



**Universidad Nacional
Autónoma de México**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Unidad Académica Mazatlán

**Dinámica y Procesos Dispersivos en el
Complejo Lagunar Bahía de Altata /
Ensenada del Pabellón, Sinaloa**

Tesis

Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias del Mar
(Oceanografía Física)

Presenta

Ismael Diego Nuñez Riboni

Director

Dr. Noel Carbajal Pérez

Comité tutorial:

Dra. Adela Monreal Gómez

Dr. Federico Páez Osuna

Mazatlán, Sinaloa, Julio de 2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicado a mi hermano
y su pequeña familia:
Yessika y Fernando

¿Qué es en definitiva el mar?
¿por qué seduce? ¿por qué tienta?
suele invadirnos como un dogma
y nos obliga a ser orilla

nadar es una forma de abrazarlo
de pedirle otra vez revelaciones
pero los golpes de agua no son magia
hay olas tenebrosas que anegan la osadía
y neblinas que todo lo confunden

Mario Benedetti

Agradecimientos

Agradecer a todas las personas que de alguna u otra forma hicieron posible cualquier trabajo como el presente es imposible. Así que sólo lo haré con aquellas que lo hicieron más directamente en el ámbito académico y administrativo. A los que no están en esta lista (pero también a algunos de los que están) las gracias, innecesarias entre la gente que de verdad se quiere, se las doy todos los días de otra forma. Como siempre sucede ellos saben bien quiénes son y jamás pretendería saldar lo que les debo con un simple agradecimiento en papel. Así pues, vaya mi reconocimiento sincero:

A mi asesor, el Dr. Noel Carbajal Pérez, y a los miembros de mi comité tutorial, Dra. Adela Monreal Gómez y Dr. Federico Páez Osuna, por el apoyo brindado.

A los miembros del jurado, por las atinadas correcciones y sugerencias: Dr. Noel Carbajal Pérez, Dra. Adela Monreal Gómez, Dr. Federico Páez Osuna, Dr. Steven Czitrom Baus y Dr. Anatoliy Filonov.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Universidad Nacional Autónoma de México por las becas otorgadas durante los dos años que duró el trabajo de maestría.

Al M. en C. David Serrano por los primeros programas en MATLAB para procesar los datos y también por su apoyo y ayuda constantes.

Al M. en C. Yovani Montaña Ley, al M. en C. Ramón Peraza Vizcarra y a los pescadores de El Castillo, Sinaloa, que colaboraron en la salida de campo.

A la Sra. Margarita Cordero Ruiz por velar eternamente por los intereses de los alumnos de la estación Mazatlán en general, y por velar por los míos en particular.

Al Mat. Germán Ramírez Reséndiz por su invaluable ayuda en cuestiones de cómputo, y al Lic. Carlos Suarez por su colaboración.

A todo el personal administrativo de la Unidad Académica Mazatlán, al Jefe de la Unidad, Dr. Michel Hendrikx, a la encargada de la mapoteca, Sra Ma. Victoria Montes Montes, y en especial a la secretaria de Jefatura, Sra. Natalia Guadalupe Medina Barba.

A la Sra. Ma. Clara Ramírez Jáuregui por el insuperable apoyo en búsqueda de material bibliográfico, en la Biblioteca Ma. Helena Caso de la Unidad Académica Mazatlán.

Al ICMYL-UNAM y a su Posgrado: al coordinador Dr. Martín Merino Ibarra y al personal administrativo en la ciudad de México, Sras. Norma Suazo y Gabriela Almaraz

Al Ing. Alberto Galaviz por el mapa digital del sistema lagunar.

En especial, gracias a mi hermano por su ayuda en materia de cómputo y de programación en C, así como por la depuración que hizo del programa de advección-difusión.

