



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA
CALIFORNIA**

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**“CUANTIFICACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN
SUSPENSIÓN EN LA COLUMNA DE AGUA MEDIANTE LA
UTILIZACIÓN DEL PERFIL DE ROUSE EN EL ALTO GOLFO DE
CALIFORNIA”**



TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
OCEANÓLOGO
PRESENTA
CARLOS MARIO LOO FIERRO

Ensenada, Baja California, agosto de 2003

RESUMEN

Los estudios concernientes a la concentración y flujo de sedimentos en el Alto Golfo de California son escasos. Para establecer predicciones con respecto a la erosión, transporte y depósito de material particulado en suspensión (MPS), mineral y orgánico, es importante conocer la concentración de MPS dentro de la columna de agua para calcular flujos netos e instantáneos de material. La cantidad de MPS total en la columna de agua se cuantificó utilizando el modelo de Rouse, el cual calcula un perfil vertical característico que establece el comportamiento de la concentración de MPS desde superficie hasta profundidades muy cercanas al fondo. Se realizaron observaciones de concentraciones de MPS en una estación a 25 km al noreste de San Felipe, B.C. (28/05/2002 y 02-03/06/2002). Las observaciones se dividieron en dos series de tiempo, una durante condiciones de mareas vivas (10 hrs) y otra durante mareas muertas (23.5 hrs). La determinación de los perfiles concentración de MPS observado se realizó mediante sensores de retroesparcimiento óptico, mientras que las velocidades medias de corriente de marea se determinaron con un Perfilador Acústico Doppler de Corrientes (ADCP), necesarias para el cálculo de la velocidad friccional. El ajuste del modelo de Rouse a los perfiles de concentración de MPS observados se hizo variando el valor del número de Rouse B , iterando en un intervalo de 0.1 a 1. El criterio estadístico fue minimizar las diferencias cuadráticas medias entre la concentración de MPS observada y la calculada a partir del perfil de Rouse. El error de estimación del perfil derivado del modelo de Rouse fue de $\pm 5.2\%$ en promedio con respecto a la concentración observada de MPS. Las observaciones de concentración integrada promedio fueron de 0.2537 kg/m^2 con una desviación estándar de 0.0579 kg/m^2 durante mareas vivas y de 0.1218 kg/m^2 con una desviación estándar de 0.0121 kg/m^2 durante mareas muertas. Las velocidades de asentamiento derivadas del modelo de Rouse tuvieron una media de 0.0025 m/s y una mediana de 0.0017 m/s para mareas vivas, en cambio para mareas muertas tuvieron una media de 0.00073 m/s y una mediana de 0.0006 m/s . Los sedimentos de fondo fueron el aporte principal de MPS a la columna de agua y los procesos de resuspensión y asentamiento fueron producidos por las corrientes de marea prevalecientes. Las observaciones durante mareas vivas mostraron que las concentraciones de MPS fueron proporcionales a la magnitud de la velocidad friccional. Esta proporcionalidad no fue tan clara para mareas muertas.

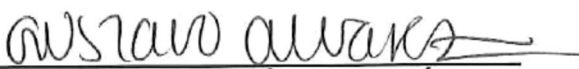
**“CUANTIFICACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN
SUSPENSIÓN EN LA COLUMNA DE AGUA MEDIANTE
LA UTILIZACIÓN DEL PERFIL DE ROUSE EN EL ALTO
GOLFO DE CALIFORNIA”**

T E S I S

QUE PRESENTA

CARLOS MARIO LOO FIERRO

APROBADA POR:


M.C. LUIS GUSTAVO ÁLVAREZ SÁNCHEZ
PRESIDENTE DEL JURADO


DR. MIGUEL AGUSTÍN TÉLLEZ DUARTE
SINODAL PROPIETARIO


DR. LUIS WALTER DAESSLE HEUSER
SINODAL PROPIETARIO

DEDICATORIA

A mi mamá, por todo lo que me has dado sin reserva. Esto es para ti...

A mi abuelita, gracias por tu apoyo y amor.

A mi tía Lily, nunca olvidaré tu esfuerzo por ayudarme a realizar mi sueño, gracias.

A mi tía Mary y tío Jimmy, por su apoyo en todos los sentidos.

A mis hermanos Alex y Kenny, a mis primos Jaime, Daniel, Jorge, Georgy y Maricarmen, a mis tíos Luis y Felipe, ya que además de ser mi familia, son mis amigos. Gracias.

A mi papá, a mi abuelo y a mi hermano Kevin Alonso, que dondequiera que se encuentren espero que este paso sea un motivo de orgullo; un poco de lo mucho que yo lo estoy de ustedes...

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi director de Tesis M.C. Luis Gustavo Álvarez Sánchez por sus consejos, apoyo, dedicación y paciencia en la realización de este trabajo, así como también a mis sinodales Dr. Miguel Téllez Duarte y Dr. Walter Daesslé Heuser.

A mis amigos Lizette, Mary Carmen, Hiram y Rodrigo, por nuestra gran amistad que espero no termine con el fin de este período en nuestras vidas.

A mis compadres Alvaro Acosta, Pancho Ramírez, Manuel Cebreros, Wicho Leal y Oscar Burciaga, por alivianarme siempre cuando andaba agütao o con demasiadas ganas de tomar. ¡Arriba Mexicali!

A mi camarada Javier Escalante (Kuko), por hacerme el paro (sin albur) cuando lo necesité, ojalá nos sigamos juntando pa' echarnos nuestras cheves.

A Liliana, por tu compañía, tu inmenso apoyo y gran cariño. ¡Puro Cachanilla!

A mi amiga Zuly, que me ayudó en mi posgrado en psicoanálisis, ¡gracias por tu tiempo y tus palabras güerita!

A Araceli, a tu papá y a tu mamá, por hacer feliz ese período de mi vida, siempre estaré agradecido.

A Manuel Moreno Mercado, Pancho Ley Lou, Rafael Hernández Walls y Dora Waumann, que además de ser mis profesores los considero mis amigos.

A Rafael Ramírez, Lupita Pacheco y Tere (FCM), por su apoyo en la realización de este trabajo.

A mis compas Renata, Angélica, Vanessa, Carolina, Ely, Alex, Sierra, Julio, Diego (Primo), Eduardo Federico Asaji (Chino), Alonso (Inge), Aleph (Huevón), Karina, Bernardo (Gordito), Nicolette, Gaby, Maru, Pablo, Shaman, Paulina, Fabián, Memo, Martín (Negro), Rubén, Rafa, Chavala, Maui, Pájaro (Erizo), Evaristo, Nacho, Ixpan, Fito, Mely, DoñaTere, Canek, Rat Boy y a todos mis compas de generación, por el placer de haberlos conocido.

Al proyecto "Concentración y flujo de sedimentos en suspensión en las planices de marea del Alto Golfo de California" de UC MEXUS-CONACYT-CICESE, por el apoyo de una beca para la realización de este trabajo.

***NO DEJES PARA MAÑANA LO QUE PUEDAS HACER HOY,
¿CUÁL ES TU EXCUSA?***

ÍNDICE GENERAL

	Página
1. Introducción	
1.1 Importancia del material particulado en suspensión (MPS).....	1
1.2 Antecedentes de modelamiento de material particulado en suspensión en la columna de agua.....	4
1.3 Antecedentes de la evolución de la hidrografía estuarina y sedimentológica en el Alto Golfo de California (AGC).....	6
1.4 Objetivo.....	10
2. Materiales y métodos	
2.1 Área de estudio.....	11
2.2 Oceanografía y sedimentología.....	12
2.3 Metodología	
2.3.1 Observaciones.....	13
2.3.2 Sensor de retroesparcimiento óptico.....	14
2.4 Análisis matemático del modelo de Rouse (1936).....	15
2.5 Tratamiento de datos.....	21
3. Resultados.....	27
4. Discusiones	
4.1 Ajuste del modelo de Rouse a perfiles de concentración de MPS observados.....	49
4.2 Condiciones hidrodinámicas que afectan el modelaje de los datos observados.....	53
5. Conclusiones.....	61
6. Referencias.....	62
7. Anexos	

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Localización del área de estudio	11
Figura 2.	Perfiles adimensionales de concentración de sedimento calculados de la ecuación de Rouse	18
Figura 3.	Ejemplos de perfiles de concentración de MPS observados para mareas vivas y mareas muertas	22
Figura 4.	Ejemplo de análisis de regresión por mínimos cuadrados entre los logaritmos naturales de la concentración de material particulado en suspensión observada y calculada por el modelo de Rouse	24
Figura 5.	Variación de la marea, velocidad friccional y concentración de material particulado en suspensión integrado en la vertical observado y calculado por el modelo de Rouse durante mareas vivas	29
Figura 6.	Variación de la marea, velocidad friccional y concentración de material particulado en suspensión promediado en la vertical observado y calculado por el modelo de Rouse durante mareas vivas	30
Figura 7.	Variación de la marea, velocidad friccional y concentración de material particulado en suspensión integrado en la vertical observado y calculado por el modelo de Rouse durante mareas muertas	31
Figura 8.	Variación de la marea, velocidad friccional y concentración de material particulado en suspensión promediado en la vertical observado y calculado por el modelo de Rouse durante mareas muertas	32
Figura 9.	Relación entre los valores integrados de material particulado en suspensión observado y calculado con el modelo de Rouse para de mareas vivas	35
Figura 10.	Relación entre los valores promediados de material particulado en suspensión observado y calculado con el modelo de Rouse para de mareas vivas	36

ÍNDICE DE FIGURAS (continuación)

		Página
Figura 11.	Relación entre los valores integrados de material particulado en suspensión observado y calculado con el modelo de Rouse para de mareas muertas	37
Figura 12.	Relación entre los valores promediados de material particulado en suspensión observado y calculado con el modelo de Rouse para de mareas muertas	36
Figura 13.	Variación de la marea, velocidad friccional y velocidad de asentamiento del material particulado en suspensión durante mareas vivas	40
Figura 14.	Variación de la marea, velocidad friccional y velocidad de asentamiento del material particulado en suspensión durante mareas muertas	41
Figura 15.	Variación de la marea, velocidad friccional y concentración de material particulado en suspensión integrado en la vertical observado y calculado por el modelo de Rouse hasta 0.1 m sobre el fondo durante mareas vivas	43
Figura 16.	Variación de la marea, velocidad friccional y concentración de material particulado en suspensión promediado en la vertical observado y calculado por el modelo de Rouse hasta 0.1 m sobre el fondo durante mareas vivas	43
Figura 17.	Variación de la marea, velocidad friccional y concentración de material particulado en suspensión integrado en la vertical observado y calculado por el modelo de Rouse hasta 0.1 m sobre el fondo durante mareas muertas	44
Figura 18.	Variación de la marea, velocidad friccional y concentración de material particulado en suspensión promediado en la vertical observado y calculado por el modelo de Rouse hasta 0.2 m sobre el fondo durante mareas muertas	45

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla I.	Concentración media integrada observada y calculada con el modelo de Rouse y desviación estándar, concentración media integrada hasta 0.1 m sobre el fondo, porcentaje de varianza explicada por el modelo de Rouse y velocidad de asentamiento media y mediana para mareas vivas y mareas muertas	28
Tabla II	Concentración media promediada observada y calculada con el modelo de Rouse y concentración media promediada hasta 0.1 m sobre el fondo para mareas vivas y mareas muertas	28

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación		Página
(1)	Ecuación de difusión-convección bajo condiciones estacionarias y unidimensionales	15
(2)	Expresión de equilibrio entre flujo de partículas por asentamiento gravitacional y flujo turbulento	16
(3)	Relación entre coeficiente de difusión turbulenta del sedimento y coeficiente de difusión turbulenta de momentum	16
(4)	Relación entre coeficiente de difusión turbulenta del sedimento y los esfuerzos de Reynolds	16
(5)	Distribución vertical del coeficiente de difusión de momentum para un flujo unidireccional de agua clara	17
(6)	Ecuación (modelo) de Rouse	17
(7)	Número de Rouse	18
(8)	Velocidad media de los valores cercanos al fondo del perfil logarítmico de la velocidad	20
(9)	Ecuación de calibración de sensor de retroesparcimiento óptico	21
(10)	Ecuación logaritmizada del modelo de Rouse	23
(11)	Ecuación de diferencia cuadrática media	25
(12)	Ley de Stokes	58

SIMBOLOGÍA

MPS = Material particulado en suspensión

AGC = Alto Golfo de California

MM = Mareas muertas

MV = Mareas vivas

ADCP = (Acoustic Doppler Current Profiler) Perfilador acústico Doppler de corrientes

SRO = Sensor de retroesparcimiento óptico

v_{ss} = velocidad de asentamiento en agua clara (m/s)

$\bar{c}_s$ = concentración media de sedimento (kg/m³)

c'_s = concentración fluctuante de sedimento (kg/m³)

ϵ_s = coeficiente de difusión turbulenta del sedimento (m²/s)

y = altura de la concentración $\bar{c}_s$ (m)

ϵ_m = coeficiente de difusión de momentum (m²/s)

$\bar{u}(y)$ = velocidad promedio latitudinal (m/s)

$\bar{v}(y)$ = velocidad promedio longitudinal (m/s)

u', v' = fluctuaciones de velocidad latitudinal y longitudinal (m/s)

h = altura total de la columna de agua (m)

u_* = velocidad friccional (m/s)

K = constante de Von Karman (0.4)

a = altura de referencia (m)

c_{sa} = concentración de MPS en nivel de referencia a (kg/m³)

SIMBOLOGÍA (continuación)

B	= Número de Rouse
β	= coeficiente de proporcionalidad entre coeficientes de difusión turbulenta de sedimento y momentum
v_{ss}	= velocidad de asentamiento de las partículas de MPS (m/s)
U	= velocidad media de los valores cercanos al fondo del perfil logarítmico de la velocidad (m/s)
z	= distancia sobre el fondo (m)
z_0	= escala de longitud de la rugosidad del fondo (m)
V	= voltios
R_i	= valor de concentración proporcionado por el perfil de Rouse (kg/m ³)
Co_i	= valor de la concentración observada (kg/m ³)
n	= número de datos
P_i	= densidad de la partícula de MPS (kg/m ³)
P	= densidad del fluido (kg/m ³)
g	= aceleración de la gravedad (m/s ²)
μ	= viscosidad del fluido (kg/ms)
d	= diámetro de la partícula (m).

ANEXOS

ANEXO I.

Tabla III. Concentraciones integradas verticalmente observadas y calculadas con el modelo de Rouse para mareas vivas (28/05/2002), concentración extrapolada hasta 0.1m sobre el fondo, altura sobre el fondo mínima de medición y el porcentaje de varianza explicado por el modelo de Rouse

Tabla IV. Concentraciones integradas verticalmente observadas y calculadas con el modelo de Rouse para mareas muertas (02/05/2002-03/05/2002), concentración extrapolada hasta 0.1m sobre el fondo, altura sobre el fondo mínima de medición y el porcentaje de varianza explicado por el modelo de Rouse

Tabla V. Concentración promediada observada y calculada con el modelo de Rouse para mareas vivas (28/05/2002), concentración extrapolada hasta 0.1m sobre el fondo, altura sobre el fondo mínima de medición y altura total de la columna de agua en la que se promediaron los datos de concentración integrados en la vertical.

Tabla VI. Concentración promediada observada y calculada con el modelo de Rouse para mareas muertas (02/06/2002-03/06/2002), concentración extrapolada hasta 0.1m sobre el fondo, altura sobre el fondo mínima de medición y altura total de la columna de agua en la que se promediaron los datos de concentración integrados en la vertical.

ANEXO II. Perfiles de concentración observada y calculada con el modelo de Rouse (con extrapolación hasta 0.1 m sobre el fondo) para mareas vivas

ANEXO III. Perfiles de concentración observada y calculada con el modelo de Rouse (con extrapolación hasta 0.1 m sobre el fondo) para mareas muertas

1. Introducción

1.1 Importancia del material particulado en suspensión (MPS)

La determinación de la concentración de sedimentos en suspensión en ríos, lagos y ambientes estuarinos ha sido causa de numerosos estudios en todo el mundo. En particular las áreas estuarinas presentan condiciones únicas para predecir transporte de sedimento gracias a la mezcla de agua dulce y salada, flujos de marea y presencia de sedimentos cohesivos (Kineke y Sternberg, 1989). Como transición entre agua dulce y salada entre ríos y océano, los estuarios son importantes ecológica y socialmente (Brennan, 2000) debido al gran impacto socio-económico que ejercen en actividades como la pesca. Observaciones en estuarios indican que los picos en la concentración de sedimento en suspensión frecuentemente coinciden con los picos en la biota, magnificando la influencia del sedimento en el ecosistema (Brennan, 2000), por lo tanto, el sedimento tiene un papel muy importante al definir un ecosistema estuarino. La hidrodinámica de los sedimentos en suspensión puede ser también aplicada al entendimiento de las distribuciones de plancton (Morgan et al. 1997). Los sedimentos contribuyen al crecimiento biológico al acarrear nutrientes e inhiben la fotosíntesis al atenuar la penetración de luz solar a la columna de agua (Kashefipour y Falconer, 1999; Lucas et al., 1999). García-de-Ballesteros y Larroque (1974) expresan que el material particulado en suspensión (MPS) es un factor biológico limitante en la distribución de los organismos. Además de las implicaciones biológicas mencionadas, el sedimento sirve como transporte para muchos contaminantes de origen antropogénico, ya que las superficies electro-químicas de las partículas cohesivas son

particularmente lugares de acarreo efectivo (Brennan, 2000), por lo tanto, el transporte de sedimento puede aportar o secuestrar partículas contaminantes dependiendo del intercambio de sedimento entre el fondo y la columna de agua, las condiciones de óxido-reducción y el pH del agua. Por otro lado, el depósito de sedimentos finos en canales y deltas estuarinos causan restricción a la navegación y problemas de inundación (Kashefipour y Falconer, 1999), además de altos costos en procesos de dragado. Las consideraciones anteriores de los procesos ligados a la sedimentación en estuarios indican la importancia de poder predecir los procesos de transporte de sedimento (Kashefipour y Falconer, 1999).

Los estudios concernientes al flujo y transporte de sedimentos en la zona conocida como Alto Golfo de California (AGC) son limitados. El AGC es una zona deltáica somera ubicada en la parte más al norte del Golfo de California que sostiene una pesquería en declive pero importante de camarón y se está desarrollando la industria del cultivo del camarón (Hernández-Ayón et al., 1993; Alvarez y Jones, 2002a). Las aguas turbias albergan larvas y juveniles de camarón y otros crustáceos, así como valiosos recursos vivientes como lo son la totoaba (*Totoaba macdonaldi*) y la vaquita de mar (*Phocoena sinus*), las cuales se encuentran en peligro de extinción (Alvarez y Jones, 2002b). Especies de camarón como *Litopenaeus stylirostris* (camarón azul) y *Farfantepenaeus californiensis* (camarón café) crecen en esta área (Calderón-Aguilera et al., 2003). La importancia del AGC en el desarrollo de los estadíos larvales para muchas especies marinas motivó al Gobierno Mexicano al declararlo como Reserva de la Biosfera en 1993 (Calderón-Aguilera et al., 2003). Además de la importancia biológica de la región, en un futuro próximo se contempla el desarrollo de una serie de

puertos turísticos a lo largo de la costa este de Baja California (proyecto conocido como Escalera Náutica), para lo cual se requerirán estudios respecto a los flujos y el transporte de sedimentos en la región.

Los modelos analíticos describen la relación causa-efecto entre las variables y nuevos valores que se desean obtener, con la expectativa de que todas éstas tienen significancia en el sistema natural estudiado. Todas las predicciones de modelos analíticos llevan asociadas un error, el cual debe ser considerado y cuantificado para determinar su credibilidad. Para poder establecer predicciones con respecto a la erosión, transporte y depósito de material particulado en suspensión (MPS); tales como partículas sedimentarias y material orgánico en ambientes costeros diversos, es importante conocer la concentración de MPS que se encuentra dentro de la columna de agua, para poder entonces calcular flujos netos e instantáneos de material. Los modelos analíticos para predecir los perfiles de concentración de sedimentos en suspensión se han utilizado extensivamente en zonas costeras (Kineke y Sternberg, 1989). Son una herramienta valiosa para predecir flujos y procesos de transporte de sedimentos y contaminantes, por lo que son importantes en el manejo ambiental de agua (Kashefipour y Falconer, 1999). La simulación del movimiento de las partículas en estuarios y la representación de los procesos involucrados en el transporte de sedimento utilizando modelos matemáticos en base a mareas es un objetivo a alcanzar (Clarke y Elliott, 1998).

1.2 Antecedentes de modelamiento del material particulado en suspensión en la columna de agua

Hasta muy recientemente el transporte, depósito y erosión de MPS no había sido considerado en términos de movimiento turbulento, sino en los términos de las características de flujo promedio y, después de 1937, en términos de mezcla por difusión (Eisma, 1993). En 1936, Hunter Rouse estableció una ecuación que modela la variación de la concentración de sedimento con la profundidad. La ecuación de Rouse genera un perfil vertical característico que establece el comportamiento de la concentración de MPS desde superficie hasta profundidades muy cercanas al fondo. Esta ecuación es matemáticamente sencilla y sigue siendo utilizada por diversos investigadores en estudios ingenieriles de modelación de MPS. Por ejemplo, Kineke y Sternberg (1989) realizaron un estudio para evaluar qué tan bien las ecuaciones de distribución de sedimento en suspensión (basadas en el modelo de Rouse) reproducían a las concentraciones observadas. Estos autores encontraron que los perfiles calculados con las ecuaciones de distribución de sedimento en suspensión evaluadas con valores de velocidad de asentamiento tomados *in situ* se asemejaban más a los perfiles observados. Clarke y Elliot (1998) estudiaron la resuspensión y movimiento de sedimento en el estuario Firth of Forth, Gran Bretaña. Estos autores presentaron la estructura vertical de la concentración de sedimento mediante una versión modificada del perfil de Rouse y encontraron que durante las mareas muertas se incrementó la erosión asumiendo que la velocidad de la corriente de marea era logarítmica con respecto a la altura sobre el fondo. Encontraron que las simulaciones más realistas se presentaban cuando los parámetros de erosión y depósito estaban en

función del ciclo de marea. Graf y Cellino (2002) utilizaron una versión modificada del perfil de Rouse para encontrar nuevos valores al parámetro de coeficiente de difusión-convección, dependiendo de la existencia de estructuras sedimentarias en el fondo y así lograr un mejor modelamiento del MPS en condiciones de laboratorio.

