

DISTRIBUCIÓN DE DBO Y BACTERIAS EN LA COSTA FRONTERIZA MÉXICO-EUA

DISTRIBUTION OF BOD AND BACTERIA ALONG THE COAST OF THE US-MEXICO BORDER

José Antonio Segovia-Zavala
Francisco Delgadillo-Hinojosa
María Victoria Orozco-Borbón
Albino Muñoz-Barbosa
Sergio Raúl Canino-Herrera

Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453
Ensenada, Baja California, México

Recibido en febrero de 1995; aceptado en junio de 1995

RESUMEN

Con el propósito de evaluar la distribución de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y bacterias coliformes totales (BCT) provenientes de la descarga de las aguas municipales de la ciudad de Tijuana, se realizaron seis muestreos de agua superficial (del 5 al 7 de febrero y del 30 de junio al 2 de julio de 1987) en la franja costera comprendida entre la línea fronteriza México-EUA y la parte norte de Rosarito, Baja California. Esta investigación se realizó bajo dos condiciones oceanográficas: cuando el transporte litoral tiene su componente hacia el sur (febrero) y cuando tiene su componente hacia el norte (julio). Los resultados muestran que el patrón de distribución superficial de estas variables se mantuvo relativamente constante del primer al último día de muestreo, representando una pluma estacionaria durante corto periodo (tres días). Sin embargo, la distribución espacial mostró diferencias de una estación del año a otra, presentándose las mayores concentraciones durante el muestreo de verano, con 55 mg l⁻¹ de DBO y 1,350,000 NMP 100 ml⁻¹ de BCT. La distribución superficial de las variables permiten distinguir una dispersión de material en sentido lateral y perpendicular a la costa y con dirección predominante hacia el sur-sureste, mostrando que la descarga es la fuente principal de DBO y BCT. Con base en los factores físicos y químicos asociados a la dispersión y degradación del material orgánico-bacteriológico, es poco probable que la descarga superficial del efluente de la planta de San Antonio de los Buenos, a 9 km al sur de la frontera, afecte las costas de San Diego, California. Las concentraciones relativamente altas de DBO (2.0 mg l⁻¹) y BCT (1,000 NMP 100 ml⁻¹) en la frontera con EUA se deben a fuentes provenientes del norte y descargas no puntuales en la zona costera de Playas de Tijuana.

Palabras clave: contaminación, DBO-BCT, frontera México-EUA.

ABSTRACT

Biochemical oxygen demand (BOD) and total coliform bacteria (TCB) from the Tijuana municipal outfall were analyzed from six surface samplings (5-7 February and 30 June to 2 July 1987), conducted along the coast between the US-Mexico border and north of Rosarito, Baja California. This study was carried out under two oceanographic conditions: with a littoral transport towards the south (February) and north (July). Results indicate that BOD and TCB surface distribution patterns remained relatively constant during the sampling periods, indicating a short-term (three-day) stationary

plume. However, spatial distribution showed seasonal differences, with the highest concentrations of BOD (55 mg l^{-1}) and TCB ($1,350,000 \text{ MPN } 100 \text{ ml}^{-1}$) occurring in summer. The surface distribution of the variables identifies a long- and offshore dispersion of matter, predominantly towards the south-southeast, indicating that the outfall is the principal source of BOD and TCB. Based on the physicochemical factors associated with the dispersion and degradation of the organic-bacteriological matter, it is unlikely that the surface outfall of the effluent from the San Antonio de los Buenos treatment plant, 9 km south of the border, affects the coasts of San Diego, California. The relatively high concentrations of BOD (2.0 mg l^{-1}) and TCB ($1,000 \text{ MPN } 100 \text{ ml}^{-1}$) at the US border are due to sources from the north and non-point outfalls along the coast of Playas de Tijuana.

Key words: pollution, BOD-TCB, US-Mexico border.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del medio ambiente marino generalmente es más severa en mares semi-cerrados y áreas costeras, y se ha relacionado con la distribución de la población y las actividades humanas (*United Nations Environmental Program*, 1984). Un ejemplo es la franja costera fronteriza entre México y Estados Unidos de Norteamérica, la cual está situada al sur de la zona más industrializada y poblada de la costa oeste del continente americano. En esta región, debido a su gran desarrollo urbano-industrial, la generación de contaminantes al medio natural son procesos prácticamente inevitables; sin embargo, el grado de impacto de éstos son técnicamente controlables.

En particular, la zona del litoral mexicano se ha sometido a una contaminación crónica por el evacuado de aguas de desecho crudas o semitratadas que provienen de la ciudad de Tijuana, México. Estas aguas se vierten directamente a la zona de rompientes en la región sur de la franja fronteriza México-EUA o dentro del Estuario Río Tijuana (Hickey, 1986). Esta situación ha generado un conflicto binacional donde las descargas al litoral fueron el punto central de las quejas por parte del gobierno de Estados Unidos. Se argumentó que la contaminación generada podría afectar no sólo las playas próximas a la frontera, en Imperial Beach, sino incluso hasta la región de Coronado, constituyendo un riesgo para la salud pública en San Diego, California (Sánchez-Rodríguez, 1990). Lo anterior motivó que se eliminara la descarga de 5 millones de galones diarios (MGD) a 1.5 km al sur de la frontera en 1986 y se pusiera en operación una planta de tratamiento

INTRODUCTION

Pollution in marine environments is generally more severe in semienclosed seas and coastal areas, and has been associated with the distribution of the population and human activities (*United Nations Environmental Program*, 1984). An example is the coastal region along the border between Mexico and the United States, located south of the most industrialized and populated area on the west coast of the American Continent. Due to the immense urban-industrial development in this region, the generation of pollutants in the natural environment is practically inevitable; however, their degree of impact is technically controllable.