Ismael Núñez Riboni
9 de junio del año 2000
Mazatlán

CONTENIDO

Agradecimientos	3
Resumen	5
Introducción	7
Capítulo 1. Planteamiento del problema	13
Área de estudio.....	13
Antecedentes	13
Objetivos	14
Metodología	15
Capítulo 2. Circulación	17
Sistema de ecuaciones.....	17
Condiciones de frontera	19
En la superficie ($\zeta=z$).....	19
En el fondo ($\zeta=-H$).....	20
En las paredes laterales	21
En la frontera abierta.....	21
Integración vertical.....	22
Solución de las ecuaciones.....	25
Adaptación del modelo.....	25
Batimetría.....	25
Mareas	28
Descarga del río.....	32
Viento.....	32
Resultados y discusión	32
Armónico M_2	32
Principales armónicos de marea.....	36
Viento.....	41
Capítulo 3. Advección y Difusión de Partículas Pasivas	45
Ecuación de advección–difusión.....	46
Modelo de advección–difusión	47
Criterio para las magnitudes de V y σ	55
Resultados y discusión	58
Difusión por M_2 desde el río Culiacán	58
Difusión por M_2 desde zonas de escurrimientos agrícolas	68
Difusión por todas las mareas desde el río Culiacán.....	72
Difusión por todas las mareas desde granjas camaronícolas.....	78
Correlación con la distribución de sedimentos y algunos metales pesados	81
Capítulo 4. Conclusiones	85
Circulación	85
Difusión.....	85
Perspectivas.....	86
Recomendaciones.....	87
Bibliografía	89

Resumen

El complejo lagunar Bahía de Altata / Ensenada del Pabellón, en el estado de Sinaloa, es un sistema estuarino que recibe los escurrimientos de las aguas dulces del río Culiacán y los numerosos drenes agrícolas adyacentes. En este trabajo se ha adaptado a dicho sistema un modelo semi-implícito de circulación barotrópica bidimensional, similar al modelo HAMSOM. Con él se determinó de forma general la circulación en el sistema, así como los procesos de transporte a través de un modelo de dispersión de partículas pasivas acoplado con el modelo de circulación. Con el modelo de dispersión se simularon las trayectorias lagrangianas de miles de partículas en el sistema, lo que permitió conocer cualitativamente la dispersión de los contaminantes que entran a las lagunas a partir del río, las zonas de escurrimientos agrícolas y las granjas camaronícolas.

Hemos concluido que la circulación del sistema está determinada fundamentalmente por el viento y las mareas semidiurnas, siendo la más importante el armónico M_2 . Las mareas hacen que el sistema oscile teniendo dos regiones bien definidas, separadas por un nodo en el canal que une a la sección conocida como Ensenada del Pabellón con la sección conocida como Bahía de Altata. La distribución de las corrientes está de acuerdo con estudios previos (Peraza-Vizcarra, 1973).

El transporte de sustancias pasivas desde el río Culiacán está regulado principalmente por dos factores: la corriente del río y la "difusividad" de la sustancia. El primer factor determina si las sustancias llegarán o no a la boca del sistema, mientras que el segundo si serán expulsadas del sistema por la línea de costa. La corriente de marea y la magnitud y dirección del viento modifican parcialmente el transporte, pero llevando en la gran mayoría de los casos las sustancias hacia Ensenada del Pabellón. Las corrientes sólo en el caso de difusión con los principales siete armónicos de marea, pueden llevar una pequeña fracción de las partículas hasta la boca del sistema. Este escenario no se modifica sustancialmente para los casos de transporte desde las zonas de escurrimientos agrícolas o de granjas camaronícolas.

La dinámica y los experimentos numéricos de transporte están de acuerdo cualitativamente con la distribución geográfica de los sedimentos en el sistema lagunar, según estudios previos (Peraza-Vizcarra, 1973, Green-Ruiz, 1996) que indican un ambiente marino en Altata, mientras que Pabellón tiene un fondo formado predominantemente por limos y arcillas (sustancia de origen terrígeno). Es muy probable que el sistema tenga poca capacidad de auto-reciclamiento, pues la gran mayoría de las partículas son incapaces de alcanzar la boca. Esto podría resultar preocupante en algunos años, dado los altos índices de contaminación que presenta hoy día este sistema lagunar. Asimismo, los experimentos de difusión están de acuerdo también cualitativamente con concentraciones en los sedimentos de ciertas sustancias como carbono orgánico, carbohidratos y algunos metales pesados.

