

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**VARIACIÓN TEMPORAL DEL COBRE DISUELTO EN LA ZONA COSTERA
DE LA BAHIA DE TODOS SANTOS, BAJA CALIFORNIA.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

OCEANÓLOGO

PRESENTA:

MAURICIO MOISES REYES BRAVO.

Ensenada, Baja California, México. Agosto de 2014

Resumen

El objetivo de este trabajo es proveer una evaluación de la variabilidad temporal de la concentración del cobre en su fase disuelta (Cu_d) en tres sitios costeros de la Bahía de Todos Santos. Para ello se recolectaron muestras superficiales de agua de mar de enero del 2008 a diciembre del 2010, con una frecuencia semanal en la zona del corredor turístico de la UABC llamada estación IIO (influenciada por descargas antropogénicas), mensual en la Rada del puerto de Ensenada (con influencia de actividades marítimo-portuarias) y quincenal en la zona de Arbolitos, ubicada en el exterior de la bahía y reconocida por la ocurrencia del fenómeno de surgencia costera. La recolecta de muestras de agua de mar para el análisis de Cu_d se realizó con botellas de polietileno de un litro de capacidad, utilizando las técnicas de “ultra limpieza”. Simultáneamente, se midió la temperatura y se recolectó agua de mar para el análisis de la salinidad y de la biomasa fitoplanctónica. En el laboratorio, el Cu_d se preconcentró con la resina Chelex-100 y se cuantificó utilizando espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito. Tanto en la estación IIO como en la Rada portuaria, la temperatura presentó una clara variación estacional con aguas frías en invierno y aguas cálidas en verano. En contraste en la estación Arbolitos las aguas frías y salinas se presentaron en primavera y las cálidas y menos salinas durante otoño, una consecuencia de la variabilidad estacional de la surgencia costera que ocurre en el exterior de la bahía. La biomasa fitoplanctónica en las tres estaciones de muestreo siguió un patrón similar con altas concentraciones en primavera y bajas en la temporada de otoño-invierno. En general, el Cu_d no mostró una variación estacional definida en ninguna de las tres estaciones durante el periodo de estudio; sin embargo, presentó un claro gradiente espacial de concentración con los valores más altos en la Rada portuaria (8.4 ± 1.2 nM), intermedios en la estación IIO (2.8 ± 0.1 nM) y los más bajos en la estación Arbolitos (1.4 ± 0.1 nM) en el exterior de la bahía. Para explicar este patrón espacial, se plantea que los procesos responsables que controlan los niveles de cobre son específicos de cada una de las estaciones de muestreo. Los niveles de Cu_d medidos en la parte externa de la bahía son similares a los reportados para la región del Sistema de la Corriente de California y su variabilidad se atribuye a la influencia de procesos oceanográficos naturales como la surgencia costera. El incremento de la concentración de Cu_d en la estación IIO, se asoció con un aumento del tiempo de residencia del agua en el interior de la bahía y a los aportes provenientes desde los sedimentos, las descargas antropogénicas cercanas al sitio, los incendios forestales y a los aportes de escurrimientos de agua dulce durante la temporada de lluvias. El enriquecimiento de Cu_d de la Rada portuaria de Ensenada se atribuyó a la combinación del uso de las pinturas antivegetativas asociadas a las actividades marítimo-portuarias, la geometría de la Rada y el alto tiempo de residencia del agua en su interior. En conclusión, la magnitud y variabilidad temporal del Cu_d en la región de la BTS están fuertemente influenciadas por procesos naturales como la surgencia en la parte externa de la bahía, mientras que los aportes desde los sedimentos, antropogénicos, partículas provenientes de incendios forestales en la región y los flujos de agua dulce en la temporada de lluvia determinan los niveles de Cu_d en su interior.

Palabras clave: Cobre disuelto, Bahía de Todos Santos, Gradiente espacial.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
LICENCIATURA EN OCEANOLOGÍA

**VARIACIÓN TEMPORAL DEL COBRE DISUELTO EN LA ZONA COSTERA
DE LA BAHIA DE TODOS SANTOS, BAJA CALIFORNIA.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

OCEANÓLOGO

PRESENTA:

MAURICIO MOISES REYES BRAVO.

Aprobado por:



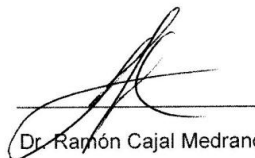
Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa

Director de tesis



M.C. Eunise Vanessa Torres Delgado

Sinodal



Dr. Ramón Cajal Medrano

Sinodal

DEDICATORIAS

Dedico con mucho amor y cariño este trabajo de investigación a mi familia que ha sido una pieza fundamental en el desarrollo de mis estudios profesionales y su culminación, pero sobre todo gracias a Dios porque me ha permitido realizarlos.

Papá y Mamá

Uzziel y María de Lourdes muchas gracias por todo el esfuerzo que han realizado para sacar adelante a la familia, darnos la mejor educación e inculcarnos los valores más importantes (amor, respeto, humildad...etc.) y esenciales dentro del núcleo familiar.

Hermanos

Sara, Jesús, Berenice, Rodrigo muchas gracias por todos los buenos momentos que pasamos juntos durante nuestro crecimiento en casa de nuestros padres, son los mejores hermanos del mundo, los quiero mucho, gracias por todo su apoyo incondicional, sus buenos deseos y bendiciones que me brindan. Ustedes me impulsan a seguir adelante y ser mejor día a día.

Cuñada y sobrinos

Carmen muchas gracias por formar parte de la familia y compartir grandes vivencias con nosotros, te has vuelto una parte fundamental de nuestra familia, pero sobre todo gracias por darle vida a dos grandes alegrías: Beto y Diego, unos pequeños gigantes que nos roban el corazón con toda su alegría y que nos enseñan a valorar más la vida con su forma de ser.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera muy especial a mi director de tesis el Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa por permitirme desde el inicio de mi carrera y del proyecto el integrarme al equipo de trabajo, que dio pie para realizar esta tesis y que gracias a su dirección, apoyo incondicional, tiempo, dedicación y conocimiento compartido se ha culminado este trabajo de investigación científica de calidad.

De manera muy especial quiero agradecer a mi sinodal la M.C. Eunise Vanessa Torres Delgado quien me ha brindado su apoyo incondicional y que me ha enseñado el desarrollo del trabajo en el laboratorio. Agradezco la gran paciencia que me ha tenido para transmitirme su conocimiento tanto laboral como intelectual, por la disponibilidad para revisar mi trabajo de tesis, por los comentarios, observaciones y recomendaciones que realizó para mejorar este trabajo y su culminación.

Agradezco de manera muy especial a mi sinodal el Dr. Ramón Cajal Medrano quien aceptó de manera grata formar parte de mi comité de tesis, por su disponibilidad de tiempo, observaciones, comentarios y recomendaciones que contribuyeron a la mejora del trabajo de tesis y la culminación de este trabajo de tesis.

Además agradezco al Dr. Víctor Froylan Camacho Ibar y al M.C. Eduardo Ortiz Campos por su apoyo en el análisis de nutrientes que fue fundamental para el desarrollo y culminación de este trabajo de tesis.

De no haber sido aceptado por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) en la Facultad de Ciencias Marinas (FCM) no fuera posible la culminación de este trabajo, por ello muchas gracias, además de brindarme una segunda casa y una segunda familia dentro de las instalaciones de la universidad y de mí querida facultad. Así mismo gracias al Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) quien me abrió sus puertas para el uso de sus laboratorios para poder realizar el trabajo de tesis y su culminación.

Gracias por el invaluable conocimiento adquirido en esta gran casa de estudios que es la UABC y en especial en la FCM y el IIO.

Gracias a CONACyT por haberme apoyado económicamente (Becario Conacyt # 16845) mediante el proyecto CB-2008-01-098471 “Biogeoquímica de elementos traza en la zona sur de la cuenca del sur de California: una región influenciada por la Corriente de California, surgencias y aportes antropogénicos”, para la culminación del trabajo de tesis.

Gracias al equipo de trabajo de laboratorio con el que inicie este largo camino pero enriquecedor tanto personal como académicamente: Sandra Laura Quijano del Olmo, Carlos Romero Bañuelos y Jacob Valdivieso Ojeda, grandes amigos que me han enseñado mucho y que sobre todo me han enseñado que la ciencia se debe de disfrutar.

De manera muy especial agradezco a cada una de mis tíos y primos por familias: López Ramírez, López Calderón, López Sánchez, López Camargo, Orozco López, Ramírez Mortera, los cuales han sido de gran bendición en mi vida.

Muchas pero muchas gracias a todos mis amigos que han estado conmigo en todo momento con los cuales he compartido grandes experiencias durante la carrera y la realización de la tesis: Carlos López Flores, Braulio Juárez Araiza, René Navarro Labastida, Jacinto León Guzmán Russell Uc Peraza, Sandra Laura Quijano del Olmo, Juritzzy Pérez García, Nathalí Cordero Quiroz, Natalia Silva Hernández, Angélica Rancho Cerón, Edna Salamanca Quevedo y Blanca Velázquez Martínez. Además de otros amigos que aunque algunos están lejos me han dado su apoyo moral e incondicional: Joseph Moyao Samano, Mariana Flores Caballero, Josefina Bermúdez Carranco, Cristina Díaz Pliego.

Finalmente agradezco a todas las personas que hicieron posible este trabajo.

Índice	Página
1. Introducción	1
2. Objetivo	6
3. Hipótesis	6
4. Área de estudio	7
4.1 Descripción general	7
4.2 Sistema de vientos	7
4.3 Circulación superficial	9
4.4 Transporte sedimentario	10
4.5 Hidrografía	10
5. Materiales y Métodos	11
5.1 Limpieza de materiales	11
5.2 Recolecta de muestras	12
5.3 Análisis y cuantificación de Cu_d	13
5.4 Determinación de la salinidad, fosfatos (PO_4) y clorofila "a"	14
5.5 Análisis de datos	15
6. Resultados	17
6.1 Variación temporal de la hidrografía (T y S) de la zona costera de la BTS	17
6.1.1 Temperatura	17
6.1.2 Salinidad	21
6.2 Variación temporal de la biomasa fitoplanctónica en la zona costera de la BTS	23
6.3 Variación temporal del Cu_d de la zona costera de la BTS	25
6.4 Serie de tiempo de la razón $Cu_d:PO_4$ de la zona costera de la BTS	29
6.5 Análisis de correlación entre el Cu_d y las variables fisicoquímicas y biológicas de la BTS	31
7. Discusiones	33
7.1 Variación temporal de las condiciones hidrográficas de la zona costera de la BTS	33
7.1.1 Temperatura	33
7.1.2 Salinidad	35
7.2 Variación estacional de la biomasa fitoplanctónica en la zona costera de la BTS	37
7.3 Variación temporal del Cu_d de la zona costera de la BTS	39
8. Conclusión	46
9. Referencias	47

LISTA DE TABLAS

Número		Página
Tabla 1.	Control de calidad para la determinación de Cu_d utilizando como material de referencia agua de mar de origen costero (CASS-5; Coastal Atlantic Standard of Seawater). Número de réplicas = 10.	14
Tabla 2.	Promedio (\pm error estándar) de temperatura, salinidad, clorofila "a", Cu_d y la razón $Cu_d:PO_4$, de invierno (I), primavera (P), verano (V) y otoño (O) de los años 2008 (08), 2009 (09) y 2010 (10) de las estaciones IIO y Arbolitos. PA representa el promedio anual y PG el promedio general de cada una de las variables. Las temporadas sin datos se identifican con línea punteada (--- --).	18
Tabla 3.	Promedio (\pm error estándar) temperatura, salinidad, clorofila "a", Cu_d y la razón $Cu_d:PO_4$ de invierno (I), primavera (P), verano (V) y otoño (O) de los años 2008 (08), 2009 (09) y 2010 (10) de la estación Rada portuaria. PA representa el promedio anual y PG el promedio general de cada una de las variables. Las temporadas sin datos se identifican con línea punteada (-----).	19
Tabla 4.	Matriz de correlación (r de Pearson) para el periodo del 2008 al 2010 de la estación IIO y Arbolitos. El contenido de las celdas presenta el coeficiente de correlación y el número de datos. Los valores de r en negritas son estadísticamente significativos ($p < 0.05$).	32
Tabla 5.	Comparación de la concentración de Cu_d (nM) registrada en este trabajo con la reportada por otros autores para el Sistema de la Corriente de California y el Golfo de California.	40

LISTA DE FIGURAS

Número		Página
Figura 1.	Área de estudio y estaciones de muestreo IIO (●), Rada (◆) y Arbolitos (▲).	8
Figura 2.	Variación temporal de la temperatura durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010 en las (a) estaciones IIO y Arbolitos y (b) Rada.	20
Figura 3.	Variación temporal de la salinidad durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010 en las (a) estaciones IIO y Arbolitos y (b) Rada.	22
Figura 4.	Variación temporal de la clorofila “a” durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010 en las (a) estaciones IIO y Arbolitos y (b) Rada.	24
Figura 5.	Variación temporal del Cu_d durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010 en las (a) estaciones IIO y Arbolitos y (b) Rada. Nótese la diferencia de escala de Cu_d en (b).	27
Figura 6.	Variación temporal del Cu_d en las estaciones IIO y Arbolitos. Cada punto es el promedio estacional (\pm error estándar) de invierno (I), primavera (P), verano (V) y otoño (O) de los años 2008 (08), 2009 (09) y 2010 (10).	28
Figura 7.	Variación temporal de la razón $Cu_d:PO_4$ durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010 en las (a) estaciones IIO y Arbolitos y (b) Rada. Nótese la diferencia de escala de $Cu_d:PO_4$ en (b).	30