1.3 Antecedentes de la evolución de la hidrografía estuarina y sedimentológica en el Alto Golfo de California (AGC)

Desde que la descarga de agua dulce del Río Colorado al Golfo de California fue suspendida por la construcción de presas a lo largo de su cauce, el área conocida como AGC cambió su condición de estuario normal a inverso. Dicho ambiente presenta una alta evaporación y una baja precipitación, por lo que la salinidad en el agua es muy alta (Lavín y Sánchez, 1999; Alvarez y Jones, 2002a). Debido a que la zona del AGC se comporta como un estuario inverso, se requiere un flujo neto de agua oceánica para compensar la pérdida de agua por la alta evaporación (Álvarez y Jones, 2002a). Las aguas cercanas a las zonas someras (ej. cabeza del estuario) poseen una alta concentración de sales, por lo que se crea una diferencia de densidad con las aguas subyacentes (Nunes Vaz et al., 1990). Las aguas con mayor contenido en sales, por su mayor densidad, tienden a hundirse y a generar corrientes de gravedad que remueven sedimentos próximos al fondo. El balance de masa se cumple cuando son reemplazadas con aguas menos salinas provenientes de la boca del estuario. En el AGC, la pérdida de sedimento en suspensión hacia aguas más profundas se encuentra controlada por las corrientes de gravedad, las cuales son típicas de la circulación cercana al fondo en los estuarios inversos (Álvarez y Jones, 2002b). Las corrientes de gravedad parecen estar moduladas por los ciclos de marea, aún durante las mareas muertas (Lavín et al., 1998). Estas corrientes que son generadas por la formación de masas de agua son un componente muy importante en la oceanografía de la región (Lavín et al., 1998; Lavín y Sánchez, 1999). En el trabajo realizado por Lavín et al., (1998), se propone que las condiciones hidrográficas (ej. estratificación de la columna

de agua) observadas durante las mareas muertas desaparecen durante las mareas vivas debido al incremento de la mezcla vertical.

Después de aproximadamente 95 años de aplicar un control excesivo del flujo del Río Colorado, el flujo sedimentario del delta ha cambiado, por lo que actualmente éste se encuentra totalmente expuesto a las fuerzas hidrodinámicas presentes (Thompson, 1968; Carriquiry y Sánchez, 1999). La construcción de las presas Hoover y Glenn Canyon generaron el impacto mas dramático en la cantidad y tiempo de llegada de agua dulce a la región del AGC (Lavín, 1999). Thompson (1968) menciona que la interrupción del flujo del aporte de lodos por parte del Río Colorado ha sido la causa más importante de los cambios en el régimen sedimentológico en las planicies costeras lodosas en los últimos 1000 a 1500 años. Este autor menciona que el Río Colorado, antes de la intervención humana, descargaba $21 \times 10^9 \text{ m}^3$ de agua al año, donde se acarreaban cerca de 180×10^6 toneladas de sedimento, de las cuales probablemente >80% eran limos y arcillas. Menciona también que actualmente se descargan menos de $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ de agua al año. El aporte del agua del río se nulificó casi totalmente al igual que el aporte de sedimentos nuevos, por lo que los aportes de sedimentos existentes hoy en día se deben en su mayoría a la erosión del delta (Carriquiry y Sánchez, 1999) y por parte de los vientos que acarrean partículas provenientes principalmente del Gran Desierto de Sonora y de la parte desértica de Baja California (Sarracino-Ramírez, 1995). El cambio en los patrones de flujo de sedimentos a la parte norte del golfo produjo cambios en la composición del sedimento y en la tasa de depósito, mientras que la carga atribuida a los vientos permanece igual o se intensifica por la mayor desertificación provocada por la falta de vegetación (a su vez provocada

por la falta de agua) y por el mayor aprovechamiento de tierra para actividades agrícolas (Sarracino-Ramírez, 1995). En ausencia de fuerzas constructivas como el aporte de nuevo sedimento por parte del río, el delta ha estado sujeto a fuerzas destructivas como la marea y el oleaje (Carriquiry y Sánchez, 1999). Estos autores sugieren que los cambios humanos inducidos están provocando la erosión de la cuenca estuarina y de la plataforma somera adyacente, provocando la dispersión y redepósito de los sedimentos. Es necesario mejor entendimiento de los mecanismos de transporte y sedimentación, así como de la evolución geomorfológica a corto plazo del delta, para comprender la magnitud de los daños provocados por las actividades antropogénicas en el flujo del Río Colorado (Carriquiry y Sánchez, 1999).

Los tamaños de grano del sedimento de fondo en la zona del AGC son arenas finas, limos y arcillas (Carriquiry y Sánchez, 1999). Sin embargo, la proporción de estos tamaños de grano puede variar debido al fenómeno de floculación, el cual es un fenómeno electroquímico común en ambientes hipersalinos que agrega partículas sedimentarias y orgánicas. Reuter et al. (1999) menciona que la turbulencia en el flujo de agua es un parámetro muy importante en los procesos de floculación, la cual se encuentra influenciada además por la concentración de sedimentos en suspensión y la salinidad. El mecanismo principal de remoción y transporte de sedimentos es la marea (García-de-Ballesteros y Larroque, 1974), por lo que la distancia del transporte dependerá de la velocidad de la corriente de marea y el tamaño y densidad de las partículas sedimentarias. Estos autores señalan que los principales factores dinámicos en la zona son la corriente neta, el flujo y reflujo de las mareas y el efecto del oleaje sobre el fondo. La mayor parte de la energía de la marea (hasta un 70%) es absorbida

por el Golfo y la mayor parte de esta absorción se presenta en el norte del mismo por fricción con el fondo (García-Silva, 1996), fricción que genera una resuspensión de los sedimentos de fondo y que aumenta la concentración de MPS en la columna de agua. García de Ballesteros y Larroque (1974) concluyen que los factores que determinan la presencia de material en suspensión son principalmente los sedimentos superficiales aportados antiguamente por el Río Colorado. Hernández-Ayón et al. (1993) menciona que debido a la gran resuspensión de sedimento en el delta del Río Colorado se genera un gran aporte de materia orgánica y de nutrientes remineralizados. Carriquiry y Sánchez (1999) mencionan que existe un flujo neto de material sedimentario de norte a sur a lo largo de las costas de Baja California que remueve el sedimento del delta, y que la acción combinada del oleaje y el amplio rango de mareas es responsable de la erosión y resuspensión de los sedimentos del fondo. Aún con el poco aporte por parte de los ríos, la energía de la marea es suficiente para mantener una alta concentración de MPS (Dyer, 1995). Daesslé et al. (2002) afirman que la distribución de metales como Fe y Mn en la zona norte del Golfo de California se encuentra controlada por la distribución de partículas de tamaño fino como arcillas. Este autor menciona también que la fuente principal de metales es la resuspensión y redepósito de los sedimentos estuarinos derivados del delta del Río Colorado.

Alvarez y Jones (2002a) realizaron un estudio acerca de los factores que influyen en los flujos de MPS en suspensión en el AGC. Estos autores encontraron que la concentración de MPS decrece a medida que se aumenta la altura sobre el fondo, y que la fuente de esta MPS era el material proveniente de la resuspensión provocada por las corrientes de marea; encontraron también que existe un transporte neto de

sedimentos finos hacia fuera del AGC. La dinámica estuarina en estaciones del año con altas temperaturas y muy poca precipitación ha recibido atención hasta años recientes (Álvarez y Jones, 2002a). Estos autores señalan que el transporte de sedimentos condiciones de estuario inverso no ha sido ampliamente documentada, tal vez a consecuencia de la relativamente poca atención que se le ha dado a este tipo de estuarios en el pasado.

1.4 Objetivo

Cuantificar la concentración de MPS dentro de la columna de agua ajustando el modelo de Rouse con base en los datos observados en el AGC .

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El Alto Golfo de California (AGC) se encuentra localizado en la parte más al norte del Golfo de California (Figura 1). Las coordenadas geográficas del área de estudio son $31^{\circ}30'$ hasta 31° N y $114^{\circ}54'$ hasta $113^{\circ}54'$ W. Esta zona se encuentra rodeada por los desiertos de Sonora al este y Baja California al oeste, mientras que en la parte NW se encuentra la antigua desembocadura del Río Colorado.

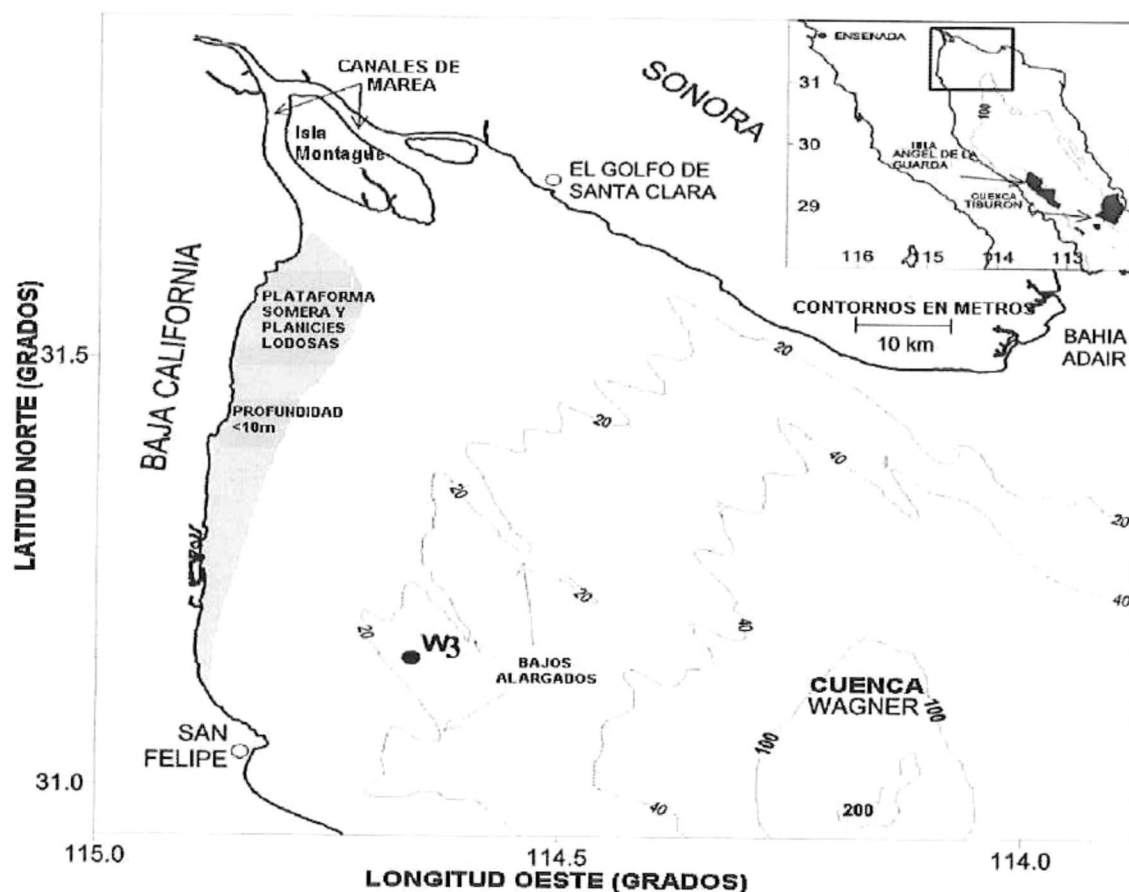


Figura 1. El Alto Golfo de California (AGC). Se muestra el sitio de observaciones **W3** con coordenadas $31^{\circ} 09.21$ N y $116^{\circ} 39.49$ W (Tomada de Alvarez y Jones, 2002b).

2.2 Oceanografía y sedimentología

El AGC una de las zonas más dinámicas de México, con un rango de mareas vivas de aproximadamente 7 m (Alvarez y Jones, 2002a) y corrientes de marea en la parte oeste de aproximadamente 0.8 m/s en mareas vivas y ~0.1 m/s durante mareas muertas a una profundidad de 25 m (Alvarez y Jones, 2002b). La poca velocidad del viento (menor a 5 ms^{-1}) y la corta longitud del fetch provocan que la altura y periodo del oleaje sean muy pequeños (altura significativa = 0.3-1.0 m y periodo = 2-4 s) (Álvarez y Jones, 2002a). La temperatura en la capa superficial del agua cambia de 15°C en enero a 31°C en agosto (Lavín et al., 1998). Thompson (1968) divide a los sedimentos de fondo presentes en la zona en tres categorías texturales: limo-arcilla, limo-arcilla-arena y arena. Estaciones de muestreo realizadas en su estudio próximas a W3, en la parte oeste del AGC (ver Figura 1), muestran los siguientes componentes: 95% sedimento terrígeno (en los primeros 10 cm de la capa de sedimentos del fondo), el cual se encuentra distribuido en promedio en 21% arena, 30% limo y 49% arcilla, 3% de sedimento constituido por fracciones de conchas de bivalvos principalmente y 2% de sedimento constituido por otros componentes biogénicos como testas de foraminíferos, diatomeas y ostrácodos. Carriquiry y Sánchez (1999) describen dos provincias mineralógicas: la provincia sonorenses caracterizada por minerales pesados como granate y zircón y la bajacaliforniana caracterizada por minerales como hornblenda, epidota y piroxenos. Basado en un análisis geoquímico y de tamaño de partículas, Daesslé et al. (2002) describen que en la provincia mineralógica de Baja California-Sonora propuesta por Carriquiry y Sánchez (1999) existe un componente de

sedimento relativamente grueso con un componente sobrepuesto de arcilla proveniente del delta del Río Colorado.

2.3 Metodología

2.3.1 Observaciones

Se estableció una estación de muestreo denominada W3 con coordenadas $31^{\circ}09.21'N$ y $114^{\circ}39.49'W$ (Fig. 1), localizada aproximadamente a 25 km al noreste de San Felipe B.C. Se realizaron mediciones de velocidad de corriente con un ADCP (Perfilador Acústico Doppler de Corriente) que se colocó en el fondo marino en esta estación. Los datos de velocidad consistieron en perfiles promedio consecutivos a intervalos de 5 minutos, medidos entre 1 y ~15 m sobre el fondo. Además de la velocidad de corriente, el ADCP midió altura del nivel del mar, temperatura cercana al fondo e intensidad de la señal acústica retroesparcida.

Los perfiles verticales de concentración fueron obtenidos con un transmisómetro Sea-Tech y sensores de retroesparcimiento óptico Sea-Point, los cuales se encontraban conectados a un CTD Sea-Bird que midió temperatura, salinidad y profundidad de la columna de agua. Estas mediciones se hicieron mediante lances a intervalos de 0.5 h. Los lances se hicieron a bordo del B/O *Francisco de Ulloa* (CICESE). Se dividieron los datos en dos series de tiempo: la primera bajo las condiciones de mareas vivas (MV), la cual empezó en fecha 28/05/2002 a las 8:25hrs con una duración de 10 horas, mientras que la segunda serie de lances se llevó acabo

bajo las condiciones de mareas muertas (MM), la cual inició en fecha 2/06/2002 a las 19:00hrs, con una duración de 23.5 horas, terminando a las 18:30hrs del 03/06/2002. Los sensores ópticos se calibraron según el método descrito por Alvarez y Jones (2002a). Las muestras de agua de las botellas montadas en el CTD se utilizaron para medir la concentración de MPS por filtración (filtros CYCLOPORE de 45 μm) de un volumen de agua conocido (medición diferencial de peso), para luego utilizarlas en la calibración de los sensores ópticos.

2.3.2 Sensor de retroesparcimiento óptico

Para la obtención de los perfiles verticales de MPS se utilizó un sensor de retroesparcimiento óptico Seapoint (SRO). Los SRO emiten una onda luminosa con una longitud de onda de 880 nm (Seapoint Sensors User Manual, 1996). La luz retrodispersa por las partículas suspendidas en los primeros 5 cm del punto de emisión es detectada por un sensor de luz el cual convierte la señal en voltaje dependiendo la cantidad de luz dispersa (5V para dispersión total y 0V para nula dispersión). Los datos obtenidos fueron almacenados en memoria de estado sólido, mediante un programa computarizado que graba los datos cada 5 minutos. La respuesta del SRO es lineal para el rango esperado de concentración de partículas en el AGC. La resolución del SRO es de 0.02% de la concentración de MPS medida.

2.4 Análisis matemático del modelo de Rouse (1936)

Para la determinación de la concentración total de MPS en la columna de agua, es un procedimiento común el determinar la distribución resolviendo la ecuación de difusión-convección bajo las condiciones apropiadas. Asumiendo condiciones estacionarias y unidimensionales (no existe cambio de la concentración de MPS con respecto al tiempo y en direcciones latitudinal o longitudinal) se obtiene la siguiente ecuación (Graf y Cellino, 2002):

$$v_{ss} \bar{c}_s + \varepsilon_s \frac{\partial \bar{c}_s}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

donde:

v_{ss} = velocidad de asentamiento en agua clara (m/s),

$\bar{c}_s$ = concentración media de sedimento (kg/m³),

ε_s = coeficiente de difusión turbulenta del sedimento (m²/s)

y = altura de la concentración $\bar{c}_s$

lo cual implica que cuando la concentración del sedimento es cero (en superficie), el coeficiente de difusión también es cero (Graf y Cellino, 2002).

La ecuación (1) implica que los flujos de partículas hacia el fondo por asentamiento gravitacional $\overline{v_{ss}c_s}$, y el flujo turbulento en dirección a la superficie, $\overline{c'_s v'}$, se encuentran en equilibrio; lo anterior puede ser expresado como:

$$\overline{c'_s v'} = -\varepsilon_s \frac{\partial \overline{c_s}}{\partial y} \quad (2)$$

donde v' es la velocidad vertical fluctuante y c'_s es la concentración fluctuante de sedimento. Usualmente se admite que el coeficiente de difusión turbulenta, ε_s , y el coeficiente de difusión turbulenta de momentum (viscosidad turbulenta), $\varepsilon_m(y)$, se encuentran relacionados de la forma:

$$\varepsilon_s = \beta \cdot \varepsilon_m \quad (3)$$

donde ε_s se encuentra relacionado con los esfuerzos de Reynolds, $-\rho \bullet \overline{u'v'}$, en la forma:

$$\overline{u'v'} = -\varepsilon_m \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \quad (4)$$

donde $\bar{u}(y) = u - u'$ y $\bar{v}(y) = v - v'$ son las velocidades promedio latitudinal y longitudinal, respectivamente, y u' y v' son sus fluctuaciones.

Para un flujo unidireccional de agua clara la distribución vertical del coeficiente de difusión de momentum $\mathcal{E}_m$ se encuentra dado por la ecuación (Graf y Cellino, 2002):

$$\mathcal{E}_m = \kappa \cdot u_* \cdot \frac{y}{h} (h - y) \quad (5)$$

donde h es la altura de la columna de agua, u_* es la velocidad friccional y κ es la constante de von Karman ($\kappa = 0.4$). Haciendo una sustitución de la ecuación (5) en la ecuación (3), y a su vez en la ecuación (1), después de una separación de variables e integrando por partes entre los límites, $a < y < h$, se obtiene la ya conocida ecuación de Rouse:

$$\frac{\bar{c}_s}{c_{sa}} = \left(\frac{h - y}{y} \frac{a}{h - a} \right)^B \quad (6)$$

donde $\bar{c}_{sa}$ es la concentración media de MPS en nivel de referencia a . El número de Rouse (B) se encuentra definido como:

$$B = \frac{v_{ss}}{\beta \kappa u_*} \quad (7)$$

Para valores grandes de $v_{ss} / \beta \kappa u_*$, lo que significa tamaño de grano grande dentro de flujos lentos, la concentración de sedimento en las capas superiores son pequeñas; en cambio, para tamaño de grano pequeño en flujos más rápidos (valor de $v_{ss} / \beta \kappa u_*$ chico) se obtendrá una concentración más homogénea en toda la columna de agua (mayor concentración de MPS cerca de la superficie) (Figura 2):

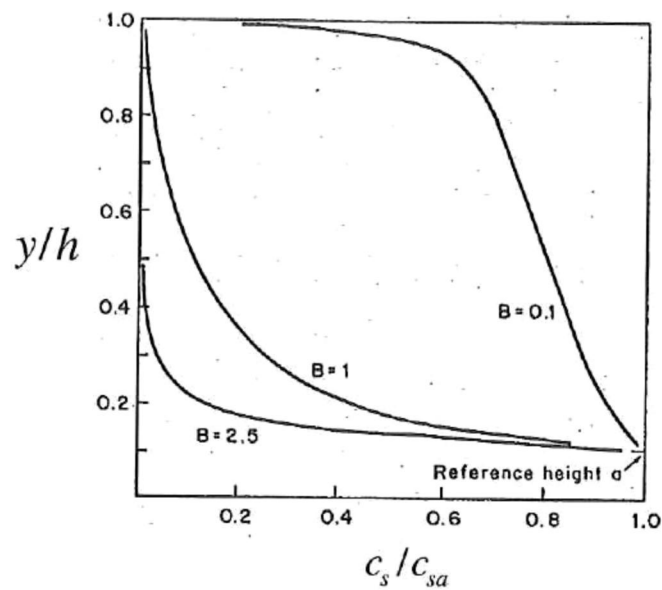


Figura 2. Perfiles adimensionales de concentración de sedimento calculados de la ecuación de Rouse variando los valores de $B = v_{ss} / \beta \kappa u_*$ (tomado de Dyer, 1986).

Otras suposiciones que hace el modelo de Rouse son las siguientes: 1) existe una distribución vertical lineal del esfuerzo de corte tangencial horizontal de la corriente de marea, 2) no existe entrada y salida de masa o momentum al sistema y 3) no existen velocidades verticales. En el caso de la aplicación de este modelo para este estudio, se asumió que $\beta = 1$ y $\kappa = 0.4$, de acuerdo con el modelo original. El valor de β implica que los coeficientes de difusión de momentum (partículas de agua) y de las partículas de MPS son iguales en toda la columna de agua. Sin embargo, Graf y Cellino (2002) encontraron que el coeficiente de difusión de momentum es mayor que el del sedimento en la zona cercana al fondo, y que estos valores comienzan a asemejarse conforme se incrementa la altura sobre el fondo. La conclusión a la que llegaron estos autores es que cuando el fondo presenta formas sedimentarias (ej. rizaduras) el valor de $\beta > 1$ (1.116), mientras que cuando no presenta formas sedimentarias el valor de $\beta < 1$ (0.568).

