

*Mytilus californianus* transplantados como bioindicadores de surgencia a dos zonas en  
Baja California, México

*Mytilus californianus* transplanted as upwelling bioindicators to two areas off  
Baja California, Mexico

J.A. Segovia-Zavala\*  
F. Delgadillo-Hinojosa  
R. Vidal-Talamantes  
A. Muñoz-Barbosa  
E.A. Gutiérrez-Galindo

Instituto de Investigaciones Oceanológicas  
Universidad Autónoma de Baja California  
Apartado postal 453  
Ensenada, CP 22800, Baja California, México  
\*E-mail: [jsegovia@uabc.mx](mailto:jsegovia@uabc.mx)

Recibido en mayo de 2003; aceptado en septiembre de 2003

## Resumen

Con el objetivo de estudiar la variabilidad espacial y temporal de cadmio biodisponible se transplantaron mejillones *Mytilus californianus* de una zona control a dos zonas de surgencia adyacentes a la región costera fronteriza México-EUA. Los mejillones se colocaron a 5 y 15 m de profundidad utilizando sistemas de flotación, en dos estaciones seleccionadas por su distinta intensidad de surgencia. Regularmente se recolectaron muestras de mejillones en periodos de surgencia (abril a septiembre) y de no surgencia (enero a marzo). La localidad de Punta Banda se caracterizó por eventos de surgencia intensa con temperaturas medias mensuales de  $13.00 \pm 1.83^\circ\text{C}$  y disminuciones abruptas de temperatura hasta los  $9.7^\circ\text{C}$ , mientras que en las Islas Coronado las surgencias fueron menos intensas con temperatura media mensual de  $16.33 \pm 2.15^\circ\text{C}$  y disminuciones abruptas de temperatura hasta los  $11.0^\circ\text{C}$ . Las concentraciones medias de Cd en el tejido blando fueron mayores en los mejillones trasplantados a Punta Banda ( $17.23 \pm 1.89 \mu\text{g g}^{-1}$  peso seco) que en los trasplantados a Islas Coronado ( $9.86 \pm 1.37 \mu\text{g g}^{-1}$  peso seco). El análisis de correlación mostró que la concentración de Cd en los mejillones de Punta Banda ( $r = 0.91$ ) e Islas Coronado ( $r = 0.75$ ) está asociada con el índice de surgencia de Bakun. Estos resultados sugieren que el proceso de surgencia juega un papel muy importante en controlar el contenido de Cd en *M. californianus* en la región noroccidental de Baja California. Los resultados de este trabajo sugieren que los mejillones transplantados son excelentes bioindicadores del fenómeno de surgencia.

*Palabras clave:* *Mytilus californianus*, cadmio, surgencia, bioindicador, Pacífico mexicano.

## Abstract

To study the spatial and temporal variability of bioavailable Cd, mussels (*Mytilus californianus*) were transplanted from a control zone to two upwelling areas off the northwestern coast of Baja California, Mexico. The mussels were placed at 5 and 15 m depth on buoy systems, at two sites selected for their different upwelling intensity. Punta Banda is characterized by intense upwelling events, with mean monthly temperatures of  $13.00 \pm 1.83^\circ\text{C}$  and abrupt drops in temperature to  $9.7^\circ\text{C}$ , whereas upwelling off the Coronado Islands is less intense and mean monthly temperatures are  $16.33 \pm 2.15^\circ\text{C}$ , with abrupt drops in temperature to  $11.0^\circ\text{C}$ . Mussel samples were collected regularly during upwelling (April to September) and non-upwelling periods (January to March). Mean Cd concentrations in soft tissue of transplanted mussels were higher at Punta Banda ( $17.23 \pm 1.89 \mu\text{g g}^{-1}$  dry weight) than at Coronado Islands ( $9.86 \pm 1.37 \mu\text{g g}^{-1}$  dry weight). The analysis of correlation showed that the concentration of Cd in mussels from Punta Banda ( $r = 0.91$ ) and Coronado Islands ( $r = 0.75$ ) is related to the Bakun upwelling index. These results suggest that upwelling plays an important role in controlling Cd content in *M. californianus* from northwestern Baja California. Transplanted mussels proved to be excellent bioindicators of upwelling.

*Key words:* *Mytilus californianus*, cadmium, upwelling, bioindicator, Mexican Pacific.

## Introducción

Los mejillones han sido utilizados como indicadores de la biodisponibilidad de los metales en el medio ambiente. Organismos marinos como los mejillones pueden bioacumular metales a partir de su alimento y del agua de mar en concentraciones que exceden considerablemente las registradas en el ambiente, reflejando condiciones ambientales pasadas (Dunstan *et al.*, 1980; Gutiérrez-Galindo y Muñoz-Barbosa, 2001; Lares *et al.*, 2002). Esta característica de los mejillones puede ser utilizada indirectamente para identificar fenómenos físicos como las surgencias que se presentan intensamente en las costas de California y Baja California, mismas que son responsables de un aporte significativo de nutrientes y metales que provocan una elevada productividad de las aguas costeras de esta región.

En las costas de Baja California los eventos de surgencia ocurren durante todo el año, pero son más intensos durante primavera y verano (Barton y Argote, 1980; Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982). Enriquecimientos de cadmio (Cd) disueltos en las aguas costeras de la frontera México-EUA y del sur de California, han sido explicados por procesos físicos de surgencia y advección costera (Bruland, 1980; Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1991; Segovia-Zavala *et al.*, 1998). Knauer y Martin (1981) encontraron altas concentraciones de Cd en plancton frente a Baja California, y esto lo atribuyeron al transporte de grandes cantidades de Cd a la superficie debido a pronunciados eventos de surgencia. Asimismo, algunos trabajos realizados acerca del Cd en mejillones residentes del litoral de Baja California han mostrado que el Cd en el tejido blando de estos organismos presenta un gradiente con valores altos en el sur y menores en el norte, lo cual puede ser atribuido a la intensidad de los eventos de surgencias costeras en la zona (Muñoz-Barbosa *et al.*, 2000; Gutiérrez-Galindo y Muñoz-Barbosa, 2001; Lares *et al.*, 2002). Sin embargo, no ha sido investigada a fondo la variabilidad espacial y temporal del Cd biodisponible, en mejillones trasplantados a la región fronteriza donde existen surgencias e influencia antropogénica (Segovia-Zavala *et al.*, 1995; Segovia-Zavala *et al.*, 1998). En la presente investigación se realizó un experimento de trasplante de mejillones *Mytilus californianus* a dos zonas con diferentes potenciales de aporte de Cd proveniente de surgencias. La intención fue aprovechar la capacidad de los mejillones para registrar la biodisponibilidad de metales, e identificar indirectamente el fenómeno de surgencia. Esta característica resulta en una ventaja cuantitativa de los mejillones sobre el análisis de metales en sedimento y agua. Así, el objetivo del presente trabajo es contribuir al conocimiento de la variabilidad espacial y temporal del Cd biodisponible en *M. californianus* trasplantados a dos zonas de surgencia en la región noroccidental de Baja California.

## Área de estudio

El área de estudio se localiza en la costa noroccidental de Baja California, México, entre las latitudes 31°43'50" y

## Introduction

Mussels have been used for several years as indicators of metal bioavailability in the environment, as they are able to bioaccumulate trace metals from food and seawater in concentrations that significantly exceed those found in the environment, reflecting past environmental conditions (Dunstan *et al.*, 1980; Gutiérrez-Galindo and Muñoz-Barbosa, 2001; Lares *et al.*, 2002). This characteristic of the mussels can be used to indirectly identify physical phenomena such as upwelling, which occurs off the coasts of California and Baja California and is responsible for the significant input of nutrients and metals that cause high productivity in the coastal waters of the region.