The Mexican littoral has been particularly subjected to chronic pollution by raw or semi-treated wastewater from the city of Tijuana, Mexico. These waters are discharged directly into the breaker zone of the Tijuana River Estuary, south of the US-Mexico border (Hickey, 1986). This situation has caused binational conflict, with the United States Government focusing its complaints on the effluent outflow to the littoral. It was argued that the pollution generated would not only affect the beaches close to the border (Imperial Beach), but also the Coronado region, creating a health risk in San Diego, California (Sánchez-Rodríguez, 1990). As a result, the outflow of 5 million gallons per day (MGD), 1.5 km south of the border, would be discontinued in 1986 and a treatment plant opened that discharges 20 MGD, 9 km from the US-Mexico border.

Studies conducted along the Mexican border have dealt with behavior and variability in the quality and organic load of sewage from

que descarga 20 MGD a 9 km de la frontera México-Estados Unidos.

Investigaciones realizadas en la franja fronteriza mexicana se han enfocado al comportamiento y variabilidad de la calidad y carga orgánica de las aguas negras de Tijuana (Sañudo-Wilhelmy y Suárez-Vidal, 1984), a la calidad bacteriológica del cuerpo receptor y organismos fitoplanctónicos (Segovia-Zavala y Orozco-Borbón, 1986; Orozco-Borbón y Segovia-Zavala, 1986) y a la dinámica de la zona costera (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1990). La mayoría de los estudios se han limitado a objetivos específicos y no han determinado un patrón de comportamiento de las aguas domésticas que ingresan a la zona litoral. Sin embargo, Sañudo-Wilhelmy y Suárez-Vidal (1984) establecieron que la carga orgánica de las aguas residuales de la ciudad de Tijuana es no homogénea y presenta mayores aportes durante los meses de verano. Así mismo, observaciones de corrientes frente a la zona de descarga determinan corrientes costeras, con una consistencia de flujo de norte a sur durante la mayor parte del año y con inversión de sentido durante verano (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1990). Cupul-Magaña *et al.* (1987) reportaron que las partículas de 3 y 3.5 ϕ definen en esta misma región un transporte litoral hacia el sur. Por lo tanto, el efecto contaminante de la descarga será más evidente durante el verano y su distribución estará definida por el patrón de corrientes y transporte litoral arriba descrito.

El objetivo del presente trabajo es determinar la distribución y variabilidad de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y bacterias coliformes totales (BCT) provenientes de la descarga de aguas municipales de la ciudad de Tijuana. Esta investigación se realizó bajo dos condiciones oceanográficas: cuando el transporte litoral tiene su componente hacia el sur (febrero) y cuando tiene su componente hacia el norte (julio).

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra localizada en la costa noroccidental de Baja California, entre los 32°22'45" y 32°31'15"N y 117°05'15" y

Tijuana (Sañudo-Wilhelmy and Suárez-Vidal, 1984), bacteriological quality of the receiving waters and filter-feeding organisms (Segovia-Zavala and Orozco-Borbón, 1986; Orozco-Borbón and Segovia-Zavala, 1986) and the dynamics of the coastal zone (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1990). Most of the studies have been limited to specific objectives and have not determined a behavior pattern in the domestic waters that enter the littoral zone. Sañudo-Wilhelmy and Suárez-Vidal (1984), however, established that the organic load of the wastewater from Tijuana is not homogeneous and that inputs increase during the summer months. Álvarez-Sánchez *et al.* (1990) observed that the currents in front of the outfall area demonstrate a consistent north to south flow throughout most of the year, which changes direction during the summer. Cupul-Magaña *et al.* (1987) reported that the 3 and 3.5 ϕ particles define a littoral transport towards the south in this region. Thus, the polluting effect of the outfall would be more evident during the summer and its distribution would be defined by the current pattern and littoral transport described above.

The objective of this study is to determine the distribution and variability of the biochemical oxygen demand (BOD) and total coliform bacteria (TCB) stemming from the Tijuana municipal outfall. It was conducted under two oceanographic conditions: when the littoral transport flows southward (February) and northward (July).

STUDY AREA

The study area is located on the northwest coast of Baja California, between 32°22'45" and 32°31'15"N and 117°05'15" and 117°10'20"W (fig. 1). It is delimited to the north by the US-Mexico border and to the south by Rosarito Beach, covering an approximate area of 74 km². It is an exposed, high energy zone, with depths of less than 40 m and an almost straight coastline comprised, for the most part, of rocky shores and cliffs (Bravo-Chávez, 1989; Patrón-Mas, 1992). The outfall of sewage from Tijuana is located 9 km south of the US-Mexico border, with an average discharge of approximately