1. Introducción

En los sistemas biológicos el cobre disuelto juega un papel ambivalente, como un micronutriente (necesario para un óptimo crecimiento) y/o una sustancia tóxica (que impide el crecimiento) para el fitoplancton y otros microorganismos en aguas naturales (e.g., Manahan y Smith, 1973; Marca *et al.*, 1986; Peers *et al.*, 2005; Buck *et al.*, 2007). En el medio ambiente acuático se encuentra generalmente en tres diferentes estados de oxidación Cu, Cu⁺¹, Cu⁺² de los cuales los iones libres Cu⁺² hidratados actúan como un tóxico para el fitoplancton ya que compiten por los sitios de captación de los micronutrientes esenciales como Mn⁺² y Zn⁺² (Sunda y Huntsman, 1983; 1998). A temperaturas elevadas el Cu⁺² compite por los sitios de captación de Mn⁺², inhibiendo la adecuada fijación de Mn⁺², un micronutriente necesario para el logro de un crecimiento óptimo. Por ello, en concentraciones altas de Cu⁺² (~0.10 nM) las cuales pueden existir en ambientes estuarinos, el Cu se convertirá en un elemento tóxico para los microorganismos acuáticos (Brand *et al.*, 1986; Sunda *et al.*, 1987; Buck *et al.*, 2007). También se ha demostrado que es capaz de influir directamente en la conversión de la energía fotosintética que realizan las algas, ya sea afectando directamente en el fotosistema II o en el sitio de reducción del fotosistema I (Wu y Lorenzen, 1984). Sin embargo, gran parte de la incertidumbre acerca de la relación entre la concentración total de los metales y la toxicidad para los organismos acuáticos es resultado de la

falta de conocimiento de las propiedades físico-químicas de los metales en las aguas naturales (Donato *et al.*, 1994; Tessier y Turner, 1995).

Desde el desarrollo de nuevos tipos de botellas de muestreo y técnicas analíticas, los valores confiables de la concentración de cobre disuelto (Cu_d) total en agua de mar del océano abierto se han reportado en un intervalo de 0.5 a 8 nM (e.g., Boyle *et al.*, 1977; Bruland, 1980; Danielsson, 1980; Nurnberg *et al.*, 1983; Danielsson *et al.*, 1985; Saager *et al.*, 1992; Nolting y de Baar, 1994; Abe, 2003a). Mientras que en aguas costeras se han reportado concentraciones de Cu_d en el intervalo de 1.6 a 60 nM (Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1996; Chadwick *et al.*, 2004; Buck *et al.*, 2007). Este incremento de los niveles del Cu_d en la zona costera se debe principalmente a la introducción del Cu por escurrimientos fluviales, vientos, chimeneas hidrotermales, difusión desde los sedimentos y actividades antropogénicas (Libes, 2009).

Otros estudios en ambientes estuarinos, han demostrado además que en ocasiones el Cu_d presenta un comportamiento conservativo (Abe, 2003a) y en otras una conducta no conservativa (Waeles *et al.*, 2005). Por ejemplo, Boyle *et al.* (1982) mostraron que Cu_d presentaba una conducta conservativa a lo largo de una curva de mezcla bien definida en el rango de salinidad de 0-36 en la pluma del Río Amazonas. Edmond *et al.* (1985) también mostraron el comportamiento conservativo del Cu_d en la zona de mezcla en el estuario del Río Yangtsé. En contraste, su conducta no conservativa se ha constatado en los estuarios de los ríos Sena y Loira en Francia, los cuales muestran un

enriquecimiento en Cu_d a causa de los aportes de agua dulce (Chiffoleau *et al.*, 1994; Waeles *et al.*, 2004) mientras que en los estuarios del Támesis en Inglaterra y Escalda en Países Bajos, el Cu desaparece de la fracción disuelta cuando disminuye la salinidad (Ackroyd *et al.*, 1986; Bourg 1988; Waeles *et al.*, 2005).

En los sistemas costeros del sur del Sistema de la Corriente de California (SCC), los cuales presentan una menor influencia fluvial, se generan cambios temporales de las propiedades físicas que son principalmente derivados de los procesos regionales del Océano Pacífico adyacente (Hickey, 1993; Carreón *et al.*, 2001). En particular, la Corriente de California (CC) se caracteriza por ser un flujo amplio de agua que viaja hacia el Ecuador, la cual ocurre frente a las costas del oeste de Estados Unidos y del noroeste de México y es uno de los factores que contribuyen fuertemente a los cambios estacionales en las características oceanográficas que se manifiestan en esta región (Hickey, 1993; Carreón *et al.*, 2001). Además, fenómenos como El Niño (La Niña) producen cambios en una escala interanual de las características oceanográficas del SCC, como el calentamiento (enfriamiento) en la temperatura superficial del mar (www.cpc.ncep.noaa.gov). Particularmente, a lo largo de las costas de Baja California, la transición entre El Niño y La Niña se caracteriza por pasar de un periodo cálido y de baja salinidad a otro frío y salinos (Durazo, 2009).

Estudios previos de los sistemas costeros del SCC, han mostrado que en general, la distribución de Cu en la columna de agua de las bahías es controlada por un equilibrio entre las fuentes (descargas municipales e industriales, aportes pluviales, fuentes no puntuales y escorrentías), el transporte de los sedimentos (sumideros) y el intercambio con el océano (Chadwick *et al.*, 2004). Por ejemplo, en un estudio en la bahía de San Francisco, se determinó que el Cu_d varió de 16 nM en la zona de la boca a 24 nM en la zona Norte de la Bahía (Buck *et al.*, 2007). Los autores explicaron que los valores bajos se derivan principalmente por el intercambio de aguas de la bahía con el Océano Pacífico que ocurre en la boca, mientras que los valores altos en la zona Norte, son el resultado de la influencia de las descargas de aguas residuales presentes en la zona. Otra bahía que ha sido objeto de estudio por los altos niveles de Cu en la columna de agua es la Bahía de San Diego. Chadwick *et al.* (2004) investigaron la distribución espacial y la variabilidad temporal del Cu_d en este cuerpo de agua del sur de California y reportaron concentraciones bajas ~1.0 nM en el exterior de la bahía hasta un máximo de 60 nM a mitad de la zona sur de la bahía. Las bajas concentraciones en la parte externa de la bahía reflejan el fuerte intercambio del agua del Océano Pacífico y la ausencia de fuentes cercanas, mientras que las altas concentraciones en el interior de la bahía fueron consistentes con el uso de pinturas antivegetativas (principal fuente de Cu_d a la bahía) para el recubrimiento de los cascos de los barcos y el alto número de buques de la

armada de los Estados Unidos y de embarcaciones de uso recreativo para el turismo.

El Cu en la Bahía de Todos Santos (BTS), podría ser uno de los contaminantes más comunes y problemáticos debido a su amplio uso en actividades marítimas, el mantenimiento de embarcaciones, el tránsito de barcos que navegan por estas aguas, así como de la resuspensión de los sedimentos durante las operaciones de dragado en el puerto. Además, en la zona adyacente a la bahía se encuentran la ciudad de Ensenada y El Sauzal de Rodríguez, así como el área ejidal y desarrollo turístico de Punta Banda. Estos asentamientos humanos tienen una gran influencia en el aporte continuo de aguas residuales domésticas e industriales (Peña-Manjarrez, 2001). Por lo tanto, la adición de Cu a través de estos procesos podría provocar que este elemento se acumule poco a poco en los sedimentos, organismos y el agua, contribuyendo al enriquecimiento de Cu en la franja costera y parte del mar adyacente alterando las características fisicoquímicas de la bahía. Así, este estudio contribuirá en aumentar nuestra comprensión de la variabilidad espacial y temporal del Cu_d así como la influencia de los procesos naturales y antropogénicos sobre la concentración superficial de este metal traza en la BTS, un sistema costero del sur del Sistema de la Corriente de California.

2. Objetivo

Estudiar la variabilidad temporal de la concentración superficial del Cu en su fase disuelta (Cu_d) en tres estaciones de la zona costera de la BTS. La estación IIO que representa la influencia de un sitio urbanizado de la zona norte de la bahía, la Rada portuaria con la continua presencia de la actividad marítima portuaria y la estación Arbolitos en la parte externa de la bahía que representa la zona con fuerte influencia de procesos oceanográficos naturales, como la surgencia costera.

3. Hipótesis

Dado que el cobre es un elemento cuyo ciclo biogeoquímico ha sido afectado por las actividades humanas, se espera que en el interior de la BTS (como la Rada portuaria y la estación IIO) se presenten valores altos de Cu_d asociado a las actividades antropogénicas de la ciudad de Ensenada. En contraste, en la estación costera de Arbolitos, se espera que las concentraciones de Cu_d sean menores en relación a la parte interna de la BTS, debido a la predominancia de las condiciones de surgencia y a que la influencia asociada a la alteración antropogénica es reducida en comparación con el interior de la bahía.

4. Área de estudio

4.1 Descripción general

La BTS (Fig. 1) se localiza en la costa oeste de Baja California aproximadamente a 100 km al sur de la frontera de México con Estados Unidos (latitud 31.7° N a 31.9° N; longitud 116.8° W a 116.6° W; Mateos-Farfán, 2010). Tiene una superficie de más de 240 km² y limita al norte con Punta San Miguel, al sur con Punta Banda, al oeste con las Islas de Todos Santos y al este con la ciudad de Ensenada. Intercambia agua con el Océano Pacífico a través de dos entradas bien diferenciadas; la entrada al noroeste de 12 km de longitud con algunos bajos y profundidades menores de 50 m y la entrada al suroeste, con 6 km de longitud y profundidades hasta de 400 m en el cañón de Todos Santos. El 75% del área presenta una profundidad menor a 50 m y el 25% restante forma parte del angosto cañón submarino de Todos Santos (Sánchez *et al.*, 2009).

4.2 Sistema de vientos.

El sistema de vientos en la BTS está influenciado por las características fisiográficas de la región. Los mecanismos que los generan en el ámbito local, no son homogéneos en toda la bahía. Los vientos en la región de las Islas Todos Santos tienen una componente dominante del noroeste. Durante el invierno soplan con la máxima intensidad de 7.5 m s⁻¹ y en el inicio de primavera se relajan hasta un mínimo de 3.3 m s⁻¹. En verano soplan con una

intensidad promedio de 5.4 m s^{-1} lo que corresponde al doble de la intensidad que en el interior de la bahía (Pavía y Reyes, 1983). Además, durante otoño e invierno el sistema de brisas en la bahía es interrumpido por vientos cálidos y secos provenientes del sureste, conocidos en la región como vientos “Santana”, los cuales tienen una velocidad hasta de 12 m s^{-1} (Gil *et al.*, 1991). Estos vientos cálidos arrastran material terrígeno y lo depositan en la bahía.

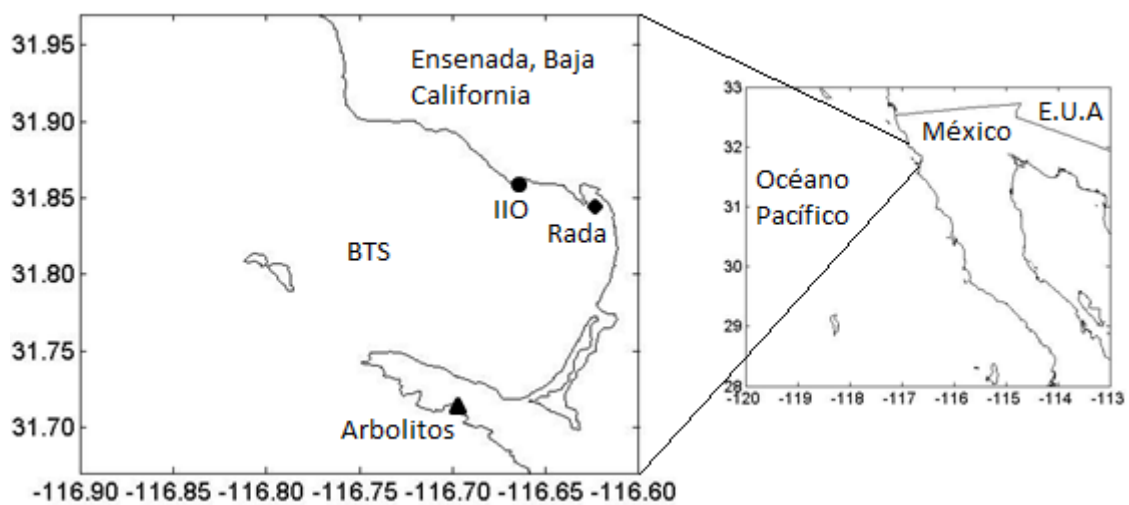


Figura 1.- Área de estudio y estaciones de muestreo IIO (●), Rada (◆) y Arbolitos (▲).

