

Transporte de material sedimentario en el sistema lagunar de Altata-Ensenada del Pabellón, Sinaloa, México

Yovani Montaña-Ley y Federico Páez-Osuna
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
Estación Mazatlán, UNAM, Sinaloa, México.

Recibido: 6 de noviembre, 1992; aceptado: 11 de junio, 1993.

RESUMEN

Se evaluó el transporte de sedimentos como carga de fondo y en suspensión en puntos discretos del sistema lagunar Altata-Ensenada del Pabellón, México. Se determinaron perfiles verticales de concentraciones de sedimentos por medio de la integración numérica de la ecuación de difusión-convección promediada en el tiempo. El trabajo de campo y laboratorio incluyó mediciones de parámetros físicos (olas y corrientes) y sedimentarios. La información obtenida se usó como datos de entrada para el modelo de computadora desarrollado por Van Rijn (1990). Los resultados indicaron en la mayoría de los perfiles verticales un incremento de las concentraciones con la profundidad. La mayor tasa de transporte de sedimentos en suspensión (0.012 kg/s m^2) se encontró cerca de la desembocadura del río Culiacán, mientras que la mayor tasa de transporte como carga de fondo (0.0012 kg/s m^2) se determinó en la entrada del sistema lagunar. Asimismo, se encontró que el flujo másico de sedimento suspendido es casi uniforme en las capas superiores de agua, incrementándose muy rápidamente a través de la capa inferior de agua de aproximadamente 0.30 m de espesor, cercana al fondo.

PALABRAS CLAVE: Lagunas costeras, transporte de sedimentos, corrientes, carga de fondo.

ABSTRACT

Suspended and bed load sediment transport were computed at several stations in the Altata-Ensenada del Pabellón lagoon system, Mexico. Sediment concentration profiles were computed by integration of the time average convection-diffusion equation. The field and laboratory work included measurements of physical and sedimentary parameters. The information was used as input for a computer model developed by Van Rijn (1990). The results indicate in most vertical profiles an increase of sediment concentration with depth. The highest suspended sediment transport (0.012 Kg/s m^2) was found near the mouth of Culiacán River and the highest bed load transport rate (0.0012 kg/s m^2) was found near the inlet. The suspended sediment flux was almost uniform in the upper water layers but increased sharply in a 0.30 m layer near the bottom.

KEY WORDS: Coastal lagoons, sediment transport, currents, bed load.

INTRODUCCION

En la literatura científica existen varios métodos y aproximaciones para evaluar los perfiles de concentración y el transporte de sedimentos bajo diversas condiciones de corrientes y oleaje (Einstein, 1950; Bijker, 1971; Grant y Madsen 1976; Fredsoe *et al.*, 1985; Deigaard *et al.*, 1986; Kamphuis *et al.*, 1986; etc.). En esta investigación se aplicó el modelo propuesto por Van Rijn (1990) para evaluar los perfiles de concentración de sedimentos a través de la ecuación de convección-difusión promediada en el tiempo; el transporte en suspensión por integración numérica del producto de concentraciones por velocidades en la columna de agua y el transporte como carga de fondo a través de una fórmula empírica-teórica. El trabajo de campo y laboratorio incluyó mediciones de parámetros hidráulicos y sedimentarios en el sistema lagunar Altata-Ensenada del Pabellón.

AREA EN ESTUDIO

El Sistema Lagunar Altata-Ensenada del Pabellón se encuentra situado en el litoral del Estado de Sinaloa, México, entre los $107^{\circ}30'$ y $107^{\circ}58'$ de longitud Oeste y los $24^{\circ}20'$ y $24^{\circ}40'$ de latitud Norte. La Capital del Estado, Culiacán, se localiza a 45 km al Noreste del Sistema (Figura 1).

El cuerpo de agua es un sistema de lagunas costeras unidas por un estrechamiento donde se ubica la desembocadura del Río Culiacán. La comunicación con el mar se realiza a través de la Boca de la Tonina. Las lagunas están separadas del mar por una barra arenosa. La Boca es de una profundidad variable, generalmente menor de 20 m, y no se interrumpe la comunicación con el mar en todo el año. La profundidad media observada en el sistema es menor de 5 m (Peraza-Vizcarra, 1973).

METODOLOGIA

El trabajo de campo se realizó entre el 4 y el 7 de abril de 1992. Las mediciones de parámetros hidráulicos y la colecta de muestras de sedimentos y agua se efectuaron en diversas estaciones ubicadas en la Boca y en el interior del Sistema Altata-Ensenada del Pabellón (Figura 1).

Un correntímetro marca Braystoke BFM 0012 A se usó para medir velocidades a varias profundidades en cada una de las estaciones seleccionadas. Las velocidades en cada estación se midieron en un tiempo menor de media hora, para obtener velocidades medias en la columna completa de agua (Metha *et al.*, 1977). Simultáneamente se efectuaron observaciones de alturas y períodos de olas; las alturas de las olas se promediaron visualmente de acuerdo con el procedimiento recomendado por el U.S. Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center (1975).