Upwelling events occur throughout the year off the coasts of Baja California, but are more intense in spring and summer (Barton and Argote, 1980; Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego, 1982). Dissolved cadmium (Cd) enrichments in coastal waters off southern California and the US-Mexico border region have been related to coastal advection and upwelling processes (Bruland, 1980; Sañudo-Wilhelmy and Flegal, 1991; Segovia-Zavala *et al.*, 1998). Knauer and Martin (1981) recorded high concentrations of Cd in plankton off Baja California, which they attributed to the transportation of large amounts of Cd to the surface by intense upwelling. Studies on mussels from Baja California have shown that Cd in soft tissues presents a gradient with high values to the south and low to the north, also associated with the intensity of upwelling events (Muñoz-Barbosa *et al.*, 2000; Gutiérrez-Galindo and Muñoz-Barbosa, 2001; Lares *et al.*, 2002). However, the spatial and temporal variability of bioavailable Cd in mussels transplanted to the border region, affected by upwelling and anthropogenic discharges (Segovia-Zavala *et al.*, 1995; Segovia-Zavala *et al.*, 1998), needs to be investigated further. In this study, mussels (*Mytilus californianus*) were transplanted to two areas with different Cd input associated with upwelling, making use of their ability to record the bioavailability of metals to indirectly identify this phenomenon. This characteristic results in a quantitative advantage of mussels over the analysis of metals in sediment and water. The objective of the present work is to contribute to the knowledge of the spatial and temporal variability of bioavailable Cd in *M. californianus* transplanted to two upwelling regions off northwestern Baja California.

## Study area

The study area is located off the northwestern coast of Baja California, Mexico (31°43'50"–32°22'30" N, 116°43'45"–117°14'00" W), and extends from the US-Mexico border to Punta Banda, approximately 110 km further south (fig. 1). The climate of this coastal region is Mediterranean, with warm, dry summers and cold, wet winters (Carlucci *et al.*, 1986). This area is within the southern section of the hydrodynamically complex oceanographic region known as Southern California

32°22'30" N y entre las longitudes 116°43'45" y 117°14'00" W. Geográficamente se extiende desde la frontera México-Estados Unidos de América (EUA) hasta Punta Banda, Baja California (110 km al sur de la frontera México-EUA; fig. 1). El clima de esta región costera es de tipo mediterráneo con veranos secos y cálidos e inviernos húmedos y fríos (Carlucci *et al.*, 1986). Esta zona se encuentra dentro de la sección sur de la región oceanográfica conocida como Cuenca del Sur de California y cuya hidrodinámica es compleja. El patrón general de circulación sigue al del Sistema de la Corriente de California, con transporte hacia el sur (Lynn y Simpson, 1987). En la costa de Baja California ocurren eventos de intensificación y relajación de surgencias durante primavera y verano (Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982). Estos eventos son un importante mecanismo de transporte de metales (Bruland, 1980) y producen fuertes gradientes superficiales sobre la plataforma continental (Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1991; Segovia-Zavala *et al.*, 1998).

## Materiales y métodos

### Ubicación de estaciones

En este estudio se seleccionaron dos sitios para el trasplante (fig. 1). La primera estación se ubicó 10 km al sur de la frontera México-EUA, en la zona sur de las Islas Coronado (ICO; 32°22'30" N y 117°14'00" W). La segunda estación se situó 110 km al sur de la frontera México-EUA, frente a Punta Banda (PBA; 31°43'50" N y 116°43'45" W). La posición de estos dos sitios fue elegida debido a que en ambos el fenómeno de surgencia ocurre con diferente intensidad.

### Trasplante y recolección de organismos

Se recolectaron mejillones de *M. californianus* en Eréndira, Baja California, ubicada 165 km al sur de la frontera México-EUA (fig. 1). Estudios previos han reportado bajas concentraciones de metales traza en *M. californianus* de esta región, las cuales han sido consideradas como los niveles naturales o más bajos de la zona costera de Baja California (Martin *et al.*, 1988). Los organismos se transportaron a los sitios de interés y se colocaron en sistemas de flotación (fig. 1) de acuerdo con Stephenson *et al.* (1979). Los muestreos de *M. californianus* se realizaron de abril a septiembre de 1989 (periodo de surgencia), y de enero a marzo de 1990 (periodo de no surgencia) (Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982). En cada muestreo se recolectaron 70 organismos de cada profundidad (5 y 15 m), debido a que con un número mayor a 30 se obtiene la máxima resolución en términos de concentración del metal (Gordon *et al.*, 1980). Los organismos fueron almacenados en bolsas de polietileno y conservados a -20°C para su posterior análisis en el laboratorio.

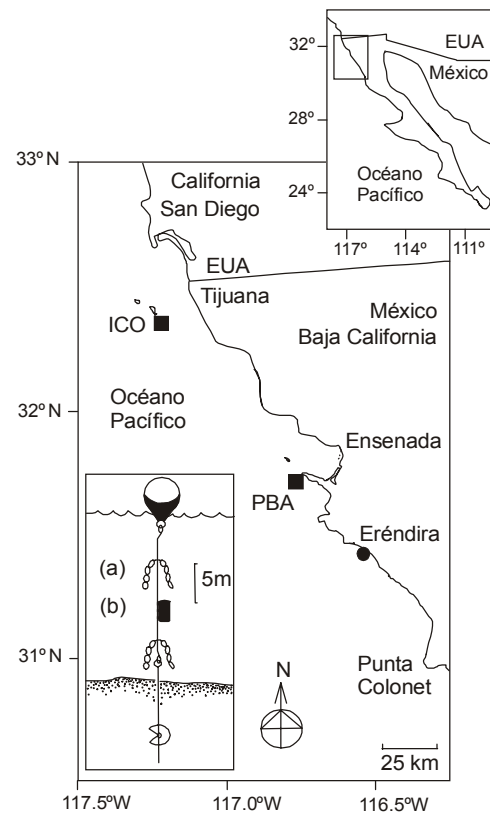
Las condiciones de surgencia se evidenciaron colocando un termógrafo a 10 m de profundidad, el cual registró las temperaturas *in situ* cada hora durante todo el estudio (fig. 1). Se utilizaron termógrafos Peabody Ryan, modelo J90.

Bight. The general circulation pattern is that of the California Current System, with a southward flow (Lynn and Simpson, 1987). Upwelling intensification and relaxation events occur off the coast of Baja California in spring and summer (Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego, 1982). These events are an important mechanism of metal transport (Bruland, 1980) and produce strong surface gradients along the continental shelf (Sañudo-Wilhelmy and Flegal, 1991; Segovia-Zavala *et al.*, 1998).

## Material and methods

### Sampling sites

Two sites (fig. 1) were selected for the transplant experiment. The first is located off the southern part of the Coronado Islands (ICO), 10 km to the south of the US-Mexico border (32°22'30" N, 117°14'00" W), and the second off Punta



**Figura 1.** Área de estudio y localización de las estaciones de muestreo (■): Islas Coronado (ICO) y Punta Banda (PBA). Eréndira (●) es la zona control de donde se tomaron los mejillones para su trasplante. La figura insertada representa el sistema de flotación para los trasplantes (a = mejillones y b = termógrafo). El termógrafo se instaló a 10 m de profundidad en cada una de las estaciones.

**Figure 1.** Study area and location of the two sampling sites (■): Coronado Islands (ICO) and Punta Banda (PBA). Eréndira (●) is the control zone from where the mussels were collected to be transplanted. The insert shows the buoy system used for the transplant experiment (a = mussels and b = thermograph). The thermograph was installed at 10 m depth at both sites.

