

BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA

y.1

ESCUELA SUPERIOR DE CIENCIAS MARINAS

U. A. B. C.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE BAJA CALIFORNIA



ESCUELA SUPERIOR DE  
CIENCIAS MARINAS  
BIBLIOTECA

APLICACION DE UN MODELO NUMERICO UNIDIMENSIONAL

DE DISPERSION EN EL ESTERO DE PUNTA BANDA.

Universidad Autónoma  
de Baja California



BIBLIOTECA CENTRAL  
ENSENADA

T E S I S

que para obtener

el título de OCEANÓLOGO

presenta

FRANCISCO ARMANDO VILLALBA LOERA

(1980)

# BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA

## INDICE

	PAG
I. - INTRODUCCION.....	1
a) Antecedentes.....	1
b) Descripcion del area de estudio.....	4
c) Objetivos.....	4
d) Trabajo a realizar.....	5
II. - MODELO UNI-DIMENSIONAL PARA DISPERSION DE CONTAMINANTES.....	7
a) Descripcion del modelo.....	7
b) Representacion de las ecuaciones en lenguaje de computadora...11	
III. - DESCRIPCION DE LAS MEDICIONES Y METODOS DE CALCULO.....	13
a) Datos necesarios para el modelo.....	13
b) Metodos de observacion e instrumentos.....	13
c) Obtencion de las concentraciones de contaminante en espacio y en tiempo.....	15
d) Obtencion del coeficiente de dispersion longitudinal.....	16
IV. - RESULTADOS.....	17
a) Caso de marea media.....	17
i) Graficas de concentraciones en espacio y tiempo.....	17
ii) Curvas de decaimiento de concentracion.....	19
iii) Tiempos de permanencia.....	22
b) Caso de marea muerta.....	23
c) Caso de marea viva.....	23
d) Coeficiente de dispersion.....	24
e) Diferencias entre el modelo y los valores observados.....	24

V. - DISCUSION..... 25

- a) Modelo numerico..... 25
- b) Dispersion del contaminante..... 26
- c) Coeficiente de dispersion..... 27
- d) Efecto del regimen de mareas..... 29
- e) Diferencias entre los valores predichos y observados..... 30

VI. - CONCLUSIONES..... 31

VII. - BIBLIOGRAFIA..... 33

APENDICE A. - DESCRIPCION DEL PAQUETE DE COMPUTACION..... A-1

- a) Descripcion de los codigos..... A-1
- b) Subrutina DE..... A-4
- c) Subrutina STEP..... A-6
- d) Subrutina INTRP..... A-7
- e) Subrutina ODE..... A-7

APENDICE B. - TABLAS DE RESULTADOS

APENDICE C. - GRAFICAS DE CONCENTRACIONES

## 1. - INTRODUCCION

### a) Antecedentes

Las lagunas litorales, esteros, estuarios, bahias y en general las zonas costeras, se encuentran entre las principales zonas de recursos naturales de cualquier nacion que limite con el mar. Estas areas tienen gran importancia en la produccion de alimentos, en la construccion y manejo de puertos, y en la industria turistica como areas de recreo. Por lo menos la tercera parte del litoral de Mexico corresponde a lagunas costeras. Y gran parte de la poblacion que reside en estas zonas las explota comercialmente como medio de sustentacion.

Ecologicamente, las lagunas costeras son sistemas de interaccion con el mar adyacente. Desde este punto de vista son muy importantes, ya que en la mayoria de ellas existe una productividad elevada, que, al haber intercambio con aguas oceanicas es aportada parcialmente al mar. Muchas pesquerias ribereñas se ven directamente beneficiadas, y algunas parcial o totalmente mantenidas por este intercambio de nutrientes. Ademas, estas zonas son importantes ya que pueden utilizarse como centros experimentales para la cria y cultivo de especies marinas potencialmente utiles.

El aprovechamiento de estas masas de agua se ha venido implementando rapidamente debido a sus condiciones de proteccion que las hacen menos precarias que la explotacion de mar adentro. Muchas veces se ha actuado en perjuicio de las pesquerias que naturalmente habitan en la laguna, debido principalmente a la falta de conocimientos que se tienen de sus recursos. Es basico conocer la ecologia y oceanografia de estas zonas, para poder abordar concientemente su explotacion. El estudio cientifico de estas zonas requiere de metodos, mediciones e instrumentos adecuados. Los periodos de mediciones suelen ser prolongados, requiriendo de gran esfuerzo humano y economico.

La implementacion de modelos numericos que expliquen debidamente el comportamiento hidrodinamico de estas masas de agua se ha hecho necesaria para el conocimiento espacio-temporal completo de su conducta, tanto en las condiciones naturales, como en las artificiales generadas por eventuales modificaciones introducidas por su explotacion.

A partir de datos obtenidos en el campo, en cierto periodo de observacion, y mediante un modelo numerico apropiado, se pueden predecir las multiples respuestas que tiene la laguna bajo

circunstancias específicas. Si el periodo de observación es suficientemente largo, de manera que las observaciones hechas sean representativas, pueden obtenerse del modelo predicciones a futuro, sobre el comportamiento físico y químico de ciertos parámetros dentro de la laguna.

Los resultados obtenidos del modelo serán una aproximación de aquellos observados, pues en la elaboración del modelo se hacen el máximo de asunciones, para simplificar su complejidad, y facilitar su aplicación a las condiciones naturales del estero. Se trata de reducir la cantidad de las ecuaciones a usar, y su dimensionalidad espacio-temporal al mínimo satisfactorio para explicar el comportamiento del fenómeno natural. Los resultados de un modelo serán adecuados, si están dentro de los fines prácticos que se requieran. Mediante su calibración en base a resultados observados en el campo, el modelo dará una mejor aproximación de los procesos que ocurren en la laguna.

El presente trabajo utiliza un modelo numérico uni-dimensional para predecir la dispersión de un trazador (contaminante) en el Estero de Punta Banda (Fig. 1). El modelo fue elaborado por D. W. Pritchard, e implementado por De la Paz (1978). El área de estudio es el Estero de Punta Banda, en Ensenada B. C. La descripción general, en lo que respecta a las condiciones hidrodinámicas, fue expuesta por De la Paz (1978). Dicho trabajo plantea todas las condiciones necesarias para realizar el presente ensayo, que en sí, es una generalización del primero.

Se han hecho numerosos estudios en el Estero de Punta Banda, se mencionan a continuación solamente aquellos que tienen relación con la hidrodinámica de esta cuenca.

Acosta y Alvarez (1974) observaron la distribución superficial de algunos parámetros físico-químicos durante Otoño e Invierno. Concluyen que los gradientes de estos parámetros son más intensos en Otoño que en Invierno. Además, indican que en el interior del estero, la temperatura del aire afecta mayormente la variación diaria de la temperatura del agua, mientras que las mareas afectan mayormente la variación diaria de la salinidad. La variación diaria de oxígeno disuelto se ve afectada por el ciclo diario de la radiación solar, y por los movimientos advectivos causados por las mareas. Cesena y Alvarez (1975), a partir de un estudio similar, concluyen que el Estero de Punta Banda es un antiestuario, con temperaturas y salinidades más elevadas hacia el interior del estero que en la boca durante todo el año. Detectaron máximos de temperatura y salinidad en el mes de Julio con valores de 26.0 °C y 37.36 ‰, respectivamente. Alvarez, Acosta y Lara (1977), atribuyen la variación de los parámetros físico-químicos a que existe un calentamiento y una evaporación no uniforme en el interior del estero debido a una batimetría irregular, a la existencia

de corrientes a lo largo de la playa en el exterior de la boca, y al oleaje variable de acuerdo a las condiciones de viento. Pritchard, De la Paz, Cabrera, Farreras y Morales (1978), establecen que las corrientes del estero son principalmente de mareas, y estan en su mayor parte dirigidas a lo largo del eje del canal. Las velocidades maximas en el flujo y en el reflujo son ligeramente mayores en la superficie que en el fondo. El aumento de la temperatura y de la salinidad hacia el interior del estero ocurre debido a que la evaporacion excede a la precipitacion y a la descarga de agua dulce. De acuerdo a las distribuciones de temperatura y salinidad, se tiende a producir un contrapeso en la distribucion de densidades, y por ende, un equilibrio entre la circulacion estuarina y la antiestuarina.

El presente trabajo se plantea basicamente sobre la informacion presentada por De la Paz (1978). Los datos necesarios para la aplicacion del modelo tales como areas superficiales, volúmenes, salinidades, y velocidades lineales de evaporacion para cada segmento, asi como las concentraciones espacio-temporales de contaminante, son los mismos obtenidos por De la Paz. A continuacion se presenta un breve resumen de dicho trabajo:

El estero se dividio en 11 segmentos (Fig. 1 bis) de un kilometro de longitud, a excepcion del segmento localizado en la cabeza que midio 690 metros. Para la aplicacion del modelo, se tomo al oceano adyacente como el primer segmento, y los 11 segmentos (2 al 12) dentro del estero. El punto de inyeccion usado en el modelo fue el segmento 9.

El trazador usado fue Rodamina Wt, en solucion acuosa al 20 . Se usaron 1.42 Kg. en peso seco. Se introdujo el trazador en el estero en un lugar situado a dos terceras partes de la distancia de la boca a la cabeza (segmento 9). La inyeccion se hizo el primero de Abril de 1977 a las 13:13 Hrs. Las mediciones se efectuaron del 3 al 20 de Abril de 1977, inclusive.

Los resultados de las concentraciones a traves del tiempo, tanto medidas como predichas, para el segmento de inyeccion 9, aparecen en las figuras 2A y 2B.

El procesamiento numerico, que da como resultado las soluciones de las ecuaciones diferenciales del modelo, se hizo mediante el paquete de programas ODESS, que incluye las subrutinas necesarias para dicho proposito, y que se explican en el Apéndice A de este trabajo.

b) Descripción del área de estudio.

El Estero de Punta Banda se localiza en la parte oeste del Valle de Maneadero. Entre los 31° 40' y 31° 48' de latitud N, y los 116° 34' y 116° 40' de longitud W. Aproximadamente a 15 km. al sur del puerto de Ensenada B. C. N., en la costa del Pacífico de la República de México (Fig. 1).

El valle fue formado por el hundimiento del bloque situado entre la península rocosa de Punta Banda, y la parte terrestre al norte del estero. Las líneas de falla se distinguen aun fácilmente por sus escarpes. El Valle de Maneadero era antes una hondonada profunda que ha sido llenada por los sedimentos acarreados por los ríos San Carlos y San Miguelito, (O'Brien y Zeevaert, 1968).

La barra de arena que separa al Estero de Punta Banda de la Bahía de Todos Santos mide 7 km. de longitud, y ha ido creciendo hacia el norte desde su formación. Se observan evidencias de esto por las líneas de dunas y de vegetación que marcan las posiciones antiguas de la boca del estero.