4.3 Circulación superficial.

La circulación en el interior de la bahía consiste principalmente de remolinos ciclónicos y/o anticiclónicos que evolucionan en escalas temporales de alrededor de 2 días, los cuales son modulados por la variabilidad de las corrientes en el exterior de la BTS (Mateos *et al.*, 2009). La formación de remolinos se encuentra asociado principalmente a la geometría de la bahía (forma de “U”, salientes y batimetría), lo cual favorece la recirculación del agua en el interior de la bahía (Mateos-Farfán, 2010). La circulación superficial de la bahía, determinada a partir de la distribución horizontal de temperatura y salinidad, presenta corrientes paralelas a la costa fuertemente controladas por el esfuerzo y dirección del viento (Argote *et al.*, 1991). Estudios previos han reportado velocidades de 0.1 a 7.3 cm s^{-1} en el área de las Islas de Todos Santos y de 0.04 a 5.7 cm s^{-1} en el área de Punta Banda (Argote *et al.*, 1991). También se ha reportado que la velocidad promedio de estas corrientes son de 15 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ para los meses de marzo a agosto y de 5 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ para los meses de septiembre a enero (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988). Un modelo numérico de la circulación de la bahía (Mateos-Farfán, 2010) mostró que cuando el transporte por las bocas es débil, el esfuerzo del viento es responsable de la formación e intensificación de la corriente frente a Punta Morro dando origen a un remolino anticiclónico, aproximadamente de 10 km de diámetro localizado al norte de la BTS. La magnitud de la velocidad de las corrientes en el interior de la bahía es menor ($\sim 8 \text{ cm s}^{-1}$) que las del exterior ($\sim 10 \text{ cm s}^{-1}$) de ella. La circulación

anticiclónica tiene un intenso flujo costero que se separa de la costa alrededor de la parte central de la bahía. Una parte del flujo anticiclónico es incorporado al flujo proveniente del mar adyacente, provocando la formación de un remolino ciclónico que es mucho más débil (2 cm s^{-1}) y pequeño ($\sim 5 \text{ km}$) que el remolino anticiclónico, el cual se localiza en la parte sur de la bahía frente al estuario de Punta Banda. Ambos remolinos abarcan casi toda la columna de agua (Mateos *et al.*, 2009; Mateos-Farfán, 2010).

4.4 Transporte sedimentario.

El patrón residual de transporte sedimentario observado en la bahía indica una convergencia del material hacia la pendiente noroeste del cañón submarino. Sin embargo, la inferencia de esta tendencia no es lo suficientemente clara para la región central. Las trayectorias de transporte muestran una entrada de material por el cañón submarino de Todos Santos, dispersándose en todo el interior de la bahía hacia San Miguel en la zona norte, y hacia la playa municipal, El Ciprés, y el Estero de Punta Banda en la zona sur. Una trayectoria de aparente salida de material sedimentario se presenta paralela a la zona de Punta Banda (Barrera-Gaona, 1998).

4.5 Hidrografía

De acuerdo a Mancilla y Martínez (1991), la salinidad máxima es de 33.80 en el verano y mínima de 33.40 en invierno en el interior de la BTS. En la parte oriental de las islas se ha reportado una temperatura mínima de $11.1 \text{ }^\circ\text{C}$ en

junio y máxima de 17.4 °C en noviembre (Peña-Manjarrez, 2001). La fluctuación de estas variables con la época del año indica que la bahía está influenciada por diferentes cuerpos de agua, con lo cual se generan condiciones hidrológicas distintas, con un posible reflejo en los primeros eslabones de la trama trófica. Por su ubicación latitudinal el balance de calor en la bahía presenta una ganancia neta en los meses de verano y una pérdida neta en los meses de invierno (Cruz-Colín, 1997).

5. Materiales y métodos.

5.1 Limpieza de materiales.

El lavado de todo el material se realizó utilizando los métodos de “ultra-limpieza” (Bruland *et al.*, 1979; Kremling *et al.*, 1983, Delgadillo-Hinojosa, 2000). El ciclo de “ultra limpieza” inició en jabón Micro-90 al 3%, posteriormente se utilizó ácido clorhídrico (HCl) al 10% por un periodo de cinco días, para que se llevara a cabo la remoción de partículas y sales que se encontraran en la superficie del material. Los filtros de policarbonato de 0.40 μm se lavaron exclusivamente con HCl grado suprapur al 25%, durante un periodo de tres días. Los enjuagues se realizaron con agua desionizada ultrapura ($>18 \text{ M}\Omega \text{ cm}^{-1}$) y se secó en una campana de flujo laminar clase 100, la cual genera una atmósfera positiva que evita la contaminación del material. Finalmente, el material se almacenó en bolsas de plástico con sello hermético hasta su utilización.

5.2 Recolecta de muestras.

El muestreo en la región de la BTS se realizó durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010. Las muestras superficiales de agua de mar se recolectaron en tres estaciones en la BTS (Fig. 1) con una frecuencia de recolecta de muestras distinta en cada una de ellas: semanalmente en la zona del corredor turístico de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) llamada estación IIO e influenciada por descargas antropogénicas de la misma universidad; quincenalmente en la zona denominada arbolitos, libre de asentamientos humanos y zona importante de surgencia costera; y mensualmente en la Rada portuaria, con gran influencia antropogénica debido a las actividades marítimo-portuarias.

La toma de muestra para el análisis de Cu_d se realizó utilizando las técnicas de "ultra limpieza". Para ello se utilizó una asa extensible con cobertura plástica y adaptada con un contenedor para una botella de plástico limpia. La recolecta de la muestra de agua se realizó a aproximadamente 30 cm por debajo de la superficie del mar utilizando botellas de polietileno de 1 L de capacidad, manipuladas con guantes de polietileno y almacenadas en bolsas de plástico con sello hermético hasta su análisis en el laboratorio. Al mismo tiempo, se midió la temperatura con un termómetro de cubeta (precisión de $0.5^{\circ}C$) y se recolectó agua de mar en botellas de polietileno para el análisis de la salinidad (250 mL), fosfatos (30 mL) y clorofila "a" (1000 mL).

5.3 Análisis y cuantificación de Cu_d.

En el laboratorio, las muestras de agua de mar para el análisis de Cu_d fueron previamente filtradas a través de filtros de polycarbonato de 0.40 μm (previamente lavados con ácido, secados y pesados) con la finalidad de separar la fase disuelta de la particulada. La fase disuelta fue recuperada en una botella de polietileno de baja densidad y acidificada con 1 mL de ácido nítrico (HNO₃) grado Ultrex que permite que los metales traza, como el Cu, se mantengan en solución.

Posteriormente se tomó una alícuota de 250 mL de agua de mar filtrada, se ajustó a un pH entre 6.0-6.5 con una solución de hidróxido de amonio (NH₄OH) grado Ultrex y se usó acetato de amonio (CH₃COONH₄) 1M como amortiguador para estabilizar el pH de la muestra. Se construyó un sistema de preconcentración de Cu_d hecho completamente de teflón que incluyó una columna de polietileno empacada con 3 mL de resina de intercambio iónico Chelex-100. Después, la muestra de agua de mar se pasó por la columna impulsada por una bomba peristáltica calibrada con un flujo de 0.8-1.0 mL/min. Finalmente, la resina se lavó con 4 mL de CH₃COONH₄ 1M para eliminar las sales y se eluyó con 5 mL de HNO₃ 2M (Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2001; 2006).

La cuantificación del Cu_d se llevó a cabo con un equipo de absorción atómica con horno de grafito Agilent 280Z AA. Se utilizó el método de adición de estándares y para eliminar cualquier interferencia de la matriz de agua de

mar se utilizó como modificador el fosfato de amonio monobásico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) al 1%. La concentración del Cu_d se calculó mediante el uso de la ecuación de la recta que se obtuvo al realizar la regresión lineal entre la concentración de Cu añadido y la absorbancia de la muestra de la curva de adición de estándares. Para el control de calidad del procedimiento se analizaron estándares certificados de agua de mar (CASS-5; Tabla 1) lo cual permitió estimar la precisión y exactitud del procedimiento de análisis de Cu_d en nuestro laboratorio.

Tabla 1. Control de calidad para la determinación de Cu_d utilizando como material de referencia agua de mar de origen costero (CASS-5; Coastal Atlantic Standard of Seawater). Número de réplicas = 10.

Valor de Cu_d certificado (nM)	Valor Cu_d medido (nM)	Porcentaje de recuperación (%)	Límite de detección (nM)
5.98 ± 0.44	6.27 ± 0.57	105 ± 10	0.0129 ± 0.0051

5.4 Determinación de la salinidad, fosfatos (PO_4) y clorofila “a”.

La salinidad se cuantificó a partir de la medición de la conductividad usando un Salinómetro 3400B de la marca Guildline, el cual fue calibrado con el estándar de referencia de agua de mar IAPSO (International Association for the Physical Sciences of the Oceans). Las muestras para el análisis de PO_4 y clorofila “a” se filtraron a través de filtros de fibra de vidrio GF/F Whatman de 24

mm de diámetro, con un poro nominal de 0.7 μm . La cuantificación del PO_4 se realizó con un Autoanalizador de Flujo Segmentado modelo Skalar San Plus siguiendo el método colorimétrico de Gordon *et al.*, 1993. La extracción de la clorofila "a" se realizó con acetona al 90%, en oscuridad durante 24 horas, de acuerdo con la recomendación de Hayward y Venrick (1998). La cuantificación se realizó con un espectrofotómetro UV-Visible Cary 50 marca Varian. Los cálculos de concentración de clorofila "a" ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) se realizaron de acuerdo a Parsons *et al.* (1984).

5.5 Análisis de datos

Se realizó un análisis estadístico con el programa Sigma Plot 12.0. de los datos de temperatura, salinidad, clorofila "a" y Cu_d que se obtuvieron en este trabajo. El tratamiento estadístico para cada variable fue de acuerdo al procedimiento establecido para el uso de pruebas paramétricas o no paramétricas; aplicando previamente las pruebas de normalidad y homocedasticidad. Finalmente, de acuerdo al procedimiento y la naturaleza de los datos se aplicó estadística no paramétrica (Kruskal Wallis) para determinar si existían diferencias de las variables físicas, biológicas y químicas en cada una de las zonas de muestreo y entre las temporadas de cada uno de los años muestreados.

Además se realizó un análisis metal:nutriente ($\text{Cu}_d:\text{PO}_4$) para estudiar la covariación biogeoquímica de estos constituyentes en la región de la BTS. Finalmente, se realizó un análisis de correlación Punto Momento de Pearson (r) entre las variables temperatura, salinidad, clorofila "a", Cu_d y $\text{Cu}_d:\text{PO}_4$ para cada estación de muestreo (IIO, Rada y Arbolitos) para determinar el grado de asociación entre estas variables en la región de la BTS.

6. Resultados

6.1 Variación temporal de la hidrografía (T y S) de la zona costera de la BTS.

6.1.1 Temperatura.

Durante el periodo del 2008 al 2010, la temperatura superficial en las estaciones IIO y Rada presentó una clara variación estacional con aguas frías en invierno y cálidas en verano (Fig. 2a, b). Durante el invierno del 2008 en particular, se registraron en ambas estaciones de muestreo los valores de temperatura promedio más bajos, registrados en este estudio ($T_{IIO} = 14.5 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $T_{Rada} = 14.7 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$; Tabla 2, 3). Posteriormente, la temperatura del agua tendió a incrementarse hacia el verano en las dos estaciones el agua y durante el 2009 se registraron los valores de temperatura promedio más altos de este trabajo ($T_{IIO} = 22.9 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$; Tabla 2). En contraste, la temperatura en la estación Arbolitos no presentó la misma variación temporal que las zonas internas a la bahía (Fig. 2a), sino que mostró una tendencia de aumento de primavera a otoño. Las aguas superficiales más frías en Arbolitos se registraron en la primavera del 2008 ($12.9 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$; Tabla 2 y Fig. 2a), mientras que las más cálidas se presentaron en otoño de ese mismo año ($17.2 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$; Tabla 2). Esta variación temporal con aguas frías en primavera en la zona de arbolitos se debió al fenómeno físico conocido como surgencia costera, característico del litoral oeste de la península de Baja California.

Tabla 2.- Promedio (\pm error estándar) de temperatura, salinidad, clorofila “a”, Cu_d y la razón $\text{Cu}_d:\text{PO}_4$, de invierno (I), primavera (P), verano (V) y otoño (O) de los años 2008 (08), 2009 (09) y 2010 (10) de las estaciones IIO y Arbolitos. PA representa el promedio anual y PG el promedio general de cada una de las variables. Las temporadas sin datos se identifican con línea punteada (-----).