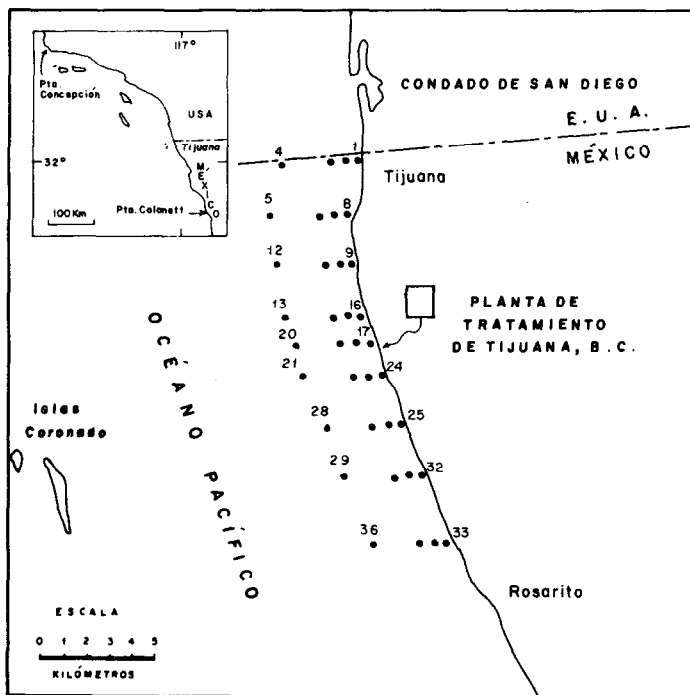


Figura 1. Localización del área de estudio y distribución de las estaciones.
Figure 1. Location of the study area and distribution of the stations.

117°10'20"O (fig. 1). Está delimitada al norte por la línea fronteriza México-EUA y al sur por playas de Rosarito, abarcando un área aproximada de 74 km². La zona se caracteriza por ser expuesta y de alta energía, de profundidades menores que 40 m, con una línea de costa casi recta constituida, en su mayoría, por playas rocosas y acantilados (Bravo-Chávez, 1989; Patrón-Mas, 1992). La descarga de aguas negras de Tijuana se localiza 9 km al sur de la frontera México-EUA. El gasto promedio de la descarga es de aproximadamente 900 l s⁻¹ (Sánchez-Rodríguez, 1990), mismo que aumenta durante el verano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Del 5 al 7 de febrero y del 30 de junio al 2 de julio de 1987 se realizaron muestreos diarios de agua superficial en la franja costera comprendida entre la línea fronteriza México-EUA

900 l s⁻¹ (Sánchez-Rodríguez, 1990); however, this is greater during the summer.

MATERIALS AND METHODS

From 5 to 7 February and 30 June to 2 July 1987, daily samplings of surface water were conducted along the coast between the US-Mexico border (Tijuana-San Diego) and northern Rosarito, BC (20 km south of the border). Thirty-six stations were sampled daily, distributed in nine transects perpendicular to the coast and 3.5 km long (fig. 1). The sample design consisted of four stations per transect: breaker zone, 0.5, 1.0 and 3.5 km offshore.

The samples were refrigerated and transported the same day to the laboratory for analysis. According to the cluster analysis of the environmental variables studied, only BOD and TCB were considered, since they are variables that indicate organic and bacteriological pollu-

(Tijuana-San Diego) y la parte norte de Rosarito, BC (20 km al sur de la frontera). Cada día se muestreó un total de 36 estaciones, distribuidas en nueve transectos perpendiculares a la costa y de 3.5 km de longitud (fig. 1). El plan de muestreo se diseñó ubicando en cada transecto cuatro estaciones: zona de rompientes, a 0.5, 1.0 y 3.5 km de la costa.

Las muestras se conservaron en refrigeración y se transportaron el mismo día al laboratorio para su análisis. De acuerdo a un análisis de agrupamiento de las variables ambientales estudiadas, sólo se consideraron la DBO y BCT por ser variables indicadoras de contaminación de origen orgánico-bacteriológico. Otras variables estudiadas, como la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes (NO_2 , NO_3 , NH_4 y PO_4), serán analizadas en una publicación posterior. La DBO se analizó de acuerdo a la técnica directa y de diluciones, con periodo de incubación de cinco días a 25°C , y las BCT mediante la técnica de número más probable (NMP) con serie de cinco tubos, utilizando una prueba presuntiva y una confirmativa (*American Public Health Association*, 1985). Los nutrientes se analizaron mediante las técnicas colorimétricas, de acuerdo con Strickland y Parsons (1972).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La variación de la distribución superficial de coliformes totales y DBO se estudió en escalas de tiempo entre días y entre verano e invierno. Los valores promedios de DBO y BCT para cada periodo de muestreo mostraron poca variabilidad (tabla 1), por lo que el patrón de distribución superficial de estas variables fue similar en los tres días de muestreo (figs. 2, 3), manteniéndose relativamente constante del primer día de muestreo al último (tabla 1). Esto representa una distribución superficial de una pluma estacionaria durante corto periodo (tres días), lo cual sugiere un equilibrio entre el aporte por la descarga y los mecanismos de remoción y dispersión del material orgánico-bacteriológico. Observaciones de corrientes en esta área de estudio, durante diez días y por cinco campañas (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1990), indican corrien-

tion. Other variables studied, such as temperature, salinity, dissolved oxygen and nutrients (NO_2 , NO_3 , NH_4 and PO_4), will be analyzed and published at a later date. A direct and a dilution technique were used to analyze BOD, with an incubation period of five days at 25°C . The five-tube most probable number technique (MPN) was used to analyze TCB, using a presumptive and a confirmed test (*American Public Health Association*, 1985). The nutrients were analyzed according to the colorimetric techniques of Strickland and Parsons (1972).