El estero se caracteriza por un canal en forma de 'L', que es paralelo a la barra en sus primeros 7 km. cerca de la boca, curvándose hacia el SE en los últimos 3 km. cerca de la cabeza. Al E del canal se extiende una zona de marismas, cortada por canales sinuosos, (ver Fig. 1). El ancho promedio del estero es aproximadamente 800 m., dependiendo del nivel de marea. Su profundidad máxima es de 7m. en bajamar media inferior (B.M.I.), registrada en la boca, y en el punto donde el canal se vuelve perpendicular a la barra, (De la Paz, 1978). El área de la laguna es de 2.6 Km en B.M.I., y 10.7 Km en altamar media superior (A.M.S.). La longitud máxima de la laguna es de 11.5 Km. Existe un retraso de la marea entre la boca y la cabeza del estero medido en 43 minutos, por O'Brien, et al, (1968). De la Paz (1978) calculo el área en bajamar media en 4.7 Km, y en 10.3 Km para pleamar media. No existe un aporte continuo de agua dulce al estero, pero en periodos de lluvia el aporte es considerable a través de los arroyos que se encuentran a lo largo de la costa E del estero.

c) Objetivos

De la Paz trato el modelo de dispersión usando solamente un punto del estero como punto de introducción del contaminante. El presente trabajo introducirá hipotéticamente una fuente instantánea de contaminante en cada uno de los segmentos del estero por separado, con el fin de :

- 1.- Obtener las concentraciones de dicho contaminante en espacio y en tiempo que resulten de cada caso, en cada segmento del estero.
- 2.- Calcular la permanencia de la tinta (contaminante) en el estero, respecto al tiempo de permanencia en el segmento de inyeccion.
- 3.- Observar el comportamiento de las concentraciones predichas por el modelo y compararlas con aquellas medidas directamente en el campo.
- 4.- Estimar la precision de los resultados del modelo para representar las condiciones reales.
- 5.- Indicar la importancia que tiene la marea en la dispersion del contaminante dentro del estero.
- 6.- Obtener un coeficiente de dispersion longitudinal para la calibracion del modelo, y la futura reestructuracion de sus ecuaciones.
- 7.- Calcular los tiempos de evacuado para todos los casos.

En si, se buscara el patron de dispersion del contaminante dentro del estero, asumiendo que el comportamiento del trazador depende de :  
i) el tiempo desde la inyeccion, ii) el tipo de descarga seccional entre segmentos, iii) el lugar de inyeccion, iv) la cantidad inicial de contaminante, v) el regimen de mareas, y vi) los fenomenos de dispersion.

d) Trabajo a realizar.

Para cumplir con los objetivos trazados, y poder evaluar la validez de las hipotesis postuladas, se plantea efectuar los siguientes ensayos con el modelo :

- 1.- Introduccion teorica de una masa unitaria de contaminante en el segmento numero 2.
- 2.- Obtencion de la masa total del contaminante en el estero en funcion del tiempo y del espacio.
- 3.- Calculo de la vida media del trazador en el estero,  $t(1/2)$ , y en cada segmento por separado. Se calculara tambien  $t(1/4)$  y  $t(1/8)$ .
- 4.- Los primeros tres pasos se repetiran haciendo variar el punto de inyeccion de segmento en segmento.
- 5.- Comparacion de las formas de desplazamientos de los maximos de concentracion en todos los casos.
- 6.- Obtencion de un coeficiente de dispersion longitudinal para los

# BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA

resultados predichos y observados.

7.- Obtencion de los tiempos de evacuado para todos los casos.

8.- Repeticion de los pasos anteriores usando condiciones de entrada de marea muerta, y marea viva, comparandose estos resultados con el caso de marea media.

9.- Comparacion del comportamiento observado del contaminante, con aquel predicho por el modelo, aclarandose ciertas condiciones que puedan explicar las diferencias.

Universidad Autónoma  
de Baja California



BIBLIOTECA CENTRAL  
ENSENADA

## II. - MODELO UNI-DIMENSIONAL PARA DISPERSION DE CONTAMINANTES

### a) Descripcion del modelo.

Considerese un estero esquematizado de acuerdo a la Fig. 1 bis. El estero se divide en  $n-1$  segmentos, considerandose al mar adyacente como el segmento  $i=1$ , y a la cabeza del estero como el segmento  $i=n$ .

Definiremos los siguientes terminos :

$A_i$ . - Area superficial del segmento  $i$ , en metros cuadrados.

$V_i$ . - Volumen del segmento  $i$ , en metros cubicos.

$S_i$ . - Salinidad promedio del segmento  $i$ , en gramos/kilogramo.

$C_i$ . - Concentracion promedio de algun trazador en el segmento  $i$ , en porciento relativo a la concentracion inicial.

Si definimos a  $l=i-1$ , y a  $r=i+1$

$Q(l,i)$ . - Descarga seccional del segmento  $i-1$  al  $i$ , en  $m$  /seg.

$Q(r,i)$ . - Descarga seccional del segmento  $i+1$  al  $i$ , en  $m$  /seg.

$Q(i,l)$ . - Descarga seccional del segmento  $i$  al  $i-1$ , en  $m$  /seg.

$Q(i,r)$ . - Descarga seccional del segmento  $i$  al  $i+1$ , en  $m$  /seg.

$E_i$ . - Velocidad lineal de evaporacion en la superficie del segmento  $i$ , en  $m/Hr$ .

$QE_i$ . - Descarga por evaporacion en la superficie del segmento  $i$ , en  $m$  /seg.

Se evalua por la ecuacion :

$$QE_i = A_i * E_i \quad (1)$$

Se definen las siguientes cantidades :

$$V_i = V_k \quad (2)$$

$$S_i = (V_k * S_k) \quad (3)$$

$$QE_i = QE_k \quad (4)$$

Para tener continuidad de volumen y de salinidad es necesario :

$$\frac{d}{dt} V_i = Q(l, i) - Q(i, l) - Q_{Ei} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} S_i = Q(l, i) * S_l - Q(i, l) * S_i \quad (6)$$

Resolviendo simultaneamente las ecuaciones (5) y (6) para  $Q(l, i)$ , y  $Q(i, l)$  tenemos :

$$Q(l, i) = \left\{ S_i \left( \frac{d}{dt} V_i + \frac{d}{dt} S_i \right) - \left( S_i - S_l \right) \right\} \quad (7)$$

y

$$Q(i, l) = Q(l, i) - Q_{Ei} - \frac{d}{dt} V_i \quad (8)$$

De igual manera se puede demostrar que :

$$Q(r, i) = \left\{ S_i \left( \frac{d}{dt} V_r + \frac{d}{dt} S_r \right) - \left( S_r - S_i \right) \right\} \quad (9)$$

$$Q(i, r) = Q(r, i) + Q_{Er} + \frac{d}{dt} V_r \quad (10)$$

Por lo que, teniendo suficientes observaciones para determinar el area superficial, volumen, salinidad y velocidad de evaporacion para cada segmento en funcion del tiempo, se podra calcular las descargas seccionales entre cada segmento.

Las ecuaciones se simplifican considerablemente bajo condiciones estacionarias. Si las mediciones se hacen sobre uno o varios periodos de mareas, bajo condiciones meteorologicas estacionarias, se pueden despreciar los terminos dependientes del tiempo considerando valores promedio de las variables durante el (o los) periodos de marea. Y de las ecuaciones anteriores tendremos :

$$Q(l, i) = S_i * Q_{Ei} \quad (S_i - S_l) \quad (11)$$

$$Q(i, l) = Q(l, i) - Q_{Ei} \quad (12)$$

$$Q(r, i) = S_i * Q_{Er} \quad (S_r - S_i) \quad (13)$$

$$Q(i, r) = Q(r, i) + Q_{Er} \quad (14)$$

En cualesquiera de los casos mencionados (estacionario y no estacionario), la variacion en el tiempo de la concentracion promedio de algun contaminante introducido en el segmento j y con una descarga continua  $Q_j$  en unidades de masa por unidad de tiempo se da por :

$$\text{o ot } V_i C_i = Q(l, i) C_l + Q(r, i) C_r - \{Q(i, l) + Q(i, r)\} C_i + Q_j \quad (15)$$

para una  $Q_j$  definida solamente para el segmento de inyección ( $j=i$ ), siendo cero en todos los demás casos.

Esta ecuación en forma diferencial, aproximada por diferencias centrales, e integrada por el método 'Leap-frog' (Pritchard, et al, 1979), nos da :

$$(C_i) = \{(V_i) \quad (V_i) \} (C_i) + 2 \ t \ (V_i) \ * \ \{Q(l, i) C_l + Q(r, i) C_r - (Q(i, l) + Q(i, r)) C_i + Q_j\} \quad (16)$$

En condiciones estacionarias,  $V_i$  no varía con el tiempo, entonces tenemos :

$$(C_i) = (C_i) + 2 \ t \ V_i \ \{Q(l, i) C_l + Q(r, i) C_r + \ - (Q(i, l) + Q(i, r)) C_i + Q_j\} \quad (17)$$

El tiempo  $t=t_0$  corresponde al tiempo de iniciación de la descarga del contaminante, siendo  $C_i=0$  para este tiempo. Las ecuaciones (16) y (17) no pueden ser usadas para el primer instante de tiempo, ya que su forma diferencial necesita de dos intervalos de tiempo.

Para un tiempo  $t=t_0 + t$  se asume que :

$$(C_i) = Q_j \ * \ t \ \text{con } Q_j=0 \ \text{para } j \neq i \quad (18)$$

Por lo que tenemos que todas las  $Q_i$  son cero excepto  $Q_j$ . Después de este primer paso, las ecuaciones (16) y (17) se pueden usar para el resto de las iteraciones.

La ecuación (17), (estacionaria), nos da el acumulamiento del contaminante en los diferentes segmentos hasta que se alcanza una distribución espacial estacionaria que será independiente del tiempo y mayor que la concentración inicial. En el caso de la ecuación (16), (no-estacionaria), las variaciones en el tiempo de los términos de volúmenes y descargas resultarán en una variación continua de la concentración del contaminante. Sin embargo, debido a que estas variaciones suelen ser periódicas, o por lo menos variar alrededor de algún valor promedio, la ecuación (16) nos dará el acumulamiento de la concentración del contaminante referido a este valor promedio, y subsecuentemente, dará el cambio en el tiempo de la distribución espacial del contaminante alrededor de este promedio.