Con lo que respecta al valor de la constante de von Karman, en trabajos como el de Gross y Nowell (1983), Kineke y Sternberg (1989), Clarke y Elliott (1998) y Graf y Cellino (2002) se ha utilizado el valor de 0.4 para κ . La mayoría de los estudios previos sobre κ se avocan a interpretar los cambios en el gradiente de velocidad con la reducción del valor del coeficiente de von Karman al incrementarse la concentración de sedimento (Cao y Egashira, 1999). En comparación al valor de 0.41 utilizado en flujos uniformes en canales abiertos, Onizuka y Nezu (1999) afirman en su trabajo que el valor de la constante de von Karman decrece en el proceso de difusión (0.33) y crece en el proceso de advección (0.46), mientras que Dyer (1986) expresa que

mientras la concentración de sedimento en la columna de agua se incrementa, el valor de κ decrece alcanzando valores de ~ 0.2 . Los valores de velocidad friccional (u_*) fueron calculados a partir de la relación conocida como “Ley de la Pared” (Alvarez, comunicación personal)*, la cual proporciona una conexión entre la hidrodinámica cercana al fondo y el flujo promedio. Teniendo los valores de la velocidad promedio de los valores cercanos al fondo del perfil logarítmico de la velocidad, la relación entre el perfil de la velocidad y u_* se encuentra dada por la ecuación:

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (8)$$

donde U es la velocidad media de los valores cercanos al fondo del perfil logarítmico de la velocidad (m/s), u_* es la velocidad friccional (m/s), κ es la constante de Von Karman, z es la distancia sobre el fondo y z_0 es la escala de longitud de la rugosidad del fondo (m). Mediante un ajuste se estima $\frac{u_*}{\kappa}$ por el método de cuadrados mínimos, y se obtiene por último el valor de u_* despejando esta relación asumiendo que el valor de κ es de 0.4. Los valores de u_* variaron con un máximo de 0.365 m/s y un mínimo de 0.0005 m/s para las mediciones durante mareas vivas, con una media en toda la serie de 0.019 m/s; en cambio, para mareas muertas se presentó un máximo de 0.02 m/s y un mínimo de 0.0004 m/s, con una media de 0.0078 m/s (Alvarez, comunicación personal)*.

*Departamento de Oceanografía Física, CICESE, Ensenada, B.C., México 22860

2.5 Tratamiento de datos

Se usaron los datos de concentración de MPS de la estación W3 (en forma de voltaje vs. presión) medidos por un sensor de retroesparcimiento óptico (SRO) y el CTD. Se procedió a transformarlos a concentración de material particulado en suspensión (MPS) en unidades de mg/l por medio de la ecuación procedente de una calibración de el SRO con muestras tomadas en el área de estudio (Alvarez, 2003):

$$\text{concentración}(mg / l) = 3.44 + 16.03V \quad (9)$$

para luego transformarlos a unidades de kg/m³. Los datos de presión tomados por el sensor se transformaron a altura sobre el fondo (de acuerdo a la formulación del perfil de Rouse). Se sumaron 0.13 m a las alturas sobre el fondo por compensación a la altura sobre la cual el sensor de presión tomó los datos y se ajustaron las alturas máximas sobre el fondo de cada perfil de concentración de MPS al nivel de mareas prevaleciente en la zona de estudio. En la Figura 3 se muestran dos ejemplos de los perfiles de concentración de MPS corregidos, uno durante mareas vivas y otro durante mareas muertas:

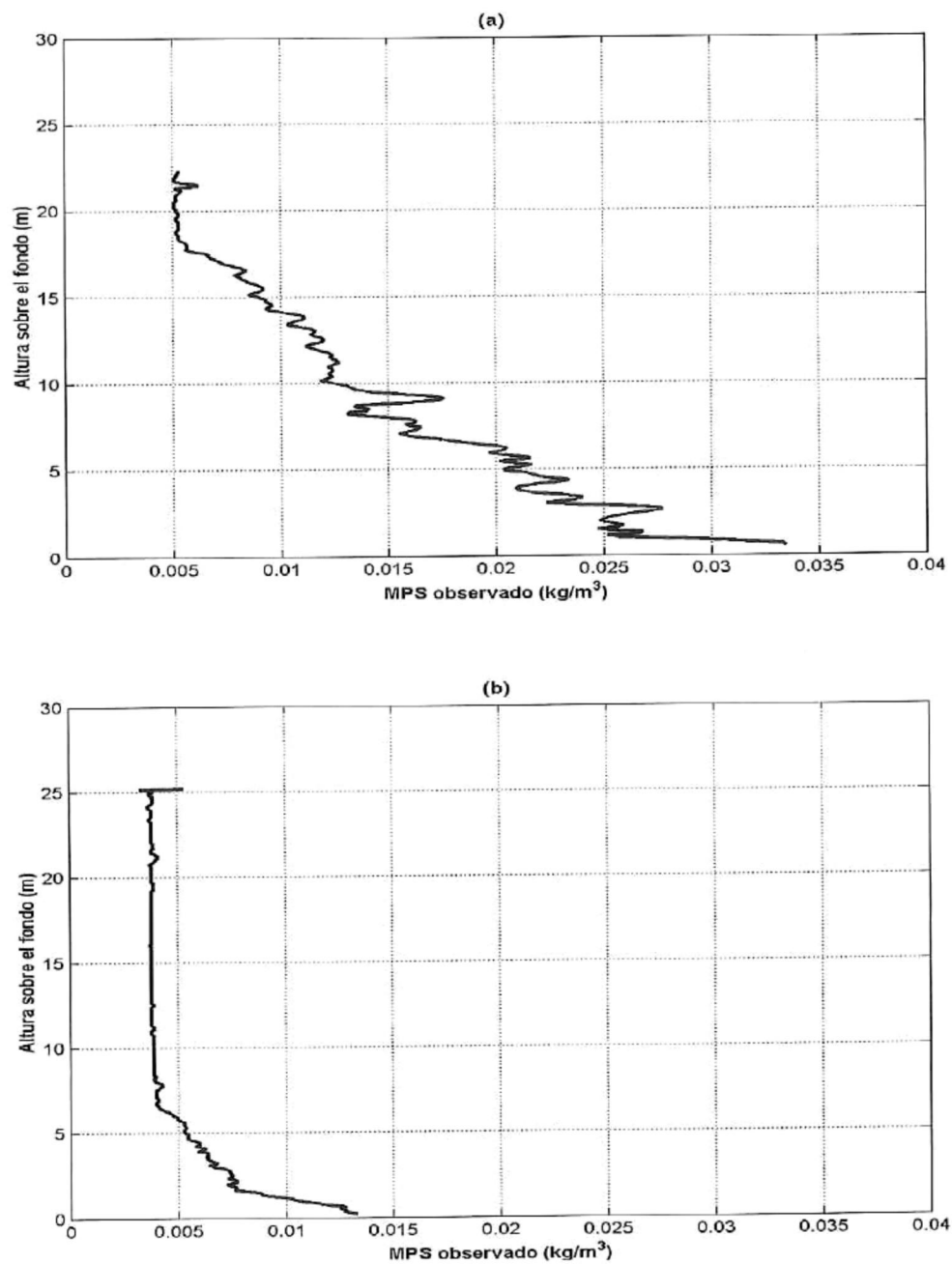


Figura 3. Ejemplo de perfiles de concentración de MPS observados durante (a) mareas vivas (8:25hrs, 28/05/2002) y (b) mareas muertas (19:00hrs, 02/06/2002).

Para ajustar el modelo de Rouse a los perfiles observados se hizo variar el valor del número de Rouse B . Esto se hace debido a que se tienen todos los valores de los parámetros necesarios para su cálculo con excepción de los valores de velocidad de asentamiento v_{ss} , el cual es difícil de obtener debido a la complejidad de su medición. Así, variando los valores totales de B se tratan de ajustar también los valores de v_{ss} a los perfiles de concentración observados.

En primera instancia, se utilizó un método de aproximación por cuadrados mínimos mediante la linealización de la ecuación de Rouse, esto es, se logaritmiciza la ecuación (6) para tener una ecuación de la forma $y=b+mx$:

$$\ln c_s = \ln c_{sa} + \frac{v_{ss}}{\beta \kappa u_*} \ln \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right) \quad (10)$$

de esta manera, al tener los datos de concentración de MPS originales y los datos de la altura total de la columna de agua (h) y concentración de referencia (a) (parámetro de Rouse), se realizaron figuras en las que se graficaban el logaritmo natural de la concentración de MPS observado vs. el logaritmo natural del valor de parámetro de Rouse. Así se lograron gráficos a los cuales se les realizó una regresión lineal para obtener el mejor ajuste por cuadrados mínimos y la ecuación de la recta que mostraba la pendiente de la misma, así como el valor de R^2 . Lo interesante de este

procedimiento es que el valor de la pendiente ($m = \frac{v_{ss}}{\beta \kappa u}$) es el mejor valor ajustado

del modelo de Rouse al perfil real por el método de regresión lineal (Figura 4):

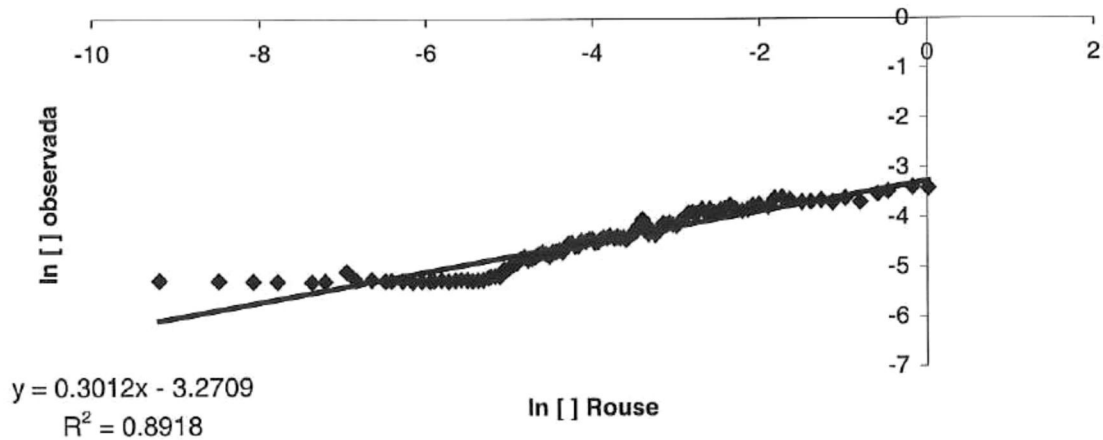


Figura 4. Ejemplo de regresión por mínimos cuadrados para una muestra durante la serie de MV entre el logaritmo natural de concentraciones de MPS calculados a partir del perfil de Rouse vs. logaritmo natural de las concentraciones observadas. El valor de la pendiente de la ecuación de la recta obtenido por la regresión es el valor óptimo del número de Rouse B .

En esencia este método resulta muy práctico para encontrar de manera rápida y efectiva los valores de B y por ende los de v_{ss} que mejor ajustan el modelo a la realidad. Sin embargo, a la hora de realizar la cuantificación de MPS (área bajo la curva) comparando el área total del modelo y el perfil real, se encontró que en partes de ambas series de tiempo los valores del modelo sí se aproximaban mucho a los valores de concentración de MPS del perfil observado, pero en otras partes de la serie discrepaban en gran medida de los valores reales de concentración de MPS. Se

encontró que estas discrepancias se encontraban relacionadas con la tendencia de los valores de u_* . Cuando los valores de u_* son máximos, ya sean positivos o negativos, los valores de B proporcionados por el ajuste por cuadrados mínimos se ajusta bien cuantitativamente, pero cuando los valores de u_* son pequeños los valores de concentración de MPS dados por el ajuste por cuadrados mínimos son muy diferentes cuantitativamente a los observados ($\pm 30\%$ en promedio de la concentración de MPS observada).

Por esta razón, se optó por analizar los datos con otro método más que brindara un valor de B que se ajustara mejor cuantitativamente en toda la serie de tiempo. El método de diferencia cuadrática media (DCM) consiste en minimizar las desviaciones entre los valores de la concentración de MPS del perfil observado y del perfil de Rouse a un mismo nivel de altura sobre el fondo. Esto se logra calculando perfiles de Rouse iterando a diferentes valores de B , con un intervalo entre $B=0.1$ hasta $B=1$ con un incremento de 0.01:

$$DCM = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - Co_i)^2}{n} \quad (11)$$

donde R_i es el valor de concentración proporcionado por el perfil de Rouse, Co_i es el valor de la concentración observada y n es el número total de datos. El valor más

pequeño de DCM una vez hecha la iteración del valor de B es considerado el mejor ajuste del perfil de Rouse al perfil de datos observados.

Una vez calculados los perfiles de Rouse para ambas series de tiempo, se obtuvo la concentración total en la columna de agua (kg/m^2) integrando numéricamente el área bajo la curva de los perfiles modelo y observado. Se trató de obtener una expresión analítica que se ajustara al comportamiento del modelo, pero se llegaron a expresiones matemáticas que solamente tienen una solución numérica, o que en dado caso se pueden resolver utilizando series de potencias (ej. series de Taylor). Se optó entonces por integrar verticalmente en forma numérica utilizando un Δy de 0.1m para obtener una buena aproximación al valor del área total bajo la curva. Se obtuvieron concentraciones totales en unidades de kg/m^2 para los muestreos observados en MV y MM y los perfiles calculados a partir de la ecuación de Rouse. Se cuantificó además la cantidad de MPS promedio en la columna de agua (kg/m^3) con las concentraciones observadas y las del perfil de Rouse.

3. Resultados

Se encontró una mayor concentración de MPS en los niveles más cercanos al fondo. Durante MV, se encontró un máximo de concentración de MPS cerca del fondo de 0.058 kg/m^3 (58 mg/l) y un mínimo de 0.012 kg/m^3 (12 mg/l), con un promedio de 0.03 kg/m^3 (30 mg/l). Para el caso de MM, se encontró un máximo de MPS cerca del fondo de 0.023 kg/m^3 (23 mg/l) y un mínimo de 0.007 kg/m^3 (7 mg/l), con un promedio durante la serie de 0.011 kg/m^3 (11 mg/l). Con respecto a las concentraciones de MPS en la superficie durante el muestreo en mareas vivas, se encontró un máximo de 0.0053 kg/m^3 (5.3 mg/l) y un mínimo de 0.0036 kg/m^3 (3.6 mg/l), con un promedio de 0.0044 kg/m^3 (4.4 mg/l). Durante mareas muertas se encontró un máximo de concentración de MPS superficial de 0.0053 kg/m^3 (5.3 mg/l) y un mínimo de 0.0032 kg/m^3 (3.2 mg/l), con un promedio de 0.0038 kg/m^3 (3.8 mg/l).

Las concentraciones de MPS integrado y promediado proporcionadas por el perfil de Rouse difieren con las concentraciones de MPS observadas $\pm 4.6\%$ en promedio durante la serie de mareas vivas, mientras que durante la serie de mareas muertas el porcentaje de diferencia entre la concentración de MPS observado y calculado por el modelo es de $\pm 5.8\%$.

La Tabla I muestra las comparaciones entre las medias de los valores de las concentraciones de MPS integradas verticalmente observadas y calculadas a partir de la ecuación de Rouse para MV y MM, donde se incluye además la media de la concentración de MPS integrada extrapolando el perfil de Rouse hasta 0.1 m sobre el

fondo. Muestra también la media de los valores del porcentaje de varianza explicada por el modelo de Rouse (R^2) que se obtuvieron al realizar una regresión entre los valores de concentración de MPS integrada observada y calculada por el modelo de Rouse, así como la media y la mediana del valor de v_{ss} obtenidos a partir del modelo de Rouse. La Tabla II muestra las concentraciones medias promediadas de MPS en el total de la columna de agua (kg/m^3) calculadas para las observaciones y para los perfiles de Rouse para MV y MM, además de la concentración de MPS promedio del perfil de Rouse extrapolada hasta 0.1 m sobre el fondo.

Tabla I. Concentración integrada promedio observada y calculada con el modelo de Rouse y desviación estándar, concentración media integrada hasta 0.1 m sobre el fondo, porcentaje de varianza (R^2) explicada por el modelo de Rouse y velocidad de asentamiento media y mediana para MV y MM.

Serie de tiempo	Altura media de la columna de agua (m)	Altura media mínima de observación sobre el fondo (m)	Concentración media integrada observada y desviación estándar (kg/m^3)	Concentración media integrada Rouse y desviación estándar (kg/m^3)	Concentración media integrada hasta 0.1m sobre el fondo (m)	R^2 media	v_{ss} media (mm/s)	Mediana de v_{ss} (mm/s)
MV	25	0.64	0.2537 0.0579	0.2525 0.0589	0.2764	0.90	2.5	1.7
MM	24.5	1.28	0.1218 0.0121	0.1275 0.0118	0.1485	0.77	0.73	0.60

Tabla II. Promedio temporal de las concentraciones promediadas en la vertical observada y calculada con el modelo de Rouse y concentración promedio calculada hasta 0.1 m sobre el fondo para MV y MM.

Serie de tiempo	Altura media total de la columna de agua (m)	Concentración media promediada observada (kg/m^3)	Concentración media promediada Rouse (kg/m^3)	Concentración media promediada hasta 0.1m sobre el fondo (kg/m^3)
MV	24.40	0.0105	0.0104	0.0112
MM	23.22	0.0053	0.0055	0.0061

Para la obtención de los valores de la desviación estándar de la concentración de MPS integrada observada y calculada con el modelo de Rouse durante MV, se utilizaron sólo las concentraciones de MPS dentro de un ciclo de resuspensión, el cual figuró entre las 10:00 hrs y las 16:30 hrs (hora local 105° WG). El total de los datos de concentración de MPS observada y calculada con el perfil de Rouse se encuentra en las Tablas III, IV, V y VI del Anexo I (Anexos), mientras que la variación gráfica entre la concentración de MPS observada y la calculada por el perfil de Rouse se encuentra en el Anexo II para MV y Anexo III para MM.

Las Figuras 5 y 6 muestran la relación entre la variación de la marea y los valores de u_* y la variación de la concentración del MPS integrado observado y calculado a partir del perfil de Rouse para MV y MM respectivamente, mientras que las Figuras 7 y 8 muestran la concentración de MPS promediado observado y calculado a partir del perfil de Rouse para MV y MM respectivamente:

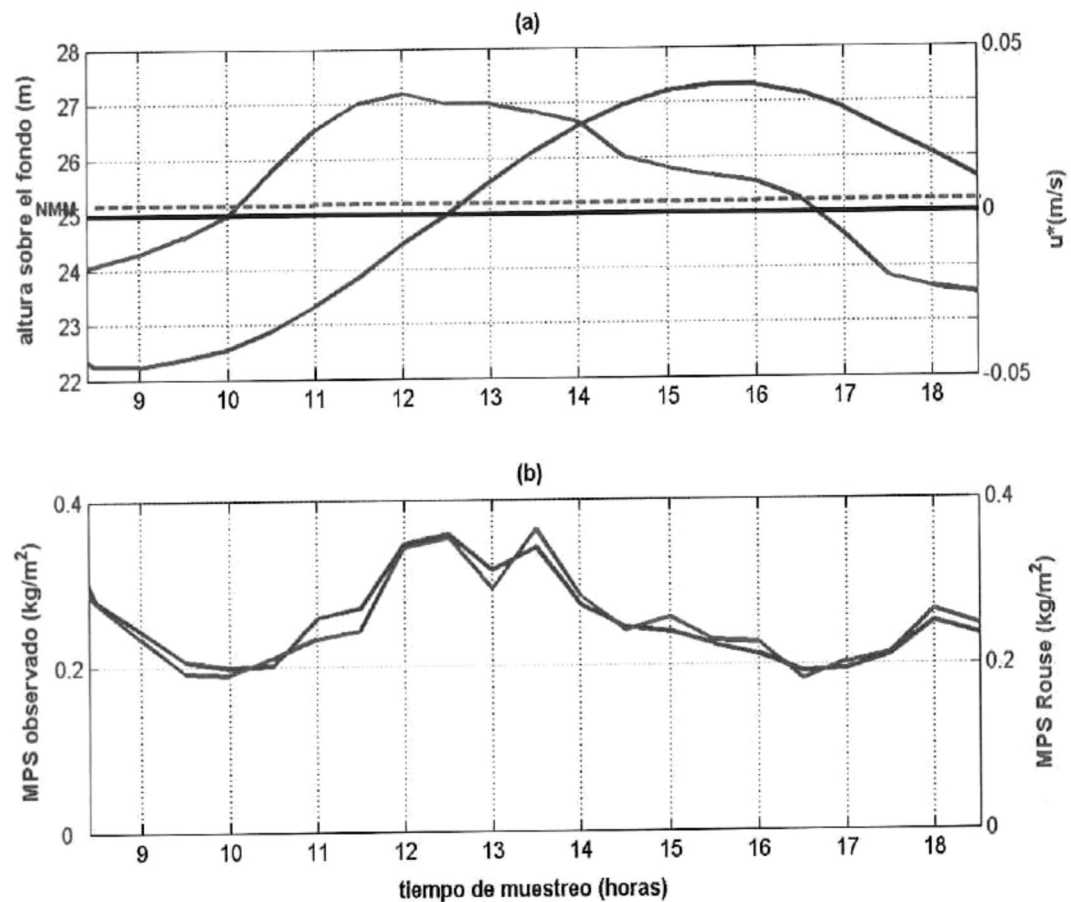


Figura 5. (a) Variación de la marea (azul) y de la velocidad friccional (u_*) (verde) durante la serie de tiempo de mareas vivas (28/05/2002), la línea punteada indica el nivel medio de marea, (b) variación de la concentración de MPS integrado en la vertical observado (azul) y calculado a partir del perfil de Rouse (verde).

