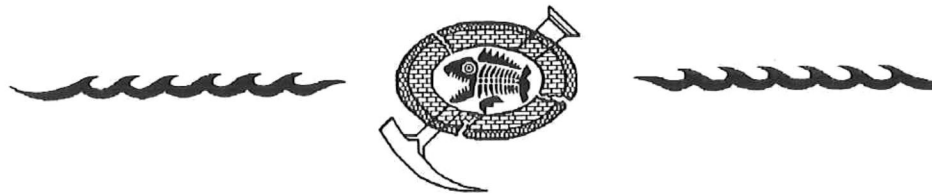




UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA



**FLUJOS DE SEDIMENTO EN SUSPENSION Y DE NUTRIENTES EN LA
CUENCA ESTUARINA DEL RIO COLORADO.**



TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
PRESENTA:
AMILCAR LEVI CUPUL MAGAÑA

Ensenada, B. C.

Noviembre de 1994.

FLUJOS DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN Y DE NUTRIENTES EN LA
CUENCA ESTUARINA DEL RÍO COLORADO.

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
PRESENTA:

AMILCAR LEVI CUPUL MAGAÑA

APROBADA POR:



PRESIDENTE DEL JURADO
DR. JOSE D. CARRIQUIRY BELTRAN



SINODAL
DR. SAUL ALVAREZ BORREGO



SINODAL
DR. VICTOR F. CAMACHO IBAR

DEDICATORIA

A MIS HIJAS, MIS TESOROS MAS PRECIADOS

**A DON LUIS Y DOÑA EVA,
POR TODO SU APOYO Y CARÍÑO**

**A MIS HERMANOS
LUIS, ULISES, FABIO, GRECIA Y EMMANUEL**

ESPECIALMENTE A TI MARIA, POR TU CARÍÑO .

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Domingo Carriquiry Beltrán por su constante apoyo y disposición durante el desarrollo de este trabajo, pero muy especialmente por haberme brindado su confianza y amistad, gracias Pepé.

A los Drs. Saúl Alvarez Borrego y Victor Camacho Ibar por sus valiosos comentarios y recomendaciones con las que me ayudaron a enriquecer este trabajo.

Especialmente a mis grandes compañeros y amigos Pedro y Lalo, por su valiosa colaboración durante los trabajos de campo, de los cuales nos reímos cuando nos acordamos de todas las (.....gas!) que nos llevamos.

Al CONACyT por el financiamiento parcial del proyecto "Flujos de Material en Suspensión en el Estuario del Río Colorado", bajo el convenio **D1433-T9201**, del cual forma parte esta tesis.

Al Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la UABC por el financiamiento complementario del proyecto, mediante el programa 4041 "Caracterización Geoquímica Sedimentaria del Río Colorado".

A Beto, Miguel, Alex, Sergio, Fernando, Erika, Angélica y Roberto, por su ayuda durante los muestreos de campo.

A Mary por su ayuda durante los tediosos análisis de laboratorio.

Al Ing. Miguel Angel Martínez Durán, Departamento de Construcción de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Mexicali, B.C., por haberme facilitado los datos de las descargas de 1993 del Río Colorado.

A la comunidad del Golfo de Santa Clara por su apoyo y hospitalidad, especialmente a Norberto Tapia ("Chino"), Alfonso Pita ("Bocón") y Arturo Dena ("Chacas") por su gran ayuda durante los muestreos, a Don Carlos y Erika por habernos aguantado tanto tiempo en El Capitán.

Y pues claro, a todos aquellos que de una u otra manera colaborarán para la realización de esta tesis, mil gracias.

RESUMEN

Con el fin de determinar el efecto del represamiento del Río Colorado sobre el patrón de intercambio de materiales (sedimento en suspensión y nutrientes) entre el estuario del Río Colorado y la zona oceánica adyacente, se llevaron a cabo dos series de tiempo en una sección transversal a la desembocadura del Río Colorado. Una, caracterizando condiciones típicas del sistema en que la descarga del río es nula (1992), y la otra, caracterizando condiciones extraordinarias del sistema en que el flujo del río es dominante en la cuenca estuarina (1993). Durante períodos de aporte nulo de agua dulce, las condiciones hidrodinámicas del estuario están controladas completamente por la asimetría entre el flujo y reflujos de marea, y en consecuencia, dando lugar a un control totalmente mareal sobre el patrón del flujo de materiales. En ambos escenarios, la concentración del sedimento en suspensión en el estuario está regida por: a) un ciclo de erosión-dilución-depositación semidiurno, producto de la asimetría en la duración del ciclo de marea y en la intensidad de las corrientes mareales en flujo y reflujos; y b) un ciclo que responde a la variación quincenal de la marea, caracterizado por concentraciones altas durante mareas vivas y concentraciones bajas durante mareas muertas. La concentración de nutrientes depende principalmente del acoplamiento entre los procesos de resuspensión del sedimento de fondo, la mezcla del agua intersticial con la columna de agua (por las fuertes corrientes de marea), el aporte de nutrientes por las marismas, la variación quincenal de la marea y los procesos de erosión del delta. Lo anterior señala como fuentes principales de nutrientes hacia el estuario, al aporte de agua dulce del río (durante eventos de avenidas), la remineralización de nutrientes en la marisma incorporados a través de los canales de marea durante el reflujos, el aporte de los drenajes agrícolas y la erosión del delta. Los flujos netos anuales de sedimento en suspensión no muestran una diferencia marcada entre ambas condiciones, sin embargo, para el caso de los nutrientes se encontró que en el escenario bajo influencia fluvial estos fueron mayores que para el escenario sin río: los $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ fueron mayores por un factor de 7.9, los fosfatos 1.94 veces y los silicatos 77 veces mayores. Las diferencias entre ambos escenarios están reflejando claramente la importancia del flujo de agua del río, sobre todo en el caso del SiO_2 . El balance de materiales determinado para ambos escenarios, caracteriza al sistema estuarino del Río Colorado como un exportador neto de sedimento en suspensión y nutrientes hacia el Alto Golfo de California. Es importante puntualizar que, aún cuando no existan aportes de sedimentos por parte del río (períodos de descarga nula), el sistema es un exportador neto durante condiciones de descarga nula. Esto indudablemente evidencia que el sistema está exportando material sedimentario a costa del material que constituye la estructura deltaica. En el caso de los nutrientes, es particularmente interesante ver que, aún cuando no existe un aporte significativo de agua dulce al sistema, y consecuentemente de nutrientes, este se convierte propiamente en una fuente de nutrientes al Alto Golfo. Estos nutrientes pueden ser derivados del sedimento que constituye a las planicies deltaicas, las cuales durante su etapa de formación en que el río estaba activo, pudieron haber "atrapado" una gran cantidad de nutrientes en solución en el agua intersticial. Posteriormente, al atravesar por una etapa destructiva de la estructura deltaica por la erosión causada por las corrientes de marea, como sucede actualmente, puede ser un mecanismo por el cual estos nutrientes sean liberados a la columna de agua. Por lo anterior, el sistema deltaico-estuarino del Río Colorado se caracteriza como un importante sistema fertilizador de las aguas de la parte Alta del Golfo de California, y en consecuencia, el sistema deltaico del Río Colorado se constituye como un reservorio finito de estos materiales.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVO	8
3. METODOLOGIA	9
3.1. Area de estudio	9
3.2. Métodos de campo y laboratorio	13
3.3. Análisis de datos	19
4. RESULTADOS	22
4.1. Variabilidad temporal	22
4.1.1. Corrientes de marea	22
4.1.2. Salinidad y temperatura	23
4.1.3. Sedimento en suspensión	25
4.1.4. Nutrientes	26
4.1.5. Flujos de agua, sedimento y nutrientes	26
4.1.6. Transporte neto de sedimentos	29
4.1.7. Transporte neto de nutrientes	29
4.2. Variabilidad espacial	34
4.2.1. Distribución espacial	34
4.2.2. Fuentes de nutrientes	36
5. DISCUSION	38
5.1. Factores que afectan la variabilidad temporal de los materiales	38
5.1.1. Corrientes de marea	38
5.1.2. Salinidad y temperatura	43
5.1.3. Flujo del río	51
5.2. Variabilidad temporal de los materiales	54

	<u>Página</u>
5.2.1. Sedimento en suspensión	54
5.2.2. Nutrientes	61
5.2.3. Flujos de material	72
5.2.4. Flujos de nutrientes	79
5.3. Variabilidad espacial de nutrientes	87
5.4. Comparación entre los dos escenarios del estuario (con y sin descargas fluviales)	93
5.5. Patrones de Circulación	99
6. CONCLUSIONES	103
7. REFERENCIAS	107

Lista de Tablas

Tabla		Pagina
I	Valores máximos, mínimos, promedio y desviación estandar para las variables medidas durante las series de tiempo de 1992 y 1993 en la estación A. Las concentraciones de nutrientes y sedimento en suspensión son superficiales.	24
II	Valores máximos en flujo y reflujo de descarga de agua, flujos de sedimento en suspensión (total, inorgánico y orgánico) y nutrientes, para ambas series de tiempo.	27
III	Transporte neto en Ton/ciclo de marea de SST, SSI y SSO para las series de 1992 y 1993.	30
IV	Transporte neto de $N-NO_2^- + NO_3^-$, $P-PO_4^{3-}$ y $Si-SiO_2$ en g/ciclo de marea, para las series de 1992 y 1993.	32
V	Concentración de nutrientes en superficie y fondo para las estaciones del muestreo espacial del 16 de marzo de 1993.	35
VI	Concentración de nutrientes para las diferentes zonas de muestreo y durante los experimentos de liberación/remoción del 22 de mayo de 1993.	37
VII	Transporte neto anual de sedimento en suspensión total (Ton/año), $NO_3^-+NO_2^-$ (Kg/año), PO_4 (Kg/año) y SiO_2 (Kg/año) para el sistema estuarino del Río Colorado, con río y sin río.	85
VIII	Comparación en la concentración promedio de nutrientes entre el Estuario del Colorado y otros grandes ríos del mundo. Concentraciones en μM .	95

Lista de Figuras

Figura		Pagina
1	Representación gráfica de los principales procesos que afectan la distribución y concentración del material en suspensión y disuelto en los principales subsistemas del estuario, incluyendo los flujos de nutrientes y materiales entre la columna de agua estuarina y cada subsistema (modificado de Childers <i>et al.</i> , 1993).	2
2	Descarga promedio anual del Río Colorado, 1908-1981. (Tomado de Baba <i>et al.</i> , 1991).	5
3	Cuenca de drenaje del Río Colorado.	10
4	Localización del área de estudio y puntos de muestreo. Los puntos numerados representan las estaciones de muestreo. Las letras denotan las secciones transversales donde las series de tiempo se llevaron a cabo. El cuadro achurado en diagonal representa una localidad del estuario caracterizando a una marisma vegetada, donde se llevaron a cabo varios experimentos de adsorción y liberación de nutrientes. El cuadro achurado en rombohedros representa al poblado de El Golfo de Santa Clara.	11
5	Diagrama que representa los subambientes muestreados, para determinar la influencia de la zona de marisma sobre la concentración de nutrientes del estuario. La zona marcada en puntos con fondo blanco es donde se llevaron a cabo los muestreos de agua intersticial.	17
6	Distribución de velocidades de corriente de marea a lo largo de la serie de (a) 1992 y (c) 1993. Se incluye la relación existente entre la velocidad de corriente y la altura de la marea (b) en un ciclo semidiurno de la serie de 1992.	39
7	Desfase en tiempo y altura de la onda de marea entre el registro del Golfo de Santa Clara y la medición en la sección A, para (a) mareas muertas y (b) mareas vivas a lo largo de la serie de tiempo de 1992.	41
8	Distribución de (a) salinidad y (b) temperatura en superficie y fondo, a lo largo de la serie de 1992.	44
9	Distribución de (a) salinidad y (b) temperatura a lo largo de la serie de 1993.	47

10	Promedios diarios en superficie y fondo de: (a) salinidad y (b) temperatura, y (c) altura de marea, a lo largo de la serie de 1992.	49
11	Promedios diarios de (a) salinidad y (b) temperatura superficial y (c) altura de marea, a lo largo de la serie de 1993.	50
12	Descarga de agua instantánea y promedios diarios del Río Colorado durante el período de muestreo de 1993.	53
13	Distribución de sedimento en suspensión: (a) total, (b) inorgánico, (c) orgánico y (d) altura de marea, a lo largo de la serie de tiempo de 1992.	55
14	Distribución de sedimento en suspensión: (a) total, (b) inorgánico, (c) orgánico y (d) altura de marea, a lo largo de la serie de 1993.	56
15	Ejemplificación del ciclo de erosión-dilución-depositación semidiurno a lo largo de dos ciclos de marea semidiurnos de la serie de 1992.	57
16	Registro de vientos para el período de la serie de tiempo de 1992.	60
17	Resultado del análisis espectral para la serie de 1992. (a) sedimento en suspensión total, (b) sedimento en suspensión inorgánico y (c) sedimento en suspensión orgánico. D= componente diurna, SD= componente semidiurna y f/r= flujo y reflujos mareales.	62
18	Distribución de nutrientes a lo largo de la serie de 1992. (a) nitritos, (b) nitratos, (c) fosfatos y (d) silicatos.	63
19	Resultado del análisis espectral de los datos de nutrientes para la serie de 1992. (a) nitritos, (b) nitratos, (c) fosfatos y (d) silicatos.	65
20	Distribución de nutrientes a lo largo de la serie de 1993. (a) nitritos, (b) nitratos, (c) fosfatos y (d) silicatos.	66
21	Simulación del efecto del derrumbamiento de los bordes en la concentración de nutrientes en el estuario. (a) NO_2^- , (b) NO_3^- , (c) PO_4^{3-} y (d) SiO_2 .	70
22	Flujos instantáneos (en Kg/s) de: (a) sedimento en suspensión total, (b) sedimento en suspensión inorgánico y (c) sedimento en suspensión orgánico, a lo largo de la serie de 1992.	73

23	Flujos instantáneos (en Kg/s) de: (a) sedimento en suspensión total, (b) sedimento en suspensión inorgánico y (c) sedimento en suspensión orgánico, a lo largo de la serie de 1993.	74
24	Transporte neto en toneladas por ciclo de marea de sedimento en suspensión: (a) total, (b) inorgánico y (c) orgánico, a lo largo de la serie de 1992.	76
25	Transporte neto de sedimento en suspensión: (a) total, (b) inorgánico y (c) orgánico, para la serie de 1993.	77
26	Flujos instantáneos de nitratos+nitritos, fosfatos y silicatos para la serie de 1992.	80
27	Flujos de nutrientes a lo largo de la serie de 1993. (a) nitratos+nitritos, (b) fosfatos y (c) silicatos.	81
28	Transporte neto en gramos por ciclo de marea de (a)N-NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻ , (b) P-PO ₄ ³⁻ y Si-SiO ₂ , a lo largo de la serie de 1992.	82
29	Transporte neto en gramos por ciclo de marea de (a)N-NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻ , (b) P-PO ₄ ³⁻ y Si-SiO ₂ , a lo largo de la serie de 1992.	83
30	Distribución espacial de salinidad, nitritos, nitratos, fosfatos y silicatos, en superficie y fondo para el 16 de marzo de 1993. Estaciones 1-3 marinas, 4-12 estuarinas y 13-15 río.	88
31	Diagramas de mezcla de nitritos, nitratos, fosfatos y silicatos para marzo de 1993.	90
32	Isohalinas superficiales para marzo de 1993.	91
33	Isohalinas en fondo para marzo de 1993.	92
34	Isolíneas superficiales de concentración de silicatos en marzo de 1993.	94
35	Distribución espacial de salinidad y temperatura (a), nitritos (b), nitratos (c), fosfato (d) y silicatos (e), a lo largo del estuario durante descarga nula del río; la estación 2 marina y la 16 cabecera del estuario. (Datos tomados de Hernández-Ayón 1990).	97
36	Flujos de sedimento en suspensión total (a), inorgánico (b) y orgánico (c) para las secciones A (Canal principal), B (Baja California) y C (Sonora), durante un ciclo de marea semidiurno en mareas vivas para la serie de 1992.	101

1. INTRODUCCION.

Los estuarios son rutas importantes de diversos materiales de origen continental hacia el océano. A través de su paso por los estuarios, estos materiales son afectados por diversos procesos biogeoquímicos que alteran su distribución (Fig. 1)(Billen *et al.*, 1991; Hager y Schemel, 1992). El intercambio de material particulado y disuelto, entre la columna de agua y los sedimentos de fondo, promovido por procesos de sedimentación y resuspensión, son ejemplos clásicos de lo anterior (Pritchard y Schubel, 1981).

Tradicionalmente se han considerado a los ríos como una de las fuentes más importantes de nutrientes al medio ambiente costero (Meybeck, 1982; Chester, 1990; Milliman, 1991). Sin embargo, como consecuencia de una modificación drástica en la contribución de ésta fuente se pueden originar cambios sustanciales en los procesos físicos, químicos, biológicos y geológicos de un estuario. Asimismo, la contribución relativa de otras fuentes, tales como el flujo de nutrientes del agua subterránea, descargas de aguas residuales, lluvias, y precipitación de partículas de la atmósfera, puede incrementarse sustancialmente (Pritchard y Schubel, 1981).

Las alteraciones naturales y/o antropogénicas en las cuencas de drenaje de los ríos se reflejan de manera directa en los estuarios, en escalas de tiempo desde muy cortas (días) (Nichols, 1977) hasta seculares (Kennish, 1986). Recientemente se han evidenciado cambios drásticos en los flujos riverinos hacia la zona costera provocados por la deforestación y la construcción de presas (Kempe, 1988); el impacto inmediato ha sido reflejado en los cambios drásticos en las propiedades físicas y químicas

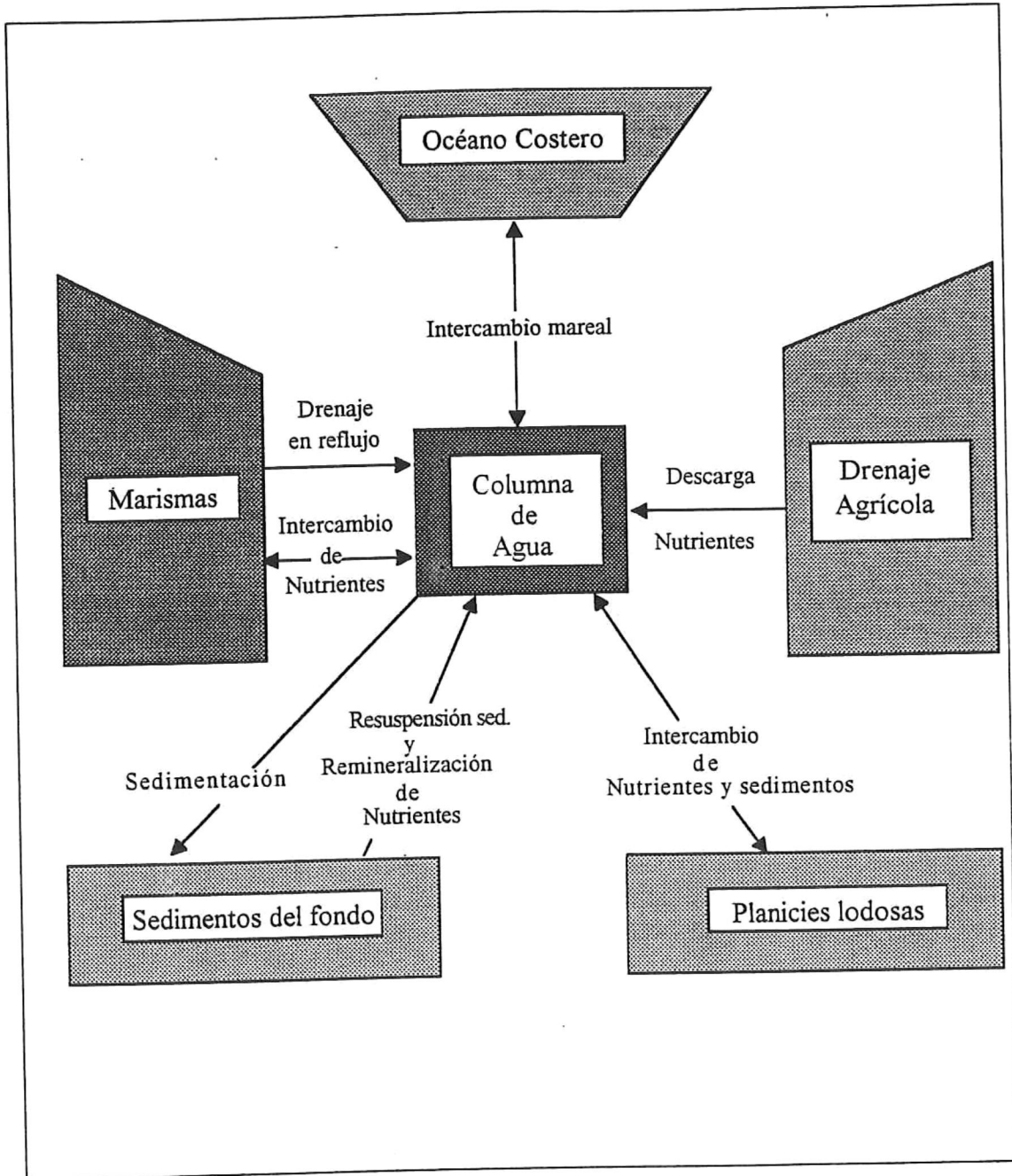


Figura 1. Representación gráfica de los principales procesos que afectan la distribución y concentración del material en suspensión y disuelto en los principales subsistemas del estuario, incluyendo los flujos de nutrientes y materiales entre la columna de agua estuarina y cada subsistema (modificado de Childers *et al.*, 1993).

(i.e. hidrología) de los estuarios asociados a estos ríos (Halim, 1991). Por ejemplo, la deforestación y la agricultura generalmente incrementan la erosión de suelos y en consecuencia las concentraciones de nutrientes, materia orgánica y metales en el agua de los ríos (Degens *et al.*, 1990; Esser y Kholmaier, 1990; Smetacek *et al.*, 1991). Al mismo tiempo, se operan cambios tanto en el flujo de agua como en la cantidad de sedimento que transportan; tales alteraciones afectan la flotabilidad del agua fluvial, y por tanto la estabilidad de la columna de agua, dando como consecuencia inmediata un cambio en la dinámica de sedimentación (Liss *et al.*, 1991).

Probablemente uno de los cambios más drámaticos en el flujo de los ríos hacia los estuarios en general sea el efecto producido por la construcción de presas. Debido a que estas pueden contener en su totalidad al flujo de agua del río, y gran parte del sedimento que transportan, estos cambios han tenido un efecto dramático en la erosión costera, fertilidad y exportación de material terrestre al océano (Mantoura *et al.*, 1991). Los efectos en la reducción de la descarga de agua del río por la construcción de presas, y en consecuencia en el aporte de sedimentos, han sido ampliamente documentados para el Río Nilo en Egipto (Frihy, 1988; Smith y Abdel-Kadar, 1988; Halim, 1991) y el Río Indo en la región de India-Pakistan (Milliman *et al.*, 1984; Halim, 1991).

Aunque el represamiento del Río Colorado se inició desde principios de siglo, sus efectos han sido solo evaluados con respecto a los cambios hidrológicos ocurridos en los diferentes cuerpos de agua (canales, lagos, repesos, *etc.*) localizados en las cuencas (alta

y baja) del mismo, en los EUA (Graf, 1985; Vaux, 1992), sin haberse establecido hasta el momento los efectos producidos en el ambiente estuarino (lado mexicano del sistema).

En el caso particular del Río Colorado, este es considerado como el sistema fluvial más manipulado del mundo (Vaux, 1992). Aún en los años más húmedos toda su agua es almacenada, o distribuida, en los Estados Unidos de América y generalmente ni una gota de ésta alcanza a llegar al estuario del Río Colorado en el Golfo de California (Vandivere y Vorster, 1984). Debido al intenso represamiento a lo largo del Río Colorado desde principios de siglo, la descarga de éste ha disminuido drásticamente (Fig. 2). Por ejemplo, durante el período de 1910 a 1920 la descarga promedio anual fue del orden de $21.37 \times 10^9 \text{ m}^3$. Después de 1920, esta decreció dramáticamente debido a la extensiva irrigación de nuevos campos de cultivo a lo largo del río; resaltando tres períodos críticos en el registro de la descarga los cuales son: 1934, un año antes de la conclusión de la presa Hoover, la descarga decreció hasta $1.78 \times 10^9 \text{ m}^3$ debido al llenado inicial de la presa. Después de cierta recuperación entre 1940 a 1952, la descarga volvió a decrecer, por efecto de la culminación y llenado inicial de la presa de Glen Canyon. A partir de éste período a la fecha, la descarga ha decrecido considerablemente. Por ejemplo, de 1960 a 1970 ésta cayó hasta $0.85 \times 10^9 \text{ m}^3$, que es solamente el 4% de la descarga entre 1910 y 1920 (Baba *et al.*, 1991), siendo incrementada solo durante períodos de extrema precipitación pluvial en la cuenca de drenaje. La disminución en la descarga de agua del Río Colorado, también se ha reflejado en el aporte de sedimentos, ya que, hasta antes de 1960, ésta era del orden de $135 \times 10^6 \text{ Ton/año}$ (van Andel, 1964).

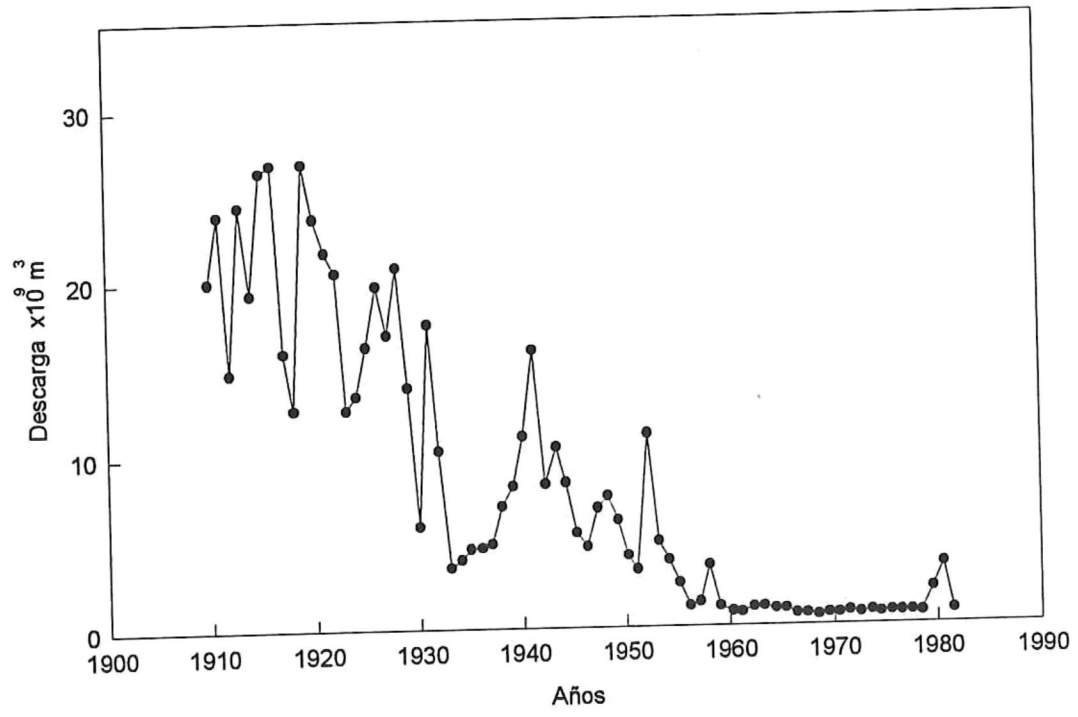


Figura 2. Descarga promedio anual del Río Colorado, 1908-1981. (Tomado de Baba *et al.*, 1991).

A partir de entonces, se ha calculado en base a modelos numéricos una descarga estimada del orden de 0.1×10^6 Ton/año (Milliman y Meade, 1983).

En consecuencia de lo anterior, la falta de aporte de agua dulce ha modificado drásticamente las condiciones hidrodinámicas del sistema estuarino, estando ahora completamente dominado por los efectos de la marea, lo cuál ha traído consigo la alteración de las características más importantes del sistema. En particular, los efectos del represamiento se han manifestado como cambios en las condiciones ecológicas e hidrológicas del estuario (Alvarez-Borrego, 1983) y también en los patrones de abastecimiento de sedimento y nutrientes de origen continental (Carriquiry *et al.*, 1992; Cupul-Magaña y Carriquiry, 1992).

En contraste con el largo período de descarga fluvial nula a la región del delta del Río Colorado, a inicios de 1993 se presentaron lluvias intensas en la cuenca baja del Río Colorado, aumentando el caudal de los ríos Colorado y Gila, rebasando la capacidad de almacenamiento de las presas de Painted Rock (Arizona, E.U.A.) y Morelos (Mexicali, México). Esto dió lugar a que las aguas fueran desfogadas hacia el delta del río a una razón de $700 \text{ m}^3/\text{s}$, en su descarga máxima, y entre 300 y $400 \text{ m}^3/\text{s}$ durante los meses de febrero a mayo de 1993. Este período extraordinario de descargas, que no se presentaba desde 1983, modificó las condiciones hipersalinas de la cuenca hacia condiciones estuarinas, restableciendo en cierta medida las características originales de abastecimiento de sedimento y nutrientes de origen continental al sistema.

La ocurrencia de este evento de avenidas del río permitió establecer la comparación entre las condiciones actuales del sistema del estuario del Río Colorado (sin descarga de agua dulce), con las características que tenía el sistema cuando el río fluía hacia el Alto Golfo de California. Para establecer esta comparación se llevaron a cabo dos series de tiempo en una sección transversal a la desembocadura del Río Colorado, la primera durante condiciones de descarga fluvial nula y la segunda bajo condiciones de aporte de agua dulce. Además, para conocer el impacto ocasionado por esta avenida de agua dulce en la distribución de nutrientes en el estuario del Río Colorado, se llevó a cabo un muestreo espacial a lo largo del mismo durante un período de mareas muertas para resaltar la influencia del río y se comparan los resultados de este trabajo con datos existentes de nutrientes y sedimento en suspensión para cuando el sistema estuarino se presenta en condiciones de flujo de río totalmente contenido.

2. OBJETIVO.

Determinar el efecto del represamiento del Río Colorado en el patrón de intercambio de materiales (sedimento en suspensión y nutrientes) entre el estuario y la zona oceánica adyacente.

3. METODOLOGIA.

3.1. Area de estudio.

La cuenca del Río Colorado tiene un área de 632,000 Km², e incluye parte de siete estados de EUA, así como una parte de la región norte de México (Fig. 3). El río se origina en las montañas Rocallosas y fluye a lo largo de más de 2,250 km antes de conectarse al Golfo de California. El promedio del flujo virgen anual del río se presenta entre 16.03×10^9 y 18.50×10^9 m³ en Lee's Ferry, Arizona. La cuenca del río puede dividirse en alta y baja; las montañas Rocallosas dominan la topografía de la cuenca alta, en donde el Colorado obtiene la mayor parte de su descarga de agua. La cuenca baja, en contraste, se caracteriza por valles aluviales planos, separados por áreas de baja montaña (Vaux, 1992).

La zona de estudio se encuentra localizada entre los 31° 37' 47.3" y 31° 54' 34.4" de latitud norte y 114° 30' 13.0" y 114° 56' 38.3" de longitud oeste, comprendiendo al estuario del Río Colorado y el extremo norte del Alto Golfo de California (Fig. 4).

El clima de la región es continental árido, con escasa precipitación pluvial y baja humedad. La razón de evaporación media estimada para el norte del Golfo de California es de 0.9 m/año (Lavín y Organista, 1988; Castro *et al.*, 1994), mientras que la precipitación promedio anual registra casi 4.5 mm (Reyes-Coca *et al.*, 1990).