Si el contaminante se introdujera en el segmento  $j$  como una fuente instantánea de masa  $m_j$  que es el caso de este estudio, entonces la

concentracion promedio en el segmento al tiempo  $t=t_0$  sera :

$$(C_i) = m_j (V_i) \quad m_j=0 \text{ para } j=i \quad (19)$$

Por lo que todos los  $C_i$  seran cero, excepto  $C_j$  para  $t=t_0$ . La distribucion de las concentraciones para el tiempo  $t=t_0+dt$ , despues del primer intervalo de tiempo sera :

$$(C_i) = \{(V_i) (V_i)\} (C_i) + 2 t (V_i) * \{Q(l,i)C_l + Q(r,i)C_r - (Q(i,l) + Q(i,r))C_i\} \quad (20)$$

Y para el resto de las iteraciones tendremos :

$$(C_i) = \{(V_i) (V_i)\} (C_i) + 2 t (V_i) * \{Q(l,i)C_l + Q(r,i)C_r - (Q(i,l) + q(i,r))C_i\} \quad (21)$$

Para condiciones de estado estacionario, la ecuacion para el primer intervalo de tiempo es :

$$(C_i) = (C_i) + 2 t V_i * \{Q(l,i)C_l + Q(r,i)C_r - (Q(i,l) + Q(i,r))C_i\} \quad (22)$$

Y para el resto de las iteraciones :

$$(C_i) = (C_i) + 2 t V_i * \{Q(l,i)C_l + Q(r,i)C_r - (Q(i,l) + Q(i,r))C_i\} \quad (23)$$

Se han despreciado las variaciones de los parametros dentro de cada segmento. Se asume que el contaminante se mezcla instantaneamente dentro de cada segmento, y solamente en el. Estas dos ultimas ecuaciones, (22) y (23), son las que se usan en el presente estudio, que corresponden a un caso estacionario con inyeccion instantanea.

La solucion numerica de estas ecuaciones requiere de ciertas condiciones de frontera. En el caso de esteros, su parte superior esta generalmente cerrada. Por lo tanto :

$$Q(n,n+1) = Q(n+1,n) = 0 \quad (24)$$

y

$$C(n+1) = C_n \quad (25)$$

En la boca hay varias alternativas para estimar la concentracion del contaminante. Aqui se usara un coeficiente de reflexion tal que :



$$C(1) = C(2) \quad \text{para } 0 < C < 1 \quad (26)$$

Esta relacion establece que la concentracion del segmento correspondiente al mar (segmento 1), sera una fraccion de la concentracion en el primer segmento del estero ( segmento 2). Se ha visto (Pritchard , et al, 1979), que para muchos propositos, y particularmente para los segmentos de la parte posterior del estero, los resultados son relativamente insensibles para un rango de valores de entre 0.25 y 0.75.

b) Representacion de las ecuaciones del modelo en lenguaje de computadora (FORTRAN IV).

A continuacion se enumeran las ecuaciones que utiliza la subrutina externa F que forma parte del paquete ODESS por medio del cual se resuelven las ecuaciones planteadas por el modelo (ver Apendice A). Todas las ecuaciones fueron mencionadas en los parrafos anteriores.

- A(I) : Area del segmento i, Ai.
- VOL(I) : Volumen del segmento i, Vi.
- SAL(I) : Salinidad del segmento i, Si.
- EV(I) : Velocidad lineal de evaporacion para el segmento i, Ei.
- Ecuacion (1) : Descarga por evaporacion

$$QE(I) = A(I) * EV(I) \quad \text{para } I = 2, NEQN.$$

siendo NEQN el numero de ecuaciones que se van a resolver.

- Ecuacion (4) : Suma de QE desde I=N, hasta I.

$$SQE(I) = SQE(I) + QE(J) \quad \text{para } I=2, NEQN \text{ y } J=1, NEQN.$$

- Ecuacion (11) : Descarga seccional entre los segmentos i-1 e i.

$$QIL(I) = SAL(I) * (SQE(I) * (SAL(I)-SAL(I-1)))$$

- Ecuacion (13) : Descarga seccional entre los segmentos i+1 e i.

$$QIR(I) = SAL(I) * (SQE(I+1) * (SAL(I+1)-SAL(I)))$$

- Ecuacion (19) : Concentracion de trazador para el tiempo t=0.

$$Y(SEG) = YINICI * VOL(SEG)$$

siendo  $SEG$  el segmento de inyeccion, y  $YINJCI$  la cantidad en kilogramos de contaminante arrojado.

- Ecuacion (23) : Concentracion promedio de contaminante en el segmento  $i$ , para un caso estacionario, y una descarga instantanea.

$$YP(I) = (QIL(I)*Y(I-1) + QIR(I)*Y(I+1) - QD(I)*Y(I)) / VOL(I)$$

Siendo  $QD(I) = QIL(I) + QIR(I) - QE(I)$ .

- Ecuaciones (24) y (25) : Se refieren a las condiciones de frontera para la cabeza, y son respectivamente :

$$QIR(NEQN) = 0.0$$

$$SAL(NEQN+1) = 0.0$$

- Ecuacion (26) : Concentracion del segmento 1 (mar).

$$YP(1) = REFL * YP(2)$$

Siendo  $REFL$  el coeficiente de reflexion. En este caso se tomo como  $REFL = 0.5$ .

Ademas, se establecieron las siguientes condiciones para el segmento 1 (mar) :

$$QE(1) = 0.0$$

$$SQE(1) = 0.0$$

$$QIL(1) = 0.0$$

$$QIR(1) = 0.0$$

$$QD(1) = 0.0$$

### III. - DESCRIPCION DE LAS MEDICIONES Y METODOS DE CALCULO

#### a) Datos necesarios para el modelo.

El periodo de mediciones abarco desde Diciembre de 1976 hasta Abril de 1977. Los datos necesarios para el modelo son las areas superficiales, volumenes salinidades y velocidades lineales de evaporacion para cada segmento. Para esto se registraron :

1) Variaciones con el tiempo de la altura de la superficie libre del agua.

2) Variaciones de la salinidad y la temperatura del agua en espacio y en tiempo.

3) Velocidades del viento, temperatura y humedad relativa del aire.

4) Variaciones espacio-temporales de las concentraciones de tinta fluorescente Rodamina Wt. inyectada en el estero como fuente instantanea.

#### b) Metodos de observaciones e instrumentos.

La obtencion en detalle de las mediciones que se mencionan a continuacion, asi como el procesamiento de los datos en crudo, se describe ampliamente en De la Paz (1978), y en Pritchard, et al, (1978). El presente trabajo solo se limita a mencionar las mediciones utilizadas directamente en el tratamiento del modelo en cuestion.

MAREAS. - Las mareas tomadas para correr el modelo corresponden a las mareas predichas para el Estero de Punta Banda a partir de los registros de marea del puerto de Ensenada, para el mes de Abril de 1977.

TEMPERATURAS Y SALINIDADES. - Se utilizo el instrumento denominado ICTI (Indictivity Conductivity Temperature Indicator) disenado y construido en Chesapeake Bay Institute. Este aparato mide conductividad y temperatura in situ. Se obtuvieron mediciones tanto en flujo como en el reflujos de las mareas, para una serie de estaciones en la superficie y a cada dos metros hasta el fondo.

METEOROLOGIA. - Se instalo una estacion meteorologica en el Tonys Camp, situado a 4 Km. al sur de la boca del estero. La estacion consto de un higrotermografo de registro continuo H311, para temperatura y humedad relativa del aire, y de un anemografo modelo 02AM300 Kalhsico de registro continuo.

FLUORESCENCIA. - Para estas mediciones se utilizo un fluorometro Turner 111 modificado en su puerta de tal manera que permitiera el flujo continuo desde un sistema de bombeo en la superficie del agua, registrandose la fluorescencia superficial en un continuo espacio-temporal durante los cruceros.

Las velocidades lineales de evaporacion se calcularon mediante el uso de la siguiente formula (U.S. Geological Survey, 1942) :

$$E = 4.283 \times 10^{-4} w(E_{se} - E_a)$$

dadas en m/Hr. Siendo

- w : velocidad del viento a una altura de 6m, en m/seg.
- E<sub>se</sub> : presion de vapor saturado sobre la superficie del estero a la temperatura del agua dada, en milibars.
- E<sub>a</sub> : presion de vapor en el aire a una altura de 6m, en milibars.

'E<sub>se</sub>' se computa a partir de la temperatura del agua, y 'E<sub>a</sub>' a partir de la humedad relativa del aire, usando tablas meteorologicas especiales elaboradas por el Instituto Smithsonian (List, 1951).

El calculo de las areas superficiales y volúmenes para cada segmento se efectuó de la siguiente manera. Se obtuvieron las areas superficiales para diferentes profundidades para todos los segmentos del estero de cartas batimetricas elaboradas por la Secretaria de Marina. Se obtuvieron los volúmenes a diferentes profundidades para todos los segmentos integrando los valores de las areas superficiales con la profundidad. Para el caso de marea media, se obtuvieron para todos los días del mes de Abril de 1977 las areas superficiales en la maxima y minima altura de marea de cada día y se calculo el area superficial media promediando estos valores diarios. Posteriormente se calculo el promedio de estas areas para todo el mes. Esto se hizo para cada segmento del estero. Lo mismo se hizo para obtener los volúmenes de los segmentos (ver Tabla 17).

Para obtener los valores de areas superficiales y volúmenes para los casos de marea muerta y marea viva, se procedio de la misma manera, pero solo se tomo el día en que ocurrio la marea muerta o viva, respectivamente (ver Tablas 18 y 19). La marea viva ocurrio el 4 de Abril, y la muerta el 29 de Abril de 1977. Para la marea muerta se

tomaron los valores de alturas de marea a partir de la sexta hora del día mencionado. La altura máxima en marea viva fue 1.60 m., y la mínima -0.29 m., con respecto a B.M.I. La altura máxima en marea muerta fue 0.14 m., y la mínima -0.13 m., respecto a B.M.I. (ver Figs. 48 y 49).

c) Obtención de las concentraciones del contaminante en espacio y tiempo.

Se presenta en breve, la forma de manejar el paquete de computación ODESS para resolver adecuadamente el modelo planteado (ver Apéndice A). Se necesita definir, primeramente, las constantes relacionadas con el número de ecuaciones (NEQN), el criterio de error (RELERR, ABSERR), y el máximo número de iteraciones permitidas (MAXNUM). También se necesita reportar la cantidad inicial de contaminante en kilogramos peso seco (YINICI), el tiempo inicial (T), y el tiempo final (TOUT), en donde se requiere la solución del modelo. Así como el segmento de inyección (SEG) y el número de segmentos (NUSEG). Todas estas constantes se explican debidamente en el Apéndice A.

Sus valores fueron los siguientes :

NUSEG = 12  
NEQN = 12  
MAXNUM = 1000  
YINICI = 100  
RELERR = 0.000001  
ABSERR = 0.000001

Las iteraciones se hicieron día tras día, y el segmento de inyección se fue cambiando desde el segmento 2, hasta el segmento 12.

El modelo se resolvió para 60 días, usando las inyecciones desde el segmento 3 al segmento 12, y hora por hora para el caso de la inyección en el segmento 2 (cercano a la boca), ya que ocurre gran pérdida de contaminante en las primeras horas después de la inyección.

Las concentraciones resultantes se obtuvieron en porcentajes respecto a la inyección inicial, para generalizar el procedimiento. Se obtuvieron las distribuciones del contaminante respecto al segmento de inyección, en espacio y en tiempo.

