

## CADMIO, COBRE Y ZINC EN EL MEJILLÓN *Mytilus californianus* (CONRAD 1837) DE LA COSTA OESTE DE BAJA CALIFORNIA

Efraín Abraham GUTIÉRREZ GALINDO<sup>1\*</sup>, Juan Carlos PÉREZ RODRÍGUEZ<sup>1</sup> y Albino MUÑOZ BARBOSA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, México

<sup>2</sup> Posgrado en Oceanografía Costera, Facultad de Ciencias Marinas/Instituto de Investigaciones Oceanológicas Universidad Autónoma de Baja California, México

\* Autor de correspondencia: egutierrezgalindo@gmail.com

(Recibido mayo 2013; aceptado junio 2014)

Palabras clave: mejillones, biomonitor costero, metales pesados

### RESUMEN

Se estudió la distribución espacial de la concentración de Cd, Cu y Zn en tejido del mejillón *Mytilus californianus* y el uso de este organismo como biomonitor de metales en la costa oeste de Baja California. Se recolectaron mejillones en siete estaciones distribuidas en 600 km de línea de costa, desde la frontera México-EUA hasta el límite norte de la reserva de la biosfera de San Sebastián Vizcaíno en Baja California Sur. Los resultados indican que San Quintín presenta los valores más altos de Cu y Zn (6.8 µg/g y 77.0 µg/g en peso seco), lo que podría ser resultado del uso de fertilizantes en la zona. Por otro lado, el valor más alto de la concentración de Cd se presentó en Eréndira (16.6 µg/g). Esto puede ser debido a que en la biogeoquímica de Cd en esta región las surgencias aportan más Cd natural que las fuentes antrópicas. Aun cuando los coeficientes de correlación entre la concentración y la concentración normalizada por el índice de condición de Cd, Cu y Zn ( $r = 0.90$ ,  $r = 0.86$ , y  $r = 0.57$ , respectivamente), sugieren que el mejillón *Mytilus californianus* es mejor biomonitor de Cd que de Cu y Zn. Sin embargo, en lo que respecta al Cu este resultado debe ser tomado con precaución. En todas las localidades estudiadas, las concentraciones de Cd excedieron los límites máximos permisibles por la Organización Mundial de la Salud y la Administración de Alimentos y Medicinas de los Estados Unidos.

Key words: mussels, coastal biomonitor, heavy metals

### ABSTRACT

Spatial distributions of the concentrations of Cd, Cu, and Zn in tissue of the mussel *Mytilus californianus* and its use as biomonitor of metals were studied in the west coast of Baja California, Mexico. Mussels were collected from seven sampling sites along 600 km of the coastline, from the Mexico-EUA border to the northern limit of the San Sebastian Vizcaino Biosphere Reserve, in Baja California Sur. The highest concentrations of Cu and Zn (6.8 µg/g and 77.0 µg/g dry weight) were found in San Quintín. These could be the result of the use of fertilizers in a large agriculture zone nearby. On the other hand, the highest Cd concentration was found in Eréndira (16.6 µg/g). Based on the cadmium biogeochemistry of this region, upwelling could

constitute the most important Cd source, even over the anthropic sources. The correlations between concentrations of Cd, Cu, and Zn and those normalized by the organisms' condition index ( $r = 0.90$ ,  $r = 0.86$ , and  $r = 0.57$ , respectively), suggest that environmental Cd and Cu levels are better reflected by *Mytilus californianus* than Zn levels. However, copper results must be taken with caution. All Cd concentrations found in this study exceeded the maximum permissible limits recommended by the World Health Organization and the United States Food and Drug Administration.

## INTRODUCCIÓN

La costa oeste de Baja California presenta un importante crecimiento demográfico asociado a una acelerada urbanización e industrialización (en particular la zona fronteriza), lo que representa un riesgo potencial de contaminación por metales pesados en el ecosistema costero de esta región (Nishikawa *et al.* 1988). En el área costera, en ambos lados de la frontera de California, Estados Unidos–Baja California, México, se han identificado diversas fuentes de contaminación, las cuales incluyen descargas de agua residuales (domésticas e industriales), escurrimientos de agua de tormenta de zonas altamente urbanizadas, dragado de materiales en puertos, aportes atmosféricos, disposición de residuos peligrosos, descargas de agua utilizada en el enfriamiento de turbinas de plantas termoeléctricas y astilleros, entre otras (Nishikawa *et al.* 1988, Steinberg y Stein 2004).

En el sur de California, EUA, durante 2007, las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales domésticas, descargaron a la zona costera un volumen combinado de  $1364 \times 10^9$  L, con un flujo de  $3509 \times 10^6$  L/d y una emisión de Cu de 20 729 kg, de Cd de 83 kg y de Zn de 35 427 kg (SCCWRP 2011). Investigaciones realizadas estiman que el 50 % de la región costera del sur de California, EUA está enriquecida por actividades humanas con Cd, Cr, Cu, Pb, Ag, Zn y Hg (Schiff y Gossett 1998). Por su parte, en la costa noroccidental de Baja California, la planta municipal de tratamiento de aguas residuales domésticas de Punta Bandera (Tijuana) libera a cielo abierto y sobre la línea de la costa un flujo de  $130 \times 10^6$  L/d de desechos líquidos y una cantidad aproximada de 6000 t de sólidos suspendidos por año. En la ciudad de Ensenada, las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales domésticas El Naranjo y el Gallo tienen un flujo de 316 y 93 L/s sobre la línea de la costa (Pérez Morga 2004).

Desde hace varias décadas se ha propuesto el uso de mejillones del género *Mytilus* sp. como monitores biológicos cuantitativos de la contaminación por metales pesados en el medio marino (Phillips 1980,

Gutiérrez Galindo y Muñoz Barbosa 2003). Se ha encontrado que estos organismos pueden acumular los metales pesados a partir de su alimento y del agua de mar en concentraciones que exceden considerablemente a aquellas encontradas en el ambiente. Además, lo hacen proporcionalmente a las concentraciones encontradas en su alrededor (Phillips 1980). A partir de que los mejillones se comenzaron a utilizar como biomonitores de las variaciones espaciales y temporales de los metales pesados, también se han realizado investigaciones para conocer los factores o procesos que pueden afectar la variabilidad en la concentración de los elementos en estos organismos. La acumulación de metales por organismos es un proceso complejo, gobernado por una variedad de factores externos e internos. La talla (Latouche y Mix 1982), la tasas de filtración (Boyden 1977), la época del año (Ouellette 1981), los ciclos de desove que afectan la condición y peso de los organismos (Lobel y Wright 1982), así como la biodisponibilidad del metal (Phillips 1976), pueden ser importantes fuentes de variación del contenido de metales pesados en el organismo.