### Disección y características biométricas

Los mejillones se descongelaron y lavaron con agua desionizada para remover la arena y epibiota presente. Por cada sitio y profundidad se tomaron 45 mejillones de tallas entre 55 y 70 mm para minimizar la variabilidad en la concentración del metal debida a la talla (Boyden, 1977; Cossa *et al.*, 1980). Cada una de las muestras se separó en tres submuestras de 15 organismos. Posteriormente, los organismos fueron medidos con un vernier y disectados con un bisturí para separar músculo y gónadas. Las gónadas se extrajeron y eliminaron para minimizar las variaciones estacionales de peso del tejido blando debidas al estado reproductivo (Cossa *et al.*, 1989). El músculo o tejido blando de cada una de las muestras fue transferido a un recipiente de polipropileno para registrar su peso y determinar su índice de condición (IC = peso del tejido húmedo sin gónada/longitud del organismo). Al final, la muestra con el tejido de los 15 organismos fue homogeneizada con una licuadora Virtis equipada con aspas de titanio. La obtención del peso seco de cada muestra se realizó secando 5 g de tejido en un horno a 70°C durante 72 h.

### Digestión

La digestión de las muestras para la determinación del Cd en *M. californianus* se realizó de acuerdo al método modificado de Stephenson *et al.* (1979). Se tomaron de 4 a 5 g del homogeneizado húmedo y se colocaron en un vaso de precipitado con 25 mL de HNO<sub>3</sub> grado metal traza (*trace metal analysis*, LOT M40052); se cubrieron con un vidrio reloj y se dejaron a temperatura ambiente durante una noche. Al siguiente día, la muestra se calentó hasta 50°C durante 2 h y se dejó enfriar durante 20 min, repitiendo esta operación hasta que el tejido se encontró en solución. Posteriormente, la muestra se colocó en reflujo por 6 h a 70°C y se dejó secar. A continuación se agregó 1 mL de agua desionizada y la muestra fue evaporada lentamente. Finalmente, se le adicionaron 20 mL de HNO<sub>3</sub> al 1% y la solución se transfirió a un frasco de polipropileno de 30 mL.

### Análisis de los metales

El análisis del Cd se realizó con un espectrofotómetro de absorción atómica Thermo Jarrel Ash 12 y la determinación se realizó a la flama de aire-acetileno. Las concentraciones de metal se reportan en microgramos por gramo de peso seco ( $\mu\text{g g}^{-1}$  ps). Se evaluó la calidad analítica del método procesando un blanco y una muestra de tejido de ostión (SRM# 15669) del National Institute of Standards and Technology por cada grupo de 15 submuestras (tabla 1).

### Procesamiento y análisis estadístico

A los datos de concentración de Cd, longitud del mejillón, índice de condición y temperatura del agua se les determinó

Banda (PBA), 110 km to the south of the border (31°43'50" N, 116°43'45" W). These two sites were chosen because upwelling occurs with different intensity.

### Transplant and collection of organisms

Mussels (*M. californianus*) were obtained from Eréndira, Baja California, located 165 km to the south of the US-Mexico border (fig. 1). Previous studies have reported low concentrations of trace metals in *M. californianus* from this area and they are considered to be the natural or lowest levels for the coast of Baja California (Martin *et al.*, 1988). The organisms were transported to the two sampling sites and suspended at 5 and 15 m depth from buoy systems (fig. 1), according to Stephenson *et al.* (1979). Mussel samples were collected from April to September 1989, an upwelling period, and from January to March 1990, a non-upwelling period (Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego, 1982). During each sampling, 70 organisms were collected per depth, because maximum resolution in terms of metal concentration is obtained with more than 30 specimens (Gordon *et al.*, 1980). The samples were placed in polyethylene bags and frozen at -20°C until further analysis in the laboratory.

To determine upwelling conditions, thermographs (Peabody Ryan, model J90) were installed at 10 m depth (fig. 1), which recorded *in situ* temperature every hour throughout the study.

### Dissection and biometric characteristics

Mussels were thawed and rinsed with deionized water to remove sand and epibiota. To minimize the variability in metal concentration due to size (Boyden, 1977; Cossa *et al.*, 1980), 45 mussels from each site and depth were used, ranging in size from 55 to 70 mm. Each sample was divided into three subsamples of 15 organisms. The organisms were then measured with vernier callipers and dissected with a scalpel to separate the muscle and gonads. The gonads were removed and discarded to minimize seasonal variations in soft tissue weight due to the reproductive stage (Cossa *et al.*, 1989). The muscle or soft tissue from each sample were transferred to a polypropylene container to record the weight and determine the condition index (IC = wet tissue weight without gonad/length of the organism). The sample with the tissue of the 15 organisms was homogenized in a Virtis homogenizer equipped with titanium blades. Finally, 5 g of tissue were dried in an oven at 70°C for 72 h to obtain the dry weight of each sample.

### Digestion

Digestion of the samples to determine Cd in *M. californianus* was carried out according to the modified method of Stephenson *et al.* (1979): 4–5 g of the homogenized sample were placed in a beaker with 25 mL of HNO<sub>3</sub> trace metal grade (LOT M40052), covered with a watch glass, and

media y error estándar para obtener los valores de tendencia central y dispersión en los sitios de muestreo. Para obtener el grado de asociación entre las variables se aplicó un análisis de correlación.

La concentración de Cd en *M. californianus* fue normalizada con respecto al índice de condición de los mejillones. La normalización consiste en multiplicar la concentración de cada metal por este índice. Esta normalización disminuye la variabilidad de los datos debido a que se reducen los efectos de factores externos tales como temperatura, salinidad y posición en la columna de agua y los debidos al estado nutricional de los mejillones (Lares-Reyes, 1988; Lares y Oriens, 1997; Gutiérrez-Galindo y Muñoz-Barbosa, 2001; Lares *et al.*, 2002). La concentración de Cd normalizada por el índice de condición se representó como  $Cd \times IC$  ( $\mu\text{g Cd cm}^{-1}$  ps).

En este trabajo se utilizó el índice de surgencia de Bakun como una medida de la intensidad de surgencia en el área de estudio y se correlacionó con la concentración normalizada de los metales medidos en los mejillones. Los índices de Bakun reportados son específicos para el periodo de estudio y las unidades están en  $\text{m}^3/\text{s}/100$  m de línea de costa. Para ICO se eligió el índice de San Diego, California (33°N), y para PBA se interpoló entre San Diego y Cabo Colonet (30°N). Estos índices pueden consultarse en [http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell\\_menu\\_NA.html](http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell_menu_NA.html).

## Resultados

La figura 2 muestra las series de tiempo de la temperatura a 10 m de profundidad de abril a septiembre de 1989 en PBA, y de abril a diciembre de 1989 en ICO. Las series de tiempo de ambas localidades muestran claramente los eventos de surgencia caracterizados por la disminución abrupta de la temperatura. En ambas localidades de abril a julio se presentan las temperaturas más bajas, apreciándose para PBA periodos y pulsos con decrementos de temperatura por debajo de los 12°C, caracterizados por disminuciones hasta los 9.9°C y 9.7°C durante mayo y julio (fig. 2), respectivamente. Sin embargo, para la serie de tiempo de ICO, los periodos de baja temperatura por debajo de los 12°C son menos que los de PBA y los cambios abruptos de temperatura sólo llegan hasta los 11.5°C, ocurriendo éstos durante mayo, junio y julio (fig. 2). Los registros de bajas temperaturas tuvieron duraciones entre 4 y 11 días.

La figura 3 presenta el comportamiento de la temperatura media mensual de abril a septiembre de 1989 en PBA y de abril a diciembre de 1989 en ICO. En general, la temperatura de ambos sitios de muestreo mostró una variación estacional con aguas más calidas durante los meses de verano y aguas más frías en los meses de otoño y primavera. También se observó que la temperatura media mensual en PBA fue aproximadamente 4°C menor que la registrada en ICO, indicando que durante este estudio prevalecieron las condiciones de surgencia en PBA. Así, las temperaturas medias durante el periodo de

**Tabla 1.** Análisis del material de referencia, tejido de ostión SRM # 15669, certificado por el National Institute of Standards and Technology (media  $\pm$  intervalo de confianza al 95%).

