

***EVACUACION DE CONTAMINANTES SEGUN
MODELO NUMERICO EN EL ESTERO DE
PUNTA BANDA, BAJA CALIFORNIA***

S. F. FARRERAS* y

F. A. VILLALBA*

(Recibido: 3 oct. 1980)

RESUMEN

Se aplica un modelo numérico unidimensional para dispersión, basado en las ecuaciones de continuidad, conservación de sal, y conservación de un contaminante, al Estero de Punta Banda, B. C. Mediante este modelo se obtiene la variación espacio-temporal de la concentración de un contaminante conservativo, introducido en forma local e instantánea en un segmento del Estero. El modelo se calibra comparando su solución para un caso particular, con las mediciones de decaimiento de la concentración de un trazador fluorescente, inyectado en un lugar del Estero. Se simula con el modelo la introducción de contaminante en distintos segmentos del Estero, bajo las mismas condiciones hidrodinámicas anteriores, obteniendo de sus predicciones la subdivisión del estero en zonas según su rapidez de evacuación.

ABSTRACT

A one-dimensional dispersion numerical model, based on continuity, salt and contaminant balance equations, is applied to Estero Punta Banda, B. C. The model output gives spacial and temporal concentration variations of a contaminant, locally and instantaneously introduced, in a given segment of the Estero. Calibration is performed by comparing model solution for a particular case, with actual measurements of a fluorescent tracer concentration decay, previously injected in one location. Model simulation of contaminant introduction in different segments of the Estero, under the same hydrodynamical conditions, makes possible a flushing rate zone division of the Estero.

* *Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE).*

INTRODUCCION

El Estero de Punta Banda, situado en la costa Oeste de Baja California ($31^{\circ}44'$ N, $116^{\circ}38'$ W), es una cuenca de aproximadamente 10 Km de longitud, y 800 m de ancho promedio, con un canal de transporte en forma de 'L', cuyo brazo mayor es paralelo a una barra de arena que lo separa de las aguas de la Bahía de Todos Santos (Fig. 1). Las corrientes de marea constituyen el factor más importante en la dinámica de su circulación (Pritchard *et al.*, 1978), manteniendo la boca en comunicación al océano continuamente abierta y en estado de equilibrio (González, 1980). No hay aportes continuos de agua dulce al estero, salvo en inviernos lluviosos ocasionales, registrándose normalmente condiciones antiestuarinas (Cesefia y Alvarez, 1975), es decir, la evaporación excediendo a la precipitación y al ingreso de agua dulce por arroyos.

Durante 1977 se desarrolló un programa intensivo de mediciones de variables hidrodinámicas y meteorológicas en el Estero, incluyendo un experimento de dispersión con trazador fluorescente (Rodamina WT). Pritchard *et al.* (1978) y Pritchard *et al.* (1979) exponen resultados previos de estas investigaciones.

El presente trabajo expone la aplicación de un modelo numérico de dispersión a la predicción del comportamiento del Estero, ante diferentes situaciones de contaminación local. Los resultados de este estudio son extensivos a la determinación del comportamiento dispersivo de larvas de ostión, en su etapa de prefijación; información indispensable para las actividades de maricultivo, cuyo desarrollo se encuentra en estado incipiente en esta cuenca.

MODELO

Se subdivide el estero en 11 segmentos de longitud aproximada a 1 Km (Fig. 1), asignando un valor promedio representativo a cada parámetro a computar en cada segmento.

En el límite entre cada par de segmentos adyacentes, suponemos la existencia de descargas de intercambio desde un segmento hacia el otro, y viceversa (Fig. 2). Durante un ciclo de marea, este intercambio de descargas ocurre en diferentes intervalos de tiempo, o a través de diferentes partes de la sección transversal. Este concepto del proceso de intercambio advectivo en ambos sentidos es matemáticamente equivalente al concepto de transporte advectivo unidireccional adicionado a un transporte difusivo causado por movimiento turbulento entre ambos segmentos.