La circulación troposférica de la corriente de chorro de norteamérica, cuya posición normal se localiza sobre la cuenca alta del Río Colorado, controla el patrón de variabilidad de la lluvia en la cuenca de drenaje del mismo, caracterizado por inviernos

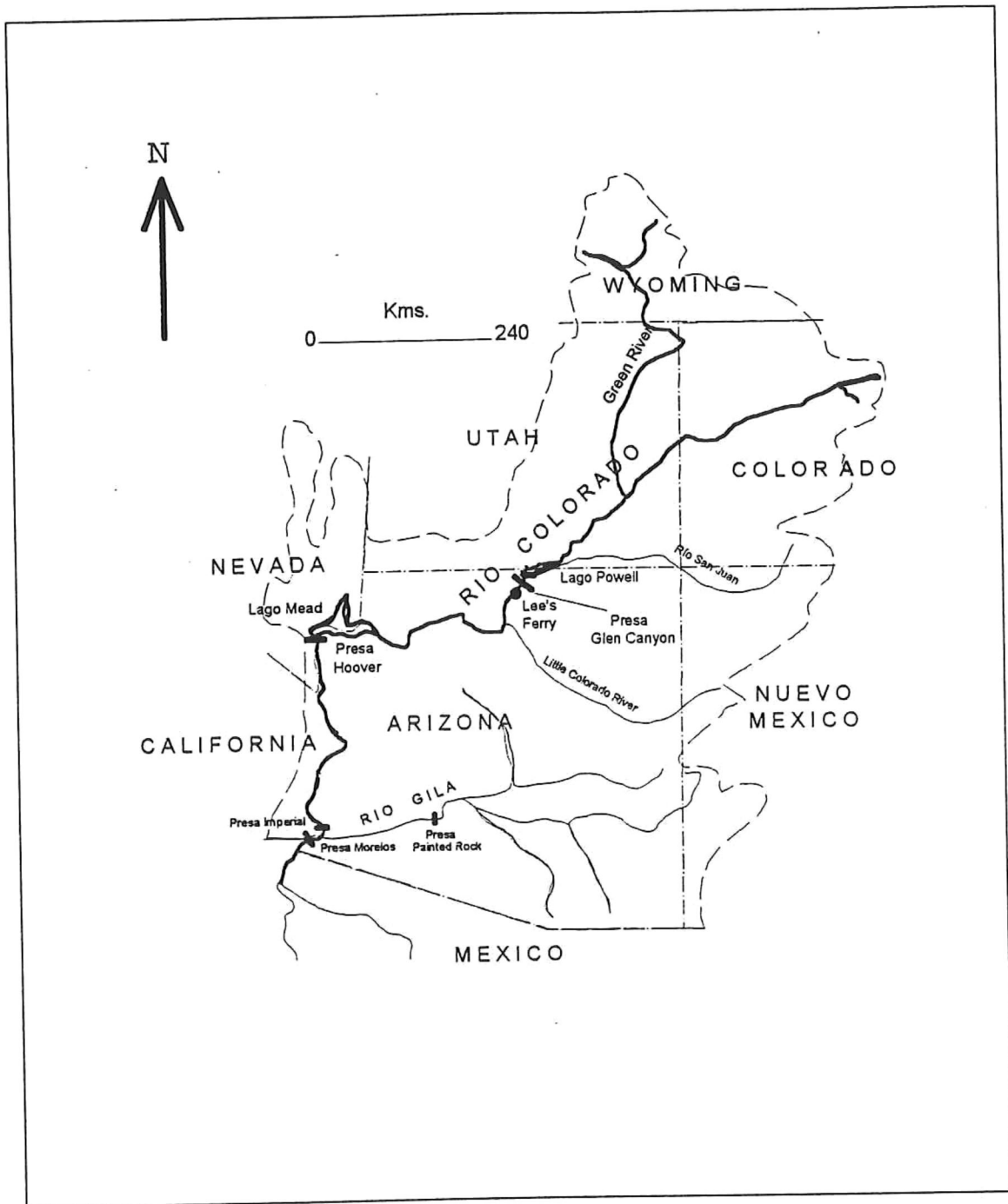


Figura 3. Cuenca de drenaje del Río Colorado.

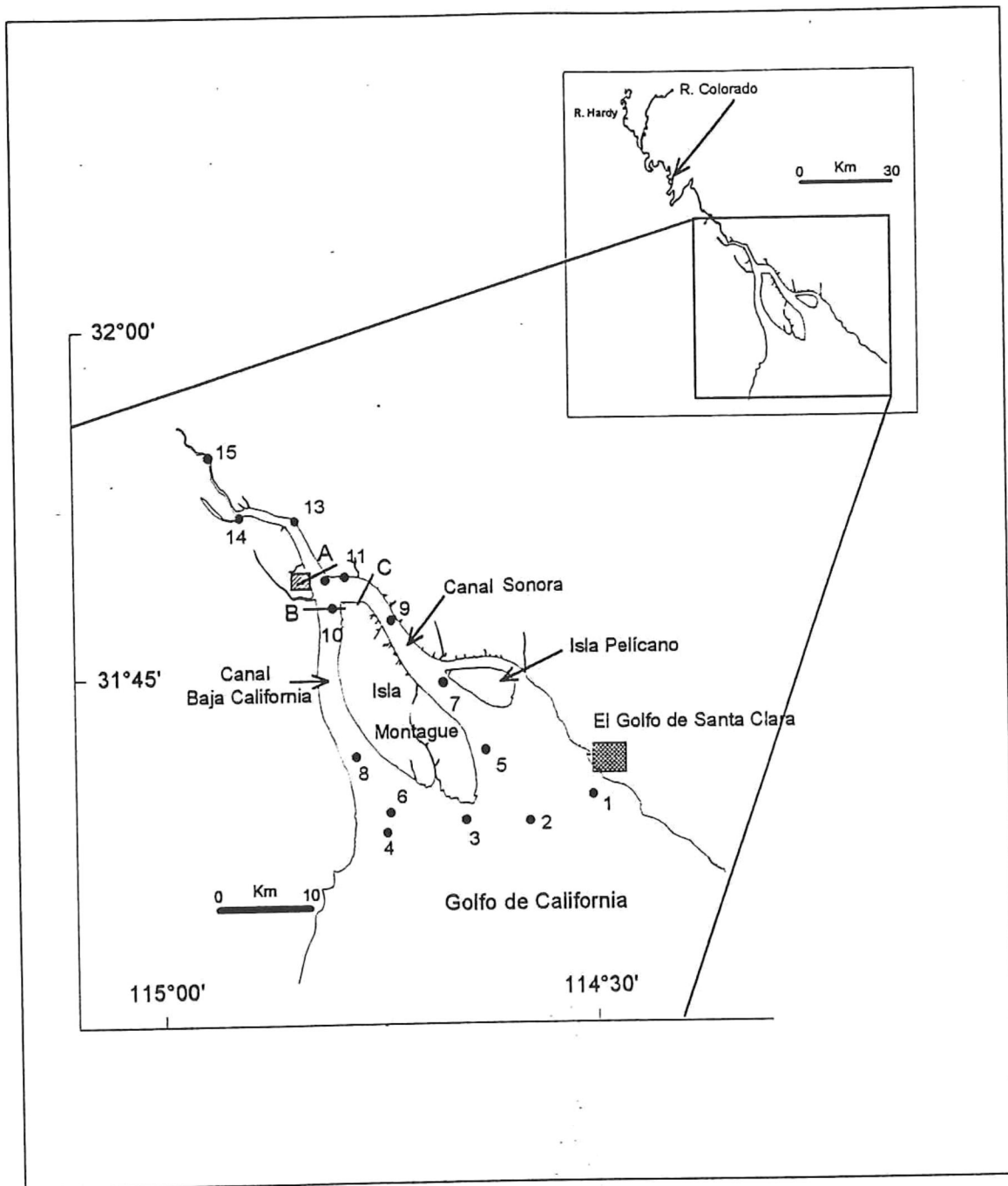


Figura 4. Localización del área de estudio y puntos de muestreo. Los puntos numerados representan las estaciones de muestreo. Las letras denotan las secciones transversales donde las series de tiempo se llevaron a cabo. El cuadro achurado en diagonal representa una localidad del estuario caracterizando a una zona de marisma vegetada, donde se llevaron a cabo varios experimentos de adsorción y liberación de nutrientes. El cuadro achurado en rombohedros representa al poblado del Golfo de Santa Clara, Son.

secos y con baja precipitación pluvial. Sin embargo, durante años de intensos inviernos, la corriente de chorro se desplaza hacia el sur, sobre la cuenca baja del Río Colorado, presentándose lluvias intensas que ocasionan flujos altos del río (Graf, 1985), como los ocurridos en el invierno de 1993.

Desde 1962 el flujo del Río Colorado ha sido atrapado en su mayor parte en los lagos Mead y Powell (Graf, 1985) mientras que el resto se retiene en la cuenca baja del río, en los valles de Imperial, Cal., EUA, y de Mexicali, B. C., México. De hecho, el aporte de materiales por parte del río hacia la cuenca estuarina ha sido nula desde 1960. En contraste, durante el período de 1891-1935, el Río Colorado aportó alrededor de 6.5×10^9 Ton de sedimento, a razón de algunas toneladas por día, a más de mil toneladas por segundo (Sykes, 1937).

Actualmente el canal principal del río se ensancha rápidamente formando un estuario de 40-48 Km de largo y 16 Km de ancho en su boca, constriñéndose de 1-3 Km de ancho para la mayoría de su longitud. El estuario comprende tres canales principales separados por barras elongadas algunas de las cuales emergen como las islas Montague y Pelicano (Meckel, 1975). El estuario es macromareal con un intervalo de marea viva máxima de 10 m y un intervalo promedio de marea de 6.5 m (Zamora-Casas, 1993). Durante las mareas vivas se observa la formación de bores hacia la cabeza del estuario, con alturas de 1 m aproximadamente (Sykes, 1937; Thompson, 1968), originados por el retraso de la onda de marea al propagarse en el estuario generando turbulencia y

resuspensión del sedimento de fondo, incrementando así la concentración de sedimento en suspensión hacia la cabeza del estuario.

En cuanto a las variables fisicoquímicas del agua, Alvarez-Borrego y Galindo-Bect (1974) y Alvarez-Borrego *et al.* (1975), señalan la variabilidad en el Alto Golfo de California con temperaturas mínimas en invierno de 8.25° C y máximas en agosto de 32.58° C; en cuanto a la salinidad superficial, encuentran valores mínimos en octubre (35.28 ‰) y máximos durante julio (41.00 ‰). Hernández-Ayón *et al.* (1993) consideran a la zona estuarina del Río Colorado como una zona de alta fertilidad, donde los nutrientes no son limitantes y donde no existen diferencias significativas en la variabilidad estacional de estos.

La zona oceánica adyacente, correspondiente al Alto Golfo de California, se caracteriza por continuos procesos de surgencias durante el año, y por una fuerte mezcla por corrientes de marea, dando lugar a un sistema oceánico costero de alta fertilidad (Alvarez-Borrego, 1983).

3.2. Métodos de campo y laboratorio.

El trabajo de campo se dividió en varias etapas que consistieron en las siguientes actividades: variaciones (a) temporales y (b) espaciales de nutrientes y sedimento en suspensión; y (c) experimentos para determinar el grado de influencia que las planicies de marismas puedan tener como fuentes potencialmente importantes de nutrientes al sistema.

a) Series de Tiempo

Con el objeto de determinar los procesos que afectan la concentración del material en suspensión y nutrientes en escalas semidiurnas, diurnas y quincenales en el estuario del Río Colorado, se llevaron a cabo dos series de tiempo en una sección transversal a la desembocadura del Río Colorado (Fig. 4). La primera serie de tiempo se realizó en el verano de 1992 (24 junio al 8 julio), cubriendo un ciclo quincenal de marea, iniciando en mareas muertas, pasando a mareas vivas, para concluir con mareas muertas. Este período de muestreo caracteriza condiciones típicas del sistema en el que la influencia de la descarga del río es nula.

El otro período de muestreo se realizó bajo condiciones extraordinarias del sistema en que el flujo del río es dominante en la cuenca estuarina. Debido a que este fue un evento extraordinario, se improvisó una salida de "emergencia", con la finalidad de caracterizar al sistema en términos de su hidrología. Esta serie de tiempo de 100 horas de duración se inició en un período de mareas vivas para concluir con mareas muertas, en primavera de 1993 (10 al 15 de marzo de 1993).

Durante los muestreos (a 20% y 80 % de la profundidad) se realizaron mediciones, durante cada hora de velocidad de corriente de marea con un flujómetro Weathertronics 6600; salinidad y temperatura *in situ* con un analizador S-C-T Labcomp y profundidad de agua. También se midió la velocidad y dirección de viento con un anemómetro manual Kalshico.

Se colectaron muestras de agua subsuperficial cada 2 horas en botellas de 250 ml para análisis de sedimento en suspensión total, inorgánico y orgánico, nitritos, nitratos, fosfato reactivo y silicatos. Para determinar la concentración de sedimento en suspensión, las muestras de agua fueron filtradas por succión inmediatamente después de la colecta a través de filtros de membrana Nucleopore de 47 mm de diámetro y 0.45 μm de poro, previamente pesados. Los filtros se enjuagaron con agua destilada para eliminación de sales solubles y se guardaron en sobres de papel aluminio y congelaron para su traslado al laboratorio.

En el laboratorio, los filtros se secaron en un horno a una temperatura de 105°C y posteriormente se pesaron para determinar la cantidad total de sedimento en suspensión. El sedimento orgánico en suspensión se estimó a partir de la pérdida por ignición a 550°C (Settlemyre y Gardner, 1977; Baird *et al.*, 1987). La fracción inorgánica en suspensión (SSI) se define como la diferencia en peso entre la fracción total (SST) y la orgánica (SSO) del sedimento en suspensión (*i.e.*, $\text{SSI} = \text{SST} - \text{SSO}$).

Las muestras de agua para nutrientes se congelaron inmediatamente después de la colecta. En el laboratorio, las muestras se filtraron y posteriormente se analizaron nitritos, nitratos, fosfato reactivo y silicatos, mediante las técnicas espectrofotométricas descritas por Strickland y Parsons (1972).

b) Variabilidad espacial

Para determinar el grado de influencia de la descarga del Río Colorado en la distribución espacial de la salinidad, nutrientes y sedimento en suspensión en el estuario, se llevo a cabo un muestreo espacial en marzo de 1993, en mareas muertas, cubriendo 15 estaciones durante el evento de avenida del Río Colorado (Fig. 4). El tiempo total de muestreo fue de 5-6 horas permitiendo así muestrear el sistema bajo un régimen de marea igual para todas las estaciones. Se colectaron muestras de agua en botellas de 250 ml en superficie y fondo con una bomba sumergible JABSCO 4400, para el análisis de nutrientes (nitritos, nitratos, fosfatos y silicatos), temperatura y salinidad. La temperatura se midió con un termómetro de cubeta y las muestras de agua para salinidad se analizaron en el laboratorio con un salinómetro de inducción Beckman RS10. Las muestras de agua se congelaron inmediatamente después de la colecta, para su traslado al laboratorio donde se filtraron y analizaron los nutrientes.

c) Experimentos en las planicies de marismas.

Para conocer la influencia que los subambientes del sistema estuarino del Río Colorado tienen sobre la concentración de nutrientes en la columna de agua, se llevo a cabo una jornada de muestreo en diferentes zonas del estuario (Fig. 5), durante el 22 de mayo de 1993 en la planicie de marea de Baja California aladaña a la estación 10 (Fig. 4). En esta localidad se llevaron a cabo los siguientes experimentos para caracterizar las fuentes de nutrientes de las marismas al estuario:

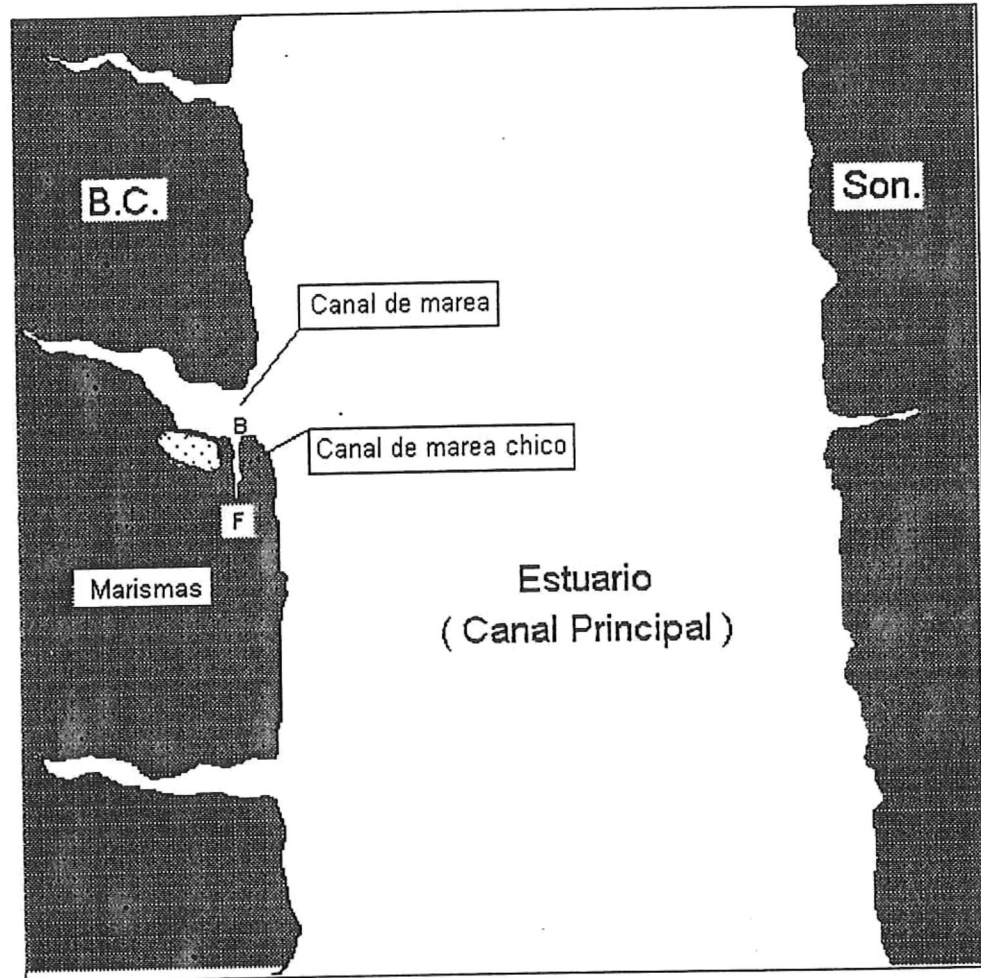


Figura 5. Diagrama que representa los subambientes muestreados, para determinar la influencia de las zonas de marismas sobre la concentración de nutrientes del estuario. La zona marcada en puntos con fondo blanco, es donde se llevaron a cabo los muestreos de agua intersticial.

1) Colecta simultánea de muestras de agua del canal principal y de un canal de marea, en flujo y reflujo mareal, para determinar si existen cambios en la concentración entre el canal principal y el canal de marea. En particular se tenía el interés de determinar si los nutrientes en el canal de marea presentaban un comportamiento dispar al del canal principal, lo cual pudiera evidenciar fuentes de nutrientes distintas para cada subsistema.

2) Experimentos de liberación y/o adsorción de nutrientes por el sedimento del borde del canal, para conocer la contribución de nutrientes al canal del estuario por los derrumbes del borde del río. El experimento consistió en la colecta de agua del canal principal en un contenedor de 18 lts, del cual se colectó una botella de 250 ml para conocer la concentración inicial. Después se agregó un bloque de sedimento de 10x10x5 cm (500 cm³), se dispersó y se colectó una muestra de agua cada 30 min., durante 90 min.

3) Agua intersticial. Se hicieron perforaciones de 30 cm de profundidad en el sedimento (en tres puntos diferentes de la planicie adyacente a un canal de marea), de los cuales se colectó el agua intersticial en condiciones de flujo y reflujo mareal.

4) Marisma. Para conocer la contribución de las praderas de pastos marinos (*Distichlis palmeri* (Vasey) Fassett) se colectaron muestras de agua de las zonas de pastos inundados, grietas de desecación, canal de marea y canal principal, simultáneamente, tanto en condiciones de flujo como de reflujo. Se colectó también de un canal de marea pequeño (8 m de largo por 1 m de ancho), durante el flujo y reflujo de marea, para determinar el transporte principal de nutrientes en esta parte.

3.3. ANÁLISIS DE DATOS

a) Series de tiempo

Los flujos de agua a través de la boca [Q(t)] se estimaron a partir de la relación:

$$Q(t) = v * A \quad \dots(1),$$

donde Q(t) es el flujo de agua instantáneo, (+) en flujo y (-) en reflujo; v es la velocidad instantánea promedio y A es el área instantánea de la sección transversal.

Los flujos de material [F(t)] se calcularon en base a la relación:

$$F(t) = Q(t) * C(t) \quad \dots(2),$$

dada por Kjerfve y McKellar (1980), donde F(t) es el flujo instantáneo de material (+) en flujo y (-) en reflujo; Q(t) es la descarga de agua instantánea obtenida de la Ec. (1) y C(t) es la concentración instantánea de material.

Como las concentraciones se midieron en una sola estación sobre la sección transversal, la suposición fue que el estuario esta bien mezclado lateral y verticalmente, por efectos de la intensa mezcla por las fuertes corrientes de marea, entonces existe homogeneidad en las concentraciones en toda la sección.

Para estimar el transporte neto de material durante todo el período de muestreo, se hicieron estimaciones separadas de flujos netos para cada ciclo de marea semidiurno, de tal manera que el transporte de material se estableció a partir de la relación:

$$\text{Tr}(T) = F_f(T) - F_r(T) \dots(3),$$

dada por Boon (1980), donde, $\text{Tr}(T)$ es el transporte de material por ciclo de marea, $F_f(T)$ es el flujo de material en el flujo de marea; $F_r(T)$ es el flujo de material en el reflujó de marea y (T) es el período de la marea semidiurna (12.42 h). Como un efecto del tipo de marea del estuario (semidiurna mixta), la descarga de agua en cada ciclo presentaba desbalances entre flujo y reflujó mareal, por lo cual se realizaron interpolaciones en cada ciclo para establecer el balance de agua en la sección y posteriormente aplicar la ecuación (3).

Para los datos de sedimento en suspensión y nutrientes de la serie de condiciones de nulo aporte del río, se utilizó el análisis espectral de la serie de tiempo para determinar los principales factores que causan las variaciones a corto plazo de las propiedades medidas. Las estimaciones presentadas se calcularon mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).

b) Distribución espacial

Para contrastar la distribución espacial de las variables fisicoquímicas del estuario del Río Colorado durante condiciones de presencia/ausencia de flujo del río, se utilizaron los datos obtenidos por Hernández-Ayón (1990) en marzo de 1990 como representativos de las condiciones de no aporte de agua por el río o condiciones "normales" del estuario. Para que la comparación entre los dos escenarios fuera mas precisa, se utilizaron los

datos correspondientes a las estaciones comunes a ambos muestreos. A estos datos se les aplico una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis de una vía para determinar si existen diferencias significativas entre los dos eventos.

4. RESULTADOS.

4.1. VARIABILIDAD TEMPORAL.

Para efectos de abreviación, de aquí en adelante la serie de verano de 1992 será referida como la serie de 1992 y la serie de primavera de 1993 como la serie de 1993. Debido a que no existe una variación temporal de carácter estacional, tanto en las descargas del río como en los niveles de nutrientes (Hernández-Ayón *et al.*, 1993), las diferencias temporales al hacer las comparaciones entre ambas fechas son mas de carácter interanual y mas dependientes de los eventos de descarga del río a la zona del delta. En otras palabras, las diferencias en las características hidrológicas del sistema en ambas fechas no son provocadas por cambios en la estacionalidad. De hecho, las diferencias entre ambas fechas se deben a la presencia y ausencia de la descarga fluvial.

4.1.1. Corrientes de marea.

Para la serie de 1992, la velocidad superficial varió de -2.10 a 2.0 m/s y la velocidad en fondo varió de -1.96 a 2.15 m/s. En la serie de 1993, únicamente se realizaron mediciones superficiales (al 20 % de la profundidad), debido a problemas logísticos. En este período la velocidad varió entre -2.5 y 1.47 m/s; lo anterior denota que la velocidad superficial en reflujó es mayor en la serie de 1993 debido a los efectos de la descarga del río, y durante el flujo son menores, *i.e.* el río atenúa la intensidad del flujo asociado a la marea.

Para el cálculo de la descarga $Q(t)$, se promedió la velocidad superficial con la de fondo (en la serie de 1992). Los valores promedio máximos de velocidad en flujo y refluo fueron de -1.96 y 2.08 m/s respectivamente, siendo más intensas las velocidades en condiciones de mareas vivas que de mareas muertas.

4.1.2. Salinidad y temperatura.

En la tabla I se muestran los valores máximos, mínimos, promedios y desviación estándar, en la superficie y fondo, de salinidad y temperatura, observadas en la estación A durante las series de 1992 y 1993.

En la serie de 1992, la salinidad en superficie varió de 30.20 a 40.90 ‰ con una media de 36.6 ‰ y la temperatura varió entre 21.20 y 34.0°C, con un valor promedio de 28.90°C. En el fondo la salinidad varió entre 29.50 y 41.30 ‰, con valor promedio de 36.75 ‰. La temperatura varió entre 21.80 y 31.20°C con una media de 28.63°C.

Debido a la improvisada salida de emergencia en la serie de 1992, se presentaron problemas logísticos y únicamente fue posible hacer mediciones en la superficie. La salinidad varió entre 0.36 y 14.29 ‰ con una media de 2.97 ‰, por efecto de la descarga del río. La temperatura osciló entre 18.0 y 24.5°C con una media de 21.11°C.

Se obtuvieron los promedios diarios de salinidad y temperatura para las series de 1992 y 1993: los valores superficiales para la serie de 1992 variaron entre 35.96 y 38.45 ‰, con una media de 36.65 ‰, y de 27.69 a 29.62°C con una media de 28.8°C; en el fondo, la salinidad y la temperatura variaron de 36.02 a 38.85 ‰, con una media de

Tabla I. Valores máximos, mínimos, promedio y desviación estándar para las variables medidas durante las series de tiempo de 1992 y 1993 en la estación A. Las concentraciones de nutrientes y sedimento en suspensión son superficiales.

Serie 1992				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.
Salinidad (‰)				
superficie	30.2	40.9	36.61	1.23
fondo	29.5	41.3	36.75	1.21
Temperatura(°C)				
superficie	21.2	34	28.9	1.51
fondo	21.8	31.2	28.63	1.06
NO ₂ ⁻ (μM)	0.04	6.64	1.59	1.32
NO ₃ ⁻ (μM)	4	51.02	29.31	10.95
PO ₄ ³⁻ (μM)	0.67	6.15	2.24	1.14
SiO ₂ (μM)	29.5	146.6	63.91	19.92
SST (g/l)	0.05	5.64	1.64	1.44
SSI (g/l)	0.05	5.21	1.49	1.33
SSO (g/l)	0	0.89	0.16	0.14
Serie 1993				
Salinidad (‰)	0.36	14.3	2.97	3.44
Temperatura(°C)	18	24.5	21.11	0.93
NO ₂ ⁻ (μM)	0.94	3.13	2.21	0.53
NO ₃ ⁻ (μM)	12.77	33.41	22.26	4.28
PO ₄ ³⁻ (μM)	0.8	3.2	1.83	0.64
SiO ₂ (μM)	24.3	314.1	137.14	91.29
SST (g/l)	0.05	4.32	1.2	1.16
SSI (g/l)	0.05	4.12	1.12	1.1
SSO (g/l)	0	0.26	0.08	0.07

36.84 ‰, y de 27.75 a 30.17°C, con un promedio de 28.67°C. En la serie de 1993 los promedios superficiales variaron entre 0.90 y 5.68 ‰, con una media de 3.09 ‰ y de 20.58 a 21.37°C con una media de 21.12°C.

4.1.3. Sedimento en suspensión.

En la tabla I se muestran los resultados correspondientes al sedimento en suspensión total (SST), inorgánico (SSI) y orgánico (SSO) para las series de 1992 y 1993. En la serie de 1992, la concentración de SST varió de 0.05 a 5.64 g/l con una media de 1.640 g/l, el SSI de 0.05 a 5.21 g/l con un valor promedio de 1.490 g/l y la concentración de SSO de 0.0 a 0.89 g/l con una media de 0.160 g/l, constituyendo esta última fracción alrededor del 10% del SST. En la serie de 1993, el SST varió entre 0.05 y 4.32 g/l, con un valor promedio de 1.199 g/l; el SSI entre 0.05 y 4.12 g/l, con un promedio de 1.123 g/l; el SSO entre 0.0 y 0.26 g/l con un promedio de 0.08 g/l. Como se puede apreciar, aunque la influencia de la descarga del río es notoria, ésta no afectó grandemente a la concentración de sedimento en suspensión en el estuario: no se observa una marcada diferencia en la concentración de sedimento en suspensión entre ambas series, con excepción del SSO cuyos valores (máximo y promedio) fueron mucho mayores en 1992. Sin embargo, al aplicar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis no se encontraron diferencias significativas entre series para los tres constituyentes.

4.1.4. Nutrientes.

En la tabla I se presentan los valores máximos, mínimos y promedios de nutrientes, en la estación A, para las series de 1992 y 1993.

Durante la serie de 1992, la concentración de NO_2^- varió de 0.04 a 6.64 μM , con un valor promedio de 1.59 μM ; los NO_3^- de 4.00 a 51.02 μM , con una media de 29.31 μM , el PO_4^{3-} entre 0.67 y 6.15 μM , con una media de 2.24 μM ; el SiO_2 entre 29.5 y 146.6 μM , con un valor promedio de 63.91 μM .

Para la serie de 1993, la concentración de NO_2^- varió entre 0.94 a 3.13 μM , con una media de 2.21 μM , el NO_3^- entre 12.77 y 33.41 μM , con una media de 22.26 μM , el PO_4^{3-} entre 0.80 y 3.20 μM , con una media de 1.83 μM , y el SiO_2 entre 24.3 y 314.1 μM , con una media de 137.42 μM .

Al comparar los promedios de las dos series, se observa que las concentraciones de NO_2^- y SiO_2 son mayores en 1993 que en 1992 y de manera inversa para el PO_4^{3-} y NO_3^- .

4.1.5. Flujos de agua, sedimento y nutrientes.

En la tabla II se presentan los valores máximos de descarga de agua, flujos de sedimento en suspensión y nutrientes para las series de 1992 y 1993.

A partir de la ecuación (1), se calculó la descarga de agua para el flujo (Q_f) y reflujos (Q_r) de marea. Durante la serie de 1992, la descarga en reflujos presentó un valor promedio de -2531.74 m^3/s alcanzando un valor máximo de Q_r igual a -7,762.10 m^3/s . En

Tabla II. Valores máximos en flujo y reflujo de descarga de agua, sedimento en suspensión (total, inorgánicos y orgánicos) y nutrientes, para ambas series de tiempo.

Serie 1992		
	Flujo	Reflujo
Q (m^3s^{-1})	6,666.62	-7,762.10
SST (kg s^{-1})	25,443.71	-23,799.23
SSI (kg s^{-1})	22,796.78	-21,867.55
SSO (kg s^{-1})	3,868.01	-1,931.68
$\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ (g s^{-1})	1,775.7	-3,059.86
PO_4^{3-} (g s^{-1})	813.37	-561.17
SiO_2	11,922.57	-19,978.05
Serie 1993		
	Flujo	Reflujo
Q (m^3/s)	4,936.39	-8,157.87
SST (Kg/s)	10,425.16	-24,488
SSI (Kg/s)	9,747.39	-22,767
SSO (Kg/s)	680.23	-1,721
$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ (g/s)	8,318.33	-11,941.86
PO_4^{3-} (g/s)	839.88	-2,047.47
SiO_2 (g/s)	25,798.22	-62,828.39

el flujo, el valor promedio de Q_f fue de $1890.47 \text{ m}^3/\text{s}$, con un valor máximo de Q_f en la serie de $6,666.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la serie de 1993, el valor promedio de Q_r fue de $-2,605.06$, con un valor máximo de $-8157.87 \text{ m}^3/\text{s}$. La descarga en flujo presento un valor promedio de $1,247.43 \text{ m}^3/\text{s}$, alcanzando un valor máximo de $4936.39 \text{ m}^3/\text{s}$, resaltando el evento de avenidas del Río Colorado, el cual incrementa el valor de Q_r . Asimismo, mientras que las diferencias entre los valores máximos de Q_r y Q_f para la serie de 1992 no son muy grandes, durante condiciones de descarga del río Q_r llega a ser casi el doble del valor de Q_f .

Los flujos máximos de material en suspensión durante el reflujos y flujo mareal respectivamente, para la serie de 1992, fueron: de $-23,799.23$ y $25,443.72 \text{ Kg/s}$ para el caso de SST; de $-21,867.55$ y $22,796.78 \text{ Kg/s}$ para SSI y de $-1,931.68$ y $3,868.01 \text{ Kg/s}$ para SSO. Los respectivos flujos de nutrientes variaron de $-3,059.86$ a $1,775.7 \text{ g/s}$ para los $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$; de -561.17 a 813.37 g/s para los PO_4^{3-} , y de $-19,978.05$ a $11,922.57 \text{ g/s}$ para los SiO_2 .

Los flujos máximos de material en suspensión en 1993 fueron de $-24,488$ y $10,425.16 \text{ Kg/s}$ para SST; de $-22,767$ y $9,747.39 \text{ Kg/s}$ para SSI y de $-1,721$ a 680.23 kg/s para SSO. Los flujos máximos de nutrientes encontrados, fueron de $-11,941.86$ y $8,318.33 \text{ g/s}$ para los $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$; de $-2,047.4$ y 839.88 g/s para los PO_4^{3-} , y de $-62,828.39$ y $25,798.22 \text{ g/s}$ para los SiO_2 , siendo estos últimos mucho mayores (por un factor de 3) que en 1992.

4.1.6. Transporte neto de sedimentos.

Con el fin de estandarizar la perspectiva de medición entre los varios flujos a lo largo de la serie, el transporte de material se estableció en base a ciclos de marea semidiurnos, iniciando en el flujo y terminando en el reflujo. En la tabla III se presenta el transporte de sedimento (total, inorgánico y orgánico), para los ciclos de marea analizados, en donde se puede apreciar que en 1992 el estuario exportó sedimento en los ciclos 1, 3, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18 y 20 e importó en los ciclos 2, 4, 7, 8, 13, 15, 17, 19, 21, 22, 23, 24, 25 y 26. Aún cuando el estuario importó sedimento en más ciclos de los que exportó, el transporte neto a lo largo de toda la serie fué predominantemente hacia el Alto Golfo con 45.23 toneladas de SST de las cuales 42.79 corresponden al SSI y 2.44 al SSO. En la serie de 1993 el sistema exportó a lo largo de toda la serie.