RESULTS AND DISCUSSION

Variation in the surface distribution of total coliforms and BOD was studied on a daily time scale and between summer and winter. The average values of BOD and TCB in each sampling period showed little variability (table 1). Therefore, the surface distribution pattern of these variables was similar in the three days of sampling (figs. 2, 3), remaining relatively constant from the first day of sampling to the last (table 1). This represents a surface distribution of a short-term (three-day) stationary plume, which suggests equilibrium between the input of the discharge and output of the organic-bacteriological matter due to dispersion mechanisms. Álvarez-Sánchez *et al.* (1990) observed the currents in the study area for 10 days during five campaigns and reported average coastal currents of 0.20 m s^{-1} , with a constant longshore flow that changes direction (south-north) approximately every 10 days. The distributions of similar plumes during each three-day period did not coincide with this change in direction, which is characteristic of summer in the study area. Using bacteria as tracers of a domestic outfall in a coastal current of 0.20 m s^{-1} , the north- or southward distributions would be projected from 17 to 52 km on the first and third sampling day, respectively. However, the real distribution is considerably less. Considering that it takes seven to eight hours for pollutants from the Tijuana effluent to degrade through oxidation once they have come into contact with the sea, the extent of the organic-bacteriological plume would be even less (5 to

Tabla 1. Concentración promedio de DBO (mg l⁻¹) y BCT (NMP 100 ml⁻¹) en el área de estudio*.
Table 1. Average concentration of BOD (mg l⁻¹) and TCB (MPN 100 ml⁻¹) in the study area*.

		Invierno			Verano		
		Día 1	Día 2	Día 3	Día 1	Día 2	Día 3
DBO	\bar{X}	1.97	1.55	1.46	4.8	5.0	4.0
	DE	0.40	0.50	0.50	8.8	9.5	5.8
Coliformes totales	\bar{X}	1,408	2,702	1,863	16,951	12,820	14,446
	DE	2,673	6,281	2,664	39,810	32,148	34,713

* Sin tomar en cuenta el dato de la zona de rompientes frente a la descarga.

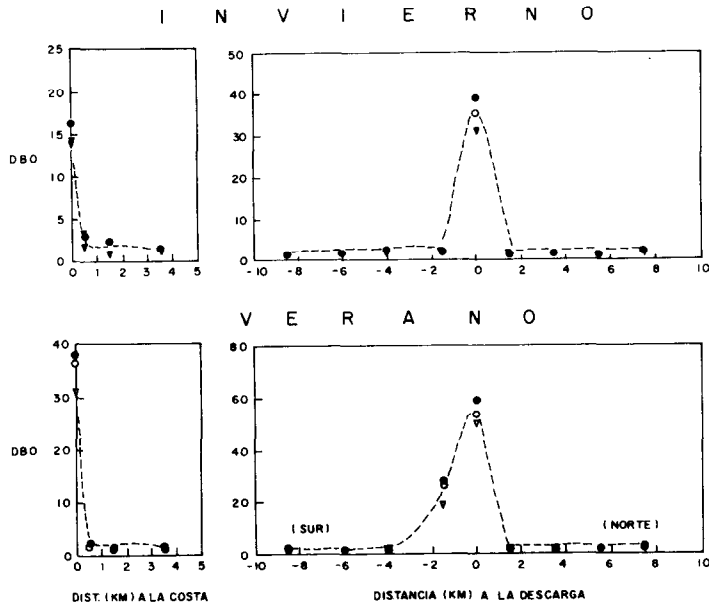


Figura 2. Distribución diaria de DBO (mg l⁻¹) durante invierno y verano.
Figure 2. Daily BOD distribution (mg l⁻¹) during winter and summer.

tes costeras promedio de 0.20 m s⁻¹, con una consistencia de flujo en dirección paralela a la costa y con inversión del sentido (sur-norte) cada diez días aproximadamente. Las distribuciones de las plumas similares durante los tres días en cada periodo no coincidieron con una inversión del sentido, misma que es característica durante el verano en la zona examinada. Con apoyo en las bacterias como indicadoras

5.5 km), a phenomenon similar to that observed in this study.

The spatial distributions of BOD and TCB showed seasonal differences, with the greatest concentrations occurring during the summer sampling (figs. 2, 3; table 1). This is because BOD in the Tijuana treatment plant is not homogeneous and inputs are greatest during the summer months, mainly due to tourism during

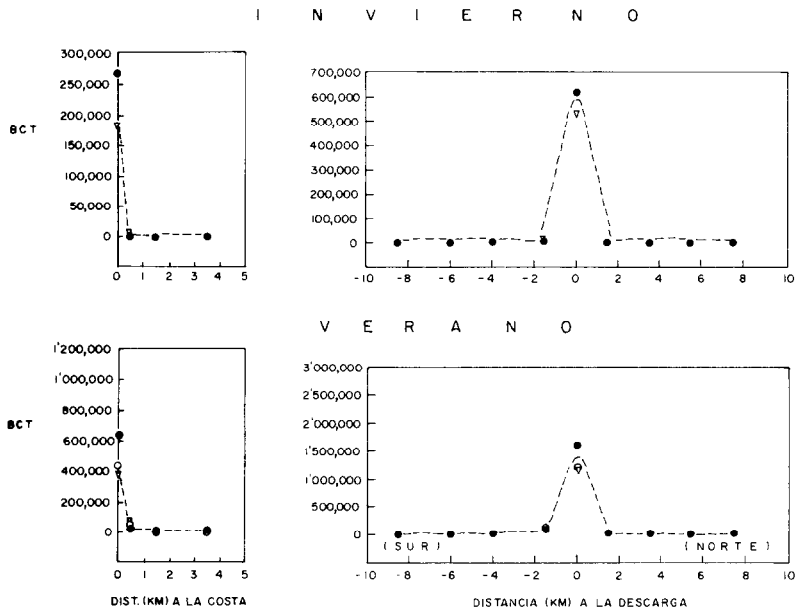


Figura 3. Distribución de BCT (NMP 100 ml⁻¹) durante invierno y verano.
Figure 3. Distribution of TCB (MPN 100 ml⁻¹) during winter and summer.

de una descarga doméstica y con una corriente costera de 0.20 m s⁻¹, las distribuciones hacia el norte o sur se proyectarían de 17 a 52 km desde el primer día de muestreo, respectivamente. Sin embargo, en la realidad, la distribución es considerablemente menor. Considerando que el tiempo que tardan los contaminantes del efluente de Tijuana en degradarse a través de la oxidación una vez en contacto con el mar es de aproximadamente de siete a ocho horas, el alcance de una pluma orgánica-bacteriológica sería todavía menor (5 a 5.5 km), fenómeno muy similar a lo observado en esta investigación.