Considerando condiciones estacionarias, es decir intervalos temporales con extensión igual a un múltiplo entero de ciclos de marea; y asumiendo que no hay desa-

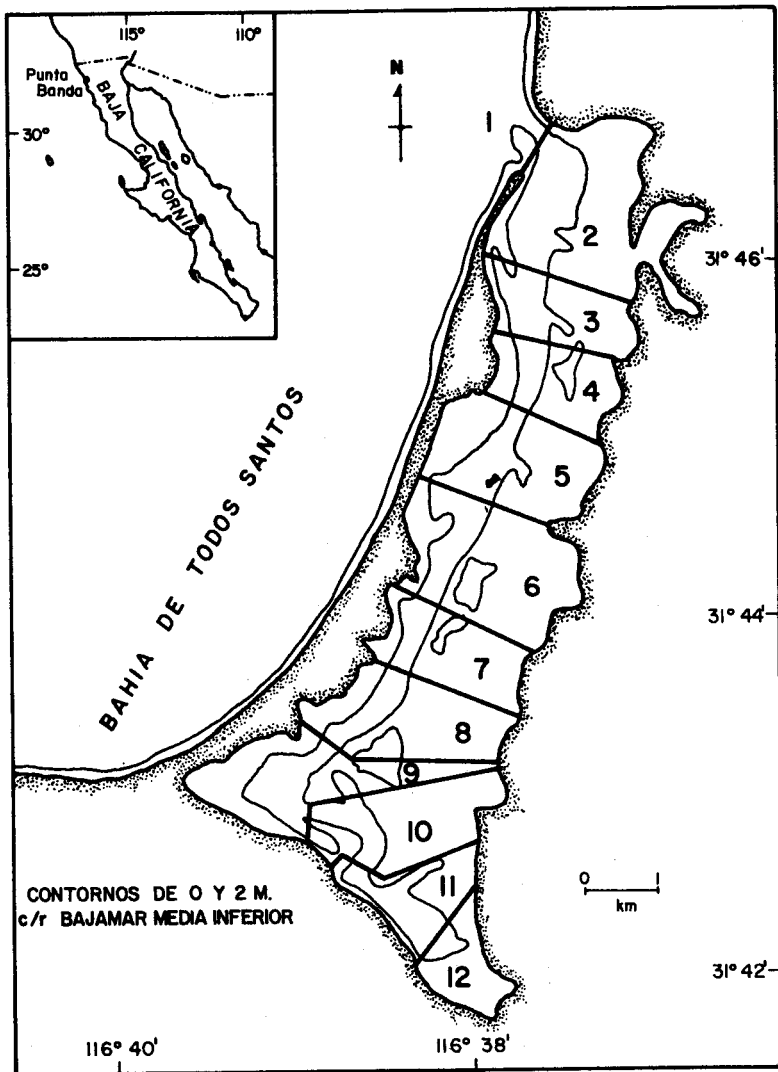


FIG. 1.- Estero de Punta Banda: batimetría y segmentación.

gües de ríos ni descargas por precipitaciones, la continuidad de volumen desde el segmento i hasta la cabeza del estero, se expresa como:

$$Q(i-1, i) - Q(i, i-1) - \sum_{k=i}^{12} E(k) = 0 \quad (1)$$

en que

$Q(l, m)$ = descarga de intercambio del segmento l al segmento m en un ciclo de marea.

$E(l)$ = descarga evaporada desde la superficie del segmento l en un ciclo de marea.

Considerando que el agua transportada de un segmento a otro, tiene la salinidad media del segmento de origen, la conservación del volumen de sal desde el segmento i hasta la cabeza del estero es:

$$Q(i-1, i) S(i-1) - Q(i, i-1) S(i) = 0 \quad (2)$$

en que

$S(l)$ = salinidad media del segmento l en un ciclo de marea

De la solución simultánea de las ecuaciones (1) y (2) se obtienen las descargas de intercambio:

$$Q(i-1, i) = \frac{S(i)}{S(i) - S(i-1)} \sum_{k=i}^{12} E(k) \quad (3)$$

$$Q(i, i-1) = \frac{S(i-1)}{S(i) - S(i-1)} \sum_{k=i}^{12} E(k) \quad (4)$$

Análogamente, se obtienen las descargas de intercambio para el límite inter-segmentos subsiguiente aguas arriba:

$$Q(i, i+1) = \frac{S(i+1)}{S(i+1) - S(i)} \sum_{k=i+1}^{12} E(k) \quad (5)$$

$$Q(i+1, i) = \frac{S(i)}{S(i+1) - S(i)} \sum_{k=i+1}^{12} E(k) \quad (6)$$

Mediante las expresiones (3), (4), (5) y (6) se obtienen todas las descargas de in-

tercambio que entran y salen de un segmento cualquiera (i) (Fig. 2), si se conocen las salinidades medias en ese segmento y sus vecinos, y las descargas evaporadas. Estas últimas se evalúan mediante la expresión empírica de U. S. Geological Survey (1942) conociendo la velocidad del viento, la humedad relativa del aire, la temperatura del aire, y la temperatura superficial del agua a lo largo del Estero.

La variación temporal en el segmento (i), de la masa de un contaminante introducido inicialmente en forma no-continua (inyección única) en un segmento (j) se expresa como:

$$\frac{\partial V(i) C(i)}{\partial t} = Q(i-1, i) C(i-1) + Q(i+1, i) C(i+1) - Q(i, i-1) C(i) - Q(i, i+1) C(i) \quad (7)$$

siendo

$V(i)$ = volumen del segmento i

$C(i)$ = concentración media de contaminante en el segmento i

Los dos primeros términos a la derecha de la ecuación (7) representan las masas de contaminante que entran al segmento (i) desde sus vecinos, aguas arriba y aguas abajo, y los dos últimos, las masas que salen hacia esos mismos lugares (Fig. 2). Se ha supuesto que el contaminante no es absorbido por los sedimentos ni se biodegrada.

La ecuación (7) se integra numéricamente usando diferencias finitas mediante el algoritmo de Adams-Bahforth-Moulton (Shampine y Gordon, 1975), obteniéndose la concentración del contaminante en función del tiempo para cada segmento.

Las descargas de intercambio provienen de las expresiones (3), (4), (5) y (6); los volúmenes de los segmentos se obtienen de la carta hidrográfica respectiva (Secretaría de Marina, 1971).

La concentración inicial de contaminante en el segmento $i = j$, es:

$$C(i)_{T_0} = \frac{m(i)}{V(i)_{T_0}} \quad \text{con } m(i) = 0 \quad \text{para } i \neq j \quad (8)$$

siendo

$m(j)$ = masa de contaminante introducida inicialmente en el segmento j

Se consideran dos condiciones de frontera para la integración anterior:

- a) en la cabeza el estero es cerrado, por ende no existen descargas de intercambio más allá del segmento 12, y el contaminante se refleja totalmente:

$$Q(12, 13) = Q(13, 12) = 0 \quad \text{y} \quad C(12) = C(13) \quad (9)$$

- b) en la boca, una parte del contaminante que llega al océano durante un ciclo de marea, regresa al estero en el siguiente ciclo, como una reflexión parcial:

$$C(1) = RC(2) \quad (10)$$

siendo R = coeficiente de reflexión, cuyo valor en un rango de 0.25 a 0.75 no modifica esencialmente la dinámica del contaminante (Carter, 1976).

CALIBRACION

El 10. de Abril de 1977 se descargó en forma instantánea una masa de 1.42 kilogramos de rodamina WT (Trazador fluorescente) en el segmento 9, codo de la L del canal del estero. Durante los 20 días siguientes se midió, mediante un fluorómetro de registro continuo, la fluorescencia del trazador a lo largo del estero, a un metro de profundidad. Simultáneamente se midió la altura de la marea, la velocidad de la corriente, la temperatura y conductividad del agua, y los parámetros meteorológicos, mediante instrumentos de registro continuo, según se detalla en Pritchard *et al.* (1978).