4.1.7. Transporte neto de nutrientes.

En la tabla IV se muestra el transporte de nutrientes, en la cual se aprecia que en la serie de 1992 el estuario exporta $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ durante todos los ciclos analizados. Para los PO_4^{3-} el comportamiento es similar importando solamente durante los ciclos 14 y 15 que corresponden a la marea más viva. Para el SiO_2 el comportamiento difiere, importando en los ciclos 2, 3, 11, 17 y 18, aunque en cantidades menores a las que exporta. En la serie de 1993, al igual que para el sedimento en suspensión, el estuario exporta nutrientes en todos los ciclos analizados.

Tabla III. Transporte neto en Ton/ciclo de marea de SST, SSI y SSO, para las series de 1992 y 1993.

Serie 1992 Ciclo	SST			SSI			SSO		
	Flujo	Reflujo	Neto	Flujo	Reflujo	Neto	Flujo	Reflujo	Neto
1	0.93	-1.09	-0.16	0.79	-0.92	-0.13	0.14	-0.17	-0.03
2	2.94	-2.12	0.82	2.51	-1.8	0.71	0.43	-0.32	0.11
3	0.57	-0.64	-0.07	0.46	-0.54	-0.08	0.11	0.1	0.01
4	3.4	-2.14	1.26	2.88	-1.83	1.05	0.52	-0.31	0.21
5	2.27	-3.34	-1.07	1.96	-2.94	-0.98	0.31	-0.4	-0.09
6	8.88	-10.92	-2.04	8.33	-9.72	-1.4	0.55	-1.2	-0.65
7	5.31	-4.64	0.66	4.64	-4.13	0.52	0.66	-0.52	0.15
8	26.58	-20.44	6.14	23.7	-17.99	5.72	2.87	-2.45	0.42
9	10.03	-19.53	-9.5	8.7	-17.87	-9.17	1.33	-1.66	-0.32
10	35.07	-49.36	-14.29	31.86	-45.31	-13.45	3.2	-4.05	-0.84
11	11.76	-15.46	-3.7	10.41	-12.26	-1.85	1.34	-3.2	-1.85
12	69.89	-84.55	-14.66	62.87	-77.57	-14.71	7.02	-6.98	0.43
13	32.65	-28.92	3.73	29.49	-26.79	2.7	3.16	-2.13	1.03
14	31.53	-54.01	-22.48	29.48	-50.39	-20.91	2.05	-3.62	-1.57
15	36.89	-28.22	8.66	30.08	-26.18	3.9	6.8	-2.04	4.76
16	60.71	-86.16	-25.45	56.99	-79.13	-22.14	3.72	-7.03	-3.31
17	34.98	-32.66	2.32	33.08	-30.23	2.85	1.9	-2.42	-0.52
18	45.08	-56.94	-11.87	41.31	-51.52	-10.21	3.76	-5.42	-1.66
19	29.62	-23.19	6.44	26.96	-21.24	5.72	2.66	-1.95	0.71
20	29.23	-44.32	-15.09	25.87	-39.01	-13.14	3.36	-5.31	-1.95
21	14.39	-10.57	3.83	13	-9.48	3.52	1.39	-1.09	0.3
22	35.58	-16.65	18.93	32.99	-14.87	18.12	2.59	-1.78	0.81
23	19.72	-11.42	8.3	17.49	-9.71	7.78	2.23	-1.72	0.52
24	13.87	-9.06	4.8	12.18	-8.01	4.17	1.68	-1.05	0.63
25	12.41	-4.6	7.81	11.44	-4.2	7.23	0.97	-0.4	0.57
26	3.95	-2.5	1.45	3.65	-2.27	1.38	0.3	-0.23	0.08

Tabla III. (Continuación)...

Serie 1993			SSI			SSO			
Ciclo	Flujo	Reflujo	Neto	Flujo	Reflujo	Neto	Flujo	Reflujo	Neto
1	20	-78	-57	19	-73	-54	1.4	-4.9	-3.5
2	27	-34	-7.5	25	-33	-7.5	1.6	-2.1	-0.5
3	14	-38	-24	13	-36	-23	0.8	-2	-1.2
4	19	-25	-6	18	-23	-5.4	1	-1.6	-0.6
5	4.7	-21	-16	4.4	-20	-15	0.3	-1.3	-1
6	4.5	-10	-5.8	4.1	-3.5	-3.1	0.3	-0.7	-0.4
7	0.4	-3.6	-3.2	0.4	-3.5	-3.1	0	-0.1	-0.1
8	0.2	-1.3	-1.1	0.2	-1.2	-1	0	-0.1	-0.1

Tabla IV. Transporte neto de $N-NO_2^- + NO_3^-$, $P-PO_4^{3-}$ y $Si-SiO_2$ en g/ciclo de marea, para las series de 1992 y 1993.

Serie 1992									
Ciclo	$NO_2^- + NO_3^-$			PO_4^{3-}			SiO_2		
Ciclo	Flujo	Reflujo	Neto	Flujo	Reflujo	Neto	Flujo	Reflujo	Neto
1	1,799.2	-1,829.9	-30.7	136.7	-141.6	-4.9	6,486.3	-7,509.7	-1,023.4
2	3,132.8	-3,461.3	-328.5	249.4	-289.5	-40.1	14,361.3	-13,703.7	657.6
3	1,092.5	-1,445.9	-363.4	100.7	-112.6	-11.8	4,930.6	-4,809.2	121.4
4	1,909.1	-3,785.9	-1,876.8	200.9	-282.4	-81.5	9,855.5	-10,925.9	-1,070.4
5	1,765.9	-3,427.1	-1,661.1	236.8	-393.9	-157.1	7,574.6	-10,329.9	-2,755.3
6	1,782.2	-6,647.8	-4,865.6	416.3	-613.7	-197.4	12,665.7	-15,685.6	-3,019.9
7	1,473.6	-3,799.1	-2,325.5	234.4	-395.9	-161.5	8,408.4	-14,459.0	-6,050.6
8	1,942.1	-5,945.4	-4,003.3	532.7	-798	-265.3	19,265.3	-22,073.4	-2,808.1
9	2,973.9	-6,467.5	-3,493.6	505.3	-682.7	-177.4	42,153.0	-50,770.9	-8,617.9
10	3,173.3	-9,096.6	-5,923.3	746.7	-888.7	-142	45,533.9	-62,860.5	-17,326.6
11	2,294.6	-4,411.4	-2,116.8	272.8	-675.3	-402.5	19,741.4	-18,917.3	824.1
12	4,640.2	-11,624.5	-6,984.33	1,378.3	-2,079.1	-700.8	33,825.7	-36,851.8	-3,026.1
13	3,320.2	-6,677.4	-3,357.2	859.3	-1,143.8	-284.5	16,744.3	-21,872.6	-5,128.3
14	2,755.1	-7,820.1	-5,065.0	1,407.2	-1,371.4	35.8	19,489.6	-23,961.0	-4,299.6
15	4,004.3	-6,809.2	-2,804.9	1,098.2	-1,096.8	1.4	21,164.6	-21,961.0	-796.4
16	6,197.1	-11,368.2	-5,171.1	1,583.3	-1,875.4	-292.1	38,628.3	-44,323.1	-5,694.8
17	5,151.4	-7,079.5	-1,928.1	1,362.9	-1,243.7	119.2	23,844.3	-23,066.4	777.9
18	5,734.6	-9,804.7	-4,070.1	1,543.8	-1,882.4	-338.6	29,404.0	-29,262.9	141.1
19	4,112.9	-6,298.7	-2,185.8	1,322.0	-1,363.0	-41	18,779.2	-19,061.2	-282
20	6,209.8	-9,921.7	-3,711.9	1,777.9	-1,835.6	-57.7	30,159.1	-35,436.1	-5,277.0
21	5,212.8	-5,996.5	-783.7	1,384.4	-1,530.6	-146.2	20,715.7	-23,015.7	-2,300.0
22	6,313.7	-9,550.4	-3,236.7	2,719.9	-1,632.5	1,087.4	27,940.1	-29,189.5	-1,249.6
23	4,691.6	-6,608.2	-1,916.6	437.6	-451.5	-13.9	28,000.1	-26,707.9	1,292.1
24	4,309.5	-6,864.7	-2,555.2	412.9	-581.6	-168.7	18,157.8	-19,605.9	-1,448.1
25	5,533.2	-7,110.2	-1,577.0	894.5	-913.9	-19.4	19,789.7	-20,497.1	-707.4
26	3,791.4	-5,384.4	-1,593.0	609.8	-892.3	-282.5	12,821.8	-15,691.2	-2,869.4

Tabla IV. (Continuación)....

Serie 1993									
Ciclo	NO ₂ +NO ₃			PO ₄ ³⁻			SiO ₂		
	Flujo	Reflujo	Neto	Flujo	Reflujo	Neto	Flujo	Reflujo	Neto
1	18,549.78	-42,624.61	-24,074.83	2,587.15	-6,067.07	-3,479.92	26,073.78	-46,062.11	-19,988.33
2	19,369	-45,303.82	-25,934.82	2,067.09	-6,448.04	-4,380.45	19,967.43	-50,643.6	-30,676.17
3	11,578.79	-35,991.02	-24,412.23	704.38	-2,606.57	-1,902.19	61,465.22	-271,110.1	-209,644.9
4	8,260.84	-19,504.51	-11,243.67	520.13	-1,409.37	-889.24	64,975.62	-244,194.2	-179,218.6
5	4,717.53	-23,998.6	-19,281.07	371.19	-3,226	-2,854.81	57,859.77	-264,455.5	-206,595.8
6	9,348.81	-24,263.32	-14,914.51	1,188.47	-3,186.17	-1,997.7	77,503.11	-201,845.4	-124,338.2
7	2,638.97	-19,559.12	-16,920.15	236.74	-2,645.55	-2,408.81	26,016.08	-179,120.6	-153,104.6
8	3,236.92	-17,773.18	-14,536.26	402.96	-2,262.71	-1,859.75	5,664.79	-29,285.4	-23,620.6

4.2. VARIABILIDAD ESPACIAL

4.2.1. Distribución espacial.

En la tabla V se muestran los resultados correspondientes al muestreo espacial del 16 de marzo de 1993. Los valores de salinidad variaron desde 0.67 ‰ hasta 29.598 ‰ en superficie y desde 0.74 ‰ hasta 35.872 ‰ en fondo, con los valores mínimos correspondiendo a las estaciones 13, 14 y 15 (en la cabeza del estuario), y los máximos a las estaciones 1, 2 y 3 en la zona oceánica adyacente (Fig. 4). De manera general, los valores de salinidad tendieron a ser menores en el canal Baja California en superficie y fondo, con respecto al canal Sonora. La concentración promedio de NO_2^- fue de 1.98 μM (0.85-2.49 μM) en superficie y de 1.04 μM (0.12-2.54 μM) en fondo; la concentración promedio de NO_3^- fue de 15.85 μM (5.89-30.45 μM) en superficie y de 8.38 μM (0.90-20.75 μM) en fondo; para el PO_4^{3-} el promedio en superficie fue de 1.60 μM (1.02-3.10 μM) y en fondo de 1.34 μM (0.53-2.30 μM); para los SiO_2 el promedio en superficie fue de 172.64 μM (74.4-277.9 μM) y de 89.24 μM (10.5-334.7 μM) en fondo. De manera general, la distribución de nutrientes tanto en superficie y fondo sigue una tendencia inversa a la salinidad, con los valores máximos correspondientes a las estaciones en la cabeza del estuario. Asimismo, los nutrientes presentan valores ligeramente mayores en el canal Baja California que en el canal Sonora, disminuyendo hacia la zona marina (a excepción del PO_4^{3-} en superficie, cuyo valor máximo en toda la zona correspondió a la estación 4).

Tabla V. Concentración de nutrientes y salinidad en superficie y fondo para las estaciones del muestreo espacial del 16 de marzo de 1993.

Estación	Profundidad (m)	NO ₂ ⁻ (μM)	NO ₃ ⁻ (μM)	PO ₄ ³⁻ (μM)	SiO ₂ (μM)	Salinidad (‰)
1	superficie	0.85	5.89	1.02	74.4	29.459
1	4.0	0.12	0.90	0.53	10.5	35.872
2	superficie	1.55	10.85	1.39	143.0	20.598
2	4.0	0.40	3.50	0.97	23.2	35.037
3	superficie	1.24	8.88	1.17	108.3	24.501
3	5.0	0.33	3.01	0.89	16.7	35.283
4	superficie	1.92	16.24	3.10	219.9	14.580
4	2.7	0.74	4.58	1.02	66.9	29.136
5	superficie	2.18	15.02	1.89	183.0	12.270
5	5.0	0.77	3.36	1.81	23.1	33.270
6	superficie	2.18	16.19	2.47	187.0	13.259
6	5.0	0.70	4.90	0.91	29.3	34.310
7	superficie	1.80	12.50	1.68	145.2	14.429
7	2.2	0.59	5.19	0.99	35.2	33.323
8	superficie	2.21	17.00	1.82	245.5	10.666
8	4.0	0.77	4.25	1.00	33.7	33.818
9	superficie	2.15	15.56	1.90	99.2	9.191
9	5.0	1.07	9.94	1.23	74.5	30.046
10	superficie	2.22	16.77	1.34	200.9	9.317
10	5.0	1.12	13.08	1.90	92.1	17.491
11	superficie	2.49	18.76	1.95	91.8	6.371
11	5.0	0.87	6.16	1.13	58.0	31.432
12	superficie	2.37	12.34	2.00	175.1	5.851
12	5.0	0.87	9.33	1.88	48.6	28.563
13	superficie	1.70	21.05	1.06	191.1	1.100
13	5.0	2.23	16.13	1.98	200.6	7.356
14	superficie	2.39	20.27	1.30	247.3	0.744
14	5.0	2.54	20.75	1.50	291.6	0.814
15	superficie	2.44	30.45	1.10	277.9	0.674
15	5.0	2.53	20.59	2.30	334.7	0.766

4.2.2. Fuentes de nutrientes.

En la tabla VI se muestra la concentración de nutrientes para cada zona de muestreo (Fig. 5) y de los experimentos de liberación/remoción de nutrientes. El valor máximo de NO_2^- corresponde a la muestra de agua intersticial colectada durante el flujo de marea, con $5.34 \mu\text{M}$; el valor mínimo para el mismo nutriente correspondió al canal principal del estuario durante el período de aguas quietas de flujo con $<0.0 \mu\text{M}$. Para los NO_3^- el valor máximo correspondió al agua intersticial ($28.23 \mu\text{M}$) durante el reflujó de marea; el valor mínimo correspondió al canal principal ($1.16 \mu\text{M}$) durante el período de aguas quietas de flujo. El valor máximo de PO_4^{3-} se presentó en el extremo final del canal de marea pequeño (CMCHF) ($4.39 \mu\text{M}$) durante el reflujó y el valor mínimo correspondió al mismo lugar (CMCHF), pero durante el flujo ($0.94 \mu\text{M}$). El valor máximo de SiO_2 se presentó en el canal de marea ($352.4 \mu\text{M}$) durante el flujo y el mínimo se presentó en el canal principal ($223.4 \mu\text{M}$) durante el reflujó. Es importante señalar que la concentración del SiO_2 en particular, en todas las muestras, fue significativamente alta.

Tabla VI. Concentración de nutrientes para las diferentes zonas de muestreo y durante los experimentos de liberación/remoción del 22 de mayo de 1993.

Muestra	NO ₂ ⁻ (μM)	NO ₃ ⁻ (μM)	PO ₄ ³⁻ (μM)	SiO ₂ (μM)
Estuario (flujo)	2.07	20.27	2.33	340.5
Estuario (slack)	0.00	1.16	1.72	227.8
Estuario (reflujo)	0.10	2.08	2.74	223.4
Canal marea (flujo)	2.07	17.62	2.60	352.4
Canal marea (ref.)	0.29	2.87	2.31	267.1
CMCHB (flujo)	0.13	4.85	1.51	247.4
CMCHF (flujo)	0.18	1.47	0.94	259.5
CMCHB (reflujo)	0.42	1.87	2.84	230.6
CMCHF (reflujo)	0.30	2.94	4.39	242.6
A.Interst. (flujo)	5.34	23.14	1.66	267.5
A.Interst.(reflujo)	0.04	28.23	1.69	273.2
Grietas desecación	0.12	6.54	2.50	234.3
Pastos inundados	0.26	5.03	3.26	228.0
Pastos inund.(C.M.)	0.53	11.90	2.96	264.0
Canal marea (p.i.)	0.54	10.45	4.18	296.2
Exp.-1(1) inicio	2.12	17.53	1.79	299.5
Exp.-1(2) 30 min.	4.11	18.51	2.97	248.4
Exp.-1(3) 60 min.	3.21	19.52	3.38	300.8
Exp.-1(4) 90 min.	3.29	18.61	3.41	292.0

5. DISCUSION.

5.1. Factores que afectan la variabilidad temporal de los materiales

5.1.1. Corrientes de marea.

En la figura 6(a, b y c) se observa el comportamiento de la velocidad de las corrientes de marea a lo largo de las series de 1992 y 1993. De acuerdo al patrón de variabilidad de las corrientes a lo largo de un ciclo de marea semidiurno (Fig. 6b), se puede inferir que las características de la onda de marea son de una onda de marea mezclada (entre estacionaria y progresiva), con valores máximos de corriente cerca de los puntos nodales y valores mínimos o cercanos a cero en las crestas y valles de la onda (Ketchum, 1983). Este tipo de relación entre las corrientes y la altura de marea es común encontrarla en algunos estuarios y lagunas costeras como por ejemplo, Laguna Guerrero Negro, Baja California (Postma, 1965), el estuario del Río Ord, Australia (Coleman y Wright, 1978), el de Gironde, Francia (Allen *et al.*, 1980) y North Inlet, EUA (Kjerfve *et al.*, 1981).

El fenómeno mareal descrito anteriormente, para los casos mencionados, se ha atribuido principalmente a los efectos de la fricción de la onda de marea entrante, y la reflejada en la cabeza del estuario, sobre las paredes y lecho del mismo: al sumarse las dos ondas de marea (la entrante y la reflejada en la cabeza del estuario) generan un régimen de velocidad-altura mixto ocasionando que los períodos de aguas quietas, y la inversión en el sentido de la corriente mareal, sucedan una hora (o poco más) después de la marea alta y baja, dependiendo del caso. Las velocidades máximas de la corriente de

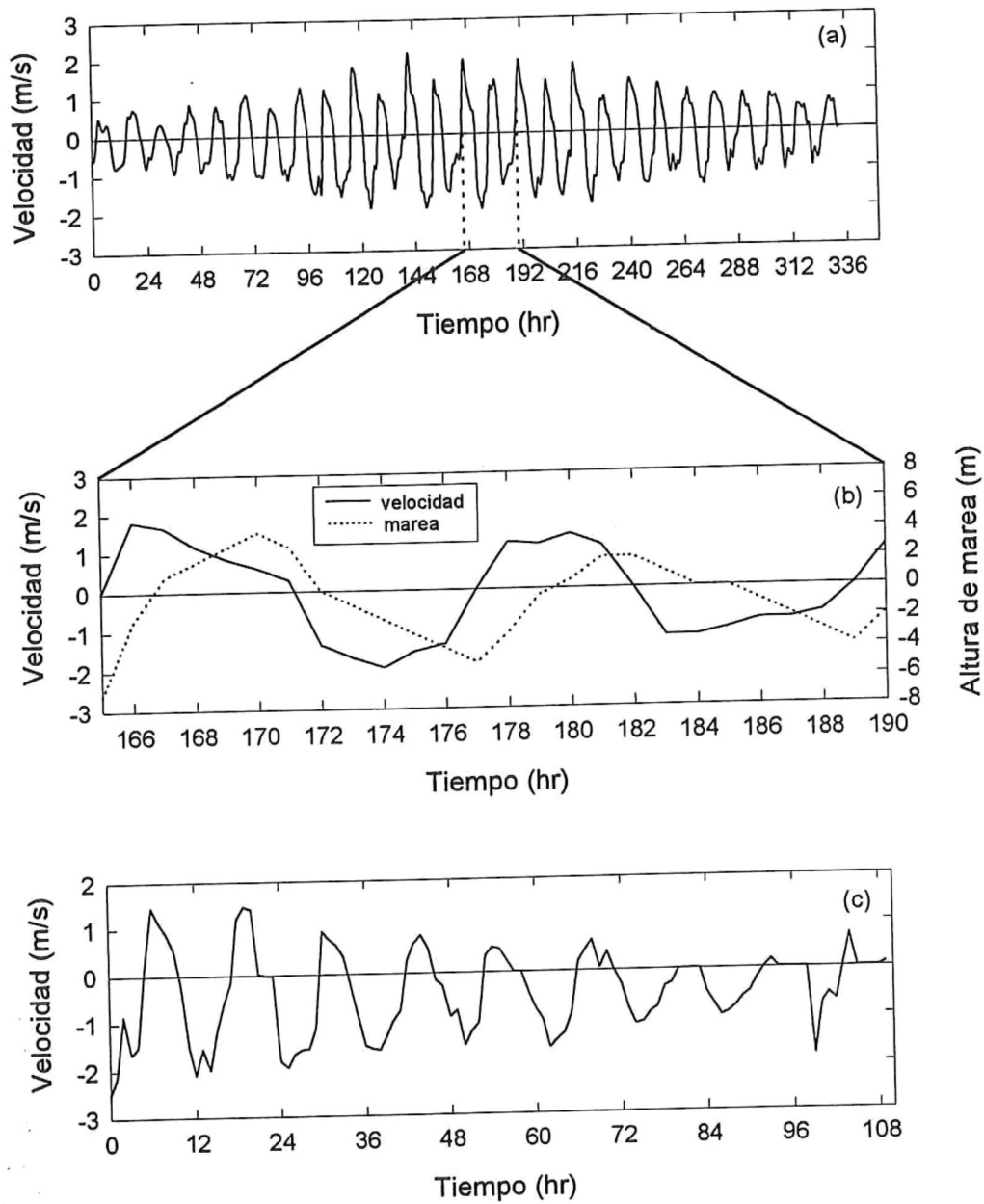


Figura 6. Distribución de velocidades de corriente de marea a lo largo de la serie de (a) 1992 y (c) 1993. Se incluye la relación existente entre la velocidad de corriente y la altura de marea (b) en un ciclo semidiurno de la serie de 1992.

marea se alcanzan justo después de la marea intermedia, y por consiguiente, están asociadas a los niveles altos de la marea en condiciones de flujo y a los niveles bajos en condiciones de reflujó (Pethick, 1984).

Al comparar las observaciones de la marea en la sección A (Fig.4) con respecto a la marea predicha para el Golfo de Santa Clara (aprox. 30 Km al SE del área), se encontró que existe un desfase máximo de aproximadamente dos horas (Fig. 7). Esto puede deberse al retraso de la onda (producto de la distancia entre estos dos puntos) y a efectos de la fricción de la onda con el fondo y las paredes del estuario. Este retraso disminuye progresivamente, hasta cerca de 45 minutos, conforme progresa la marea de muerta a viva. Esta reducción puede ser producto del aceleramiento de la onda al entrar hacia el estuario por efecto del estreñimiento por las paredes del canal, lo que produce una mayor resuspensión de sedimento de fondo (Officer y Nichols, 1980) e incrementa la concentración de sedimento en suspensión en la columna de agua. El efecto de la fricción en la onda de marea, se evidencia por la asimetría en la duración del flujo y reflujó mareal y en la intensidad de las corrientes de marea. Las velocidades máximas se presentan al inicio del reflujó, a diferencia con lo reportado por Zamora-Casas (1993) para la estación situada en el canal Sonora (Fig.4), donde ocurren al inicio del flujo. La duración del flujo y reflujó de marea, para mareas muertas, en algunos casos fue de 7 h para el reflujó y 5 horas para el flujo, aunque la simetría en tiempo también fue observada en esta sección bajo condiciones de mareas vivas.

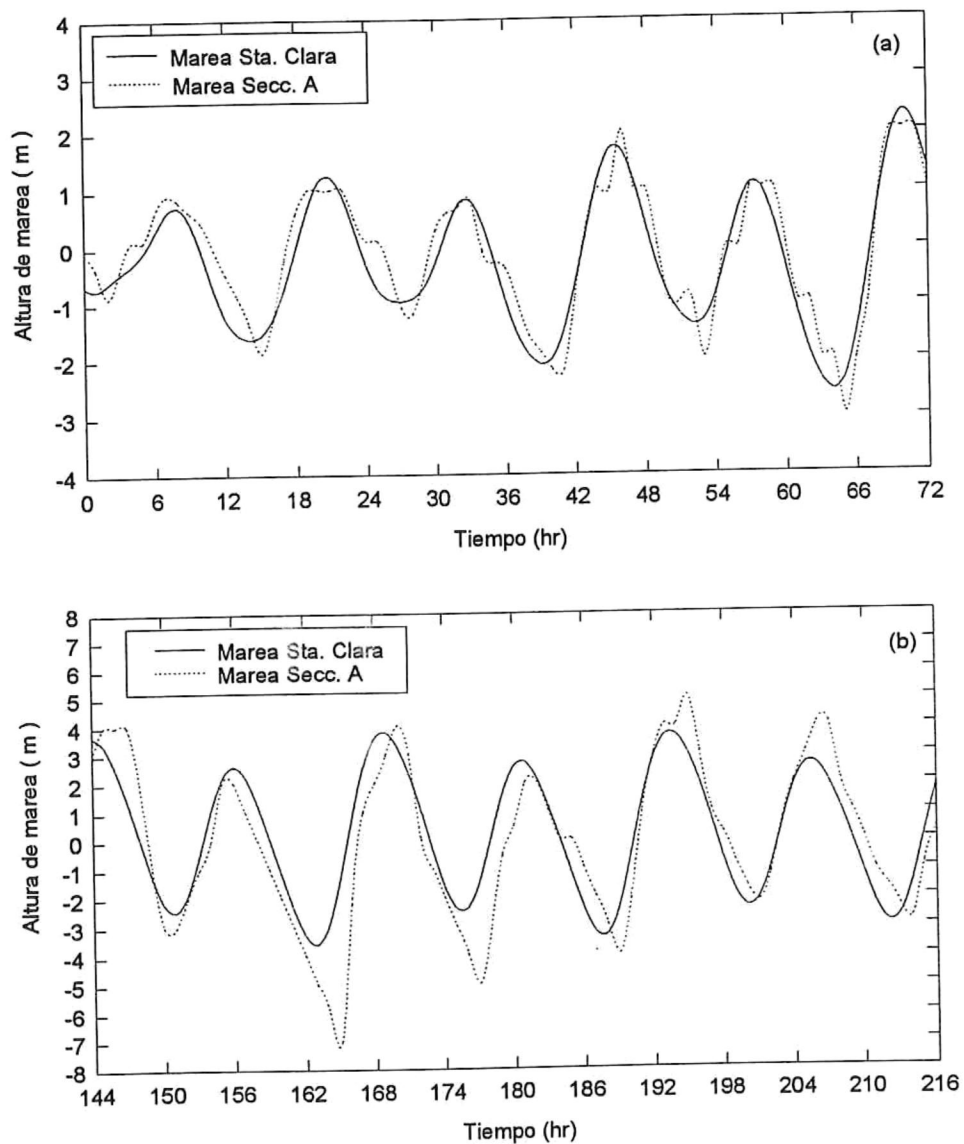


Figura 7. Desfase en tiempo y altura de la onda de marea entre el registro del Golfo de Santa Clara y la medición en la sección A, para (a) mareas muertas y (b) mareas vivas a lo largo de la serie de tiempo de 1992.

En algunos estuarios, las máximas descargas ocurren durante el flujo y la duración de este es menor que el reflujó. En otros estuarios, el comportamiento es inverso. Este comportamiento se ha relacionado directamente con la morfología de la sección transversal del estuario (Shetye y Gouveia, 1992; Aubrey y Speer, 1985). Speer y Aubrey (1985) demostraron que los canales estuarinos estrechos y someros, con secciones transversales rectangulares, generan dominancia de flujo. Sin embargo, en casos como el anterior que presenten adicionalmente planicies de marea a ambos lados del canal profundo, el resultado es la dominancia del reflujó.

Aún bajo estos esquemas, el comportamiento de las corrientes y descargas en el área de estudio no concuerdan completamente con estos dos tipos clásicos de estuarios (los dominados por el flujo y los dominados por el reflujó), ya que si se considera solo la asimetría en la duración del flujo de marea, coincidiría con los dominados por el flujo; pero si se considera la intensidad en las corrientes, coincidiría con los dominados por el reflujó. Esta peculiaridad del sistema bajo estudio puede ser explicada por efectos de la morfología del estuario (Fig.4), debido a que puede existir un desaceleramiento de la corriente del flujo mareal por el choque de los flujos entrantes por el canal de Baja California y el canal Sonora respectivamente; situación que no se presenta en el reflujó, con lo cual se favorece más el esquema de dominancia de reflujó en el sistema y en consecuencia podría caracterizarlo como un exportador neto de materiales hacia el Alto Golfo.

5.1.2. Salinidad y temperatura.

Durante la serie de 1992, la salinidad (Fig. 8a), tanto en superficie como en el fondo presentó una tendencia a disminuir conforme la marea progresaba de mareas muertas a mareas vivas, tendiendo a aumentar de nuevo, en su cambio progresivo hacia mareas muertas. Probablemente lo anterior se debe a que las corrientes de marea durante mareas muertas no son tan fuertes como para mezclar completamente el agua del estuario con la del Alto Golfo. Por otro lado, las altas tasas de evaporación en esta zona (~0.9 m) (Lavín y Organista, 1988; Castro *et al.*, 1994) ocasionan que durante mareas muertas, se presenten salinidades tan altas como 41 ‰. Sin embargo, al irse incrementando el intervalo mareal, las corrientes incrementan su intensidad, permitiendo que haya un mayor intercambio de agua con el mar adyacente, dando lugar a una dilución del agua de la cuenca estuarina por efecto de la mezcla con el agua oceánica (menos salina) del Alto Golfo. Lo anterior se refleja en una disminución de la salinidad de hasta en casi 5 ‰, la cual se lleva a cabo en el período de transición de mareas muertas a vivas, para posteriormente mantenerse alrededor de 36 ‰, tendiendo a aumentar hacia el final de la serie durante las etapas de mareas muertas, cuando las corrientes disminuyen su intensidad y por consiguiente la mezcla, incrementando el tiempo de residencia del agua en la cuenca con lo que se favorece la evaporación y consecuentemente aumentando la salinidad.

De manera general se aprecia la misma tendencia en la temperatura (Fig. 8b), presentando valores altos durante mareas muertas y valores bajos durante mareas vivas.

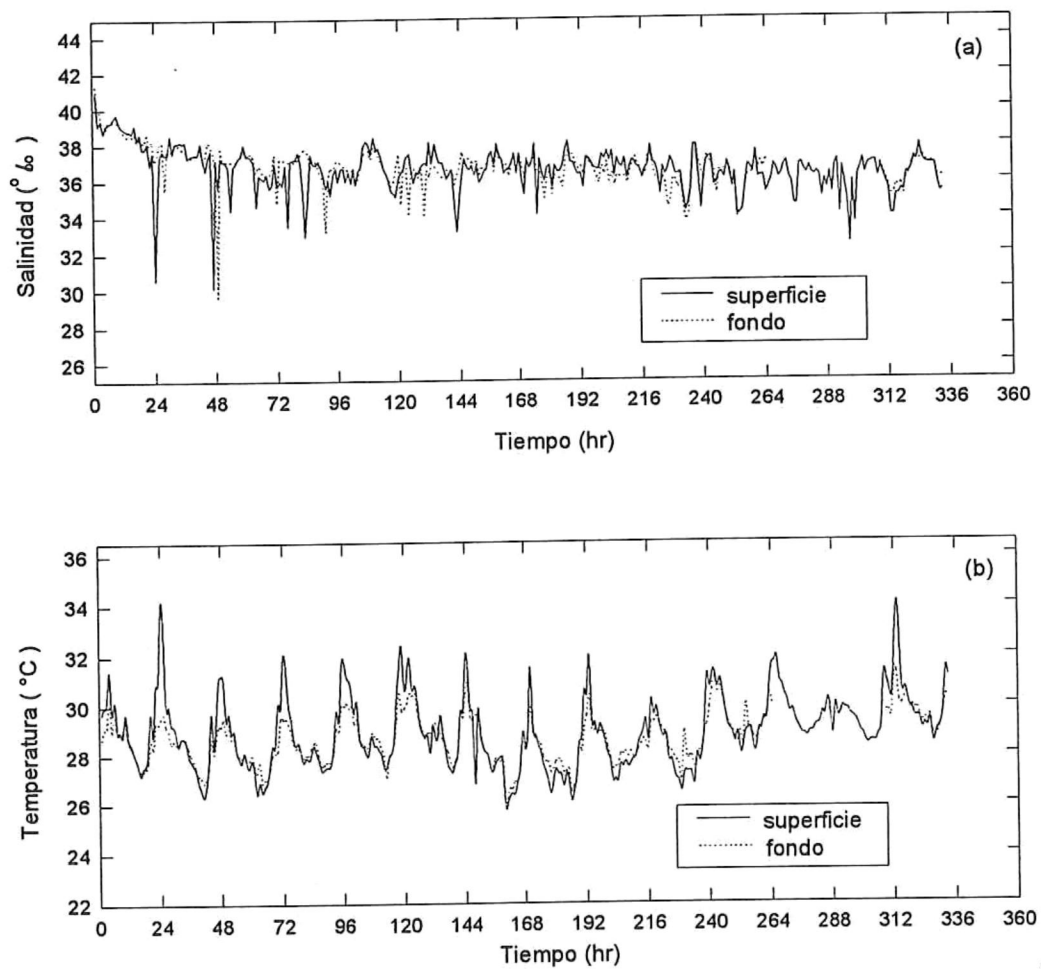


Figura 8. Distribución de (a) salinidad y (b) temperatura en superficie y fondo, a lo largo de la serie de 1992.