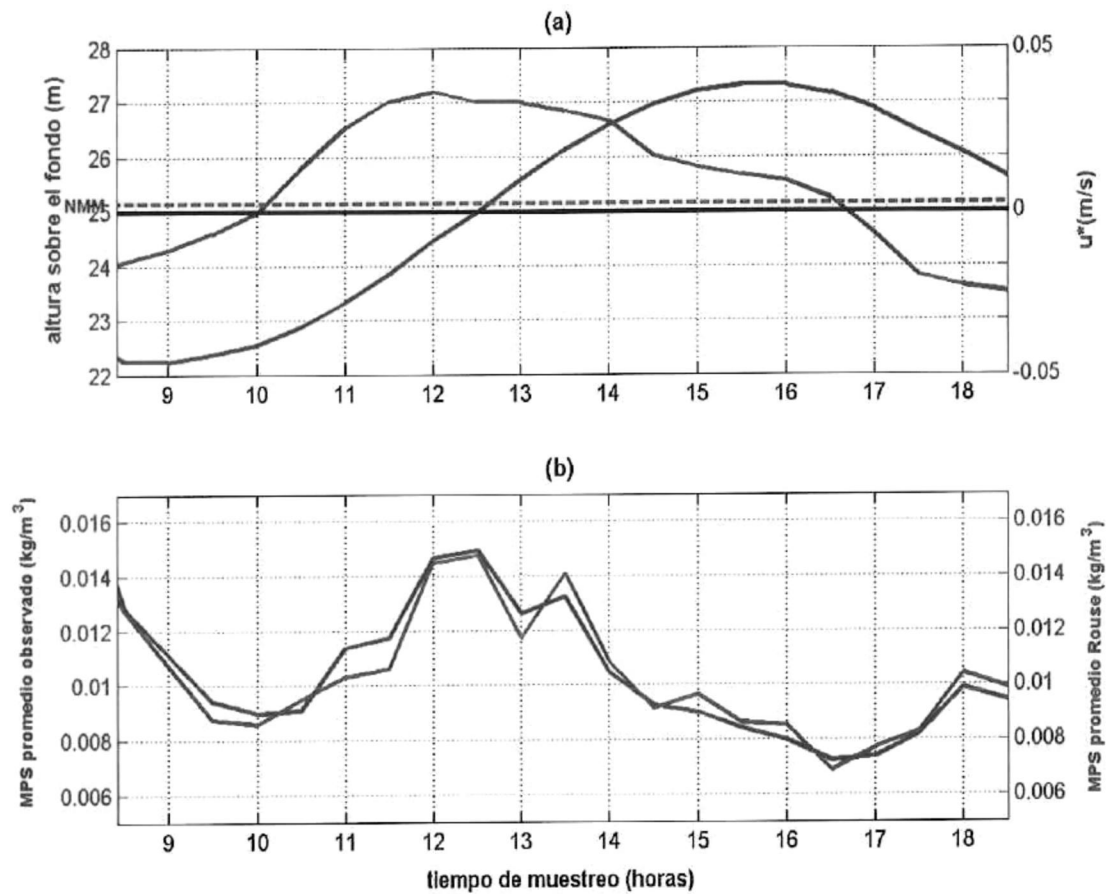


Figura 6. (a) Variación de la marea (azul) y de la velocidad friccional (u_*) (verde) durante la serie de tiempo de mareas vivas (28/05/2002), la línea punteada indica el nivel medio de marea, (b) variación de la concentración de MPS promediado en la vertical observado (azul) y calculado a partir del perfil de Rouse (verde).

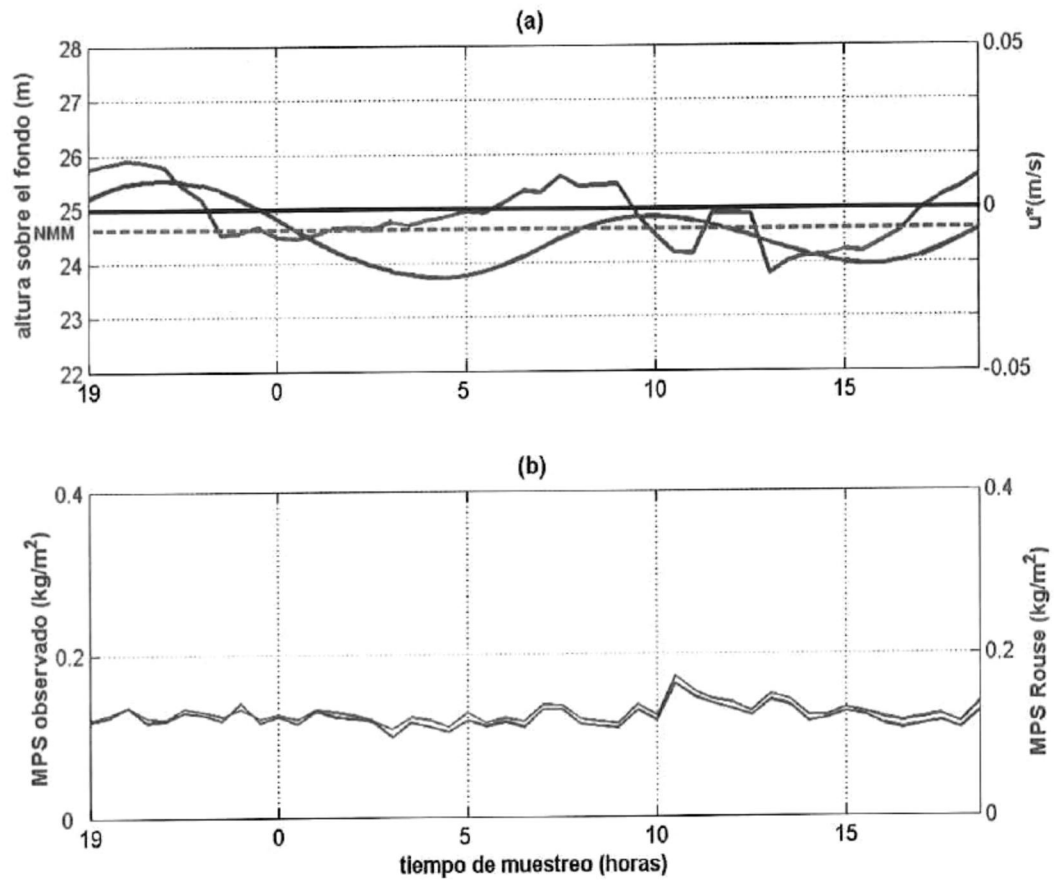


Figura 7. (a) Variación de la marea (azul) y de la velocidad friccional (u_*) (verde) durante la serie de tiempo de mareas muertas (02/06/2002 – 03/06/2002), la línea punteada indica el nivel medio de marea, (b) variación de la concentración de MPS integrado en la vertical observado (azul) y calculado a partir del perfil de Rouse (verde).

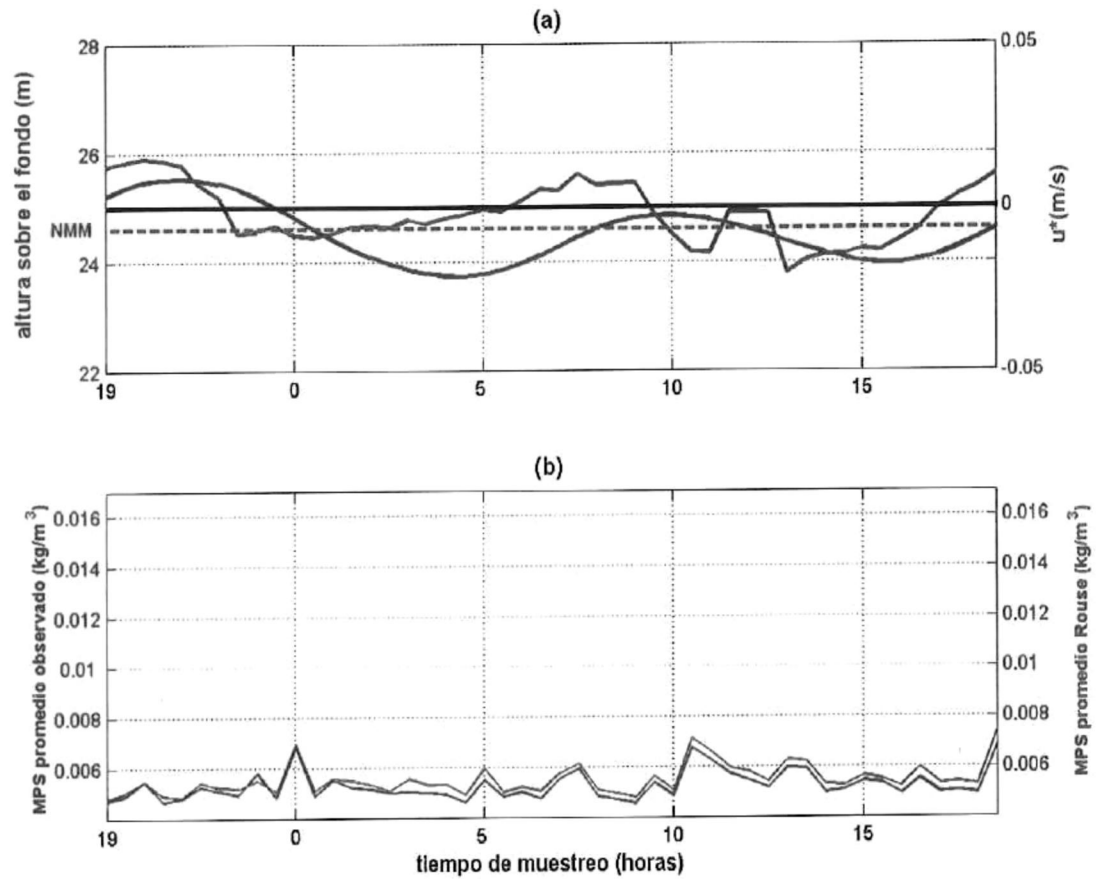


Figura 8. (a) Variación de la marea (azul) y de la velocidad friccional (u_*) (verde) durante la serie de tiempo de mareas muertas (02/06/2002 – 03/06/2002), la línea punteada indica el nivel medio de marea, (b) variación de la concentración de MPS promediado en la columna de agua observado (azul) y calculado a partir del perfil de Rouse (verde).

Las Figuras 5 y 6 muestran la dependencia entre la magnitud de la concentración de MPS en la columna de agua y u_* . Esta dependencia se presenta marcadamente durante mareas vivas donde los valores de u_* son más grandes, aún cuando la serie de tiempo es corta. Los máximos de MPS integrado y promediado coinciden con los máximos valores de u_* , así como los mínimos valores de MPS de ambas figuras coinciden con los valores de u_* cercanos a cero.

Para el caso de las Figuras 7 y 8 no se observa una dependencia tan clara entre la concentración de MPS y la intensidad de u_* , pero sí se manifiestan períodos de la serie donde se acentúa esta dependencia con mayor claridad (ej. Figura 7, 10:30 hrs). Cabe mencionar que sólo el 60% de las mediciones de MPS hechas con el SRO durante mareas muertas llegaron a alturas menores de 1m sobre el fondo, el 27% de las mediciones alcanzaron entre 1 m y 3 m sobre el fondo y el 8% superó los 3 m de altura sobre el fondo; en cambio durante mareas vivas el porcentaje de mediciones que no superaron el metro de altura sobre el fondo fue de 95%. Esto implica que las mediciones de concentración de MPS integrada y promediada durante mareas muertas no fueron tan semejantes en altura de columna de agua como lo fueron durante mareas vivas.

Los perfiles de concentración de MPS en la serie durante MM muestran una capa entre superficie y ~15 m de profundidad en la columna de agua donde la concentración de MPS prácticamente no cambió (Figura 3(b)), con un rango de concentración de MPS de entre 0.0032 kg/m³ y 0.005 kg/m³. El espesor de esta capa tuvo un máximo de

20 m a las 4:30 hrs del 02/06/2002 y a las 12:30 hrs del 03/06/2002 y un mínimo de 7 m a las 18:30 hrs del 03/06/2002 y de 8 m a las 0:00hrs del 02/06/2002 y a las 7:30hrs del 03/06/2002. El promedio del espesor de esta capa durante todo el muestreo fue de 15.16 m. En el caso de las observaciones durante mareas vivas, el espesor de la capa entre el rango determinado durante mareas muertas es de 6 m en promedio (Figura 3(a)). Las variaciones horizontales de MPS en la vertical estuvieron más definidas durante esta serie, mientras que durante los muestreos en mareas muertas la capa se presenta más homogénea en la vertical.

Para conocer qué tan parecidos son los valores obtenidos de MPS observado y calculado a partir del perfil de Rouse, se calculó la relación entre concentración de MPS observado y calculado por el perfil de Rouse en forma integrada y promediada en la columna de agua para las series de mareas vivas y mareas muertas. Los resultados de las regresiones por cuadrados mínimos se muestran en las Figuras 9 a 12:

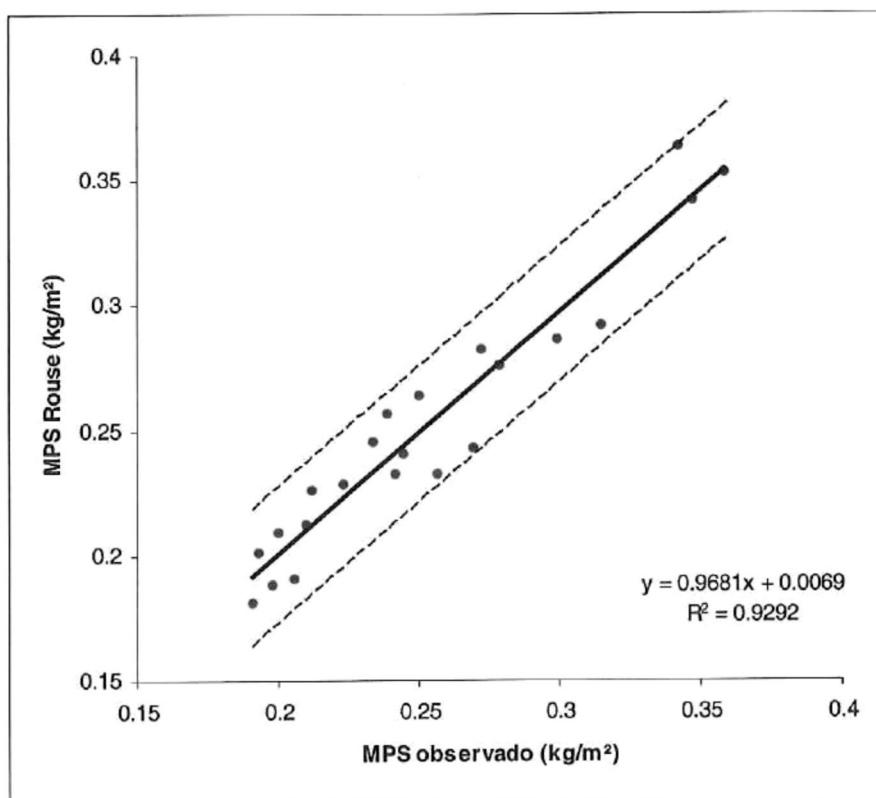


Figura 9. Relación entre las concentraciones de MPS observado y calculado a partir del perfil de Rouse para la serie de tiempo de mareas vivas (28/05/2002), los valores corresponden a las cantidades integradas en la columna de agua. Las líneas punteadas muestran el intervalo de confianza al 95%. Se muestra la ecuación obtenida por análisis de regresión por mínimos cuadrados y el porcentaje de varianza (R^2) explicada por el modelo.

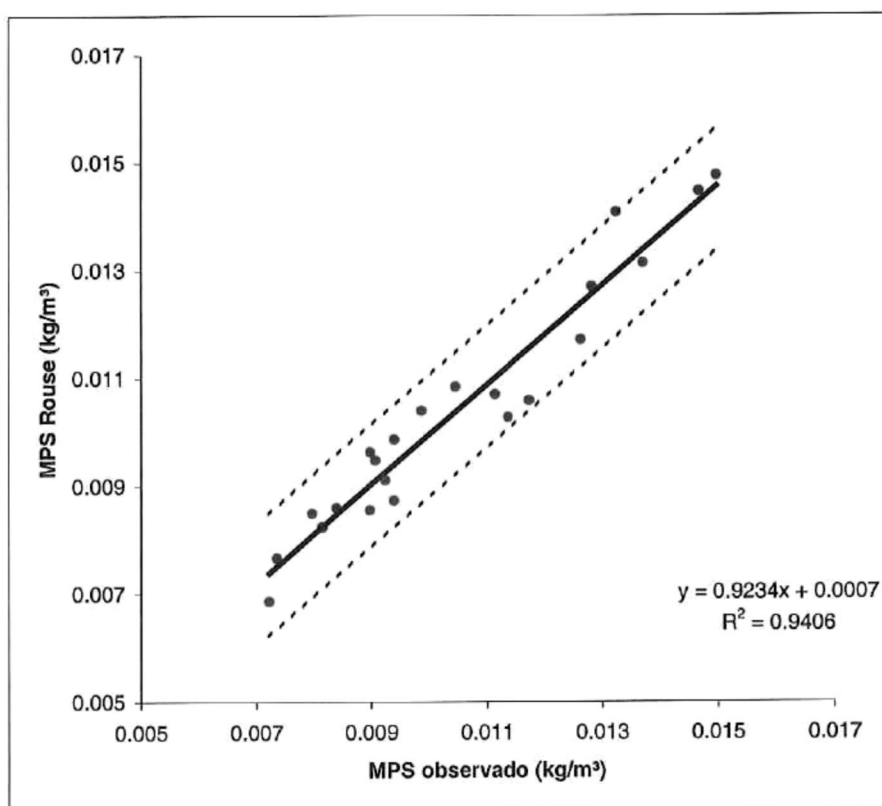


Figura 10. Relación entre las concentraciones de MPS observado y calculado a partir del perfil de Rouse para la serie de tiempo de mareas vivas (28/05/2002), los valores corresponden a las cantidades promediadas en la columna de agua. Las líneas punteadas muestran el intervalo de confianza al 95%. Se muestra la ecuación obtenida por análisis de regresión por mínimos cuadrados y el porcentaje de varianza (R^2) explicada por el modelo.

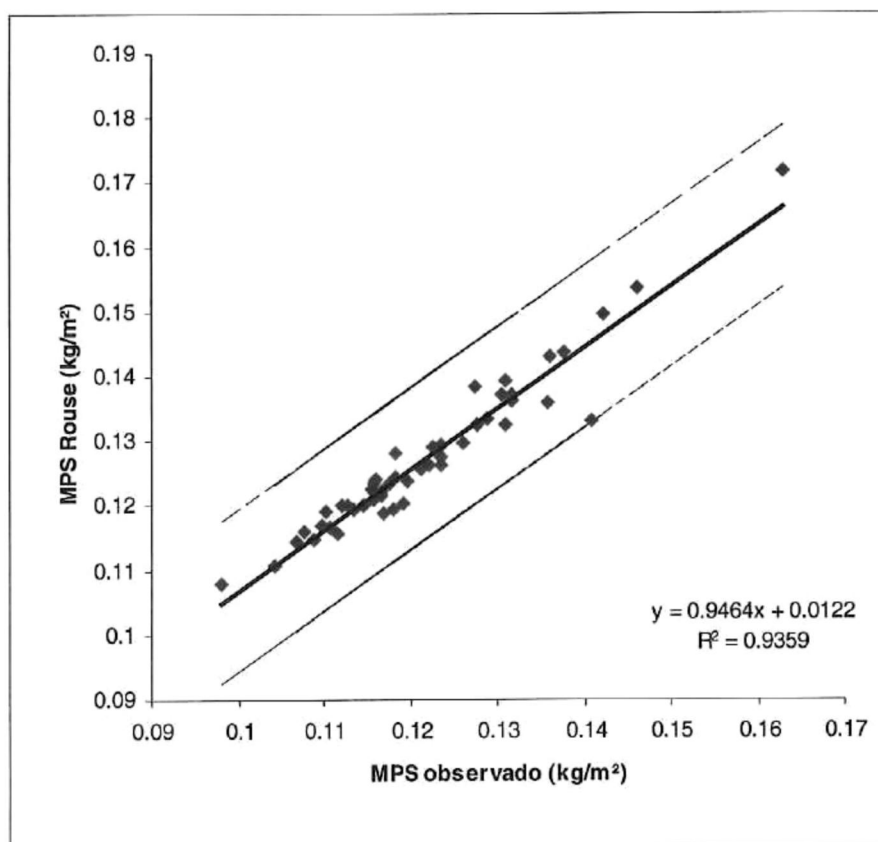


Figura 11. Relación entre las concentraciones de MPS observado y calculado a partir del perfil de Rouse para la serie de tiempo de mareas muertas (02/06/2002-03/06/2002), los valores corresponden a las cantidades integradas en la columna de agua. Las líneas punteadas muestran el intervalo de confianza al 95%. Se muestra la ecuación obtenida por análisis de regresión por mínimos cuadrados y el porcentaje de varianza (R^2) explicada por el modelo.

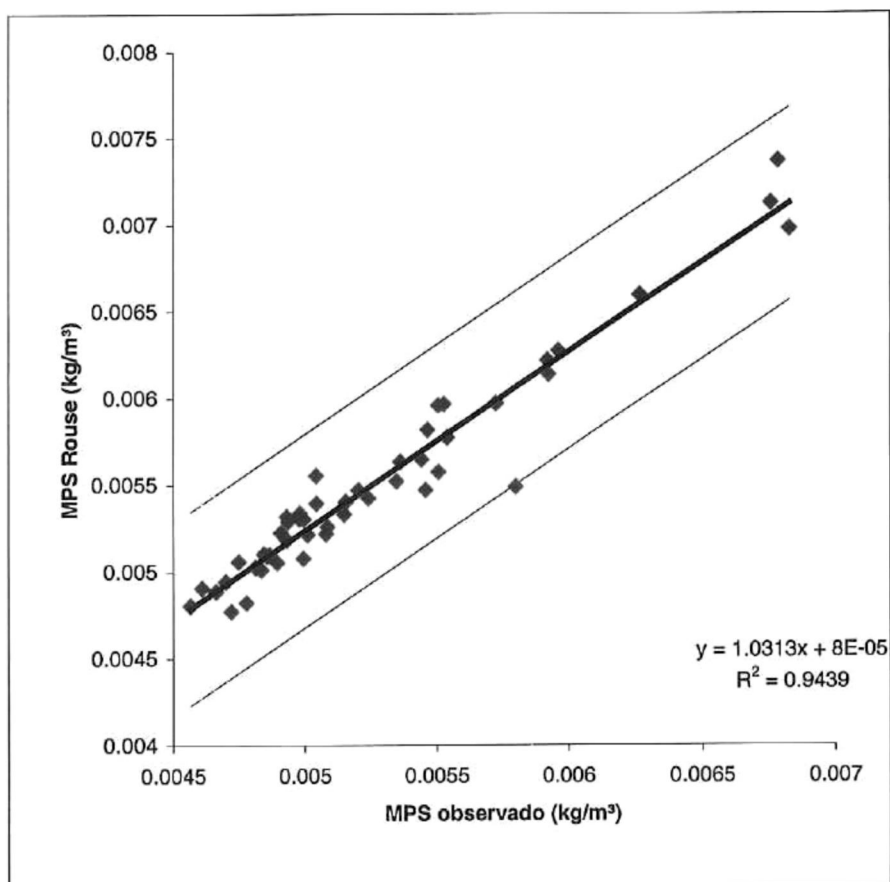


Figura 12. Relación entre las concentraciones de MPS observado y calculado a partir del perfil de Rouse para la serie de tiempo de mareas muertas (02/06/2002-03/06/2002), los valores corresponden a las cantidades promediadas en la columna de agua. Las líneas punteadas muestran el intervalo de confianza al 95%. Se muestra la ecuación obtenida por análisis de regresión por mínimos cuadrados y el porcentaje de varianza (R^2) explicada por el modelo.

El análisis de regresión por cuadrados mínimos aplicado a la relación entre los valores de concentración de MPS observada y calculada a partir del perfil de Rouse (Figuras 9 a 12) arroja valores de R^2 superiores a 0.92 ($r = 0.96$), lo que implica que el modelo explica al menos el 92% de la varianza de los datos observados, el cual demuestra una alta relación lineal entre las concentraciones de MPS comparadas. El cálculo del intervalo de confianza al 95% se realizó según Hoel (1979).