Las distribuciones espaciales de DBO y BCT mostraron diferencias de una estación del año a otra, presentándose las mayores concentraciones en el muestreo de verano (figs. 2, 3; tabla 1). Este hallazgo se debe a que la DBO en la planta de tratamiento de Tijuana no es homogénea y su mayor aporte es durante los meses de verano, lo cual puede deberse principalmente a la actividad turística que se presenta en

this time (Sañudo-Wilhelmy and Suárez-Vidal, 1984).

The dendrogram of the cluster analysis of the environmental variables studied (fig. 4) indicated that BOD, NH₄, PO₄ and TCB covary spatially ($r > 0.90$), which suggests a similar spatial distribution. This association is due to the similar behavior and common origin these variables have since BOD estimates the polluting load of the organic effluent, which serves as an energetic substrate for bacteriological development and growth. NH₄ is a product of degradation of the nitrogenated organic matter from the effluent and PO₄ is a variable that indicates domestic outfalls. Previous studies on coastal waters show that PO₄ concentrations lower than 2.8 µg-at l⁻¹ are considered to be unaffected by anthropogenic activity (Ketchum, 1969). The PO₄ concentrations detected in the present study, up to 2 km from the outfall, were from 3 to 90 µg-at l⁻¹ during both sampling periods, indicating an anthropogenic influence of the outfall.

esos meses (Sañudo-Wilhelmy y Suárez-Vidal, 1984).

El dendrograma del análisis de agrupamiento de las variables ambientales estudiadas (fig. 4) indicó que la DBO, NH_4 , PO_4 y las BCT covarían espacialmente ($r > 0.90$), lo cual sugiere una distribución espacial similar. Esta asociación se debe a que estas variables tienen un comportamiento parecido y un origen común debido a que la DBO estima la carga contaminante del efluente orgánico, el cual sirve como sustrato energético para el desarrollo y crecimiento bacteriano. El NH_4 es un producto de degradación del material orgánico nitrogenado proveniente del efluente y el PO_4 es una variable indicadora de descargas domésticas. Antecedentes de estudios sobre aguas costeras señalan que las concentraciones de PO_4 por debajo de $2.8 \mu\text{g-at l}^{-1}$ son consideradas como no afectadas por la actividad antropogénica (Ketchum, 1969). Las concentraciones de PO_4 detectadas en la presente investigación, hasta los 2 km frente a la descarga, fueron de 3 a $90 \mu\text{g-at l}^{-1}$ durante ambos periodos de muestreo, lo cual indica la influencia antropogénica de la descarga.

En lo que respecta a las distribuciones horizontales, las variables presentaron fuertes gradientes. Los valores más altos de DBO (100 mg l^{-1}) y BCT ($1 \times 10^6 \text{ NMP } 100 \text{ ml}^{-1}$) se presentaron frente a la descarga y disminuyeron en forma lateral y perpendicular a la costa (figs. 2, 3, 5), mostrando que la descarga es la fuente principal de materia orgánica y BCT. Rivera-Duarte *et al.* (1986) reportaron que, al norte de la bahía de Todos Santos, la DBO superficial durante el verano varió entre 2 y 20 mg l^{-1} . Sañudo-Wilhelmy y Vargas-Flores (1984) encontraron, en la misma zona de estudio, valores mayores que $16,000 \text{ BCT } 100 \text{ ml}^{-1}$ a 1 km de distancia de la costa en verano. Los valores reportados en la presente investigación exceden considerablemente los valores de los parámetros de calidad permitidos por la legislación, de $< 2 \text{ mg l}^{-1}$ para DBO (Clark, 1986) y $< 1,000 \text{ BCT NMP } 100 \text{ ml}^{-1}$ (*Diario Oficial de la Federación*, 13 de diciembre de 1989, México), lo que confirma el potencial contaminante de la descarga de las aguas municipales al litoral costero.

The horizontal distributions of the variables presented strong gradients. The highest BOD (100 mg l^{-1}) and TCB ($1 \times 10^6 \text{ MPN } 100 \text{ ml}^{-1}$) values were found near the outfall and decreased both lateral and perpendicularly to the shore (figs. 2, 3, 5), demonstrating that the outfall is the principal source of organic matter and TCB. Rivera-Duarte *et al.* (1986) reported surface BOD variations during the summer in the northern region of Bahía de Todos Santos, from 2 to 20 mg l^{-1} . Sañudo-Wilhelmy and Vargas-Flores (1984) found summer values greater than $16,000 \text{ TCB } 100 \text{ ml}^{-1}$, 1 km offshore in the same area. The values reported in the present study considerably exceed those of the quality parameters allowed by law, $< 2 \text{ mg l}^{-1}$ for BOD (Clark, 1986) and $< 1,000 \text{ TCB MPN } 100 \text{ ml}^{-1}$ (*Diario Oficial de la Federación*, 13 December 1989, Mexico), confirming the polluting potential of the municipal outfall along the shore.