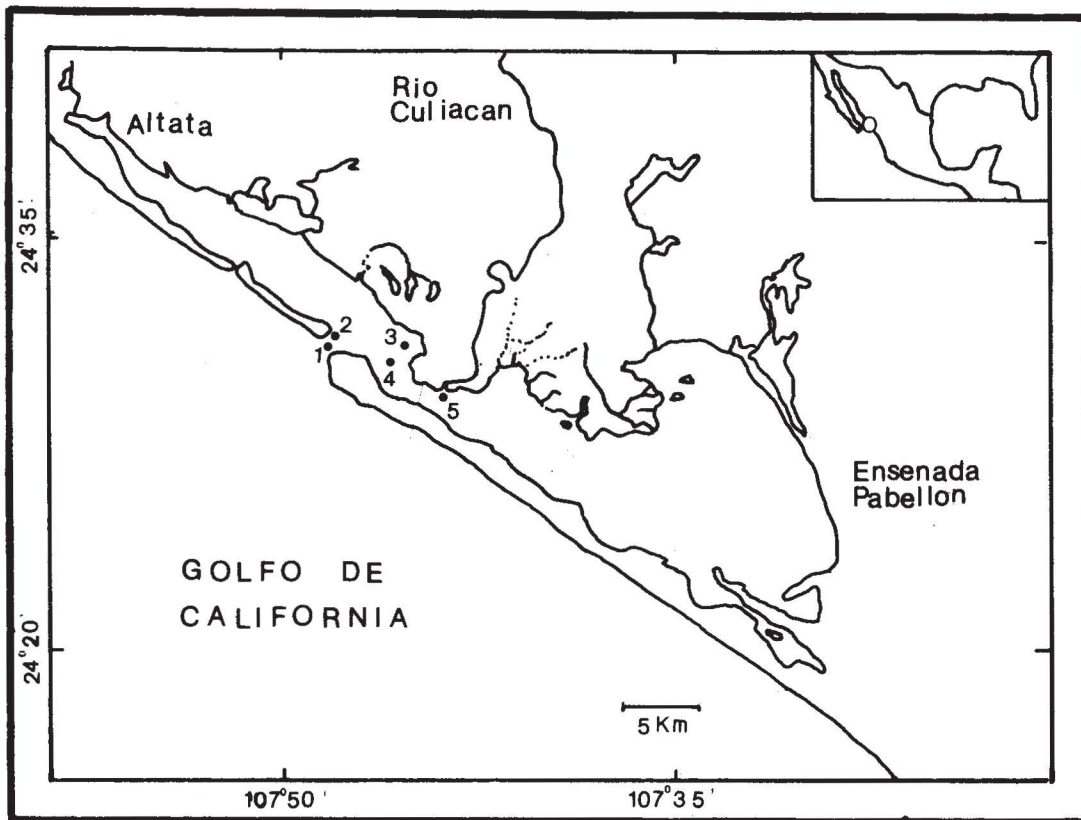


Fig. 1. Ubicación del área en estudio y de las estaciones de medición y muestreo, 1-5.

La colecta de muestras de sedimentos de fondo se realizó con una draga tipo Van Veen. La distribución de tamaños de granos de sedimentos se obtuvo por el método mecánico de tamices (Folk, 1974). La velocidad de caída del sedimento en suspensión se evaluó a través de la ecuación de Stokes, considerando como medida representativa de las partículas del sedimento en suspensión $d_s = 0.8 d_{50}$, de acuerdo con Van Rijn (1987). La altura de las rizaduras (Δ_r) se midió en forma directa por buceo con una regla y una cinta cubierta con vaselina. En algunas estaciones la turbidez no permitió hacer la medición de las rizaduras, consecuentemente los datos de estas estaciones no se utilizaron en el presente trabajo.

Las rugosidades $k_{s,w}$ y $k_{s,c}$ relacionadas a olas y corrientes respectivamente se obtuvieron a través de las características de las rizaduras del fondo. Estimaciones razonables de las rugosidades para ambientes con corrientes y olas (sin rompiente) de acuerdo con Van Rijn (1990), son $k_{s,c} = k_{s,w} = 3 \Delta_r$. Los valores de la rugosidad se usan para calcular los factores de fricción que determinan los esfuerzos cortantes sobre el fondo. Asimismo, se aplican directamente en la evaluación de los perfiles de velocidades de las corrientes. El espesor de la capa de mezcla " δ_s " y el nivel de referencia " a ", se evaluaron de acuerdo con el procedimiento de Van Rijn (1990), en el cual $a = 1/2 \Delta_r$ y $\delta_s = 3\Delta_r$.

La densidad y la viscosidad cinemática del fluido se obtuvieron directamente de las tablas publicadas por Riley y Skirrow (1975), considerando la temperatura y la salinidad registrada en las estaciones de medición. El coeficiente de la proporción de mezcla entre el sedimento y el fluido se consideró igual a la unidad.

Todos los parámetros anteriores se aplicaron como datos de entrada para el modelo de computadora desarrollado por Van Rijn (1990). El trabajo efectuado por el modelo para obtener el transporte de sedimentos incluyó la evaluación de los parámetros contenidos en la Tabla 2. El significado físico de algunos de ellos se describe a continuación.

El parámetro T representa el proceso de agitación que gobierna el ingreso al flujo de las partículas del material del fondo, y depende de los esfuerzos cortantes que ejercen sobre el mismo las corrientes y las olas.

El parámetro de la partícula D_* refleja la influencia de la gravedad, la viscosidad y la densidad en el transporte de sedimentos como carga de fondo de acuerdo con las ecuaciones (7) y (8).

El coeficiente de mezcla $\epsilon_{s,cw}$ se considera el resultado de la suma de los cuadrados de los valores de $\epsilon_{s,c}$ y $\epsilon_{s,w}$ relacionados a las corrientes y olas. Esta aproximación co-

responde a la suma de la energía cinética de ambos tipos de movimientos. El coeficiente $\epsilon_{s,c}$ funcionalmente depende de la velocidad cortante $u_{*,c}$ de la corriente sobre el fondo, mientras que $\epsilon_{s,w}$ depende de las velocidades orbitales máximas de las olas y de la profundidad total.

La velocidad orbital U es función de la profundidad total h , del período máximo T_p , la altura de ola significativa H_s y la longitud de la ola L . Se evaluó teóricamente de acuerdo con la relación:

$$U = \frac{H_s \pi}{T_p \sinh(2\pi h/L)} \quad (1)$$

El transporte de sedimentos relacionados con la corriente que incluye transporte como carga de fondo y en suspensión, se evaluó asimismo por el método de Van Rijn (1990), como se describe a continuación.

Primeramente se calculó el transporte como carga de fondo utilizando la ecuación:

$$q_{b,c} = 0.25 u_{*,c} d_{50} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \quad (2)$$

donde

$q_{b,c}$ = Transporte como carga de fondo relacionado a la corriente.

$u_{*,c}$ = Velocidad cortante de la corriente sobre el fondo, (Van Rijn, 1990).

d_{50} = Diámetro medio de las partículas del material de fondo.

T = Parámetro adimensional de corte de fondo debido a las corrientes y olas, (Van Rijn, 1990).

D_* = Parámetro adimensional de las partículas, (Van Rijn, 1990).

El transporte como carga en suspensión promediado en el tiempo se obtuvo por integración numérica, con respecto a la profundidad del producto de la velocidad de la corriente por la concentración de sedimentos

$$q_{s,c} = \int_a^h u C dz \quad (3)$$

donde

$q_{s,c}$ = Transporte como carga en suspensión relacionado a la corriente.

h = Profundidad del agua.

a = Nivel de referencia.

u = Velocidad de la corriente a una elevación z sobre el fondo.

C = Concentración de sedimentos a una altura z sobre el fondo.

z = Coordenada vertical.

La carga total $q_{t,c}$ del transporte de sedimentos se obtuvo a partir de

$$q_{t,c} = q_{b,c} + q_{s,c} \quad (4)$$

La evaluación de los perfiles de concentración de sedimentos sobre fondo plano se basa en la ecuación de convección-difusión dependiente del tiempo

$$\frac{\partial C}{\partial t} - w_{s,m} \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{s,w} - \frac{\partial C}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

donde

t = tiempo.

$w_{s,m}$ = velocidad de caída de la partícula en una mezcla del fluido del sedimento.

$\epsilon_{s,w}$ = coeficiente de mezcla del sedimento por olas.