**Table 1.** Analysis of the reference material, oyster tissue SRM # 15669, certified by the National Institute of Standards and Technology (mean  $\pm$  95% confidence interval).

| Metal | Medido en este trabajo<br>( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) | Certificado<br>( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) |
|-------|--|---|
| Cd    | $4.2 \pm 0.08$                                     | $4.5 \pm 0.38$                          |

left overnight at room temperature. The next day, the sample was heated at 50°C for 2 h and allowed to cool for 20 min, repeating this operation until the tissue dissolved. The sample was refluxed for 6 h at 70°C and allowed to dry; 1 mL of deionized water was then added and the sample was slowly evaporated. Finally, 20 mL of HNO<sub>3</sub> (1%) were added and the solution was transferred to a 30-mL polypropylene flask.

### Metal analysis

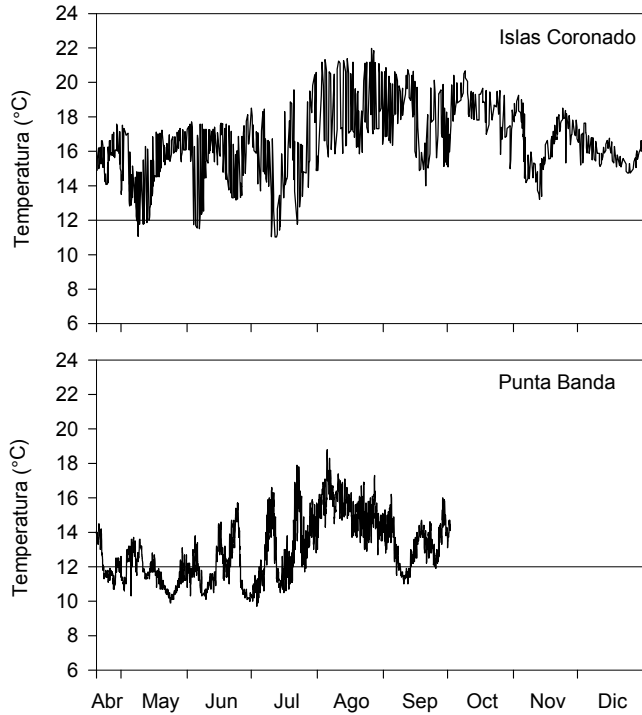
Cadmium was analyzed with a Thermo Jarrel Ash 12 atomic absorption spectrophotometer and determined by air-acetylene flame. The concentrations of Cd are given in micrograms per gram of dry weight ( $\mu\text{g g}^{-1}$  dw). The analytical quality of the method was evaluated by processing a blank and an oyster tissue sample (SRM # 15669) of the National Institute of Standards and Technology for each subsample (table 1).

### Processing and statistical analysis

We calculated the mean value and standard error of Cd concentration, mussel length, condition index and water temperature to determine the central tendency and dispersion at the sampling sites. A correlation analysis was applied to obtain the degree of association between the variables.

The concentration of Cd in *M. californianus* was normalized relative to the condition index of the mussels:  $Cd \times IC$  ( $\mu\text{g Cd cm}^{-1}$  dw). This normalization decreases the variability of the data by reducing the effects of external factors such as temperature, salinity and position in the water column, and of the nutritional state of the mussels (Lares-Reyes, 1988; Lares and Oriens, 1997; Gutiérrez-Galindo and Muñoz-Barbosa, 2001; Lares *et al.*, 2002).

The Bakun index was used as a measure of upwelling intensity in the study area and was correlated with the normalized concentration of the metals measured in the mussels. The Bakun upwelling indices reported are specific to the study period and are given in  $\text{m}^3/\text{s}/100$  m of coastline. The San Diego, California (33°N), index was chosen for ICO, while an interpolation was made between San Diego and Cabo Colonet (30°N) for PBA. This index can be consulted at [http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell\\_menu\\_NA.html](http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell_menu_NA.html).



**Figura 2.** Serie de tiempo de la temperatura a 10 m de profundidad en las estaciones de Punta Banda e Islas Coronado durante el período de abril a diciembre de 1989. La línea horizontal en los 12°C es la temperatura que define las surgencias en Baja California.

**Figure 2.** Time series of temperature at 10 m depth off Punta Banda and Coronado Islands for April to December 1989. The horizontal line at 12°C is the temperature that defines upwelling off Baja California.

estudio para PBA fueron de  $13.00 \pm 1.83^\circ\text{C}$  y de  $16.33 \pm 2.15^\circ\text{C}$  en ICO. En la localidad de PBA las temperaturas medias más bajas se registraron en abril ( $12.15^\circ\text{C}$ ), mayo ( $11.65^\circ\text{C}$ ) y junio ( $11.94^\circ\text{C}$ ), mientras que en ICO fueron en abril ( $15.54^\circ\text{C}$ ), mayo ( $14.63^\circ\text{C}$ ), junio ( $15.61^\circ\text{C}$ ) y julio ( $15.41^\circ\text{C}$ ).

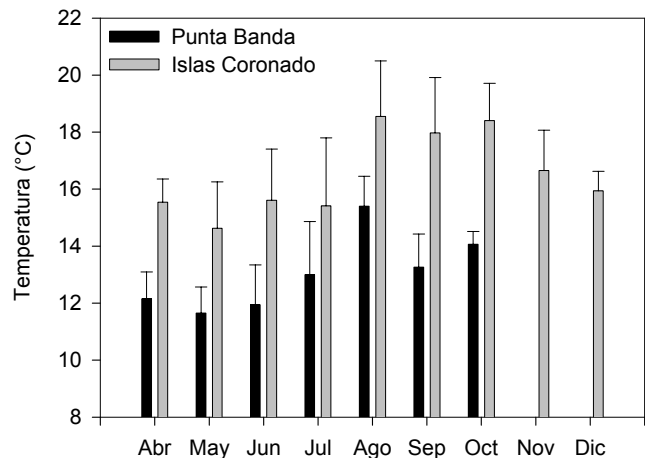
En la tabla 2 se presentan los promedios y errores estándar de las concentraciones de Cd en *M. californianus* transplantados al área de estudio. En general, durante todo el estudio las concentraciones medias de Cd fueron mayores en los mejillones de PBA ( $17.23 \pm 1.89 \mu\text{g g}^{-1}$  ps) que en los de ICO ( $9.86 \pm 1.37 \mu\text{g g}^{-1}$  ps). La concentración de Cd previa al trasplante fue de  $8.3 \mu\text{g g}^{-1}$  ps. La variación temporal de la concentración de Cd normalizada ( $\text{Cd} \times \text{IC}$ ) mostró en general un comportamiento similar en ambas localidades. Los valores más bajos se presentaron a principios de primavera y durante el periodo otoño/invierno, mientras que los valores más altos fueron registrados durante los meses de abril a julio (fig. 4a). Valores altos del índice de Bakun correspondieron con valores altos de  $\text{Cd} \times \text{IC}$  y viceversa. En ambas localidades de muestreo la concentración de Cd normalizada se correlacionó positivamente con el índice de Bakun (fig. 4b, c). Los valores de los coeficientes de correlación fueron de 0.91 en PBA y 0.75 en ICO.