Aunada a esta tendencia, se aprecia un comportamiento de período más corto aparentemente relacionado con la marea y a los cambios diurnos de la temperatura del aire. Bowden (1980) menciona que la distribución de la temperatura en un estuario esta determinada primariamente por las temperaturas de las aguas del río y del mar, los procesos de mezcla y el intercambio de calor a través de la interfase aire-superficie del mar. La mayoría de los estuarios que presentan este comportamiento se encuentran localizados en zonas templadas o tropicales, en donde los cambios en la temperatura del aire no son tan amplios como para influir directamente sobre la temperatura del agua del estuario. Sin embargo, en estuarios localizados en zonas donde las variaciones de la temperatura del aire son grandes, la temperatura del agua del estuario dependerá principalmente de la mezcla por mareas y la temperatura del aire. Debido a que los estuarios son más someros que el océano, estos responderan más rápidamente a los cambios en la temperatura del aire, de tal manera que entre más drástico es el cambio en la temperatura ambiental, el estuario experimentará amplias fluctuaciones diurnas, estacionales y anuales que el mar adyacente (Kennish, 1986). En particular, la zona de estudio se caracteriza por tener clima desértico, por lo que se encuentra sujeta a variaciones extremas en la temperatura del aire, con temperaturas máximas promedio entre 46 a 48 °C en los meses de junio a septiembre (Franco *et al.*, 1986), con cambios diurnos hasta de 20 °C en un típico día de verano. Estos cambios tan drásticos en la temperatura del aire pueden estar regulando, en conjunto con los cambios de marea, la temperatura superficial del agua en la cuenca. Por ejemplo, los valores máximos de

temperatura consistentemente se presentaron alrededor del medio día (coincidiendo con el máximo de irradiación solar) y los mínimos durante la madrugada (coincidiendo con las mínimas temperaturas del aire), con un cambio de hasta 6°C en un período de 12 horas. El efecto de esta variación de la temperatura del aire, es más marcada durante los períodos de mareas muertas, en donde la mezcla por corrientes de marea no es tan fuerte y en consecuencia la advección de agua marina es menor, permitiendo un mayor calentamiento de las aguas superficiales de la cuenca. En contraste, durante mareas vivas la temperatura disminuye en respuesta al aumento en la mezcla con el agua marina, provocada por el incremento en la intensidad de las corrientes de marea, aunque el patrón de variación en la temperatura del agua en la cuenca se sigue manteniendo.

En la serie de 1993 el flujo de agua dulce del río se evidencia en el patrón de comportamiento de la salinidad a lo largo de la serie de tiempo (Fig. 9a). Aquí se aprecia que las fluctuaciones en la salinidad se relacionan directamente con la marea, mostrando una tendencia a aumentar con el flujo y a disminuir durante el refluo, presentando de manera general valores mayores durante mareas vivas, producto de la mezcla por las fuertes corrientes de marea. Conforme progresa la marea hacia muertas, las corrientes de marea disminuyen en intensidad, y por lo tanto, disminuye la mezcla del agua estuarina con la del Alto Golfo. Aunque no se tienen valores de salinidad en fondo durante la serie, es posible inferir que este comportamiento está relacionado a un ciclo de estratificación-desestratificación de la columna de agua, como lo mencionan Uncles *et al.*

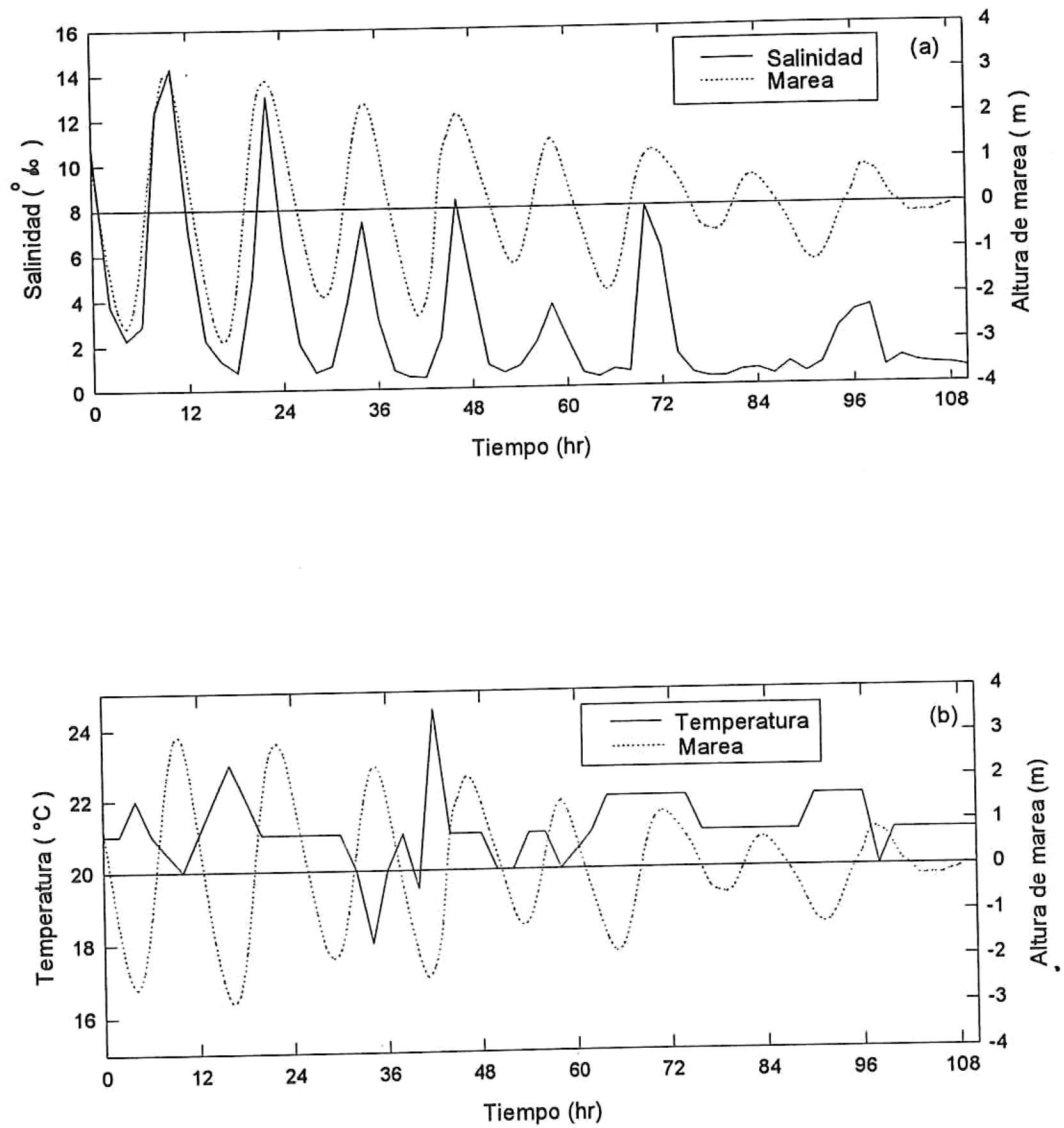


Figura 9. Distribución de (a) salinidad y (b) temperatura a lo largo de la serie de 1993.

(1990), en donde las mareas muertas favorecen la formación de una columna de agua estratificada a causa de las corrientes lentas, y por lo tanto una mezcla vertical débil.

La temperatura superficial durante la misma serie de tiempo (Fig. 9b) no fue tan variable como la salinidad, debido a que durante esta serie, el efecto de la mezcla entre las aguas del río y del alto Golfo dominan sobre los efectos de la temperatura del aire. Además, durante este evento las temperaturas del aire fueron similares a la temperatura ambiental, a diferencia de lo que se observó en la serie de 1992 (Fig 8b) en donde la temperatura del aire tuvo un mayor efecto sobre el comportamiento de la temperatura del agua del estuario.

Con el fin de tener una representación más clara de las tendencias generales de los valores de salinidad y temperatura en ambas series, se graficaron los promedios diarios para las series de 1992 (Figs. 10a,b) y 1993 (Figs. 11a,b). Analizando las dos series de tiempo de salinidad, se aprecia que existen tres procesos principales que contribuyen a la variabilidad de la salinidad en la sección, estos son: la mezcla por marea, las variaciones en la temperatura del aire (intercambio de calor entre el aire y la superficie del agua) y la influencia de la descarga del río, los dos primeros afectan principalmente a la serie de 1992 y el último a la serie de 1993. En la serie de 1992 (Fig. 10a), la mayor variabilidad se presenta durante mareas muertas (desviación estándar grande) debido a que la mezcla mareal es débil y por lo tanto las variables ambientales (temperatura, evaporación) tienen una mayor influencia sobre el agua de la cuenca reflejándose en los altos valores de salinidad para estos períodos. Conforme la marea progresa hacia vivas, el valor promedio

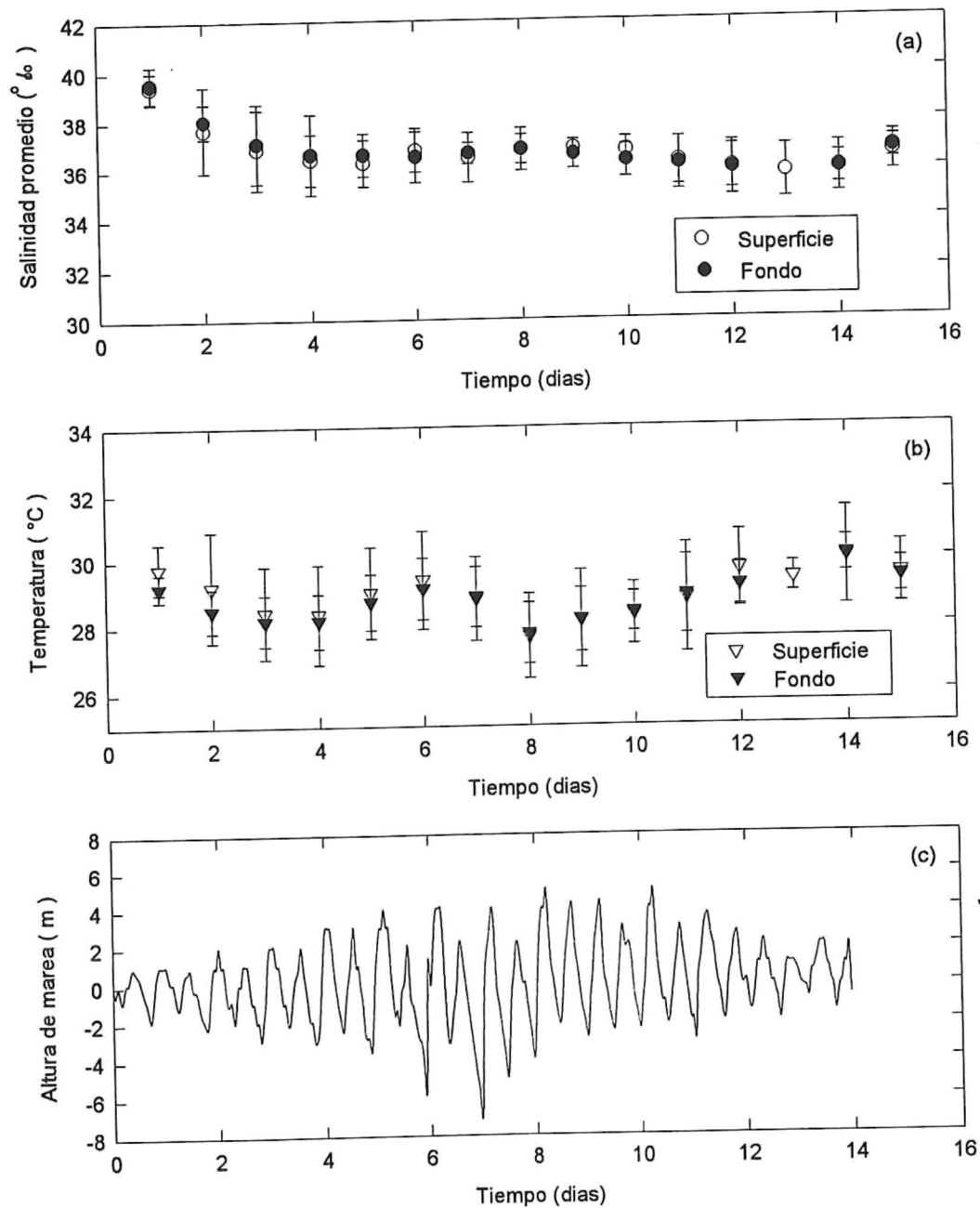


Figura 10. Promedios diarios en superficie y fondo de (a) salinidad y (b) temperatura, y (c) altura de marea, a lo largo de la serie de 1992.

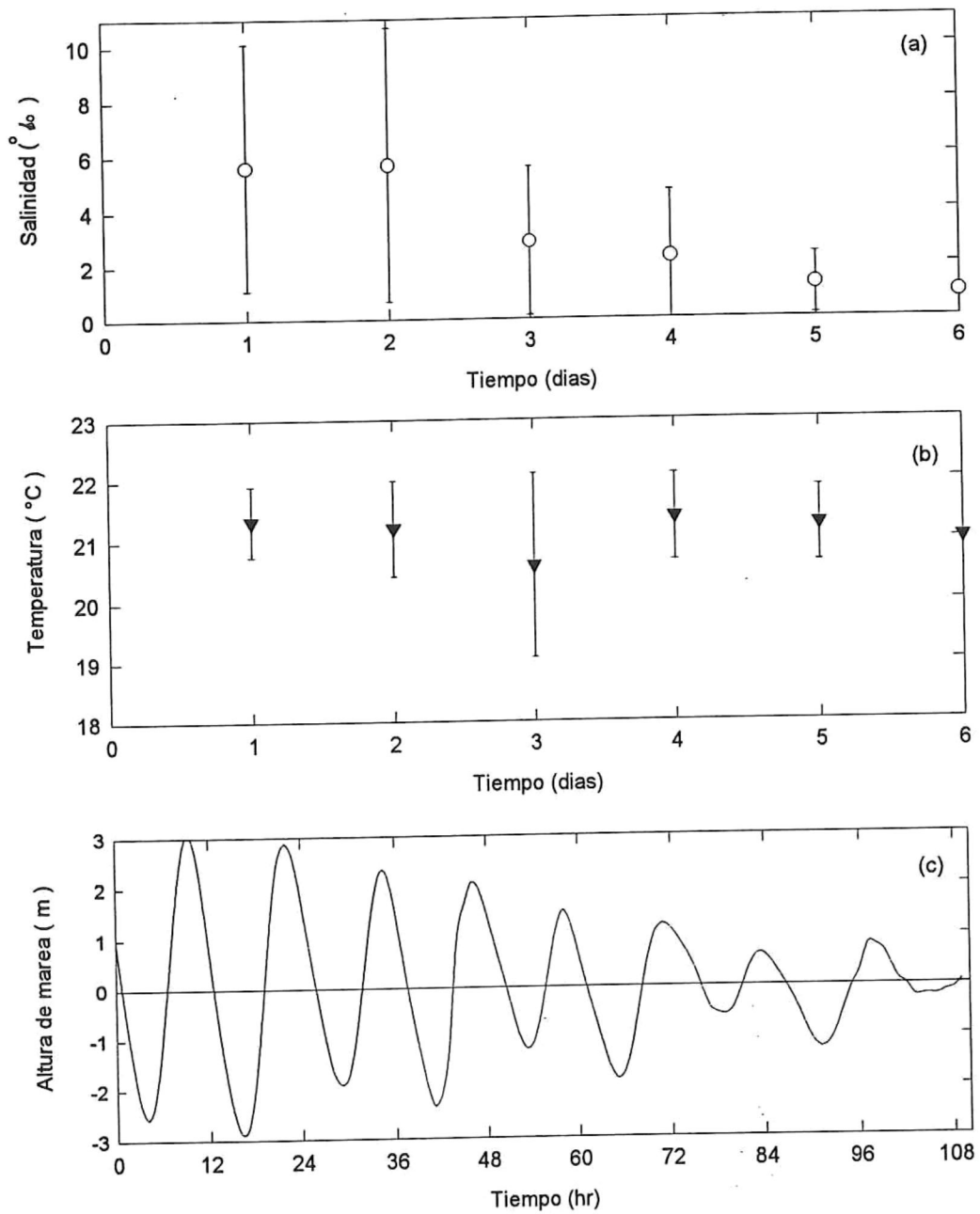


Figura 11. Promedios diarios de (a) salinidad y (b) temperatura superficial, y (c) altura de marea a lo largo de la serie de 1993.

de salinidad y su desviación estándar disminuyen debido al aumento en el intervalo mareal (Fig. 10c) y en consecuencia al aumento de la mezcla con el agua del Alto Golfo (menos salina) por efecto de la intensificación de las corrientes de marea, con lo cual la influencia de los procesos atmosféricos disminuye. En la serie de 1993 (Fig. 11a), la variabilidad de la salinidad esta controlada principalmente por la amplitud mareal y la descarga del río. Debido al amplio intervalo mareal durante mareas vivas, la mezcla por mareas promueve una alta variabilidad en la salinidad, la cual disminuye conforme la marea progresa hacia muertas, acrecentando con esto la dominancia de la descarga del río que se refleja en la disminución de los promedios hasta valores de 1 ‰ y una menor variabilidad en la salinidad.

5.1.3. Flujo del río.

A inicios de 1993 se presentó un período de intensas lluvias en la cuenca baja del Río Colorado (Valle Imperial, Valle de Mexicali y cuenca del Río Gila, tributario del Río Colorado). Como resultado, en un tiempo muy corto se rebasó la capacidad de almacenamiento de las presas de Painted Rock (Arizona, E.U.A.) y Morelos (Mexicali, México) provocando que se desfogaran las aguas hacia el delta del río a una razón de 700 m³/s en su descarga máxima, y entre 300 y 400 m³/s durante los meses de febrero a mayo de 1993. Parte de este caudal fue desviado hacia la zona de la Laguna Salada y otra parte fue desviada directamente hacia el estuario a una descarga estimada de 250 m³/s (Comunicación personal, Ing. Miguel Angel Martínez Durán, Departamento de

Construcción, CONAGUA, Mexicali, B.C.). En la figura 12 se muestran las descargas de agua diarias para el período de muestreo. Eventos repentinos de este tipo pueden producir modificaciones drásticas en las condiciones hidrodinámicas del sistema, empujando la cuña de agua salada hasta la región marina en unos cuantos días (Nichols 1977), con sus cosecuente implicaciones en los patrones de distribución e intercambio de sedimento y nutrientes en el sistema. Efectos similares de avenidas han sido descritos para otras localidades (Nichols 1977), los cuales se caracterizan por una serie de etapas subsecuentes: (1) respuesta inicial del sistema, (2) shock, (3) rebote, y si no se vuelve a presentar otro evento en el mismo período, (4) homogeneidad y recuperación de las condiciones iniciales. En ese estudio en particular, la cuarta etapa se alcanzó en 15 días, en términos de las condiciones hidrodinámicas y de transporte de sedimento, y 60 días para la salinidad. Aún cuando el muestreo se realizó 15 días después de la ocurrencia de la máxima descarga del río, es posible inferir que se hayan presentado etapas similares a las que menciona Nichols (1977). La importancia de este evento de avenidas radica en que permitió documentar, por primera vez, las características que parcialmente pudo haber tenido el estuario del Río Colorado antes de ser eliminado el flujo de agua dulce por los represamientos a lo largo de su cauce. Por ejemplo, la salinidad disminuyó significativamente en el estuario, registrando valores de hasta 14‰ a 30 km al sur de la desembocadura del río, comparado con 36 ‰ durante épocas de nulo aporte de agua dulce. En cuanto a los nutrientes, el efecto más drástico se reflejó en las concentraciones

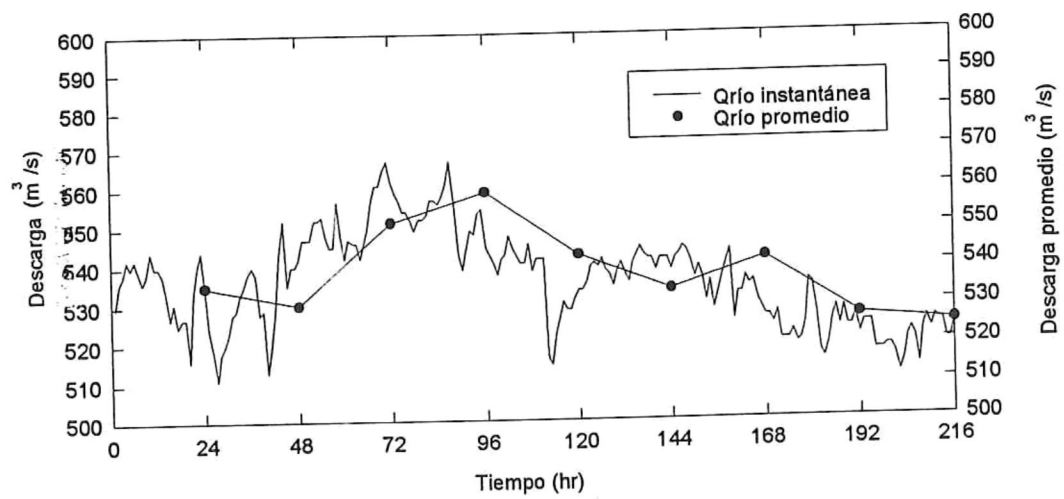


Figura 12. Descarga de agua instantánea y promedios diarios del Río Colorado durante el período de muestreo de 1993.

de silicatos, los cuales llegan a ser hasta 10 veces mayores que durante los períodos de nulo aporte de agua dulce.

5.2. Variabilidad temporal del sedimento en suspensión y nutrientes.

5.2.1. Sedimento en suspensión.

El patrón general de variación de la concentración de sedimento en suspensión, a lo largo de las series de tiempo de 1992 y de 1993 se observa en las figuras 13 y 14 respectivamente. Ambas series muestran un comportamiento similar caracterizado por dos tipos de comportamientos bien marcados: un patrón periódico de carácter semidiurno y un patrón de comportamiento que responde a la variación quincenal de la marea.

En el primer tipo, el patrón general presenta las máximas concentraciones durante las últimas 2 horas del refluo marea, manteniéndose así hasta el inicio del flujo y decreciendo hasta alcanzar los valores mínimos durante el período de aguas quietas de marea alta (Fig. 15). De manera general, la concentración de sedimento en suspensión tiende a aumentar conforme baja la marea, debido a que se combinan la disminución de la profundidad en el cauce con la intensificación de la corriente de refluo, incrementando la concentración de sedimento en suspensión. Esta resuspensión, provocada por la acción de las corrientes de marea, se considera como el mecanismo gobernante de la variabilidad del material particulado en suspensión en los estuarios (Schubel, 1971; Allen *et al.*, 1980; Nichols y Biggs, 1985). Aún cuando se tienen intensas corrientes durante períodos de

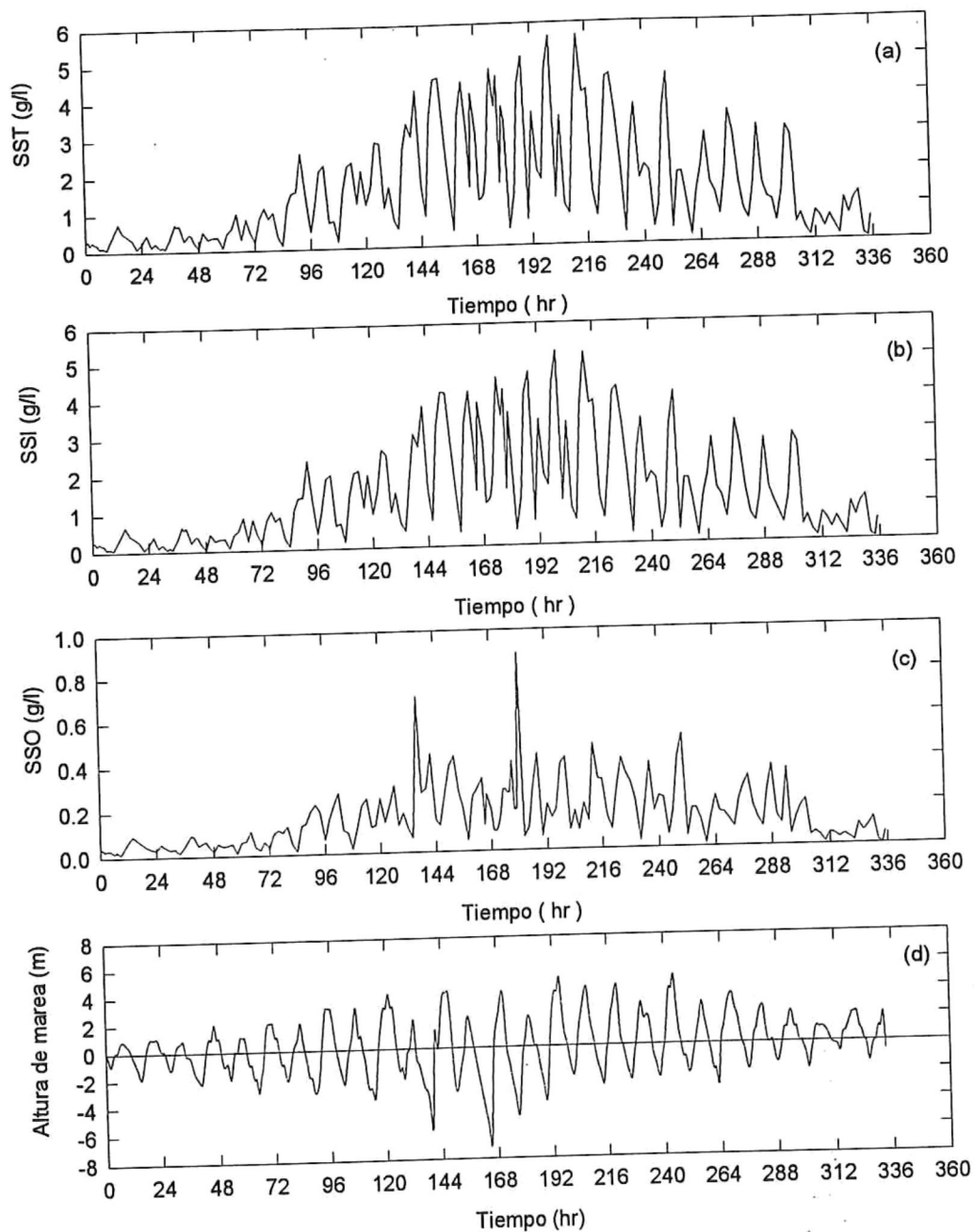


Figura 13. Distribución de sedimento en suspensión: (a) total, (b) inorgánico, (c) orgánico y (d) altura de marea, a lo largo de la serie de tiempo de 1992.

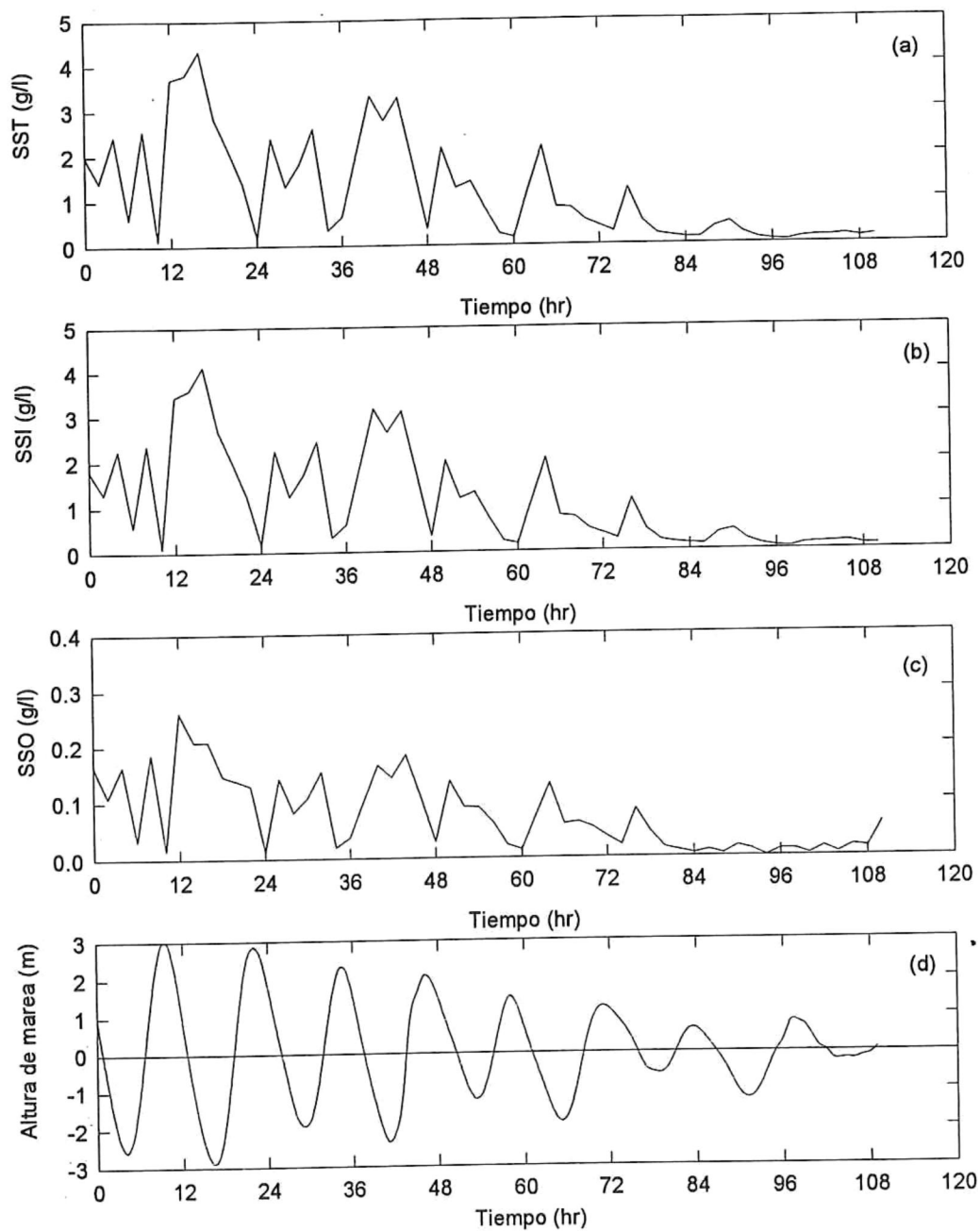


Figura 14. Distribución de sedimento en suspensión: (a) total, (b) inorgánico, (c) orgánico y (d) altura de marea, a lo largo de la serie de 1993.