Para facilitar la interpretacion de los resultados, se generaron cuatro tipo de graficas. A saber :

1. - Distribucion de contaminante en distancia, a diferentes tiempos, para cada una de las inyecciones. (Figs. 3 a 13)
2. - Variacion y relacion temporal de las distribuciones de contaminante en la distancia, para cada una de las inyecciones. (Figs. 14 a 24)
3. - Distribucion de contaminante en el tiempo, para cada segmento, y para cada inyeccion. (Figs. 25 a 35)
4. - Decaimiento de la concentracion en cada segmento con el tiempo, respecto a la maxima concentracion en dicho segmento, para cada inyeccion. (Figs. 36 a 46)

d) Obtencion del coeficiente de dispersion longitudinal.

El metodo que utiliza el presente trabajo para calcular el coeficiente de dispersion, es el mencionado por Carter y Okubo (1970). A partir de la ecuacion expuesta por Fischer (1966), Carter calcula la varianza de la concentracion de dos maneras : la primera monitoreando el desplazamiento de las maximas concentraciones, y la segunda, ajustando una curva normal a las distribuciones de concentraciones contra distancia y haciendo uso de la siguiente ecuacion :

$$\text{VAR} = (1 \quad 2) (\text{Area bajo la curva} \quad \text{Concentracion maxima})$$

Se adopto para este trabajo este ultimo metodo.

Se obtuvieron los momentos estadisticos para las distribuciones de concentracion correspondientes al segmento de inyeccion 9, tanto para los resultados observados, como para los predichos. Se obtuvo la curva normal ajustada (Spiegel, 1970), y se integro para obtener su area (ver Tabla 20). Los datos aparecen en las figuras 52 y 53, junto con el ajuste de las curvas normales para ambos casos.

Seguidamente se grafico la varianza para cada caso con respecto al tiempo. Se utilizo para esto las varianzas obtenidas a partir del tercer dia y hasta el noveno dia, ya que el ajuste fue mas irregular para los demas dias. La pendiente obtenida de la curva de regresion representa la estimacion del coeficiente de dispersion longitudinal, en unidades de area por tiempo, para el caso predicho y observado. Los resultados aparecen en las figuras 54 y 55, y se discutiran mas adelante.

#### IV. - RESULTADOS

a) Caso de mareas medias.

i) Graficas de concentraciones en espacio y tiempo.

En esta seccion se presentan los resultados obtenidos por el modelo bajo las condiciones anteriormente presentadas (ver Tabla 17). Se expondra el comportamiento de la tinta a lo largo del estero, y a traves del tiempo. En la interpretacion de las graficas, no se toman en cuenta concentraciones menores del 1.

Al inyectarse el contaminante en el segmento 2 (Tabla 1), se pierde cerca de la mitad de la concentracion inicial en las primeras dos horas (Fig. 14). En la primera hora, la nube de contaminante se dispersa hasta el segmento 4 (Fig. 3). No existen concentraciones significativas (mayores del 1 de la concentracion inicial) arriba del segmento 6 (Figs. 25a y 25b). La mancha tarda dos horas para llegar al segmento 5 y cuatro horas para llegar al segmento 6. Las maximas concentraciones permanecen mas tiempo en el segmento 6, que en cualquier otro segmento. Hay gran perdida de trazador. Despues de tres horas se pierde todo contaminante en el segmento 2 (Fig. 25a). Despues de doce horas no hay concentraciones significativas en ninguno de los segmentos del estero (Fig. 14).

Al hacerse la inyeccion en el segmento 3 (Tabla 2), se pierde el 45 del trazador el primer dia, y la mancha se extiende hasta el segmento 9. A traves del tiempo, la nube se dispersa hacia la cabeza del estero disminuyendo de concentracion (Fig. 4). Tarda tres dias para llegar al segmento 10. No existen concentraciones significativas arriba de este punto (Fig. 26b). Los segmentos 2, 4, 5, 6, y 7 alcanzan su maxima concentracion entre el primer y segundo dia (Fig. 26a). Los maximos en el resto de los segmentos se van retrasando a medida que aumenta su distancia desde la boca (Fig. 26b). En el segmento 9 ocurre la mayor permanencia de los maximos. Despues de doce dias, no existen concentraciones significativas en ninguno de los segmentos (Fig. 15).

Las curvas para las inyecciones en los segmentos 4, 5 y 6 (Figs. 5-7, 16-18, y 27-29), son muy similares a las curvas para la inyeccion en el segmento 3. Varian muy poco sus valores de concentracion.

Practicamente la variacion es insignificante. La concentracion del trazador en el segmento de inyeccion decae bruscamente en el primer dia, llegando al 10 o 15 de la concentracion inicial. Las maximas concentraciones se registran arriba del segmento de inyeccion en todos estos casos, a excepcion del segmento de inyeccion 6, donde ocurre lo contrario (Figs. 29a y 29b). Las curvas para la inyeccion en el segmento 5 y en el 6 son sorprendentemente similares (Figs. 6 y 7), indicando las mismas condiciones dinamicas de renovacion del agua en toda la parte central del estero.

Para la inyeccion en el segmento 7 (Tabla 6), la tendencia principal de la nube es la de dispersarse hacia la boca. El primer dia, la nube se encuentra entre los segmentos 2 y 10, teniendo la maxima concentracion en el segmento 7 (Figs. 8 y 19). Existe poca perdida de trazador los primeros dias. La nube tarda dos dias para llegar al segmento 11, y cuatro dias al segmento 12 (Fig. 30b). Los maximos para los segmentos 2 al 9 se alcanzan en los primeros dos dias despues de la inyeccion. El tiempo para las maximas concentraciones para los ultimos tres segmentos se retrasa (Figs. 30a y 30b). Los maximos permanecen mas tiempo en el segmento 9 y 12. Despues de doce dias el maximo se establece en el segmento 12.

En el caso de la inyeccion en el segmento 8 (Tabla 7), existe la tendencia inicial de dispersion hacia la boca, aunque menos marcada que en el caso anterior (Figs. 9 y 20). Las concentraciones son mayores en los segmentos abajo del punto de maxima concentracion los primeros seis dias (Fig. 20). Los maximos para los segmentos 2 al 5 ocurren despues de dos dias, y despues de un dia para los segmentos 6, 7 y 9 (Figs. 31a y 31b). En el primer dia la nube se extiende desde el segmento 2 al 11 (Fig. 20). Tarda tres dias para llegar al segmento 12 (Fig. 31b). Existe poca perdida de trazador los primeros dias. Ocurre permanencia en los segmentos 9 y 12. Despues de once dias el maximo se establece en el segmento 12.

Al inyectarse el contaminante en el segmento 9 (Tabla 8), existe dispersion a lo largo de todo el estero (Fig. 21). Sin embargo, se presentan mayores concentraciones en los segmentos localizados hacia la boca del punto de inyeccion en los primeros cuatro dias (Figs. 32a y 32b). El primer dia la mancha se localiza entre los segmentos 3 y 11 (Fig. 1). Tarda dos dias para llegar al segmento 2 y al segmento 12. Hay muy poca perdida de trazador los primeros dias. Para los segmentos 7, 8, y 10 los maximos ocurren el primer dia. Para el resto de los segmentos hacia la boca, ocurren hasta el tercer dia. Se alcanza el maximo al cuarto dia para el segmento 11, y al noveno para el segmento 12 (Figs. 32a y 32b). Ocurre permanencia de las maximas concentraciones en los segmentos 9 y 12. El maximo se establece en el segmento 12 despues de diez dias.

Para la inyeccion en el segmento 10 (Tabla 9), la tendencia

inicial del contaminante es la de dispersarse hacia la boca (Fig. 22). Esto ocurre en los primeros tres días. Practicamente no se pierde nada de trazador en este tiempo. En el primer día la mancha se localiza entre los segmentos 6 y 12, ocurriendo la máxima concentración en el segmento 10 (Fig. 11). Tarda dos días para llegar al segmento 2. Los máximos para los segmentos 2 al 6 ocurren al quinto día (Fig. 33a), y en seis días para el segmento 12 (Fig. 36b). Existe permanencia de los máximos en los segmentos 10 y 12. El máximo se establece en el segmento 12 después de siete días.

Al inyectarse el trazador en el segmento 11 (Tabla 10), existe muy poca (casi nula) pérdida de trazador los primeros días (Fig. 23). En el primer día la mancha se extiende hasta el segmento 8 (Fig. 12). Tarda tres días para llegar al segmento 4, y 5 días para llegar al segmento 2 (Fig. 34a). El máximo es mayor en el segmento 12 que en el 10, y se alcanzan después de dos y cinco días respectivamente (Fig. 34b). Después de diez y siete días sigue habiendo más del 10% de la concentración inicial en el segmento 12, y 44% en todo el estero (Fig. 34b). El máximo se localiza en el segmento 12 después de cuatro días. Puede observarse además, que los perfiles de las curvas de concentración para los casos de las inyecciones en los segmentos 9, 10 y 11 (Figs. 21, 22, y 23), son muy similares.

Al inyectarse el contaminante en el segmento 12 (Tabla 11), la mancha en el primer día se localiza entre los segmentos 10 y 12 (Fig. 13). No existe pérdida significativa en los primeros cinco días (Fig. 24). La mancha tarda tres días para llegar al segmento 7, cinco días para llegar al segmento 5, y nueve días para llegar al segmento 2 (Fig. 35a). La pérdida del contaminante es muy lenta (Fig. 35b). Los máximos de concentración para los segmentos 2 al 6 ocurren alrededor del doceavo día después de la inyección (Fig. 35a).

## ii) Curvas de decaimiento de concentración.

Caso general : Comparación de decaimientos en el segmento de inyección, para todos los segmentos (Fig. 47). - Las curvas para las inyecciones en los segmentos 5 y 6 son muy similares entre sí. El comportamiento de las curvas para las inyecciones 7, 8, y 9 presenta una tendencia similar, pero con mayores concentraciones en la curva del segmento 9. A medida que el punto de inyección se mueve hacia la cabeza, las curvas disminuyen más suavemente a través del tiempo, mostrando menor velocidad de decaimiento, es decir, mayor tiempo de evacuado en dichos segmentos. En las inyecciones cerca de la boca, las curvas decaen más rápidamente, y llegan, en los primeros cinco segmentos, por debajo del 10% de la concentración inicial en los primeros quince días. En cambio, en este mismo periodo, las concentraciones siguen siendo mayores del 50% de la concentración inicial en los últimos dos segmentos cercanos a la boca.

Inyección en el segmento 2 (Fig. 36).- Después de cuatro horas no se observa contaminante en el segmento 2, y desaparece por completo del estero (aun del segmento 12) en 36 horas. A medida que los segmentos se aproximan a la cabeza, los máximos en ellos se van retardando. Las curvas aparecen sesgadas hacia la izquierda en todos los casos, a excepción del segmento 3, indicando que el decaimiento es más rápido que el incremento de contaminante. Las curvas de los segmentos 5 y 6, parecen ser simétricas, aunque desfasadas en tiempo una de la otra.

Inyección en segmento 3 (Fig. 37).- La concentración de trazador en el segmento 3 decae abruptamente el primer día. Los segmentos 4, 5, y 6 tienen un comportamiento muy similar entre sí. Alcanzan su máximo el primer día, y disminuyen notablemente los primeros cinco días. También los segmentos 7, 8, y 9 tienen un comportamiento similar entre sí, aunque sus máximos estén desfasados en un día. Los tres últimos segmentos presentan una distribución notablemente sesgada hacia la derecha. Su decaimiento es más lento. Para la inyección en el segmento 4 (Fig. 38), el patrón es muy similar.