Los objetivos de este estudio fueron determinar la distribución espacial de Cd, Cu y Zn en la costa oeste de Baja California utilizando a *Mytilus californianus* como biomonitor y además, evaluar si este organismo es un buen biomonitor de los metales estudiados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprende la costa oeste de Baja California, desde la frontera México-Estados Unidos hasta la Bahía de Sebastián Vizcaíno. Parte de esta área se encuentra en la porción sur de la región conocida como la Cuenca del Sur de California (CSC), la cual abarca un área aproximada de 78 000 km<sup>2</sup> (Mearns 1973). La hidrodinámica del área es compleja, con un patrón de corrientes dominado por el Sistema de la Corriente de California que transporta aguas de norte a sur (Lynn *et al.* 1982). El lecho marino está formado principalmente por fondos de

arena y sedimento lodoso y sobre la plataforma continental predominan los sedimentos arenosos (Dailey *et al.* 1993). Esta región de la CSC es un ecosistema rico en organismos con cerca de 5000 especies de invertebrados, 480 especies de peces y 195 especies de aves (Dailey *et al.* 1993). El clima de la región es de tipo mediterráneo con veranos secos y cálidos e inviernos húmedos y fríos (Carlucci *et al.* 1986) y la precipitación pluvial es escasa.

Para la realización del estudio se recolectaron mejillones *Mytilus californianus* del 4 al 8 de junio de 2008 en siete localidades distribuidas a lo largo de 600 km de costa, desde la zona fronteriza de Tijuana, Baja California hasta la Bahía Sebastián Vizcaíno (Fig. 1). Los mejillones recolectados fueron organismos adultos de acuerdo con sus características biométricas y de madurez gonadal (Ramírez 2005). Las localidades de norte a sur fueron: Bajamar, Bahía Todos Santos Ensenada, Eréndira, Bahía San Quintín, Punta Baja y Bahía Sebastián Vizcaíno

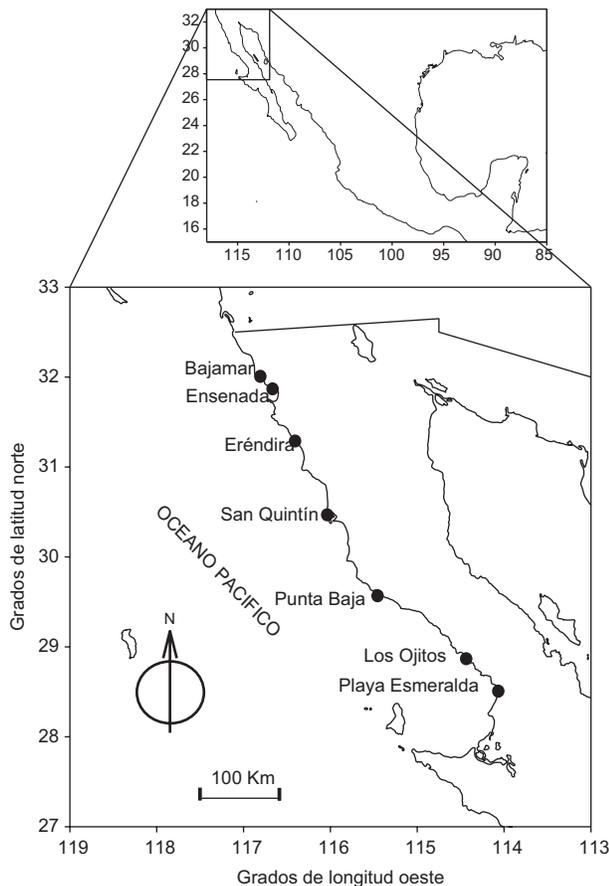


Fig. 1. Área de estudio y localidades de recolección de mejillones *Mytilus californianus* de la costa oeste de Baja California, México

(Los Ojitos y Playa Esmeralda). Con la finalidad de minimizar la variación en la concentración de metales pesados debida a la talla y al tiempo de exposición, en cada una de las estaciones se recolectaron 50 organismos de un mismo manto, de una talla similar (40-60 mm), y a un mismo nivel de marea (Coleman 1980). Inmediatamente después de la recolección los organismos se transfirieron a bolsas de polietileno previamente lavadas con agua desionizada, se colocaron en hieleras y se transportaron al laboratorio donde fueron congeladas a  $-20^{\circ}\text{C}$  para su análisis posterior.

Con la finalidad de reducir la variación individual de la concentración de los metales pesados, los organismos recolectados se separaron en tres réplicas integradas de 15 individuos cada una (Stephenson *et al.* 1979). Los organismos se descongelaron, se lavaron con agua desionizada para remover arena y epibiota y se midieron (largo, ancho y alto). Con el objetivo de minimizar las variaciones estacionales debidas al ciclo reproductivo del organismo, éstos se disectaron separando la gónada (Oullette 1981). El músculo de cada uno de los organismos fue transferido a un frasco de plástico de boca ancha de 250 mL donde se registró su peso individualmente. Al final, con un homogeneizador Virtis 45 equipado con navajas de titanio, el tejido de cada una de las réplicas fue homogeneizado y enseguida congelado hasta su posterior análisis.

La digestión del tejido se realizó de acuerdo con lo descrito por Muñoz Barbosa *et al.* (2000). Para evaluar la calidad de la técnica analítica, por cada siete réplicas se analizaron un blanco de procedimiento y el estándar de referencia certificado NIST Oyster tissue 1566a (Cuadro I). La concentración Cd, Cu y Zn se determinó mediante la técnica de flama aire-acetileno por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica marca Varian modelo SpectrAA 220.

El índice de condición (IC) se calculó usando la expresión propuesta por Lobel *et al.* (1991).

$$IC = \frac{\text{Peso seco de tejido blando}}{\text{Largo (cm)} \times \text{Ancho (cm)} \times \text{Alto (cm)}} = \frac{g}{\text{cm}^3}$$

Donde IC es el índice de condición y largo, ancho y alto se refieren a las dimensiones del organismo.