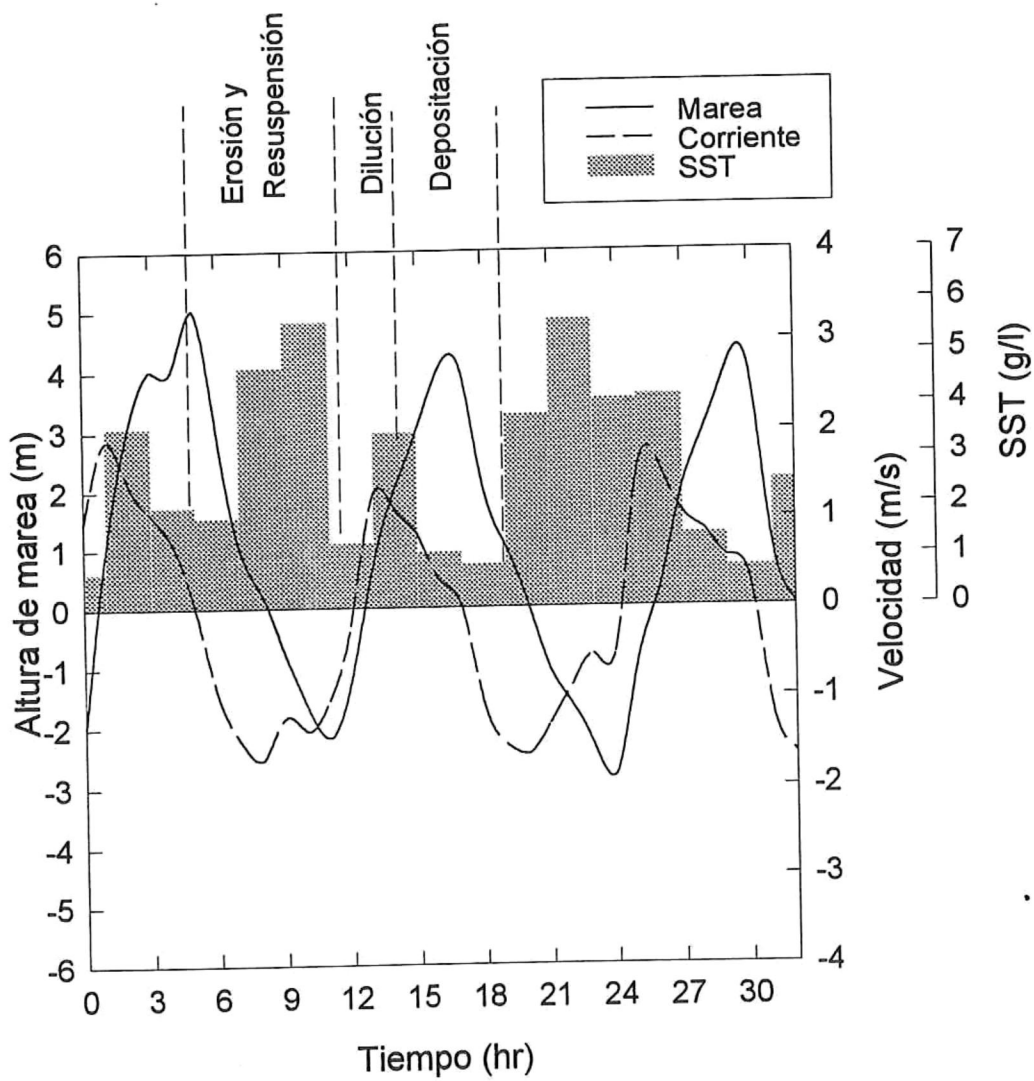


Figura 15. Ejemplificación del ciclo de erosión-dilución-depositación semidiurno a lo largo de dos ciclos de marea semidiurnos de la serie de 1992.

marea alta, la concentración de sedimento en suspensión tiende a disminuir considerablemente, en respuesta al incremento del volumen de agua en el cauce por la entrada de agua de mar pobre en material en suspensión hacia el estuario, ocasionando un efecto de dilución en la cuenca. Como en la mayor parte del flujo mareal las velocidades de corriente son menores que en el reflujo, gran parte del sedimento resuspendido durante el reflujo tiende a sedimentarse durante el flujo, particularmente durante el período de aguas quietas de flujo. Este incremento y decremento en la concentración del sedimento en suspensión, se puede relacionar a la presencia de un ciclo de erosión-dilución-depositación semidiurno generado por los efectos de asimetría de la onda de marea en el estuario del Río Colorado (Carriquiry *et al.*, 1992; Zamora-Casas, 1993): el período de erosión neta corresponde al reflujo, el de dilución al inicio del flujo y el de depositación al período de aguas quietas del flujo, que es cuando se tiene un mayor volumen de agua en el cauce, y por tanto, cuando el efecto de las corrientes de marea sobre el fondo es menor. Este ciclo de erosión-depositación ha sido reportado en estuarios mesomareales como el del Río Columbia, E.U.A. (Gelfenbaum, 1983) el del Río Tagus en Portugal (Vale y Sundby, 1987) y en estuarios macromareales como el del Gironde en Francia (Allen *et al.*, 1980) y el del Río Ord en Australia (Coleman y Wright, 1978).

En el tipo de comportamiento quincenal de la concentración del sedimento en suspensión (figs. 13 y 14) se aprecia claramente que a menores amplitudes de marea corresponden concentraciones bajas de sedimento en suspensión, y viceversa. Al

respecto, Allen *et al.* (1976) mencionan que existe una relación directa entre la amplitud mareal y la concentración del sedimento en suspensión debido a que existe un incremento en la velocidad de corriente conforme se incrementa la amplitud de marea, aumentando la erosión y resuspensión durante cada ciclo de marea. En la figura 13 (a,b y c) correspondiente a la serie de 1992, se aprecia que conforme progresa la marea de muerta a viva, la concentración de los tres constituyentes del sedimento en suspensión aumenta considerablemente como una respuesta al incremento del intervalo de marea, y en consecuencia, al aumento en la intensidad de las corrientes de marea (Fig. 6a), resultando una mayor eficiencia en la erosión del lecho del estuario por las mismas. Por el contrario, conforme progresa la marea de viva a muerta se esperaría que la concentración del sedimento en suspensión tendiera a disminuir como una respuesta al decremento en el intervalo de marea, sin embargo, la concentración se mantiene relativamente alta debido a que durante esta parte de la serie se tuvo la influencia de vientos fuertes del SE de hasta 14 m/s (Fig.16) que causaron la formación de oleaje fuerte dentro del estuario. Al conjugarse el efecto del viento con el de refluo mareal, se generó un fuerte oleaje, el cual resuspendió material en las partes someras del estuario, incrementando así la concentración del sedimento en suspensión. Efectos similares se han reportado por Ward (1981) para el estuario de Choptak en Maryland y por Gabrielson y Lukatelich (1984) para el sistema estuarino de Peel-Harvey, Australia, donde se reporta que vientos con intensidades de 5 m/s son capaces de resuspender el sedimento de fondo generando alta turbidez en el sistema.

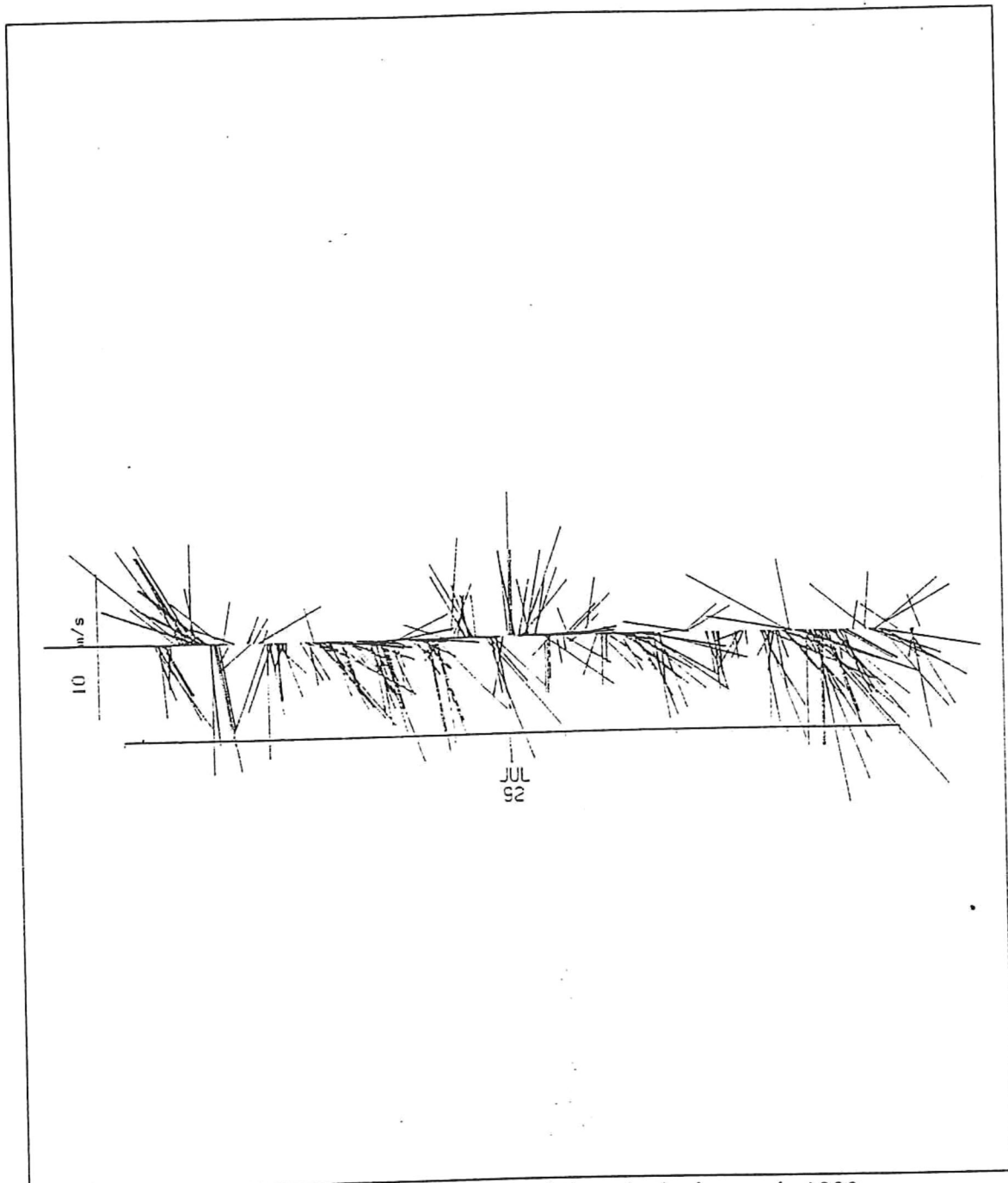


Figura 16. Registro de vientos para el período de la serie de tiempo de 1992.

El análisis espectral de la serie de tiempo de verano, proporcionó las principales frecuencias que contribuyen mayormente a la varianza del sedimento en suspensión. En los tres constituyentes del sedimento en suspensión (Fig. 17), las frecuencias más significativas fueron las relacionadas a la marea semidiurna (0.08 ciclos/h, T=12.5h) y la acción del flujo y reflujo de la marea (0.16 ciclos/h, T= 6.25h). Por consiguiente, las frecuencias relacionadas con el efecto del viento no contribuyen en gran medida a la variación del sedimento, a pesar de que si se refleja en las concentraciones del sedimento en suspensión hacia la parte final de la serie.

5.2.2. Nutrientes.

Durante la serie de 1992 la concentración de nitritos (Fig. 18a) presenta una relación directa con el ciclo quincenal de la marea, en la cual conforme aumenta el intervalo de marea aumenta la concentración de nitritos. Esta relación tiende a ser inversa en los nitratos (Fig. 18b), aunque no tan marcadamente. Esta relación inversa entre los nitratos y nitritos puede deberse a que durante los períodos de mareas vivas haya entrada de especies reducidas de nitrógeno (NH_4^+), por efecto de la resuspensión del sedimento del fondo por las corrientes de marea, y debido a la intensa mezcla inducida por las mismas, estas especies reducidas se oxidan rápidamente hacia nitritos, reflejándose en ese aumento de la concentración. Otra alternativa puede ser que la fuente principal de los nitratos esté en la cabecera del estuario, ya sea por medio de las descargas de los drenajes agrícolas del Hardy y/o las estaciones de bombeo, las cuales tienen una mayor influencia

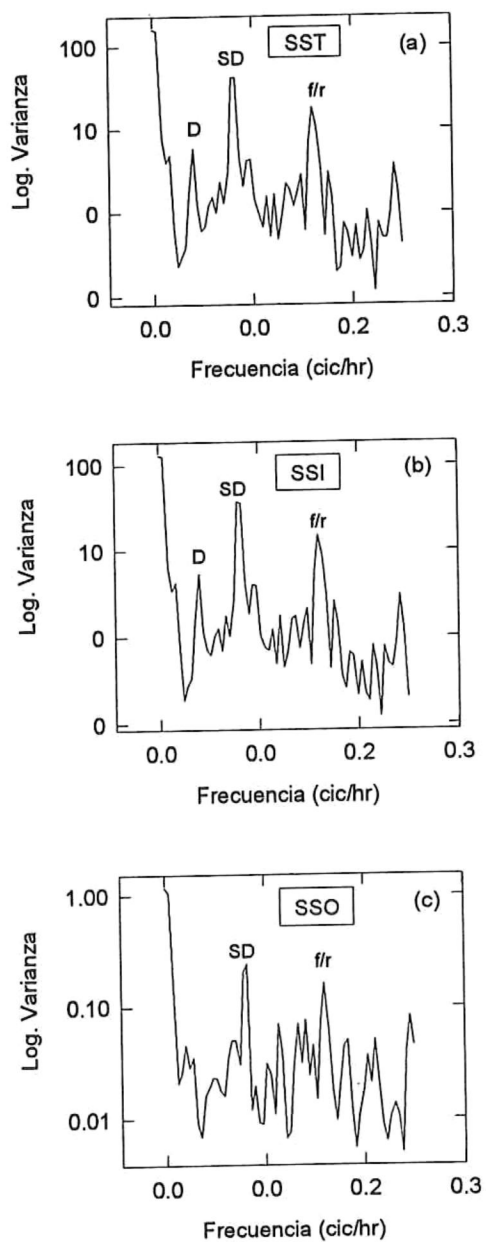


Figura 17. Resultado del análisis espectral para la serie de 1992. (a) sedimento en suspensión total, (b) sedimento en suspensión inorgánico y (c) sedimento en suspensión orgánico. D= componente diurna, SD= componente semidiurna y f/r = flujo y reflujo mareal.

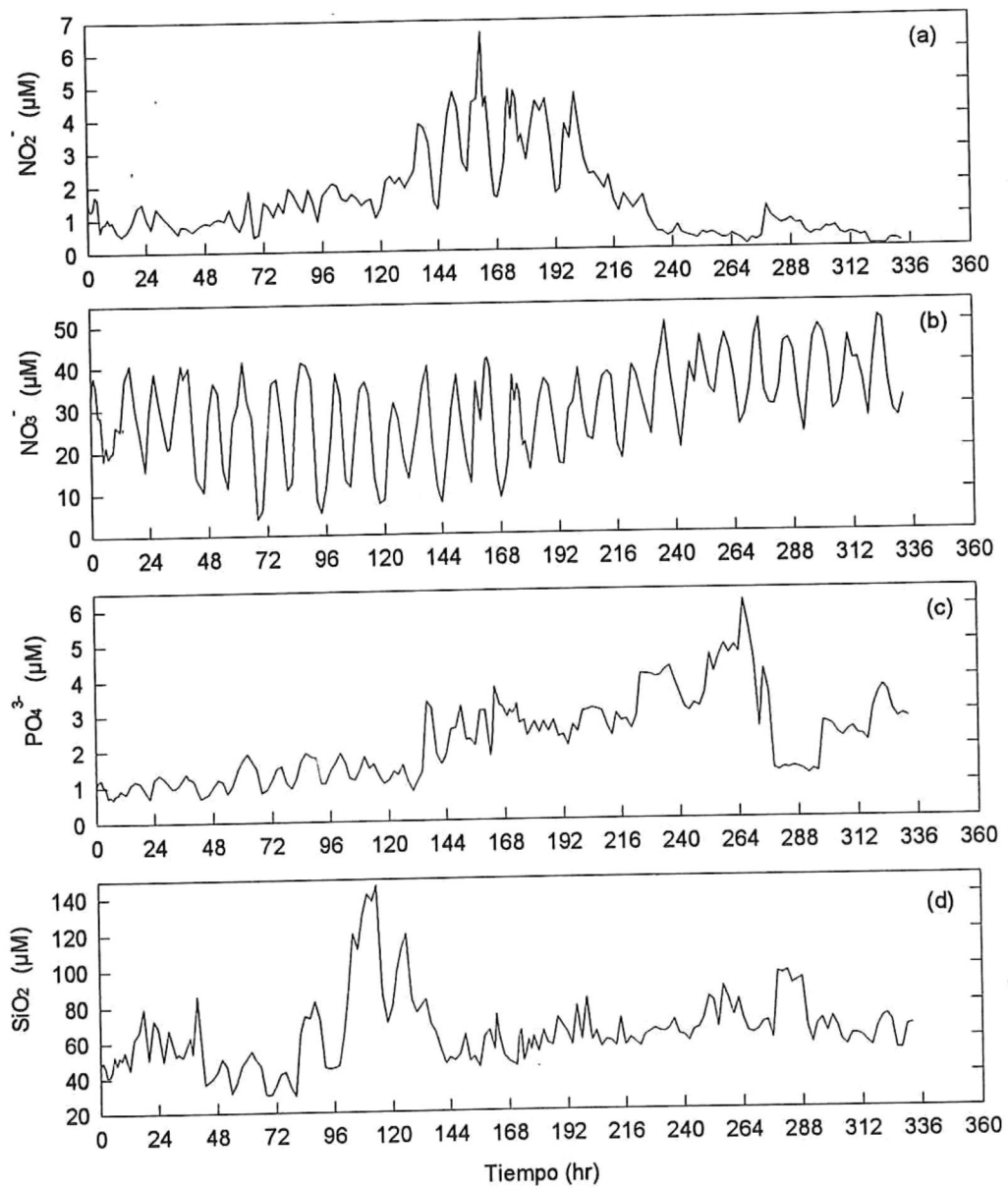


Figura 18. Distribución de nutrientes a lo largo de la serie de 1992. (a) nitritos, (b) nitratos, (c) fosfatos y (d) silicatos.

durante los períodos de mareas muertas, en donde la mezcla no es tan intensa, que durante las mareas vivas en donde se intensifica la mezcla y en consecuencia hay un mayor volumen de agua marina que ocasione un efecto de dilución en la concentración de nitratos en la cuenca y también una posible entrada de nitritos hacia el estuario. En los espectros de nitritos y nitratos (Fig. 19) se observa que la mayor contribución a la varianza esta dada por la marea semidiurna (0.083 cic./h) y la frecuencia relacionada con la transición de marea de vivas-muertas-vivas (0.0167 cic./h), por lo cual, el control principal en las variaciones de estos nutrientes es la marea. Para el caso de los fosfatos (Fig. 18c) la tendencia general es de aumentar la concentración conforme aumenta el intervalo de marea, pero en este caso los valores máximos se presentan después de mareas vivas. Para el sílice (Fig. 18d) la tendencia es inversa a la de los fosfatos, ya que en este caso los valores máximos se presentan antes del inicio de la marea viva. En los espectros de fosfatos y silicatos (Fig. 19) se observa que las frecuencias que contribuyen más a la variación de estos compuestos son la marea semidiurna y la relacionada a la transición de marea, esta última es la que contribuye más fuertemente a la variación de la concentración, como se aprecia en la figura 18c y d.

Para determinar si existía una relación directa entre el comportamiento de estos nutrientes, se realizaron análisis de regresión lineal entre ellos, resultando que no hay una relación directa aparente entre estos.

En la serie de 1993 (Figs. 20a,b,c y d), no se observa un comportamiento de carácter periódico en la distribución de la concentración de los nutrientes a lo largo de la

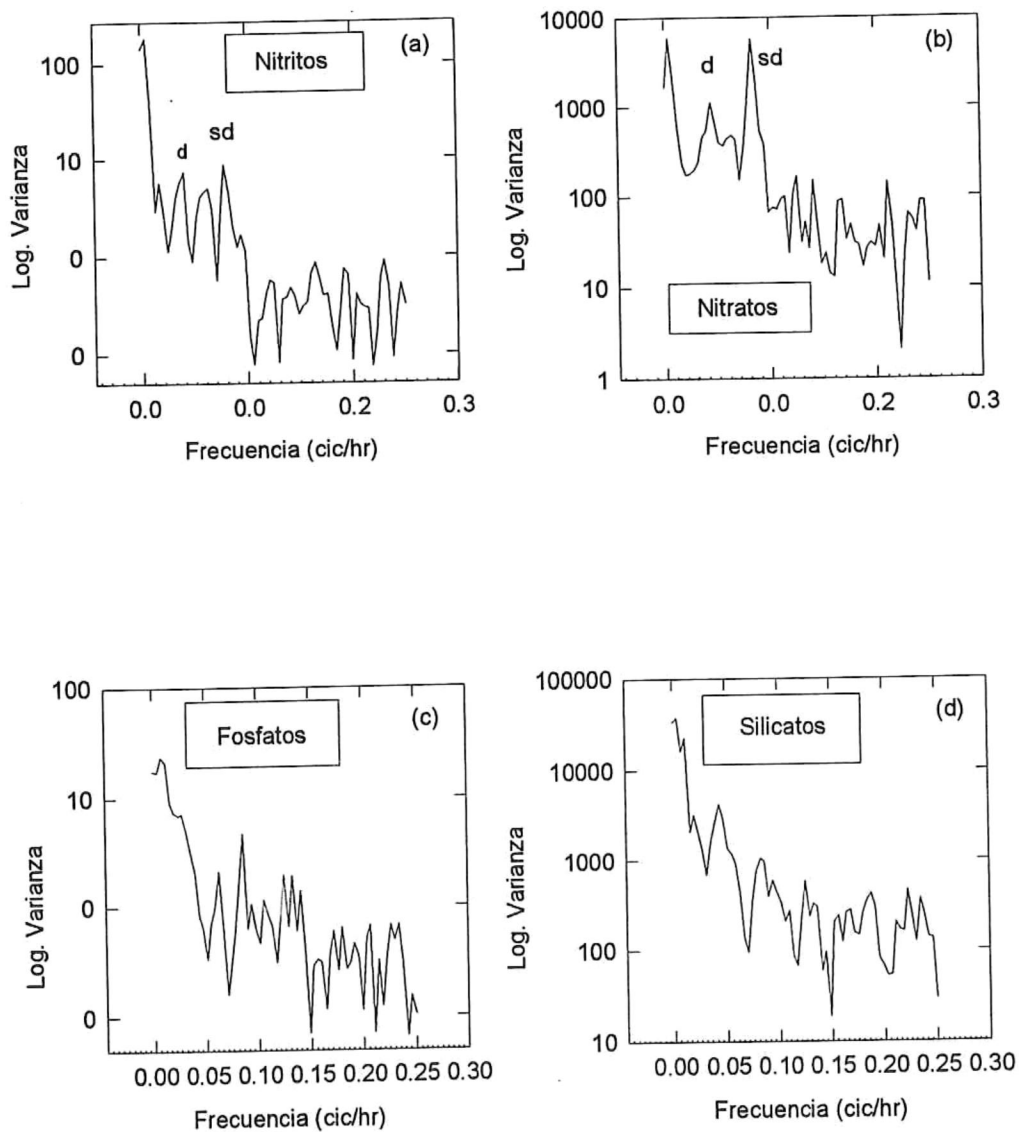


Figura 19. Resultado del análisis espectral de los datos de nutrientes para la serie de 1992. (a) nitritos, (b) nitratos, (c) fosfatos y (d) silicatos.

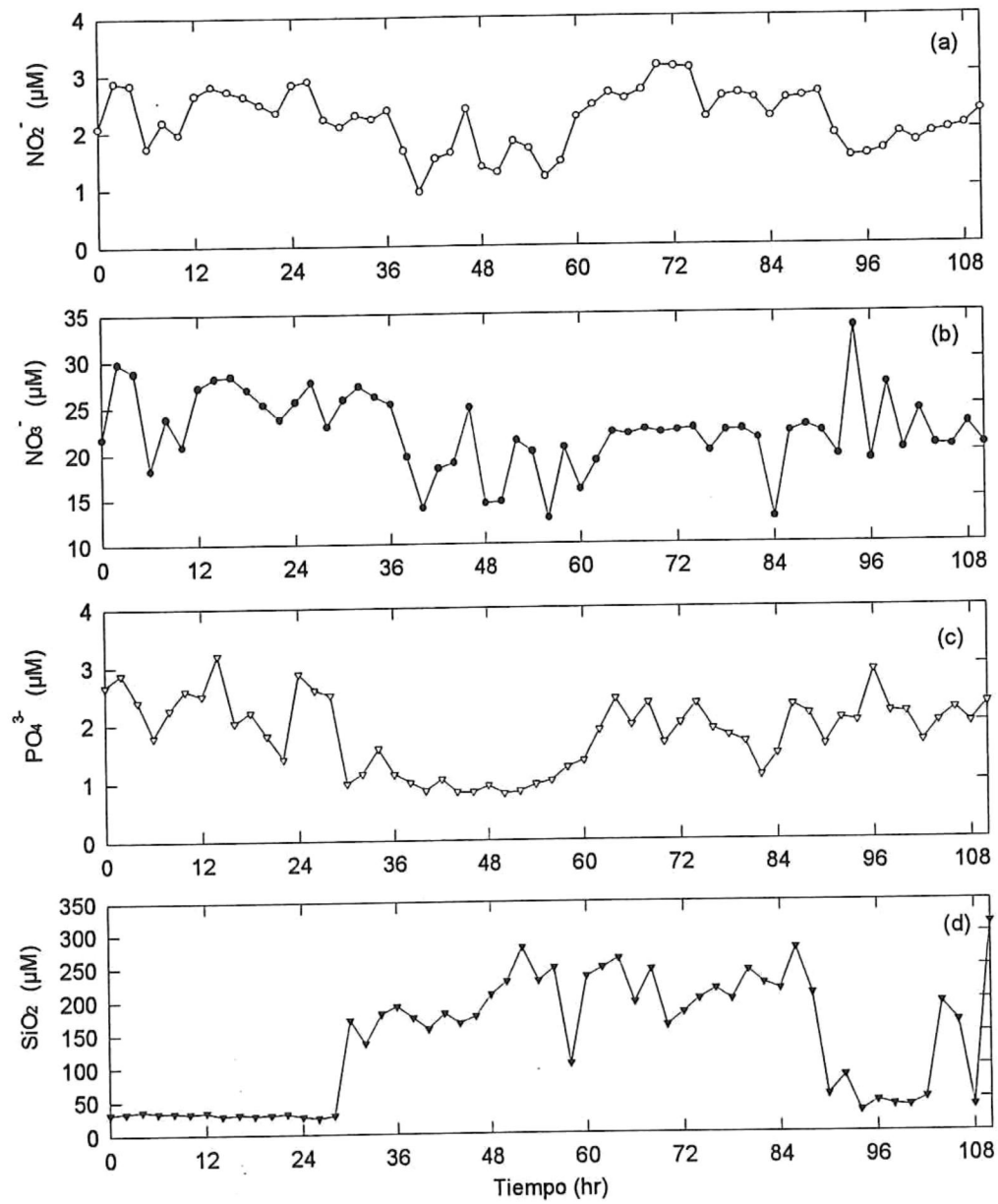


Figura 20. Distribución de nutrientes a lo largo de la serie de 1993. (a) nitritos, (b) nitratos, (c) fosfatos y (d) silicatos.

serie. De manera general, sin embargo, se puede observar que las concentraciones tienden a aumentar con el reflujó y a disminuir con el flujo, debido quizá, a que durante el reflujó, se tiene una mayor influencia de agua dulce proveniente del río y a la entrada de nutrientes del fondo por efecto de la resuspensión provocada por las corrientes de marea, como se explicó anteriormente para el caso del sedimento en suspensión.

Es claro que el SiO_2 incrementó notablemente su concentración, durante este período, hasta el doble de la concentración de la serie de verano, reflejando de esta manera la fuerte contribución por parte del Río Colorado en este nutriente.

En estudios previos de distribución de nutrientes en el estuario del Río Colorado, se señala de manera general que las concentraciones de nutrientes son altas a lo largo del año, pudiendo deberse al flujo de agua subterránea en la cabeza del estuario en el caso del NO_3^- , y los altos valores de NO_2^- , PO_4^{3-} y SiO_2 a la resuspensión de sedimentos y mezcla del agua intersticial con la columna de agua, producto de la intensa mezcla de marea (Hernández-Ayón *et al.*, 1993). Sin embargo, los altos valores en la concentración de nutrientes encontrados en el área, pueden responder al acoplamiento entre los procesos de resuspensión de sedimento de fondo, la mezcla del agua intersticial con la columna de agua por las fuertes corrientes de marea; al aporte de la remineralización de nutrientes en la marisma; y a los procesos de erosión del delta. Los resultados obtenidos en éste trabajo muestran que en el caso del fosfato, existe un aporte potencialmente importante de la zona de marisma, ya que las muestras de agua de esta zona presentan los valores más altos de este nutriente (Tabla VI). Además, al compararlas con los valores de

fosfatos del agua del estuario se aprecia que existe un enriquecimiento en las aguas que inundan la marisma, ya que el valor en la concentración de fosfato en el agua que fluye sobre la marisma es casi el doble que lo encontrado en el canal principal; lo cual también se aprecia durante el reflujó en las muestras del canal de marea pequeño. Gardner (1975) menciona que cuando la concentración de nutrientes en el agua que inunda las marismas son bajas, se produce una liberación neta de nutrientes a partir de estas hacia la columna de agua. Lo anterior puede explicar que este enriquecimiento en fosfato del agua que inunda la marisma, se deba a que el fosfato puede ser incorporado al agua por la acción de las plantas (*Distichlis palmeri*), similar a lo que encuentran McRoy *et al.* (1972) para el caso de *Zostera marina* en Izembek Lagoon, Alaska. Estos autores mencionan que el fósforo atrapado en los sedimentos profundos puede ser reincorporado a la columna de agua por las raíces y rizomas de las plantas actuando como bombas de fósforo.

Al observar la concentración de fosfato del agua que se filtra por las grietas de desecación, se observa que están más enriquecidas que las del estuario, pudiendo deberse a lo argüido por Arenas y De La Lanza (1981), de que, por esta vía, se pueden alcanzar las capas profundas de sedimento, y por procesos fisicoquímicos acelerar la remineralización, favoreciendo la disponibilidad de fósforo durante mareas vivas. Esta remineralización de nutrientes en las zonas de marismas, es más extensa en el margen de Baja California debido a que este margen es topográficamente más bajo que el de Sonora Carriquiry y Cupul-Magaña (en manuscrito), con lo cual permite una inundación más frecuente, resultando en un mayor intercambio entre las marismas y la columna de agua.

Además, durante la mayor parte del ciclo quincenal de marea, las planicies de inundación quedan completamente expuestas, ocasionando a que por efectos de evaporación se generen grietas de desecación en la superficie, con varios centímetros de profundidad. Posteriormente, durante períodos de marea vivas, estas planicies son completamente inundadas durante marea alta, produciendo una reincorporación de nutrientes que pudieron haberse considerados perdidos del sistema. Esta agua de la marisma "enriquecida" en nutrientes finalmente se incorpora al estuario durante el reflujó por medio de los canales de marea.

Con la finalidad de determinar la factibilidad de que los sedimentos deltáicos sean una fuente potencialmente importante de nutrientes al sistema estuarino, se llevó a cabo un experimento con los sedimentos de los bordes del canal de estas zonas. De manera general, en dicho experimento se observó que existe un aumento en la concentración de nitritos, nitratos y fosfatos, y una disminución en la concentración de silicatos a los 30 minutos de iniciado el experimento; aunque después esta tiende a aumentar al igual que los otros tres constituyentes (Fig. 21). Al finalizar el experimento, se observa que la concentración de los nutrientes es ligeramente mayor que antes de empezar, a excepción de los silicatos. De acuerdo a Childers y Day (1990) la mayor parte de la liberación de nutrientes sucede en los inicios de los ciclos de marea durante el flujo, relacionando esto a pulsos difusivos de nutrientes inorgánicos desde los sedimentos, poco después de exponerse a la columna de agua. Este comportamiento de los nutrientes en el experimento, podría indicar que algo similar sucede en el cauce del estuario conforme

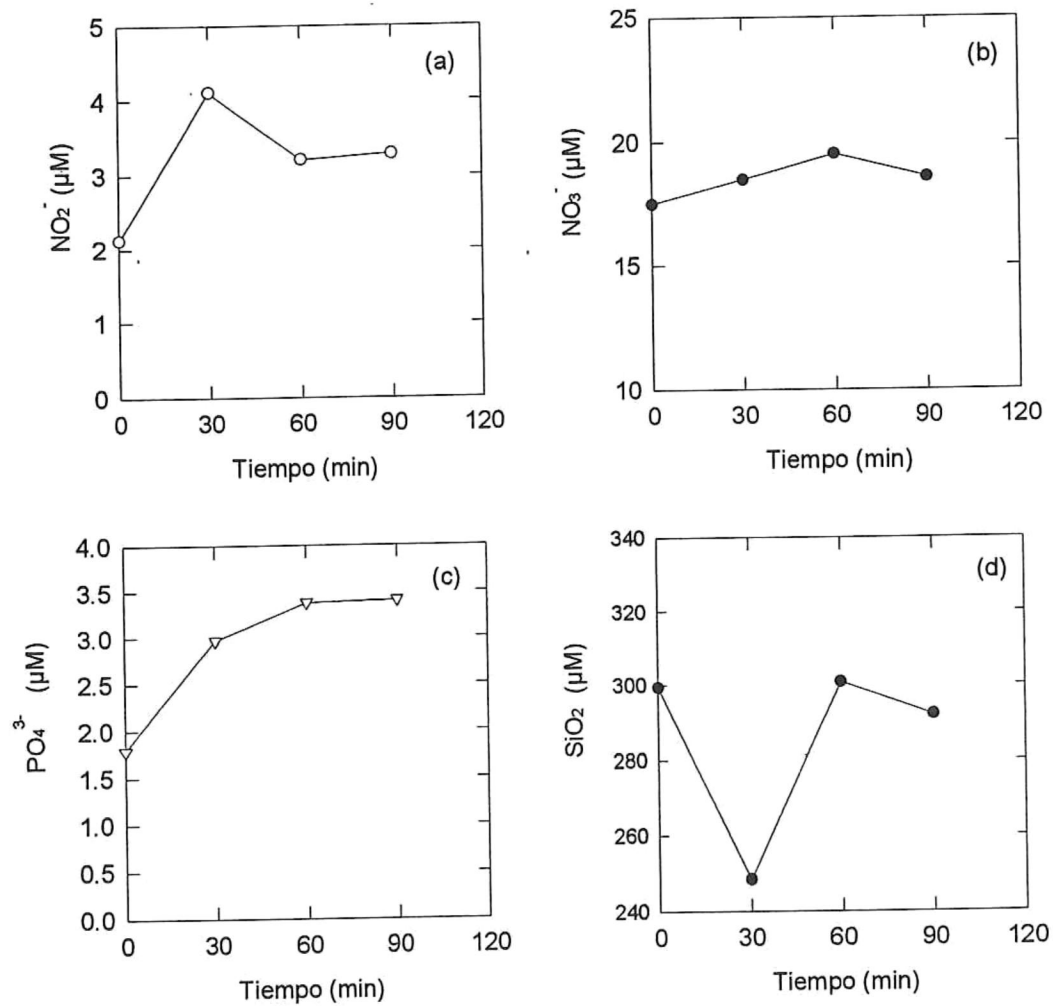


Figura 21. Simulación del efecto del derrumbamiento de los bordes en la concentración de nutrientes en el estuario. (a) NO_2^- , (b) NO_3^- , (c) PO_4^{3-} y (d) SiO_2 . (Ver texto para la explicación del experimento).

sube y baja la marea, y de una manera más rápida, cuando se presenta el colapsamiento de los bordes del canal (fenómeno característicamente ubicuo en esta área de estudio). Con lo anterior, se apoyaría la hipótesis de que los procesos de erosión del delta pueden ser una importante fuente de nutrientes al sistema.