## Results

Figure 2 shows the time series for temperature at 10 m depth from April to September 1989 at PBA and from April to December 1989 at ICO. The time series of both localities clearly show upwelling events characterized by abrupt drops in temperature, the lowest temperatures occurring from April to July. Periods of temperature below  $12^\circ\text{C}$  can be observed for PBA, dropping to  $9.9^\circ\text{C}$  and  $9.7^\circ\text{C}$  in May and July, respectively; however, at ICO the periods of temperature below  $12^\circ\text{C}$  were fewer than at PBA, with abrupt changes in temperature only reaching  $11.5^\circ\text{C}$  in May, June and July (fig. 2). The low temperature data were for periods of 4 to 11 days.

Figure 3 shows the behaviour of mean monthly temperature from April to September 1989 at PBA and from April to December 1989 at ICO. In general, temperature at both sites presented a seasonal variation, with warmer waters during summer and cooler water during autumn and spring. Mean monthly temperatures were  $13.00 \pm 1.83^\circ\text{C}$  for PBA and  $16.33 \pm 2.15^\circ\text{C}$  for ICO, and were approximately  $4^\circ\text{C}$  lower in the former than in the latter, indicating that upwelling conditions prevailed at PBA during this study. The lowest mean temperatures were recorded in April ( $12.15^\circ\text{C}$ ), May ( $11.65^\circ\text{C}$ ), and June ( $11.94^\circ\text{C}$ ) at PBA, and in April ( $15.54^\circ\text{C}$ ), May ( $14.63^\circ\text{C}$ ), June ( $15.61^\circ\text{C}$ ), and July ( $15.41^\circ\text{C}$ ) at ICO.

The mean concentrations and standard error of Cd in *M. californianus* transplanted to the study area are given in table 2, and were higher in the mussels from PBA ( $17.23 \pm 1.89 \mu\text{g g}^{-1}$  dw) than in those from ICO ( $9.86 \pm 1.37 \mu\text{g g}^{-1}$  dw) throughout the study period. The concentration of Cd prior to the transplant was  $8.3 \mu\text{g g}^{-1}$  dw. The temporal variation of



**Figura 3.** Variación media mensual de la temperatura a 10 m de profundidad en las estaciones de Punta Banda e Islas Coronado durante el período de abril a diciembre de 1989. Las líneas indican una desviación estándar del promedio de 730 datos.

**Figure 3.** Mean monthly temperature variation at 10 m depth for Punta Banda and Coronado Islands from April to December 1989. The lines indicate one standard deviation of the 730 data average.

## Discusión

En la región de PBA se presentan surgencias todo el año, ocurriendo los eventos más fuertes durante la primavera y el verano (González-Morales y Gaxiola-Castro, 1991). En estudios previos se ha establecido que frente a PBA, aproximadamente a 100 m de profundidad, se encuentran las isoterms entre 12°C y 14°C que al emerger a la superficie durante primavera y verano se consideran temperaturas indicadoras de surgencia (Gómez-Valdez, 1983). En este estudio, la evidencia de surgencia en PBA se identificó por las bajas temperaturas medias mensuales registradas en abril (12.15°C), mayo (11.65°C) y junio (11.94°C) (fig. 3). Las temperaturas medias mensual más bajas en ICO ocurrieron en abril, mayo, junio y julio, con valores de 15.54°C, 14.63°C, 15.61°C y 15.41°C, respectivamente. En general, la temperatura media durante todo el estudio en PBA fue de  $13.00 \pm 1.83^\circ\text{C}$ , mientras que en ICO ésta fue de  $16.33 \pm 2.15^\circ\text{C}$ . Los valores mínimos de temperatura y la diferencia media, de aproximadamente 4.0°C, indican que los eventos de surgencia ocurrieron con mayor intensidad en PBA (figs. 2, 3). En la zona costera fronteriza se ha reportado la ocurrencia de eventos de surgencia en condiciones de verano con temperaturas superficiales de 13°C en Punta Descanso, mientras que en la zona de las Islas Coronado éstas se han reportado con temperaturas de 14°C a 15°C (Segovia-Zavala *et al.*, 1998). En un estudio realizado en julio de 1986 en PBA, González-Morales y Gaxiola-Castro (1991) registraron temperaturas superficiales de 13–14°C, indicando la presencia de eventos del fenómeno de surgencia.

En el periodo de 1989–1990, las condiciones de surgencia de mayor intensidad se presentaron durante la primavera y el verano en PBA, con valores del índice de Bakun mayores a 300 m<sup>3</sup>/s/100 m de línea de costa, mientras que en el invierno el índice de Bakun fue menor a 200 m<sup>3</sup>/s/100 m de línea de costa (fig. 4a). En PBA, de abril a julio se identificaron surgencias casi continuas con registros de temperaturas por debajo de los 12°C (fig. 2). Por lo contrario para ICO, las surgencias no fueron tan continuas y solamente cuatro eventos alcanzaron los 12°C. En PBA se identificaron 80 días con temperaturas iguales o menores a los 12°C, mientras que en ICO estos niveles de temperaturas se registraron solamente durante 15 días (fig. 2). Para ICO se registraron 46 días con temperaturas iguales o menores a los 14°C. Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego (1982) encontraron que los eventos de intensificación y relajamiento de surgencias ocurren en la región de Baja California principalmente en primavera y verano, y mostraron que los eventos de surgencia intensa tienen una duración de alrededor de cuatro días. En el presente trabajo se puede apreciar que en PBA e ICO se observaron registros de bajas temperaturas por periodos de 4 a 11 días (fig. 2). Se ha sugerido que el factor principal que influye en el desarrollo de los eventos de surgencia en la costa de Baja California es la presencia de vientos fuertes con dirección predominante hacia el ecuador (Barton y Argote, 1980). La variación temporal de la temperatura presentada en este trabajo (figs. 2, 3) muestra evidencia adicional de

**Tabla 2.** Concentración media y error estándar de cadmio en mejillones (*Mytilus californianus*) transplantados a Punta Banda (febrero de 1989 a enero de 1990) y a Islas Coronado (mayo de 1989 a marzo de 1990). El número de muestras en Punta Banda fue de 24 y en Islas Coronado fue 27.

**Table 2.** Mean concentration and standard error of cadmium in mussels (*Mytilus californianus*) transplanted to Punta Banda (February 1989 to January 1990) and Coronado Islands (May 1989 to March 1990). The number of samples was 24 for Punta Banda and 27 for Coronado Islands.

| Metal | Punta Banda<br>( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) | Islas Coronado<br>( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) |
|-------|---|--|
| Cd    | $17.23 \pm 1.89$                        | $9.86 \pm 1.37$                            |

normalized Cd concentration ( $\text{Cd} \times \text{IC}$ ) presented a similar behaviour at both sites. The lowest values were recorded in early spring and during the autumn/winter period, whereas the highest were recorded between April and July (fig. 4a). High values of the Bakun upwelling index corresponded to high values of  $\text{Cd} \times \text{IC}$  and vice versa. The normalized Cd concentration presented a positive correlation with the Bakun index at both sampling sites (fig. 4b, c); the correlation coefficient values were 0.91 for PBA and 0.75 for ICO.