Para evitar la limitante de tipo de fondo plano de la ecuación anterior, la distribución de concentraciones con respecto a la profundidad en $z > a$ se obtuvo por integración numérica de la ecuación de convección-difusión promediada en el tiempo, la cual se aplica tanto a fondos planos como con rizaduras.

$$\frac{dC}{dz} = \frac{(1-C)^5 C w_s}{\epsilon_{s,cw}} \quad (6)$$

donde

w_s = Velocidad de caída del sedimento suspendido en agua dulce.

$\epsilon_{s,cw}$ = Coeficiente de mezcla del sedimento por olas y corrientes, Van Rijn, (1990).

mientras que la concentración C_a de sedimentos de fondo para $z < a$ se obtuvo de

$$C_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \quad (7)$$

El parámetro adimensional de las partículas D_* se obtuvo de la relación

$$D_* = \left[\frac{(s-1)g}{v} \right]^{1/3} d_{50} \quad (8)$$

donde

ν :: Viscosidad cinemática.

ρ = Densidad específica.

Algunos parámetros importantes para evaluar el transporte de sedimentos y los perfiles de concentración son la velocidad de la corriente, el tamaño de los granos de arena y la altura de la ola. Para comprender mejor el efecto de estos parámetros en las tasas de transporte, se examinó la sensibilidad del modelo variando cada parámetro sobre cierto rango arbitrario y manteniendo los otros parámetros constantes.

RESULTADOS Y DISCUSION

La Tabla 1 presenta los resultados del trabajo de campo realizado en el Sistema Lagunar Altata-Ensenada del Pabellón y del análisis de laboratorio de las muestras recolectadas. Los resultados indican velocidades de corrientes entre 0.13 y 0.24 m/s y olas entre 0.50 y 0.60 m de altura en todas las estaciones realizadas, con excepción de la estación 5 donde las olas apenas alcanzaron los 0.10 m de altura. En relación a las muestras granulométricas de sedimento la mediana de medidas de partículas (d_{50}) considerada como representativa de las condiciones de fondo fluctuó entre 41 y 328 micras; las estaciones 1-4 efectuadas en la boca y sus proximidades se caracterizaron por presentar fondos arenosos los cuales reciben aporte de materiales provenientes de la deriva litoral, mientras que la estación 5 frente al Río Culiacán presentó fondos limosos alimentados supuestamente por la carga de sedimento fino transportado por el río. Los coeficientes de viscosidad cinemática y los valores de densidad incluidos en la Tabla 1 decrecen desde la boca del sistema lagunar hasta la desembocadura del Río Culiacán cuyo aporte de agua dulce, al reducir la salinidad de las aguas aledañas, reduce también el valor de los parámetros mencionados. Con excepción de la velocidad de caída del sedimento, el resto de las variables incluidas en la Tabla 1 presentaron cierta uniformidad en sus valores.

La Tabla 2 incluye parámetros físicos relacionados a movimientos orbitales de la ola, esfuerzos cortantes, parámetros sedimentarios y factores de eficiencia determinados a partir de la información vertida en la Tabla 1. Estos parámetros se aplicaron en la evaluación del transporte de sedimentos y en el cálculo de perfiles verticales de concentración.

La Tabla 3 presenta el transporte de sedimentos como carga de fondo y en suspensión para cada una de las estaciones estudiadas. El valor máximo de transporte en suspensión (0.0120 kg/s m²) correspondió a la estación 5, mientras que el valor máximo como carga de fondo (0.0012 kg/s m²) se encontró en la estación 1, en la boca del sistema lagunar.

En todas las estaciones las mayores tasas de transporte correspondieron a la carga en suspensión. Sin embargo, las tasas para la carga de fondo conservaron el mismo orden de magnitud que las del transporte suspendido con excepción de la estación 5, donde la carga de fondo descendió en

tres ordenes de magnitud, posiblemente por la influencia del aporte fluvial.

El material arenoso fino (60 y 200 μ) es puesto fácilmente en suspensión por las corrientes. Tales partículas tienen un peso sumergido relativamente pequeño y son fácilmente integradas dentro del flujo por movimientos turbulentos. De acuerdo con McDowell y O'Connor (1977) el modo primario de movimiento de sedimentos finos se presenta, en efecto, como transporte en suspensión y tal transporte de sedimento constituye un 75-95% del transporte total.

La Tabla 4 presenta las tasas de transporte a diferentes niveles de profundidad en las estaciones 1-5. Las tasas máximas en términos generales se encontraron muy cerca del fondo ($z < 0.30$ m) y las mayores tasas en el primer o segundo metro por encima del fondo.

Las Figuras 2-6 proporcionan una imagen preliminar de la distribución horizontal de sedimentos suspendidos en el sistema lagunar Altata-Ensenada del Pabellón, para la época muestreada. En términos generales se observó un incremento en la concentración de sedimentos suspendidos desde la boca del sistema hacia el interior del mismo. Puede esperarse un incremento de material de grano fino en suspensión desde la entrada hasta el interior de los cuerpos de agua costeros, por ejemplo en planicies de mareas a lo largo de las costas del Mar del Norte en Dinamarca, Alemania y los Países Bajos, así como en la costa del Golfo de México (U. S. A.), tanto en tiempos de calma como de tormenta (Brunn, 1976). Esta distribución de concentraciones de sedimento en suspensión puede atribuirse a un desfase entre el tiempo de cambio de marea (cuando la velocidad de la corriente es cero) y el momento en el cual se presentan las más bajas concentraciones de material suspendido (Postma, 1961).

En su estudio de acumulación de sedimentos de grano fino en el Wadden Sea, Holanda, Postma (1961) describe una situación similar a la observada en el sistema lagunar de Altata-Ensenada del Pabellón. La concentración de sedimentos en suspensión presentó en ambos cuerpos de agua una disminución desde las áreas y canales de poca profundidad hasta las zonas más profundas de las bocas. En aguas someras del Wadden Sea las concentraciones superficiales fluctuaron entre 0.100 y 0.600 kg/m³ mientras que en nuestro caso se calculó un valor de 0.030 kg/m³; por otra parte en las zonas más profundas del Wadden Sea los valores de concentración de sedimentos suspendidos fluctuaron entre 0.020 y 0.080 kg/m³ mientras que en Altata-Ensenada del Pabellón se evaluó en la boca una concentración de 0.0007 kg/m³.

Postma (1961) encontró concentraciones de sedimento en suspensión cerca del fondo ($z = 0.30$ m) entre 0.100 y 0.800 kg/m³ en zonas interiores, mientras que en áreas más profundas próximas a la boca las concentraciones fluctuaron entre 0.040 y 0.300 kg/m³. En nuestro caso las concentraciones de fondo más elevadas fueron de 0.062 kg/m³, mientras que en áreas profundas de la boca lagunar la concentración fue de 0.027 kg/m³.