Se ha encontrado que al normalizar la concentración de algunos metales en tejido de mejillones con respecto al índice de condición, se elimina la variabilidad debida a factores externos tales como

**CUADRO I.** ANÁLISIS DEL MATERIAL DE REFERENCIA OYSTER TISSUE 1566B (CONCENTRACIONES EN  $\mu\text{g/g}$  PESO SECO) CERTIFICADO POR INSTITUTO NACIONAL DE ESTÁNDARES Y TECNOLOGÍA (NIST) DE LOS ESTADOS UNIDOS

	Medido*	Certificado*	Recuperación (%)	Coefficiente de variación (%)
Cd	2.25 $\pm$ 0.14	2.48 $\pm$ 0.08	91	3.1
Cu	63.6 $\pm$ 4.1	71.6 $\pm$ 1.6	89	3.3
Zn	1315 $\pm$ 73	1426 $\pm$ 46	92	2.8

\* Media  $\pm$  intervalo de confianza al 95 %

temperatura, salinidad, posición en la columna de agua y condición del organismo (Lares y Orians 1997). Es decir, la normalización elimina la variabilidad no debida a la concentración del metal en el medio, aislando esta última, la cual es la de interés.

Lares y Orians (1991) encontraron que la normalización propuesta por Fisher (1983), que utiliza el peso de la concha del organismo, presentaba ciertos problemas cuando esta última no estaba en buenas condiciones. En busca de una alternativa a lo anterior, estos autores correlacionaron datos normalizados de acuerdo a Fisher (1983) con datos normalizados mediante el producto entre concentración del metal y el IC propuesto por Lobel *et al.* (1991) y encontraron que las correlaciones eran significativas. Dada la similitud en los resultados de ambas normalizaciones y ante el hecho de no contar con los pesos de las conchas, la normalización se realizó de acuerdo con la alternativa propuesta por Lares y Orians (1991).

$$NORM = CoMtb \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{g}} \right) \times IC \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Donde:

NORM= Normalización por el índice de condición

CoMtb= Concentración del metal en tejido blando (peso seco)

IC= Índice de condición

La razón concentración-límite(s) máximo(s) permisible(s) (RCLMP) se calculó mediante la siguiente expresión:

$$RCLMP = \frac{[C] \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{g}} \right)}{LMP \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{g}} \right)}$$

Donde:

RCLMP= Razón concentración-límite máximo permisible (RCLMP)

[C]= Concentración del metal (peso seco)

LMP= Límite máximo permisible propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS 1982) o la administración de alimentos y drogas de los EUA (FDA, por sus siglas en inglés, 2001). Cadmio es el único metal para el cual la norma oficial mexicana NOM-242-SSA1-2009 contempla un LMP para moluscos y este es igual al de la OMS (2 mg/kg).

Una RCLMP < 1, indica que la concentración del metal en la localidad examinada no excede lo permitido por la OMS o la FDA.

Una RCLMP > 1, indica que la concentración del metal en la localidad examinada excede lo permitido por la OMS o la FDA.

Una RCLMP = 1, está en el límite permitido por la OMS o la FDA.

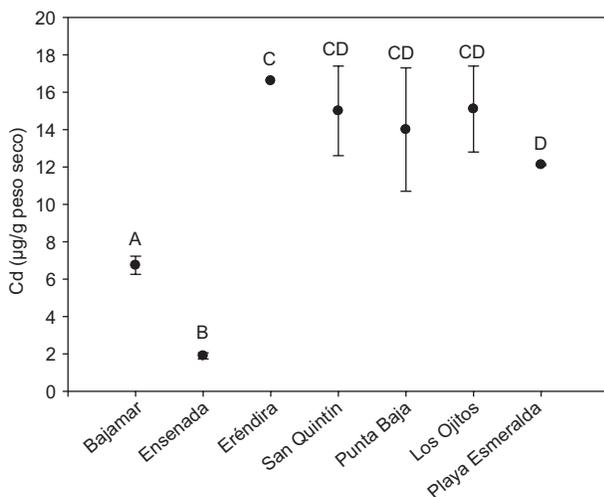
Para determinar el grado de efectividad que los mejillones tienen para reflejar las variaciones ambientales de metales en el medio marino, se llevó a cabo la correlación producto-momento de Pearson entre la concentración de peso seco de los metales en mejillones y sus concentraciones normalizadas por el índice de condición. Un coeficiente de correlación significativo indica que la normalización con respecto al índice de condición no reduce significativamente la variabilidad, lo cual sugiere que los factores externos no afectan de manera importante la concentración de ese metal en el mejillón. Por tanto, la concentración del metal en sus tejidos puede considerarse como un buen reflejo de la concentración del mismo metal en el ambiente. En contraste, un coeficiente de correlación no significativo indica que la normalización con respecto al índice de condición reduce significativamente la variabilidad, lo que sugiere que factores ajenos a la concentración del metal en

el medio intervienen de manera determinante en la variabilidad de la concentración de ese metal en el mejillón, lo que a su vez indica que el organismo no es un buen biomonitor de ese metal en el ambiente marino (Gutiérrez Galindo y Muñoz Barbosa 2001). Aunque la acumulación de metales pesados por los mejillones proporciona información de la calidad del medio marino, el conocimiento del grado de efectividad que tienen como biomonitores de la concentración de metales pesados en el océano proporciona un elemento de juicio que puede ser de utilidad para la interpretación de resultados.

Para determinar diferencias espaciales de las concentraciones de metales entre sitios de muestreo se usó la prueba paramétrica de análisis de varianza (ANOVA), seguida de la prueba *a posteriori* de Tukey. Previamente, para cubrir los requisitos necesarios del análisis de varianza paramétrico se aplicaron pruebas de homogeneidad de varianza (Prueba de Bartlett) y de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) a los datos transformados por  $\text{Log}_{10}$ . Todas las variables cumplieron con las pruebas de homogeneidad de varianzas y normalidad.

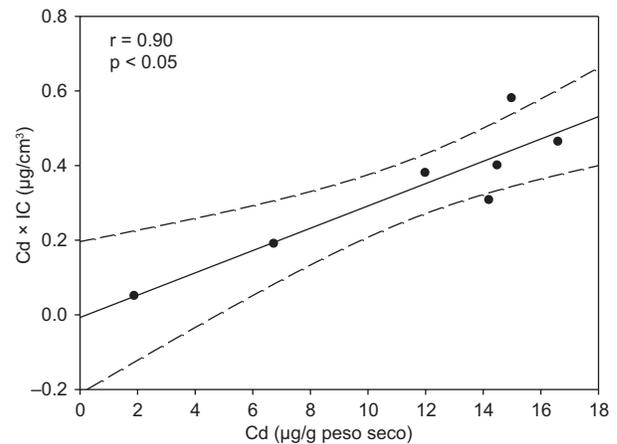
**RESULTADOS**

La distribución espacial del cadmio (**Fig. 2**) presenta una región norte con concentraciones significativamente más bajas ( $p < 0.01$ ; Bajamar 6.7  $\mu\text{g/g}$  y Ensenada 1.9  $\mu\text{g/g}$ ) y otra región centro-sur con



**Fig. 2.** Variación espacial de la concentración de Cd en *M. californianus*. Cada punto representa la media de tres réplicas de 15 organismos y las barras verticales representan  $\pm 1$  desviación estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ )

concentraciones significativamente altas ( $p < 0.01$ ; Eréndira 16.6  $\mu\text{g/g}$  y Los Ojitos 14.9  $\mu\text{g/g}$ ). La correlación entre la concentración de Cd en *M. californianus* y la concentración normalizada por el índice de condición (**Fig. 3**) es significativa ( $p < 0.05$ ;  $r = 0.90$ ). Esto indica que la variabilidad retirada por la normalización es mínima y no afecta la distribución espacial de Cd y que, en su mayor parte, es debida a la concentración de Cd en el ambiente.