## Discussion

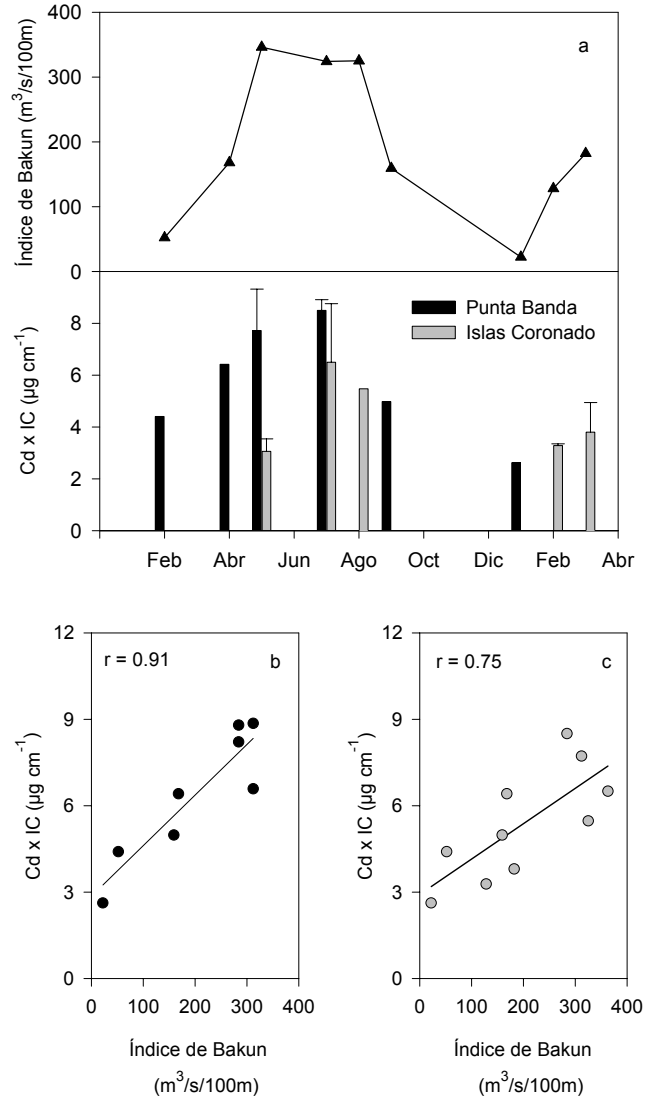
Upwelling occurs throughout the year at PBA, with stronger events in spring and summer (González-Morales and Gaxiola-Castro, 1991). Previous studies have established that the 12°C and 14°C isotherms are found at approximately 100 m depth off PBA, and are considered indicative temperatures of upwelling when they emerge at the surface during spring and summer (Gómez-Valdez, 1983). In this study, upwelling at PBA was identified by the low mean temperatures of 12.15°C, 11.65°C, and 11.94°C recorded in April, May, and June, respectively (fig. 3). At ICO, the lowest mean monthly temperatures were 15.54°C, 14.63°C, 15.61°C, and 15.41°C in April, May, June, and July, respectively. Mean temperatures throughout the study were  $13.00 \pm 1.83^\circ\text{C}$  at PBA and  $16.33 \pm 2.15^\circ\text{C}$  at ICO. The lower temperature values and average difference of approximately 4.0°C indicate that upwelling occurred with greater intensity at PBA (figs. 2, 3). Upwelling events have been reported for the coastal border region in summer, with surface temperatures of 13°C at Punta Descanso and of 14–15°C in the area of ICO (Segovia-Zavala *et al.*, 1998). Surface temperatures of 13–14°C were recorded in July 1986 at PBA (González-Morales and Gaxiola-Castro, 1991), indicating the presence of upwelling.

In the 1989–1990 period, upwelling conditions were stronger in spring and summer off PBA, with Bakun index values greater than 300 m<sup>3</sup>/s/100 m of coastline, whereas in winter they were lower than 200 m<sup>3</sup>/s/100 m of coastline (fig. 4a). At PBA, upwelling occurred almost continuously from April to July, with temperatures below 12°C (fig. 2); at

la presencia de surgencias en la región y fortalece la idea de que éste es un importante mecanismo de transporte de aguas profundas y sus características químicas, a las capas superficiales, pero que ocurre de manera desigual entre PBA e ICO.

El Cd, al igual que el fosfato, se encuentra enriquecido en las aguas superficiales de la zona de surgencia de Baja California en un factor de tres a cinco en relación con aguas más alejadas de la costa (Boyle *et al.*, 1976; Segovia-Zavala *et al.*, 1998). Durante el verano de 1990, Segovia-Zavala *et al.* (1998) encontraron en ICO y en Punta Descanso concentraciones superficiales de Cd disuelto de 0.12 y 0.14 nM, respectivamente. Estos investigadores mostraron que la distribución espacial de este metal se asoció con procesos físicos como las surgencias (53%) y biológicos como la biomasa fitoplanctónica (25%) y, además, demostraron que el agua de surgencia proviene de 220–250 m de profundidad en la región. De igual forma, la concentración media superficial de Cd registrada en PBA durante un periodo de surgencia (abril a septiembre de 1996) fue de  $0.207 \pm 0.031$  nM (Van Geen, <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/EPCU/Cd>). Esta concentración de Cd disuelto en PBA es equivalente a la del agua que proviene de los 300 m de profundidad (Bruland, 1980; Van Geen y Husby, 1996). Asimismo, Knauer y Martin (1981) encontraron altas concentraciones de Cd en plancton frente a Baja California, mismas que atribuyeron a grandes cantidades de Cd transportadas a la superficie por eventos de surgencia intensa. De acuerdo con la estructura hidrográfica frente a PBA (Gómez-Valdez, 1983), las aguas con temperaturas iguales o menores a 12°C que allí se registraron provienen de entre 200 y 300 m de profundidad; mismas que se identificaron por temperaturas hasta de 9.7°C (fig. 2).

Las concentraciones medias de Cd medidas en los mejillones transplantados a PBA ( $17.23 \pm 1.89 \mu\text{g g}^{-1}$  ps) y a ICO ( $9.86 \pm 1.37 \mu\text{g g}^{-1}$  ps) en este estudio (tabla 2) son mayores que las reportadas en otros trabajos realizados con *M. californianus* residentes de la misma zona. Por ejemplo, Muñoz-Barbosa *et al.* (2000) encontraron concentraciones de Cd de  $3.16 \pm 2.05 \mu\text{g g}^{-1}$  ps en *M. californianus* recolectados en la zona intermareal de PBA y de  $0.61 \pm 0.13 \mu\text{g g}^{-1}$  ps en organismos de esta misma especie recolectados en la zona aledaña a la descarga de aguas negras de Tijuana, Baja California. Gutiérrez-Galindo y Muñoz-Barbosa (2001) encontraron concentraciones de Cd de  $1.4 \mu\text{g g}^{-1}$  ps en un estudio de variabilidad de periodo corto de los metales Ag, Cd y Cu en mejillones residentes en la zona intermareal de PBA. Las concentraciones de Cd medidas en la presente investigación son de 5 a 16 veces mayores que las obtenidas Muñoz-Barbosa *et al.* (2000) y 12 veces mayores que las reportadas por Gutiérrez-Galindo y Muñoz-Barbosa (2001). Esta diferencia en las concentraciones de Cd puede explicarse con base en que los mejillones transplantados a 5 y 15 m de profundidad en ICO y PBA se encontraron expuestos de manera más continua a niveles altos de Cd provenientes de la surgencia (figs. 2, 3, 4). Lares *et al.* (2002) realizaron un estudio sobre la variabilidad de periodos largo y corto en la concentración de Cd en Bahía



**Figura 4.** (a) Variación temporal del índice de Bakun (▲) y de la concentración de cadmio normalizada (Cd x IC) en *Mytilus californianus* transplantados a las Islas Coronado y a Punta Banda; las líneas indican una desviación estándar. (b) Relación del índice de Bakun vs. Cd x IC en Punta Banda. (c) Relación del índice de Bakun vs. Cd x IC en Islas Coronado.

**Figure 4.** (a) Temporal variation of the Bakun upwelling index (▲) and of the normalized cadmium concentration (Cd x IC) in *Mytilus californianus* transplanted to Coronado Islands and Punta Banda; the lines indicate one standard deviation. (b) Bakun Index vs Cd x IC for Punta Banda. (c) Bakun index vs Cd x IC for Coronado Islands.