Tabla 1

Parámetros obtenidos a través de mediciones de campo y laboratorio correspondientes a las estaciones 1-5.

ESTACION		1	2	3	4	5
-Profundidad del Agua	M	4.00 00 E+00	10.00 0 E+00	4.00 00 E+00	9.50 00 E+00	2.00 00 E+00
-Velocidad Media de la Corriente	M/S	2.40 00 E-01	2.00 00 E-01	1.30 00 E-01	2.40 00 E-01	1.47 00 E-01
-Altura de Ola Significante	M	5.00 00 E-01	6.00 00 E-01	6.00 00 E-01	6.00 00 E-01	1.00 00 E-01
-Período máximo de ola	S	5.00 00 E+00	5.00 00 E+00	4.00 00 E+00	5.00 00 E+00	3.00 00 E+00
-Angulo entre olas y corriente	DEG.	20.00 0 E+00	170.00 E+00	30.00 0 E+00	25.00 0 E+00	25.00 0 E+00
-Mediana de medidas de particulas de fondo	M	1.48 00 E-04	1.48 00 E-04	3.28 00 E-04	1.85 00 E-04	4.10 00 E-05
-90% de medidas de particulas	M	1.15 00 E-04	1.15 00 E-04	1.36 00 E-04	1.32 00 E-04	1.00 00 E-06
-Velocidad de caida del sedimento en suspensión	M/S	1.00 00 E-02	1.00 00 E-02	3.90 00 E-02	1.60 00 E-02	1.00 00 E-03
-Rugosidad relacionada con la corriente	M	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02
-Rugosidad relacionada con la ola	M	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02
-Espesor de la capa de mezcla cerca del fondo	M	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02	4.50 00 E-02
-Nivel de referencia	M	7.00 00 E-03	7.00 00 E-03	7.00 00 E-03	7.00 00 E-03	7.00 00 E-03
-Coeficiente de viscosidad cinemática		9.37 00 E-07	9.37 00 E-07	9.31 00 E-07	9.31 00 E-07	8.93 70 E-07
-Densidad del fluido	KG/M3	1022.90 E+00	1022.90 E+00	1021.90 E+00	1021.90 E+00	1019.00 E+00
-Densidad del Sedimento	KG/M3	2650.00 E+00	2650.00 E+00	2650.00 E+00	2650.00 E+00	2650.00 E+00
-Radio de mezcla del sedimento y el fluido		1.00 00 E+00	1.00 00 E+00	1.00 00 E+00	1.00 00 E+00	1.00 00 E+00

Las Figuras 2-6 presentan perfiles verticales de concentraciones de sedimentos en suspensión y de velocidades del fluido en las cinco estaciones de medición consideradas. En todos los perfiles de concentraciones es relevante el hecho de que en la parte superior de la columna de agua la concentración de sedimentos se mantiene casi uniforme o se incrementa ligeramente desde la superficie del agua hasta un nivel de profundidad cercano al fondo. A partir de ese nivel las concentraciones aumentan de valor rápidamente. Este incremento en las concentraciones se explica

en virtud de la gran cantidad de energía disipada en el fondo (McDowell y O'Connor, 1977). Postma (1965) encontró en la laguna de Guerrero Negro, México, que la distribución vertical de arena en suspensión, en varias estaciones realizadas, se ajusta a la línea recta en una escala semi-logarítmica. Su muestreo lo realizó tan sólo a tres niveles de profundidad. La capa de agua cercana al fondo ($z < .30$ m) no se muestreó en detalle por lo cual no incluye un perfil de sedimentos en suspensión cercano al fondo. En cambio en el presente trabajo el modelo usado permitió calcular

Tabla 2

Parámetros físicos calculados para las estaciones 1-5.

ESTACION		1	2	3	4	5
-Parámetro de la partícula.		.3862 E+01	.8605 E+01	.3862 E+01	.4854 E+01	.1107 E+01
-Longitud de onda.	M	.2796 E+02	.2087 E+02	.3659 E+02	.3624 E+02	.1131 E+02
-Velocidad orbital máxima.	M/S	.3065 E+00	.3107 E+00	.1399 E+00	.1508 E+00	.7735 E-01
-Excursión orbital máxima de fondo.	M	.2439 E+00	.1978 E+00	.1113 E+00	.1200 E+00	.3693 E-01
-Esfuerzo cortante en el fondo relacionado a la ola.	N/M2	.2588 E+01	.3093 E+01	.9884 E+00	.1078 E+01	.4572 E+00
-Esfuerzo cortante en el fondo relacionado a la corriente.	N/M2	.2591 E+00	.1023 E+00	.1274 E+00	.1724 E+00	.1011 E+00
-Coeficiente de fricción relacionado a la ola.		.1077 E+00	.1256 E+00	.1975 E+00	.1856 E+00	.3000 E+00
-Coeficiente de fricción relacionado a la corriente.		.2618 E+01	.2618 E-01	.2045 E-01	.2072 E-01	.3227 E-01
-Coeficiente de Chezy.	M	.5450 E+02	.5450 E+02	.6167 E+02	.6127 E+02	.4909 E+02
-Rugosidad aparente.	M	.1173 E+00	.2701 E+00	.9453 E-01	.7210 E-01	.6677 E-01
-Coeficiente de ola-corriente.		.4824 E+00	.1587 E+00	.5023 E+00	.6708 E+00	.5939 E+00
-Esfuerzo cortante crítico de fondo.	N/M2	.1468 E+00	.1851 E+00	.1468 E+00	.1506 E+00	.1423 E+00
-Factor de eficiencia relacionado a la corriente.		.3466 E+00	.3566 E+00	.3822 E+00	.3887 E+00	.1561 E+00
-Factor de eficiencia relacionado a la ola.		.1553 E+00	.6973 E+00	.1553 E+00	.1236 E+00	.5422 E+00
-Parámetro de esfuerzos cortantes de fondo.		.2034 E+00	.1965 E+00	.2126 E+00	.1831 E+00	.8084 E+00

detalladamente el perfil vertical de concentraciones en toda la columna de agua, incluyendo la capa cercana al fondo ($z < .30$ m). En la parte superior de la columna la distribución encontrada se aproxima a una recta, mientras que cerca del lecho marino adopta la forma de una curva que refleja un rápido incremento en las concentraciones de sedimento suspendido cerca de la interfase fondo-agua. Sternberg *et al.*, (1985) basados en mediciones de sedimento suspendido y perfiles de velocidad dentro del metro de la columna de agua por encima del fondo marino, en la Bahía de San Francisco, California, concluyeron que el flujo másico era casi uniforme entre $z = 20$ cm y $z = 1.0$ m,

y que luego se incrementaba marcadamente reflejando, al igual que en este trabajo, un rápido incremento en las concentraciones de sedimento suspendido. Van Rijn (1987) obtuvo perfiles verticales de concentraciones de sedimentos en suspensión, similares a los de este trabajo, en investigaciones de campo realizadas en el estuario de Eastern Scheldt en los Países Bajos. Rodríguez-Espinosa (1982) encontró concentraciones de sedimento en suspensión de 0.019 y 0.030 Kg/m^3 para velocidades de 0.50 y 0.70 m/seg respectivamente en las lagunas Machona y del Carmen en el estado de Tabasco, México. Los muestreos de sólidos en suspensión los realizó a una elevación $z = 0.30$ m