IIO					
Temporada	Temperatura (°C)	Salinidad	Clorofila “a” ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Cu_d (nM)	$\text{Cu}_d:\text{PO}_4$ (nM/ μM)
I08	14.5 \pm 0.1	33.50 \pm 0.05	2.4 \pm 0.2	-----	-----
P08	17.0 \pm 0.2	33.92 \pm 0.04	3.3 \pm 0.3	-----	-----
V08	21.9 \pm 0.2	33.78 \pm 0.07	2.0 \pm 0.1	-----	-----
O08	19.3 \pm 0.2	33.40 \pm 0.08	-----	-----	-----
PA	18.2 \pm 0.2	33.40 \pm 0.09	2.7 \pm 0.1	-----	-----
I09					
I09	16.7 \pm 0.1	33.44 \pm 0.03	-----	-----	-----
P09	19.7 \pm 0.2	33.76 \pm 0.04	1.9 \pm 0.3	1.7 \pm 0.1	1.6 \pm 0.1
V09	22.9 \pm 0.2	33.62 \pm 0.04	2.2 \pm 0.2	2.8 \pm 0.4	3.5 \pm 0.5
O09	17.9 \pm 0.5	33.42 \pm 0.02	1.0 \pm 0.2	2.9 \pm 0.3	3.8 \pm 0.4
PA	19.6 \pm 0.2	33.60 \pm 0.03	1.8 \pm 0.1	2.6 \pm 0.2	3.4 \pm 0.4
I10					
I10	16.7 \pm 0.1	33.14 \pm 0.28	1.1 \pm 0.8	4.5 \pm 0.5	6.5 \pm 0.7
P10	17.9 \pm 0.3	-----	2.7 \pm 1.1	2.9 \pm 0.1	3.7 \pm 0.3
V10	19.1 \pm 0.6	33.52 \pm 0.04	2.1 \pm 0.1	2.7 \pm 0.2	3.8 \pm 0.5
O10	17.9 \pm 0.6	33.37 \pm 0.02	1.4 \pm 0.2	2.5 \pm 0.3	-----
PA	17.4 \pm 0.2	33.38 \pm 0.04	1.7 \pm 0.4	3.0 \pm 0.2	4.3 \pm 0.4
PG	18.7 \pm 0.1	33.55 \pm 0.02	2.2 \pm 0.1	2.8 \pm 0.1	3.7 \pm 0.3
Arbolitos					
I08	12.8 \pm 0.4	33.63 \pm 0.03	2.5 \pm 0.3	0.9 \pm 0.1	0.9 \pm 0.1
P08	12.9 \pm 0.7	33.92 \pm 0.03	3.0 \pm 0.5	1.0 \pm 0.2	1.1 \pm 0.3
V08	15.5 \pm 1.0	33.62 \pm 0.11	1.4 \pm 0.1	1.0 \pm 0.1	1.1 \pm 0.2
O08	17.2 \pm 0.5	33.50 \pm 0.03	1.3 \pm 0.2	1.6 \pm 0.4	2.0 \pm 0.6
PA	14.7 \pm 0.5	33.70 \pm 0.05	2.0 \pm 0.2	1.1 \pm 0.1	1.3 \pm 0.2
I09					
I09	15.3 \pm 0.8	33.58 \pm 0.04	1.4 \pm 0.3	1.5 \pm 0.4	1.6 \pm 0.5
P09	15.0 \pm 0.5	33.74 \pm 0.04	2.5 \pm 0.8	1.1 \pm 0.2	0.7 \pm 0.1
V09	-----	-----	-----	-----	-----
O09	15.7 \pm 0.3	33.46 \pm 0.09	0.4 \pm 0.3	1.5 \pm 0.2	2.4 \pm 0.4
PA	15.3 \pm 0.3	33.61 \pm 0.04	1.7 \pm 0.4	1.4 \pm 0.1	1.4 \pm 0.3
I10					
I10	15.3 \pm 0.3	33.47 \pm 0.00	0.8 \pm 0.6	1.6 \pm 0.2	1.9 \pm 0.4
P10	14.7 \pm 0.4	33.63 \pm 0.02	3.1 \pm 0.3	1.7 \pm 0.4	1.8 \pm 0.2
V10	14.8 \pm 0.8	33.55 \pm 0.03	2.7 \pm 0.3	2.2 \pm 0.6	2.0 \pm 0.6
O10	15.7 \pm 0.7	33.33 \pm 0.03	2.0 \pm 0.4	-----	-----
PA	15.1 \pm 0.3	33.50 \pm 0.03	2.3 \pm 0.3	1.8 \pm 0.2	1.9 \pm 0.2
PG	15.0 \pm 0.2	33.59 \pm 0.02	2.0 \pm 0.2	1.4 \pm 0.1	1.5 \pm 0.1

Tabla 3.- Promedio (\pm error estándar) temperatura, salinidad, clorofila "a", Cu_d y la razón $Cu_d:PO_4$ de invierno (I), primavera (P), verano (V) y otoño (O) de los años 2008 (08), 2009 (09) y 2010 (10) de la estación Rada portuaria. PA representa el promedio anual y PG el promedio general de cada una de las variables. Las temporadas sin datos se identifican con línea punteada (-----).

Rada					
Temporada	Temperatura (°C)	Salinidad	Clorofila "a" ($mg \cdot m^{-3}$)	Cu_d (nM)	$Cu_d:PO_4$ (nM/ μ M)
I08	14.7 \pm 1.0	33.61 \pm 0.17	3.3 \pm 1.4	8.2 \pm 2.6	9.3 \pm 3.1
P08	19.5 \pm 1.0	33.94 \pm 0.08	-----	-----	-----
V08	21.0 \pm 0.0	-----	6.6 \pm 0.4	11.9 \pm 2.3	23.3 \pm 4.8
O08	-----	-----	-----	-----	-----
PA	17.6 \pm 1.0	33.65 \pm 0.13	4.6 \pm 1.1	8.8 \pm 1.7	14.5 \pm 3.4
I09	15.5 \pm 0.5	33.33 \pm 0.12	-----	-----	-----
P09	17.5 \pm 0.3	33.65 \pm 0.02	-----	4.7 \pm 1.3	-----
V09	-----	-----	-----	-----	-----
O09	16.9 \pm 1.3	-----	0.3 \pm 0.0	13.6 \pm 5.5	-----
PA	16.9 \pm 0.6	33.54 \pm 0.05	0.3 \pm 0.0	9.1 \pm 3.2	-----
I10	16.4 \pm 0.4	-----	0.3 \pm 0.1	9.3 \pm 0.8	-----
P10	17.7 \pm 0.9	-----	6.0 \pm 2.8	3.3 \pm 0.8	-----
V10	20.8 \pm 0.5	-----	6.6 \pm 1.6	-----	-----
O10	16.9 \pm 1.1	33.35 \pm 0.26	2.6 \pm 1.9	-----	-----
PA	18.0 \pm 0.6	33.46 \pm 0.06	3.9 \pm 1.0	7.2 \pm 1.4	-----
PG	17.6 \pm 0.4	33.55 \pm 0.05	3.8 \pm 0.7	8.4 \pm 1.2	14.5 \pm 3.4

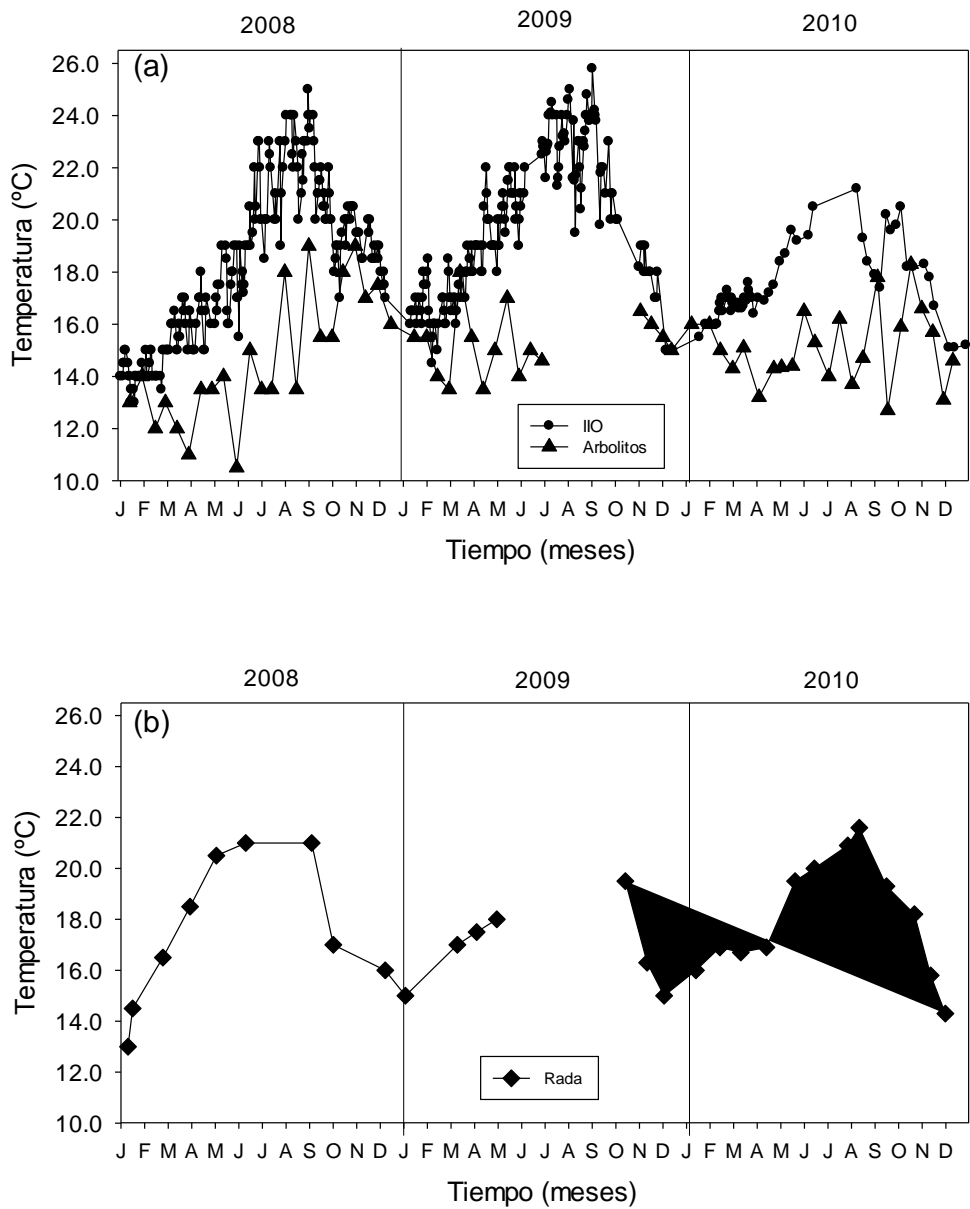


Figura 2.- Variación temporal de la temperatura durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010 en las (a) estaciones IIO y Arbolitos y (b) Rada.

6.1.2 Salinidad

Durante todo el periodo de estudio, la salinidad superficial en la estación IIO y Arbolitos presentó una variación estacional muy bien definida, con aguas de salinidad alta en primavera y de salinidad baja durante el otoño (Fig. 3a). Durante la primavera del 2008, se registró las salinidades promedio máximas en la estación IIO ($S_{IIO} = 33.92 \pm 0.04$) y Arbolitos ($S_{Arb} = 33.92 \pm 0.03$; Tabla 2). En contraste, la salinidad decreció hacia el otoño en ambas estaciones de muestreo y durante el otoño del 2010 se presentaron las salinidades promedio más bajas de este estudio ($S_{IIO} = 33.37 \pm 0.02$; $S_{Arb} = 33.33 \pm 0.03$; Tabla 2). En particular, durante otoño del 2008 e invierno del 2010, en la estación IIO se registraron valores de 32.89 y 32.86 respectivamente, lo cual reflejó el efecto de las lluvias sobre el agua de mar de esta zona de la bahía (Fig. 3a). A pesar de ser el sitio costero más interno de la bahía, en la Rada también se observó que durante primavera del 2008 se presentaron los valores más altos de salinidad (33.94 ± 0.08) y los más bajos en el otoño de ese mismo año (Fig. 3b).