Para observar los valores obtenidos de velocidad de asentamiento de partículas (v_{ss}) obtenidos a partir del perfil de Rouse y los valores de u_* durante el tiempo de muestreo, se graficaron estas variables para la serie de mareas vivas (Figura 13) y para mareas muertas (Figura 14):

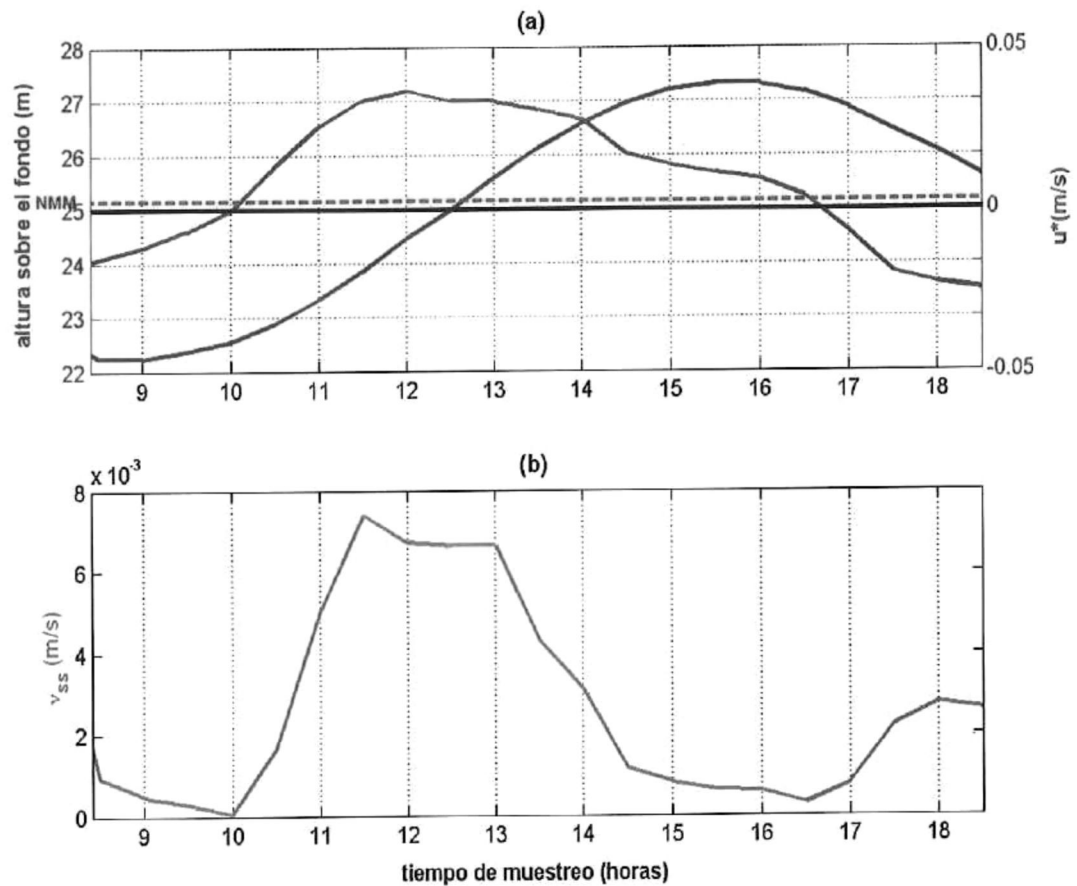


Figura 13. (a) Variación de la marea (azul) y velocidad friccional (u_*) (verde) durante la serie de tiempo de mareas vivas (28/05/2002), la línea punteada indica el nivel medio de marea, (b) variación de la de velocidad de asentamiento (v_{ss}) obtenida con el perfil de Rouse.

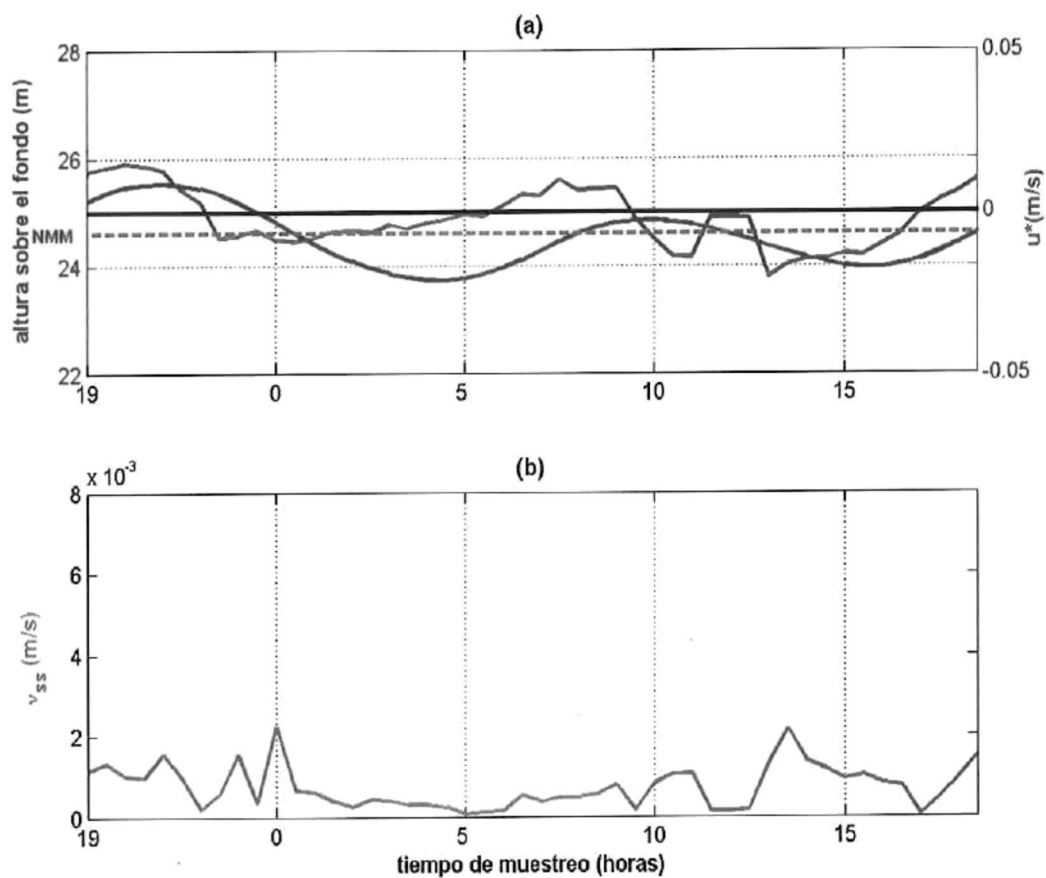


Figura 14. (a) Variación de la marea (azul) y velocidad friccional (u_*) (verde) durante la serie de tiempo de mareas muertas (02/06/2002-03/06/2002), la línea punteada indica el nivel medio de marea, (b) variación de la de velocidad de asentamiento (v_{ss}) obtenida con el perfil de Rouse.

Como se explicó anteriormente, la obtención de los valores de v_{ss} necesarios para realizar el modelo de Rouse no pudieron ser obtenidos en base a mediciones *in situ*, por lo que se derivaron al ajustar estadísticamente el perfil de Rouse al perfil de MPS observado. Es por ello que los valores de v_{ss} son directamente proporcionales a los valores de u_* . Esta proporcionalidad se observa claramente en la Figura 13 (mareas vivas) y en la Figura 14 (mareas muertas).

Las Figuras 15 y 16 muestra la variación de la marea, u_* y la concentración del MPS integrado y promediado de las observaciones y calculado a partir del perfil de Rouse hasta 0.1m sobre el fondo para la series durante MV, mientras que para MM se esta variación se muestra en las Figuras 17 y 18.

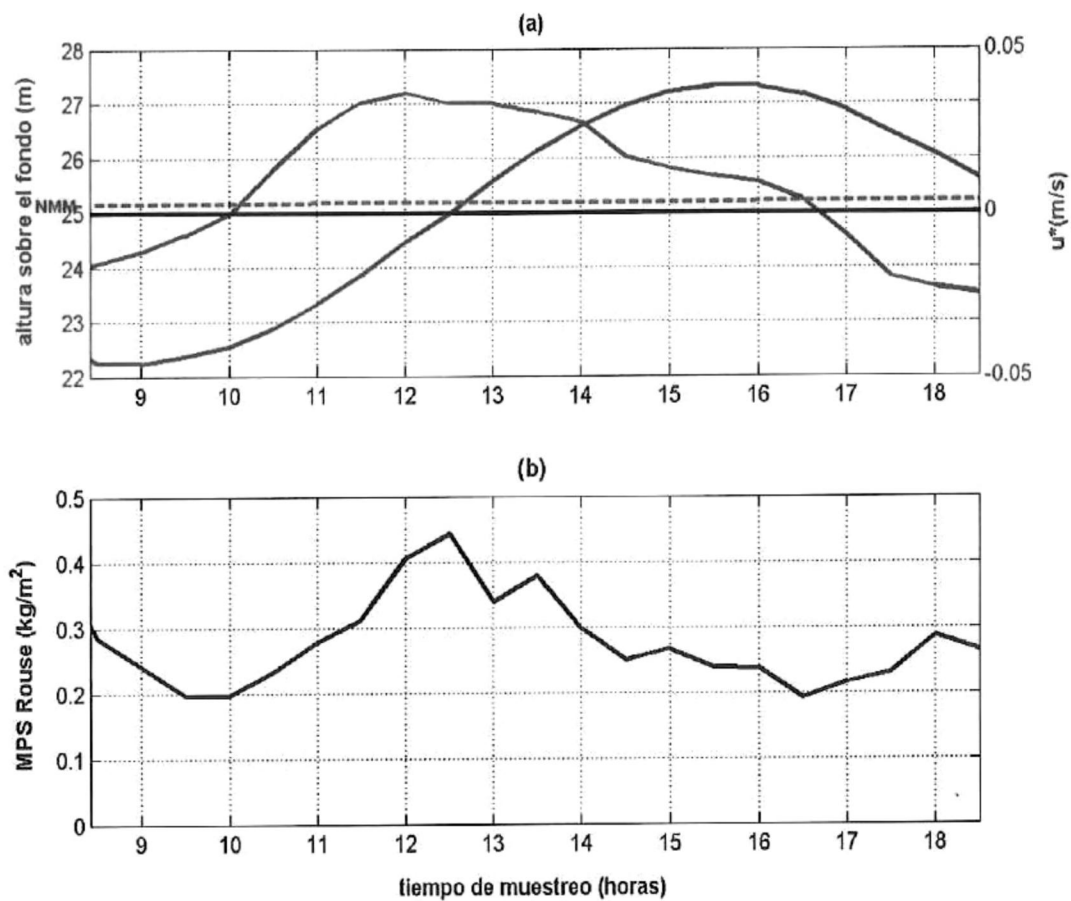


Figura 15. (a) Variación de la marea (azul) y de la velocidad friccional (u_*) (verde) durante la serie de tiempo de mareas vivas (28/05/2002), la línea punteada indica el nivel medio de marea, (b) variación de la concentración de MPS integrado en la vertical hasta 0.1m sobre el fondo calculado a partir del perfil de Rouse.

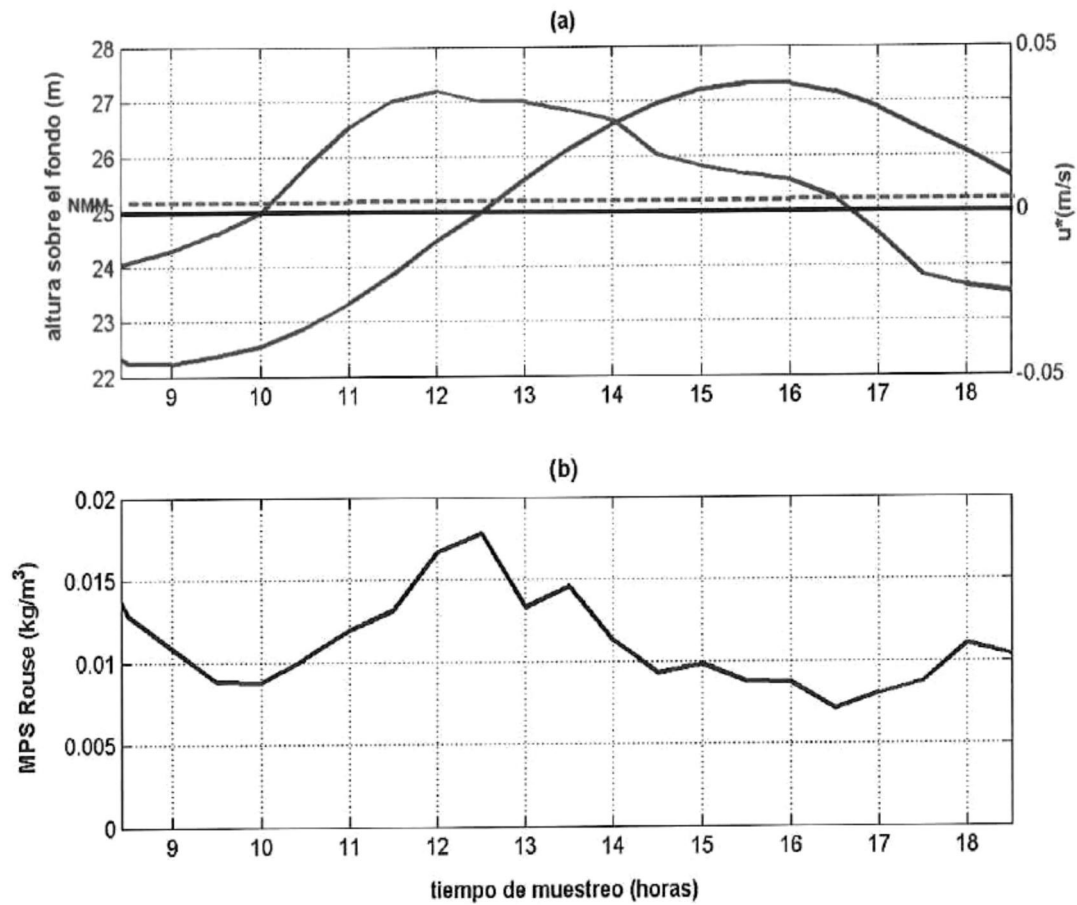


Figura 16. (a) Variación de la marea (azul) y de la velocidad friccional (u_*) (verde) durante la serie de tiempo de mareas vivas (28/05/2002), la línea punteada indica el nivel medio de marea, (b) variación de la concentración de MPS promediado en la vertical hasta 0.1m sobre el fondo calculado a partir del perfil de Rouse.

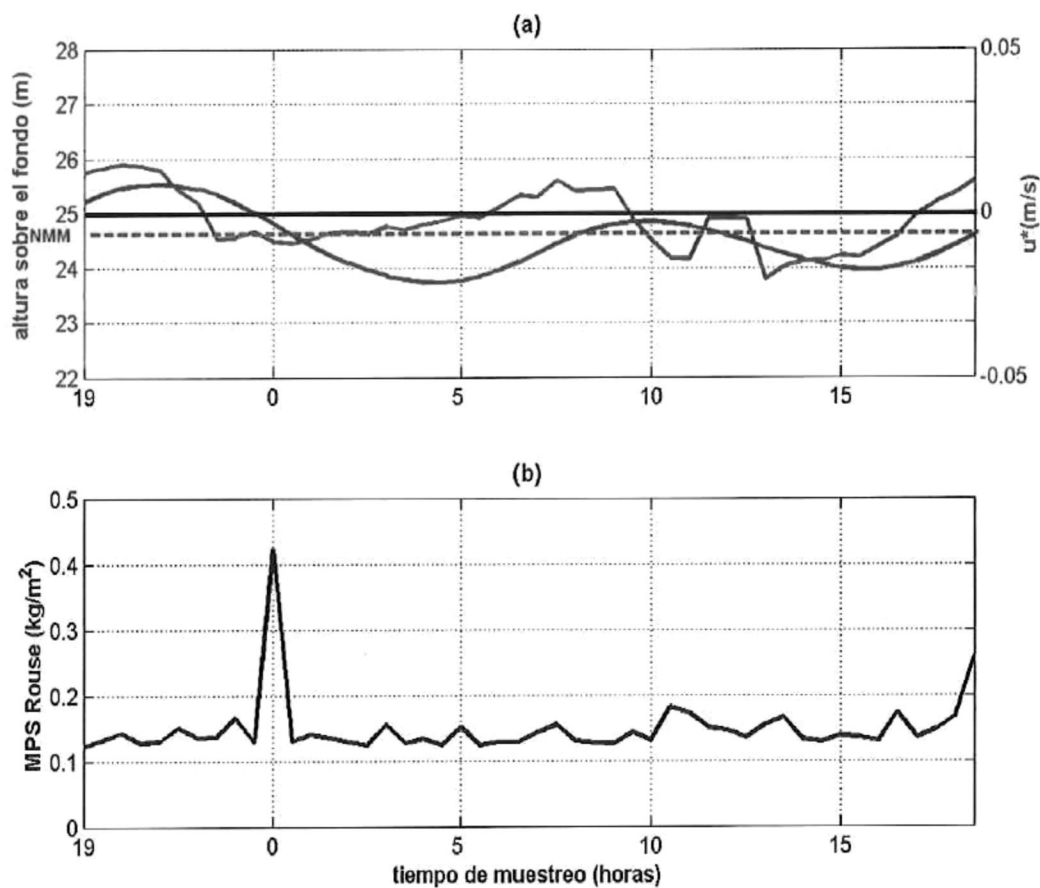


Figura 17. (a) Variación de la marea (azul) y de la velocidad friccional (u_*) (verde) durante la serie de tiempo de mareas muertas (02/06/2002 – 03/06/2002), la línea punteada indica el nivel medio de marea, (b) variación de la concentración de MPS integrado en la vertical hasta 0.1m sobre el fondo calculado a partir del perfil de Rouse.

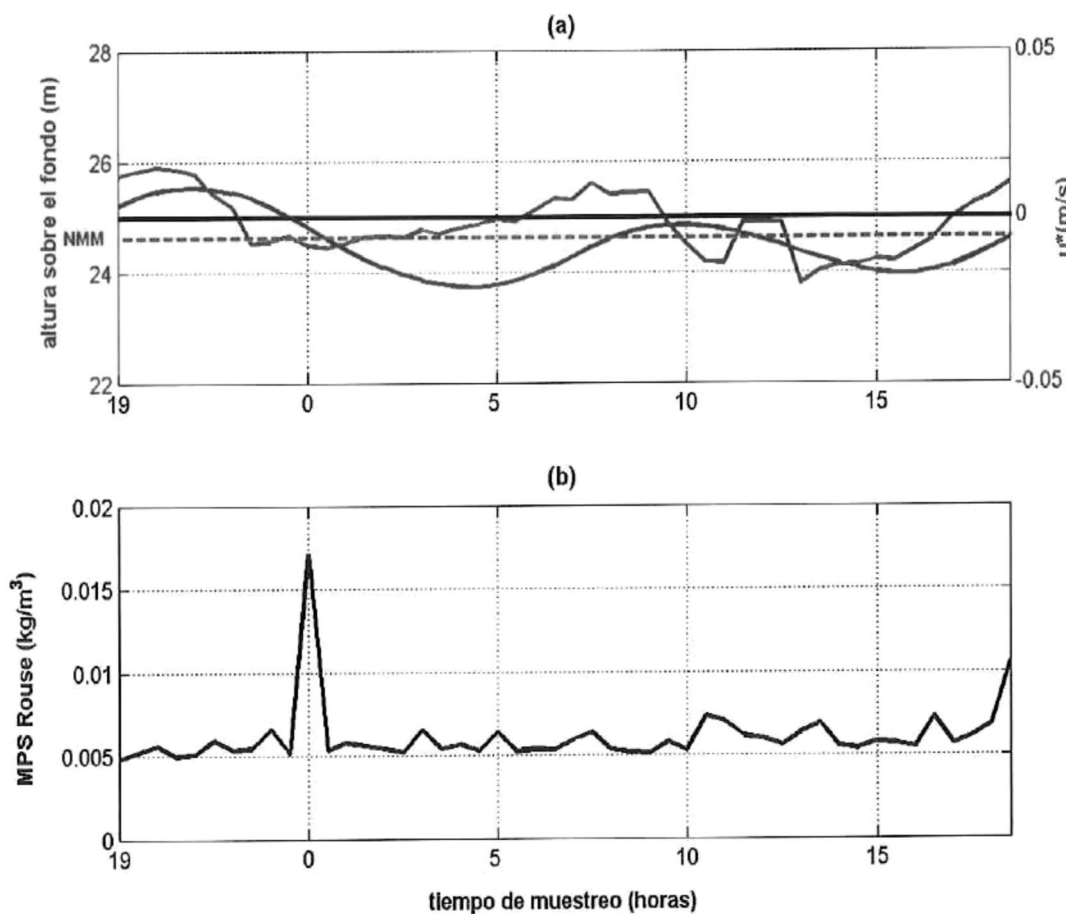


Figura 18. (a) Variación de la marea (azul) y de la velocidad friccional (u_*) (verde) durante la serie de tiempo de mareas muertas (02/06/2002 – 03/06/2002), la línea punteada indica el nivel medio de marea, (b) variación de la concentración de MPS promediado en la vertical hasta 0.1m sobre el fondo calculado a partir del perfil de Rouse.

En las Figuras 15 y 16 se observa un comportamiento muy similar de la concentración de MPS integrada y promediada con respecto a la concentración extrapolada hasta 0.1m sobre el fondo. La proximidad al fondo de la mayoría de las mediciones durante mareas vivas generaron que las concentraciones de MPS extrapoladas por el modelo de Rouse conservaran la misma tendencia a aumentar o disminuir con respecto a u_* . En cambio, la gran variación de la proximidad al fondo de las mediciones hechas durante mareas muertas (Figuras 17 y 18) provoca predicciones de concentración a 0.1m sobre el fondo menos precisas. La combinación de una c_{sa} medida a una altura lejana del fondo (más de 1 m) y el ruido ó variación vertical de la concentración de MPS (ejemplo Figura 3) implica un error adicional a las predicciones del modelo. El caso más representativo de este error se presenta en la concentración extrapolada por el modelo a las 00:00 hrs durante la medición hecha durante mareas muertas, la cual tuvo una altura de medición sobre el fondo de 6.72 m y presenta una concentración integrada de 0.43 kg/m² y promediada de 0.017 kg/m³. El aumento de la concentración de MPS al extrapolar el perfil de Rouse hasta 0.1m sobre el fondo no es significativo a c_{sa} medidas a alturas sobre el fondo pequeñas (entre 0.2 y 1 m), con un aumento en promedio de 15% del total de la concentración de MPS integrada para MV y MM.