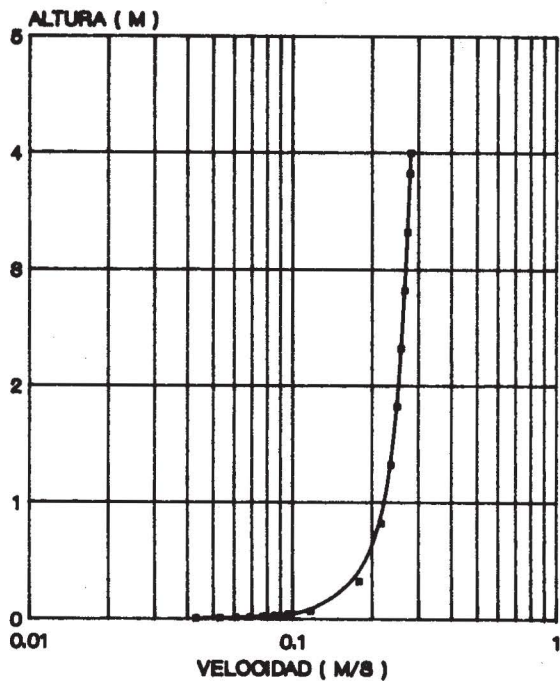
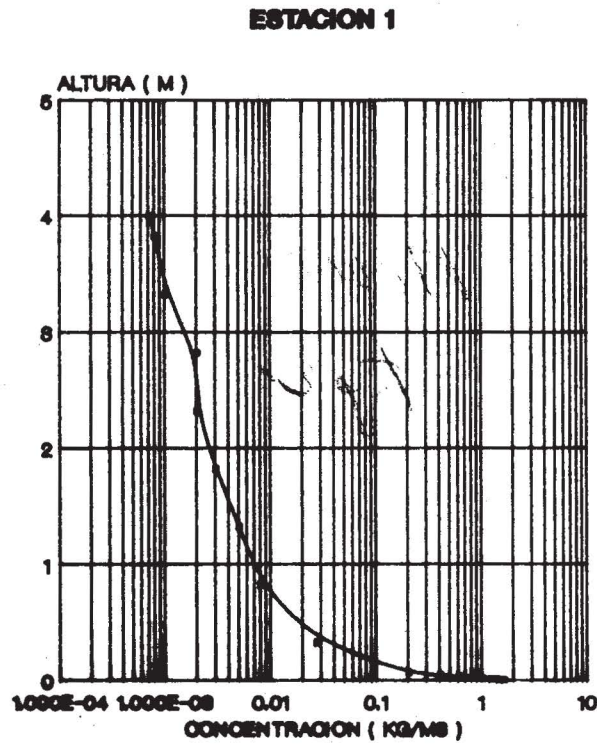


Fig. 2. Perfiles verticales de concentraciones de sedimentos y velocidades del agua en la estación 1.

sobre el fondo marino. Las concentraciones determinadas por Rodríguez-Espinosa son similares en orden de magnitud a las concentraciones de 0.027 kg/m^3 determinadas al mismo nivel para una velocidad de 0.24 m/seg , en la presente investigación.

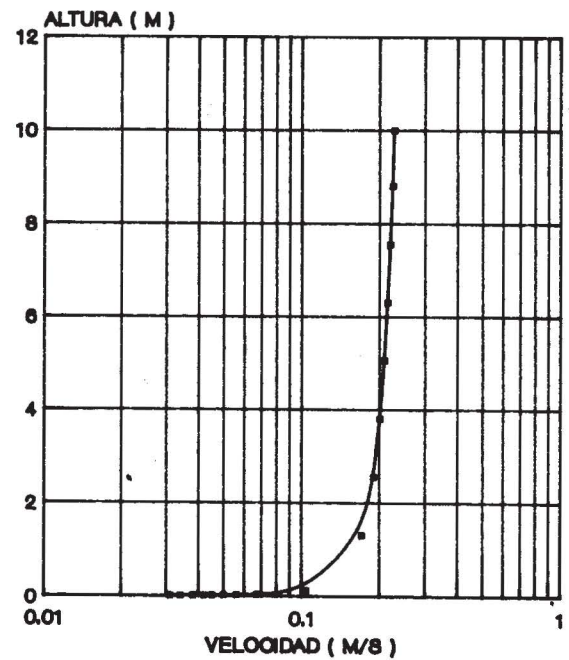
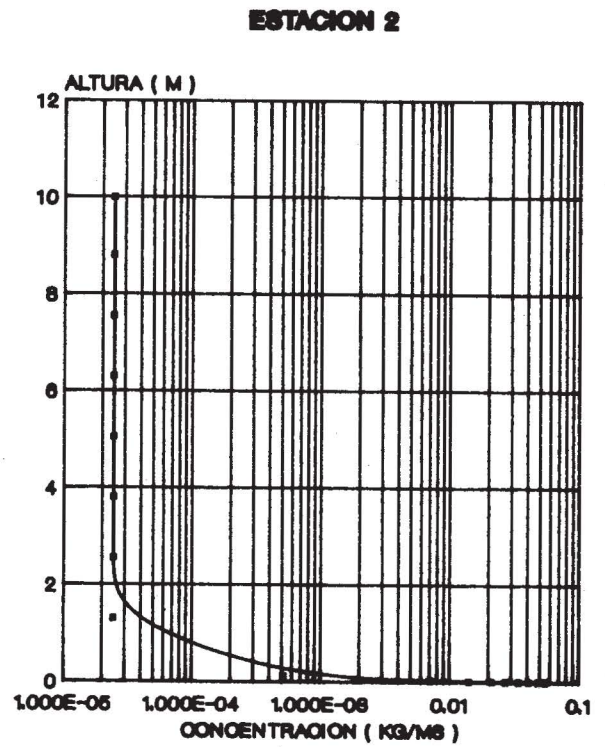
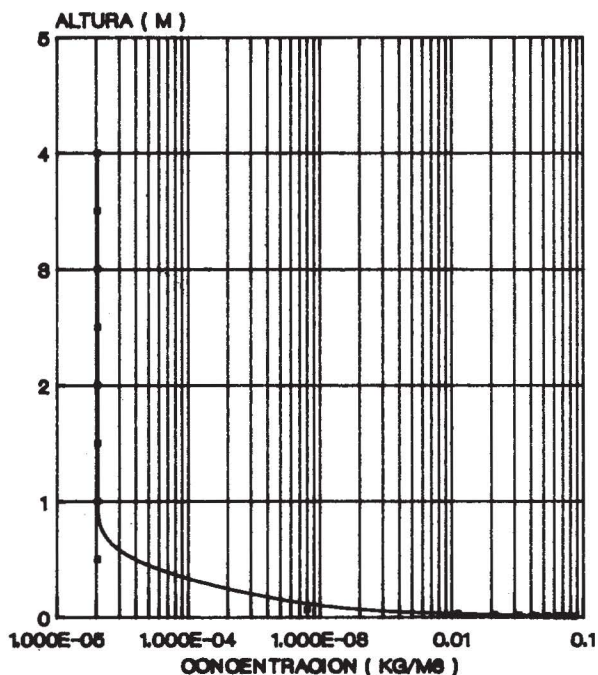