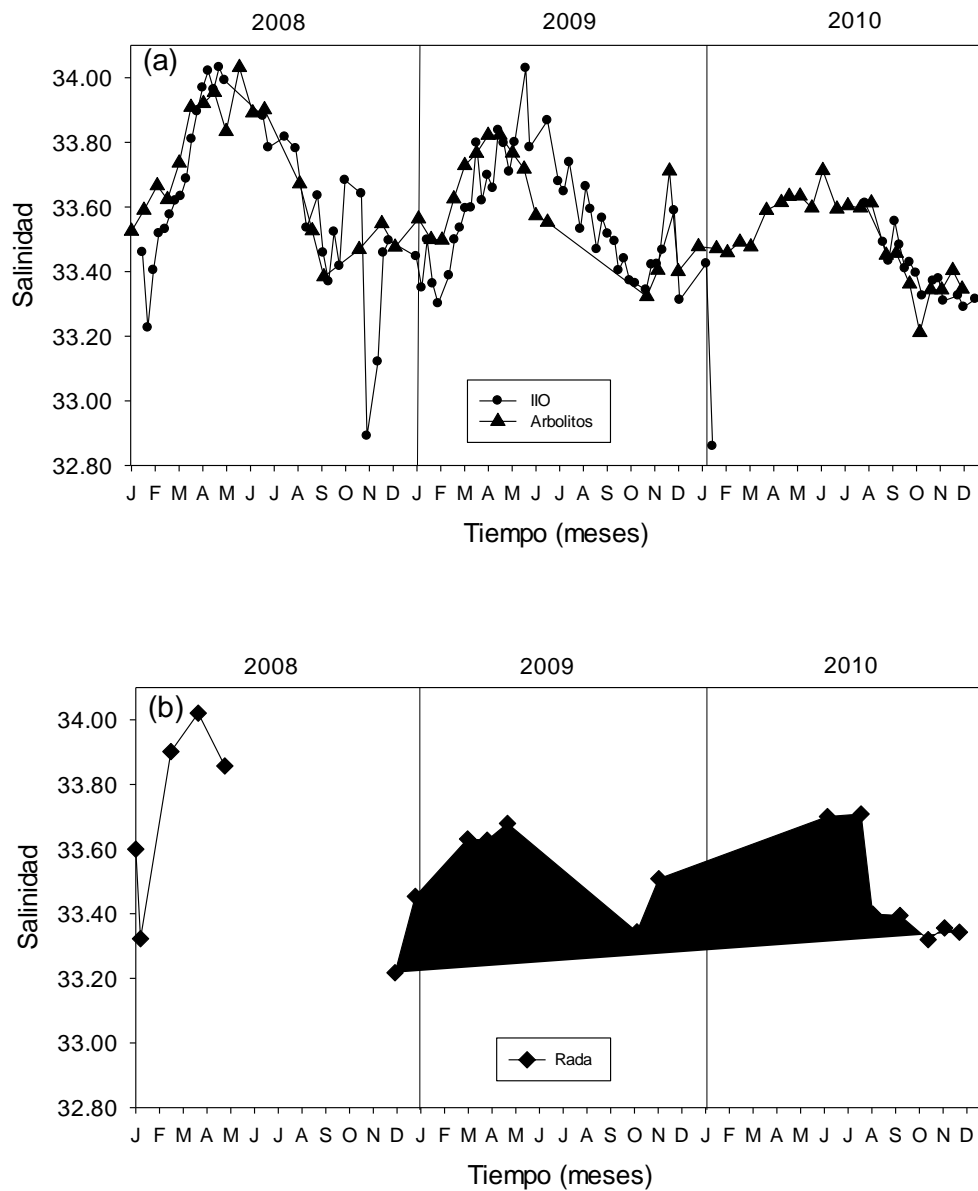


Figura 3.- Variación temporal de la salinidad durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010 en las (a) estaciones IIO y Arbolitos y (b) Rada.

6.2 Variación temporal de la biomasa fitoplanctónica en la zona costera de la BTS.

Durante el periodo del 2008 al 2010, la concentración de clorofila “a” (CLA) en las estaciones IIO, Arbolitos y Rada presentó una variación temporal con concentraciones máximas en primavera y mínimas en la temporada de otoño-invierno (Fig. 4a, b). Así, en la estación IIO se registró la concentración promedio máxima de clorofila “a” durante la primavera del 2008 ($CLA_{IIO} = 3.3 \pm 0.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) mientras que la máxima en la estación Arbolitos se detectó en la primavera del 2010 ($CLA_{Arb} = 3.1 \pm 0.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, Tabla 2). En contraste, durante el otoño del 2009 se registraron las concentraciones promedio mínimas de clorofila “a” en ambas estaciones ($CLA_{IIO} = 1.0 \pm 0.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; $CLA_{Arb} = 0.4 \pm 0.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; Tabla 2), los cuales fueron los valores más bajos registrados en este estudio. En la estación Rada se presentaron concentraciones máximas de clorofila “a” en las primaveras del 2008 y 2010 ($CLA_{Rada} > 6.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) y de manera similar a lo ocurrido en toda la zona de estudio, las mínimas se registraron en la temporada de otoño-invierno durante la transición del 2009 al 2010 ($CLA_{Rada} < 1.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; Fig 4b; Tabla 3).

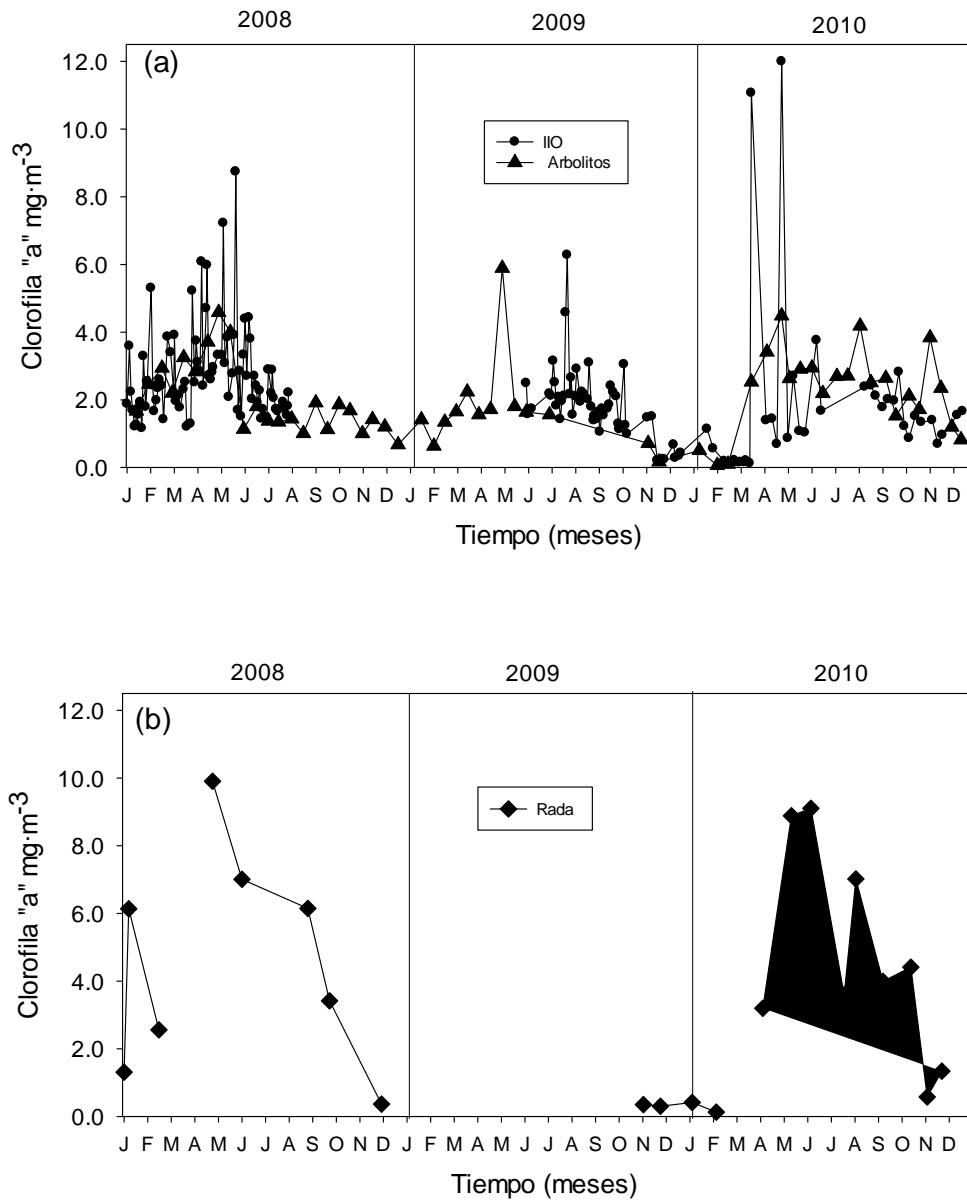


Figura 4.- Variación temporal de la clorofila "a" durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010 en las (a) estaciones IIO y Arbolitos y (b) Rada.

6.3 Variación temporal del Cu_d de la zona costera de la BTS.

La serie de tiempo de la concentración del Cu_d en las estaciones IIO, Arbolitos y Rada se presentan en las figuras 5a y b. La figura muestra que cada serie presentó una variación temporal única ya que las concentraciones máximas y mínimas se registraron en diferentes temporadas en cada una de las estaciones de muestreo. La figura 6 muestra además el promedio estacional (\pm error estándar) para una mejor comprensión de la variación temporal y espacial del Cu_d en la región de la BTS. Aquí se nota que en la estación IIO la concentración promedio máxima de Cu_d se registró en invierno de 2010 (4.5 ± 0.5 nM), mientras que la concentración promedio máxima de Cu_d en la estación Arbolitos se presentó en verano de 2010 (2.2 ± 0.6 nM; Fig. 6). En cambio en la estación IIO la concentración promedio mínima de Cu_d se presentó en primavera de 2009 (1.7 ± 0.1 nM), mientras que en la estación Arbolitos, la mínima se presentó en invierno de 2008 (0.9 ± 0.1 nM; Fig. 6). Además, claramente los valores más altos de Cu_d reportados en este estudio se registraron de manera sistemática en la estación Rada, con una concentración promedio máxima de 11.9 ± 2.3 nM medida en el verano de 2008 y una mínima de 3.3 ± 0.8 nM evidenciada en la primavera de 2010 (Tabla 3).

A diferencia de la variación temporal, el análisis estadístico básico del conjunto total de los datos de este trabajo indican que el Cu_d presentó un gradiente espacial de concentración claramente definido, con los valores más

altos en la Rada portuaria (8.4 ± 1.2 nM; n=18), intermedios en la estación IIO (2.8 ± 0.1 nM; n= 71) y los más bajos en la estación Arbolitos (1.4 ± 0.1 nM; n= 54) en el exterior de la bahía.

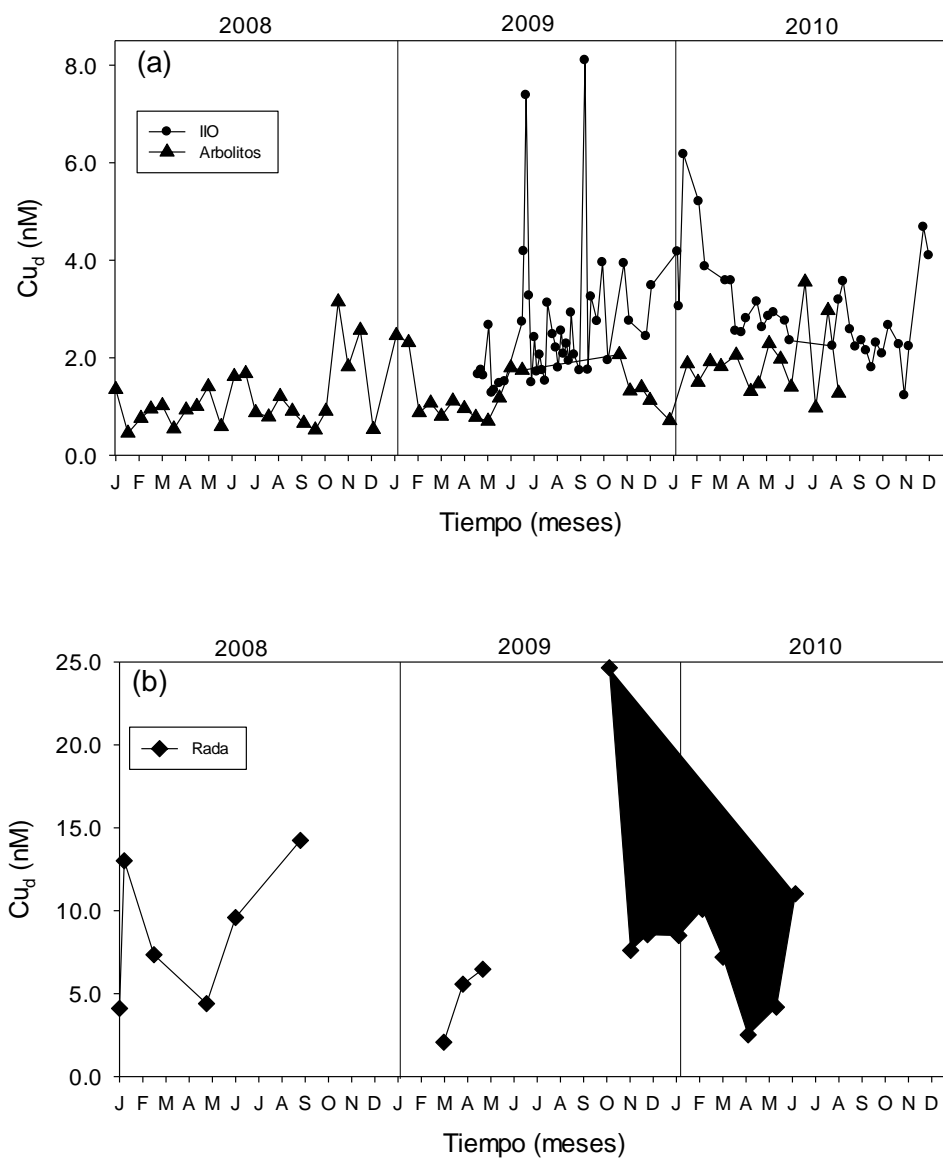


Figura 5.- Variación temporal del Cu_d durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010 en las (a) estaciones IIO y Arbolitos y (b) Rada. Nótese la diferencia de escala de Cu_d en (b).