A long- and offshore dispersion of matter can be determined from the BOD and TCB distributions described (figs. 2, 3, 5), with a predominantly south-southeast orientation. Postma (1967) reported that particulate and dissolved organic matter from sewage increase in size by a factor of ten or more as they mix and dilute in the breaker zone due to the change in salinity, and present a behavior similar to natural sediments. A study on natural tracers of the littoral current in the southern region of the study area establishes that the 3 and 3.5ϕ particle fractions define a littoral transport towards the south (Cupul-Magaña *et al.*, 1987), which is congruent with the dispersion results of the present study.

The dynamics of coastal transport is very important for interpreting the broader extent of the plume towards the south. The principal physical factors that determine the distribution of the effluent are two types of currents: the littoral currents adjacent to the coast in a band that varies according to the topography of the zone, and the surface and subsurface currents generally found in a band some 0.5 to 6 km offshore (Sánchez-Rodríguez, 1990). The first type of current is evidently responsible for the surface dispersion of the Tijuana outfall; furthermore, the wave action along the California and Baja California coast is generally from

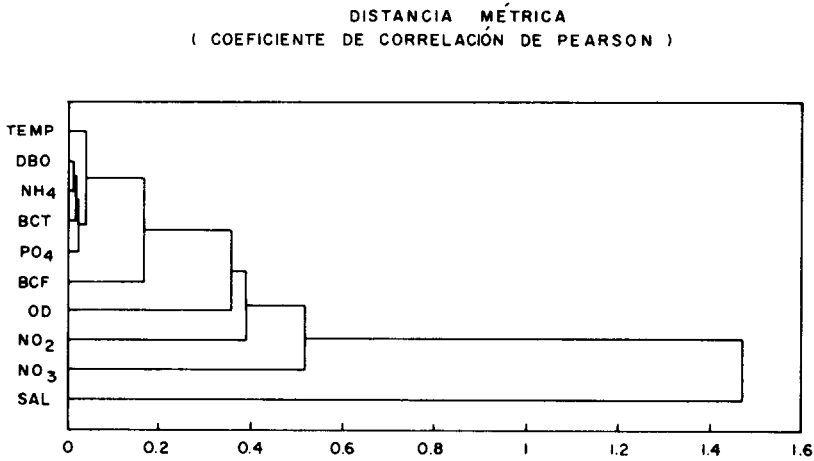


Figura 4. Dendrograma de similitud de las variables ambientales medidas.
Figure 4. Similarity dendrogram of the environmental variables measured.

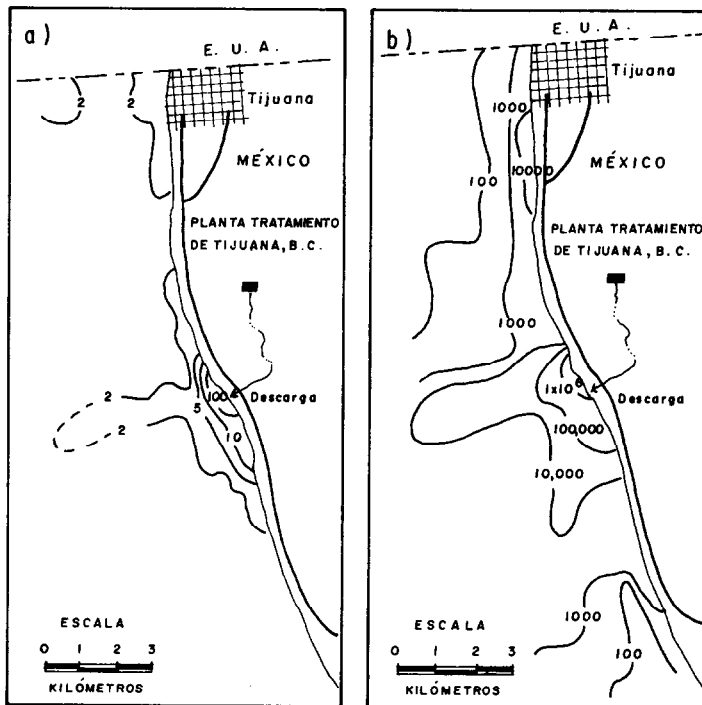


Figura 5. Distribución superficial promedio de a) DBO (mg l^{-1}) y b) BCT ($\text{NMP } 100 \text{ ml}^{-1}$) durante verano.

Figure 5. Average surface distribution of a) BOD (mg l^{-1}) and b) TCB ($\text{MPN } 100 \text{ ml}^{-1}$) during summer.

Las distribuciones descritas de DBO y BCT (figs. 2, 3, 5) permiten distinguir una dispersión del material que ocurre en sentido lateral y perpendicular a la costa y con dirección predominante hacia el sur-sureste. Postma (1967) reportó que el material orgánico, particulado y disuelto, de las aguas de desecho, al mezclarse y diluirse en la zona de rompiente por el cambio de salinidad, aumentan su tamaño por un factor de diez o más, presentando un comportamiento similar a los sedimentos naturales. Una investigación sobre trazadores naturales de la corriente litoral en la parte sur de la zona de estudio, establece que las fracciones de partículas de 3 y 3.5 ϕ definen un transporte litoral hacia el sur (Cupul-Magaña *et al.*, 1987), lo cual es congruente con los resultados de dispersión del presente trabajo.