Para las inyecciones en los segmentos 5 (Fig. 39) y 6 (Fig. 40), las curvas son prácticamente iguales. Y siguen el mismo comportamiento que las curvas anteriormente mencionadas. El segmento de inyección pierde el 90 de su concentración inicial en los primeros tres días. Las curvas de los segmentos 4, 5, y 6 se juntan hasta casi coincidir. Todas las curvas aparecen sesgadas hacia la derecha.

Inyección en segmento 7 (Fig. 41).- El segmento de inyección pierde más del 90 de la concentración inicial los primeros tres días. No hay diferencia significativa entre los segmentos abajo del segmento de inyección y el inmediatamente arriba de él. El segmento 9 se comporta análogamente a estos. Los segmentos 10, 11, y 12 decaen más lentamente. Los demás, después de quince días presentan menos del 10 de la concentración inicial. Todas las curvas aparecen sesgadas hacia la derecha.

Inyección en segmento 8 (Fig. 42).- No hay diferencia en el decaimiento de los segmentos 3, 4, 5, y 6. Tampoco entre los segmentos 7 y 9. Los segmentos 10, 11, y 12 se comportan igual que en el caso anterior. La máxima concentración se alcanza primero en los segmentos 9 y 7, que en los segmentos 3, 4, 5, 6, y 10. Después del cuarto día no se encuentran concentraciones significativas en el segmento 8.

Inyección en segmento 9 (Fig. 43).- La concentración en el segmento inicial sigue decayendo abruptamente los primeros días, pero en menor escala que en los casos anteriores. Después de cinco días no existe concentración significativa en este punto. Los segmentos 2, 3, 4, 5, y

6, presentan curvas similares. Sus maximos se retrasan en comparacion con los casos anteriores, y ocurren despues que para los segmentos 7, 8, y 10. Las tendencias de los segmentos 7 y 8 son similares. El segmento 10 decae mas rapidamente que en los casos anteriores, y se comporta de igual manera que los primeros segmentos despues del doceavo dia.

Inyeccion en segmento 10 (Fig. 44).- Decaimiento brusco en el segmento de inyeccion. Los maximos ocurren mas rapido y mas juntos unos de otros. Tienen el mismo comportamiento los segmentos 2 al 6. Sus maximos ocurren despues que en los demas segmentos, salvo para el segmento 12. A partir del dia 18 los segmentos 7 y 11 presentan el mismo comportamiento, que en general, es similar al del segmento 8. La concentracion del segmento 9 disminuye mas lentamente que la del segmento 10, pero mas rapido que la de los demas, y muy cercana a la de los segmentos 7, 8, y 11.

Inyeccion en segmento 11 (Fig. 45).- El segmento de inyeccion sigue el mismo patron ya mencionado en los casos anteriores, aunque menos abrupto. Los segmentos 2 al 6 se comportan similarmente, aunque sus maximos se desplazan en el tiempo respecto a los casos ya mencionados. La concentracion del segmento 10 decae mas rapidamente que cualquiera, y con un comportamiento cercano al del segmento 12. Los segmentos 9, 8, y 7 presentan la misma tendencia, aunque sus concentraciones van decayendo mas rapidamente mientras menos distancia tengan de la cabeza.

Inyeccion en segmento 12 (Fig. 46).- El segmento de inyeccion decae notablemente mas despacio que en los casos anteriores. Los primeros cinco segmentos tienen el mismo comportamiento (seg. 2 al 6). Sus maximos ocurren despues de trece dias. Los segmentos 9, 8, y 7 se comportan similarmente entre si, y basicamente igual que los primeros. Los segmentos decaen mas rapido a medida que estan mas cerca del segmento de inyeccion.

En general, puede decirse ademas, que en casi todos los casos las curvas estan sesgadas hacia la derecha, indicando un decaimiento mas lento que el incremento y tambien en casi todos los casos las curvas de cuatro segmentos cercanos a la inyeccion se juntan hasta casi coincidir, indicando esto que la mezcla de contaminante y agua es muy buena (casi total) al menos en una distancia de dos segmentos (2 km.) al rededor del segmento de inyeccion.

iii) Tiempos de permanencia.

Definiremos a la vida media del trazador en un segmento o en el estero como el tiempo necesario para que la concentracion inicial de trazador en el segmento o en el estero se reduzca a la mitad. Analogamente, la vida cuarta y octava de un trazador se define como el tiempo necesario para que la concentracion inicial de trazador se reduzca a su cuarta u octava parte, respectivamente.

La Tabla 12, muestra las vidas medias, cuartas y octavas del trazador, para todos los segmentos del estero, respecto al segmento de inyeccion 2. Se puede observar que en las primeras cinco horas se pierde la mitad del contaminante inicial en cada segmento.

La Tabla 13 muestra las vidas medias del trazador para todos los segmentos en funcion del punto de inyeccion, que varia desde el segmento 3 al 12, para este caso. En todos los casos de inyeccion, las vidas medias del contaminante aumentan hacia ambos lados del punto de inyeccion, siendo mayor para el segmento inmediatamente arriba de dicho punto, que en el inmediatamente abajo unica excepcion a esto es el caso del segmento 7. Para los segmentos de inyeccion, la vida media fluctua desde aproximadamente 12 horas para la inyeccion en el segmento 3, hasta 84 horas para la inyeccion en el segmento 12. Estos valores pueden parecer pequenos al compararse con las vidas medias de los demas segmentos (de no-inyeccion) que son de 28 a 363 horas. Sin embargo, debe considerarse que la concentracion inicial es muy elevada (100 %) en los segmentos de inyeccion en comparacion con los otros segmentos (0 %), lo que explica el rapido decaimiento en los primeros.

Lo mismo sucede para la vida cuarta del fluido (Tabla 14), aunque los valores de permanencia son mayores. En la inyeccion 7 sucede lo mismo ya mencionado. El patron se repite para los resultados de la vida octava del trazador (Tabla 15). En general, para los segmentos de no-inyeccion, puede observarse que la vida media del contaminante fluctua entre 1 y 6 dias en los segmentos 3 al 6, y 7 y 15 dias en los segmentos 9 al 12, con condiciones intermedias en los segmentos 7 y 8.

Al tomarse todos los segmentos del estero en conjunto (Tabla 16), los tiempos de decaimiento aumentan a medida que el punto de inyeccion se acerca a la cabeza. Para la inyeccion en el segmento 2, en pocas horas se pierde todo el contaminante. Para inyecciones entre los segmentos 3 al 6, la vida media de todo el contaminante en el estero es de 3 dias. Para inyecciones en los segmentos 7 al 9, la vida media es de 5 a 7 dias. Y para inyecciones entre los segmentos 10 al 12, la vida media es de 11 a 19 dias. La vida media para la inyeccion en el segmento 2 es de escasas dos horas.



b) Caso de marea muerta.

La Tabla 18 muestra los valores de entrada al modelo tomando en cuenta condiciones de marea muerta. Los resultados obtenidos, y su comparacion con la situacion de marea media para la inyeccion en el segmento 9, aparecen en las figuras 50a y 50b. Existe gran similitud en la forma del decaimiento y entre los valores de concentracion de contaminante para marea muerta y marea media. Para el segmento 2, y el segmento de inyeccion (seg. 9), ambas distribuciones son iguales. En general, no existen diferencias significativas en ninguno de los segmentos, salvo el segmento 12, que muestra concentraciones muy bajas para marea muerta. Los segmentos 3 al 5, y 7, muestran valores un poco mayores para marea muerta. En el segmento 10 sin embargo, los valores son ligeramente inferiores para marea muerta. Para el segmento 11, durante los primeros ocho dias, se obtienen concentraciones mayores en marea muerta que en media. En general, el comportamiento del contaminante es igual para ambos casos.

Se eligio para la comparacion el caso de la inyeccion en el segmento 9, porque este es el caso en que se efectuó el experimento en el campo de dispersion con trazador, y se calibro el modelo con estos resultados. Sin embargo, comparaciones para otros casos de inyeccion, aunque no se muestran, no evidencian diferencias significativas con el caso mencionado.

c) Caso de marea viva.

La Tabla 19 muestra los valores usados para resolver el modelo para el caso de marea viva. Los resultados y su comparacion con el caso de marea media nuevamente para la inyeccion en el segmento 9 se muestran en las figuras 51a y 51b. En todos los segmentos, a excepcion del segmento 12, las concentraciones predichas para el caso de marea viva son ligeramente mayores que para el caso de marea media, salvo en los primeros dias. Sin embargo, en ninguno de los segmentos existen diferencias significativas en la forma de las curvas y en los valores correspondientes entre ambos casos, salvo para el segmento 12. Los maximos de concentracion para el caso de marea viva estan desfasados levemente en el tiempo respecto a los maximos para la marea media. En general, se observan menores diferencias entre estos dos casos, que entre los casos de marea muerta y marea media.

# BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA

## d) Coeficiente de dispersion.

Se efectuó el ajuste de curvas normales solamente para el caso de la inyección en el segmento 9, que es el único con el que se cuenta con datos de mediciones de dispersión del trazador. Como se observa en las figuras 52a, 52b, y 53a, 53b, el ajuste de la curva normal se hace con mayor exactitud para los datos predichos por el modelo, que los observados en el campo. Se tomaron los días 3 al 9 de Abril de 1977 para ambos casos, ya que en ellos había menor discrepancia entre las curvas normales y los datos. La Tabla 20 muestra el cálculo de la varianza para los datos predichos y los observados.

El valor del coeficiente de dispersión, obtenido como la pendiente de la recta de regresión (según se explicó en la sección IIId) para los datos predichos fue de  $D_p = 0.49 \times 10$  cm /seg (Fig. 54). Y para los valores observados fue de  $D_o = 1.62 \times 10$  cm /seg (Fig. 55). Esta diferencia se tratará de explicar más adelante.

## e) Diferencias entre el modelo, y los valores observados.

En general, los valores observados en el campo, y los predichos por el modelo, difieren en menos del 10 (Fig. 56). Las diferencias son menores para los segmentos más cercanos al punto de inyección (Figs. 57a y 57b).

Una diferencia notoria entre ambos patrones de distribución, es la aparición de un segundo máximo en casi todas las curvas de datos observados, que aparece en el noveno día para todos los casos. Sin embargo, es de notar, que este segundo máximo también aparece en la curva de decaimiento observado para todo el trazador contenido en el estero (Fig. 58). Esto último indica que la causa más probable del hecho sea una descalibración del instrumento de medición a partir del noveno día, que entrega valores superiores a los del modelo, no solamente para el noveno día, sino para los subsiguientes también. Un ajuste de estos valores reducirá aun más las diferencias entre los resultados del modelo y los medidos.