ICO, however, upwelling was not as continuous and only four events reached 12°C. Temperatures of or lower than 12°C were recorded on 80 days at PBA but only on 15 days at ICO (fig. 2); at the latter, temperature was 14°C or less on 46 days. Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego (1982) reported that upwelling intensification and relaxation events occur mainly during spring and summer off Baja California and that the intense upwelling events last 4 days. In this study, periods of low temperatures were recorded of 4 to 11 days (fig. 2). It has



San Quintín de enero a octubre. Estos investigadores registraron durante junio los niveles más altos de Cd ( $17.2 \pm 2.3 \mu\text{g g}^{-1}$  ps) en *M. californianus* de Bahía San Quintín. Estos valores tan altos estuvieron asociados con condiciones de surgencia intensa (Lares *et al.*, 2002). En la presente investigación, durante la primavera de 1989 se midió una concentración máxima de Cd de  $28.56 \mu\text{g g}^{-1}$  ps en PBA, y de  $17.71 \mu\text{g g}^{-1}$  ps en ICO durante el verano del mismo año. La máxima concentración de Cd en PBA coincide con las temperaturas más bajas ( $9.7^\circ\text{C}$ ) registradas en la serie de tiempo durante el mes de mayo (fig. 2). La concentración de Cd en el mejillón previa al trasplante fue de  $8.3 \mu\text{g g}^{-1}$  ps, misma que varió durante el experimento en ambas localidades alcanzando máximos enriquecimientos para PBA e ICO de 3.44 y 1.38 veces, respectivamente. Estos enriquecimientos de Cd se presentaron durante los periodos de surgencia y de manera desigual entre PBA e ICO, siendo 2.5 veces mayores en PBA que en ICO. De manera similar, el comportamiento de Cd  $\times$  IC se asoció positivamente con el índice de Bakun de ambas localidades (fig. 4b, c;  $r \geq 0.75$ ). Estos resultados sugieren que la variabilidad temporal de la concentración de Cd en el tejido de *M. californianus* trasplantado en la zona costera de Baja California está asociada con el proceso de surgencia. Los resultados de la concentración de Cd en *M. californianus* del presente estudio también indican que las condiciones de surgencia en PBA son más continuas que en ICO, sustentando además la idea de que los eventos de intensificación y relajamiento de las surgencias en la región de Baja California ocurren principalmente en el periodo de primavera y verano (figs. 2, 3). Muñoz-Barbosa *et al.* (2000) sugirieron que el gradiente sur-norte en la concentración de Cd en *M. californianus* residentes de la costa de Baja California se debe a que el proceso de surgencia es más intenso en el sur que en el norte. Los resultados de la presente investigación muestran que el fenómeno de surgencia se da de manera desigual entre PBA e ICO, hipótesis que también es sustentada por las temperaturas (figs. 2, 3) y las correlaciones de las concentraciones de Cd normalizadas en el tejido suave de los mejillones trasplantados. La concentración de Cd normalizada con el índice de condición presentó coeficientes de correlación considerablemente altos con el índice de surgencia de Bakun ( $r = 0.91$  para PBA y  $r = 0.75$  para ICO; fig. 4b, c). Estudios realizados por Fisher (1983), Lobel *et al.* (1991), Lares y Orians (1997) y Gutiérrez-Galindo y Muñoz-Barbosa (2001) han demostrado que la normalización de la concentración con el índice de condición reduce la variación en el metal y elimina mucha de la variación no debida a la concentración del metal en el medio. Esto implica que la concentración de Cd en el mejillón trasplantado se debe más a la concentración de Cd en el medio que a factores externos o fisiológicos. Por lo tanto, los datos aquí presentados podrían representar una mejor evidencia de los aportes de Cd debidos a las surgencias frente a Baja California. Estos resultados sugieren también que la variabilidad temporal de la concentración de Cd en el tejido de *M. californianus* trasplantado a la zona costera de Baja

been suggested that strong, equatorward winds are responsible for the development of upwelling events off Baja California (Barton and Argote, 1980). The temporal variation in temperature reported herein (figs. 2, 3) is additional evidence of the presence of upwelling in the region, and supports the idea that it is an important mechanism that transports deep water (with its chemical characteristics) to the surface layers, which occurs differently at PBA and ICO.

Cadmium, like phosphate, is enriched in surface waters of the upwelling zone off Baja California by a factor of three to five relative to offshore waters (Boyle *et al.*, 1976; Segovia-Zavala *et al.*, 1998). In summer 1990, Segovia-Zavala *et al.* (1998) recorded surface concentrations of dissolved Cd of 0.12 and 0.14 nM off ICO and Punta Descanso, respectively. These authors showed that the spatial distribution of this metal is associated with physical processes, such as upwelling (53%), and with biological processes, such as phytoplankton biomass (25%), and that upwelled water originates at 220–250 m depth in the region. Likewise, a mean surface Cd concentration of  $0.207 \pm 0.031$  nM (Van Geen, <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/EPCU/Cd>) was obtained for PBA during an upwelling period (April to September 1996); this concentration of dissolved Cd is equivalent to water originating at 300 m depth (Bruland, 1980; Van Geen and Husby, 1996). Knauer and Martin (1981) found high Cd concentrations in plankton off Baja California, which they attributed to high amounts of Cd transported to the surface by intense upwelling. According to the hydrographic structure off PBA (Gómez-Valdez, 1983), the waters with temperatures of or lower than  $12^\circ\text{C}$  recorded at PBA originate between 200 and 300 m depth; temperatures as low as  $9.7^\circ\text{C}$  were obtained for these waters (fig. 2).

The mean Cd concentrations measured in mussels transplanted to PBA ( $17.23 \pm 1.89 \mu\text{g g}^{-1}$  dw) and ICO ( $9.86 \pm 1.37 \mu\text{g g}^{-1}$  dw) in this work (table 2), are higher than those reported in other studies on resident *M. californianus* in the same study area. For example, Muñoz-Barbosa *et al.* (2000) reported Cd concentrations of  $3.16 \pm 2.05 \mu\text{g g}^{-1}$  dw in *M. californianus* collected from the intertidal zone of PBA, and of  $0.61 \pm 0.13 \mu\text{g g}^{-1}$  dw in *M. californianus* from the area near the wastewater discharges of Tijuana, Baja California. Gutiérrez-Galindo and Muñoz-Barbosa (2001) recorded Cd concentrations of  $1.4 \mu\text{g g}^{-1}$  dw in a study on the short-term variability of Ag, Cd and Cu in resident mussels of the intertidal zone of PBA. The Cd concentrations reported herein are 5 to 16 times higher than those found by Muñoz-Barbosa *et al.* (2000) and 12 times higher than those reported by Gutiérrez-Galindo and Muñoz-Barbosa (2001). An explanation for this difference in concentration is that the mussels transplanted to 5 and 15 m depth at ICO and PBA were more continually exposed to high levels of Cd in the upwelled waters. Lares *et al.* (2002) studied the long- and short-term variability of Cd concentration in San Quintín Bay from

California está asociado con el proceso de surgencia, sugiriendo que los organismos transplantados son buenos indicadores indirectos del fenómeno de surgencia.

## Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Autónoma de Baja California y al Instituto de Investigaciones Oceanológicas el financiamiento para la realización de este estudio, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo recibido a través del proyecto 88-01-79.