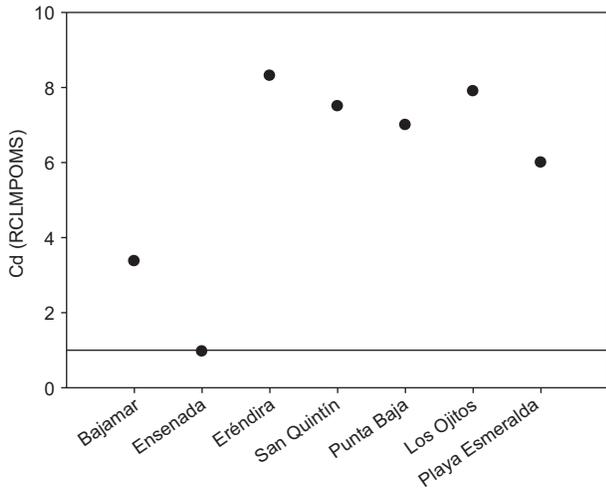


**Fig. 3.** Análisis de correlación entre la concentración de Cd y la concentración de Cd normalizada por el índice de condición

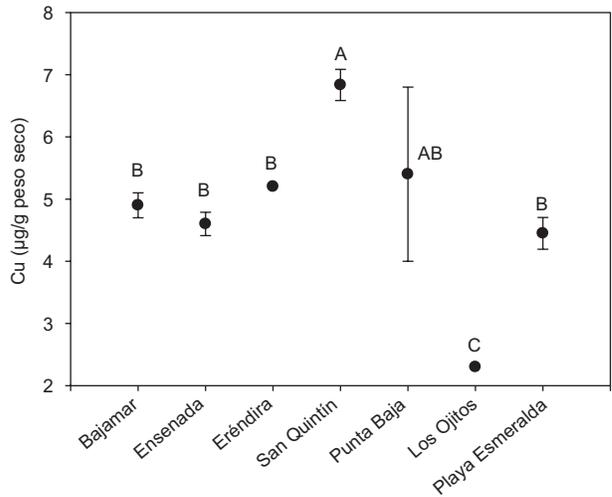
También se encontró que, con excepción de Ensenada, los valores de la razón concentración-límite máximo permisible de la OMS (RCLMPOMS) de Cd son mayores a 1 en todas las estaciones (**Fig. 4**). El valor en Eréndira (zona centro del área de estudio) es ocho veces más alto que lo permitido por la OMS, mientras que lo encontrado en Ensenada no excede la RCLMPOMS (0.96). De igual manera, Eréndira y Ensenada registraron el valor máximo y mínimo de la RCLMPFDA de Cd: 86 y 9.7, respectivamente (**Fig. 5**). En este último caso todas las estaciones excedieron el nivel permitido.

La concentración de Cu en San Quintín (6.8  $\mu\text{g/g}$ ) es significativamente mayor ( $p < 0.01$ ) a las encontradas en todas las demás localidades (**Fig. 6**). Como una característica importante se debe destacar que hacia el norte y hacia el sur de San Quintín las concentraciones de Cu presentan una tendencia a la disminución. Los Ojitos, en el extremo sur del área de estudio, presentó una concentración (2.3  $\mu\text{g/g}$ ) significativamente menor ( $p < 0.01$ ) a todas las demás estaciones.

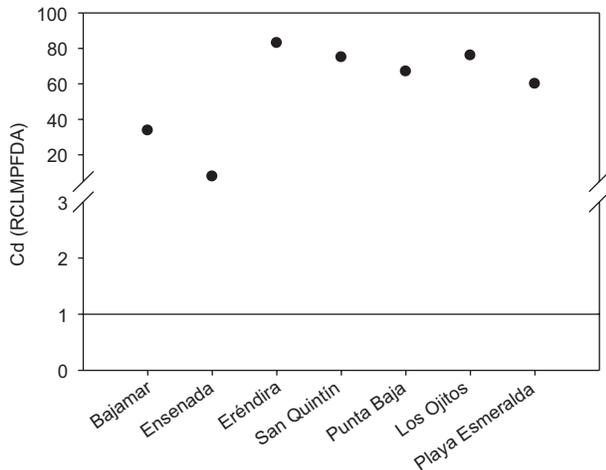
Por otro lado, la correlación entre la concentración de Cu y la concentración normalizada es significativa



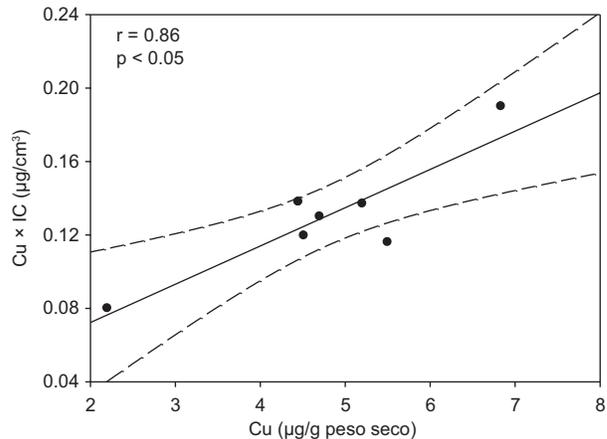
**Fig. 4.** Razón concentración-límite máximo permisible-Organización Mundial de la Salud (RCLMPOMS) de Cd en el área estudiada. La línea horizontal indica RCLMP = 1



**Fig. 6.** Variación espacial de la concentración de Cu en *M. californianus*. Cada punto representa la media de tres réplicas de 15 organismos y las barras verticales representan  $\pm 1$  desviación estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ )



**Fig. 5.** Razón concentración-límite máximo permisible-Food and Drug Administration (RCLMPFDA), de Cd en el área estudiada. La línea horizontal indica RCLMP = 1



**Fig. 7.** Análisis de correlación entre la concentración de Cu y la concentración de Cu normalizada por el índice de condición

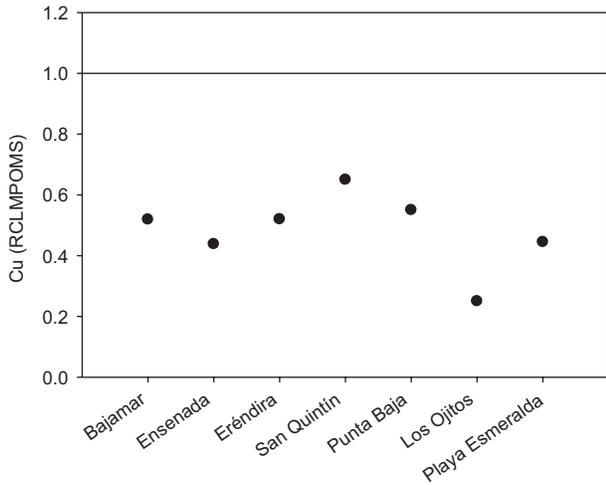
( $p < 0.05$ ,  $r = 0.86$ ; **Fig. 7**). Esto sugiere que la concentración de Cu encontrada en *M. californianus* es un buen reflejo de la concentración del mismo metal en el ambiente.

Todos los valores en la distribución espacial de la RCLMPOMS de Cu son menores a 1 (**Fig. 8**), lo que indica que la concentración de Cu no excede lo permitido por la OMS en el área de estudio. El valor más alto de la RCLMPOMS del Cu se presenta en San Quintín (0.68), disminuyendo hacia el norte y al sur, con la mínima RCLMPOMS en Los Ojitos (0.23). De igual manera, en el caso de la RCLMPFDA todos los valores fueron menores a 1 (**Fig. 9**).

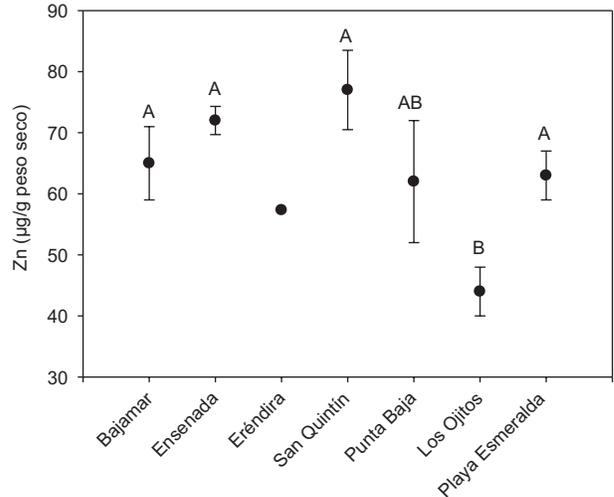
La distribución espacial de Zn en *M. californianus*

no presenta tendencias espaciales bien definidas (**Fig. 10**). La concentración más alta fue en San Quintín (77.0  $\mu\text{g/g}$ ) y la más baja en Los Ojitos (44.0  $\mu\text{g/g}$ ). La correlación entre la concentración de Zn y la concentración normalizada por el índice de condición de este elemento en *M. californianus* no fue significativa ( $p < 0.05$ ;  $r = 0.57$ ; **Fig. 11**), esto sugiere que la concentración de Zn encontrada en *M. californianus* fue afectada por factores ajenos a la concentración de este metal en el ambiente.

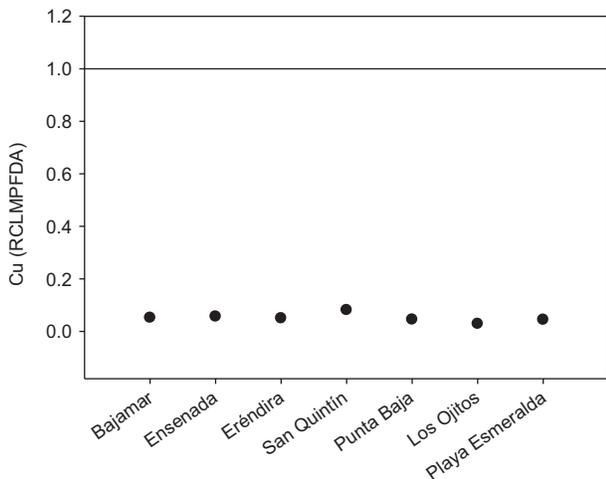
Todos los valores en las distribuciones espaciales de las RCLMPOMS (**Fig. 12**) y RCLMPFDA (**Fig. 13**) de Zn son menores a 1.



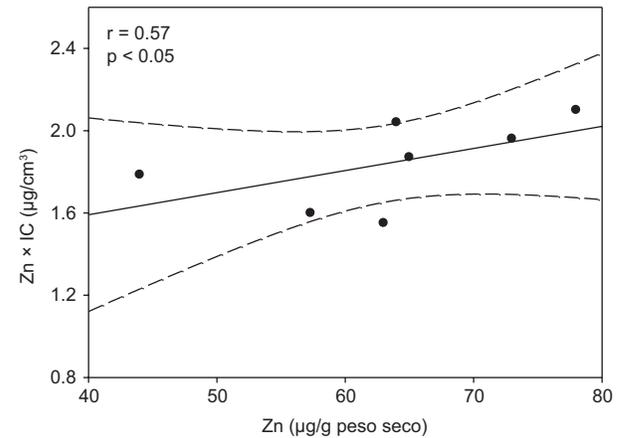
**Fig. 8.** Razón concentración-límite máximo permisible-Organización Mundial de la Salud (RCLMPOMS) de Cu en el área estudiada. La línea horizontal indica RCLMP = 1



**Fig. 10.** Variación espacial de la concentración de Zn en *M. californianus*. Cada punto representa la media de tres réplicas de 15 organismos y las barras verticales representan  $\pm 1$  desviación estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ )



**Fig. 9.** Razón concentración-límite máximo permisible-Food and Drug Administration (RCLMPFDA) de Cu en el área estudiada. La línea horizontal indica RCLMP = 1