Las mediciones de fluorescencia se corrigieron por efecto de la fluorescencia natural, y se ajustaron para 20°C, temperatura de calibración del instrumento; previamente al cálculo de las concentraciones, según el método de Carter (1974). Lo incierto de las concentraciones así determinadas fue de ± 0.03 ppb.

Los resultados del modelo, bajo las mismas condiciones que el experimento, se compararon con las mediciones de decaimiento de concentración del trazador (Fig. 3). Ambos grupos de valores concuerdan razonablemente, no excediendo su diferencia al rango de incertidumbre en la determinación de los resultados experimentales.

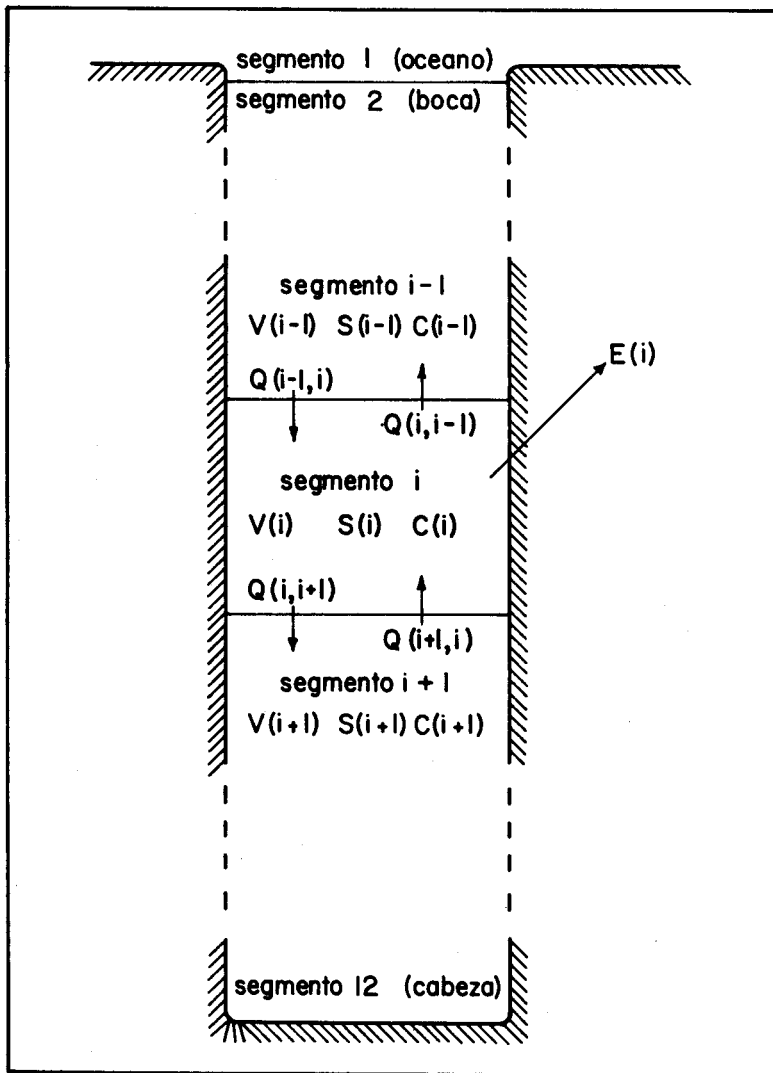


FIG. 2.- Terminología de la esquematización de un segmento.