## V. - DISCUSION

### a) Modelo numerico.

Existen innumerables estudios hechos en estuarios realizados con la ayuda de modelos numericos. Muchos de ellos (Carter 1976, Carter y Okubo 1970, Gardner y Pritchard 1974, Pritchard, Okubo y Mehr 1962) utilizan una tinta fluorescente para la obtencion de un coeficiente de dispersion que les permite la calibracion del modelo.

Existen modelos uni-dimensionales (Carter 1976, Fischer 1968, etc.), bi-dimensionales (Elliot 1975, Pritchard et al, 1962), y tri-dimensionales. Todos con sus debidas simplificaciones geometricas y condiciones de frontera, de acuerdo al caso real a tratar.

En una laguna elongada y estrecha, y sin ramificaciones, la ecuacion general de difusion, en su forma tri-dimensional, se puede simplificar a dos dimensiones, despreciando los terminos laterales. Aun mas, si la laguna es de poca profundidad, y existe fuerte mezcla vertical, los terminos relacionados con los cambios verticales se pueden omitir, dejando la ecuacion en forma unidimensional (Pritchard, et al, 1962)

En el modelo utilizado en este trabajo, se asume que las variaciones tanto laterales como verticales son minimas, y por ende, despreciables, lo que lo hace adecuado a la situacion real del Estero de Punta Banda. El modelo se basa principalmente en las descargas seccionales entre los segmentos, que a su vez dependen basicamente de la salinidad y del area superficial del segmento.

El modelo no toma en consideracion ningun coeficiente de dispersion. Esto hace muy dificil su calibracion. Para poderlo calibrar adecuadamente, se necesitaria introducir un nuevo termino en la ecuacion general del modelo, que tomara en cuenta un coeficiente de dispersion longitudinal, el que generalmente se obtiene de la siguiente manera :

Se obtienen las distribuciones en espacio y tiempo de las concentraciones de tinta fluorescente. Se resuelve el modelo con estos valores (y las demas variables requeridas) para obtener el coeficiente

de dispersion que debe de estar incluido en la ecuacion de dispersion del modelo. Obteniendo este coeficiente, se corre el modelo para las condiciones de entrada que se quieran analizar utilizando el coeficiente de dispersion obtenido. Se obtendran las distribuciones de concentracion de contaminante en espacio y en tiempo, relacionadas con el coeficiente de dispersion observado en los datos reales.

Las diferencias entre los resultados del modelo y los datos reales se deben, principalmente, a la simplicidad del modelo, pues en la ecuacion de continuidad, solo toma en cuenta las descargas seccionales, cuando es evidente la existencia de otros procesos hidrodinamicos que son importantes en la dispersion del contaminante.

#### b) Dispersion del contaminante.

Cuando la circulacion en alguna laguna costera es debida principalmente a la marea, y si la laguna es de secciones transversales uniformes y con la misma amplitud de marea, la distribucion longitudinal de contaminante se aproxima a una curva normal. Sin embargo, en la mayoria de las lagunas costeras, no se observa uniformidad en sus secciones transversales, y ademas, la energia disponible para la mezcla es variable entre secciones. Esto ocasiona una distribucion sesgada, con la maxima concentracion desplazandose hacia arriba del centro de masa del contaminante. Esto se produce a pesar de que el flujo hacia la boca produce perdida de contaminante del estero (Pritchard, 1962). Un patron similar se encontro en este estudio, y se muestra muy claramente para las inyecciones en los segmentos 7 y 8, y en general se cumplio para todos los casos.

Al introducirse el contaminante a la mitad del estero (seg. 7, Fig. 8), a pesar de que el flujo de masa es hacia la boca, el desplazamiento de los maximos es hacia la cabeza. Se produce esto principalmente por los procesos advectivos dentro del estero.

En todos los casos, el maximo despues de cierto tiempo se localiza en el segmento 12. Se obtuvo un movimiento de la nube de contaminante mayor hacia la boca que hacia la cabeza, para las inyecciones en los segmentos intermedios (seg. 6 al 9), como se muestra en las figuras 7 a 10. Para las inyecciones en los extremos del estero (seg. 2, 3, y 11, 12) se observa que el movimiento de la nube de contaminante se hace con mayor facilidad desde la cabeza a la boca, que de la boca a la cabeza (Figs. 3, 4, y 12, 13, respectivamente). La nube se desplaza con mayor rapidez hacia la boca que hacia la cabeza.

Los maximos se presentan arriba del centro de masa del contaminante, debido a que en los segmentos localizados hacia la boca

del centro de masa de la nube hay mas mezcla, y el contaminante es diluido en las capas verticales (Pritchard, et al, 1962). Se observo que los maximos permanecen mas tiempo en los segmentos 6, 9, y 12, respectivamente. Los segmentos 6 y 9, presentan valores altos de area superficial, volumen y salinidad, con respecto a los demas segmentos (ver Tabla 17), por lo que ambos actuan como trampas debido a esto. El movimiento relativo de los maximos depende del cambio longitudinal del area transversal y/o de la difusibilidad. Cuando estos valores cambian mucho, las concentraciones en un intervalo dado, muestran un movimiento hacia la cabeza (Pritchard, et al, 1962).

En todos los casos se observo un decaimiento brusco en la concentracion de contaminante para el segmento de inyeccion. Pritchard (1954), explica esto obteniendo las concentraciones maximas en funcion del tiempo y graficandolas en papel semi-log. Obtiene dos curvas de esta distribucion, una para la etapa inicial (primeras horas), y otra para el resto de las etapas. Con esto muestra que la curva para los tiempos iniciales cae mucho mas abruptamente que la curva de las etapas posteriores. Esto ocasiona un descenso brusco en las concentraciones instantaneas del contaminante durante las primeras horas, y luego una etapa gradual de descenso en las horas siguientes.

### c) Coeficiente de dispersion.

Al introducir materia soluble o en suspension en aguas de algun estero, la masa del contaminante sera transportada hacia la boca del estero, pero al mismo tiempo, los contornos originales que delimitaban a la mancha se deformaran a medida que la nube se dispersa en todas las direcciones. El patron resultante de la concentracion promedio en una seccion se parecera a una distribucion de probabilidad sobre el eje de flujo, sera sesgada, y caracterizada al principio, por concentraciones altas dentro de una zona pequena y con una cola hacia la cabeza (Sooky, 1969). Al pasar el tiempo, la distribucion se aplanara y tiende a transformarse en una distribucion normal a medida que la nube se dispersa hacia ambos lados de la inyeccion. Este proceso, denominado dispersion longitudinal, tiene gran importancia en el control de la contaminacion marina. La razon entre el transporte y la dispersion depende tanto de las propiedades del contaminante, como de la geometria y la dinamica de la masa de agua que lo recibe. Existen muchas discrepancias entre los valores de coeficientes de dispersion predichos analiticamente y los valores observados. Actualmente, los estudios con tintas fluorescentes estan entre los mejores metodos utilizados para estimar la dispersion. Fischer (1968) hace la distincion entre dispersion y difusion de la siguiente manera: El termino difusion generalmente se aplica a procesos en que el movimiento de las particulas es enteramente aleatorio, con o sin alguna autocorrelacion. La dispersion corresponde a un movimiento en el cual las particulas se ayudan de otro mecanismo que no sea ese movimiento aleatorio.

# BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA

La ecuacion original para dispersion en un tubo infinitamente largo fue descrita por Taylor (1954). Obtuvo la siguiente ecuacion para calcular el coeficiente de dispersion :

$$D=10.1 aU$$

donde 'a' es el radio del tubo, y 'U' es la velocidad tangencial del fluido.

Elder (1969), utilizo el mismo principio que Taylor para un flujo bi-dimensional sobre un plano inclinado, y definio el coeficiente de dispersion como :

$$D = 5.93 dU$$

siendo 'd' la profundidad del flujo, y 'U' la velocidad friccional. Desde entonces innumerables autores han cuantificado el coeficiente de dispersion, obteniendo valores desde  $D = 50 rU$ , hasta  $D = 700 rU$  (Fischer, 1966).

Harleman (1965), indica que el coeficiente de dispersion longitudinal es una funcion del gradiente longitudinal de salinidad, y es funcion de la posicion. Sin embargo, varios autores, entre ellos Paulson (1969), exponen que no hay ninguna justificacion para que el coeficiente de dispersion 'D' sea funcion de la distancia longitudinal.

Segun este ultimo autor, hay factores que pueden controlar la intensidad de la dispersion en los estuarios, por ejemplo, las turbulencias de gran escala generadas por velocidades tangenciales inestables, y la geometria del canal. En muchos casos, el coeficiente de dispersion se toma en funcion de la descarga de agua dulce al estuario. Debido a que en el Estero de Punta Banda no se observa descarga pluvial significativa, se opto por un metodo estadistico basado en concentraciones en funcion de la distancia longitudinal para obtener el coeficiente de dispersion.

Fischer (1966), se baso en el metodo de cambios de momento. La ecuacion que obtiene es :

$$D = 1/2 d/dt VAR$$

que esta de acuerdo con Carter y Okubo (1976). Donde VAR es la varianza de la distribucion de concentraciones respecto a la distancia a lo largo del canal. La varianza tambien se puede obtener por :

$$VARx = U * VAR$$

siendo VARx la varianza de la distribucion de concentraciones respecto al tiempo, medida en un punto fijo y U es la velocidad promedio del

flujo. Existe un problema para obtener las varianzas cuando la distribución es sesgada, a menos que la ecuación de dispersión contenga los términos que causan el sesgo (Carter y Okubo, 1970). La cola de la distribución se origina por dos mecanismos de almacenaje. Ambos retienen trazador a medida que pasa la nube, y lo sueltan poco a poco tiempo después. El primer mecanismo es la absorción de trazador por sedimentos del fondo y de las orillas del estero. El otro es la existencia de zonas de baja velocidad. La tinta de estas zonas debe ser incluida en el proceso de dispersión, no así la del primer mecanismo (Fischer, 1968). Estas zonas de baja velocidad mencionadas se llenan muy lentamente de tinta. Cuando pasa la nube, el color claro de estas zonas se torna rojo por la tinta (Rodamina), a pesar de que en las zonas adyacentes ya no se percibe color, y empiezan posteriormente a soltar tinta a las regiones anexas. Fischer (1968), notó la presencia de estas zonas de baja velocidad por medio de fotografías aéreas. Pritchard (1954), también observó este proceso, y concluyó que juega un papel importante en la dispersión longitudinal del contaminante. También reportó que en los recodos de los estuarios el contaminante se acumula cerca de la orilla que tenga mayor velocidad hacia la boca.

Los datos predichos por el modelo se ajustan con mayor facilidad a una distribución normal, no así los datos obtenidos en el campo. El mal ajuste de estos últimos, se debe principalmente, a que las concentraciones en la mayoría de los segmentos son muy similares entre sí (Fig. 57a, y 57b). Los primeros nueve segmentos (seg. 2 al 10), presentan concentraciones muy parecidas durante los primeros nueve días del muestreo, esto hace que la aproximación a una distribución normal sea un tanto imprecisa. El coeficiente de dispersión calculado sobre las concentraciones observadas es relativamente alto en comparación con el coeficiente obtenido con los valores predichos. Esto muestra que en la realidad se observó mayor dispersión, habiendo poca diferencia entre la concentración de un segmento y otro, ya que la nube de contaminante se desplazó con mayor velocidad.