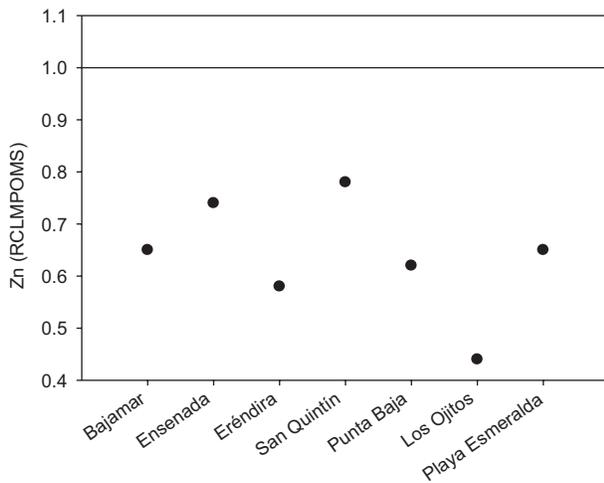
**Fig. 11.** Análisis de correlación entre la concentración de Zn y la concentración de Zn normalizada por el índice de condición

**DISCUSIÓN**

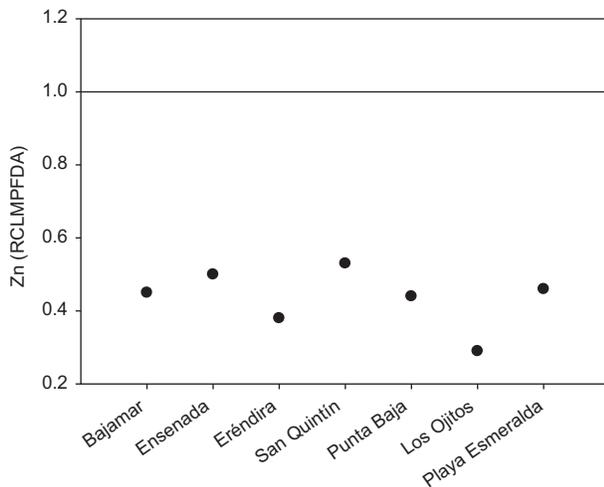
Las concentraciones de Cd en mejillones del área de estudio indican que la distribución espacial presenta dos regiones bien definidas: una región norte (Bajamar y Ensenada) con concentraciones significativamente bajas ( $p < 0.01$ ) y otra región centro-sur (Eréndira a Playa Esmeralda) con concentraciones significativamente altas ( $p < 0.01$ ; **Fig. 2**). La correlación significativa ( $p < 0.05$ ,  $r = 0.90$ ) entre la concentración de Cd y su concentración normalizada por el IC (**Fig. 3**), sugiere que la variabilidad de la concentración de Cd en *M.*

*californianus* es debida a la concentración del metal en el medio marino.

El ciclo biogeoquímico del Cd en el océano está estrechamente ligado con el de la materia orgánica y su distribución está dominada por su involucramiento en un ciclo de regeneración similar al de los fosfatos y nitratos (Knauer y Martin 1981). Debido a esto, las concentraciones máximas y mínimas del Cd en el medio marino de la Cuenca del Sur de California corresponden espacialmente con los máximos y mínimos de los nutrientes, respectivamente (Stephenson *et al.* 1979). En la zona costera de Baja California las altas concentraciones de Cd en el agua de mar están



**Fig. 12.** Razón concentración-límite máximo permisible-Organización Mundial de la Salud (RCLMPOMS) de Zn en el área estudiada. La línea horizontal indica RCLMP = 1



**Fig. 13.** Razón concentración-límite máximo permisible-Food and Drug Administration (RCLMPFDA) de Zn en el área estudiada. La línea horizontal indica RCLMP = 1

asociadas a fenómenos físicos como las surgencias (Segovia Zavala *et al.* 1998). Se ha encontrado que en esta misma zona las descargas de aguas residuales existentes en el sur de California (al norte del área de estudio), contribuyen sólo con el 1 % del Cd presente en el agua, mientras que los fenómenos físicos lo hacen con el 99 % (Sañudo-Wilhelmy y Flegal 1991, 1996). Además, se ha encontrado en el sur de la zona estudiada (Bahía Sebastián Vizcaíno), altas concentraciones de Cd en sedimentos superficiales que coinciden con una pluma de agua fría superficial derivada de un área de intensas surgencias costeras (Daesslé *et al.* 2000). Debido a lo anterior, las altas

concentraciones de Cd encontradas cerca de esta zona (Playa Esmeralda y Los Ojitos) podrían ser atribuidas a este mismo fenómeno. Es decir, como consecuencia de la asociación del Cd al ciclo de regeneración de la materia orgánica y a que en la zona de estudio se presentan surgencias intensas, es probable que las altas concentraciones de este metal en el área examinada tengan un origen natural y no antrópico. De manera similar, Muñoz-Barbosa *et al.* (2000), atribuyeron a las surgencias las concentraciones más altas de Cd en mejillones *M. californianus* en un sitio localizado entre las estaciones Ensenada y San Quintín de este estudio. Los altos niveles de Cd encontrados por estos autores en su trabajo son muy similares a las más altas concentraciones registradas en este estudio, por lo que el origen de lo encontrado aquí podría ser el mismo. Sin embargo, a pesar de la prevalencia de altas concentraciones de Cd en esta zona y de que éstas pudieran tener un origen natural (con excepción de Ensenada), los valores de las RCLMP de OMS y FDA encontradas en este trabajo son todas mayores a 1. Esto último indica que, aun cuando el Cd podría tener un origen natural, las concentraciones encontradas en los mejillones podrían representar un peligro para el consumo humano.

Los resultados del estudio indican que la concentración de Cu encontrada en San Quintín es significativamente mayor ( $p < 0.01$ ) a la detectada en las demás localidades de estudio (Fig. 6). Además, que la concentración de Cu y su concentración normalizada por el índice de condición (Fig. 7), presentan una correlación significativa entre ellas ( $p < 0.05$ ,  $r = 0.87$ ). Lo que sugiere, como en el caso del Cd, que *M. californianus* es un buen biomonitor de las concentraciones de Cu en el ambiente marino. Sin embargo, en la figura 7 se puede observar que el coeficiente de correlación significativo sugiere que lo anterior puede estar influenciado por los dos valores extremos, pues en el centro de la gráfica se encuentra un grupo de datos que por sí sólo no muestran linealidad alguna. Es decir, los dos datos extremos podrían estar produciendo una linealidad ficticia. En consecuencia, es probable que en este caso *M. californianus* no esté reflejando apropiadamente las concentraciones ambientales de Cu. Esto último está de acuerdo con lo encontrado para el mismo organismo y para la misma zona por Gutiérrez-Galindo y Muñoz-Barbosa (2001), en donde además de que las concentraciones de Cu son similares a las del presente trabajo, este metal tiene el menor coeficiente de correlación entre sus concentraciones cruda y normalizada por el índice de condición. Estos autores analizaron el Cu en *M. californianus* en un

lugar limpio y otro impactado antrópicamente en la Bahía Todos Santos y encontraron que este metal presentó alta variabilidad y no mostró diferencias significativas entre ambos lugares.