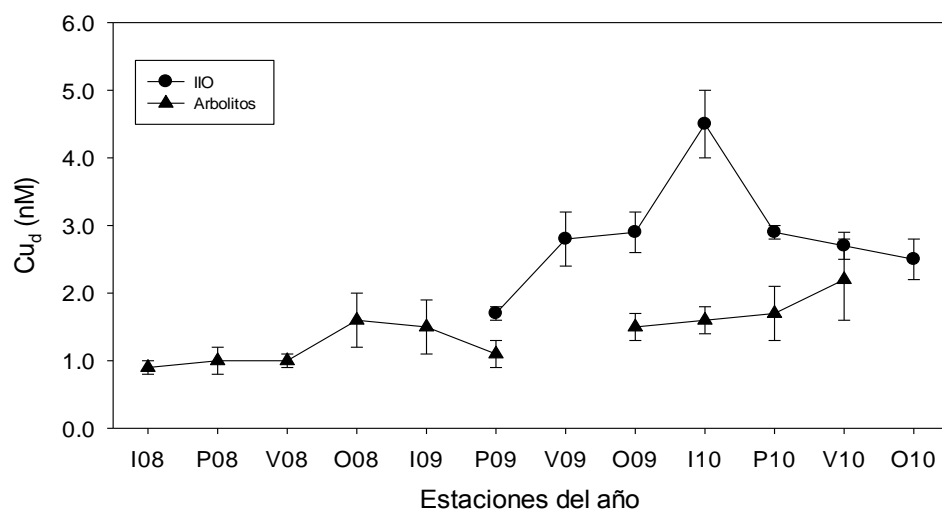


Figura 6.- Variación temporal del Cu_d en las estaciones IIO y Arbolitos. Cada punto es el promedio estacional (\pm error estándar) de invierno (I), primavera (P), verano (V) y otoño (O) de los años 2008 (08), 2009 (09) y 2010 (10).

6.4 Serie de tiempo de la razón $\text{Cu}_d:\text{PO}_4$ de la zona costera de la BTS.

La serie de tiempo de la razón $\text{Cu}_d:\text{PO}_4$ de la BTS no presentó una variación temporal definida, con valores muy fluctuantes durante todo el periodo de estudio (Fig. 7a, b). En el caso de la estación IIO, los valores máximos de la razón $\text{Cu}_d:\text{PO}_4$ se presentaron en el invierno de 2010 ($6.5 \pm 0.7 \text{ nM}/\mu\text{M}$), mientras que en la estación Arbolitos se registraron durante otoño de 2009 ($2.4 \pm 0.4 \text{ nM}/\mu\text{M}$). Por el contrario, los valores más bajos de la razón ($\text{Cu}_d:\text{PO}_{4\text{IIO}} = 1.6 \pm 0.1 \text{ nM}/\mu\text{M}$; $\text{Cu}_d:\text{PO}_{4\text{Arb}} = 0.7 \pm 0.1 \text{ nM}/\mu\text{M}$; Tabla 2) se presentaron en ambas estaciones de muestreo durante primavera del 2009. En general, los valores más altos de la razón $\text{Cu}_d:\text{PO}_4$ de este estudio se estimaron para la estación de la Rada portuaria. Aquí, la razón $\text{Cu}_d:\text{PO}_4$ más baja se presentó en el invierno de 2008 ($9.3 \pm 3.1 \text{ nM}/\mu\text{M}$) y la máxima en verano de ese mismo año ($23.3 \pm 4.8 \text{ nM}/\mu\text{M}$; Tabla 3).

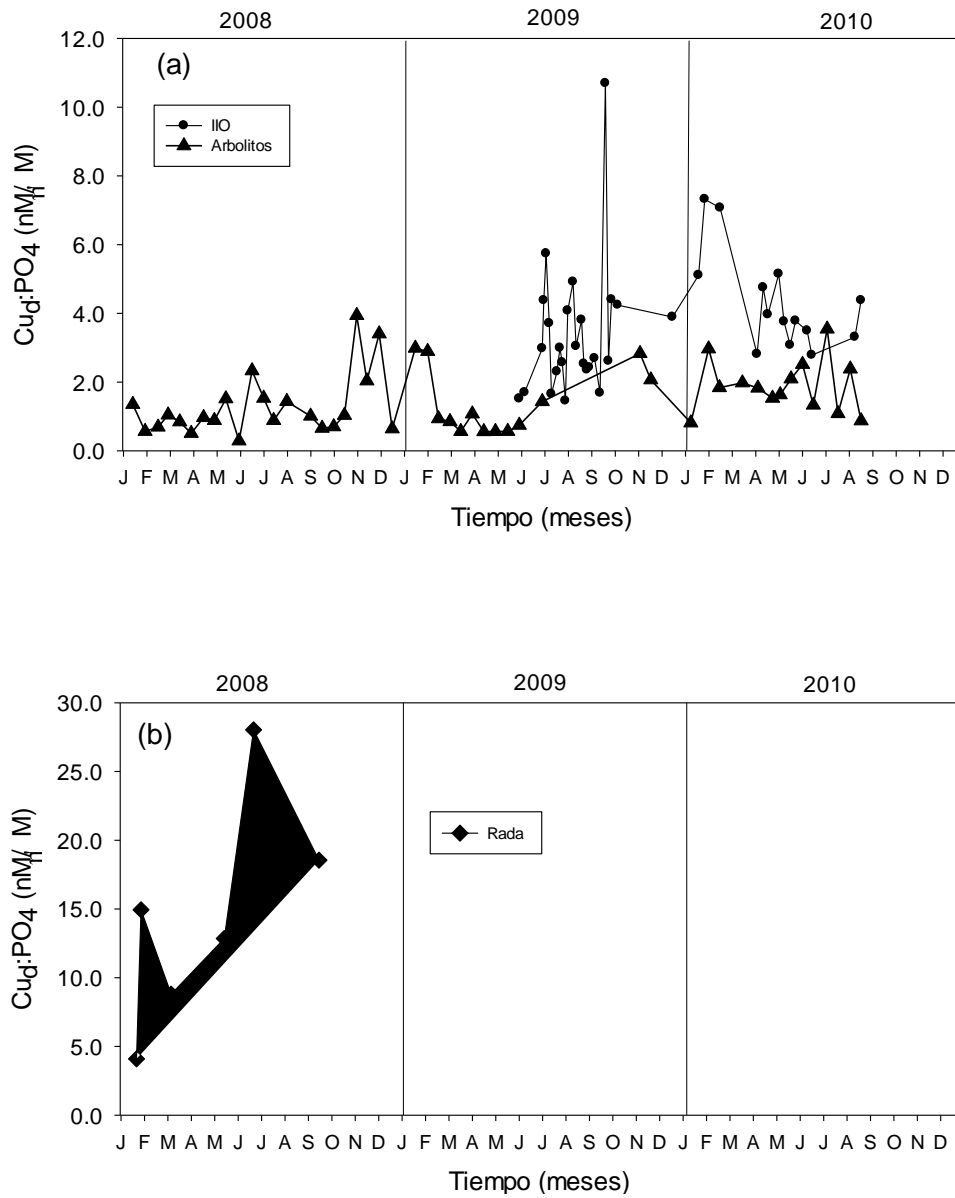


Figura 7.- Variación temporal de la razón $Cu_d:PO_4$ durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010 en las (a) estaciones IIO y Arbolitos y (b) Rada. Nótese la diferencia de escala de $Cu_d:PO_4$ en (b).

6.5 Análisis de correlación entre Cu_d y las variables fisicoquímicas y biológicas de la BTS.

En la estación IIO, el Cu_d se correlacionó inversamente con la salinidad ($r = -0.84$, $p < 0.05$) y la temperatura ($r = -0.33$, $p < 0.05$) mientras que en la estación Arbolitos el Cu_d se correlacionó negativamente solamente con la salinidad ($r = -0.29$, $p < 0.05$). De igual forma que el Cu_d , la razón $Cu_d:PO_4$ en la estación IIO se correlacionó inversamente con la salinidad ($r = -0.88$, $p < 0.05$) y la temperatura ($r = -0.40$, $p < 0.05$); sin embargo, en la estación Arbolitos la razón $Cu_d:PO_4$ se relacionó positivamente ($r = 0.36$, $p < 0.05$) con la temperatura.

Tabla 4.- Matriz de correlación (r de Pearson) para el periodo del 2008 al 2010 de la estación IIO y Arbolitos. El contenido de las celdas presenta el coeficiente de correlación y el número de datos. Los valores de r en negritas son estadísticamente significativos ($p < 0.05$).

Variables	IIO			
	Salinidad	Clorofila "a"	Cu _d	Cu _d :PO ₄
Temperatura	0.23 71	-0.15 134	-0.32 39	-0.40 39
Salinidad		0.64 40	-0.84 8	-0.88 8
Clorofila "a"			-0.13 39	-0.17 39
Cu _d				0.90 39
	Arbolitos			
Temperatura	-0.05 57	-0.24 57	0.18 49	0.35 49
Salinidad		0.10 57	-0.29 49	-0.26 49
Clorofila "a"			-0.03 49	-0.21 49
Cu _d				0.92 49

7. Discusiones

7.1 Variación temporal de las condiciones hidrográficas de la zona costera de la BTS.

7.1.1 Temperatura

La variación de la temperatura del agua en las estaciones IIO y Rada durante el periodo 2008 - 2010, presentó una clara variación estacional con bajas temperaturas del agua en invierno y máximas en verano, consistentes con el ciclo estacional de radiación solar de estas latitudes del hemisferio norte (Gil *et al.*, 2009; 2011; 2012). La variación estacional de la temperatura del agua de las estaciones internas de la BTS que se describe en este estudio, coincide con lo reportado por otros autores que previamente registraron temperaturas superficiales frías en invierno (13.9 °C) y cálidas en verano en este cuerpo costero (22 °C; Mancilla y Martínez, 1991; Peña-Manjarrez, 2001; Salamanca-Quevedo, 2013). Así mismo, es consistente con el patrón de circulación de la bahía (Mateos-Farfán, 2010) ya que al ser un cuerpo costero semicerrado, la recirculación del agua que ingresa desde el Océano Pacífico favorece que quede confinada en su interior por más tiempo y en consecuencia habrá un aumento de la temperatura de acuerdo a la temporada del año.

En claro contraste con la estación IIO, en la estación Arbolitos la variación estacional de la temperatura del agua presentó un desfase al registrar bajas temperaturas en primavera y altas en otoño, lo cual puede atribuirse

principalmente al proceso físico de surgencia costera que se presenta en ese sitio y no a la tendencia del ciclo de radiación solar anual. Una variación estacional de la temperatura similar fue reportada por Linacre *et al.* (2010) en un estudio realizado en la región geográfica donde se localiza la estación Arbolitos. Estos autores reportaron que la temperatura superficial (<10m) en las estaciones 100.30 y ENSENADA presentó un marcado patrón en una escala anual. Los valores superficiales de temperatura más bajos (<15 °C) fueron medidos durante primavera mientras que los más altos (>17 °C) durante otoño, evidenciando de este modo el efecto que produce la surgencia costera sobre la temperatura superficial del agua en el norte de la península de Baja California. De manera similar, Durazo *et al.* (2010) realizaron un análisis hidrográfico utilizando datos colectados durante 40 años frente a la península de Baja California y mostraron que las temperaturas más bajas del agua superficial se registraron en primavera, asociadas a los eventos de surgencia mientras que las más altas se registraron en la época de otoño, asociadas al debilitamiento de los eventos de surgencias. En esta región del Pacífico, la surgencia se intensifica entre los meses de abril a junio cuando los vientos provenientes del noroeste soplan con mayor intensidad y de manera paralela a la costa, desplazando así el agua superficial mar adentro la cual es remplazada por agua fría y salina de fondo. En contraste, la temperatura superficial del agua de esta región se incrementa durante los meses de octubre a diciembre debido a

la relajación de los vientos y en consecuencia, a la disminución de la intensidad de los eventos de surgencia (Durazo *et al.*, 2010).

7.1.2 Salinidad

El comportamiento de la salinidad en la estación IIO está ligado a la influencia de agua de surgencia, debido a que siguió una tendencia estacional similar al registro de salinidad de la estación arbolitos, es decir salinidad alta en primavera y baja en otoño (Fig. 3a). Este resultado indica que en el interior de la bahía existe una fuerte influencia de los afloramientos de agua que se producen en el exterior, y a través de procesos advectivos el agua de surgencia se introduce a la bahía y es distribuida en su interior por los patrones de circulación (Mateos *et al.*, 2009; Mateos-Farfán, 2010). Otros autores han descrito de igual forma para la BTS, una variación estacional de salinidad baja entre otoño-invierno (~33.40) y alta entre primavera-verano (~33.80), lo cual se ha atribuido a la influencia de aguas del mar adyacente y la entrada de aguas más frías y salinas en las proximidades de Punta San Miguel y Punta Banda (Mancilla y Martínez, 1991; Carreón *et al.*, 2001; Peña-Manjarrez, 2001; Salamanca-Quevedo, 2013).

Por otra parte, en esta región del Pacífico la temporada de lluvia se presenta en otoño-invierno y aunque la precipitación es escasa en el norte de la península de Baja California (260 mm/año; <http://peac-bc.cicese.mx>), la salinidad del agua de mar en la zona costera de la BTS puede ser modificada

por los aportes de agua dulce durante los eventos de lluvia. Un ejemplo de este efecto de dilución del agua de mar pudo detectarse en las estaciones IIO y Rada, ya que se registraron salinidades <33.20 posteriormente a la ocurrencia de los eventos de lluvia durante los inviernos del 2008/2010 y el otoño del 2008 (Fig. 3a, b). Este resultado es importante debido a que los aportes de agua dulce durante el invierno no solo cambian la salinidad de la bahía sino también podría tener una implicación en el arrastre y la intrusión de partículas que puedan contener Cu asociadas a las escorrentías que se producen en esta temporada en la región de la BTS.