4. Discusiones

4.1 Ajuste de modelo de Rouse a perfiles de concentración de MPS observados

La ecuación de Rouse (1936) que calcula un perfil teórico vertical de concentración de MPS se encuentra limitada por una serie de factores como lo son las condiciones estacionarias y unidimensionales, el nulo aporte o salida de material del sistema, la igualdad del coeficiente de difusión del sedimento y de momentum, la homogeneidad en la vertical de la columna de agua y la igualdad del flujo de sedimento por advección al flujo por difusión generado por turbulencia. Aún con estas suposiciones, los números de Rouse B obtenidos fueron adecuados para la cuantificación de la concentración de MPS con una desviación pequeña con respecto a las concentraciones observadas (5.2% en promedio). Dyer (1986) expresa que la ecuación de Rouse describe bien las mediciones de perfiles observados de concentración de sedimento en mediciones experimentales cuando se utiliza el número de Rouse B como parámetro libre.

Los valores de B obtenidos por el ajuste basado en la diferencia cuadrática media (DCM) para MV y MM figuran entre un máximo de ~0.5 y un mínimo de 0.1, con un promedio de 0.27 para MV y de 0.22 para MM. Estos valores comparados con los expuestos en la Figura 2 son clasificados como pequeños, lo que según Dyer (1986), significa que existen tamaños de grano fino dentro de flujos rápidos. Esto coincide con lo expuesto por Thompson (1968), Carriquiry y Sánchez (1999) y Alvarez y Jones (2002b), en cuanto a que los sedimentos de fondo son muy finos y que las velocidades de corrientes de marea son fuertes.

Para la serie de MV, se encontró una v_{ss} con un máximo de 7.3 mm/s y un mínimo de 0.026 mm/s, con una media de 2.5 mm/s, mientras que para la serie de MM se encontró un máximo de 2.236 mm/s y un mínimo de 0.0304 mm/s, con una media de 0.7316 mm/s. Como se observa, la media de v_{ss} de la mediciones durante MV es tres veces mayor a la media generada durante MM, lo cual es consecuencia de que a una mayor velocidad de corriente las partículas que se suspenderán serán de mayor tamaño a las partículas suspendidas por una velocidad menor. Al ser v_{ss} directamente proporcional a los valores de u_* por el método de obtención del modelo de Rouse, se esperaba una variación similar durante las mediciones en MV y MM. El rango de valores de v_{ss} durante series de tiempo relativamente cortas de muestreo demuestra las grandes variaciones de la velocidad de la corriente de marea en períodos cortos de tiempo. Datos citados en Alvarez (2003) para diferentes ambientes marinos muestran rangos de v_{ss} inferidas para agregados por floculación de entre ~0.7 y 2.1 mm/s, mientras que para estuarios donde domina la fuerza de marea la v_{ss} promedio para estos agregados es de ~2 mm/s. Estas cifras concuerdan con los valores promedio de las v_{ss} para MM y MV obtenidos en este trabajo (0.73 mm/s y 2.5 mm/s, respectivamente).

Un factor que tampoco fue posible controlar por las limitaciones en las mediciones fue la determinación de una concentración de referencia c_{sa} más adecuada. Dyer (1986) menciona que al incrementarse rápidamente la concentración de MPS en

dirección al fondo, la altura del nivel de referencia debería ser el límite donde la carga en suspensión se junta con la carga de fondo, aunque sea difícil la precisión de este límite. Este autor menciona otras alternativas para la determinación de la altura de referencia como lo es el establecimiento de la misma a la altura de la rugosidad del fondo. Para lograr un mejor ajuste se necesitan tener datos de concentración de MPS lo más cercano al fondo posible. Para determinar el mejor ajuste a los datos reales se utilizó la c_{sa} más profunda que se logró medir para cada muestreo. Para el caso de los muestreos durante MV las alturas sobre el fondo variaron entre 0.2 m hasta 1.2 m, lo que significa que teóricamente hubo un mejor ajuste perfil de Rouse en los muestreos donde las mediciones estuvieron más cercanas al fondo marino. En cambio, para las mediciones durante mareas muertas la variación de las alturas sobre el fondo fue más amplia, con mínimos de 0.2 m hasta máximos de 6.72 m. Esto significa que en varias mediciones no se consideró material suspendido que se encontraba por debajo de los umbrales de medición; es en esta zona donde la concentración de MPS generalmente aumenta por ser el fondo el principal aportador de material sedimentario a la columna de agua. Por lo tanto existió una subestimación de MPS total en los perfiles observados y por ende una mayor incertidumbre en los perfiles calculados con base en el perfil de Rouse.

Las extrapolaciones hechas por el perfil de Rouse para cuantificar MPS por debajo de la altura de referencia a son más realistas cuando las mediciones se hacen lo más cercanamente al fondo. La sobre-estimación de la concentración de fondo se debe a un perfil ruidoso con oscilaciones verticales notables, como ejemplo se encuentra la sobre-estimación de concentración de MPS integrada y promediada hecha en la

medición correspondiente a las 0:00 hrs durante mareas muertas (Figura 17 y 18). Dyer (1986) menciona que los resultados que presenta el perfil de Rouse son menos precisos en altas concentraciones de sedimento (180mg/l). Esto puede deberse a que el perfil de Rouse se encuentra diseñado para cálculos de concentración de sedimento en suspensión entre la altura de referencia y la superficie. El incremento promedio de la concentración de MPS al extrapolar el perfil de Rouse hasta 0.1m sobre el fondo fue de 15%. Este incremento es poco considerando las limitantes del modelo de Rouse, sin embargo no es posible comprobar esta diferencia porque no existen observaciones realizadas a esta altura en el área de estudio.

4.2. Condiciones hidrodinámicas que afectan el modelaje de los datos observados

El cambio frecuente del sentido y magnitud de las corrientes de marea semidiurnas y la circulación y estratificación de masas de agua por cambios en densidad (Lavín y Sánchez, 1999; Alvarez y Jones, 2002b) provocan que las u_* sean menos exactas. La obtención de u_* se basa en la Ley de la Pared, la cual asume flujos estacionarios y unidimensionales sobre un fondo uniforme, o sea, sin estructuras sedimentarias. En lo que respecta a las estructuras sedimentarias la composición lodoso del fondo hace suponer una rugosidad muy pequeña. Aún en ausencia de las condiciones ideales, se encontró que cuando la velocidad de la corriente de marea es grande la cantidad de MPS suspendida también lo es. Clarke y Elliott (1998) mencionan en su trabajo hecho en el estuario de Firth of Forth, Escocia, que en los datos generados en su área de estudio el tiempo de máxima velocidad de corriente coincidió con una máxima concentración de MPS en la columna de agua. Lavín et al. (1998) observaron que la mezcla vertical en verano es producida por las mareas. Alvarez y Jones (2002a) explican que en la serie de tiempo tomada durante mareas vivas en el AGC los picos periódicos de concentración de MPS coinciden con las corrientes máximas observadas en la mayor parte de la columna de agua. Alvarez y Jones (2002b) afirman que para el AGC la cantidad de MPS en la columna de agua se encuentra controlada por la resuspensión generada por las corrientes de marea, esto desde que el suministro de sedimento por parte del Río Colorado fue bloqueado.

Los datos obtenidos durante MV y MM muestran una capa superior de concentración de MPS casi homogénea que se mantuvo con poco cambio en el tiempo, lo que implica que la difusión turbulenta es suficientemente fuerte para mantener esta concentración constante en esta capa y/o que existe una fracción de MPS con velocidades de asentamiento muy pequeñas, por lo menos durante condiciones de verano. El sedimento en suspensión produce un gradiente vertical de densidad, lo que según Dyer (1986) tiene un efecto estabilizante en el flujo del sedimento, inhibiendo el intercambio vertical de sedimento por turbulencia. A pesar de la variación de u_* la concentración de MPS de la capa superior varió poco, con una diferencia de 0.6mg/l entre MV y MM. Esto puede deberse a que la v_{ss} es tan pequeña que las partículas de MPS no alcanzan a asentarse cuando de nuevo predominan condiciones de alta u_* . El oleaje presente en la zona parece no tener una incidencia significativa en la resuspensión y distribución vertical de la concentración de MPS, al tener la columna de agua profundidades promedio de 25 m. Ya que la altura significativa y el periodo del oleaje son pequeños, Alvarez y Jones (2002a) determinan una influencia del oleaje con periodo de 4 s es hasta un máximo de 6 m de profundidad. La fuerza de las corrientes de marea es el factor principal de mezcla en la región (Lavín et al., 1998; Carriquiry y Sánchez, 1999), por lo que la influencia del oleaje en estos procesos es limitada.

Aunque se sabe de la existencia de formación de masas de agua más densas por la evaporación excesiva de agua en la zona del AGC, los datos tomados en los muestreos de este trabajo no son suficientes para determinar la presencia de

corrientes de gravedad formadas por estas masas de agua. Lavín et al. (1998) proponen que las corrientes de gravedad se generan en las partes someras del AGC, y pueden ser observadas durante MM, mientras que desaparecen en MV por el incremento de la mezcla vertical. Para la determinación de la presencia de corrientes de gravedad se necesitan series de tiempo de mayor longitud a las tomadas en este trabajo.

El hecho de que la zona de estudio sea considerada como un estuario inverso (alta salinidad por evaporación) (Lavín et al., 1998; Lavín y Sánchez, 1999; Alvarez y Jones, 2002a; Alvarez y Jones, 2002b) y la gran concentración de MPS presente implica otros factores que pueden incrementar la incertidumbre de los valores de v_{ss} . La floculación es la adherencia de partículas ya sean sedimentarias u orgánicas en torno a una partícula núcleo, la cual puede ser generada por fuerzas electromagnéticas a nivel molecular (fuerzas de Van der Waals) o por sustancias adherentes propias de la materia orgánica (aglutinantes). La cantidad de material de tamaño arcilla presente en la zona de estudio reportada por Thompson (1968), Carriquiry y Sánchez (1999) y Daesslé et al., (2002) y la alta salinidad hace suponer la posibilidad de formar agregados. La floculación resulta en la formación de partículas de mayor tamaño y en un aumento de la velocidad de asentamiento que se incrementará en función del diámetro de las partículas (Eisma, 1993). Esto implica que la velocidad de asentamiento de las partículas es variable, por lo que el valor de v_{ss} obtenido por el perfil de Rouse es una sobre-simplificación que debe tomarse con reserva. El hecho de que existan corrientes de marea muy fuertes provoca una resuspensión rápida del

sedimento no consolidado en la superficie del fondo, erosionando después el material más consolidado que se encuentra bajo la superficie del lecho y que es separado de éste en forma de agregados (Eisma, 1993), los cuales se integran a la columna de agua y aumentan los valores de v_{ss} promedio de las partículas en toda la columna de agua. Además v_{ss} puede variar a diferentes niveles de la columna de agua debido a los cambios en la viscosidad de la misma debido a estratificación por variaciones en la densidad (por cambios en salinidad y temperatura) (Eisma, 1993). El aumento de la velocidad de corriente provoca la erosión de partículas más grandes (ej. tamaño limo y arena fina) a las que ya se encuentran en suspensión, por lo que se provoca un aumento de v_{ss} promedio. Por otra parte, a una mayor velocidad de corriente se incrementa la turbulencia en la columna de agua, lo que a su vez puede disgregar las partículas afectadas por floculación haciendo que en promedio la v_{ss} disminuya notablemente (Eisma, 1993). Por lo tanto es importante considerar todos los fenómenos implicados en la floculación, para saber si este fenómeno es el causante del incremento en v_{ss} o es la resuspensión de partículas más grandes lo que la aumenta.

Carriquiry y Sánchez (1999) proporcionan un rango de tamaño de sedimento en el fondo para la parte oeste del AGC de entre 5ϕ y 7ϕ , que equivale a un intervalo entre $31\ \mu\text{m}$ y $7.8\ \mu\text{m}$ (limo mediano a muy fino), mientras que Jones et al. (en preparación), con mediciones en tubos de asentamiento, encontraron que la mediana del tamaño de las partículas en suspensión fue de $50\ \mu\text{m}$ (limo grueso) durante mareas muertas y de $150\ \mu\text{m}$ (arenas finas) durante mareas vivas. Los datos aportados por Jones et al. (en

preparación) son los únicos tomados en su tipo en el área de estudio, por lo que no existen referencias anteriores de tamaño de partículas en suspensión. La diferencia entre los tamaños de partículas descritos por Jones et al. (en preparación) y Carriquiry y Sánchez (1999) indica la posibilidad de que existe una agregación de partículas que genera tamaños más grandes en suspensión que los proporcionados por las partículas erosionadas del fondo marino. De la Peña-Nettel (1991) afirma que la alta mezcla vertical en la columna de agua permite al fitoplancton fotosintetizar inmediatamente y con mayor eficiencia (mediante el incremento de la clorofila a) cuando se encuentra expuesto a la luz. Esto quiere decir que aún cuando las condiciones de turbidez son altas en el AGC la productividad primaria también lo es, lo que significa una mayor contribución de materia orgánica al MPS. Mucha de la materia orgánica se considera aglutinante por contener compuestos mucilaginosos, los cuales se adhieren a las paredes de partículas sedimentarias muy finas (arcillas), lo que aumenta la posibilidad de cohesividad del MPS en forma de agregados (Eisma, 1993).

Una manera de obtener el tamaño de las partículas con los datos obtenidos a partir del modelo de Rouse es utilizando la Ley de Stokes (Julien, 1995), ecuación que relaciona el diámetro de una partícula con su velocidad de asentamiento:

$$v_{ss} = \left[\frac{(P_i - P)g}{18\mu} \right] d^2 \quad (12)$$

donde P_i es la densidad de la partícula y P es la densidad del fluido (kg/m^3), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), μ es la viscosidad del fluido (kg/ms) y d es el diámetro de la partícula (m). Despejando d de la ecuación (12) y utilizando el valor de la media y la mediana de v_{ss} durante MV y MM, se encontraron valores de diámetro de partícula de $50\ \mu\text{m}$ para la media y de $41\ \mu\text{m}$ para el valor de la mediana de v_{ss} durante MV. Para MM, se encontraron valores de $27\ \mu\text{m}$ para la media y de $24\ \mu\text{m}$ para la mediana de v_{ss} . El valor máximo y mínimo de diámetro de partícula fue de $80\ \mu\text{m}$ (en MV) y de $5\ \mu\text{m}$ (en MM). La utilización de la media y la mediana de v_{ss} no implica que la ecuación (12) proporcione los valores de la media y la mediana del tamaño de partícula, sin embargo aporta un rango de tamaño interesante para estudios posteriores. El valor máximo de diámetro de partícula encontrado durante MV y MM equivale a arenas muy finas, mientras que el mínimo equivale a limos finos. Los valores obtenidos de las v_{ss} por la Ley de Stokes en MV y MM son mas pequeños que el intervalo descrito en Jones et al. (en preparación), sin embargo discrepan en menor medida de los valores propuestos por Carriquiry y Sánchez (1999) para tamaños de partículas en el fondo.

Las concentraciones de MPS observadas en este trabajo son comparables a las obtenidas por Alvarez y Jones (2002a) en muestreos en el AGC en la misma estación de muestreo (W3) en agosto de 1997. Para el caso de mareas vivas, estos autores reportan un máximo en el fondo de $85\ \text{mg/l}$ y un máximo en superficie de $\sim 5\ \text{mg/l}$, mientras que los reportados en este trabajo alcanzan un máximo en el fondo de 58

mg/l y 5.3 mg/l en superficie. Para muestreos durante mareas muertas, Alvarez y Jones (2002a) reportan concentraciones de MPS máximas en el fondo de 25 mg/l, contra 23 mg/l reportados en este trabajo. La similitud entre ambos resultados aumenta la credibilidad del muestreo y tratamiento de los datos y en el ajuste de la ecuación de Rouse.

La aplicación del modelo de Rouse para la zona de estudio aún presenta ciertos problemas técnicos. La dificultad de medir la v_{ss} de las partículas *in situ* es tal vez el más grande. Existen técnicas de medición de v_{ss} a partir de tubos de asentamiento que son lanzados a la columna de agua con ambos extremos abiertos, para luego cerrarlos e inmediatamente subirlos y medir los valores antes de que el MPS se disgregue y arroje datos irreales. El ajuste estadístico del perfil de Rouse a los datos observados de concentración de MPS demuestra que con los valores de v_{ss} reales es posible cuantificar en forma adecuada el material que se encuentra en suspensión. Otra dificultad existente en la aplicación del modelo de Rouse es el problema de instalar aparatos en el fondo marino que midan concentración de MPS y corrientes en esta zona en particular. Los ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) tienen un margen de blanqueo de decenas de centímetros hasta metros, lo que aunado a la altura sobre el fondo a la cual se encuentra anclado el aparato, no permite medir las velocidades de corriente adyacentes al fondo. Adjunto al ADCP pueden ser colocados OBS para medir también concentraciones de MPS, pero de la misma forma no tomarían en cuenta mediciones por debajo del aparato, por lo que se dejarían de tomar mediciones muy importantes al estar en el fondo la mayor concentración de material sedimentario.

Existe la posibilidad de enterrar los aparatos y dejar los sensores lo mas cercano al fondo posible. Sin embargo, los procesos de advección y resuspensión del material pueden en un momento dado enterrar también a los sensores y bloquear o saturar la medición. El amplio rango de mareas hace difícil también la localización del fondo marino. La continua variación del fondo por la resuspensión y depósito de material sedimentario hace mayor la posibilidad de una inclinación en el aparato, lo que aumentaría la incertidumbre de los datos medidos. El AGC posee el status de Reserva de la Biosfera, pero existen pequeñas comunidades que se dedican a la pesca de camarón utilizando redes de arrastre. Existe la posibilidad de que los aparatos puestos en el fondo sean desplazados por redes de arrastre o sean robados, lo que hace menos factible (económicamente) su colocación por lo costoso de los aparatos.

Hasta ahora las mejores aproximaciones del perfil de concentración de MPS se logran realizando muestreos en los cuales se bajan los aparatos de medición desde superficie, donde se tiene un mejor control de los mismos para tratar de alcanzar niveles mas próximos al fondo.

5. Conclusiones

1. El perfil de Rouse se ajustó cuantitativamente a los perfiles de concentración de MPS observados, con un error de estimación de $\pm 5.2\%$ en promedio con respecto a la concentración observada de MPS.
2. Las observaciones durante mareas vivas mostraron que las concentraciones de MPS fueron proporcionales a la magnitud de u_* .
3. Las observaciones de concentración integrada promedio fueron de 0.2537 kg/m^2 con una desviación estándar de 0.0579 kg/m^2 durante mareas vivas y de 0.1219 kg/m^2 con una desviación estándar de 0.0121 kg/m^2 durante mareas muertas.
4. Las velocidades de asentamiento derivadas del modelo de Rouse tuvieron una media de 0.0025 m/s y una mediana de 0.0017 m/s para mareas vivas, mientras que para mareas muertas tuvieron una media de 0.00073 m/s y una mediana de 0.0006 m/s .
5. Los sedimentos de fondo fueron el aporte principal de MPS a la columna de agua y los procesos de resuspensión y asentamiento fueron generados por las corrientes de marea prevalecientes.

6. Referencias

Alvarez, L.G. y Jones, S.E., 2002a. Factors influencing suspended sediment flux in the Upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **54**, 747-759.

Alvarez, L.G. Jones, S.E., 2002b. Short-term observations of suspended particulate matter in a macro-tidal inverse estuary: the Upper Gulf of California. Sometida a *Journal of Coastal Research*.

Alvarez, L.G., 2003. Suspended sediment dynamics in the Upper Gulf of California. Tesis de Doctorado. Sometida a Universidad de Gales. Bangor, Gran Bretaña.

Brennan, M., 2000. Sediment fluxes in a partially stratified estuary. Ph.D. dissertation Exam, August 2000. Department of Civil al Environmental Engineering. Stanford University. 157pp.

Calderón-Aguilera, L.E., Marinone, S.G. y Aragón-Noriega, E.A., 2003. Influence of oceanographic processes on the early life stages of the blue shrimp (*Litopenaeus stylirostris*) in the Upper of California. *Journal of Marine Systems* **39** 117-128

Cao, Z. y Egashira, S. 1999 Turbulence modulation by suspended sediment in open channel flow. *Proceedings of the XXVIII IAHR Congress, August 1999, 1-6 Graz, Austria*.

Carriquiry, J.D. & Sánchez, A. 1999 Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Marine Geology* **158**, 125-145.

Clarke, S. y Elliot A.J., 1998. Modelling suspended sediment concentrations in the Firth of Forth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **47**, 235-250.

Daesslé, L.W., Ramos, S.E., Carriquiry, J.D. y Camacho-Ibar, V.F., 2002. Clay dispersal and the geochemistry of manganese in the Northern Gulf of California. *Continental Shelf Research* **22** 1311-1323

De la Peña-Nettel, G., 1991. Influencia de la turbidez sobre la producción orgánica primaria en la región del delta del Río Colorado. Tesis de licenciatura. UABC. Ensenada B.C., México.

Dyer, K.R. 1986. Coastal and Estuarine Sediment Dynamics. John Wiley & Sons. 342pp.

Dyer, K.R., 1995. Sediment transport processes in estuaries. In *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Perillo, G.M.E. (ed.). *Development in Sedimentology* **53**, 423-449.

Eisma, D., 1993. Suspended Matter In The Aquatic Environment. Ediciones Springer-Verlag. Berlín, Alemania. 315pp.

García de Ballesteros, M.G. y Larroque, M., 1974. Elementos sobre la turbidez en el Alto Golfo de California. *Ciencias Marinas* **1** (2), 1-30.

García-Silva, A., 1996. Modelación de corrientes residuales en el Golfo de California mediante la utilización de diferentes tamaños de malla. Tesis de licenciatura, UABC. Ensenada B.C., México.

Graf, W.H. y Cellino, M., 2002. Suspension flows in open channels; experimental study. *Journal of Hydraulic Research* **40**, 4 435-447.

Gross, T.F. y Nowell, A.R.M., 1983. Mean low and turbulence scaling in a tidal boundary layer. *Continental Shelf Research* **2** (2/3), 109-126.

Hernández-Ayón, J.M., Galindo-Bect, M.S., Flores-Báez, B.P. y Alvarez-Borrego, S., 1993. Nutrient concentrations are high in the turbid waters of the Colorado River delta. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **37**, 593-602.

Hoel, P.G. 1979. Estadística Elemental. Tercera Edición. Compañía Editorial Continental, S.A. México, D.F. 388 pp.

Jones, S.E., Alvarez, L.G., Fisher, N. y Probert, D. En preparación. Physical characteristics of suspended particles in the Upper Gulf of California.

Julien, P.Y. 1995. Erosion and sedimentation. Cambridge University Press. New York, NY, EE.UU. 280pp.