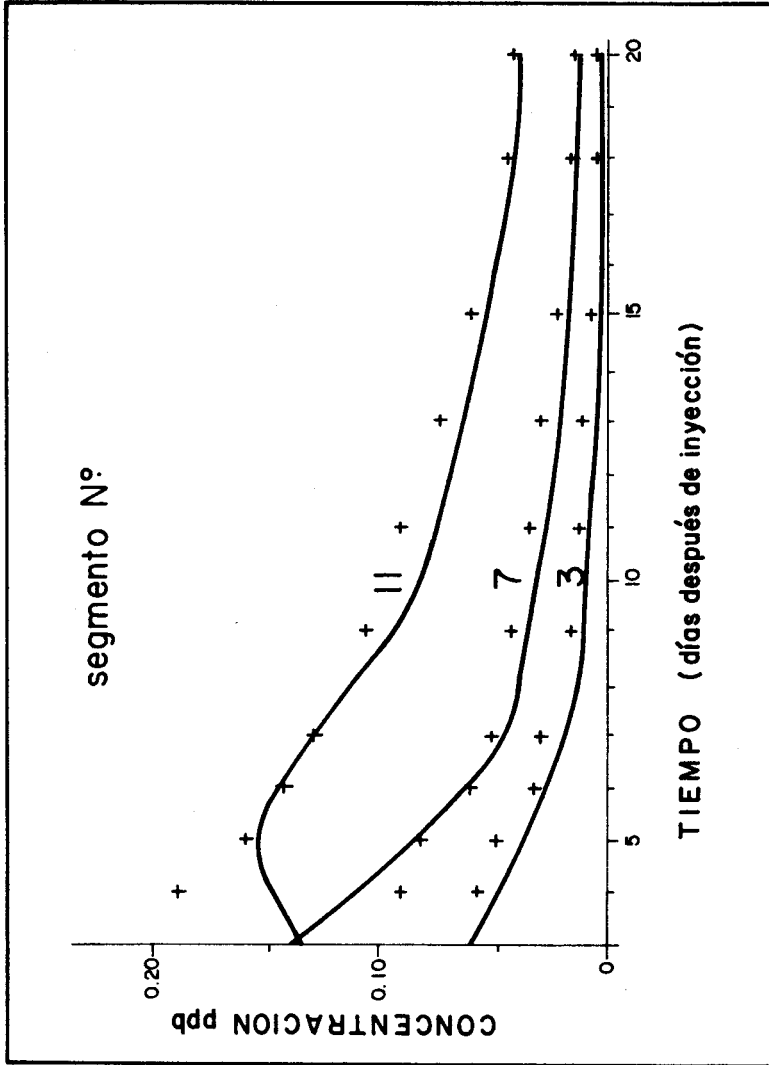


FIG. 3.- Concentraciones de trazador según modelo (-) y mediciones (+), para tres segmentos del Estero de Punta Banda (caso de introducción en el segmento 9).

PREDICCIONES

Usando el modelo anterior, se simuló la introducción de trazador en cada uno de los 11 segmentos del estero, bajo las mismas condiciones de marea, temperatura, salinidad, vientos y humedad ambiental anteriores. Las curvas resultantes de crecimiento y decrecimiento de concentración en el tiempo:

- a) están sesgadas hacia la derecha en todos los segmentos, indicando que la evacuación del contaminante es más lenta que su acumulación (Fig. 4),