#### d) Efecto del régimen de mareas.

Una hipótesis en relación al efecto de las mareas, es que a mayores velocidades de marea habrá mayor mezcla, y los máximos de concentración deberán decrecer más rápidamente, por lo menos en las primeras etapas. Pritchard (1954), observó que las concentraciones máximas son menores al haber marea viva (pues existe mayor mezcla), que en marea muerta y que para los tres primeros días las concentraciones máximas son mayores en marea muerta que en marea media. Esto se puede observar en las figuras 50(a,b) y 51(a,b), que muestran las distribuciones en marea media comparadas con las de marea muerta y marea viva, respectivamente. Aunque el patrón se cumple, las diferencias entre las concentraciones no son muy significativas. En general, y en referencia al efecto de la marea, las variaciones en las

areas superficiales y en los volúmenes no tienen mucho peso en los resultados que se obtienen del modelo. Se puede decir que el modelo es muy estable en este aspecto.

Para el caso de marea muerta que se muestra, las alturas de mareas fueron muy bajas, y esto repercutió en el cálculo del área y del volumen del segmento 12, entregando valores muy bajos. En marea viva, a pesar de que el máximo fue alto, el mínimo fue muy bajo, quedándose seco el segmento 12 en marea baja, por lo que se hizo el promedio del área y del volumen usando solo los valores de marea alta. También se obtuvieron valores muy bajos de área y volumen en comparación de los obtenidos en marea media, pero siempre fueron mayores para el caso de marea viva que los de marea muerta.

e) Diferencias entre los valores predichos y observados.

Los máximos secundarios que presenta la distribución observada de contaminante pueden deberse a procesos similares a los descritos por Fischer (1968) y Pritchard (1954), y que ya fueron mencionados en el texto o bien, a los posibles problemas de calibración del instrumento de medición que también ya fueron mencionados. Sin embargo, debido a lo ya anteriormente expuesto, se adjudica mayor validez a la postura que fue alguna falla en la calibración del instrumento la que causó los dos máximos. Un problema que surgió en las mediciones de fluorescencia fue que debido a la poca tinta inyectada, pudo haber impresiones mayores de las normales en las mediciones, debidas a las bajas concentraciones y a la precisión del fluorímetro, así como a la fluorescencia natural de algunos organismos (background).

En general, la resolución que se obtiene del modelo es buena, en cuanto se tome como una primera aproximación. Los máximos secundarios en la distribución observada de trazador que ocurren curiosamente después del noveno día desde la inyección no tienen fácil explicación, salvo la ya mencionada en el texto porque tampoco se observan condiciones ambientales anormales en otros parámetros que pudieran haberlos causado.

## VI. - CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, se pueden formular las siguientes conclusiones.

1. - El flujo de masa del contaminante es predominantemente hacia la boca, en todos los casos. ✓
2. - Las maximas concentraciones en los segmentos ocurren primero en los segmentos localizados abajo del punto de inyeccion.
3. - Las maximas concentraciones del contaminante, despues de los primeros ciclos, tienden a irse hacia la cabeza, en todos los casos. ✓
4. - La mezcla de contaminante y agua es muy buena (casi total) en una distancia de aproximadamente 2 Km. (2 segmentos) alrededor del punto de inyeccion. ✓
5. - Existe gran perdida de contaminante al efectuarse la inyeccion en los segmentos cercanos a la boca. ✓
6. - El segmento de inyeccion pierde bruscamente contaminante el primer dia.
7. - Para todas las inyecciones, el tiempo de evacuado del segmento es directamente proporcional a su distancia a la boca. ✓
8. - El decaimiento en la concentracion del contaminante es mas lento que su incremento. ✓
9. - El tiempo de permanencia del contaminante en el estero, aumenta a medida que el punto de inyeccion se acerca a la cabeza.

10. - Existe mayor permanencia de los maximos en los segmentos que tienen mayor area y salinidad.
11. - El modelo es estable para condiciones de mareas cambiantes.
12. - Existen tres zonas dentro del estero claramente diferenciables por su similar comportamiento. Los segmentos cercanos a la boca (seg. 3 al 6), los los segmentos intermedios (seg. 7 al 9), y los segmentos de la cabeza (seg. 10 al 12).

# BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA

## VII. - BIBLIOGRAFIA

- Acosta, R.M., y Alvarez, B.S. 1974. 'DISTRIBUCION SUPERFICIAL DE ALGUNOS PARAMETROS HIDROLOGICOS FISICOS Y QUIMICOS EN EL ESTERO DE PUNTA BANDA, B.C. EN OTONO E INVIERNO.' Ciencias Marinas, Vol. 1(1), pp 17-45. Junio.
- Alvarez, B.S., Acosta, R.M., y Lara, L.R. 1977. 'HIDROLOGIA COMPARATIVA DE LAS BOCAS DE DOS ANTIESTUARIOS DE BAJA CALIFORNIA.' Ciencias Marinas, Vol. 4(1), pp 1-11.
- Carter, H.H. 1976. 'SIMPLE ONE DIMENSIONAL KINETIC MODEL RESULTS FOR THE BUSH RIVER AND ROMNEY CREEK.' Chesapeake Bay Institute. (C.B.I.) Special Rep. 49, March.
- Carter, H.H., and Okubo, A. 1970. 'LONGITUDINAL DISPERSION IN NON-UNIFORM FLOW.' Chesapeake Bay Inst. (C.B.I.) Tech. Rep. 68. Nov.
- Casena, C.R., y Alvarez, B.S. 1975. 'DISTRIBUCION SUPERFICIAL DE ALGUNOS PARAMETROS HIDROLOGICOS FISICOS Y QUIMICOS EN EL ESTERO DE PUNTA BANDA, B.C.' Ciencias Marinas, Vol. 2(1), pp 98-105. Junio.
- De la Paz, R. 1978. 'HIDRODINAMICA Y DISPERSION DE CONTAMINANTES EN EL ESTERO DE PUNTA BANDA, B.C.' Tesis profesional para obtener el titulo de Oceanologo, U.C.M., U.A.B.C. Sin publicar.
- Elder, J.W. 1969. 'THE DISPERSION OF MARKED FLUIDS IN TURBULENT FLOW.' Jour. Fluid Mech. Vol. 5, pp 544-560.
- Elliot, A.J. 1975. 'A STEADY STATE TWO-LAYERED NON-COUPLED DINAMIC AND KINEMATIC ESTUARINE MODEL WITH APPLICATION TO THE POTOMAX ESTUARY.' C.B.I. Special Rep. 44. July.
- Fischer, H.B. 1968. 'METHODS FOR PREDICTING DISPERSION COEFICIENTS IN NATURAL STREAMS, WITH APPLICATIONS TO LOWER REACHES OF THE GREEN AND DUWAMISH RIVERS, WASH.' Jour. of Sanitary Eng. Div. Proc. American Society of Civil Engineers (ASCE). Paper SA 5.

- Fischer, H.B. 1966. 'ANALYTICAL PREDICTION OF LONGITUDINAL DISPERSION COEFFICIENTS IN NATURAL STREAMS.' Proc. 12th. Cong. Int. Ass. Hyd. Res. pp 187-216. Nov.

- Gardner, G.B., and Pritchard, D.W. 1974. 'VERIFICATION AND USE OF A NUMERICAL MODEL OF THE CHESAPEAKE AND DELAWARE CANAL.' C.B.I. Tech. Rep. 87. July.

- Harleman, D.R.F. 1965. 'THE SIGNIFICANCE OF LONGITUDINAL DISPERSION IN THE ANALYSIS OF POLLUTION IN ESTUARIES.' Advances in Water Pollution Res. Vol. I. Proc. 2nd. Int. Water Poll. Res. Conf. Tokyo 1964. pp 279-306.

- List, R.J. 1951. 'SMITHSONIAN METEOROLOGICAL TABLES.' Sexta edicion. Washington, D.C. Smithsonian Institution.

- O'Brien, M.P., and Zeevaert, L. 1968. 'DESIGN OF A SMALL TIDAL INLET.' Proc. 11th. Conf. on Coastal Eng. London, England. Vol. 2(78) pp 1242-1257.

- Paulson, R.W. 1969. 'THE LONGITUDINAL DIFFUSION COEFFICIENT IN THE DELAWARE RIVER ESTUARY AS A FUNCTION OF FRESH WATER INFLOW.' Water Resources Res. Vol. 6(2). pp 516-526. April.

- Pritchard, D.W. 1954. 'A STUDY OF FLUSHING IN THE DELAWARE MODEL.' C.B.I. Tech. Rep. VII. April. 25p.

- Pritchard, D.W. 1962. 'DISPERSION AND FLUSHING OF POLLUTANTS IN ESTUARIES.' Jour. Hydraul. Div. of ASCE. 95. pp 115-124. C.B.I. Contrib. No. 119.

- Pritchard, D.W., Okubo, A., and Mehr, E. 1962. 'A STUDY OF THE MOVEMENT AND DIFFUSION OF AN INTRODUCED CONTAMINANT IN NEW YORK HARBOR WATERS.' C.B.I. Tech. Rep. 31. October.

- Pritchard, D.W., De la Paz, R., Cabrera, M.H., Farreras, S.S., y Morales, E. 1978. 'HIDROLOGIA FISICA DEL ESTERO DE PUNTA BANDA. PARTE I : ANALISIS DE DATOS.' Ciencias Marinas, Vol. 5(2), pp 1-23.

- Pritchard, D.W., De la Paz, R., Cabrera, M.H., Farreras, S.S., y Morales, E. 1979. 'HIDROLOGIA FISICA DEL ESTERO DE PUNTA BANDA. PARTE II : APLICACION DE UN MODELO DE DISPERSION.' Ciencias Marinas, Vol. 6(1). En impresion.

- Shampine, L. F., and Gordon, M. K. 1975. 'COMPUTER SOLUTION OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS : THE INITIAL VALUE PROBLEM.' W. H. Freeman and Co. San Francisco.

- Sooky, A. A. 1969. 'LONGITUDINAL DISPERSION IN OPEN CHANNELS.' Proc. of the Am. So. of Civ. Eng. (ASCE) Jour. of the Hydraulics Div. Paper HY4. July.

- Spiegel, R. M. 1970. 'TEORIA Y PROBLEMAS DE ESTADISTICA.' Series de compendios Schaum. McGraw-Hill, Ed. pags : 125, 136-137, 201-202.

- Taylor, E. H. 1954. 'FLOW CHANNEL CHARACTERISTICS AT RECTANGULAR OPEN-CHANNEL JUNCTIONS.' Trans. Am. So. Civil Eng. Vol 109, pp 893-903.

- U. S. Geological Survey. 1942. 'STUDIES ON EVAPORATION : LAKE HEFNER.' Government Printing Office. Washington, D. C.