Introducción

Antes que complicado ecosistema, que inagotable yacimiento de elementos químicos, que emparedado de la corteza y la atmósfera, que desafortunado depósito de desechos, que medio para el transporte y la comunicación, que hermoso paisaje para el esparcimiento, y antes que misterio y quimera, el mar no es otra cosa que una inmensa masa de agua en movimiento bajo el influjo de la atmósfera y la rotación terrestres, de las fuerzas de gravedad de la tierra, la luna y el sol. Como gigantesco electrolito en continuo intercambio de energía con el universo que lo rodea, el océano es tan susceptible al análisis matemático y experimental de un físico como cualquier manzana que cae de un árbol. Susceptible, más no accesible, pues el mar es un sistema caótico y complicado: es un medio mecánico fijo a un sistema no inercial que está sometido a interacciones gravitacionales complejas e imposible de soslayar; molecularmente está formado por un líquido que no es precisamente lo que se pueda llamar ideal, dada la infinidad de iones disueltos que contiene; los intercambios de energía a los que está sometido son complicados y difíciles de modelar satisfactoriamente. El mar es un ente real, tangible, que si bien es físicamente un problema plausible de análisis, éste dista mucho de aquel mítico caballo esférico del que solíamos escuchar en la facultad. La cantidad de fenómenos físicos que se presentan en el océano forman una miríada que es capaz de opacar al conjunto de estrellas en la noche más despejada. Así, la aplicabilidad de la física al estudio de este antiguo amigo del hombre parece no tener límites, y si bien ya nos consta la inexistencia de aquellos fantásticos monstruos legendarios que antaño se creía que en él habitaban, el mar está muy lejos aún de revelarnos todos sus secretos.

La aplicación más directa y simple de la física al estudio del mar está relacionada con el movimiento de las aguas, es decir, con las corrientes. El agua de los mares no puede escapar al conjunto de leyes universales que rigen el movimiento de todo lo material y macroscópico que se mueve a velocidades no relativistas: la mecánica clásica. Esta rama de la física aplicada al movimiento de un fluido se convierte en *mecánica de fluidos*. A pesar de que existen otros factores, dado que el mar está en continuo intercambio de energía con el fondo, con la atmósfera, sin contar los intercambios químicos (lo que hace que exista una pequeña fracción de termodinámica clásica involucrada) es la mecánica de fluidos la principal herramienta cuando se trata de desenmascarar las corrientes del océano. Y como siempre que se resuelven las ecuaciones del movimiento de la mecánica de fluidos hay cuatro puntos importantes a considerar: las fuerzas involucradas, las condiciones de frontera, las aproximaciones y el método de solución. Habiendo definido estos tópicos para nuestro problema particular habremos construido un modelo de circulación que, dependiendo de las aproximaciones, será válido para un mar, un océano completo, una laguna costera, un estuario, etc.

En la práctica todo modelo de circulación es numérico y asistido por computadora,¹ pues es literalmente imposible resolver de forma analítica las ecuaciones del movimiento para cualquier sistema oceánico real. Desde el punto de vista de las ciencias del mar, los modelos de circulación son una poderosa herramienta, indispensable para comprender a fondo todos los fenómenos naturales involucrados en un sistema. Efectivamente, la explicación de muchos procesos químicos en el mar o en zonas costeras, como el transporte de contaminantes, así como de muchos otros procesos biológicos y geológicos está estrechamente relacionada con la dinámica de las aguas. Conocerla desde el punto de vista observacional, con mediciones *in situ*, sería extremadamente caro y complicado. Así, los modelos de circulación son un camino alternativo excelente para eludir esta situación. Sin embargo, es importante recalcar que un método no sustituye al otro, sino que, en la práctica hoy en día, estos métodos se complementan. Por otro lado, los modelos presentan otras ventajas sobre las observaciones, ya que nos permiten estudiar de forma aislada cada uno de los factores involucrados en la circulación, esto es, *experimentar* bajo condiciones controladas, etc.

Este es el principal aporte de la física clásica teórica a las ciencias del mar en todo el mundo, y nuestro país no es la excepción. México, con sus más de 11000 kilómetros de costas, cuenta con un excelente potencial marítimo. Más de 125 lagunas costeras cubriendo una superficie de aproximadamente 12600 km² (Lankford, 1977), se localizan a lo largo del Golfo de México, Mar Caribe, Golfos de California y Tehuantepec y en general en el Pacífico Mexicano. Las lagunas costeras reciben considerables aportes de nutrientes asociados a descargas de los ríos y escurrimientos terrestres lo que las convierte en zonas de alta productividad, e incluso gran parte de la pesca mundial (90%) tiene lugar en estas regiones. Este hecho justifica sobradamente que el estudio de las lagunas costeras adquiera suma importancia. Aunque se han realizado amplios estudios en diversas ramas de la oceanografía en varios complejos lagunares (un ejemplo es Smith et al., 1997, donde se hace un estudio de flujos de carbón, nitrógeno y fósforo en varias lagunas costeras mexicanas, entre ellas en el sistema lagunar que toca a este trabajo), la parte correspondiente a la investigación de los procesos hidrodinámicos en detalle es escasa. A menudo el entendimiento e interpretación de fenómenos biológicos, químicos y geológicos dependen de un conocimiento profundo de la hidrodinámica de las lagunas. Sin embargo, considerando la importancia que debe tener la hidrodinámica de las lagunas desgraciadamente existen pocos estudios al respecto en las lagunas costeras mexicanas (Dressler, 1981; Sanay González, 1997; Rendón-Villalobos et al. 1999).