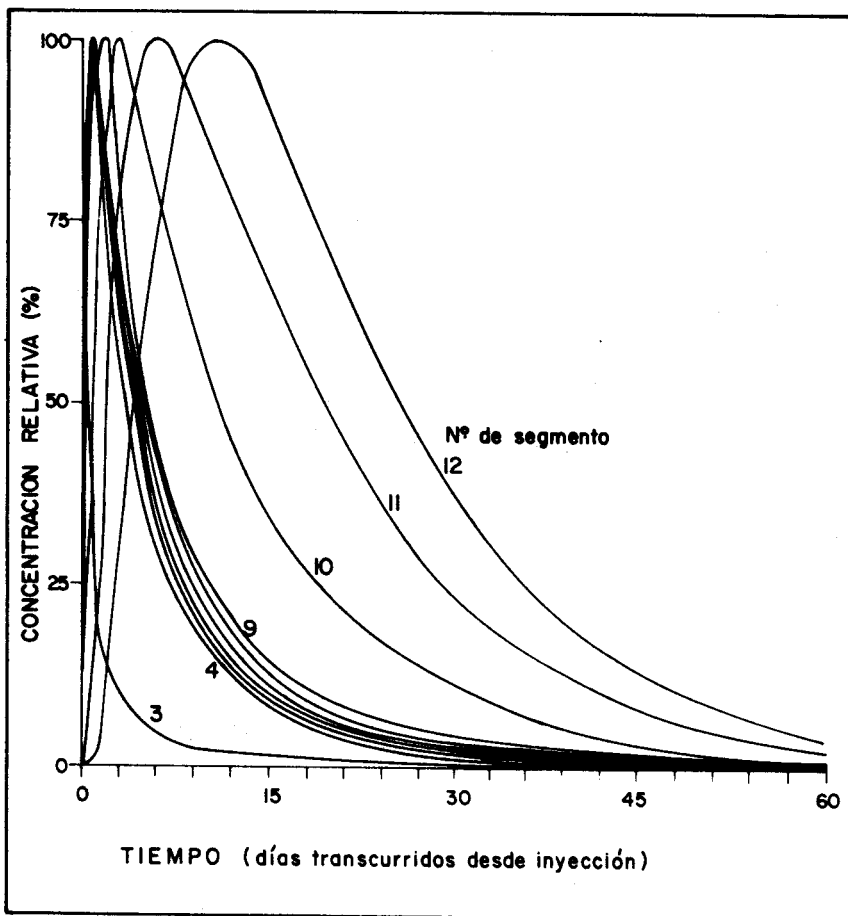


FIG. 4.- Decaimiento de trazador en cada segmento, para inyección en segmento N° 7.

- b) son casi coincidentes, a lo menos para 4 segmentos vecinos al de inyección, indicando una zona de buena mezcla en 2 Km alrededor de éste. La figura 4 ilustra esto para el caso de inyección en el segmento 7; el fenómeno es similar para los casos de inyección en otros segmentos (Villalba, 1980),
- c) evidencian que los segmentos 10, 11 y 12 son excepcionalmente lentos en su evacuación, no perdiendo cantidad apreciable de su trazador al exterior de la laguna, durante 3 a 5 días posteriores a la inyección (Fig. 5),

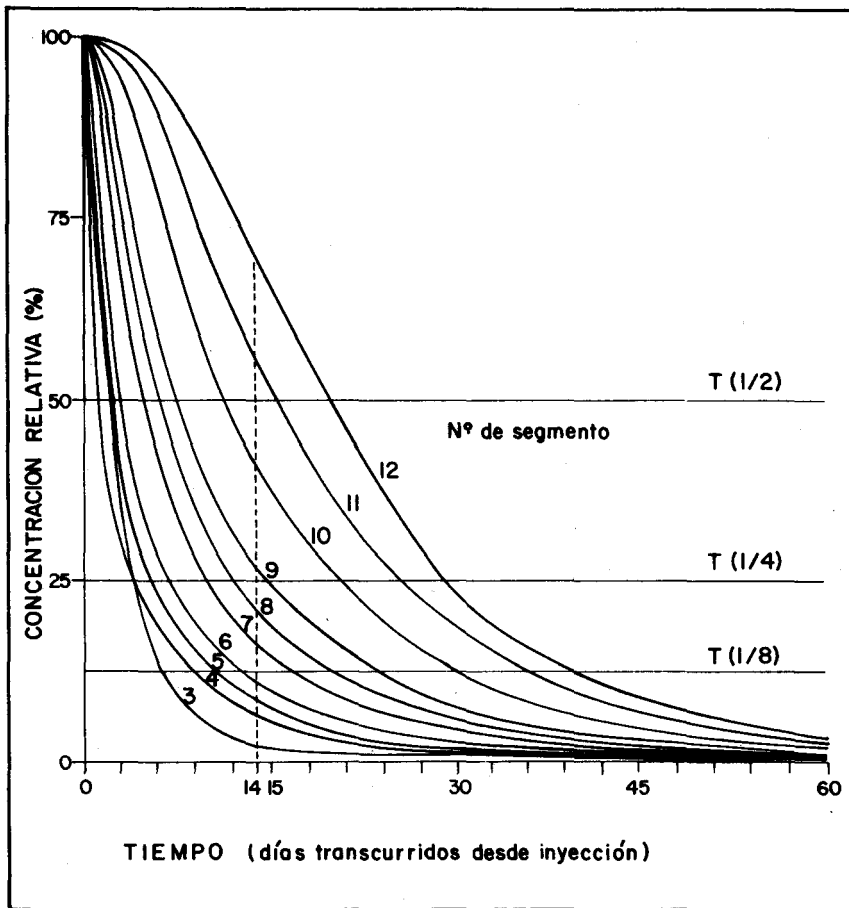


FIG. 5.- Decaimiento de trazador en todo el estero con indicación de vidas medias, cuartos y octavas, para diferentes segmentos de inyección.