Un aspecto de suma importancia para la interpretación del mayor alcance de la pluma hacia el sur es la dinámica del transporte costero. Los principales factores físicos que determinan la distribución del efluente son dos tipos de corrientes: las corrientes litorales adyacentes a la costa en una franja que varía de acuerdo a la topografía de la zona, y las corrientes superficiales y subsuperficiales generalmente en una franja entre los 0.5 y 6 km de la costa (Sánchez-Rodríguez, 1990). Evidentemente, el primer tipo de corriente es la responsable de la dispersión de la descarga superficial del drenaje de Tijuana; además, el oleaje, que en la costa de California y Baja California generalmente se aproxima del noroeste y oeste, puede causar transporte hacia el sur (Judge, 1970). Este comportamiento influye a que las más altas concentraciones de DBO y BCT se localicen de 0.5 a 1 km de la costa y, además, que se proyecten hacia el sur (figs. 2, 3, 5). Asimismo, el segundo tipo de corriente tiene un menor grado de influencia en la franja más lejana de 1 km de la costa, siendo más evidente para la concentración de BCT que presenta una proyección al sur (10,000 BCT 100 ml⁻¹) y otra al norte (100 y 1,000 BCT 100 ml⁻¹). A nuestro conocimiento, sólo existe una investigación sobre corrientes en el área de estudio a este nivel de resolución (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1990) y reporta un flujo de norte a sur durante la mayor parte del año,

the northwest and west and produces a southern transport (Judge, 1970). As a result of this behavior, the highest concentrations of BOD and TCB are located 0.5 to 1 km offshore and are projected towards the south (figs. 2, 3, 5). The second type of current has a lesser degree of influence on the band located more than 1 km offshore, and is more evident in the TCB concentration that presents a projection to the south (10,000 TCB 100 ml⁻¹) and another to the north (100 and 1,000 TCB 100 ml⁻¹). To our knowledge, only one study has been conducted on the currents in the study area at this level of resolution (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1990) and it reports a north-south flow for most of the year, with a longshore eddy diffusion coefficient (10⁵ cm² s⁻¹), greater than the coefficient of the normal direction (10⁴ cm² s⁻¹). The above concurs with the BOD and TCB dispersion plumes that remain almost stationary adjacent to the coast and have a more parallel than perpendicular projection.

Another characteristic of the distribution observed are the relatively high values of BOD (2.0 mg l⁻¹) and bacteria (1,000 MPN 100 ml⁻¹) along the US border (fig. 5). However, they are small in comparison to the values detected in the sewage outfall area of the treatment plant in Tijuana. The distributions of the 2.0 mg l⁻¹ BOD and 1,000 MPN 100 ml⁻¹ TCB isolines to the north of the study area (fig. 5) suggest a source coming from the United States. The information available on current flow to the north of the study area is limited. However, according to Sánchez-Rodríguez (1990), there is a sediment transport in the Tijuana River that modifies the topography of the area adjacent to the coast, in such a way that the littoral current is divided, one part flowing towards the north (USA) and the other to the south (Mexico); this can explain the source of TCB and BOD pollution to the north of the study area. Another source is internal and stems from the non-point outfalls from Playas de Tijuana that are identified by a focus of 10,000 TCB 100 ml⁻¹ (fig. 5).

The results of the present study suggest receiving waters in equilibrium between the input of matter from the municipal outfall and the output of organic-bacteriological matter due

con coeficientes de difusión turbulenta en dirección paralela a la costa ($10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$), el cual es mayor que el coeficiente en dirección normal ($10^4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$). Lo anterior coincide con las plumas de dispersión de DBO y BCT que permanecen casi estacionarias adyacentes a la costa y que se proyectan más paralelamente que perpendicular a la misma.

Otra característica de la distribución observada son los valores relativamente altos de DBO (2.0 mg l^{-1}) y bacterias ($1,000 \text{ NMP } 100 \text{ ml}^{-1}$) en la frontera con Estados Unidos (fig. 5). Sin embargo, son pequeños en relación con los valores detectados en la zona de descarga de aguas negras de la planta de tratamiento de Tijuana. Las distribuciones de las isolíneas de 2.0 mg l^{-1} de DBO y $1,000 \text{ NMP } 100 \text{ ml}^{-1}$ de BCT, al norte de la zona de estudio (fig. 5), sugieren una fuente proveniente de los Estados Unidos. La información disponible sobre el flujo de corrientes al norte del área de estudio es limitada. No obstante, de acuerdo con Sánchez-Rodríguez (1990), existe un acarreo de sedimentos por el río Tijuana, los cuales modifican la topografía del área adyacente a la costa, de tal manera que la corriente litoral se divide, fluyendo por un lado hacia el norte (EUA) y por otro hacia el sur (México); esto puede explicar la fuente de contaminación por BCT y DBO al norte del área de estudio. Otra fuente es interna y proviene de las descargas no puntuales de Playas de Tijuana que se identifican con un foco de $10,000 \text{ BCT } 100 \text{ ml}^{-1}$ (fig. 5).

Los resultados de la presente investigación sugieren un cuerpo receptor en equilibrio entre el aporte de material por la descarga municipal y los mecanismos de remoción y dispersión del material orgánico-bacteriológico durante periodos de tiempo corto, reflejándose en una constante dispersión en sentido lateral y perpendicular a la costa con dirección predominante hacia el sur. El alcance de la pluma es limitado a la periferia de la descarga (0.5 a 3.5 km), por lo que es poco probable que al presentarse la inversión de la corriente hacia el norte llegue a afectar las costas de San Diego, California. Si ocurriera una inversión de la corriente hacia el norte, la distribución y alcance de la pluma tenderían a ser muy similares a lo observado cuan-