Kashefipour, S.M. y Falconer, R.A., 1999. Numerical modeling of suspended sediment fluxes in open channel flows. *Proceedings of the XXVIII IAHR Congress, August 1999, 22-27 Graz, Austria.*

Kineke, G.C. y Sternberg, R.W., 1989. The effect of particle settling velocity on computed suspended sediment concentration profiles. *Marine Geology* **90**, 159-174.

Lavín, M.F. y Sánchez, S., 1999. On how the Colorado River affected the hydrography of the Upper Gulf of California. *Continental Shelf Research* **19**, 1545-1560.

Lavín, M.F., Godínez, V.M. y Alvarez, L.G., 1998. Inverse-estuarine features in the Upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **47**, 769-795.

Lucas, L., Koseff, J., Cloern, J., Monismith, S. y Thompson, J., 1999. Processes governing phytoplankton blooms in estuaries I: the local production-loss balance. *Marine Ecology Progress Series* **187**: 1-15

Morgan, C., Cordell, J. y Simenstad, C., 1997. Sink or swim? Copepod population maintenance in the Columbia River estuarine turbidity-maxima region. *Marine biology* **129** (2): 309-317

Nunes Vaz, R.A., Lennon, G.W. y Bowers, D.G., 1990. Physical behavior of a large, negative or inverse estuary. *Continental Shelf Research* **10** (3), 277-304.

Onitzuka, K. y Nezu, I., 1999. Effects of unsteadiness on von Karman constant in unsteady open-channel flows. *Proceedings of the XXVIII IAHR Congress, August 1999, 1-6, Graz, Austria.*

Open University Course Team. 1989. Waves, Tides and Shallow-Water Processes. Pergamon Ed. New York, NY. 189pp.

Reuter, C., Reuber, J. y Kongeter, J., 1999. A new settling column for investigations on turbulence influenced sediment transport. *Proceedings of the XXVIII IAHR Congress, August 1999, 22-27 Graz, Austria.*

Sarracino Ramírez, D., 1995. Sedimentación terrígena en los sedimentos laminados del Golfo de California en los últimos 250 años. Tesis de Maestría, UABC. Ensenada, B.C., Méx.

Seapoint Sensors User Manual, 1996. Seapoint Turbidity Meter. Seapoint Sensors Inc. Kingston, New Hampshire, E.U.A. 11pp.

Thompson, R.W., 1968. Tidal flat sedimentation on the Colorado River delta, northwestern Gulf of California. *Bulletin of the Geological Society of America Memories*, 107.

Anexo I

Tabla III. Concentraciones integradas verticalmente observadas y calculadas con el modelo de Rouse para mareas vivas (28/05/2002), concentración extrapolada hasta 0.1m sobre el fondo, altura sobre el fondo mínima de medición y el porcentaje de varianza explicado por el modelo de Rouse.

Hora local (105°WG)	Altura de columna de agua (m)	Altura mínima de observaciones sobre el fondo (m)	Concentración integrada (kg/m ²) observada	Concentración integrada (kg/m ²) Rouse	Concentración integrada (kg/m ²) hasta 0.1m sobre el fondo	R ²
8:25	22.33	0.50	0.2991	0.2868	0.3033	0.93
8:30	22.24	0.50	0.2785	0.2762	0.2838	0.88
9:00	22.24	0.50	0.2421	0.2328	0.2395	0.78
9:30	22.37	0.50	0.2055	0.1911	0.1967	0.75
10:00	22.54	0.52	0.1977	0.1886	0.1962	0.84
10:30	22.87	0.81	0.2001	0.2093	0.2325	0.91
11:00	23.31	0.71	0.2567	0.2325	0.2770	0.95
11:30	23.84	0.90	0.2691	0.2430	0.3112	0.96
12:00	24.45	0.81	0.3467	0.3421	0.4047	0.92
12:30	24.97	1.02	0.3585	0.3535	0.4428	0.96
13:00	25.57	0.64	0.3146	0.2922	0.3388	0.98
13:30	26.12	0.30	0.3417	0.3636	0.3787	0.95
14:00	26.58	0.51	0.2724	0.2828	0.2983	0.90
14:30	26.95	0.50	0.2445	0.2411	0.2492	0.90
15:00	27.2	0.59	0.2391	0.2566	0.2661	0.89
15:30	27.31	0.71	0.2234	0.2289	0.2385	0.84
16:00	27.31	0.69	0.2121	0.2263	0.2367	0.83
16:30	27.15	0.70	0.1909	0.1816	0.1912	0.92
17:00	26.86	0.60	0.1930	0.2016	0.2147	0.95
17:30	26.45	0.69	0.2100	0.2126	0.2302	0.91
18:00	26.05	0.69	0.2502	0.2639	0.2860	0.92
18:30	25.61	0.70	0.2341	0.2460	0.2639	0.93

Tabla IV. Concentraciones integradas verticalmente observadas y calculadas con el modelo de Rouse para mareas muertas (02/06/2002-03/06-2002), concentración extrapolada hasta 0.1m sobre el fondo, altura sobre el fondo mínima de medición y el porcentaje de varianza explicado por el modelo de Rouse.

Hora local (105°WG)	Altura de columna de agua (m)	Altura sobre el fondo (m) mínima de medición	Concentración integrada (kg/m ²) observada	Concentración integrada (kg/m ²) Rouse	Concentración integrada (kg/m ²) hasta 0.1m sobre el fondo	R ²
19:00	25.21	0.20	0.1180	0.1193	0.1209	0.76

Tabla IV. (continuación)

Hora local (105°WG)	Altura de columna de agua (m)	Altura sobre el fondo (m) mínima de medición	Concentración integrada (kg/m ²) observada	Concentración integrada (kg/m ²) Rouse	Concentración integrada (kg/m ²) hasta 0.1m sobre el fondo	R ²
19:30	25.35	0.39	0.1221	0.1261	0.1308	0.78
20:00	25.46	0.59	0.1357	0.1361	0.1419	0.85
20:30	25.51	0.49	0.1166	0.1223	0.1266	0.78
21:00	25.53	0.59	0.1191	0.1203	0.1292	0.87
21:30	25.50	0.89	0.1289	0.1335	0.1500	0.87
22:00	25.44	0.59	0.1262	0.1297	0.1350	0.80
22:30	25.34	1.35	0.1182	0.1244	0.1369	0.83
23:00	25.19	0.91	0.1407	0.1333	0.1654	0.87
23:30	25.01	0.96	0.1157	0.1209	0.1283	0.78
0:00	24.81	6.72	0.1234	0.1261	0.4231	0.90
0:30	24.60	1.02	0.1147	0.1202	0.1303	0.74
1:00	24.40	0.64	0.1308	0.1324	0.1397	0.82
1:30	24.23	0.64	0.1226	0.1291	0.1353	0.77
2:00	24.08	0.54	0.1211	0.1255	0.1297	0.67
2:30	23.96	0.55	0.1169	0.1189	0.1240	0.75
3:00	23.85	4.40	0.0980	0.1080	0.1554	0.67
3:30	23.78	0.65	0.1155	0.1227	0.1275	0.76
4:00	23.73	1.35	0.1103	0.1190	0.1333	0.67
4:30	23.72	1.12	0.1041	0.1109	0.1236	0.64
5:00	23.76	2.26	0.1183	0.1281	0.1515	0.75
5:30	23.84	0.77	0.1115	0.1156	0.1241	0.77
6:00	23.96	0.66	0.1167	0.1215	0.1284	0.84
6:30	24.10	0.97	0.1097	0.1170	0.1282	0.79
7:00	24.27	0.51	0.1316	0.1372	0.1435	0.85
7:30	24.44	2.22	0.1315	0.1363	0.1552	0.78
8:00	24.59	1.16	0.1134	0.1196	0.1305	0.74
8:30	24.71	1.14	0.1107	0.1165	0.1271	0.73
9:00	24.79	0.93	0.1089	0.1147	0.1259	0.71
9:30	24.83	0.50	0.1304	0.1371	0.1431	0.77
10:00	24.84	0.61	0.1176	0.1234	0.1308	0.75
10:30	24.81	0.71	0.1627	0.1717	0.1811	0.91
11:00	24.76	1.45	0.1460	0.1537	0.1720	0.80
11:30	24.68	0.62	0.1376	0.1436	0.1506	0.77
12:00	24.58	0.61	0.1309	0.1394	0.1462	0.72
12:30	24.47	0.51	0.1234	0.1295	0.1353	0.68
13:00	24.35	0.51	0.1420	0.1495	0.1545	0.71
13:30	24.24	1.25	0.1360	0.1429	0.1659	0.85
14:00	24.14	0.88	0.1157	0.1234	0.1326	0.67
14:30	24.06	0.53	0.1196	0.1238	0.1287	0.69

Tabla IV. (continuación)

Tiempo de muestreo	Altura de columna de agua (m)	Altura sobre el fondo (m) mínima de medición	Concentración integrada (kg/m ³) observada	Concentración integrada (kg/m ³) Rouse	Concentración integrada (kg/m ³) hasta 0.1m sobre el fondo	R ²
15:00	23.99	0.53	0.1276	0.1325	0.1373	0.72
15:30	23.96	0.84	0.1236	0.1277	0.1358	0.76
16:00	23.96	0.97	0.1128	0.1201	0.1301	0.67
16:30	24.01	4.54	0.1076	0.1161	0.1736	0.76
17:00	24.10	1.60	0.1120	0.1201	0.1355	0.68
17:30	24.24	1.23	0.1160	0.1241	0.1470	0.72
18:00	24.40	2.77	0.1067	0.1144	0.1662	0.76
18:30	24.58	5.78	0.1275	0.1385	0.2584	0.90

Tabla V. Concentración promediada observada y calculada con el modelo de Rouse para mareas vivas (28/05/2002), concentración extrapolada hasta 0.1m sobre el fondo, altura sobre el fondo mínima de medición y altura total de la columna de agua en la que se promediaron los datos de concentración integrados en la vertical.

Hora local (105°WG)	Altura de columna de agua (m)	Altura sobre el fondo (m) mínima de medición	Altura total de columna de agua (m) a promediar	Concentración promediada (kg/m ³) observada	Concentración promediada (kg/m ³) Rouse	Concentración promediada (kg/m ³) hasta 0.1m sobre el fondo
8:25	22.33	0.50	21.83	0.0137	0.0131	0.0136
8:30	22.24	0.50	21.74	0.0128	0.0127	0.0128
9:00	22.24	0.50	21.74	0.0111	0.0107	0.0108
9:30	22.37	0.50	21.87	0.0093	0.0087	0.0088
10:00	22.54	0.52	22.02	0.0089	0.0085	0.0087
10:30	22.87	0.81	22.06	0.0090	0.0094	0.0102
11:00	23.31	0.71	22.60	0.0113	0.0102	0.0119
11:30	23.84	0.90	22.94	0.0117	0.0105	0.0131
12:00	24.45	0.81	23.65	0.0146	0.0144	0.0166
12:30	24.97	1.02	23.95	0.0149	0.0147	0.0178
13:00	25.57	0.64	24.93	0.0126	0.0117	0.0133
13:30	26.12	0.30	25.82	0.0132	0.0140	0.0145

Tabla V. (continuación)

Hora local (105°WG)	Altura de columna de agua (m)	Altura sobre el fondo (m) mínima de medición	Altura total de columna de agua (m) a promediar	Concentración promediada (kg/m ³) observada	Concentración promediada (kg/m ³) Rouse	Concentración promediada (kg/m ³) hasta 0.1m sobre el fondo
14:00	26.58	0.51	26.07	0.0104	0.0108	0.0112
14:30	26.95	0.50	26.45	0.0092	0.0091	0.0092
15:00	27.2	0.59	26.61	0.0089	0.0096	0.0098
15:30	27.31	0.71	26.60	0.0084	0.0086	0.0087
16:00	27.31	0.69	26.62	0.0079	0.0085	0.0087
16:30	27.15	0.70	26.45	0.0072	0.0068	0.0070
17:00	26.86	0.60	26.26	0.0073	0.0076	0.0080
17:30	26.45	0.69	25.76	0.0081	0.0082	0.0087
18:00	26.05	0.69	25.36	0.0098	0.0104	0.0110
18:30	25.61	0.70	24.91	0.0093	0.0098	0.0103

Tabla VI. Concentración promediada observada y calculada con el modelo de Rouse para mareas muertas (02/06/2002-03/06/2002), concentración extrapolada hasta 0.1m sobre el fondo, altura sobre el fondo mínima de medición y altura total de la columna de agua en la que se promediaron los datos de concentración integrados en la vertical.

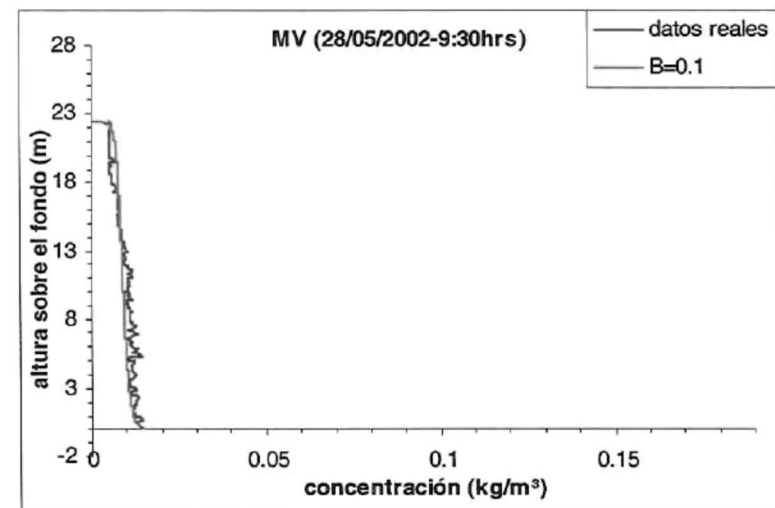
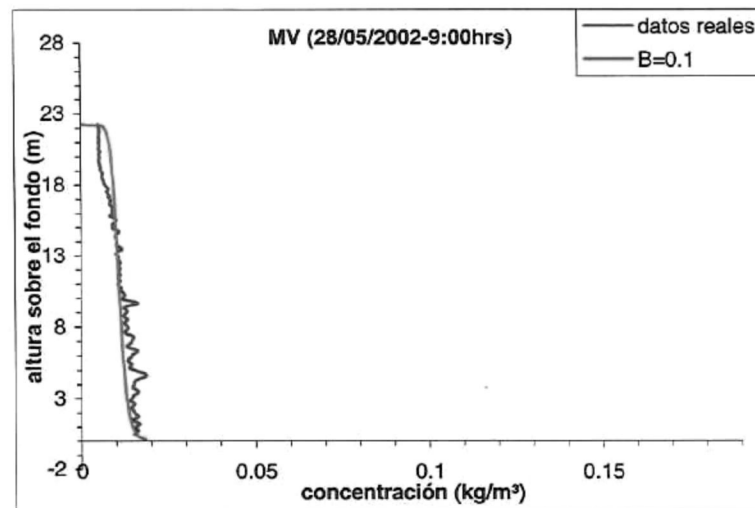
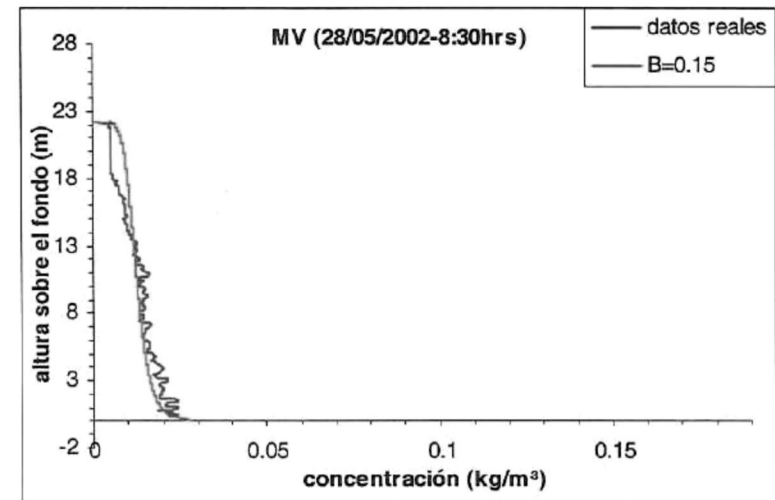
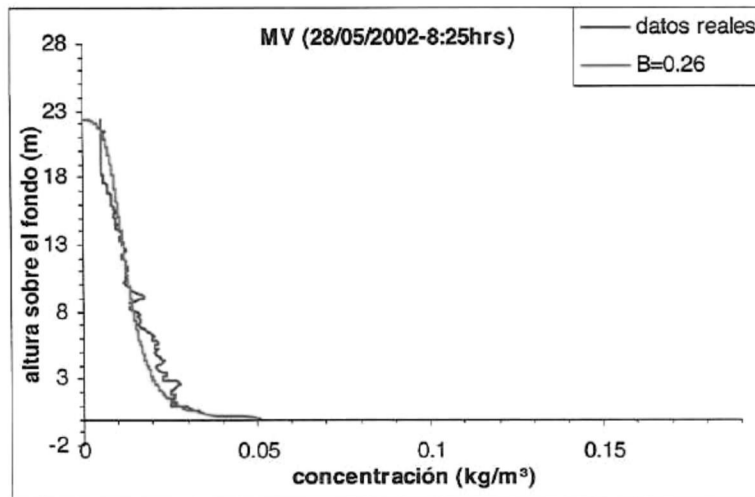
Tiempo de muestreo	Altura de columna de agua (m)	Altura sobre el fondo (m) mínima de medición	Altura total de columna de agua (m) a promediar	Concentración promediada (kg/m ³) observada	Concentración promediada (kg/m ³) Rouse	Concentración promediada (kg/m ³) hasta 0.1m sobre el fondo
19:00	25.21	0.20	25.01	0.0047	0.0047	0.0048
19:30	25.35	0.39	24.96	0.0048	0.0050	0.0052
20:00	25.46	0.59	24.87	0.0054	0.0054	0.0056
20:30	25.51	0.49	25.02	0.0046	0.0048	0.0049
21:00	25.53	0.59	24.94	0.0047	0.0048	0.0050
21:30	25.50	0.89	24.61	0.0052	0.0054	0.0059
22:00	25.44	0.59	24.85	0.0050	0.0052	0.0053
22:30	25.34	1.35	23.99	0.0049	0.0051	0.0054
23:00	25.19	0.91	24.28	0.0057	0.0054	0.0065
23:30	25.01	0.96	24.05	0.0048	0.0050	0.0051
0:00	24.81	6.72	18.09	0.0068	0.0069	0.0171
0:30	24.60	1.02	23.58	0.0048	0.0051	0.0053
1:00	24.40	0.64	23.76	0.0055	0.0055	0.0057
1:30	24.23	0.64	23.59	0.0052	0.0054	0.0056
2:00	24.08	0.54	23.54	0.0051	0.0053	0.0054
2:30	23.96	0.55	23.41	0.0049	0.0050	0.0051
3:00	23.85	4.40	19.45	0.0050	0.0055	0.0065
3:30	23.78	0.65	23.13	0.0049	0.0053	0.0053
4:00	23.73	1.35	22.38	0.0049	0.0053	0.0056
4:30	23.72	1.12	22.60	0.0046	0.0049	0.0052
5:00	23.76	2.26	21.50	0.0055	0.0059	0.0064

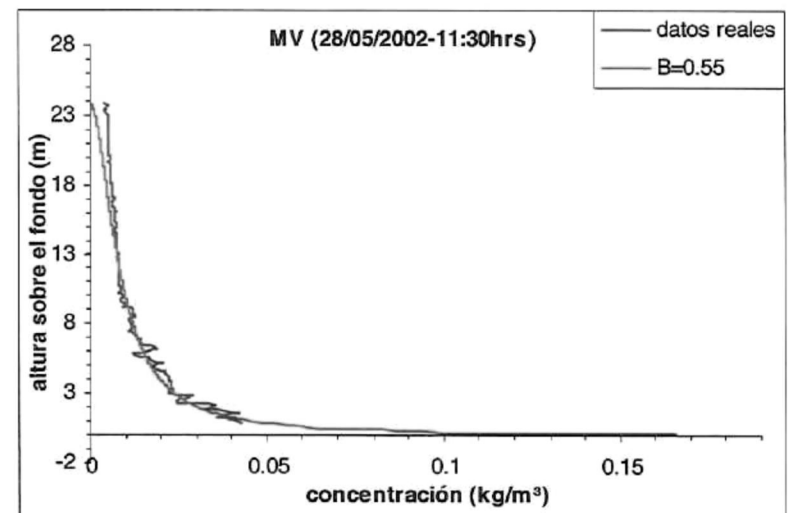
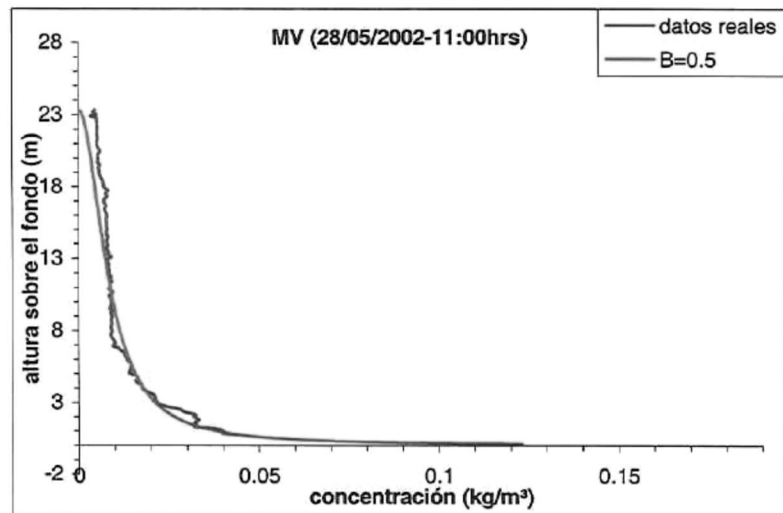
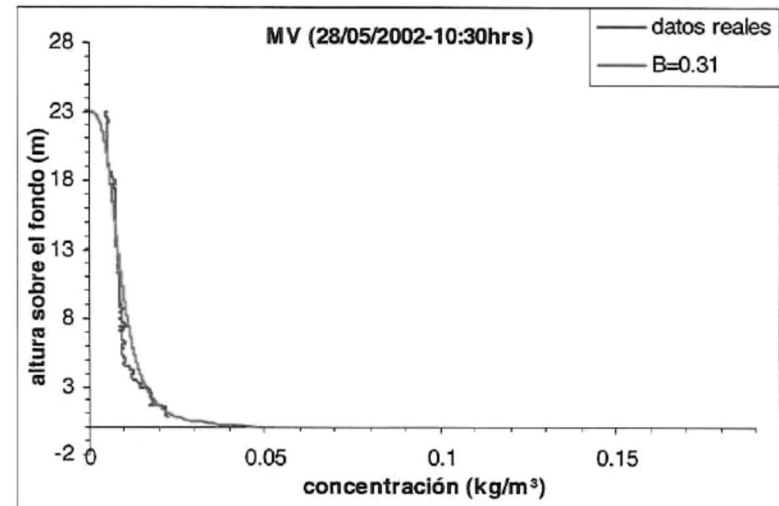
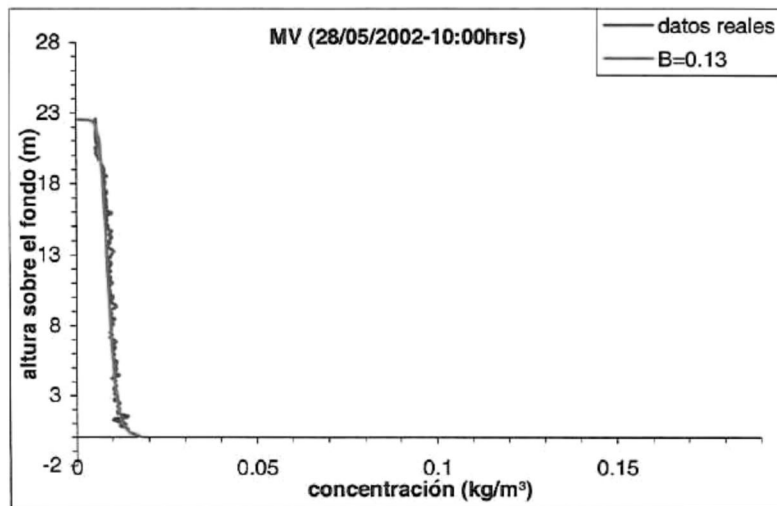
Tabla VI. (continuación)