Fig. 3. Perfiles verticales de concentraciones de sedimentos y velocidades del agua en la estación 2.

Los perfiles verticales de velocidades incluidos en las Figuras 2-6 presentaron una disminución leve de la velocidad de la corriente desde la superficie del agua hasta un nivel de profundidad de aproximadamente 0.30 m sobre el fondo, a partir de este nivel la velocidad decrece rápida-

ESTACION 3



ESTACION 4

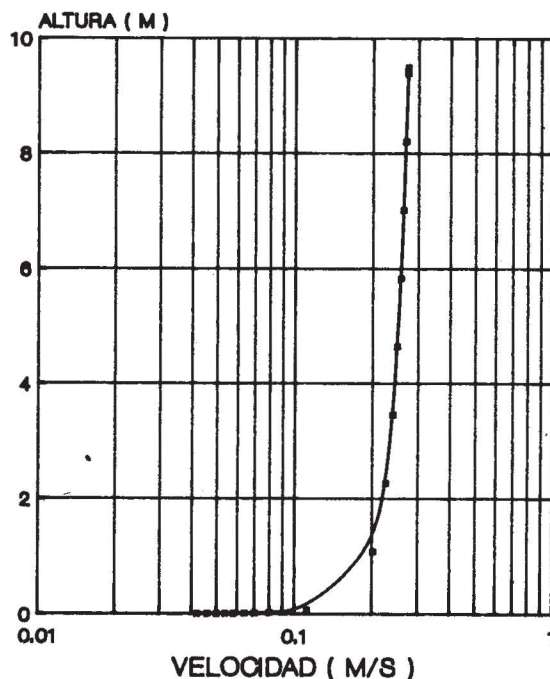
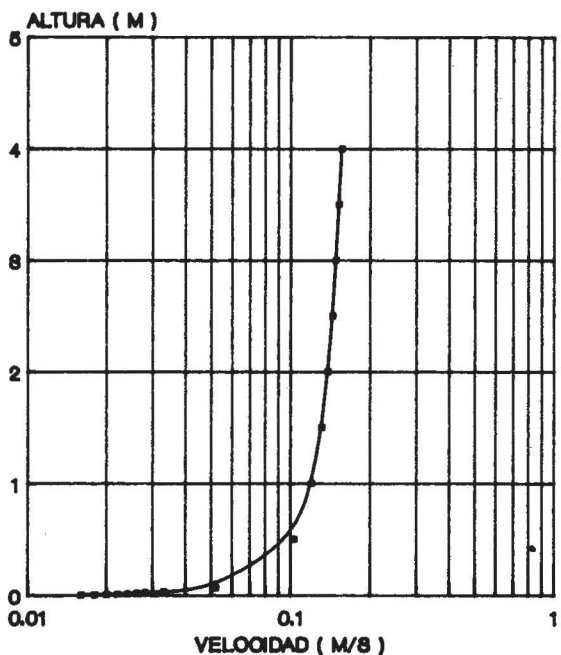
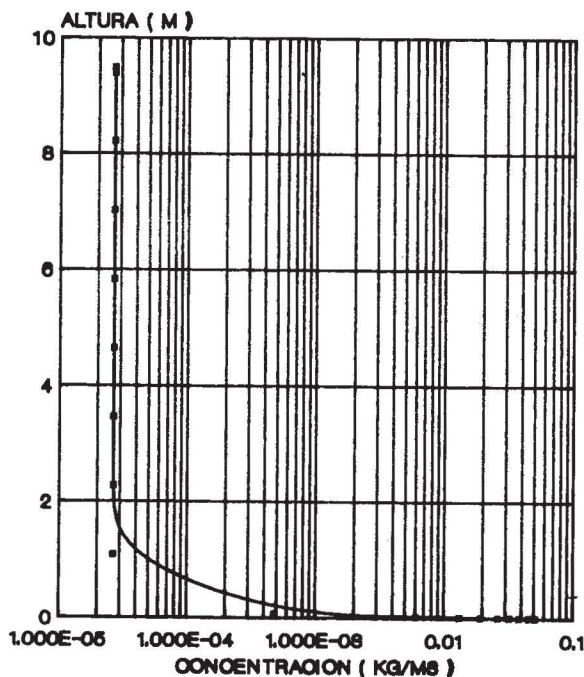


Fig. 4. Perfiles verticales de concentraciones de sedimentos y velocidades del agua en la estación 3.

Fig. 5. Perfiles verticales de concentraciones de sedimentos y velocidades del agua en la estación 4.

mente en forma logarítmica. Metha *et al.*, (1975) encontraron, al igual que en este trabajo, perfiles logarítmicos de velocidades medidas cerca del fondo en John's Pass y Blind Pass en la costa Oeste de Florida, U.S.A..

La Figura 7 presenta los resultados del análisis de sensibilidad del modelo usado en esta investigación. En este análisis se examina la sensibilidad de los datos de salida del modelo, específicamente para transporte de sedi-

Tabla 3

Tasas de transporte de sedimentos en suspensión y como carga de fondo en las estaciones 1-5.