En particular, una hipótesis similar ha sido recientemente propuesta por Madden *et al.* (1988) quienes han mostrado que los nutrientes son "secuestrados" por las marismas en los estadios tempranos del ciclo deltaico, particularmente en la fase de crecimiento subaéreo (vertical), y liberados por el deterioro de las marismas en la fase de destrucción de los deltas.

Debido a que los nutrientes aportados por los ríos hacia los estuarios están generalmente asociados al material transportado en suspensión (Pritchard y Schubel, 1981), éstos en la etapa temprana de construcción deltaica son atrapados en la estructura del delta y/o planicies mareales, para después ser liberados en las etapas tardías de la evolución deltaica, mediante procesos de destrucción del delta. Esta teoría puede proveer, en parte, una explicación a los altos valores de nutrientes en ésta área, a través del tiempo, aún cuando no existan aportes por descarga fluvial al sistema.

Debido a que, vía Río Colorado y canal Wellton, se descargaban a esta zona las aguas de lavado de las tierras agrícolas de los valles de Imperial, California y Mexicali, B.C., este tipo de aguas ricas en compuestos nitrogenados y fosfatados (Meybeck, 1982), son fuentes importantes de estos nutrientes al medio estuarino. Hager y Schemel (1992)

han reportado este tipo de procesos como importantes fuentes de nutrientes para la Bahía de San Francisco.

En base a todo lo anterior se puede establecer que las fuentes principales de nutrientes al estuario del Río Colorado pueden ser: el aporte de agua dulce del río; la remineralización de nutrientes en la marisma que son incorporados a través de la red de canales de marea durante el reflujó de marea; la erosión de la planicie deltaica y posiblemente la remineralización de la materia orgánica que se importe del alto Golfo.

5.2.3. Flujos de material.

A lo largo de la serie de tiempo los flujos de agua resultaron ligeramente mayores durante el reflujó, como una consecuencia de la asimetría en la intensidad y duración de las corrientes del ciclo mareal. Es importante señalar, sin embargo, que por lo general los desbalances en el flujo de agua se presentan en trabajos que involucran mediciones de campo directas para el cálculo de la descarga (Whiting *et al.*, 1985). La existencia de estas asimetrías son problemáticas ya que reflejan que, en cualquier ciclo de marea dado, una marisma parece mostrar una acumulación o pérdida neta de agua (Nixon, 1980). No obstante, este problema se reduce al equilibrar los volúmenes de agua dentro de cada ciclo mareal, mediante técnicas de interpolación.

En las figuras 22 y 23, donde se presentan los flujos instantáneos de sedimento en suspensión total, inorgánico y orgánico a lo largo de las series de 1992 y 1993, se observa que consistentemente se tiene mayor transporte de sedimento en suspensión

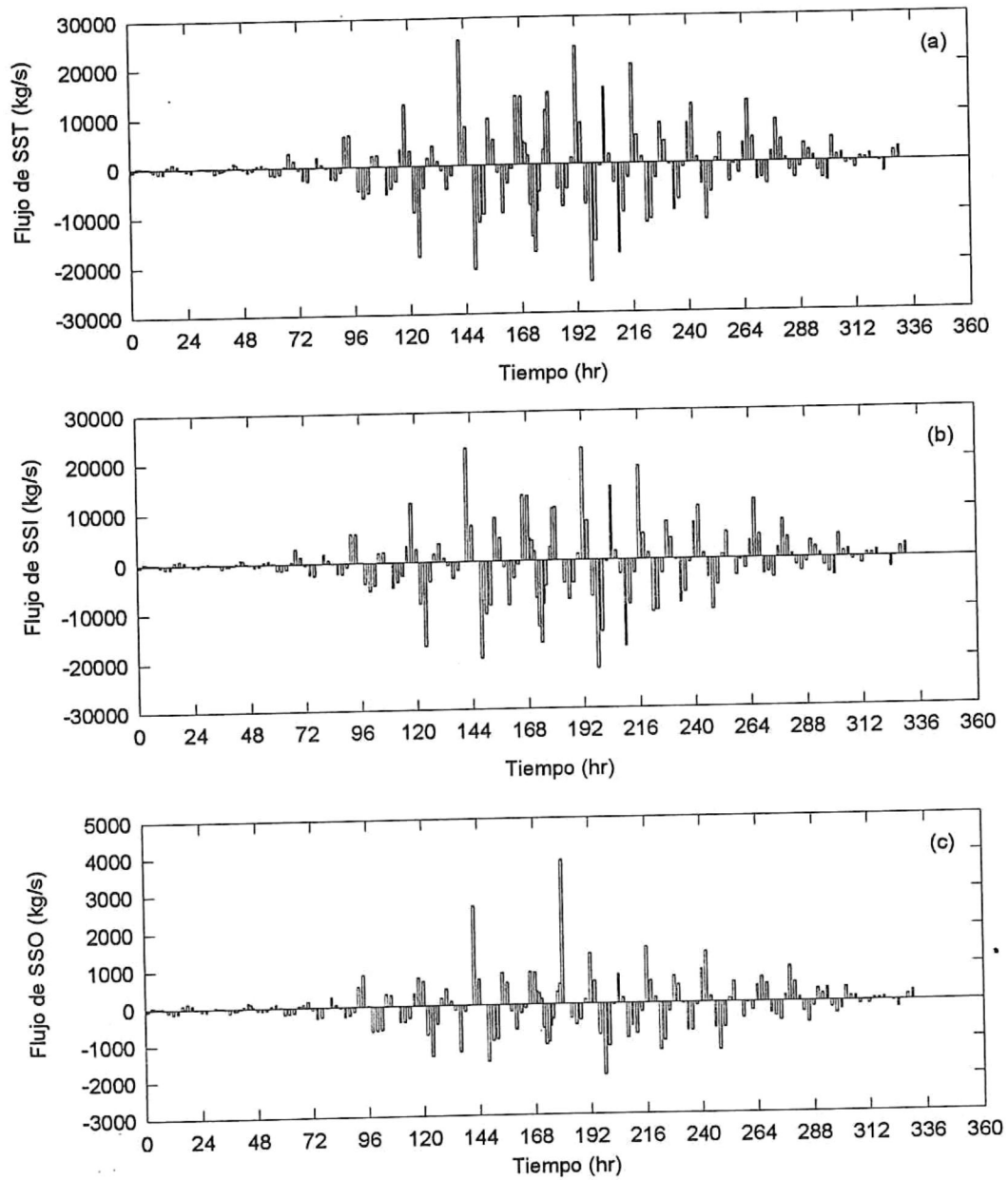


Figura 22. Flujos instantáneos (en Kg/s) de: (a) sedimento en suspensión total, (b) inorgánico y (c) orgánico, a lo largo de la serie de 1992.

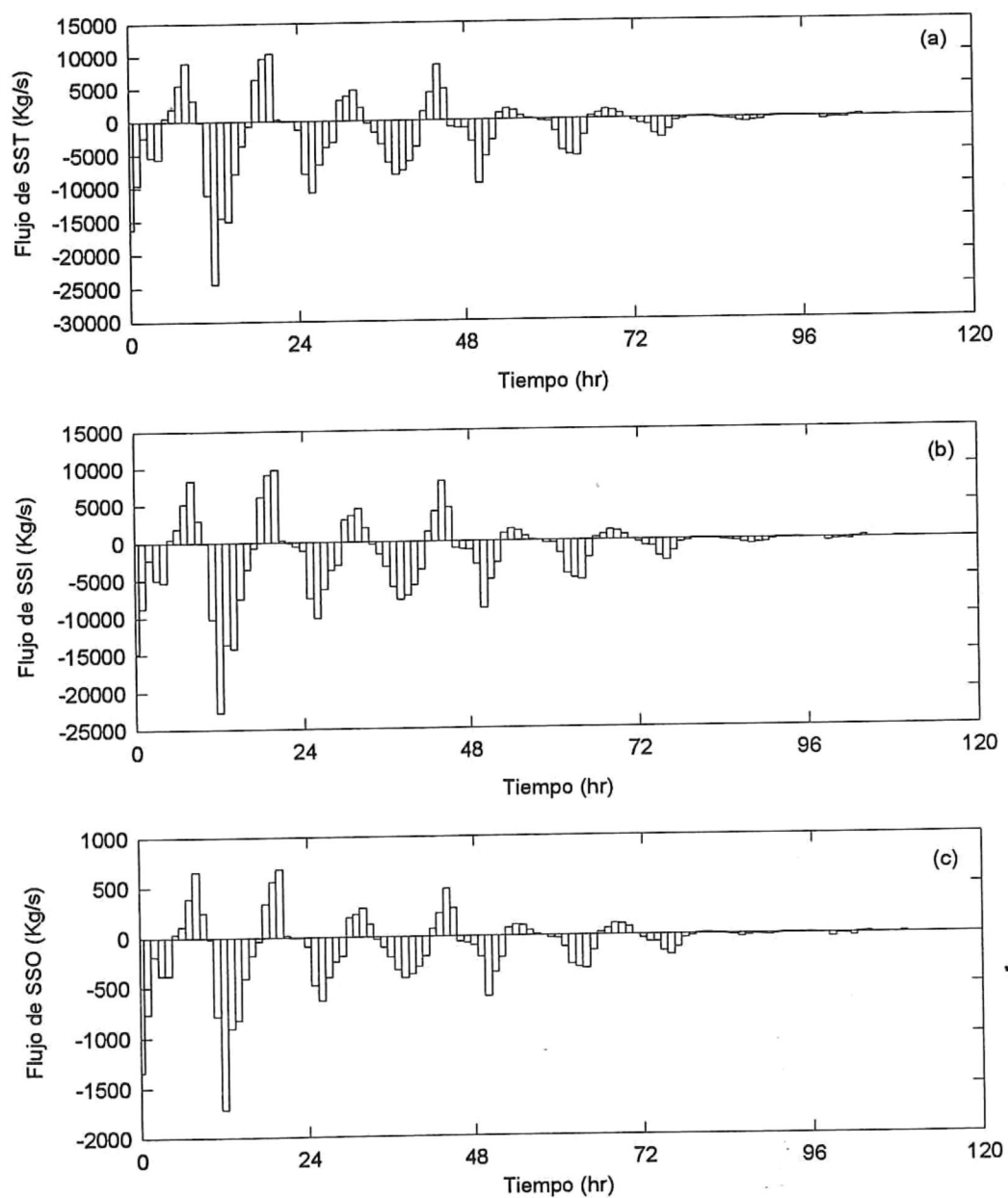


Figura 23. Flujos instantáneos de sedimento en suspensión: (a) total, (b) inorgánico y (c) orgánico, a lo largo de la serie de 1993.

durante el reflujo. Durante la serie de 1992 (Fig. 22) el sistema actúa como exportador de sedimento en suspensión, aún cuando en 14 de los 26 ciclos analizados el sistema importa sedimento; de estos 14 casos, 8 corresponden a mareas muertas y 6 corresponden a mareas vivas. Este comportamiento se puede atribuir a la resuspensión del sedimento de las zonas someras provocado por el oleaje generado por el viento durante la parte final de la serie. 6 de estos ciclos correspondientes a mareas muertas coinciden con los días en que ocurrieron los vientos más fuertes, dando lugar a que se importara más material.

En la serie de 1993 (Fig.23) el flujo de sedimento en suspensión fue consistentemente mayor durante el reflujo que durante el flujo, con una tendencia a decrecer hacia mareas muertas al igual que en la serie de 1992.

Al realizar el balance entre el transporte en flujo y reflujo para determinar el transporte neto de sedimento en suspensión en las series de 1992 (Fig. 24) y 1993 (Fig.25), se puede determinar claramente que el sistema actúa consistentemente como exportador de sedimento en suspensión, incrementándose desde un exporte neto de 0.07 hasta 25.45 Tons. por ciclo mareal semidiurno en la serie de 1992. El transporte neto de sedimento en suspensión para la serie de 1993 es de 1.1 a 57 Tons. por ciclo mareal semidiurno.

La exportación neta de sedimento en suspensión es una consecuencia de la asimetría en tiempo y velocidad de las corrientes de marea (Fig. 6b). Estudios similares han concluido que esta asimetría en la velocidad de corriente de marea junto con la

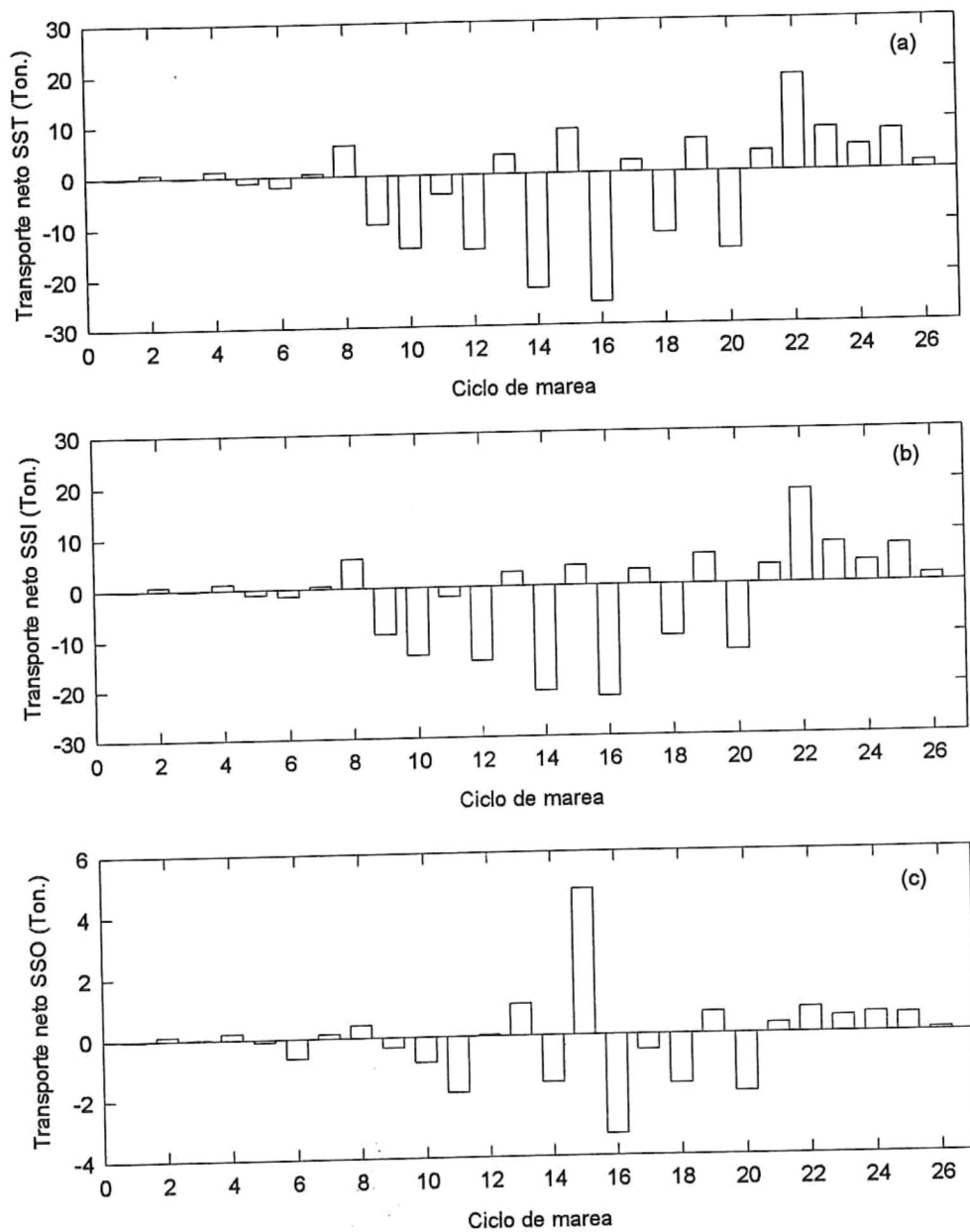


Figura 24. Transporte neto en toneladas por ciclo de marea de sedimento en suspensión: (a) total, (b) inorgánico y (c) orgánico, a lo largo de la serie de 1992.

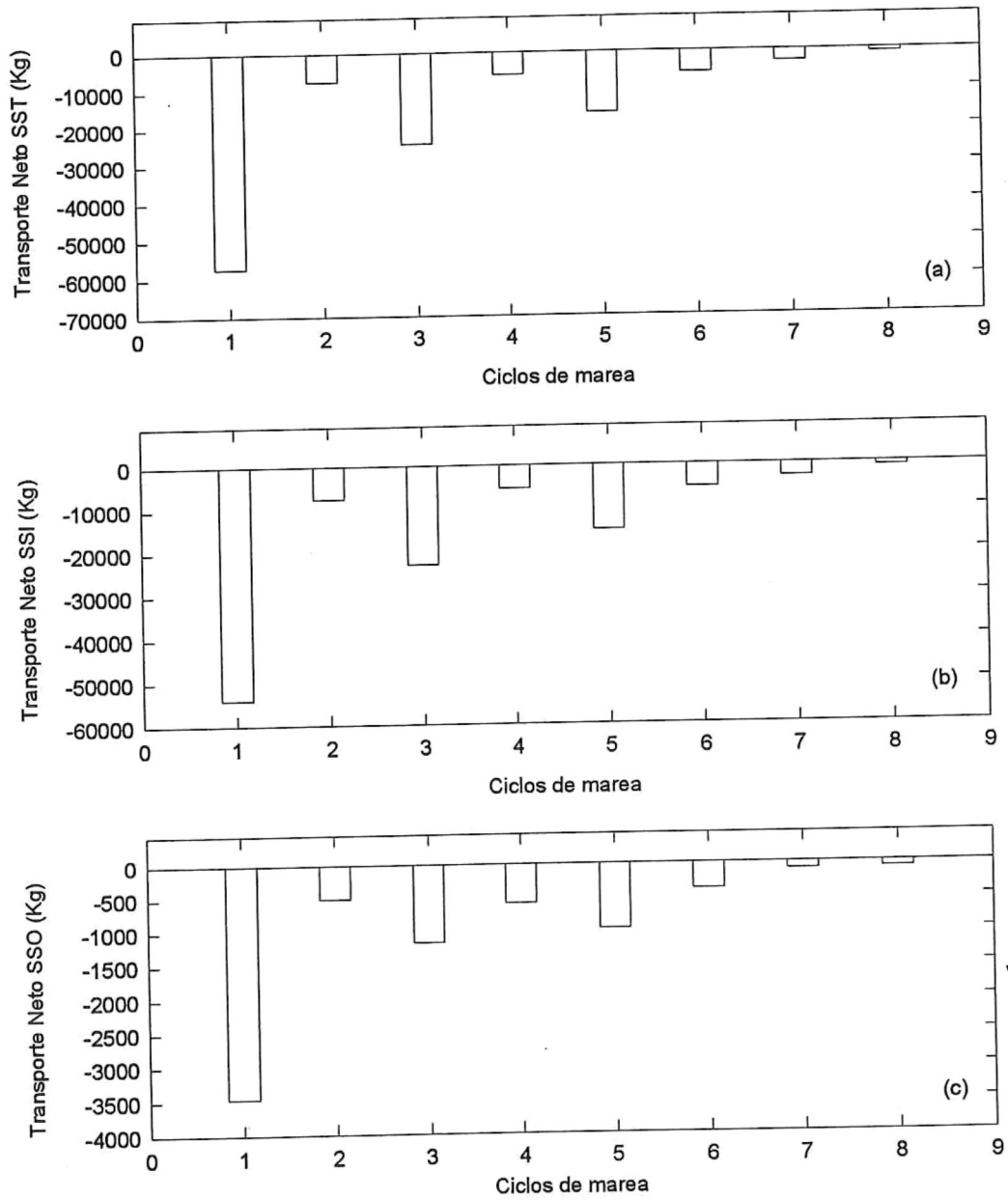


Figura 25. transporte neto de sedimento en suspensión: (a) total, (b) inorgánico y (c) orgánico, para la serie de 1993.

covariancia de las altas cargas de sedimento en suspensión y las fuertes corrientes de marea, producen un flujo neto de material hacia el mar (Stevenson *et al.*, 1988).

Es importante puntualizar que en épocas de avenidas, debido al acople de la asimetría en las corrientes de marea con el aporte de sedimentos del río, el carácter de exportador neto de materiales del sistema se intensifica aún más. De hecho, esta situación es la que prevalece en casi todos los sistemas estuarinos del mundo en los que el río descarga en una cuenca estuarina macromareal (*e.g.* Coleman y Wright, 1978; Allen *et al.*, 1980). Sin embargo, lo más relevante de los resultados del transporte de material de este estudio, es el caso en el que el sistema sea un exportador neto, aún cuando no existan aportes de sedimentos por parte del río (períodos de descarga nula). Esto indudablemente evidencia que el sistema está exportando material sedimentario a costa del material que constituye la estructura deltaica. Por lo tanto, el balance sedimentario anteriormente expuesto está reflejando que la cuenca estuarina, y el delta del Río Colorado, están en un proceso de destrucción inducido por la falta de aporte de agua dulce, y consecuentemente, de sedimentos al sistema.

Al respecto, Boon y Byrne (1981) han concluido, mediante simulaciones con un modelo hipsométrico de cuencas, que lagunas jóvenes con grandes áreas de mar abierto son dominadas por el flujo, debido a que las velocidades de flujo son más fuertes que las de refluo. Este modelo también predice que conforme las lagunas evolucionan de cuerpos de agua abiertos a sistemas complejos de bahías segmentadas, rodeadas por marismas, el transporte de refluo se vuelve dominante, dando lugar a que el exporte neto

de materiales por marismas maduras se incrementa conforme el área se haga relativamente pequeña, como en el caso del estuario del Colorado. Además, en la sección de estudio el estuario está caracterizado por corrientes de reflujo más intensas que durante el flujo, aumentando la capacidad de evacuación de sedimento en suspensión conforme progresa de mareas muertas a vivas. Esta capacidad se resalta por el aumento en la intensidad de las corrientes.

5.2.4. Flujo de nutrientes:

En las figuras 26 y 27 se muestran los patrones de flujo de nutrientes, durante las series de 1992 y 1993 respectivamente, en donde el patrón de flujos de nutrientes fue similar al del sedimento en suspensión con el máximo exporte de nutrientes durante el período de mareas vivas. Al obtener el transporte neto de nutrientes para ambas series (Figs. 28 y 29) se observa claramente el papel exportador del sistema, siendo para los $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ desde 30.7 hasta 6,984.3 g N/ciclo en 1992 y de 11,243.6 a 30,676.7 en 1993; la exportación de PO_4^{3-} fue de 4.9 a 700.8 g PO_4^{3-} -P/ciclo en 1992 y de 889.2 a 4380.95 en 1993; la exportación de SiO_2 fue de 282 a 17,326.6 g SiO_2 -Si/ciclo en 1992 y en 1993 este fue de 19,988.33 a 206,595.75 g SiO_2 -Si/ciclo.

A partir de los datos de nutrientes y de sedimento en suspensión se obtuvieron los transportes anuales de materiales promediando los transportes netos por ciclo de marea semidiurna, para cada serie, y multiplicándolos por el número de ciclos de marea que ocurren en un año; esto es justificable debido a que Hernández-Ayón *et al.* (1993)

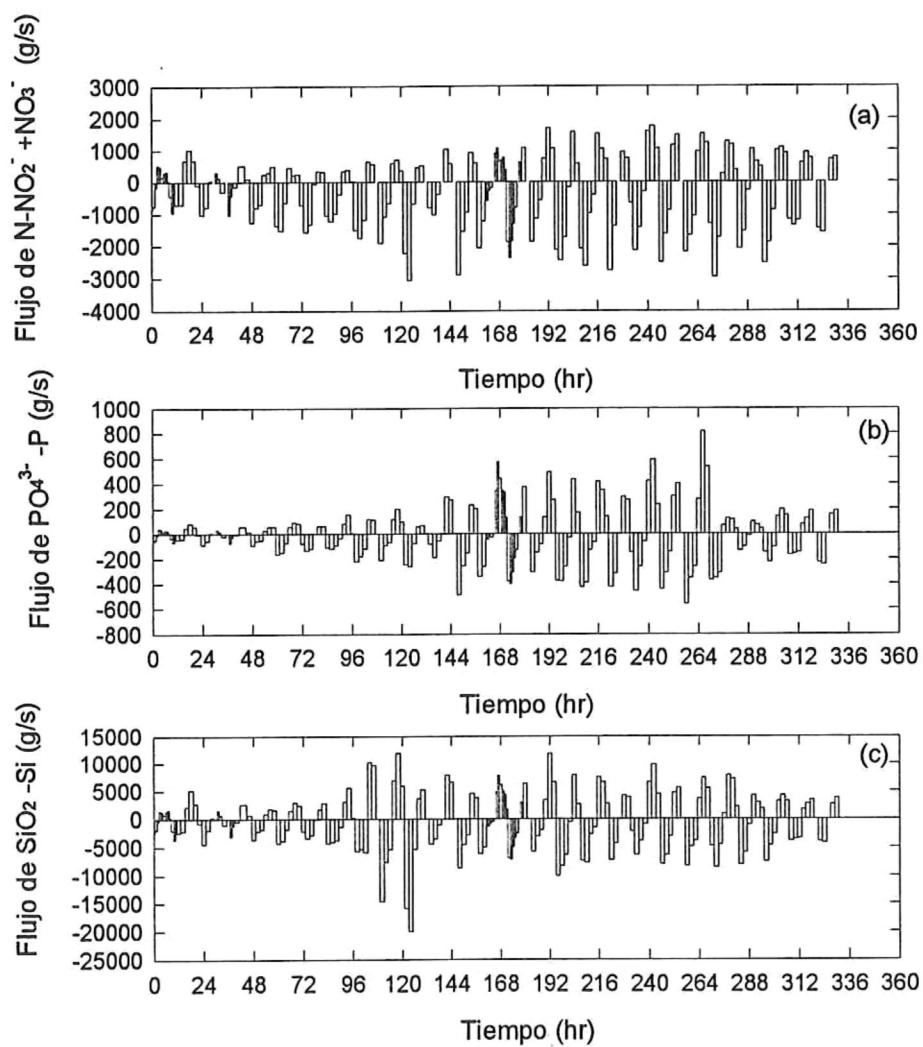


Figura 26. Flujos de nutrientes a lo largo de la serie de 1992. (a) $\text{N-NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ (g/s), (b) P-PO_4^{3-} (g/s) y (c) Si-SiO_2 .

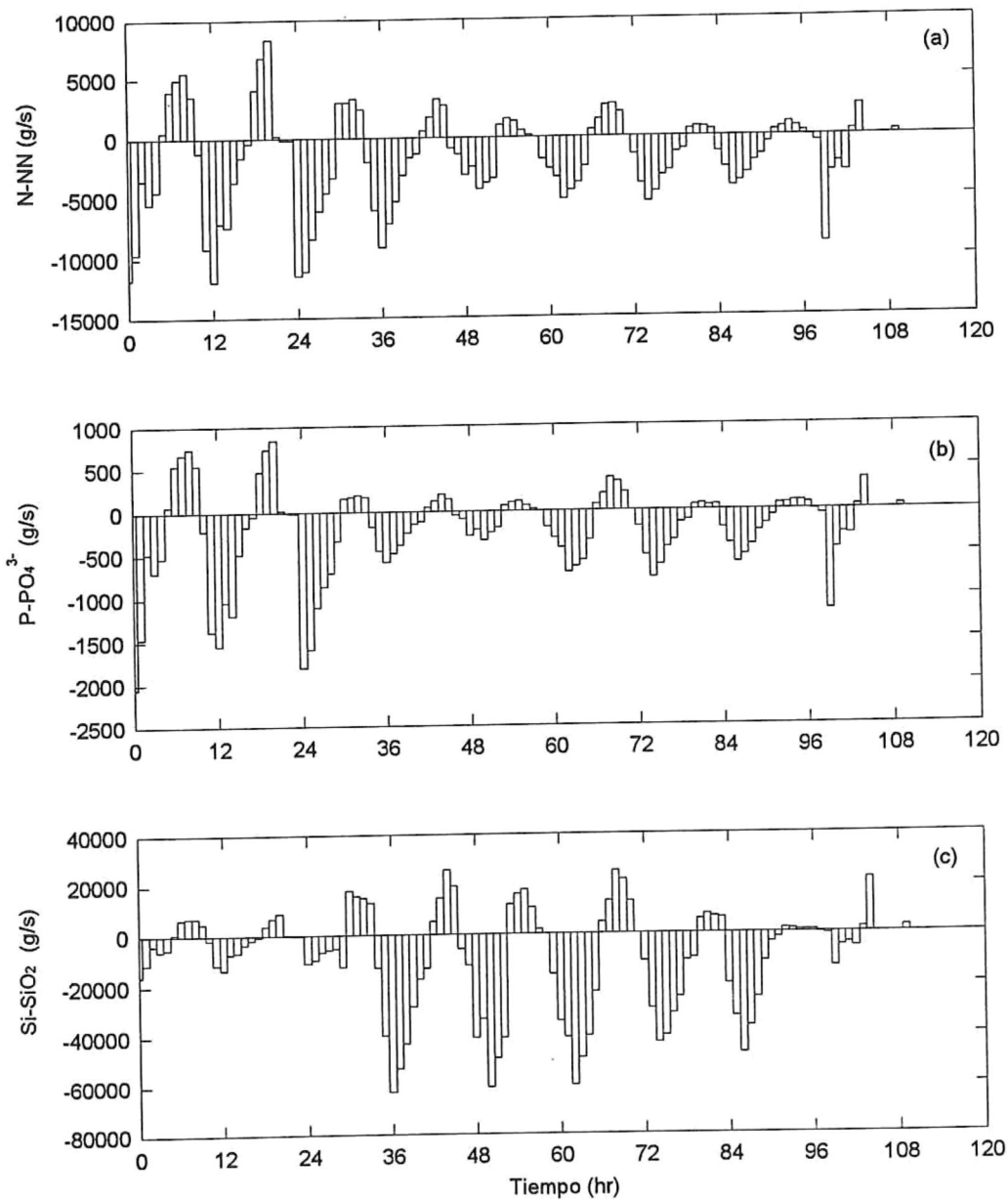


Figura 27. Flujos de nutrientes a lo largo de la serie de 1993. (a) nitratos+nitritos, (b) fosfato y (c) silicatos.

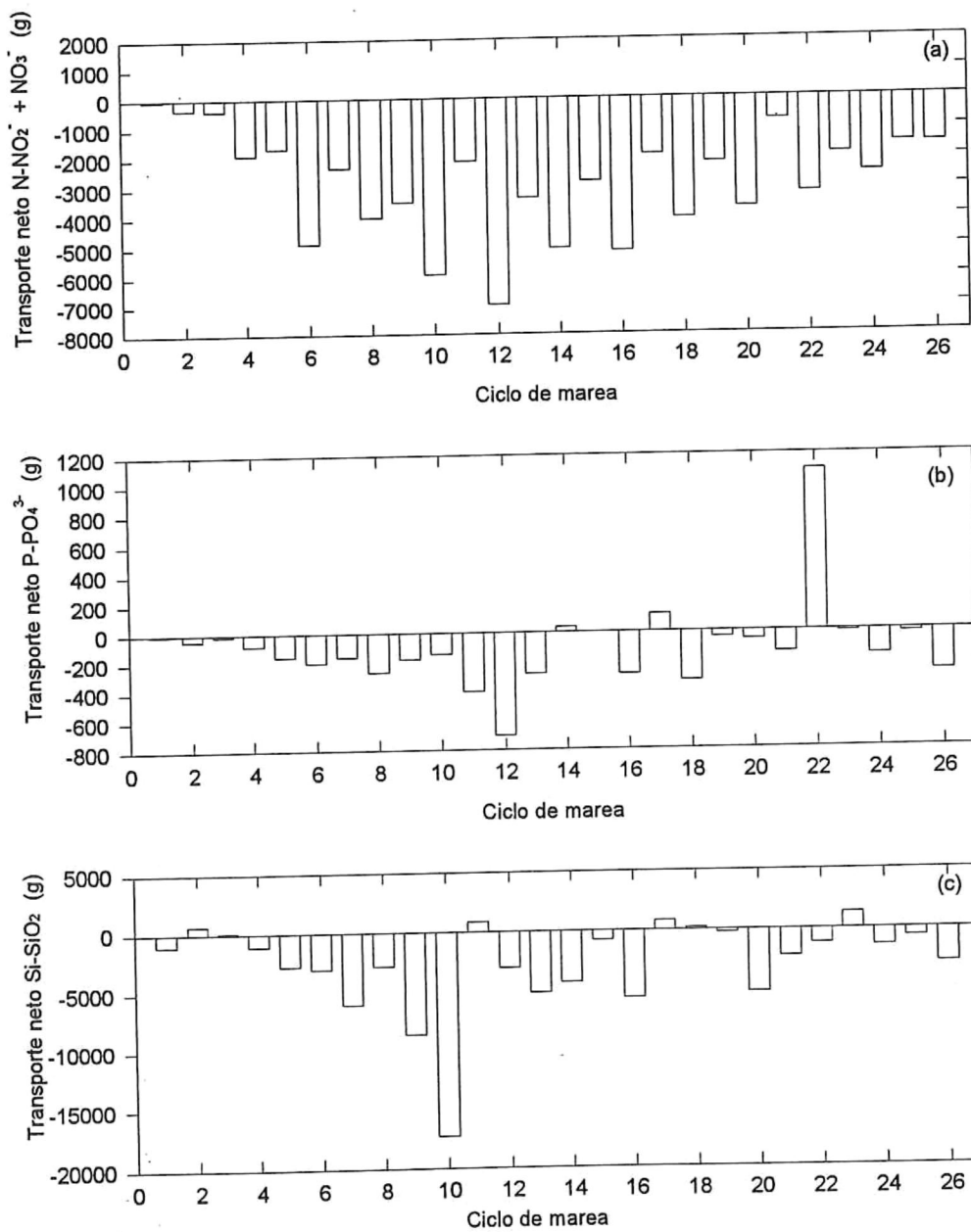


Figura 28. Transporte neto en gramos por ciclo de marea de (a) $N-NO_2^- + NO_3^-$; (b) $P-PO_4^{3-}$ y $Si-SiO_2$, a lo largo de la serie de 1992.