En la actualidad se vislumbra un factor nuevo que hace aun más trascendental la investigación de la circulación en cuerpos lagunares, como es el caso de los sistemas acuáticos costeros de la zona noroeste de nuestro país: Éstos generalmente reciben descargas de ríos que fluyen a través de tierras de cultivo y de focos de aguas negras tanto industriales como urbanos; asimismo, como ha venido ocurriendo en los últimos diez años, son afectados también por la

¹ Esto está relacionado con la naturaleza no lineal de estos modelos.

contaminación proveniente de la acuicultura (como es el caso del camarón, Páez-Osuna et al., 1999). De hecho, estudios recientes (Páez-Osuna et al., 1998b) han demostrado que el desarrollo continuo del cultivo del camarón en México, junto con los efluentes municipales y agrícolas, han creado en la última década los primeros síntomas de impacto negativo en el medio ambiente, debido a la descarga de nutrientes y de materia orgánica en las aguas costeras. Esto acarrea efectos adversos en los ecosistemas e implica la urgente introducción de medidas de manejo correcto de la acuicultura del camarón, con el fin de mitigar los efectos adversos en el medio ambiente. Este es el caso general del sistema lagunar tropical de Bahía de Altata / Ensenada del Pabellón en el estado de Sinaloa (Figura 1). Tal y como lo demuestran recientes estudios con pesticidas marcados radiactivamente (Gonzalez-Farias, 1997; Carvalho et al., 1996), en este sistema los niveles de contaminación han alcanzado en ocasiones valores alarmantes. Otras investigaciones han demostrado que los sedimentos y varios organismos recolectados en la zona están contaminados con fósforo, metales pesados y pesticidas (Páez-Osuna et al., 1992, 1993a, b, 1994; Izaguirre-Fierro, et al., 1992; Readman et al., 1992). La polución de la laguna proviene principalmente de las granjas camaronícolas y de los productos químicos que se utilizan como fertilizantes en los cultivos altamente productivos de Sinaloa, así como de desechos urbanos e industriales. Dichas sustancias son arrastradas hasta el complejo lagunar por el río Culiacán y por otros escurrimientos cercanos a Ensenada del Pabellón. Estas descargas aunadas a los contaminantes que se producen en el sistema acuático debido al cultivo de camarón aumentan en forma considerable la carga de nutrientes.