Al igual que la temperatura, en la estación Arbolitos la variabilidad estacional de la salinidad está regida por los afloramientos de agua que se producen por el efecto del viento. Los valores máximos de salinidad durante primavera se deben al incremento de la velocidad de los vientos provenientes del noroeste y por consecuencia afloramientos de agua más intensos, mientras que los valores mínimos de salinidad que se presentaron en otoño, se deben a la disminución en la velocidad de los vientos y en consecuencia el relajamiento de la surgencia costera (Pérez Brunius *et al.*, 2007). Durazo *et al.*, (2010) reportaron que durante la primavera, las aguas de la región de surgencias costeras en la porción norte de la red de muestreo IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California) presentan valores superficiales promedio de temperatura de $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ y salinidad de 33.50, muy similares a los registrados en la estación Arbolitos. Considerando estos hallazgos, las

temperaturas y salinidades que se registraron en la estación Arbolitos durante la temporada de surgencias, sugiere que la fuente de aguas recién emergidas podrían tener un origen entre 70-100m de profundidad, posiblemente de la porción superior de la contracorriente de California (Durazo *et al.*, 2010). A diferencia de la estación IIO y Rada, en la estación Arbolitos no se midieron salinidades <33.00 durante la época de otoño-invierno debido a que los flujos de agua dulce son prácticamente inexistentes en esta zona y la surgencia costera es el proceso físico más influyente en controlar la variabilidad de la salinidad en el exterior de la BTS.

7.2 Variación estacional de la biomasa fitoplanctónica en la zona costera de la BTS.

Los resultados de este trabajo muestran que la biomasa fitoplanctónica en la estación IIO y Arbolitos presentó una variación estacional muy parecida y además bien definida, con concentraciones de clorofila altas en primavera y bajas en otoño-invierno (Fig. 4a). Sin embargo, la magnitud de esta variabilidad estacional va a estar controlada por las condiciones químicas y físicas que se presentan en la columna de agua durante cada temporada. Por ejemplo, en un estudio previo realizado por Carreón *et al.* (2001) se mostró que bajo condiciones de primavera en la BTS, existen niveles favorables de luz, temperatura y disponibilidad de nutrientes inyectados a la superficie por eventos de surgencia en el exterior, lo que estimula la actividad biológica y el crecimiento de la biomasa fitoplanctónica en la región. En contraste, durante la

época de otoño-invierno se presenta una termoclina homogénea, ocurre un descenso de la temperatura del agua, existe menor cantidad de luz y una menor disponibilidad de nutrientes que tiene como consecuencia que ocurra la disminución de la biomasa fitoplanctónica (Carreón *et al.*, 2001). Consistente con esos resultados, Peña-Manjarrez (2001) reportó que en la franja costera de la BTS se presentan concentraciones de clorofila “a” altas en primavera ($13.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) y bajas a principios de otoño ($5.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$), las cuales fueron atribuidas a la proliferación y ausencia de dinoflagelados.

En el caso de la Rada portuaria se detectaron concentraciones de clorofila “a” altas ($>6.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$), especialmente en primavera-verano, las cuales posiblemente se deban a la influencia de la actividad antropogénica y marítima que se ha desarrollado durante años en esta zona. Estas actividades han contribuido con el enriquecimiento de nutrientes y metales en el agua y el sedimento de tal forma que detonan los altos niveles de biomasa fitoplanctónica que se presentan en este cuerpo de agua semicerrado. Existen muy pocos trabajos realizados en la Rada Portuaria de Ensenada donde se reporten datos de clorofila “a”; sin embargo, las biomásas fitoplanctónicas registradas en este estudio para la estación de la Rada están en el intervalo de concentraciones de clorofila “a” existentes en la literatura. En un estudio realizado en el puerto interior por Peña Manjarrez (2001), se determinó que las más altas concentraciones de clorofila “a” ($\sim 10.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) se registraron en los meses de noviembre a marzo, periodo en el cual no hubo presencia de

dinoflagelados. Sin embargo, en el mes de mayo cuando se presentó un florecimiento de dinoflagelados, se determinaron concentraciones mayores de $60.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, consecuencia de la aparición de las condiciones propicias para el adecuado desarrollo de estos organismos fitoplanctónicos (Peña Manjarrez, 2001).

7.3 Variación temporal del Cu_d de la zona costera de la BTS.

En la estación Arbolitos, el Cu_d no presentó una variación estacional definida y las concentraciones promedio mínimas se detectaron durante el invierno del 2008 y las máximas en verano de 2010 (Tabla 3; Figs. 5a, 6). Estas concentraciones de Cu_d son similares a las registradas previamente para aguas costeras del norte de la península de Baja California (0.9 - 3.8 nM; Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1996) y son comparables con las concentraciones de Cu_d reportadas para la CC (1.4 – 4.5 nM; Bruland, 1980) y el Pacífico Norte (0.5 – 5.3; Tabla 5; Boyle *et al.*, 1977; Bruland, 1980). Este resultado nos indica que las aguas que se encuentran en la parte exterior de la bahía pertenecen a la provincia oceanográfica del SCC y del Pacífico Nororiental y, además, nos sugiere que esta zona se encuentra relativamente poco influenciada por aportes antropogénicos de cobre de la ciudad de Ensenada, la cual es el asentamiento poblacional más importante de la región. Así, la variabilidad del Cu_d en la estación Arbolitos se atribuye a la influencia de procesos oceanográficos naturales como la surgencia costera, la cual es la principal fuente de Cu_d en aguas superficiales en esta zona. Además, procesos como la

Tabla 5.- Comparación de la concentración de Cu_d (nM) registrada en este trabajo con la reportada por otros autores para el Sistema de la Corriente de California y el Golfo de California.

Zona de estudio	Cu_d (nM)	Referencias
Pacífico Norte	0.5 - 5.3	Boyle <i>et al.</i> , 1977; Bruland, 1980.
Océano abierto	0.5 - 8.0	Boyle <i>et al.</i> , 1977; Bruland 1980; Danielsson, 1980, Nurnberg <i>et al.</i> , 1983; Danielsson <i>et al.</i> , 1985; Saager <i>et al.</i> , 1992; Nolting y de Baar, 1994; Abe, 2003a.
Corriente de California	1.4 - 4.5	Bruland, 1980.
Aguas costeras y zona de surf frente a Baja California	0.9 - 3.8	Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1991; Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1996.
Bahía de San Diego	1.0 - 60.0	Chadwick <i>et al.</i> , 2004; Blake <i>et al.</i> , 2007.
Bahía de San Francisco	16.0 - 24.0	Buck <i>et al.</i> , 2007
Canal de Ballenas, Golfo de California	1.2 - 3.3	Segovia-Zavala <i>et al.</i> , 2011
Estación Arbolitos	0.5 - 3.5	Este estudio
Estación IIO	1.2 - 8.1	Este estudio
Estación Rada	2.1 - 24.7	Este estudio

removilización diagenética (Bruland, 1980; Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1996) y la resuspensión de partículas bénticas (Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1996) también influyen los niveles de Cu_d de la columna de agua, ya que los sedimentos de la plataforma continental son una fuente importante de cobre en esta región del Pacífico (Sañudo-Wilhelmy y Flegal 1991, 1996).

El análisis de las variables hidrográficas en este estudio muestra que la temperatura del agua proveniente del Océano Pacífico se incrementa después de que se introduce a la BTS, debido a que la bahía es cuerpo costero semicerrado con una tendencia a la recirculación del agua. Este efecto de

retención de estas aguas propicia que las concentraciones naturales de Cu_d sean modificadas, y una evidencia de ello es que en el interior de la BTS se estimó un incremento de 100% de la concentración de cobre ($\text{Cu}_{d\text{IIO}} = 2.8 \pm 0.1$ nM) en relación a las concentraciones registradas en la parte externa de la bahía ($\text{Cu}_{d\text{Arb}} = 1.4 \pm 0.1$ nM; t de Student, $p < 0.05$). Sin embargo, cuando se comparan los valores de Cu_d de la estación IIO, con los valores de la concentración de Cu de otros ecosistemas marinos prístinos y altamente productivos, por ejemplo, la CC (1.4 – 4.5 nM; Bruland, 1980) y el Golfo de California (1.2 – 3.3; Segovia-Zavala *et al.*, 2011), el enriquecimiento de Cu_d que presentan las aguas de la BTS es aparente. Este panorama es distinto también, cuando comparamos los niveles de Cu de la BTS (Tabla 5) con los que se han reportado para las bahías más prominentes y contaminadas del SCC, como son la Bahía de San Diego (1- 60 nM; Chadwick *et al.*, 2004; Blake *et al.*, 2004) y la Bahía de San Francisco (16 – 24 nM; Buck *et al.*, 2007) en los EUA. En la BTS encontramos concentraciones de Cu_d ~30 veces menores a la Bahía de San Diego y ~10 veces más bajas de la Bahía de San Francisco, sugiriendo entonces que el enriquecimiento de Cu_d que presenta la estación IIO dentro de la BTS, es relativo.

Existen varias causas para explicar estas diferencias, entre las que se encuentran la magnitud de los aportes de Cu de origen antropogénico y el tiempo de residencia hidráulico de cada uno de estos sistemas. Las bahías en EUA presentan una boca reducida por lo que el intercambio de agua con el

océano adyacente es menor y, en consecuencia, el confinamiento del agua es mayor en su interior, permitiendo de este modo la acumulación del Cu_d introducido a las bahías por los aportes antropogénicos de las plantas de agua residuales y del tráfico marítimo que caracterizan a estos sistemas. En contraste, el hecho que la BTS sea mucho más profunda y presente dos entradas bien diferenciadas; la entrada noroeste de 12 km de longitud y la entrada al suroeste con 6 km de longitud (Sánchez *et al.*, 2009) permiten que el intercambio de agua con el Océano Pacífico sea relativamente rápido y propicie la formación de patrones de circulación en su interior (Mateos *et al.*, 2009; Mateos-Farfán, 2010). Este recambio de agua provoca que ocurra la redistribución de los aportes de Cu que provienen de los sedimentos, las aguas residuales de fuentes no puntuales, de las plantas de tratamiento de agua localizadas en el norte de la bahía (CESPE-Sauzal y UABC), así como del intercambio de aguas con la marina del Hotel Coral y Marina, teniendo como resultado que la acumulación de Cu_d en la BTS sea mucho menor que en las grandes bahías de California.

La alta variabilidad temporal que presentó el Cu_d en la estación IIO a lo largo de todo este estudio, fue producto del registro de valores muy altos ($\text{Cu}_d > 7 \text{ nM}$). Este resultado se atribuye, de manera preliminar, a dos procesos naturales externos al sistema marino de la BTS: a) los incendios forestales y b) la entrada de agua dulce de lluvia, los cuales no habían sido considerados previamente como factores que influyen la composición química de las

aguas de la bahía. A principios de julio y finales de septiembre del 2009, se registraron en la estación IIO los valores más altos de Cu_d (7.4 nM y 8.1 nM, respectivamente) medidos en este estudio y se asociaron a la entrada de partículas de ceniza provenientes de varios incendios forestales que ocurrieron en la región continental de Ensenada. Estos eventos de quema de la vegetación local fueron de gran intensidad (Verano: <http://ensenada.net/noticias/nota>) (Otoño: www.eluniversal.com.mx/notas), y tuvieron lugar durante las fechas de colecta de muestras en la estación IIO (<http://ensenada.net/noticias/index>). Así, aunque esta afirmación requiere más datos para demostrarla de manera contundente, en este estudio se propone que los incendios forestales, los cuales ocurren principalmente durante la temporada de verano-otoño, podrían ser una fuente importante capaz de introducir Cu a aguas superficiales de la BTS.

Por otra parte, durante el invierno del 2010 se observó que tuvo lugar en la estación IIO un importante flujo de agua dulce de lluvia. Este flujo de agua dulce disminuyó la salinidad (Fig. 3a) y asociado a este evento, se registró un incremento sustancial de la concentración promedio de Cu_d ($r = -0.84$; Tabla 4; Fig. 6; Tabla 2). Cabe mencionar que en estudios realizados en otros sistemas costeros en el cual existe un flujo considerable de agua dulce aportado por ríos, por ejemplo, el mar amarillo, se han reportado concentraciones de $\text{Cu}_d \sim 7.8$ nM asociadas principalmente a un aumento en la descarga de agua proveniente de los ríos Huanghe y Changjiang, por la temporada de lluvia durante otoño.

Mientras concentraciones ~ 5 nM fueron atribuidas al periodo de convección de la mezcla vertical durante la temporada de invierno (Abe, 2003b). A pesar de que en el estudio antes mencionado existe una constante entrada de agua dulce por ríos y en nuestra zona se carece de esa fuente activa, se identifica el claro efecto que produce el agua de lluvia en el aumento de la concentración del Cu_d en ambos sistemas costeros. Consideremos además, que la lluvia podría introducir partículas terrígenas que puedan contener Cu y/o partículas de cenizas de los incendios que se presentaron en temporadas pasadas en la zona continental de Ensenada y transportarlas hacia la BTS mediante las escorrentías que se presentan durante la época de lluvias. También se ha considerado que la mezcla vertical que se produce en invierno propicia una mayor resuspensión de partículas de los sedimentos y en consecuencia pudo además haber contribuido por procesos de difusión al incremento de la concentración Cu_d en la BTS.