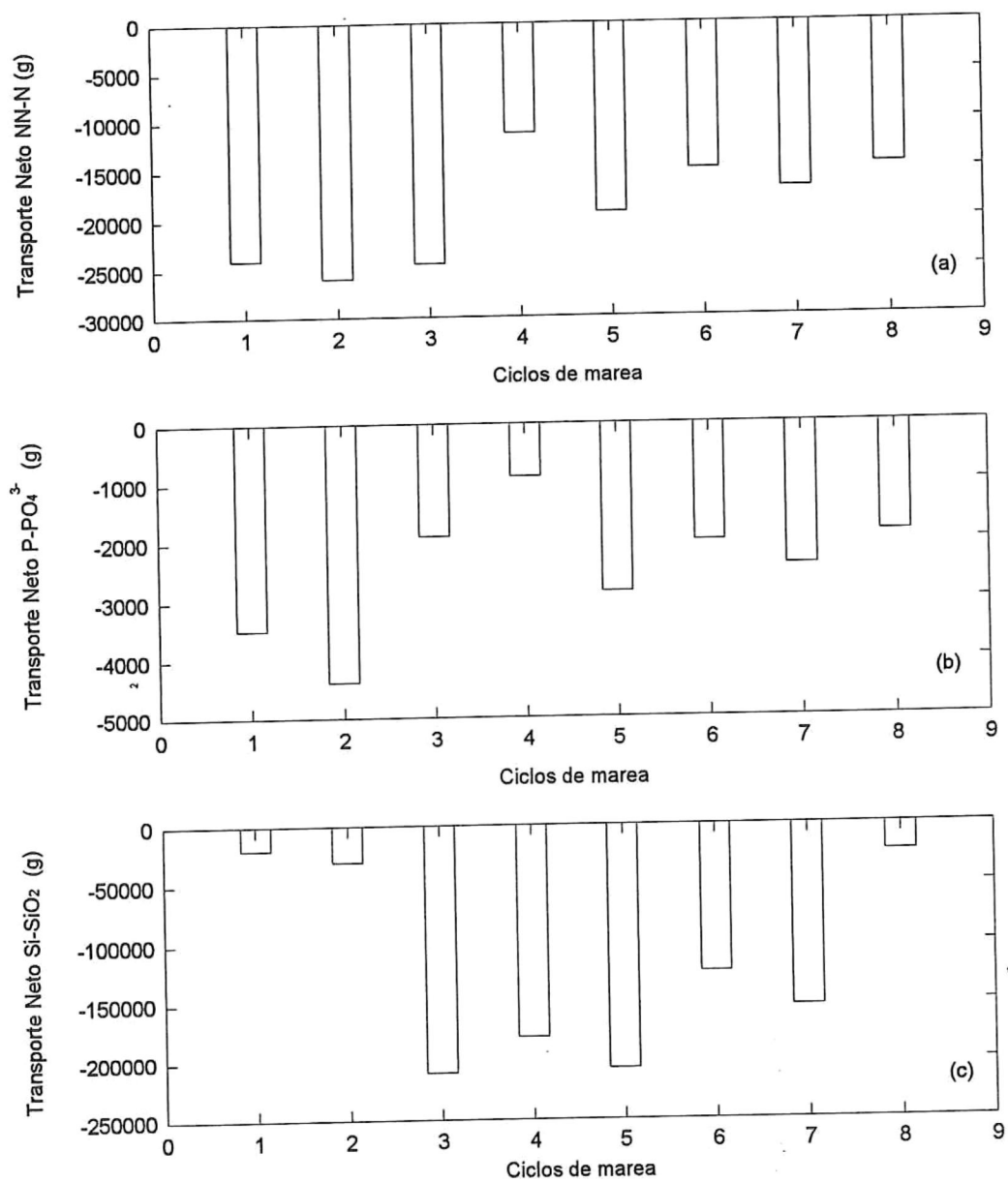


Figura 29. Transporte neto de nutrientes durante la serie de 1993. (a) nitratos+nitritos, (b) fosfato y (c) silicatos.

concluyeron en su estudio que no existen variaciones estacionales en la concentración de nutrientes en el estuario del Río Colorado.

Debido a que la serie de 1993 se inició en un período de mareas vivas concluyendo en mareas muertas, solo se utilizó la parte correspondiente a este período de la serie de 1992 para establecer la comparación. Con los resultados se establecen dos escenarios característicos: uno con flujo de río (1993) y otro sin flujo de río (1992), con el fin de determinar la importancia del flujo del río en el transporte de materiales hacia el Alto Golfo y poder establecer así comparaciones con otros sistemas del mundo.

En la tabla VII se muestran los flujos netos anuales del sistema estuarino del Río Colorado en donde se aprecia que para el sedimento en suspensión no hay una diferencia marcada en ambas condiciones, sin embargo, para el caso de los nutrientes se observa que en el escenario bajo influencia fluvial estos son mayores que para el escenario sin río. Por ejemplo, los $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ son mayores por un factor de 7.9. En el caso del PO_4^{3-} es 1.94 veces mayor y para el SiO_2 este es 77 veces más grande. Estas diferencias entre ambos escenarios están reflejando claramente la importancia del flujo de agua del río; sobre todo en el caso del SiO_2 . Este gran aumento en el SiO_2 puede deberse a que la concentración de N y P en el agua son reguladas principalmente por las interacciones entre el agua, los minerales del suelo y la biota, en cambio el contenido de sílice resulta de la alteración de las rocas y depende de la naturaleza del basamento y de la extensión del intemperismo (Billen *et al.*, 1991). En concordancia, el sílice en aguas superficiales no

Tabla VII. Transporte neto anual de sedimento en suspensión total (Ton/año), $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ (Kg/año), PO_4 (Kg/año) y SiO_2 (Kg/año) para el sistema estuarino del Río Colorado con río y sin río.

	SST	$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$	PO_4	SiO_2
Con Río	1.1×10^4	1.3×10^4	1.8×10^3	8.6×10^4
Sin Río	0.96×10^4	0.27×10^4	0.22×10^3	0.41×10^4

se afecta significativamente por las actividades agrícolas, mientras que el P, y aún más el N, son considerablemente elevados por la práctica agrícola (Billen *et al.*, 1991).

Aunque, como podemos ver, los flujos netos de nutrientes en condiciones de descarga del Río Colorado no son nada extraordinarios, los resultados de flujos netos en condiciones de ausencia de la descarga del río si lo son. El que el sistema estuarino esté exportando nutrientes al océano, aún en ausencia del aporte de estos materiales por un río, indica, o que existen otras fuentes no identificadas, o bien, que esta condición nos esté evidenciando el proceso de destrucción del delta. Los grandes volúmenes de exportación de sedimento en suspensión reiteran esta última condición; especialmente cuando no existen aportes continentales de sedimento al sistema. En el caso de los nutrientes, es particularmente interesante ver que aún cuando no existe un aporte significativo de agua dulce al sistema, y consecuentemente de nutrientes, este se convierte propiamente en una fuente de nutrientes al Alto Golfo. Estos nutrientes pueden ser derivados del sedimento que constituye a las planicies deltaicas. Estas, durante su etapa de formación cuando el río estaba activo, pudieron haber "atrapado" una gran cantidad de nutrientes en forma de agua intersticial, por lo que, la destrucción de la estructura deltaica, por la erosión de las corrientes de marea, puede ser un mecanismo por el cual estos nutrientes sean liberados a la columna de agua.

Otro aspecto interesante encontrado, es que, conforme se incrementa el intervalo de marea, la exportación de estos nutrientes es mayor debido a la intensificación de las corrientes de marea y en consecuencia de los procesos de mezcla en la columna de agua

y de la erosión del cauce del estuario por los mecanismos mencionados. Este carácter de exportador neto de nutrientes al Alto Golfo, concuerda con la hipótesis general de evolución de ecosistemas estuarinos de Odum (1969) retomada por Vitousek y Reiners (1975), quienes establecen, de manera general que, en un ecosistema joven de rápido desarrollo se produce más biomasa y el almacenamiento de nutrientes es mayor que en ecosistemas viejos, donde el crecimiento es menor, y se requieren menos nutrientes; tal podría ser el caso del sistema estuarino del Río Colorado, que ha sido forzado a pasar, por la acción del hombre, hacia un sistema ecológicamente en decadencia.

5.3. Variabilidad espacial de nutrientes

En la figura 30, donde se muestra la distribución espacial de nutrientes en superficie y fondo para el muestreo de 1993, se aprecia la tendencia de presentar concentraciones altas de NO_3^- y SiO_2 en la zona de la cabeza del estuario (estaciones 14 y 15), disminuyendo conforme incrementa la influencia marina. Este patrón de distribución de estos nutrientes a lo largo del estuario, nos indica la influencia marcada del río como fuente principal de nutrientes al sistema estuarino. Tian *et al.* (1993) reportan tendencias similares en el estuario Changjiang en China, donde encuentran un decremento gradual a lo largo del estuario, con valores altos hacia la cabeza del estuario disminuyendo drásticamente hacia la región marina, como en este estudio.

En el caso del PO_4^{3-} no se observa un gradiente marcado a lo largo del estuario. De hecho, estos presentan un comportamiento diferente a los anteriores, con valores

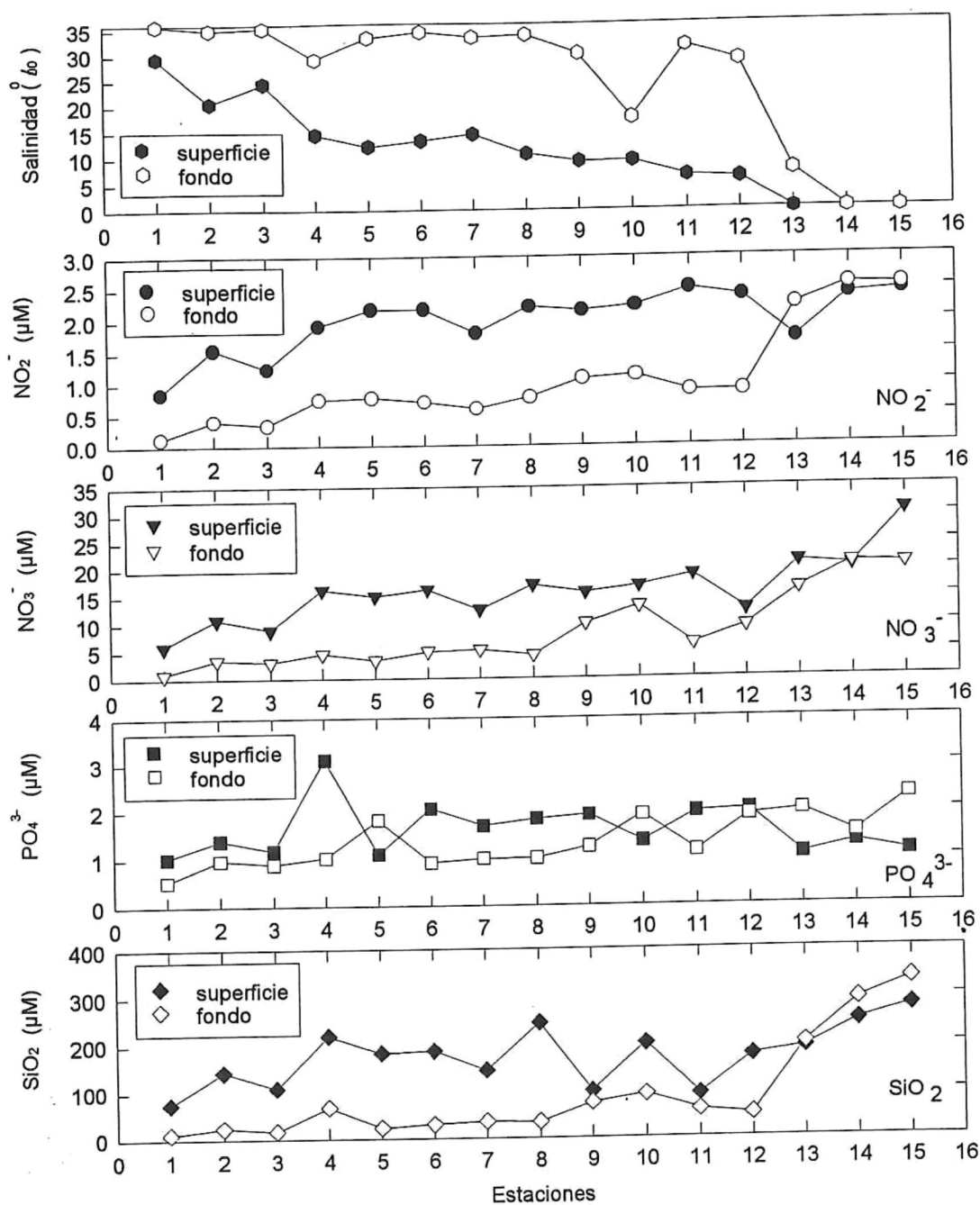


Figura 30. Distribución espacial de salinidad, nitritos, nitratos, fosfatos y silicatos, en superficie y fondo para el 16 de marzo de 1993. Estaciones 1-3 marinas, 4-12 estuarinas y 13-15 río.

ligeramente más bajos en las estaciones de la cabeza y de la zona marina, y valores ligeramente mayores en la zona estuarina, siendo más altos en las estaciones 4 y 6. De manera general, el comportamiento observado del PO_4^{3-} puede deberse principalmente al proceso de amortiguamiento entre las concentraciones en la fase disuelta y particulada (Froelich 1988), en el cual al existir un déficit de fosfatos en alguna de las dos fases, por ejemplo en la disuelta, hay liberación a partir de la fase particulada para compensar la pérdida por remoción y equilibrar la concentración de entre las dos fases.

En la figura 31 se muestran los diagramas de mezcla de NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y SiO_2 en función de la salinidad. El diagrama de NO_2^- , muestra que en la región estuarina existe adición de NO_2^- que puede ser producto de la remoción del NO_3^- como se aprecia en la figura 31b. En ambos casos el río parece funcionar como fuente de estos nutrientes, presentando un gradiente más marcado en el fondo que en la superficie. El diagrama de PO_4^{3-} , muestra una fuerte adición de PO_4^{3-} en la región del estuario, posiblemente por la liberación del PO_4^{3-} asociado al sedimento en suspensión producto del mecanismo de amortiguación antes mencionado.

El comportamiento espacial de los nutrientes a través del estuario, muestra una tendencia general a presentar valores ligeramente mayores en el canal de Baja California que en el canal Sonora. Lo anterior puede estar relacionado a que en el canal Baja California la salinidad en superficie y fondo es menor que en el segundo (Figs. 32 y 33), evidenciando con esto lo encontrado por Cupul-Magaña y Carriquiry (1992), de que el canal de Baja California actúa principalmente como exportador de materiales del delta

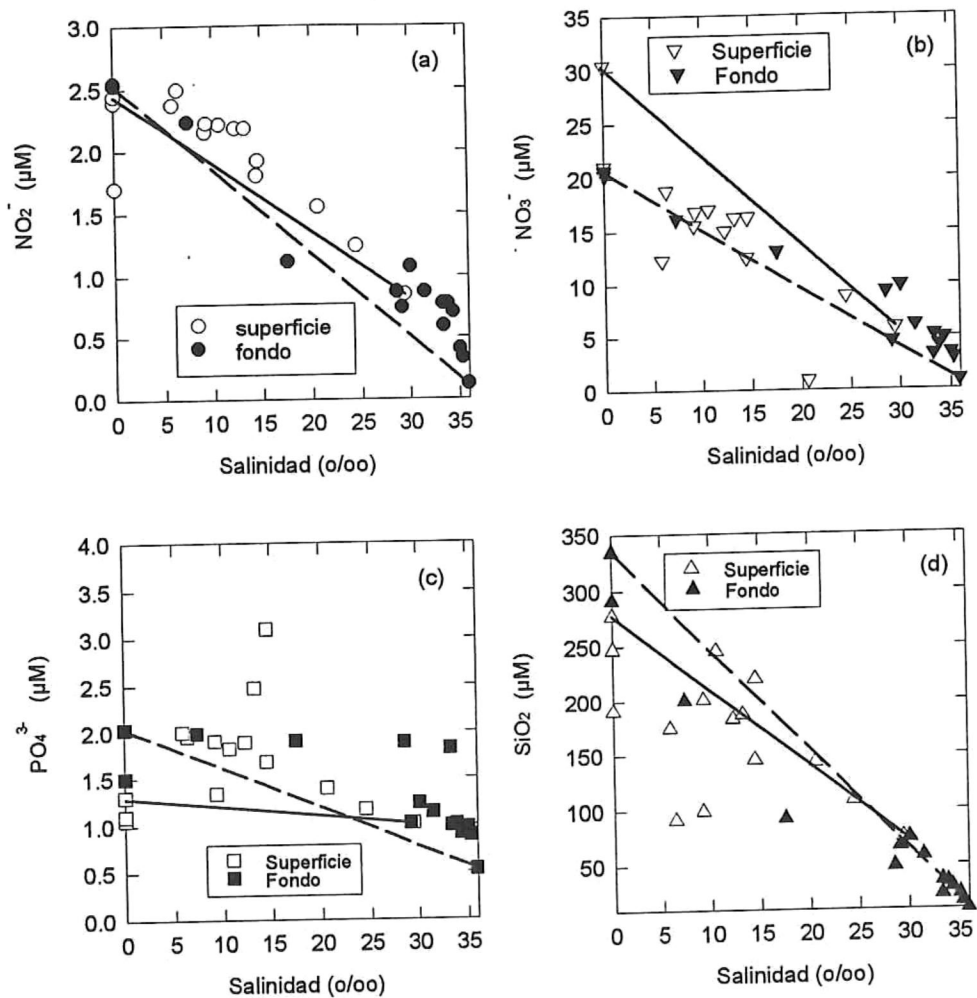


Figura 31. Diagramas de mezcla de: (a) nitritos, (b) nitratos, (c) fosfatos y (d) silicatos, en superficie y fondo, para la distribución espacial del 16 de marzo de 1993.

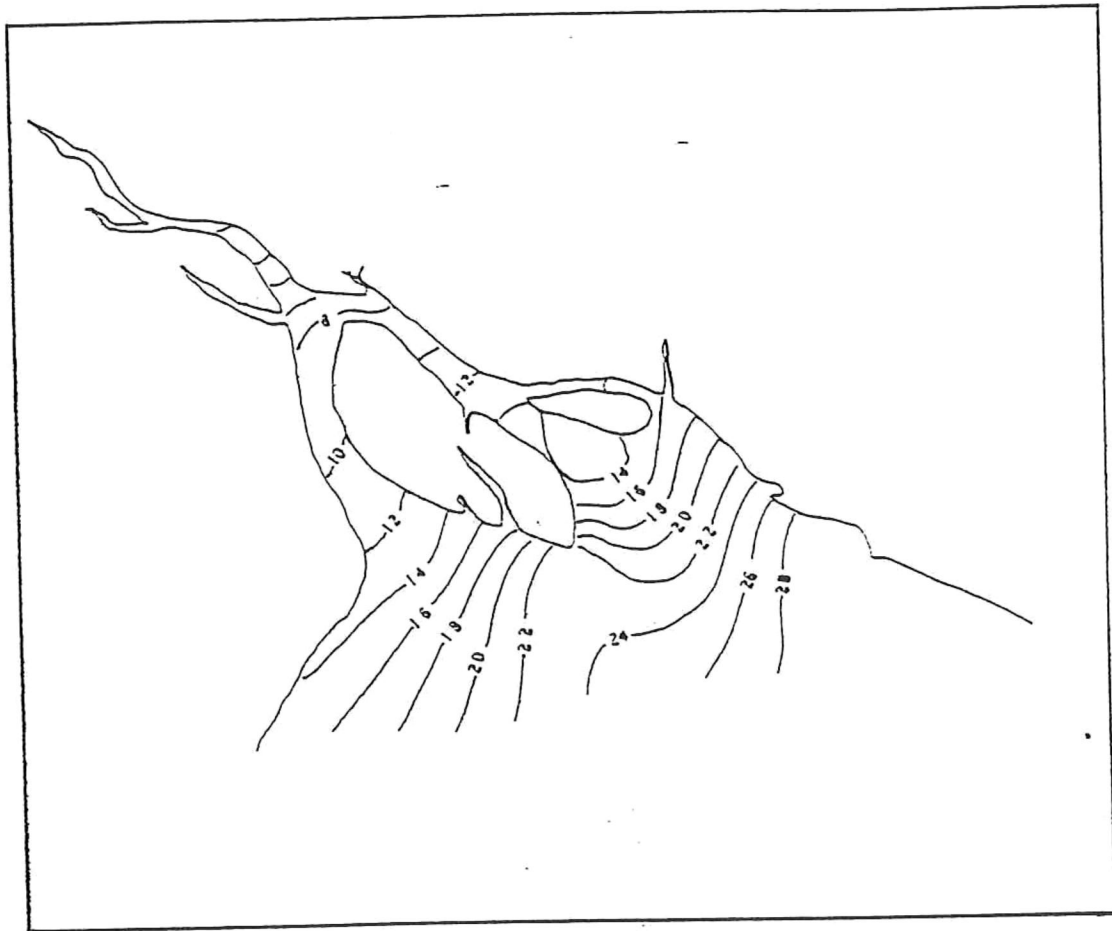


Figura 32. Isohalinas superficiales para marzo de 1993.

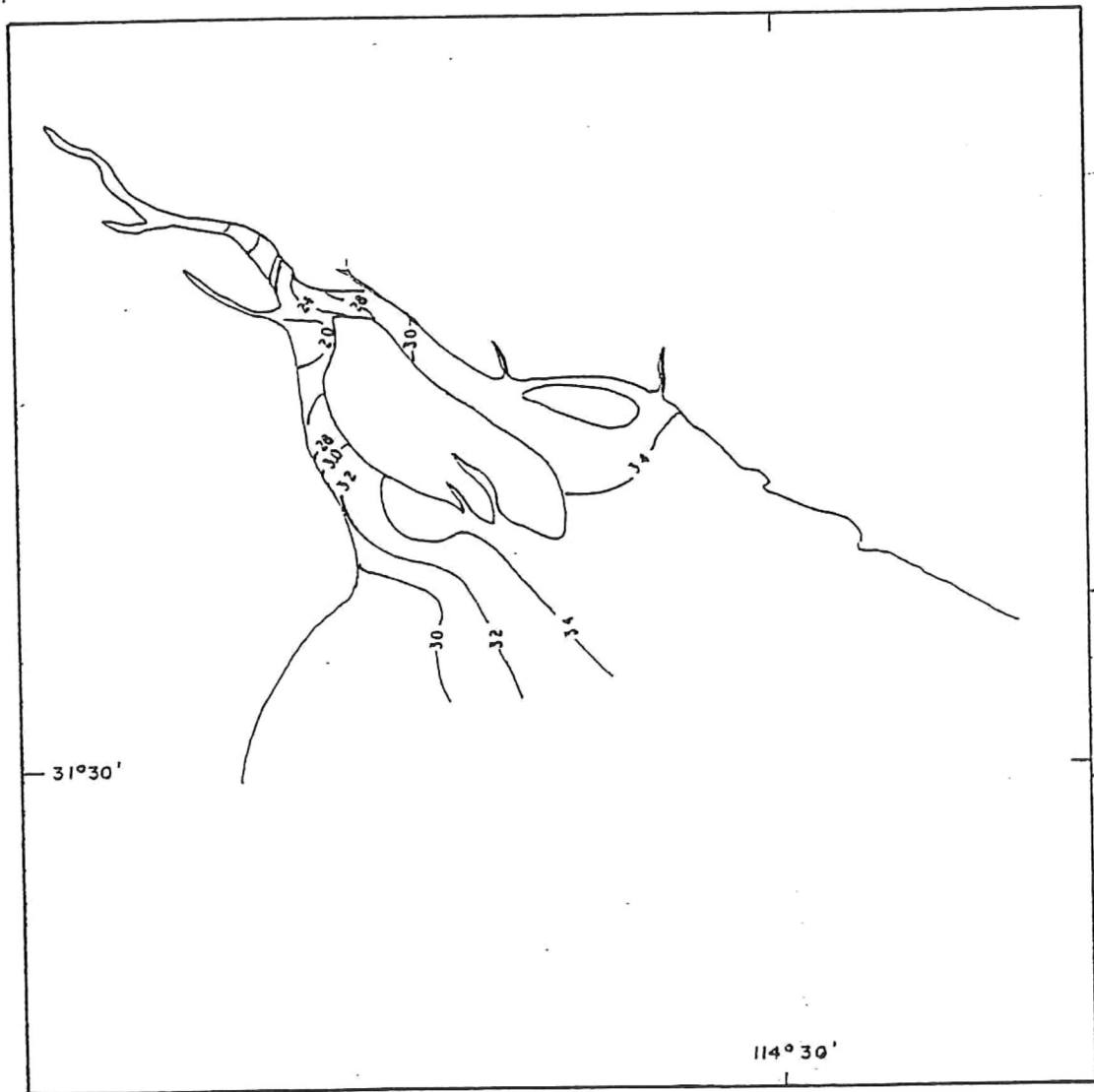


Figura 33. Isohalinas en fondo para marzo de 1993.

hacia la parte alta del Golfo de California. El efecto anterior se ilustra en la distribución de los SiO_2 (Fig. 34) pues la fuente principal de este nutriente es el flujo de agua de los ríos (Peterson *et al.*, 1975). Se observa claramente un gradiente en la distribución de este nutriente a lo largo del estuario, con los valores más altos en el canal de Baja California relacionados a las salinidades más bajas, lo cual indica en cierta medida, que la mayor parte del flujo de agua dulce se lleva a cabo por este canal, como se observa en las figuras 32 y 33.

5.4. Comparación entre los dos escenarios del estuario.

Las concentraciones de nutrientes encontradas en la serie de 1993 son comparables a las encontradas en otros ríos del mundo, e incluso superiores a algunos sistemas fluviales importantes. En el caso de los nitratos, fosfatos y silicatos los valores aquí encontrados son ligeramente mayores que para el Amazonas y Orinoco (Edmond *et al.* 1981), Zaire y Níger (Bennekom *et al.* 1978). Lo mismo ocurre con el Changjiang, en China (Tian *et al.* 1993), aunque en este caso las concentraciones de nitratos son mayores (110 μM) que en esta área de estudio (ver tabla VIII).

La distribución espacial de los nutrientes en ambas condiciones (con y sin descarga de río) es similar. Es decir, existe una tendencia a presentar concentraciones altas de nutrientes en la zona de la cabeza del estuario (principalmente en los nitratos y silicatos) disminuyendo conforme va encontrando la influencia marina. Lo anterior se puede observar claramente, comparando las figuras correspondientes a los muestreos

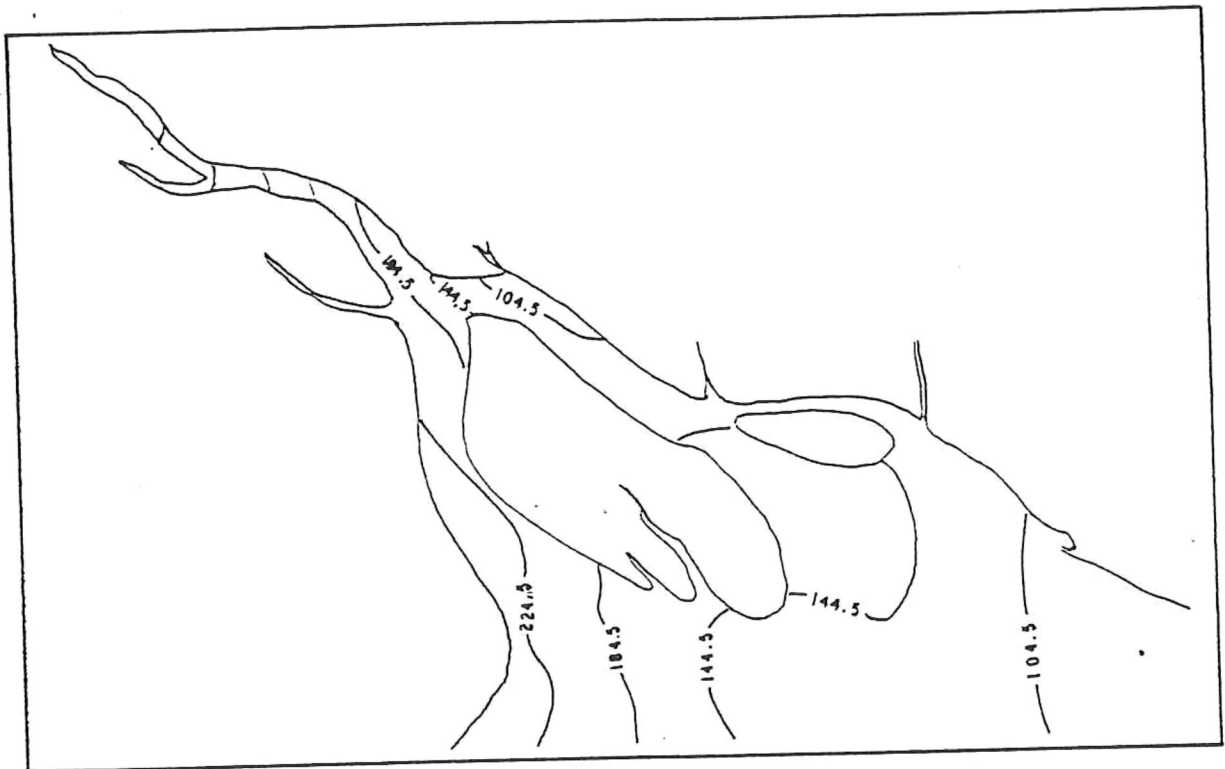


Figura 34. Isolneas superficiales de concentración de silicatos en marzo de 1993.

Tabla VIII. Comparación en la concentración promedio de nutrientes entre el Estuario del Colorado y otros grandes ríos del mundo. Concentración en μM

Estuarios	NO_3^-	PO_4^{3-}	SiO_2	Autores
Colorado	16	1.60	173	Este estudio
Changjian	70-110	0.80	110	Tian et al. 1993
Amazonas	20	0.2	140	Edmond et al. 1981
Orinoco	8	0.3	110	
Zaire	7	0.8	165	Bennekom et al. 1978
Níger	5	0.8	250	

de alta descarga (Fig.30) y de descarga nula (Fig.35), donde aparentemente el papel del río como fuente principal de nutrientes al sistema estuarino puede ser apreciado (en el caso de la figura 30).

A pesar de que Hernández-Ayón *et al.* (1993, p. 593) concluyen en su estudio hidrológico del estuario del Río Colorado, en un período de descarga fluvial nula, que el sistema es el de un estuario negativo, con salinidades generalmente mayores en la cabecera que en la boca del estuario, ellos han propuesto que la fuente principal de nutrientes al estuario del Río Colorado se debe principalmente a la entrada de agua subterránea en la cabeza del estuario, evidenciado por una disminución de la salinidad a niveles de 34 ‰ en esa zona (Fig. 35).