Phillips (1976) encontró que la asimilación de Cu por mejillones puede ser afectada por la salinidad, la temperatura y las interacciones con otros metales, causando incrementos o decrementos por asimilación o excreción de este metal. El mismo autor menciona que los resultados de su estudio no permiten distinguir los efectos que uno u otro factor tienen sobre la concentración de Cu en mejillones, por lo que concluye que es probable que la asimilación de Cu responda a muchas variables ambientales interactuantes. Como ya se mencionó, la normalización con respecto al índice de condición intenta eliminar los efectos de algunas de las variables, sin embargo, aun así podría haber variabilidad ajena a la producida por la concentración del metal en el medio, que no sea eliminada por la normalización. La correlación significativa, que indica la capacidad de organismo como bioindicador de Cu (**Fig. 7**), podría ser una observación errónea pues el coeficiente de correlación parece estar influenciado por dos valores extremos. Como consecuencia, cualquier conclusión basada en las concentraciones de Cu en este organismo debe ser tomada con precaución.

Los resultados muestran que ninguno de los valores de las RCLMPOMS o FDA de Cu resultó mayor a 1. Esto indica que, en relación con la concentración de Cu, el consumo de *M. californianus* de las localidades estudiadas no representa un riesgo para la salud humana.

El Zn es el cuarto metal más utilizado en los procesos productivos; debido a esto, las fuentes antrópicas superan los aportes naturales de este metal (Mirenda 1986). Kimbrough *et al.* (2008) señalan que como resultado de las actividades naturales y antrópicas el Zn se encuentra en todos los compartimentos ambientales (aire, agua, suelo y biota).

Los resultados de este estudio indican que la concentración de Zn en *M. californianus* no presenta una distribución espacial definida (**Fig. 10**). Además, la correlación entre la concentración de Zn y su concentración normalizada (**Fig. 11**) resultó ser no significativa ( $p > 0.05$ ,  $r = 0.57$ ). Lo que sugiere que el Zn encontrado en el tejido de *M. californianus* puede no ser debido a la concentración del metal en el medio natural. Esto muestra que a diferencia del Cd, para el cual *M. californianus* podría considerarse un buen biomonitor, en el caso del Zn sucede lo contrario, este organismo parece no reflejar de manera adecuada las concentraciones de este metal

en el ambiente marino. El Zn es un micronutriente esencial para los organismos marinos, por lo que su asimilación y acumulación en el tejido del mejillón puede depender de los requerimientos del mismo en un momento dado. Es decir, se puede presentar biorregulación del metal, de tal forma que su concentración dependerá más de la fisiología del organismo que de la concentración del metal en el ambiente que lo rodea (Muñoz-Barbosa *et al.* 2000). Debido a lo anterior, cualquier conclusión basada en las concentraciones de Zn en este organismo deberá ser tomada con precaución.

Un factor adicional, que podría tener como consecuencia las altas concentraciones de metales (en particular Cu y Zn) en San Quintín y las áreas aledañas, es la actividad agrícola en la zona. Se ha encontrado que la fertilización continua con químicos a base de fosfatos podría incrementar el contenido de Cu y Zn aumentando los niveles naturales de éstos en los suelos, con lo que se podría provocar su transferencia a la cadena alimenticia humana o a ecosistemas adyacentes (Giuffré de López Camelo *et al.* 1997). En el valle de San Quintín la principal actividad económica es la agricultura comercial. De 1977 a 1985, el incremento de la superficie hortícola de riego tuvo una tasa de crecimiento del 15.4 % y en los últimos cuatro años de ese periodo el crecimiento medio anual alcanzó una tasa cercana al 20 %. Para principios de los años 90, el principal cultivo fue el tomate, ocupando un 60 % de la superficie en producción (Anguiano 1991). En la actualidad, el valle de San Quintín es una de las zonas agrícolas más importantes del noroeste de México (León-López *et al.* 2002). Debido a la industria agrícola existente en San Quintín, el uso de grandes cantidades de fertilizantes comerciales que contienen metales se ha extendido. Esto sugiere que el uso masivo de fertilizantes puede resultar en su transporte eólico y/o por escurrimientos hacia el océano adyacente provocando lo que parece ser una anomalía en la concentración de metales en los mejillones de la región. Sin embargo, lo anterior, no puede ser confirmado debido que no se cuenta con datos confiables sobre las cantidades y tipos de fertilizantes usados, ni se tiene información en esta región sobre los flujos (atmosféricos o por escurrimientos) de los residuos de estos fertilizantes hacia el océano.

Por otro lado, los resultados de este estudio muestran que la concentración más alta de Zn encontrada en San Quintín tiene RCLMPOMS (**Fig. 12**) y RCLMPFDA (**Fig. 13**) inferiores a 1. Lo que indica que las concentraciones de Zn en *M. californianus* no son peligrosas para el consumo humano.

## CONCLUSIONES

A pesar de que ninguna de las concentraciones de Cu y Zn encontradas en *Mytilus californianus* representan peligro para el consumo humano, los altos valores de Cd por sí solos son suficientes para sugerir que se evite el consumo excesivo de mejillones colectados en la zona estudiada. En todas las localidades examinadas las concentraciones de Cd excedieron los límites máximos permisibles (LMP) propuestos por la Organización Mundial de la Salud y la administración de alimentos y drogas de EUA. Además, los resultados indican que el mejillón *Mytilus californianus* es mejor bioindicador de Cd que de Cu y Zn.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero recibido por la 13va. Convocatoria Interna emitida por la Coordinación de Posgrado e Investigación de la Universidad Autónoma de Baja California (Código 0601). Muñoz-Barbosa, A. fue beneficiario de una beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT). Se agradecen los comentarios de los revisores anónimos que fueron de gran utilidad para el mejoramiento del estudio.