Claramente los valores más altos de Cu_d reportados en este estudio se registraron en la estación Rada, con una concentración promedio máxima en el verano de 2008 y mínima en primavera de 2010 (Fig. 5b, Tabla 3). La Rada portuaria es un sistema somero ($<10\text{m}$), está sujeta a un intenso tráfico marítimo y actividades antropogénicas y, dada su geometría (Fig. 1), presenta baja energía hidrodinámica. El agua del Océano Pacífico que se introduce a la BTS y que recircula en el interior de la bahía, incrementa aún más su tiempo de retención cuando ingresa a la Rada portuaria, quedando además expuesta a

los aportes de Cu_d presentes en la zona. De esta manera, las concentraciones de Cu_d medidas en la Rada son ~8 veces mayores que las presentes en las aguas del exterior de la bahía ($\text{Cu}_{d\text{Arb}} = 0.5 - 3.5 \text{ nM}$); sin embargo, son concentraciones menores a las registradas en el interior de las bahías contaminadas del SCC (Tabla 5). El enriquecimiento de Cu_d que presentó la Rada se atribuye principalmente al uso de pinturas antivegetativas (antifouling paints), el mantenimiento y reparación de barcos en las actividades marítimo-portuarias y a fuentes antropogénicas como las descargas de aguas residuales que son las fuentes principales de Cu a las aguas de esta estación de muestreo. Eventualmente, el Cu proveniente de estos aportes se acumula principalmente en el sedimento de grano fino y por procesos de removilización diagenética se difunde de nuevo a la columna de agua (Huerta-Díaz *et al.*, 2008), contribuyendo de este modo a la acumulación de este metal en la fase disuelta.

8. Conclusión

Las concentraciones de Cu_d en la zona costera de la BTS presentan un claro gradiente espacial con los valores más altos en la Rada portuaria (8.4 ± 1.2 nM), intermedios en la estación IIO (2.8 ± 0.1 nM) y los más bajos en la estación Arbolitos (1.4 ± 0.1 nM) en el exterior de la bahía

Los niveles de Cu_d medidos en la parte externa de la bahía son similares a los reportados para la región del Sistema de la Corriente de California y su variabilidad se atribuye a la influencia de procesos oceanográficos naturales como la surgencia costera.

El incremento de la concentración de Cu_d en la estación IIO se asoció con el aumento del tiempo de residencia del agua en el interior de la bahía y a los aportes provenientes desde los sedimentos, las descargas antropogénicas cercanas al sitio, a los incendios forestales y a los aportes de escurrimientos de agua dulce durante la temporada de lluvias.

El enriquecimiento de Cu_d de la Rada portuaria de Ensenada se atribuyó a la combinación del uso de las pinturas antivegetativas asociadas a las actividades marítimo-portuarias, la geometría de la Rada y el alto tiempo de residencia del agua en su interior.

9. Referencias

- Abe, K., Ishihi, Y., Watanabe, Y., 2003a. Dissolved copper in the Yellow Sea and the East China Sea-Cu as a tracer of the Changjiang discharge. *Deep-Sea Research II* 50: 327-337 p.
- Abe, K., 2003b. Copper distribution associated with various water masses in the Yellow Sea. *Bulletin Fisheries Research Agency*, No 8, 15-21 p.
- Alvarez-Sánchez, L. G., R. Henández y R. Durazo., 1988. Patrones de deriva de los trazadores lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, 14 (4):135-162 p.
- Barrera-Gaona, J. A., 1998. Patrón de dispersión de sedimentos en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, U.A.B.C., Ensenada, B.C. 54 pp.
- Blake, A.C., Chadwick, D.B., Zirino, A., Rivera-Duarte, I., 2004. Spatial and Temporal Variations in Copper Speciation in San Diego Bay. *Estuaries* Vol. 27, No 3, 437- 447 p.
- Boyle, E.A., F. Sclater, and J.M. Edmond, 1977. The distribution of dissolved copper in the Pacific, *Earth Planet. Sci. Lett.* 37., 38-54 p.
- Bruland, K.W., 1980. Oceanographic distribution of cadmium, zinc, nickel and copper in the North Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 47: 176-198 p.
- Buck, K.N., Ross, J.R.M., Flegal, A.R., Bruland, K.W., 2007. A review of total dissolved copper and its chemical speciation in San Francisco Bay, California. *Environmental Research* 105:5-19 p.
- Carreón-Espinosa, T. L., Gaxiola-Castro, G., Robles-Pacheco, J.M. y Nájera Martínez, S., 2001. Temperatura, Salinidad, Nutrientes y Clorofila *a* en aguas costeras de la Ensenada del Sur de California. *Ciencias Marinas*, 27(3): 397-422 p.
- Chadwick, D.B., Zirino, A., River-Duarte, I., Katz, C.N., Blake, A.C., 2004. Modeling the mass balance and fate of copper in San Diego Bay. *Limnology and Oceanography*, 49(2), 355-366 p.
- Cruz-Colín, M. E., 1997. Variabilidad de temperatura del mar en la Bahía de Todos Santos, B. C., México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C. Ensenada, B. C. 98 pp.

Delgadillo-Hinojosa, F., 2000. Biogeoquímica del cadmio y manganeso en el Golfo de California. PhD Thesis. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México. 181 pp.

Delgadillo-Hinojosa, F., Macias-Zamora, J.V., Segovia-Zavala, J.A and Torres-Valdés, S., 2001. Cadmium enrichment in the Gulf of California. *Marine Chemistry*. 75:109-122 p.

Delgadillo-Hinojosa, F., Segovia-Zavala, J.A., Huerta-Díaz, M.A and Atilano-Silva, H., 2006. Influence of geochemical and physical processes on the vertical distribution of manganese in Gulf of California waters. *Deep-sea Research I*. 53: 1301-1319 p.

Durazo, R., 2009. Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997– 2008. *Progress in Oceanography*. 83: 361–368 p.

Durazo, R., Ramirez-Manguilar, A.M., Miranda, L.E., Soto-Mardones, L.A., 2010. Climatología de variables hidrográficas. En: Gaxiola-Castro, G., Durazo, R. (eds.), *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. Pp. 25-58.

Gil, S. E., S. Larios, R. Blanco y O. Delgado., 1991. Rapidez y dirección del viento en la Bahía de Todos Santos, B. C. Reporte Técnico de datos. Instituto de Investigaciones Oceanológicas, U.A.B.C., Ensenada, B. C.

Gil-Silva Eduardo, Adán Mejía Trejo y Oscar E. Delgado G., 2009. Informe de datos meteorológicos de la estación Punta Morro, Ensenada, BC., Periodo Enero 1 a diciembre 31 de 2009. Informe Técnico, DOFIIOPM2009, 42p.

Gil-Silva Eduardo, Oscar E. Delgado G., Adán Mejía Trejo, Rubén Castro Valdez y Feliciano Domínguez P., 2011. Informe de datos meteorológicos de la estación Punta Morro, Ensenada, BC., Periodo Enero 1 a diciembre 31 de 2010. Informe Técnico, DOFIIO, 38P.

Gil-Silva Eduardo, Oscar E. Delgado G. y Adán Mejía Trejo, 2012. Informe de datos meteorológicos de la estación Punta Morro, Ensenada, BC., Periodo, Enero 1 a diciembre 31 del 2008. Informe Técnico, DOF-IIO-PM2008, 42p.

Gordon LI, Jennings JC Jr, Ross AA, Krest JM., 1993. A suggested protocol for continuous flow automated analysis of seawater nutrients (phosphate, nitrate, nitrite and silicic acid) in the WOCE Hydrographic Program and the Joint Global

Ocean Fluxes Study. WOCE Hydrographic Program Office, Methods Manual WHPO 91-1. 55 pp.

Hayward, T. and Venrick, E., 1998. Near-surface pattern in the California Current: Coupling between physical and biological structures. *Deep-Sea Res. II*, 45: 1617-1638 p.

Huerta-Díaz, M.A., Delgadillo-Hinojosa, F., Hernández-Ayón, M., Segovia-Zavala, J.A., García-Esquivel, Z., Zárate-López, H., Siqueiros-Valencia, A., Galindo-Bect, S., 2008. Diagnosis of trace metal contamination in sediments: The example of Ensenada and Sauzal, two harbors in Baja California, Mexico. *Marine Environmental Research* 66: 345-358 p.

Libes, S., 2009. *Introduction to Marine Biogeochemistry. Second Edition*, Elsevier. ISBN: 978-0-12-088530-5, 909 pp.

Linacre, L., Durazo, R., Hernández-Ayón, J.M., Delgadillo-Hinojosa, F., Cervantes-Díaz, G., Lara-Lara, J.R., Camacho-Ibar, V., Siqueiros-Valencia, A., Bazán-Guzmán, C., 2010. Temporal variability of the physical and chemical water characteristics at a coastal monitoring observatory: Station ENSENADA. *Continental Shelf Research* 30:1730-1742 p.

Mancilla-Peraza, M y Martínez-García, G.M., 1991. Variación estacional de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en la Bahía de Todos Santos, B.C., México (marzo 1986 a junio 1987). *Rev. Invest. Cient.*, 2: 33-45 p.

Mateos, E., Marinone, S., y Parés-Sierra, A., 2009. Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B.C., México. *Ocean Modelling*, 27: 107-112 p.

Mateos-Farfán, E., 2010. Modelación de la circulación costera estacional en la región norte de Baja California y sur de California y de la Bahía de Todos Santos. Tesis de Doctorado en Oceanografía Física, CICESE, Ensenada, Baja California, México, 121 pp.

Parsons.T.R., Maita, Y. and Mali, C.M., 1984. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, 173 pp.

Pavia, E. y S. Reyes., 1983. Variaciones espaciales y estacionales del viento superficial en la Bahía de Todos Santos, *Ciencias Marinas*. 9:151-167 p.

Peña-Manjarrez, J.L., 2001. Ecofisiología de dinoflagelados productores de mareas rojas en la Bahía de Todos Santos. Tesis de Maestro en Ciencias en Ecología Marina. División Oceanología, CICESE, Ensenada, Baja California, México, 133 pp.

Pérez-Brunius, P., López, M., Parés-Sierra, A., Pineda, J., 2007. Comparison of Upwelling índices off Baja California derived from three different wind data sources. Calif. Co. Oceanic Fish. Invest. Rep. 48:204-214 p.

Salamanca-Quevedo, E. (2013). Distribución espacial y variabilidad temporal de Cadmio en la Bahía de Todos Santos: Una región influenciada por la Corriente de California y el fenómeno de surgencias. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas-Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México. 103 pp.

Sánchez, A., Carriquiry, J., Barrera, J., López-Ortiz, B.E., 2009. Comparación de modelos de transporte de sedimentos en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen 61, Núm. 1, p. 13-24.

Sañudo-Wilhelmy, S.A., y Flegal, A.R., 1991. Trace element distributions in coastal waters along the US-Mexican boundary: relative contributions of natural processes vs. anthropogenic inputs. Marine Chemistry. 33:372-392 p.

Sañudo-Wilhelmy, S.A., y Flegal, A.R., 1996. Trace metal concentrations in the surf zone and in coastal waters off Baja California, México. Environmental Science Technology 30: 1575-1580 p; doi:10.1021/es9505560.

Segovia-Zavala, J.A., Delgadillo-Hinojosa, F., Lares-Reyes, M.L., Huerta-Díaz, M.A., Muñoz-Barbosa, A., Santamaría del Ángel, E., Torres-Delgado, E.V., Sañudo-Wilhelmy, S.A., 2011. Distribuciones verticales de hierro, cobre y cadmio disueltos en el canal de Ballenas, golfo de California. Ciencias Marinas 37(4A): 457-469 p.

Tessier, A., and D. R. Turner., 1995. Metal speciation and bioavailability in aquatic systems, edited by B.J. a. V. L. H. P., Chichester, John Wiley & sons.

Waeles, M., Riso, R.D., Le Corre, P., 2005. Seasonal variations of dissolved and particulate copper species in estuarine waters. Estuarine, Coastal and Shelf Science 62: 313-323 p.

Wu, J.T. y Lorenzen, H., 1984. Effect of copper on photosynthesis in synchronous chlorella cells. Botany Bull. Academia Sinica 25: 125-132 p.

Ligas de internet.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml#NINO

<http://www.eluniversal.com.mx/notas/628848.html>

[http://ensenada.net/noticias/index.php?pagina=14&num=257&&SearchQuery=incendios forestales&categoria=.](http://ensenada.net/noticias/index.php?pagina=14&num=257&&SearchQuery=incendios forestales&categoria=)

[http://ensenada.net/noticias/nota.php?id=15072&&SearchQuery=incendios forestales.](http://ensenada.net/noticias/nota.php?id=15072&&SearchQuery=incendios forestales)

<http://peac-bc.cicese.mx/datosclim/boletines.html>