Estación	Trasporte como carga en suspensión	Transporte como carga de fondo
	kg/s m	kg/s m
1	.8931 E-02	.1234 E-02
2	.9494 E-04	.3134 E-04
3	.3803 E-04	.2364 E-04
4	.9401 E-04	.3966 E-04
5	.1298 E-01	.5809 E-04

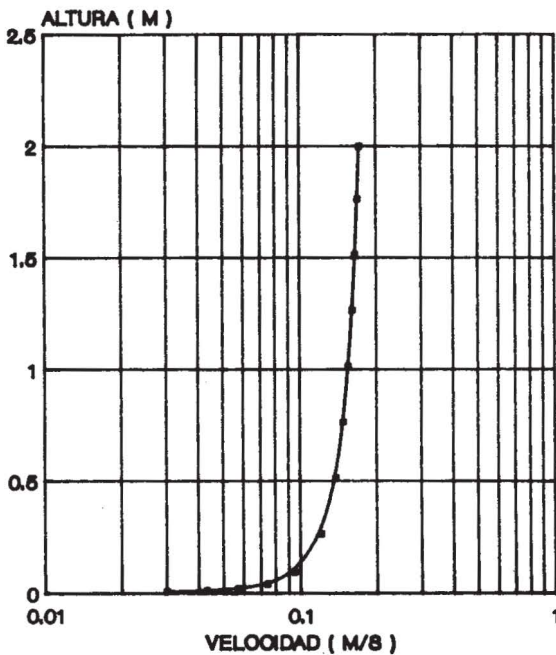
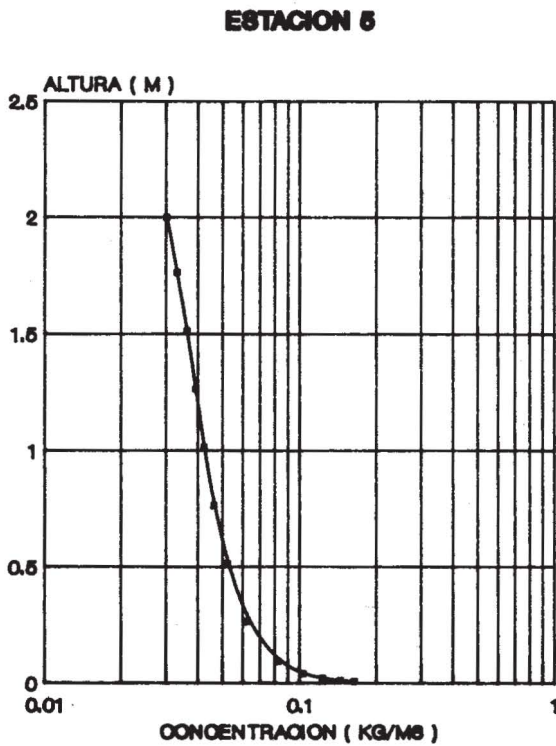


Fig. 6. Perfiles verticales de concentraciones de sedimentos y velocidades del agua en la estación 5.

mentos, a variaciones en los datos de entrada. La Figura muestra el efecto de los cambios de la velocidad de la co-

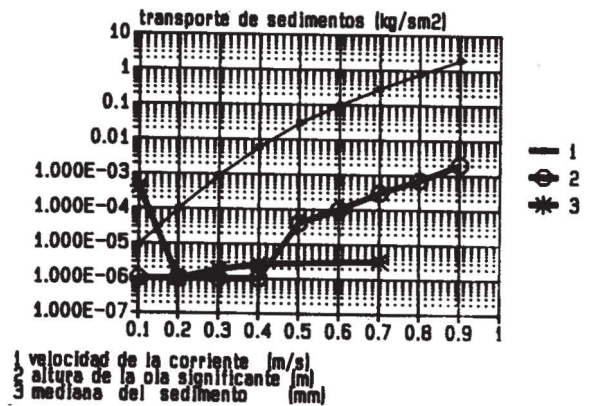


Fig. 7. Sensibilidad del modelo (transporte de sedimentos) al cambio de: (1) velocidad de la corriente; (2) altura de la ola y (3) mediana del sedimento, para la estación 2.

riente, la mediana del sedimento y la altura de la ola. El análisis efectuado reveló los resultados siguientes: a) incrementos significativos en las tasas de transporte con el incremento de la velocidad de la corriente, b) tasas de transporte constantes dentro del intervalo de alturas de olas entre 0-0.40 m e incrementos considerables en el transporte para el intervalo de altura de olas entre 0.40-0.90 m, c) decrecimientos significativos en las tasas de transporte con el aumento en la mediana del sedimento en el intervalo 0.1-0.2 mm e incrementos relativamente pequeños en el transporte en el intervalo 0.2-0.7 mm.

CONCLUSIONES

Las investigaciones inherentes al transporte de material sedimentario efectuadas en el sistema lagunar de Altata-Ensenada del Pabellón conducen a las siguientes conclusiones relevantes:

Las tasas de transporte de sedimentos en suspensión fueron superiores en magnitud a las tasas de transporte de sedimentos como carga de fondo. La tasa máxima de transporte en suspensión (0.0120 kg/s m²) se encontró frente a la boca del Río Culiacán, mientras que la tasa máxima de transporte como carga de fondo (0.0012 kg/s m²) se encontró en la boca del sistema lagunar.

Tabla 4

Distribución vertical del transporte de sedimentos en las estaciones 1-5.

ESTACION									
1		2		3		4		5	
ALTURA [M]	TRANSPORTE [KG/SM2]	ALTURA [M]	TRANSPORTE [KG/SM2]	ALTURA [M]	TRANSPORTE [KG/SM2]	ALTURA [M]	TRANSPORTE [KG/SM2]	ALTURA [M]	TRANSPORTE [KG/SM2]
.7000 E-02	.7039 E-01	.7000 E-02	.1698 E-02	.7000 E-02	.1332 E-02	.7000 E-02	.2130 E-02	.7000 E-02	.4939 E-02
.9920 E-02	.7553 E-01	.8363 E-02	.1658 E-02	.8650 E-02	.1326 E-02	.8142 E-02	.2047 E-02	.1200 E-01	.6163 E-02
.1336 E-01	.7493 E-01	.9967 E-02	.1566 E-02	.1056 E-01	.1265 E-02	.9478 E-02	.1912 E-02	.2143 E-01	.7066 E-02
.1754 E-01	.7023 E-01	.1191 E-01	.1428 E-02	.1281 E-01	.1159 E-02	.1108 E-01	.1729 E-02	.4158 E-01	.7612 E-02
.2290 E-01	.6227 E-01	.1439 E-01	.1246 E-02	.1557 E-01	.1012 E-02	.1310 E-01	.1498 E-02	.9331 E-01	.7771 E-02
.3031 E-01	.5151 E-01	.1775 E-01	.1021 E-02	.1914 E-01	.8258 E-03	.1578 E-01	.1220 E-02	.2645 E+00	.7513 E-02
.4203 E-01	.3906 E-01	.2289 E-01	.7711 E-03	.2419 E-01	.6011 E-03	.1977 E-01	.8915 E-03	.5145 E+00	.7132 E-02
.6975 E-01	.2370 E-01	.3313 E-01	.4575 E-03	.3287 E-01	.3513 E-03	.2731 E-01	.5129 E-03	.7645 E+00	.6806 E-02
.3240 E+00	.4831 E-02	.1250 E+00	.5301 E-04	.7018 E-01	.4127 E-04	.7113 E-01	.5296 E-04	.1015 E+01	.6514 E-02
.8240 E+00	.1825 E-02	.1308 E+01	.4156 E-05	.5038 E+00	.2085 E-05	.1089 E+01	.5313 E-05	.1265 E+01	.6207 E-02
.1324 E+01	.1091 E-02	.2558 E+01	.4618 E-05	.1004 E+01	.2443 E-05	.2276 E+01	.5954 E-05	.1515 E+01	.5873 E-02
.1824 E+01	.7554 E-03	.3808 E+01	.4892 E-05	.1504 E+01	.2652 E-05	.3464 E+01	.6319 E-05	.1765 E+01	.5529 E-02
.2324 E+01	.5614 E-03	.5058 E+01	.5088 E-05	.2004 E+01	.2801 E-05	.4651 E+01	.6575 E-05	.2000 E+01	.5206 E-02
.2824 E+01	.4149 E-03	.6308 E+01	.5240 E-05	.2504 E+01	.2916 E-05	.5839 E+01	.6772 E-05		
.3324 E+01	.3050 E-03	.7558 E+01	.5365 E-05	.3004 E+01	.3010 E-05	.7026 E+01	.6933 E-05		
.3824 E+01	.2233 E-03	.8808 E+02	.5470 E-05	.3504 E+01	.3090 E-05	.8214 E+01	.7069 E-05		
.4000 E+01	.2000 E-03	.1000 E+02	.5558 E-05	.4000 E+01	.3159 E-05	.9401 E+01	.7186 E-05		