## REFERENCIAS

- Boyden C. R. (1977). Effect of size upon metal content of shellfish. *J. Mar. Biol.* 5, 675-714.
- Carlucci A.F., Eppley R.W., y Beers J.R. (1986). Introduction to the Southern California Bight. En: Lecture notes on coastal and estuarine studies: Plankton Dynamics of the Southern California Bight (R.W. Eppley, Ed.). Springer-Verlag, Nueva York, pp.1-12.
- Coleman N. (1980). The effect of emersion on cadmium accumulation by *Mytilus edulis*. *Mar. Pollut. Bull.* 11, 359-362.
- Daesslé L. W., Carriquiry J. D., Navarro R. y Villaescusa Celaya J. A. (2000). Geochemistry of surficial sediments from Sebastián Vizcaíno Bay, Baja California. *J. Coastal. Res.* 16, 133-1145.
- Dailey M.O., Anderson J.W., Reish D.J. y Gorsline D.S. (1993). The California Bight: Background and setting. En: Ecology of Southern California Bight: A synthesis and interpretation (M.D. Dailey, D.J. Reish y J.W. Anderson, Ed.). UC Press, California, pp.1-18.
- FDA (2001). Fish and fisheries products hazards and controls guidance, US Food and Drug Administration Department of Health and Human Services, Public Health Service, 3<sup>a</sup> ed. Maryland, EUA, pp. 326.
- Phillips D. J. H. (1980). Quantitative aquatic biological indicators. Applied Science Publishers LTD, Essex, Inglaterra, pp. 488.
- Fisher H. (1983). Shell weight as an independent variable in relation to cadmium content of molluscs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 12, 59-75.
- Giuffré de López Camelo L., Ratto de Miguez S. y Marbán L. (1997). Heavy metals input with phosphate fertilizers used in Argentina. *Sci. Total. Environ.* 204, 245-250.
- Gutiérrez Galindo E. A. y Muñoz Barbosa A. (2001). Short-term temporal variability of Ag, Cd and Cu in *Mytilus californianus* and the effectiveness of this organism as a bioindicator. *Cienc. Mar.* 27, 269-288.
- Gutiérrez Galindo E. A. y Muñoz Barbosa A. (2003). Geographic variability of the concentration of Hg, Co, Fe and Ni in mussels *Mytilus californianus* (Conrad, 1837) from the coast of Baja California. *Cienc. Mar.* 29, 21-34.
- Kimbrough K. L., Johnson W. E., Lauenstein G. G., Christensen J. D., Apeti D. A. (2008). Una evaluación de dos décadas de control de los contaminantes en la zona costera de la nación. NOAA National Status & Trends Mussel Watch. Silver Spring, EUA. 105 pp.
- Knauer G. A. y Martin J. H. (1981). Phosphorus-cadmium cycling in northeast pacific waters. *J. Mar. Res.* 39, 66-76.
- Lares M. L. y Orians K. S. (1997). Natural Cd and Pb variations in *Mytilus californianus* during the upwelling season. *Sci. Total. Environ.* 197, 177-195.
- Latouche Y. D. y Mix M. C. (1982). The effect of depuration, size and sex on trace metals levels in bay mussels. *Mar. Pollut. Bull.* 13, 27-29.
- Lobel P. B., Belkhole S. P., Jackson S. E. y Longerich H. P. (1991). Improved protocol for collecting mussel watch specimens taking into account sex, size, condition, shell shape, and chronological age. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 21, 409-414.
- Lobel P. B. y Wright D. A. (1982). Gonadal and non gonadal zinc concentrations in mussels. *Mar. Pollut. Bull.* 13, 329-323.
- Lynn R.J., Bliss A. y Eber L.E. (1982). Vertical and horizontal distribution of seasonal mean temperature, salinity, sigma-t, stability, dynamic height, oxygen and oxygen saturation in the California Current 1950-1978. *Calcofi. Atlas* 30, 513-535.
- Mearns A.J. (1973). Southern California inshore demersal fishes: diversity, distribution and disease as response to environmental quality. California Cooperative Fisheries Report XVII, 141-148.
- Mirenda R. J. (1986). Acute toxicity and accumulation of zinc in the crayfish *Orconectes virilis* (Hagen). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 37, 387-394.

- Muñoz Barbosa A., Gutiérrez Galindo E. A. y Flores Muñoz G. (2000). *Mytilus californianus* as an indicator of heavy metal on the northwest coast of Baja California, Mexico. *Mar. Pollut. Bull.* 48, 587-603.
- Nishikawa Kinomura K. A., Gutiérrez Galindo E. A., Sañudo Wilhelmy S. A., Flores Muñoz G., Martin M. y Stephenson M. D. (1988). Marine pollution in the central southern California bight adjacent to the American-Mexican border zone. *Rev. Int. Ocean. Med.* 91, 125-150.
- OMS (1982). Toxicological evaluation of certain food additives and contaminants. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, WHO Food Additives Series N° 17, World Health Organization, Geneva, pp 28-35.
- Oullette T. R. (1981). Seasonal variations of trace metals in the mussel *Mytilus californianus*. *Environ. Conserv.* 81, 53-58.
- Pérez Morga N. (2004). Características de la circulación y dispersión de contaminantes frente al arroyo El Gallo en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Baja California, México.
- Phillips D. J. H. (1976). The common mussel *Mytilus edulis* as an indicator of pollution by zinc, cadmium, lead and copper. Effect of environmental variables on uptake of metals. *Mar. Biol.* 38, 59-69.
- Phillips D. J. H. (1980). Quantitative aquatic biological indicators. Applied Science Publishers LTD, Essex, Inglaterra, pp. 488.
- Ramírez Gutiérrez S.C. (2005). Asentamiento y dispersión de *Mytilus galloprovincialis* y *Mytilus californianus* en condiciones naturales y de laboratorio. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Baja California, México.
- Sañudo S. A. y Flegal A. R. (1991). Trace elements distributions in coastal water along the US-Mexican boundary: Relative contributions of natural processes vs anthropogenic inputs. *Mar. Chem.* 33, 371-392.
- Sañudo S. A. y Flegal A. R. (1996). Trace metal concentrations in the surf zone in coastal waters off Baja California. *Environ Sci. Technol.* 30, 1575-1580.
- Segovia Zavala J. A., Delgadillo Hinojosa F. y Alvarez Borrego S. (1998). Cadmium in the coastal upwelling area adjacent to the California-Mexico Border. *Estuar. Coast. Shelf. S.* 46, 475-481.
- Schiff K. C. y Gosset R. W. (1998). Southern California Bight 1994 pilot project III. Sediment chemistry. California, EUA. 63 pp.
- Steinberg A. y Stein E. D. (2004). Effluent discharges on the southern California Bight from large municipal waste water treatment facilities in 2001 and 2002. California, EUA. 15 pp.
- Stephenson M. D., Martin M., Lange S. E., Flegal A. R y Martin J. H. (1979). Trace metal concentration in the California mussel *Mytilus californianus*. California state mussel watch. Water Quality Monitoring Report. 8, 22-45.