- d) muestran que el segmento 2 es excepcionalmente rápido en su evacuación, no dispersándose el trazador introducido en él más allá del segmento 6; y reduciéndose al 10% de su concentración inicial en 36 horas,

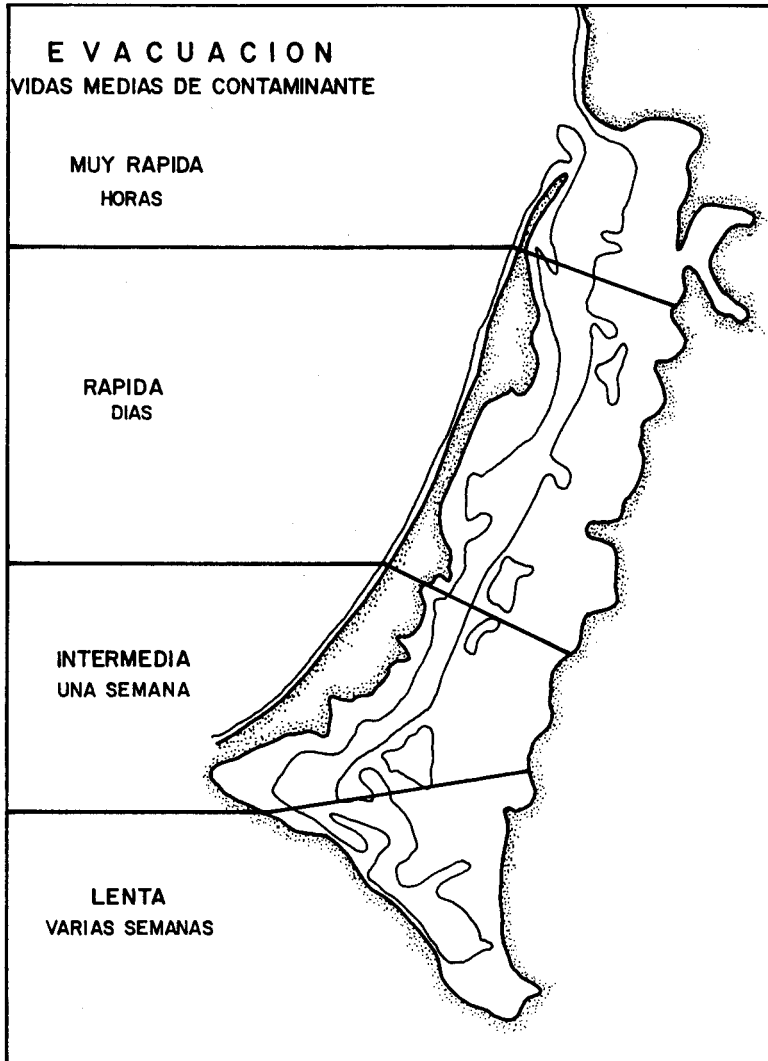


FIG. 6.- Zonas de evacuación según rapidez en el Estero de Punta Banda.

e) indican que la vida media (tiempo en que se reduce el trazador a la mitad de su concentración inicial) según la figura 5, es de:

1 a 3 días para inyecciones en los segmentos 3 al 6,

5 días a 1 semana para inyecciones en los segmentos 7 al 9,

11 a 19 días para inyecciones en los segmentos 10 al 12.

Esto permite dividir al estero en 4 zonas, según su rapidez de evacuación (Fig. 6).