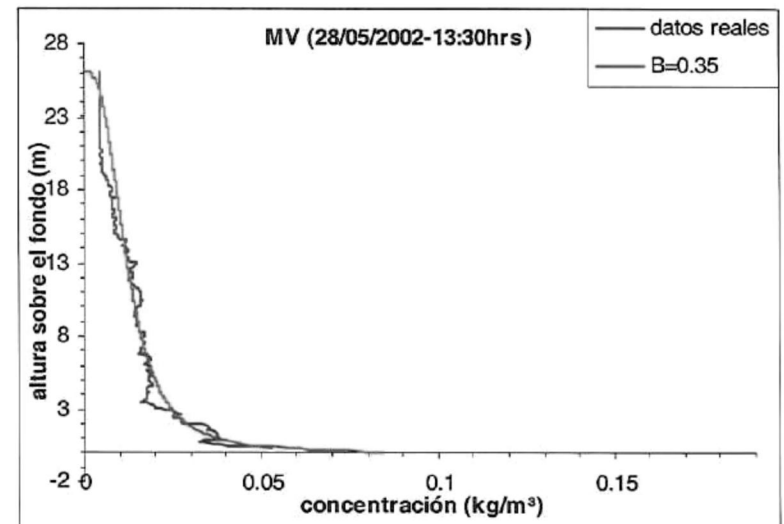
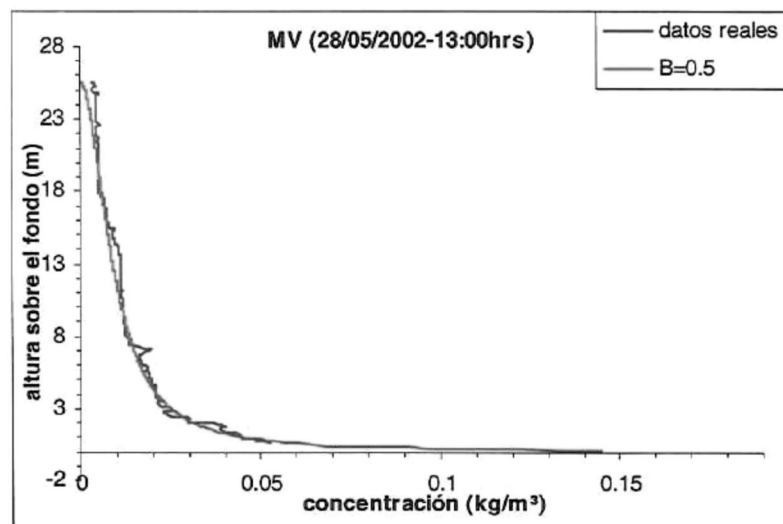
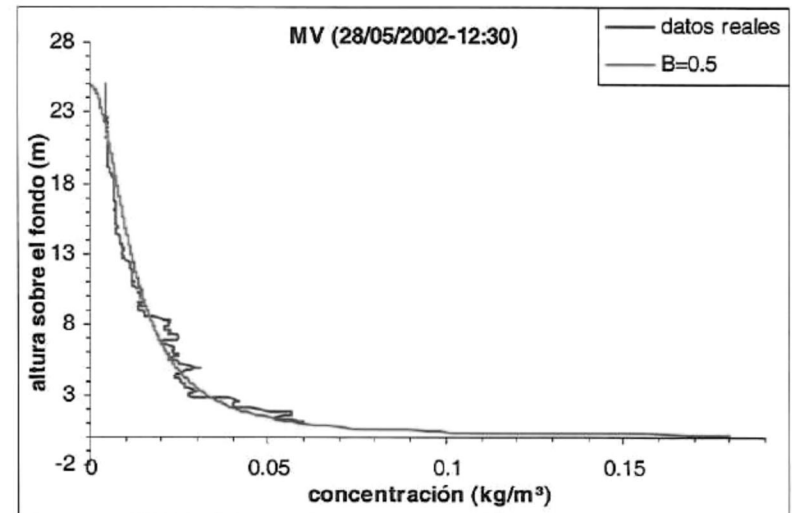
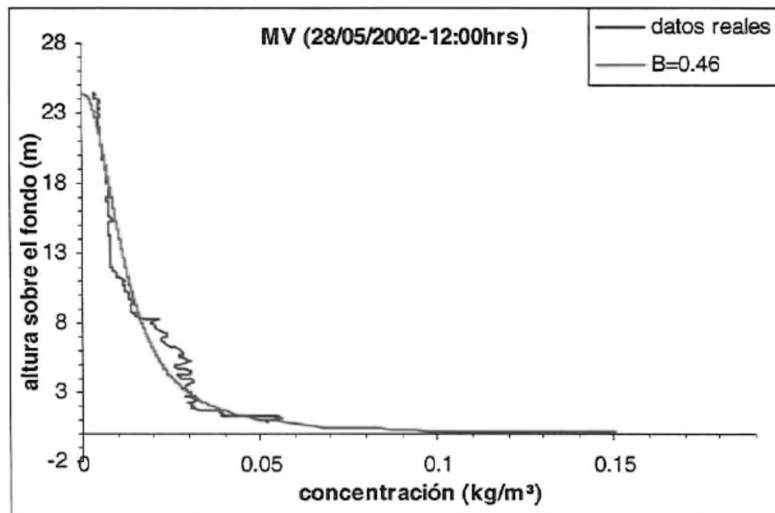
Tiempo de muestreo	Altura de columna de agua (m)	Altura sobre el fondo (m) mínima de medición	Altura total de columna de agua (m) a promediar	Concentración promediada (kg/m ³) observada	Concentración promediada (kg/m ³) Rouse	Concentración promediada (kg/m ³) hasta 0.1m sobre el fondo
5:30	23.84	0.77	23.07	0.0048	0.0050	0.0052
6:00	23.96	0.66	23.30	0.0050	0.0052	0.0053
6:30	24.10	0.97	23.13	0.0047	0.0050	0.0053
7:00	24.27	0.51	23.76	0.0055	0.0057	0.0059
7:30	24.44	2.22	22.22	0.0059	0.0061	0.0063
8:00	24.59	1.16	23.43	0.0048	0.0051	0.0053
8:30	24.71	1.14	23.57	0.0046	0.0049	0.0051
9:00	24.79	0.93	23.86	0.0045	0.0048	0.0051
9:30	24.83	0.50	24.33	0.0053	0.0056	0.0057
10:00	24.84	0.61	24.23	0.0048	0.0050	0.0052
10:30	24.81	0.71	24.10	0.0067	0.0071	0.0073
11:00	24.76	1.45	23.31	0.0062	0.0065	0.0069
11:30	24.68	0.62	24.06	0.0057	0.0059	0.0061
12:00	24.58	0.61	23.97	0.0054	0.0058	0.0059
12:30	24.47	0.51	23.96	0.0051	0.0054	0.0055
13:00	24.35	0.51	23.84	0.0059	0.0062	0.0063
13:30	24.24	1.25	22.99	0.0059	0.0062	0.0068
14:00	24.14	0.88	23.26	0.0049	0.0053	0.0055
14:30	24.06	0.53	23.53	0.0050	0.0052	0.0053
15:00	23.99	0.53	23.46	0.0054	0.0056	0.0057
15:30	23.96	0.84	23.12	0.0053	0.0055	0.0057
16:00	23.96	0.97	22.99	0.0049	0.0052	0.0055
16:30	24.01	4.54	19.47	0.0055	0.0059	0.0073
17:00	24.10	1.60	22.50	0.0049	0.0053	0.0056
17:30	24.24	1.23	23.01	0.0050	0.0053	0.0060
18:00	24.40	2.77	21.63	0.0049	0.0052	0.0068
18:30	24.58	5.78	18.80	0.0067	0.0073	0.0105

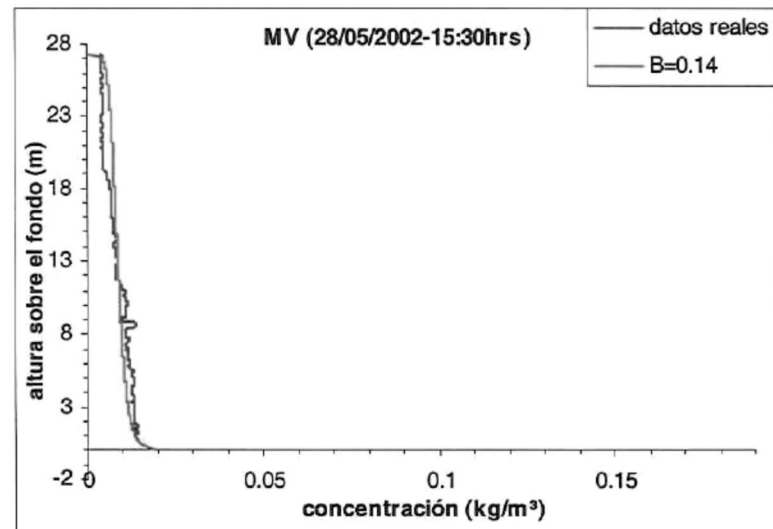
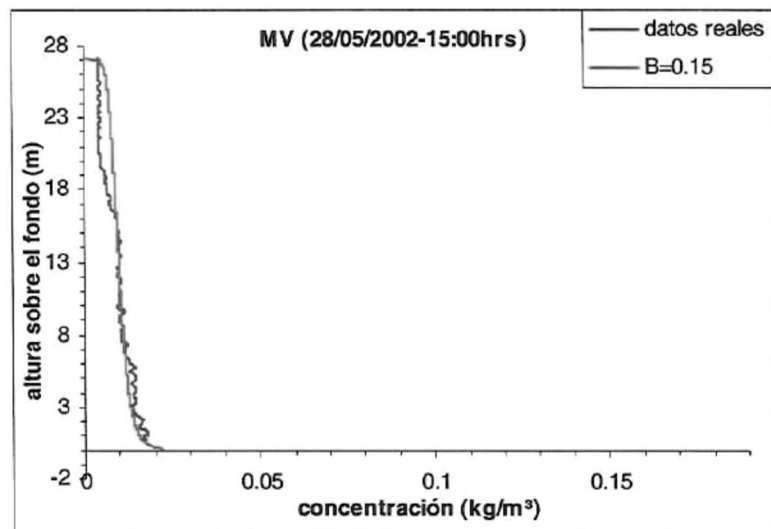
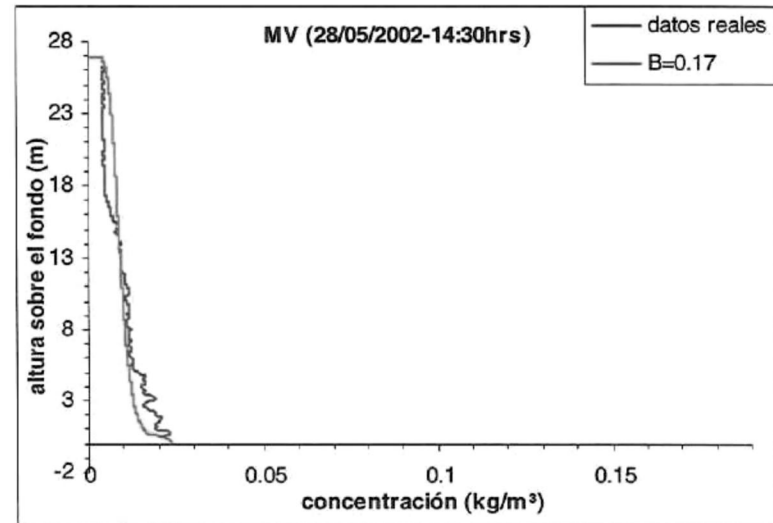
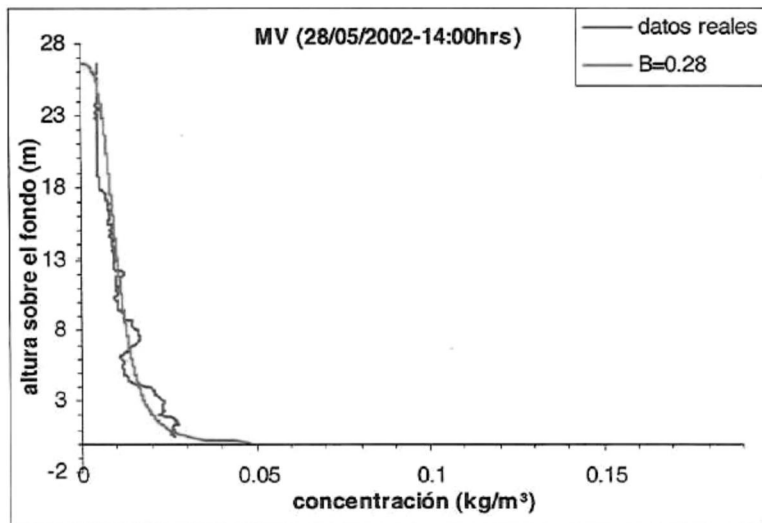
ANEXO II

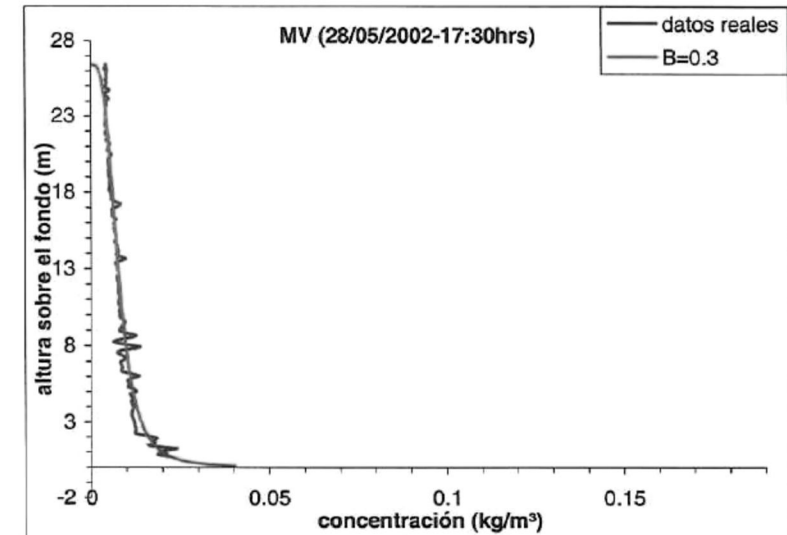
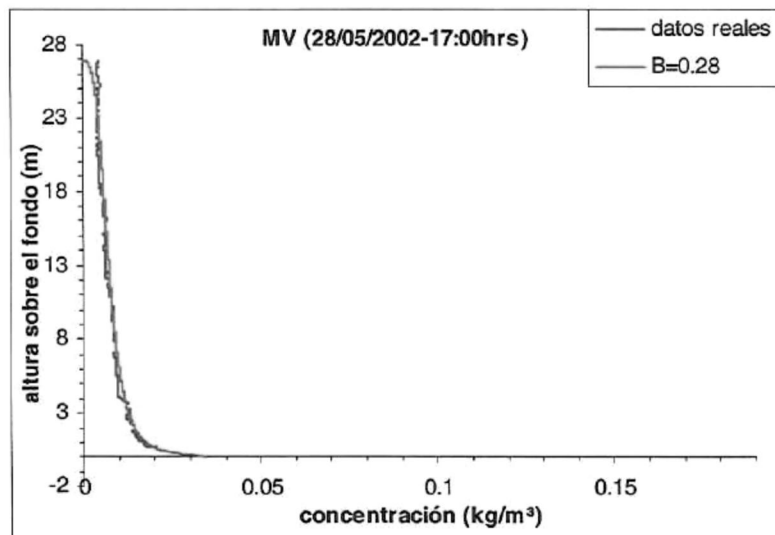
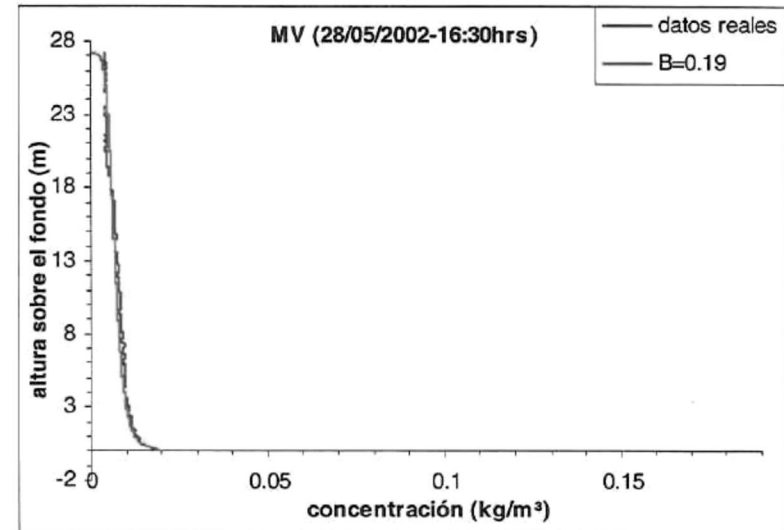
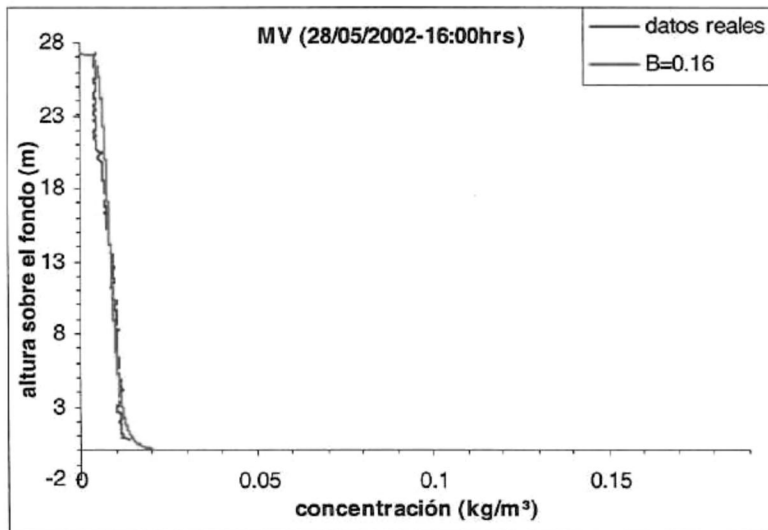
Perfiles de concentración observada y calculada con el modelo de Rouse (con extrapolación hasta 0.1 m sobre el fondo) para mareas vivas

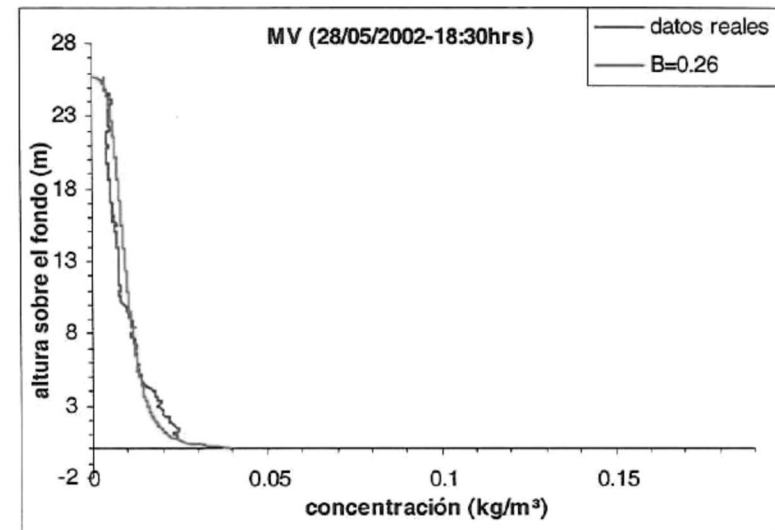
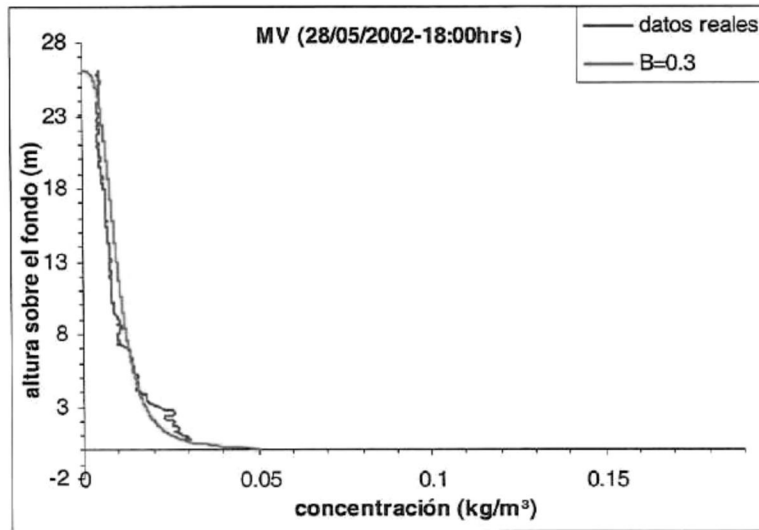












ANEXO III

Perfiles de concentración observada y calculada con el modelo de Rouse (con extrapolación hasta 0.1 m sobre el fondo) para mareas muertas