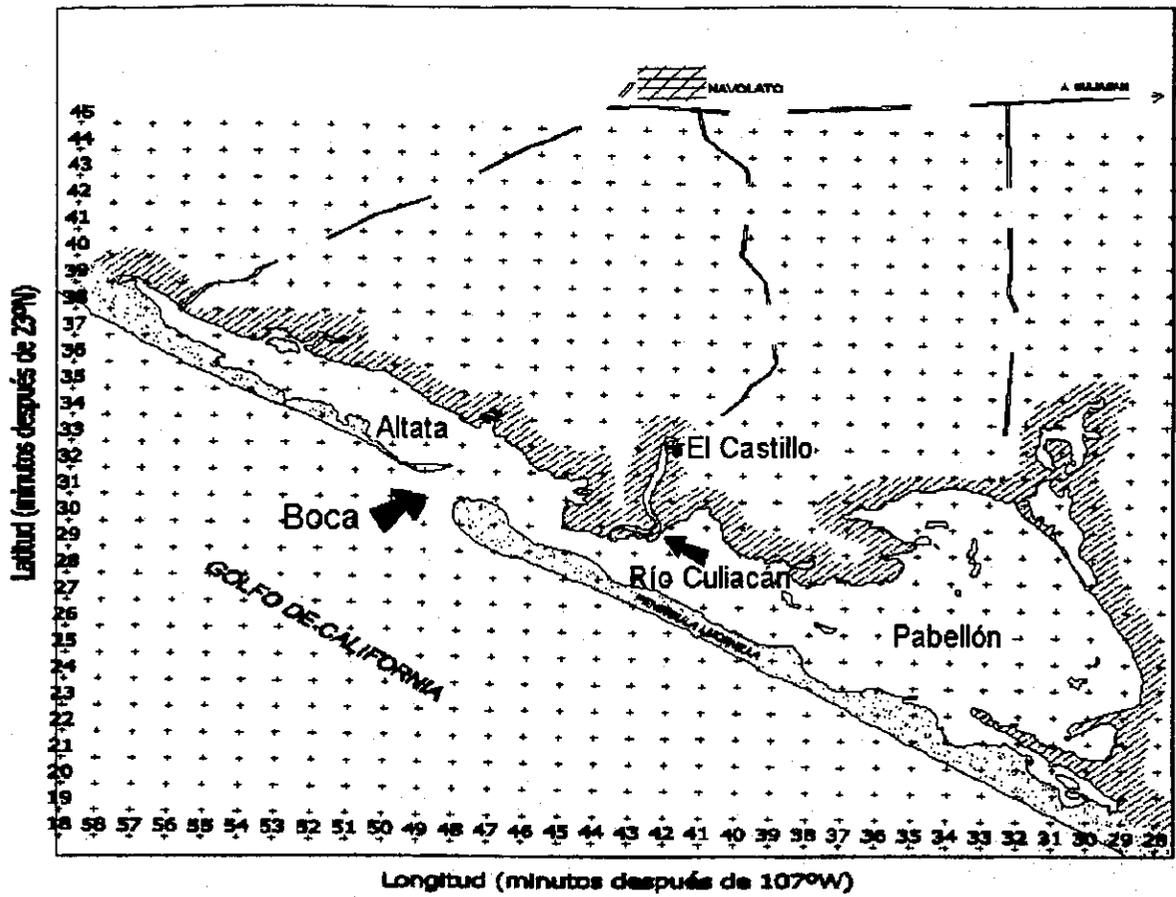


Figura 1. El sistema lagunar Bahía de Altata / Ensenada del Pabellón.

Dada la vasta región de manglares que rodea al sistema lagunar, éste sustenta a una gran diversidad de especies animales y es santuario de vida silvestre, incluidas un gran número de aves migratorias (González-Farías et al, 1997); asimismo ofrece ambientes que son fuente de alimentos y sitios de reproducción y de refugio para especies en peligro de extinción, como tortugas marinas y cocodrilos. Por otro lado, el sistema es de gran importancia socio-económica, pues no solo representa un atractivo escenario para el turismo, sino que cuenta con una gran cantidad de pesquerías y de cultivos acuáticos cuyos productos pueden ser afectados por la contaminación. Esto tendría como consecuencia el decaimiento de dichos sectores económicos, así como severos problemas de salud para la población.

Por lo tanto, un conocimiento integral acerca del destino y la distribución de los contaminantes en el complejo lagunar Altata/Pabellón es importante. Y para ello resulta indispensable la determinación de las corrientes con el fin de conocer cómo se dan los procesos de dispersión en el sistema acuático. Por ello, en este trabajo de tesis se ha adaptado un modelo de circulación bidimensional barotrópico al sistema lagunar, con el cual se ha establecido de forma general la circulación del sistema. Asimismo, se ha desarrollado un sencillo modelo de transporte de sustancias pasivas que se ha acoplado con el modelo de circulación para simular los procesos de dispersión de varios miles de partículas. Aunque los

estudios recientes mencionados muestran indicios de que el sistema aun no ha alcanzado niveles realmente preocupantes, la presente investigación nos lleva a suponer que al ritmo de crecimiento actual el problema de una grave contaminación en el futuro podría estar predeterminado. Por ejemplo, se ha demostrado que la componente de corriente mareal más importante (M_2), así como las corrientes producidas por el viento son incapaces en la mayoría de los casos de llevar las partículas que ingresan al sistema desde el río Culiacán hasta la boca, sacándolas así del complejo lagunar.