En la figura 5 se indican también las concentraciones remanentes después de 14 días, para todos los casos de inyección. Este período corresponde a la permanencia en suspensión de larvas de ostión desovadas; permitiendo la información de las curvas, determinar el porcentaje óptimo de fijaciones de éstas, para maricultivo (Carter, 1967).

CONCLUSIONES

Los resultados expuestos son de aplicación directa a las actividades de maricultivo ya mencionadas, a la dispersión de contaminantes de densidad similar al agua del estero, y a otros problemas afines.

El experimento, que se usó para fines de calibración del modelo, se efectuó en condiciones de primavera y en estado de marea media.

Durante el verano, el incremento de la evaporación en las zonas bajas de los segmentos cercanos a la cabeza, aunado al incremento en salinidad así inducido, producen un aumento en las descargas de intercambio, y una mayor rapidez de evacuación. Durante el invierno, salvo en algunos días de precipitaciones significativas, el efecto es inverso, disminuyendo la rapidez de la evacuación.

En condiciones de mareas vivas, la evacuación será más rápida, y en mareas muertas más lenta, que la predicha.

El modelo es aplicable en condiciones tales que no haya fluctuaciones exageradas de las variables meteorológicas y oceanográficas durante los ciclos de marea en que se promedian sus valores. Análogamente, al asumir que el contaminante se mezcla homogénea y rápidamente en cada segmento, se implica la no existencia de fluctuaciones exageradas en los parámetros, dentro de cada segmento.

Bajo las condiciones anteriores, este modelo unidimensional simple es aplicable con facilidad y rapidez al cálculo de fenómenos de dispersión en lagunas costeras similares al Estero de Punta Banda.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se efectuó con el financiamiento parcial del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del Proyecto PC MANAL 790116 por convenio con el Banco Interamericano de Desarrollo.

BIBLIOGRAFIA

- CARTER, H. H., 1967. A method for predicting brood stock requirements for oyster (*C. virginica*) producing areas with application to the Manokin River, Chesapeake Bay Institute. The John Hopkins University. 31 pp.
- CARTER, H. H., 1974. The measurement of rodamine tracer in natural systems by fluorescence; Rapport P-V Reunion Conseil International Exploration du Mer 167, 193-200.
- CARTER, H. H., 1976. Simple one dimensional kinetic model results for the Bush River and Romney Creek, Chesapeake Bay Institute, The John Hopkins University, Special Report 49.
- CESEÑA, C. R. y S. ALVAREZ, 1975. Distribución superficial de algunos parámetros hidrológicos físicos y químicos en el Estero de Punta Banda, B. C., *Ciencias Marinas* 2(1), 98-105.
- GONZALEZ, A., 1980. Estabilidad y habilidad natural de auto dragado de la boca del Estero de Punta Banda, B. C., Tesis de Oceanólogo, Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B. C., México.
- PRITCHARD, D. W., R. DE LA PAZ, H. R. CABRERA, S. F. FARRERAS, y E. MORALES, 1978. Hidrografía física del Estero de Punta Banda. PARTE I: Análisis de datos. *Ciencias Marinas* 5(2): 1-23.
- PRITCHARD, D. W., R. DE LA PAZ, S. F. FARRERAS, H. R. CABRERA, y E. MORALES, 1979. Hidrografía Física del Estero de Punta Banda. PARTE II: Aplicación de un modelo para intercambio y dispersión. *Ciencias Marinas*, 6 (1 y 2): 1-17.
- SECRETARIA DE MARINA DE MEXICO, 1971. Carta Hidrográfica del Estero de Punta Banda, B. C.
- SHAMPINE, L. F. y M. K. GORDON, 1975. Computer solution of ordinary differential equations: the initial value problem. W. H. Freeman and Co., San Francisco, Ca. U. S. A.
- U. S. GEOLOGICAL SURVEY, 1942. Studies on evaporation: Lake Hefner, Naval Electronics Laboratory, Washington, D.C., U. S. A.
- VILLALBA, F. A., 1980. Aplicación de un modelo numérico unidimensional de dispersión en el Estero de Punta Banda. Tesis de Oceanólogo. Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México.