Los perfiles verticales de concentración de sedimentos en suspensión reflejaron que en la parte superior de la columna de agua la concentración de sedimentos se mantiene casi uniforme y se incrementa rápidamente desde $0.30 < z < 1.5$ m, hasta el fondo. Los perfiles verticales de velocidades del fluido en la columna de agua correspondieron a distribuciones de tipo logarítmico. Las velocidades decrecieron rápidamente cerca del fondo.

La mayor concentración superficial (0.030 Kg/m^3) de sedimento en suspensión se encontró en la estación 5 (frente al Río Culiacán) donde el fondo consistió de sedimentos

limosos, mientras que la menor concentración superficial (0.0007 kg/m^3) se encontró en la estación 1 en la boca, donde el fondo consiste de arena fina.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada con el apoyo parcial del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del Proyecto 0625-N9110. Se agradece a Martín Frías Espericueta y a Martha Harfush Meléndez por su valiosa cooperación en el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se agradece a Ma. Margarita Cordero Ruíz por la mecanografía del manuscrito.

BIBLIOGRAFIA

- BIJKER, E. W., 1971. Longshore Transport Computations. *J. Waterways Harbour and Coastal Eng.*, 99, 187-196.
- BRUUN, P. 1976. Port Engineering. Gulf Publishing Company. Houston, USA, 586 pp.
- DEIGAARD, R., J. FREDSOE y I. BROECKER 1986. Suspended Sediment Transport in the Surf Zone. *J. Waterways Port Coastal and Ocean Eng.* 112, 29-38.
- EINSTEIN, H. A., 1950. The Bed-Load Function for Sediment Transport in Open Channel Flow. Technical Bulletin No. 1026, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, USA. 42 pp.
- FOLK, R., 1974. Petrology of Sedimentary Rocks, Hemphill Pub., Co., Austin, Texas, 164 pp.
- FREDSOE, J., O. H. ANDERSEN y S. SILBERG, 1985. Distribution of Suspended Sediment in Large Waves. *J. Waterways Port Coastal and Ocean Eng.*, 3, 66-73.
- GRANT, W. D. y O. S. MADSEN, 1976. Quantitative Description of Sediment Transport by Waves. Proc. 15th Coastal Eng. Conf., 1093-1112.
- KAMPHUIS, J. W., M. H. DAVIES, R. B. NAIRN y O. J. SAYAO, 1986. Calculation of Littoral Sand Transport Rate. *Coastal Eng.*, 10, 1-21.
- McDOWELL, D. M. y B. A. O'CONNOR, 1977. Hydraulic Behaviour of Estuaries. The Macmillan Press Ltd, London and Basingstoke, 292 pp.
- METHA, A. J., R. J. BYRNE y J. DE ALTERIS, 1975. Hydraulic Constants of Tidal Entrances III: Bed Friction Measurements at John's Pass and Blind Pass, Tech. Report No. 26, Coastal and Oceanographic Engineering Laboratory, Univ. of Florida, 81 pp.
- PERAZA-VIZCARRA, R. 1973. Características Hidrográficas y Distribución de los Sedimentos en el Sistema Estuario Bahía Altata Ensenada del Pabellón, Sin. Tesis Lic. Univ. Autón, Baja California, 65 pp.
- POSTMA, H. 1961. Transport and Accumulation of Suspended Matter in the Dutch Wadden Sea. *Neth. J. Sea Res.*, 1, 148-190.
- POSTMA, H. 1965. Water Circulation and Suspended Matter in Baja California Lagoons. *Neth. J. Sea Res.* 2, 566-604.
- RILEY, J. P. y G. SKIRROW 1975. Chemical Oceanography. Academic Press, New York, 606 pp.
- RODRIGUEZ-ESPINOSA, P. F. 1982. Impacto en las Lagunas Costeras Carmen-Pajonal-Machona, Tabasco, México, a partir de la abertura de una Boca Artificial. Tesis de Lic. Univ. Nal. Autón. México. Colegio de Geografía. 111 pp.
- STERNBERG, K. W., D. A. CACCHIONE, D. E. DRAKE y E. KRANCK, 1985. Suspended Sediment Transport in a Estuarine Tidal Channel within San Francisco Bay, California. *Mar. Geol.* 71, 237-258.
- U.S. ARMY, CORPS. OF ENGINEERS, COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, 1975. Shore Protection Manual. Government Printing Office, Washington, D.C. Vol. I. 450 pp.
- VAN RIJN, L. C., 1987. Data Base Sand Concentration Profiles for Currents and/or Waves. Delft Hydraulics. Report M1695-04-1, Delft, The Netherlands, 226 pp.
- VAN RIJN, L. C., 1990. Handbook Sediment Transport by Currents and Waves, Delft Hydraulics. Report H 461. The Netherlands, 288 pp.
-
- Yovani Montaña-Ley y Federico Páez-Osuna.
*Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
Estación Mazatlán, UNAM, Apdo. Postal No. 811.
Mazatlán, 82000 Sinaloa, México.*