## Referencias

- Álvarez-Borrego, J. and Álvarez-Borrego, S. (1982). Temporal and spatial variability of temperature in two coastal lagoons. *CalCOFI Rep.*, XXIII: 188–198.
- Barton, E.D. and Argote, M.L. (1980). Hydrographic variability in an upwelling area off Baja California in June 1976. *J. Mar. Res.*, 38: 631–649.
- Boyden, C.R. (1977). Effects of size upon metal content of shellfish. *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 57: 675–714.
- Boyle, E.A., Sclater, F. and Edmond, J.M. (1976). On the marine geochemistry of cadmium. *Nature*, 263: 42–44.
- Bruland, K.W. (1980). Oceanographic distribution of cadmium, nickel, and copper in the North Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 47: 176–198.
- Carlucci, A.F., Eppley, R.W. and Beers, J.R. (1986). Introduction to the Southern California Bight. In: R.W. Eppley (ed.), *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies: Plankton Dynamics of the Southern California Bight*. Springer-Verlag, New York, pp. 1–12.
- Cossa, D., Bourget, E., Pouliot, D., Piuze, J. and Chanut, J.P. (1980). Geographical and seasonal variations in the relationship between trace metal content and body weight in *Mytilus edulis*. *Mar. Biol.*, 58: 7–14.
- Cossa, D., Bourget, E., Pouliot, D., Piuze, J. and Chanut, J.P. (1989). Sexual maturations as a source of variation in the relationship between cadmium concentration and body weight of *Mytilus edulis*. *Mar. Pollut. Bull.*, 10: 174–176.
- Dunstan, I.C., DeForest, A. and Pettis, R.W. (1980). *Mytilus edulis* as an indicator of trace metal pollution in naval dockyard waters with preliminary results from Williamston naval dockyard, Victoria, Australia. *Rep. Mater. Res. Lab. Australia*, 20 pp.
- Fisher, H. (1983). Shell weight as an independent variable in relation to cadmium content of mollusks. *Mar. Ecol. Prog. Serv.*, 12: 59–75.
- Gómez-Valdez, J. (1983). Estructura hidrográfica promedio frente a Baja California. *Cienc. Mar.*, 9: 75–86.
- González-Morales, A.T. y Gaxiola-Castro, G. (1991). Variación día a día de características fisicoquímicas, biomasa y productividad primaria en una zona de surgencia costera de Baja California. *Cienc. Mar.*, 17(3): 21–37.
- Gordon, M., Knauer, G.A. and Martin, J.H. (1980). *Mytilus californianus* as a bioindicator of trace metal pollution: Variability and statistical considerations. *Mar. Pollut. Bull.*, 11: 195–198.
- Gutiérrez-Galindo y Muñoz-Barbosa, A. (2001). Variabilidad temporal de corto periodo de Ag, Cd y Cu en *Mytilus californianus* y la efectividad de este organismo como biomonitor. *Cienc. Mar.*, 27(2): 269–288.
- Knauer, G.H. and Martin, J.H. (1981). Phosphorous-cadmium cycling in northeast Pacific waters. *J. Mar. Res.*, 39: 66–76.
- January to October, and the highest levels recorded in *M. californianus* were  $17.2 \pm 2.3 \mu\text{g g}^{-1}$  dw in June, related to intense upwelling conditions. In this study, a maximum Cd concentration of  $28.56 \mu\text{g g}^{-1}$  dw was recorded at PBA in spring 1989 and of  $17.71 \mu\text{g g}^{-1}$  dw at ICO in summer 1989. The maximum Cd concentration for PBA coincides with the lowest temperature,  $9.7^\circ\text{C}$ , recorded in May (fig. 2). The concentration of Cd in *M. californianus* before the transplant was  $8.3 \mu\text{g g}^{-1}$  dw; it varied throughout the experiment, with maximum enrichment 3.44 and 1.38 times greater at PBA and ICO, respectively. This Cd enrichment occurred during the upwelling periods and was 2.5 times higher at PBA than at ICO. Likewise, the behaviour of Cd  $\times$  IC was positively correlated to the Bakun upwelling index at both sites (fig. 4b, c;  $r \geq 0.75$ ). These results suggest that the temporal variability of Cd concentration in the tissue of *M. californianus* transplanted to two sites off Baja California is related to the upwelling process. The Cd concentrations reported herein indicate that the upwelling conditions at PBA are more continuous than at ICO, supporting the idea that upwelling intensification and relaxation events occur primarily in spring and summer off Baja California (figs. 2, 3). Muñoz-Barbosa *et al.* (2000) suggested that the south to north gradient of Cd concentration in *M. californianus* from Baja California is due to more intense upwelling in the south than in the north. Our results show differences in upwelling at PBA and ICO, as indicated by the temperatures (fig. 2, 3) and normalized Cd concentrations in the soft tissue of transplanted mussels, which presented a positive correlation with the Bakun upwelling index ( $r = 0.91$  for PBA and  $r = 0.75$  for ICO; fig. 4b, c). Studies carried out by Fisher (1983), Lobel *et al.* (1991), Lares and Oriens (1997), and Gutiérrez-Galindo and Muñoz-Barbosa (2001) have shown that normalization of the concentration by the condition index reduces variability of the metal and much of the variability not due to the metal concentration in the environment. This suggests that the concentration of Cd in the transplanted mussels is due more to the concentration of this metal in the environment, as a result of upwelling, rather than to external or physiological factors. These results also indicate that the temporal variability of Cd concentration in the tissue of *M. californianus* transplanted to the coastal zone off Baja California is related to the upwelling process, suggesting that these organisms are good indirect bioindicators of the upwelling phenomenon.

## Acknowledgements

This study was funded by the Instituto de Investigaciones Oceanológicas of the Universidad Autónoma de Baja California, and by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (project 88-01-79).

English translation by Christine Harris.

- Lares-Reyes, M.L. (1988). Relación temporal de cadmio y mercurio biodisponibles en una zona de surgencias costera. Tesis de Maestría en Ciencias, CICESE, Baja California, México, 99 pp.
- Lares, M.L. and Orians, K.S. (1997). Natural Cd and Pb variations in *Mytilus californianus* during upwelling season. *Sci. Total Environ.*, 197: 177–195.
- Lares, M.L., Flores-Muñoz, G. and Lara-Lara, R. (2002). Temporal variability of bioavailability Cd, Hg, Zn, Mn, and Al in an upwelling regime. *Environ. Pollut.*, 120: 595–608.
- Lobel, P.B., Bajdik, C.D., Belkhole, S.P., Jackson, S.E. and Longericch, 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.
- Lynn, R.J. and Simpson, J.J. (1987). The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.*, 92: 12947–12966.
- Martin, M., Stephenson, M.D., Smith, D.R., Gutiérrez-Galindo, E.A. and Flores-Muñoz, G. (1988). Use of silver in mussels as tracer of domestic wastewater discharge. *Mar. Pollut. Bull.*, 9: 512–520.
- Muñoz-Barbosa, A., Gutiérrez-Galindo, E.A. and Flores-Muñoz, G. (2000). *Mytilus californianus* as an indicator of heavy metals on the northwest coast of Baja California, Mexico. *Mar. Environ. Res.*, 49: 123–144.
- Sañudo-Wilhelmy, S.A. and Flegal, A.R. (1991). Trace element distributions in coastal water along the US-Mexican boundary: Relative contributions of natural processes vs anthropogenic inputs. *Mar. Chem.*, 33: 371–392.
- Segovia-Zavala, J.A., Delgadillo-Hinojosa, F., Orozco-Borbón, M.V., Muñoz-Barbosa, A. y Canino-Herrera, S.R. (1995). Distribución de DBO y bacterias en la costa fronteriza México-EUA. *Cienc. Mar.*, 21(4): 415–426.
- Segovia-Zavala, J.A., Delgadillo-Hinojosa, F. and Álvarez-Borrego, S. (1998). Cadmium in the coastal upwelling area adjacent to the California-Mexico border. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 46: 475–481.
- Stephenson, M.D., Martin, M., Flegal, A.R. and Martin, J.H. (1979). Trace metal concentrations in the California mussel *Mytilus californianus*. *Water Quality Monitoring Rep.*, Vol. II, No. 79–22, 102 pp.
- Van Geen, A. and Husby, D.M. (1996). Cadmium in the California Current System: Tracer of past and present upwelling. *J. Geophys. Res.*, 101: 3489–3587.