## APENDICE A

### DESCRIPCION DEL PAQUETE DE COMPUTACION

A continuacion se da un breve resumen de los metodos y programas descritos por Shampine y Gordon (1975), para la ~~solucion~~ <sup>solucion</sup> numerica de ecuaciones diferenciales.

UNIVERSIDAD AUTONOMA  
DE BAJA CALIFORNIA



a) Descripcion de los codigos.

ESCUELA SUPERIOR DE  
CIENCIAS MARINAS  
BIBLIOTECA

El metodo que aproxima la solucion de una ~~ecuacion~~ <sup>ecuacion</sup> diferencial ordinaria de primer grado, de la forma :

$$y'(x) = f(x, y(x)) \quad (A-1)$$

$$y(a) = A \quad (A-2)$$

en un intervalo  $[a, b]$ , lo hace valiendose de una reticula de puntos  $\{x_0, x_1, x_2, \dots\}$  en  $[a, b]$ . Estos puntos estan igualmente separados por un intervalo  $h$ , de tal manera que :

$$x_0 = a$$

$$x_n = x_m + h_n$$

para  $n = 1, 2, \dots$ , y siendo  $m = n - 1$ .

Cualquier solucion de (A-1), puede escribirse como :

$$y(x) = y(x) + \int y'(t) dt = y(x) + \int f(t, y(t)) dt \quad (A-3)$$

El metodo de Adams aproxima esta solucion reemplazando  $f(t, y(t))$  con un polinomio, interpolando para valores computados de las derivadas  $f_i$ , y luego integrando el polinomio.

La formula de Adams-Bashforth de grado  $k$  en  $x_n$ , usa un polinomio  $P(x)$ , interpolando las derivadas computadas de los  $k$  puntos anteriores :

$$P(x) = f_j \quad j=1, 2, \dots, k. \quad (A-4)$$

Estas derivadas, y  $Y_n$  (aproximación a la solución de  $y(x)$ ) deben guardarse de la iteración anterior. Una aproximación a la solución en  $x$  se obtiene por :

$$y = y + \int P(t) dt \quad (A-5)$$

Se usa el polinomio de interpolación de Lagrange, definido como :

$$P(x) = \sum L_i(x) f_i \quad (A-6)$$

donde

$$L_i(x) = \prod_{j \neq i} \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)} \quad \text{para } i=1,2,\dots,k. \quad (A-7)$$

La fórmula de Adams-Bashforth generalmente se escribe :

$$y = y + h \int f \quad (A-8)$$

donde

$$= 1 + h \int L_i(t) dt \quad (A-9)$$

La formulación clásica considera puntos de la cuadrícula espaciados por un tamaño de intervalo  $h$ . Se introduce  $\xi$  ya que son independientes de  $h$ , y solo dependen del intervalo relativo entre puntos de la cuadrícula y no de la escala de la variable independiente.

Es plausible que una mejor aproximación de  $y(x)$  pudiera obtenerse si tomáramos el valor de  $y$  de la ecuación (A-5) como un valor predicho tentativo, y lo incorporásemos al polinomio de interpolación. Entonces la fórmula de Adams-Moulton de grado  $k$  para  $x_n$  usa un polinomio  $P(x)$ , que también interpola  $k$  derivadas.

La solución aproximada para  $y$  se da como :

$$y = y + \int P(t) dt \quad (A-10)$$

De igual manera se deriva el polinomio lagrangiano de interpolación, tal que :

$$y = y + h \int f + h \int f(x, P) \quad (A-11)$$

siendo  $P$  el valor predicho para (A-5), dado por :

$$= \sum L_i(x + Sh) f_i \quad (A-12)$$

donde

$$S = t - x \quad h \quad (A-13)$$

y

$$L_i(x) = (x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{i-1}) \quad (A-14)$$

Este procedimiento de predecir-corriger se denomina metodo 'PECE', y funciona como sigue : se Predice P , se Evalua f , se Corrige para obtener y , y se Estima f para completar una iteracion. Los codigos PECE de grado k consisten del termino de Adams-Bashforth de grado k que predice, y del termino de Adams-Moulton de grado k+1 que corrige.

El diagrama de flujo que ilustra la manera en que el paquete de computacion DDESS resuelve las ecuaciones diferenciales planteadas en el modelo, es el siguiente :

```
PROGRAMA PRINCIPAL
  SUBROUTINA ODE
  SUBROUTINA DE
SUBROUTINA INTRP  SUBROUTINA STEP
                  SUBROUTINA F
```

En general :

STEP.- Resuelve un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer grado.

F.- Evalua sus derivadas.

INTRP.- Calcula el vector de solucion y el de la primera derivada en cualquier punto deseado.

DE.- Integra el sistema de euaciones diferenciales odinarias de primer grado.

Los codigos principales son el integrador STEP, la subrutina de

# BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA

interpolacion INTRP, y el operador DE.

Los codigos STEP e INTRP avanzan la solucion numerica de la ecuacion un paso, e interpolan su solucion y su derivada, respectivamente. La subrutina DE es un operador que simplifica el procedimiento usando los otros codigos para problemas rutinarios.

Las unicas constantes que dependen de la computadora usada son TWOW y FOURU, que representan, respectivamente, dos veces y cuatro veces el error de redondeo 'u' de la computadora.

b) SUBROUTINE DE (F, NEQN, Y, T, TOUT, RELERR, ABSERR, IFLAG)

Definicion de terminos :

NEQN. - Numero de ecuaciones que seran integradas.

F. - Subrutina externa que define las ecuaciones diferenciales y evalua sus derivadas. Esta definida por  $F(T, Y, YP)$ , donde :

YP : evalua el miembro derecho de la ecuacion, e.g. sus derivadas :

$$y' (t) = f (t, y (t), y (t), \dots, y_n(t)) \quad \text{para } I=1, \text{NEQN.}$$

Y : vector con las condiciones iniciales :

entrada  $y(L) = Y (a)$

salida  $y(L) = Y (b)$

T, TOUT. - Variables independientes que definen el intervalo de integracion.  $T = a$ , y  $TOUT = b$ .

RELERR, ABSERR. - Errores relativo y absoluto, respectivamente.

IFLAG. - Estado de la integracion (con o sin exito, incompleta, etc.)

Y. - Vector de soluciones

La minima informacion necesaria para el integrador consiste en :

1. - Definir las ecuaciones.
2. - Definir sus condiciones iniciales.
3. - Indicar el intervalo de integracion  $[a, b]$ .
4. - Declarar la precision requerida.
5. - Declarar la manera de medir el error.

La subrutina DE integra el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer grado, sobre un intervalo finito dado, usando el integrador STEP.

En todas las llamadas a DE, se procede de la siguiente manera :  
asumiendo que los parametros de entrada son validos, el codigo toma las variables relacionadas con la longitud y el punto final de la integracion, inicializa los contadores, y maneja las tolerancias de los errores para definir el vector de pesos asociado con el criterio de error.

La variable TEND, marca el punto final de la integracion interna a DE. Al ser el IFLAG de entrada positivo,  $TEND = T + 10*(TOUT-T)$ , asi es que el intervalo de integracion de STEP generalmente es ajeno entre dos puntos de salida. Para IFLAG negativo,  $TEND = TOUT$ , produciendose el final de la integracion internamente en TOUT.

En la primera llamada a DE, se definen las cantidades X y YY, se inicializa el tamano de la iteracion, y se guarda la direccion de la integracion. La integracion procede con X y YY, no con T y Y que pasan a STEP.

El resto de DE se ejecuta repetidamente hasta que se alcanza TOUT o el codigo se rinde. DE primero revisa si la variable X llego mas alla de TOUT,  $|X-T| > |TOUT-T|$ , si esto sucede, DE interpola la solucion y regresa. Si DE no puede interpolar, revisa si IFLAG es negativo, y tambien revisa si el tamano dl intervalo que queda es chico respecto a la precision de la computadora. En tal caso, extrapola usando el metodo de Euler y regresa.

Si la integracion no se ha completado, y se han tomado menos de MAXNUM pasos (MAXNUM es el maximo numero de iteraciones permitidas), DE manda el vector de pesos a la prueba local de error en STEP e intenta hacer una iteracion. Si la iteracion tiene exito, DE incrementa los contadores del numero de iteraciones y empieza de nuevo a revisar para interpolar, extrapolar, etc.

Cuando STEP reporta que no puede avanzar, debido a que las tolerancias de error son muy pequens, DE incrementa RELERR y ABSERR antes de regresar. Si ya se hicieron MAXNUM iteraciones, DE revisa para ver si las ecuaciones son rigidas, y regresa. El integrador debe reportar la solucion en b, y si fue o no exitosa.

# BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA

c) SUBROUTINE STEP (X, Y, F, NEQN, H, EPS, WT, START, HOLD, K, KOLD, CRASH, PHI, P, YP, PSI).

Este codigo utiliza las formulas de Adams en una combinacion PECE con extrapolacion local (i.e. predice con orden  $k$ , y corrige con orden  $k+1$ ), para resolver un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden.

Definicion de terminos :

X. - Variable independiente definida hasta  $X_n$ . Representa el progreso de la iteracion.

Y(NEQN). - Vector de soluciones  $Y_n$  en  $X_n$ .

F. - Evalua las derivadas  $\{F(X, Y, YP)\}$ .

H. - Tamano optimo para la siguiente iteracion. El codigo lo estima. Es el mayor intervalo que puede tomar el codigo pudiendo aun pasar la prueba de error.

EPS. - Tolerancia local de error.

WT(NEQN). - Especifica el criterio de error. Son los pesos para el control del error.

START. - Es .TRUE. para el primer paso y .FALSE. para el resto de las iteraciones.

HOLD. - Intervalo usado en la ultima iteracion exitosa.

K. - Grado optimo, determinado por el codigo, para la siguiente iteracion.

KOLD. - Grado usado en la ultima iteracion exitosa.

CRASH. - Es .TRUE. si la iteracion no se puede realizar. De lo contrario es .FALSE.

PHI(NEQN, 16). - Es el arreglo de las diferencias divididas modificadas. Las columnas 15 y 16 se usan para controlar la propagacion de redondeo.

P(NEQN). - Solucion predicha para  $X_n$ .

YP(NEQN). - Derivada calculada con la solucion corregida en  $X_n$ .

PSI(12). - Coeficientes  $(n) = h + h + h + \dots, h$  que son las sumas de los intervalos que se usaron para integrar el polinomio de interpolacion.

d) SUBROUTINE INTRP (X, Y, XOUT, YOUT, YPOUT, NEQN, KOLD, PHI, PSI)

Este codigo calcula el vector de soluciones YOUT y el vector de sus primeras derivadas YPOUT en cualquier punto especificado XOUT sin modificar el tamaño del intervalo de STEP.

e) SUBROUTINE ODE (F, NEQN, Y, T, TOUT, RELERR, ABSERR, IFLAG, WORK, IWORK)

El codigo ODE divide los arreglos de trabajo en las partes que necesitan las otras subrutinas, y llama a una version modificada de DE para que dirija las integraciones.