Tratando de encontrar las evidencias de lo concluído por Hernández-Ayón *et al* (1993), se llevaron a cabo algunos muestreos de sedimentos subsuperficiales con nucleadores de mano en diversas partes del delta y se encontró que en la zona del cauce del río, en mareas bajas, los núcleos de sedimentos presentan valores de saturación de agua de 100 % en la interfase agua-sedimento hasta niveles de 30% de agua en la base de los núcleos, a 40 cm subsuperficialmente. Asimismo, se hicieron pruebas de permeabilidad sobre el lecho del río durante mareas bajas y se encontró que los sedimentos son altamente impermeables. Tanto las evidencias de porcentaje de saturación de agua de poro, como las texturales y las de permeabilidad permiten concluir que no existe un flujo sustancial de agua subterránea a la columna de agua. Carriquiry y Cupul-Magaña (en manuscrito) concluyen que las evidencias encontradas por Hernández

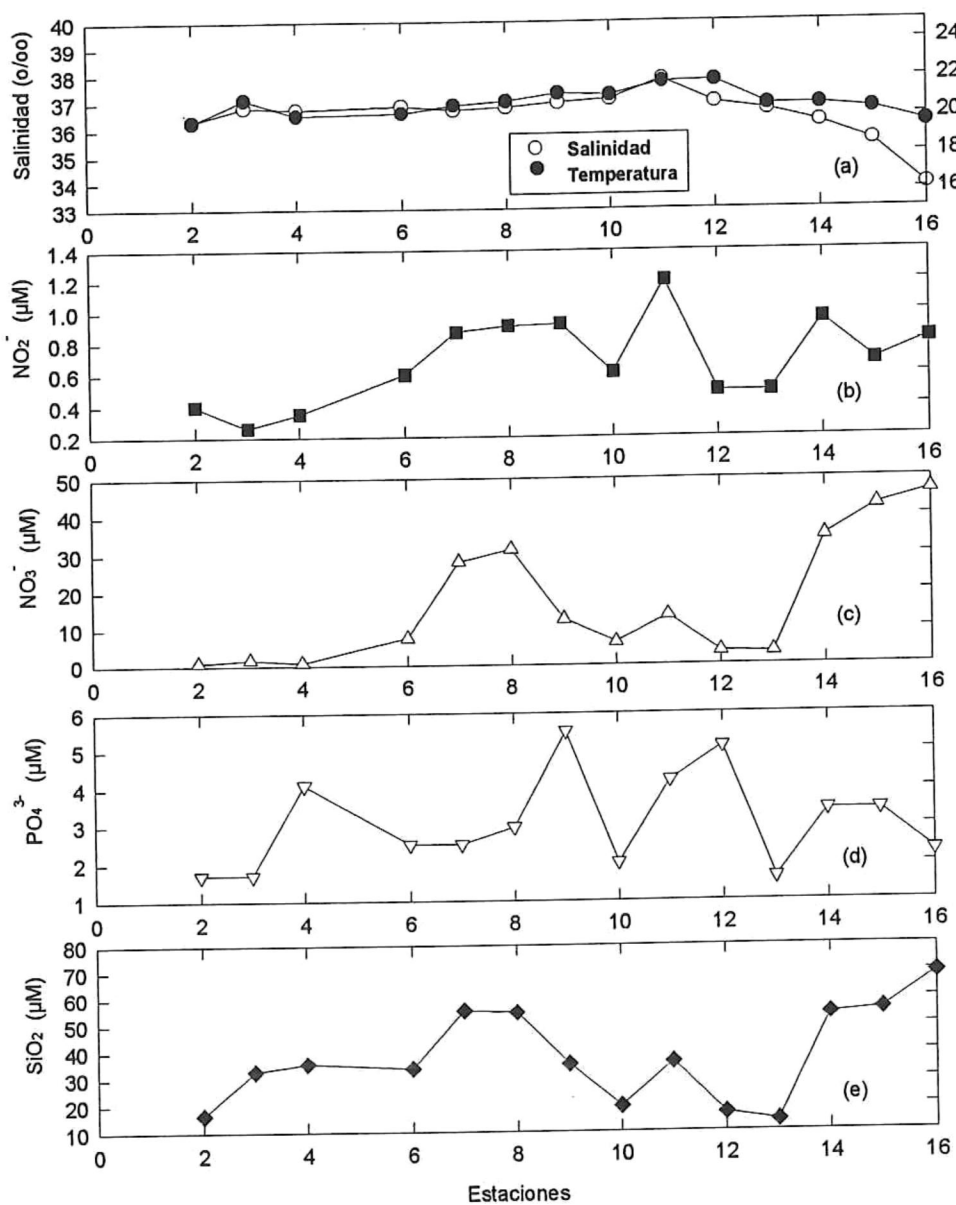


Figura 35. Distribución espacial de (a) salinidad y temperatura, (b) nitritos, (c) nitratos, (d) fosfato y (e) silicatos, a lo largo del estuario durante descarga nula del río; la estación 2 marina y la 16 cabecera del estuario. (Datos tomados de Hernández-Ayón, 1990).

Ayón *et al.* (1993) reflejan meramente un efecto local de bombeo de aguas agrícolas a la zona de la estación 11 (de ellos). Coincidentalmente, la zona del río en donde se localiza la estación 11 de Hernández-Ayón *et al.* (1993), en donde encuentran evidencias de dilución por agua subterránea, corresponde a una localidad en la que se tiene una estación de bombeo de CONAGUA. Esto indica que la dilución encontrada por estos autores es muy probablemente un efecto local por bombeo y no por flujo subterráneo. Esto también puede ser evidenciado por el nivel de dilución tan pequeño alcanzado en esa estación (de 36 ‰ en la boca a 34 ‰ en esa estación; Fig. 35). De hecho, estos autores consideran esta posibilidad al mencionar que la "dilución" encontrada en la cabecera puede ser un efecto de "contraste" al encontrar mayores salinidades en la parte media del estuario que pudiera ser causada por evaporación intensa en las zonas someras de ésta sección del estuario. Esa posibilidad contemplada por estos autores es, de hecho, muy factible.

La importancia de las aguas de drenajes agrícolas, en épocas de baja descarga de río, ha sido demostrada por Hager y Schemel (1992) en la zona del Río Sacramento en la parte norte de la Bahía de San Francisco. Estos autores encontraron que estas descargas contribuyen con cerca del 69% del transporte de nitrógeno inorgánico disuelto y con el 73% del fosfato reactivo; situación que podría estarse dando en el estuario por efecto de las descargas agrícolas del Valle de Mexicali.

Para evaluar la existencia de diferencias significativas entre los dos escenarios del Estuario del Colorado se realizó una prueba de Kruskal-Wallis de una vía, resultando que

en el caso de los nitritos, fosfatos y silicatos si existen diferencias significativas entre ambos escenarios, caracterizando con un mayor aporte de estos nutrientes por parte del Río Colorado. En el caso de los nitratos no existieron diferencias significativas entre ambos escenarios, pudiendo deberse principalmente a que en ambas épocas el sistema del estuario del Río Colorado recibe altas entradas de este nutriente por vía externa (río y drenajes agrícolas).

5.5. Patrones de Circulación

Se ha inferido en base a imágenes de satélite (Alvarez-Borrego *et al.*, 1975) que existe un patrón de circulación en contra de las manecillas del reloj en la zona del delta del Río Colorado. Sin embargo, las únicas evidencias directas parciales sobre el transporte de sedimento en suspensión son las de Zamora-Casas (1993), quién reporta que para el canal Sonora (Fig.4) existe un importe neto de sedimento en suspensión hacia el sistema.

Con la finalidad de entender cual es la dinámica del patrón de movimiento de sedimento en suspensión en la zona estuarina del Río Colorado, se realizaron series de tiempo simultáneas a la del canal principal (sección A), en las secciones correspondientes a cada canal del sistema (Canal Baja California = sección B y Canal Sonora = sección C, Fig. 4). Aunque el interés principal de realizar las series de tiempo simultáneas en 3 puntos distintos del sistema fue para estimar cuanto, del material que entra y sale por el canal principal, entra y sale por cada uno de los canales (B.C. y Son.), esta información

también proveería evidencias para tratar de inferir el patrón de movimiento de sedimentos en el sistema. En particular, se llevo a cabo una serie de tiempo simultánea en los 3 canales principales del estuario durante mareas vivas por un período de 12 hrs.

Los flujos netos de sedimento en suspensión (Fig. 36), evidencian la existencia de una mayor exportación por el canal de Baja California que por el canal Sonora. Al comparar los flujos de sedimento en suspensión en las 3 secciones, se aprecia más claramente esta tendencia ya que del 100% del material que salió por la sección A, alrededor del 31% sale por la sección B y un 15 % por la sección C, siendo 2 veces mayor lo exportado por el Canal Baja California que lo exportado por el Canal Sonora. Esta evidencia, aunado a lo reportado por Zamora-Casas (1993) permite inferir con cierta certidumbre, que el patrón de circulación en el delta es en contra de las manecillas del reloj.

El evento de avenidas del Río Colorado permitió la utilización de otras variables para determinar el patrón de circulación en el estuario. En las figuras 32 y 33 se aprecia claramente un mayor desplazamiento de las isohalinas mayores hacia el mar por el canal Baja California que por el canal Sonora, lo cual refuerza lo anteriormente mencionado para el sedimento en suspensión. En la figura 34 se aprecia que la distribución de las isolneas de concentración de SiO_2 sigue el mismo patrón de las isohalinas, confirmando además del patrón de circulación, lo mencionado anteriormente de que el flujo de agua del río es la fuente principal de este nutriente.

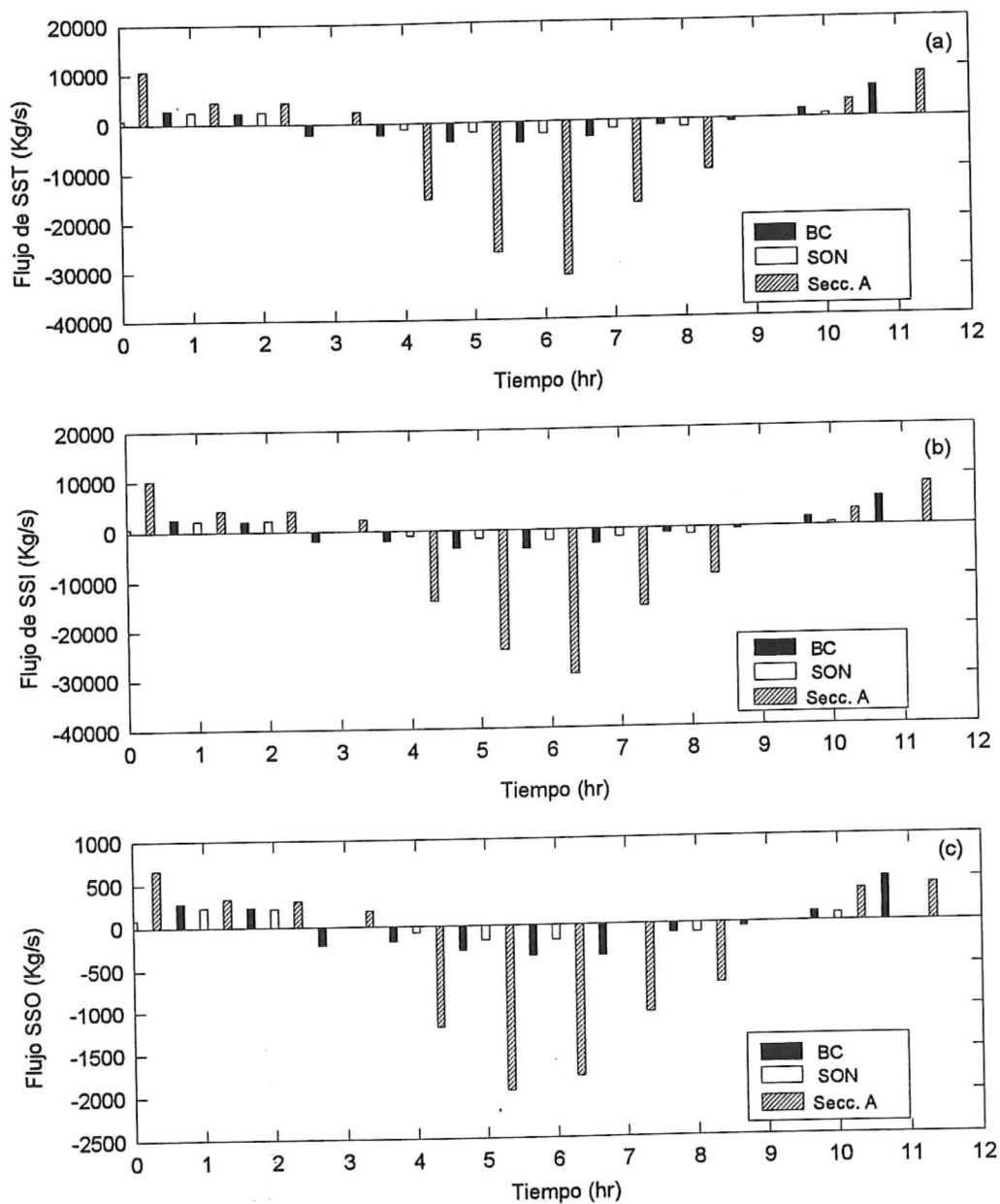


Figura 36. Flujos de sedimento en suspensión: (a) total, (b) inorgánico y (c) orgánico, para las secciones A (Canal principal), B (Baja California) y C (Sonora), durante un ciclo de marea semidiurno de la serie de 1992.

Con estos argumentos se puede concluir que efectivamente el Canal Sonora actúa como entrada principal de material al sistema y el de Baja California como salida, generando una circulación rotatoria en contra de las manecillas del reloj.

6. CONCLUSIONES.

Durante períodos de aporte nulo de agua dulce al sistema estuarino del Río Colorado, las condiciones hidrodinámicas del medio son controladas completamente por la asimetría entre el flujo y reflujos de marea, y en consecuencia, esto controla al patrón de intercambio de materiales en el sistema.

La asimetría mareal no concuerda completamente con los dos tipos clásicos de estuarios (dominados por flujo y dominados por reflujos), ya que aquí se determina que las corrientes de reflujos son más intensas que en el flujo y el período de duración de reflujos es mayor que el flujo, lo cual puede sugerir, o bien que el sistema pudiera estar "perturbado", o que se trata de un tercer tipo de estuario de acuerdo a su régimen mareal.

De acuerdo a la distribución de la concentración del sedimento en suspensión a lo largo de los ciclos de marea analizados, se determinó la presencia de dos ciclos que controlan la concentración del sedimento en suspensión: (1) un ciclo de erosión-dilución-depositación semidiurno, controlado por la asimetría en la duración del ciclo de marea y la asimetría en la intensidad de las corrientes de marea en flujo y reflujos; y (2) un ciclo que responde a la variación quincenal de la marea, caracterizado por altas concentraciones de sedimento en suspensión durante mareas vivas y bajas concentraciones durante mareas muertas.

El principal control de la variación de las concentraciones del material en el área son la componente de marea semidiurna (M_2) y en el caso del sedimento en suspensión la componente correspondiente al flujo y reflujo mareal (6 hrs.).

Durante las mareas muertas la influencia de las condiciones atmosféricas es más marcada en la regulación de los patrones de variabilidad de las condiciones físicas del medio, principalmente sobre la variabilidad de la temperatura superficial del agua; así como una marcada contribución del viento para mantener elevada la concentración del sedimento en suspensión durante la fase de mareas muertas.

Las fuentes principales de nutrientes al estuario son el aporte de agua dulce del río; la remineralización de nutrientes en la marisma incorporados a través de los canales de marea durante el reflujo; el aporte de los drenajes agrícolas y la erosión de la planicie deltaica.

La concentración de nutrientes en el área, responde al acoplamiento entre los procesos de resuspensión de sedimento de fondo; la mezcla del agua intersticial con la columna por las fuertes corrientes de marea; el aporte de la remineralización de nutrientes de los pastos marinos; la variación quincenal de la marea y los procesos de erosión del delta.

El comportamiento de los nutrientes a través del estuario muestra una tendencia a presentar concentraciones más altas en el canal Baja California que en el canal Sonora. Esto principalmente debido al patrón de flujos, inferido a partir de la distribución espacial

de nutrientes (silicatos) y salinidad, en las que se determinó que, en lo que respecta al flujo de agua en el estuario, éste tiende a salir principalmente por el canal Baja California.

Las distribuciones espaciales de nutrientes para ambos escenarios, fueron significativamente diferentes (principalmente en nitritos, fosfatos y silicatos), con concentraciones mucho mayores para el caso de los silicatos, demostrando con esto último, la importancia de la entrada de agua dulce por parte del Río Colorado sobre la influencia en las concentraciones y en la distribución de nutrientes en el estuario.

En el caso de los nitratos no se presentaron diferencias significativas entre ambos escenarios debido a que, aún cuando no hay flujo del río, existe la entrada de altas concentraciones de nitratos producto del drenaje agrícola del Valle de Mexicali.

A partir del patrón de flujos de sedimento en suspensión determinado, se establece que el delta del Río Colorado se encuentra en proceso de destrucción motivado por la falta de aporte de agua dulce, y por consiguiente, de sedimentos de origen continental.

El sistema estuarino del Río Colorado actúa como fuente de nitratos, fosfatos y silicatos. Este comportamiento responde al acoplamiento entre el flujo de agua hacia el estuario por la red de canales de marea que drenan las marismas, y a la erosión del delta con la consecuente liberación de nutrientes atrapados en los sedimentos de la planicie deltaica.

Por lo anterior, el sistema deltaico-estuarino del Río Colorado se caracteriza como un importante sistema fertilizador de las aguas de la parte Alta del Golfo de California, por lo que este sistema es un reservorio finito de estos materiales.

7. REFERENCIAS.

- Allen, G.P., G. Sauzay, P. Castaing, y J.M. Jouanneau, (1976), Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde estuary, France. En: Wiley, M., (Ed.), **Estuarine Processes. Vol. II.** Academic Press, p. 63-81.
- Allen, G.P., J.C. Salomon, P. Bassoullet, Y. Dupenhouat, y C. Granpre, (1980), Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedimentary Geology*, 26:69-90.
- Alvarez-Borrego, S., (1983), Gulf of California. En: Ketchum, B.H. (Ed.) **Ecosystems of the World 26: Estuaries and Enclosed Seas. Cap. 17.** p. 427-449. Elsevier Sci. Pub. Co. New York.
- Alvarez-Borrego, S. y Galindo-Bect, L.A., (1974), Hidrología del Alto Golfo de California. I: Condiciones durante otoño. *Ciencias Marinas*, 1:46-64.
- Alvarez-Borrego, S., Flores-Baéz, B.P. y Galindo-Bect, L.A., (1975), Hidrología del Alto Golfo de California. II. Condiciones durante invierno, primavera y verano. *Ciencias Marinas*, 2:21-36.
- Arenas, V. y De La Lanza, G., (1981), The effect of dried and cracked sediment on the availability of phosphorus in a coastal lagoon. *Estuaries*, 4:206-212.
- Aubrey, D.G. y Speer, P.E., (1985), A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part I: Observations. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 21:185-205.

- Baba, J., Peterson, C.D. y Schrader, H.J., (1991), Fine-grained terrigenous sediment supply and dispersal in the Gulf of California during the last century. En: Dauphin, J.P. y Simoneit, B.R.T., (Eds.), **The Gulf and Peninsular Province of the Californias**. pp. 589-602 The American Association of Petroleum Geologists. Memoir 47, Tulsa, Oklahoma.
- Baird, D., Winter, P.E.D. y Wendt, G., (1987), The flux of particulate material through a well-mixed estuary. *Contin. Shelf Res.*, 7: 1399-1403.
- Bennekom, A.J.V., G.W. Berger, W. Helder y R.T.P. Devries, (1978), Nutrient distribution in the Zaire Estuary and River plume. *Neth. Jour. Sea Res.*, 12:255-272.
- Billen, G., Lancelot, C. y Meybeck, M., (1991), N, P, and Si retention along the aquatic continuum from land to ocean. En: Mantoura, R.F.C., Martin, J.-M. y Wollast, R., (Eds.), **Ocean Margins Processes in Global Change**, John Wiley Ltd. p. 19-44.
- Boon, J.D.,III, (1980), Comment on "Nutrient and particulate fluxes in a salt marsh ecosystem: Tidal exchanges and inputs by precipitation and groundwater" (Valiela *et al.*). *Limnol. Oceanogr.*, 25:182-183.
- Boon, J.D.,III y Byrne, R.J.,(1981), On basin hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems. *Marine Geology*, 40:27-48.

- Bowden, K.F., (1980), Physical factors: salinity, temperature, circulation, and mixing processes. En: Olausson, E. y Cato, I. (Eds.), **Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries**, p. 80. John Wiley & Sons, Chichester.
- Carriquiry, J.D. y Cupul-Magaña, A.L., (en manuscrito), Materials flux in the estuarine basin of the Colorado River, I: Neap tides. Será sometido a Estuarine, Coastal and Shelf Science.
- Carriquiry, J.D., A. Cupul Magaña y P. Castro, (1992), Anomalía en el balance sedimentario del delta del Río Colorado. GEOS, 12:15-16. Unión Geofísica Mexicana.
- Castro R., Lavín M.F. y Ripa P., (1994), Seasonal heat balance in the Gulf of California. J. Geophys. Res., 99(C2):3249-3261.
- Chester, R., (1990), **Marine Geochemistry**. Chap. 3. The transport of material to the oceans: the river pathway. pp. 14-77. Unwin Hyman, London, 698 pp.
- Childers, D.L. y Day, J.W. Jr., (1990), Marsh-water column interactions in two Louisiana estuaries. II. Nutrient dynamics. Estuaries, 13:404-417.
- Coleman, J.M. y Wright, L.D., (1978), Sedimentation in an arid macrotidal alluvial river system: Ord River, Western Australia. Jour. Geol., 86:621-642.
- Cupul-Magaña, A.L. y Carriquiry, J.D., (1992), Flujos de materiales en la desembocadura del Río Colorado durante mareas muertas. Resúmenes del IV Congreso de la asociación de Investigadores del mar de Cortés.

- Degens, E.T., Kempe, S. y Richey, J.E., (1990), Summary: Biogeochemistry of major world rivers. En: Degens, E.T., Kempe, S. y Richey, J.E. (Eds.), **Biogeochemistry of Major World Rivers**. SCOPE 42: 323-347. John Wiley & Sons Ltd. Chichester.
- Edmond, J.M., E.A. Boyle, E.A. Grant y R.F. Stallard, (1981), The chemical mass balance in the Amazon plume I: The nutrients. *Deep-Sea Research*, 28:1339-1374.
- Esser, G. y Kohlmaier, G.H., (1990), Modelling terrestrial sources of nitrogen, phosphorus, sulphur and organic carbon to rivers. En: Degens, E.T., Kempe, S. y Richey, J.E. (Eds.), **Biogeochemistry of Major World Rivers**. SCOPE 42:297-322. John Wiley & Sons Ltd. Chichester.
- Franco, V., J.A. Maza-Alvarez, H. Ramírez-León y C.Y. Orozco-Alvarez, (1986), *Reseña Histórica (Volumen 1)*. Contrato CRISH-84-01-E, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (no publicado).
- Frihy, O.E., (1988), Nile Delta shoreline changes: Aerial photographic study of a 28-year period. *Jour. Coast. Res.*, 4:597-606.
- Froelich, P.N., (1988), Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: A primer on the phosphate buffer mechanism. *Limnol. Oceanogr.*, 33:649-668.
- Gabrielson, J.O. y Lukatelich, R.J. (1985), Wind-related resuspension of sediments in the Peel-Harvey estuarine system. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 20:135-145.

- Gardner, R.L., (1975), Runoff from an intertidal marsh during tidal exposure-recession curves and chemical characteristics. *Limnol. Oceanogr.*, 20:81-89.
- Gelfenbaum, G., (1983), Suspended-sediment response to semidiurnal and fortnightly tidal variations in a mesotidal estuary: Columbia River, U.S.A., *Marine Geology*, 52:39-57.
- Graf, W.L., (1985), **The Colorado River, instability and basin management**. Resour. Pub. in Geography. Assoc. Amer. Geographers. 86 pp.
- Hager, S.W. y Schemel, L.E., (1992), Sources of nitrogen and phosphorus to northern San Francisco Bay. *Estuaries*, 18:40-52.
- Halim, Y., (1991), The impact of human alterations on the hydrological cycle on ocean margins. En: Mantoura, R.F.C., Martin, J.-M. y Wollast, R., (Eds.), **Ocean Margin Processes in Global Change**, pp. 301-327, John Wiley & Sons Ltd.
- Hernández-Ayón, J.M., (1990), Distribución espacial y registros circadianos de NO₃, NO₂, PO₄ y SiO₂ en el delta del Río Colorado. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. UABC. 83 pp. (no publicado).
- Hernández-Ayón, J.M., M.S. Galindo-Bect, B.P. Flores-Baéz y S. Alvarez-Borrego, (1993), Nutrient concentrations are high in the turbid waters of the Colorado River Delta. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 37:593-602.
- Kempe, S., (1988), Estuaries - Their natural and anthropogenic changes. En: Rosswall, T., R.G. Woodmansee y P.G. Risser (Eds.), **Scales and Global Change**, Cap. 13. SCOPE, pp. 251-285., John Wiley & Sons.

- Kennish, M.J., (1986), **Ecology of Estuaries. Vol. I: Physical and Chemical Aspects.**
CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Ketchum, B. H., (1983), Estuarine characteristics. En: Ketchum, B.H. (Ed.) **Ecosystems of the World 26: Estuaries and Enclosed Seas.** Cap. 1. p. 1-14. Elsevier Sci. Pub. Co. New York.
- Kjerfve, B. y McKellar, H.N. Jr., (1980), Time measurements of estuarine material fluxes. En: Kennedy, V., (Ed.), **Estuarine Perspectives.** Acad. Press, New York, p. 341-357.
- Kjerfve, B., L.H. Stevenson, J.A. Proehl, T.H. Chrzanowsky y W.L. Kitchens, (1981), Estimation of material fluxes in an estuarine cross section: A critical analysis of spatial measurement density and errors. *Limnol. Oceanogr.*, 26:325-335.
- Lavín, M.F. y Organista, S., (1988), Surface heat flux in the northern Gulf of California. *Jour. Geophys. Res.*, 93(C11):14,033-14,038.
- Liss, P.S., G. Billen, R.A. Duce, V.V. Gordeev, J.-M. Martin, I.N. McCave, J. Meincke, J.D. Milliman, M.-A. Sicre, A. Spitzky y H.L. Windom, (1991), Group Report: What regulates boundary fluxes at ocean margins? En: Mantoura, R.F.C., Martin, J.-M. y Wollast, R., (Eds.), **Ocean Margin Processes in Global Change**, pp. 111-126, John Wiley & Sons Ltd.
- Madden, C.J., Day, J.W. Jr. y Randall, J.M., (1988), Freshwater and marine coupling in estuaries of the Mississippi River deltaic plain. *Limnol. Oceanogr.*, 33:982-1004.

- Mantoura, R.F.C., Martin, J.-M. y Wollast, R., (1991), Introduction, En: Mantoura, R.F.C., Martin, J.-M. y Wollast, R., (Eds.), **Ocean Margin Processes in Global Change**, pp. 1-3, John Wiley & Sons Ltd.
- McRoy, P.C., Barsdate, R.J. y Nebert, M., (1972), Phosphorus cycling in an eelgrass (*Zostera marina L.*) ecosystem. *Limnol. Oceanogr.*, 17:58-67.
- Meckel, L.D., (1975), Holocene sand bodies in the Colorado Delta area, Northern Gulf of California. En: Broussard, M.L. (Ed.), **Deltas, Models for Exploration**. Houston Geological Society. p. 239-266.
- Meybeck, M., (1982), Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *Amer. Jour. Science*, 282:401-450.
- Milliman, J.D., (1991), Flux and fate of fluvial sediment and water in coastal seas. En: Mantoura, R.F.C., Martin, J.-M. y Wollast, R., (Eds.), **Ocean Margin Processes in Global Change**, pp. 69-89, John Wiley & Sons Ltd.
- Milliman, J.D. y Meade, R.H., (1983), World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Jou. Geology*, 91:1-21.
- Milliman, J.D., Quraishee, G.S. y Beg, M.A.A., (1984), Sediment discharge from the Indus River to the ocean: Past, present and future. En: Haq, B.U. y Milliman J.D. (Eds.), **Marine Geology and Oceanography of the Arabian Sea**, pp. 65-70. van Norstrand Reinhold Co., New York.
- Nichols, M.M., (1977), Response and recovery of an estuary following a river flood. *Jour. Sed. Petrol.*, 42:1171-1186.

- Nichols, M.M. y Biggs, R.B., (1985), Estuaries. En: Davies, R.A. Jr., (Ed.), **Coastal Sedimentary Environments**, 2nd. Ed. p. 77-186. Springer-Verlag, New York.
- Nixon, S.W., (1980), Between coastal marshes and coastal waters -A review of twenty years of speculation and research on the role of salt marshes in estuarine productivity and water chemistry. En: Hamilton, P. y McDonald, K.B., (Eds.), **Estuarine and Wetland Processes: With Emphasis on Modelling**. Plenum Press, New York, p. 437-525.
- Odum, E., (1969), The strategy of ecosystem development. *Science*, 164:262-270.
- Officer, Ch.B. y Nichols, M.M., (1980), Box model application to a study of suspended sediment distributions and fluxes in partially mixed estuaries. En: Kennedy, V.S. (Ed.) **Estuarine Perspectives**. Academic Press, pp. 329-340.
- Peterson, D.H., T.J. Conomos, W.W. Broenkow y E.P. Scriveri, (1975), Processes controlling the dissolved silica distribution in San Francisco Bay. En: Cronin, L.E. (ed.), **Estuarine Research, vol I**. Academic Press. New York, p. 153-187.
- Pethick, J., (1984), **An Introduction to Coastal Geomorphology**. Chap. 9. Edward Arbold Ltd. London, p. 167-189.
- Postma, H.,(1965), Water circulation and suspended matter in Baja California Lagoons. *Neth. Jour. Sea Res.*, 2:566-604.
- Pritchard, D.W. y Schubel, J.R., (1981), Physical and geological processes controlling nutrients levels in estuaries. En: Nelson, B.J. (Ed.), **Estuaries and Nutrients**. p. 47-69. Humana Press Inc.

- Reyes-Coca, S., Miranda, F. y García J., (1990), Climatología de la región noroeste de México (Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa). Parte I.- Precipitación: Series de tiempo de valor total mensual y estadísticas del año climatológico. Publicación EBA No. 3. Reporte Técnico CIOFIT9001, CICESE, Ensenada, B.C., México., 170 pp.
- Schubel, J.R., (1971), Tidal variation of the size distribution of suspended sediment at a station in the Chesapeake Bay turbidity maximum. *Neth. Jour. Sea Res.*, 5:252-266.
- Settlemyre, J.L. y Gardner, L.R., (1977), Suspended sediment flux through a salt marsh drainage basin. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 5:653-663.
- Shetye, S.R. y Gouveia, A.D., (1992), On the role of geometry of cross-section in generating flood-dominance in shallow estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 35:113-126.
- Smetacek, V., U. Bathmann, E.-M. Nöthing y R. Scharek, (1991), Coastal eutrophication: Causes and consequences. En: Mantoura, R.F.C., Martin, J.-M. y Wollast, R., (Eds.), **Ocean Margin Processes in Global Change**, pp. 251-279, John Wiley & Sons Ltd.
- Smith, S.E. y Abdel-Kadar, A., (1988), Coastal erosion along the Egyptian Delta. *Jour. Coast. Res.*, 4:245-255.
- Speer, P.E. y Aubrey, D.G., (1985), A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part II: Theory. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 21:207-224.

- Stevenson, J.C., Ward, L.G. y Kearney, M.S., (1988), Sediment transport and trapping in marsh systems: Implications of tidal flux studies. *Marine Geology*, 80:37-59.
- Strickland, J.D.H. y Parson, T.R.,(1972), **A practical handbook of seawater analysis**. 2nd. Edition. Fish. Res. Bd. Can. Bull. 167. Canada.
- Sykes, G., (1937), **The Colorado Delta**. Amer. Geogr. Soc. Spec. Pub. No. 19. Kennikat Press, N.Y., 193 pp.
- Tian, R.C., Hu, F.X. y Martin, J.-M., (1993), Summer nutrient fronts in the Changjiang (Yantze River) Estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 37:27-41.
- Thompson, R.W., (1968), Tidal flat sedimentation on the Colorado River Delta, Northwestern Gulf of California. The Geological Society of America. Memoir 107. 129p.
- Uncles, R.J., Ong, J.E. y Gong, W.K., (1990), Observations and analysis of a stratification-destratification event in a tropical estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 31:651-665.
- Vale, C. y Sundby, B., (1987), Suspended sediment fluctuations in the Tagus estuary on semi-diurnal and fortnightly time scales. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 25:495-508.
- Vandivere, W.B. y Vorster, P., (1984), Hydrology analysis of the Colorado River floods of 1993. *GeoJournal*, 9:343-350.
- Vaux, P.D., (1992), Manejo de los embalses del Río Colorado. *Ingeniería Hidráulica en México*, VII:122-131.

- Vitousek, P. y Reiners, W., (1975), Ecosystem succession and nutrient retention: A hypothesis. *Bioscience*, 25:376-381.
- Ward, G.L., (1981), Suspended-material transport in marsh tidal channels, Kiawah Island, South Carolina. *Marine Geology*, 40:139-154.
- Whiting, G.J., H.N.Jr. McKellar, B. Kjerfve y J.D. Spurrier, (1985), Sampling and computational desing of nutrient flux from a Southeastern U.S. saltmarsh. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 21:161-184.
- Zamora-Casas, C., (1993), Comportamiento del seston en la desembocadura del Río Colorado, Sonora-Baja California. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C. 80 p. (no publicado).
- van Andel, Tj.H., 1964, Recent marine sediments of the Gulf of California. En: van Andel, Tj. H. y Shor, G.G., (Eds.), **Marine Geology of the Gulf of California**. A.A.P.G. Memoir 3, p. 216-310.