to dispersion mechanisms during short periods, reflected in a constant long- and offshore dispersion with a predominantly southern direction. The extent of the plume is limited to the periphery of the outfall (0.5 - 3.5 km) and a change in the direction of the current towards the north is unlikely to affect the coasts of San Diego, California. If an inversion in the current occurs towards the north, the distribution and extent of the plume would tend to be very similar to that observed when the current is towards the south. Álvarez-Sánchez *et al.* (1990) found current velocities towards the north of 15 cm s^{-1} in the study area, which are less than those reported towards the south, 20 cm s^{-1} , and those reported by Marmolejo-Lara (1985) of 25 cm s^{-1} . A relevant characteristic of the study area is the high removal of matter from the outfall region, shown by a 95% decrease in the organic matter concentrations, which favored the oxygenated conditions during the winter (6.5 mg l^{-1}) and summer (4.5 mg l^{-1}) samplings. This suggests receiving waters that have a high assimilative capacity and, hence, a short-term recovery relative to the organic-bacteriological variables, upon complying with the limits established for wastewater outflows to the coastal zone or eliminating the outfall.

English translation by Jennifer Davis.

do la corriente es hacia el sur. Álvarez-Sánchez *et al.* (1990) encontraron, para el área de estudio, velocidades de corrientes hacia el norte de 15 cm s^{-1} , las cuales son menores a las que reportan hacia el sur, de 20 cm s^{-1} , y a las reportadas por Marmolejo-Lara (1985) de 25 cm s^{-1} . Una característica relevante del área de estudio es una alta remoción de material en la zona de la descarga, ya que las concentraciones de material orgánico en la periferia de la misma disminuyen en un 95%, lo cual favoreció las altas concentraciones de oxígeno detectadas en invierno (6.5 mg l^{-1}) y verano (4.5 mg l^{-1}). Esto sugiere un cuerpo receptor con alta capacidad asimilativa, por lo que su recuperación en relación con las variables orgánico-bacteriológicas sería de corto plazo a partir del cumplimiento de los límites establecidos para descargas de

aguas residuales a la zona costera o de la eliminación de la descarga.

REFERENCIAS

- Álvarez-Sánchez, L.G., Godínez-Sandoval, V.M. y Lavín-Organista, M.F. (1990). Dispersión en la franja costera de Tijuana, Baja California. *Ciencias Marinas*, 16(4): 87-109.
- American Public Health Association (1985). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 16th edition. American Public Health Association, Washington, DC, 1268 pp.
- Bravo-Chávez, A.B. (1989). Coeficientes de difusión frente a la costa del municipio de Tijuana, B.C. Tesis de licenciatura, **Universidad Autónoma de Baja California**, 71 pp.
- Clark, R.B. (1986). **Marine Pollution**. Clarendon, Oxford University Press, New York, 215 pp.
- Cupul-Magaña, A.L., Pérez-Higuera, R. y Chee-Barragán, A. (1987). Utilización de los minerales pesados como indicadores del movimiento de los sedimentos entre punta Los Buenos y playas de Rosarito, BC, México. *Ciencias Marinas*, 13(4): 97-109.
- Hickey, N.W. (1986). Border sewage update, continuing plan of action. **Chief Administrative Office of Special Projects**, Sacramento, California, 16 pp.
- Judge, C.W. (1970). Heavy minerals in beach and stream sediments as indicators of shore processes between Monterey and Los Angeles, California. Tech. Memo No. 33, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army, Corps of Engineers.
- Ketchum, B.H. (1969). Eutrophication of estuaries. In: **Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives**. National Academy of Sciences, USA, pp. 197-209.
- Marmolejo-Lara, M. (1985). Control de azolvamiento en una obra de toma de agua marina. Tesis de licenciatura, **Universidad Autónoma de Baja California**, 60 pp.
- Orozco-Borbón, M.V y Segovia-Zavala, J.A. (1986). Calidad bacteriológica del mejillón *Mytilus californianus* en la zona noroccidental de Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 12(1): 7-17.
- Patrón-Mas, M.D. (1992). Contaminación bacteriana en sedimentos superficiales marinos de la zona fronteriza México-EUA en época de verano. Tesis de licenciatura, **Universidad Autónoma de Baja California**, 69 pp.
- Postma, H. (1967). Marine pollution and sedimentology. In: T.A. Olson and F.J. Burgess (eds.), **Pollution and Marine Ecology**. Interscience Publ., pp. 225-234.
- Rivera-Duarte, I., Nishikawa-Kinomura, K., Sañudo-Wilhelmy, S.A. y Segovia-Zavala, J.A. (1986). Efecto de los contaminantes derivados de la industria de la harina de pescado en la bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, 12(2): 69-84.
- Sánchez-Rodríguez, R. (1990). **El medio ambiente como fuente de conflicto en la relación binacional México-Estados Unidos**, primera edición. Colegio de la Frontera Norte, Tijuana, BC, México, 134 pp.
- Sañudo-Wilhelmy, S.A. y Suárez-Vidal, C.E. (1984). Variación temporal de la carga orgánica en las aguas residuales de la ciudad de Tijuana, Baja California. *Ciencias Marinas*, 10(2): 107-118.
- Sañudo-Wilhelmy, S.A. y Vargas-Flores, J.A. (1984). Contaminación fecal en la bahía de Ensenada, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 10(1): 7-12.
- Segovia-Zavala, J.A. y Orozco-Borbón, M.V. (1986). Calidad bacteriológica del agua de mar en la zona costera noroccidental de Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 12(1): 93-102.
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. (1972). A practical handbook of seawater analysis. **Bull. Fish. Res. Bd. Canada**, 310 pp.
- United Nations Environmental Program (1984). Prospects for global ocean pollution monitoring. **UNEP, Regional Seas Report and Studies**, No. 47, 53 pp.