Capítulo 1. Planteamiento del problema

Área de estudio

El sistema lagunar Bahía de Altata / Ensenada del Pabellón está representado en la Figura 1. Se encuentra localizado entre los 24° 19' y 24° 40' de latitud Norte y los 107° 28' y 107° 58' de longitud Oeste, en la costa del estado de Sinaloa. Se trata de un sistema lagunar costero del tipo III A (Guerrero-Galván, 1997), según la clasificación de las lagunas costeras en México, es decir, una laguna costera con barrera de plataforma interna en la cual los ejes de orientación son paralelos a la línea de costa, y con afluentes de agua dulce permanente que le confieren condiciones de hiposalinidad en las regiones más internas de Ensenada del Pabellón y el río Culiacán. Es un sistema de aproximadamente 360 km² que incluye la Bahía de Altata y la Ensenada del Pabellón. La primera cubre un área de cerca de 80 km² y es una larga y angosta laguna paralela a la línea de costa con sedimentos arenosos y una profundidad promedio de 5 m. Dos entradas profundas la conectan con el mar (una pequeña, cerrada gran parte del año), por lo que las condiciones marinas prevalecen (32 UPS) (Guerrero-Galván, 1997). La Ensenada del Pabellón es más ancha que la Bahía de Altata y cubre 247 km² con sedimentos de limo y arcilla y con una profundidad promedio de 1 m. Irrigada con aguas del río Culiacán, esta laguna muestra condiciones estuarinas (15-28 UPS) todo el año (Guerrero-Galván, 1997).

Hasta hace unos años, el río tenía una descarga anual promedio de 80 m³/s (SEMARNAP-CNA 1996). Hoy día se cree (comunicación personal con el Dr. Federico Páez Osuna) que la descarga es de aproximadamente 3.5 m³/s. Para el sistema, el río Culiacán es una fuente de sustancias químicas, las cuales se dispersan a lo largo, ancho y profundo de la laguna. Aunque existen estudios sobre concentraciones de sustancias químicas como nitratos, nitritos, hierro, etc. y sedimentos (ver siguiente sección), no se conoce totalmente el efecto o el alcance de estas sustancias debido a que tampoco se conoce la dinámica del sistema. Esta es una deficiencia grave que se pretende resolver con este trabajo de tesis.

Antecedentes

Como ya se debió haber vislumbrado por lo dicho anteriormente, las investigaciones realizadas hasta la fecha en el sistema lagunar Altata / Ensenada del Pabellón son muchas y en múltiples áreas de las ciencias del mar. En biología marina se han estudiado las comunidades bénticas del sistema y se han encontrado hasta veinte especies nuevas (Gomez-Noguera, 1998); la distribución de la meiofauna y el efecto que sobre ella tienen los contaminantes de la laguna (Gomez-Noguera and Hendrickx, 1997) y se han analizado la composición y abundancia del micro y el zooplancton (Gomez-Aguirre and Gomez-Noguera, 1995). En el ámbito de la geología marina se han determinado la morfología y la sedimentología del sistema (Ayala-Castanares et al., 1994), se han realizado

detallados estudios de la composición química de los sedimentos (en cuanto a metales se refiere), así como de su textura granulométrica (Green-Ruiz, 1996) y también se les ha medido la concentración de fósforo total, inorgánico y orgánico (Perez-Bernal, 1999); así mismo, en la rama de la geofísica, se han computado los transportes de sedimentos en suspensión y en arrastre (Montaño-Ley and Páez-Osuna, 1994), y se han hecho algunas mediciones de parámetros sedimentarios y físicos (Peraza-Vizcarra, 1973).

Las investigaciones en el ámbito de la química marina se concentran en su totalidad en estudios relacionados con la contaminación del complejo lagunar. En este terreno son punta de lanza los estudios llevados a cabo por el Laboratorio de Geoquímica y Contaminación Costera de la Unidad Académica Mazatlán de la UNAM, encabezado por el Dr. Federico Páez Osuna. Algunos de estos trabajos se han citados líneas atrás. Otras investigaciones llevadas a cabo por este grupo han sido: análisis de los sedimentos por su contenido de carbohidrato total y carbón orgánico, con el fin de obtener un indicador de la materia orgánica derivada de la agricultura y de la industria de la caña de azúcar (Páez-Osuna, et al., 1998a); determinación de concentración de metales pesados en ostión (Páez-Osuna et al., 1993a, Osuna-López et al., 1999), almeja (Páez-Osuna et al., 1993b) y mejillón (Páez-Osuna et al, 1994), trabajos de gran importancia dada la asimilación que estos organismos (comúnmente consumidos entre la población) tienen de las sustancias que se utilizan como fertilizantes y pesticidas en las zonas agrícolas adyacentes; por último, determinación de carbono y fósforo en los sedimentos (Páez-Osuna et al., 1992).

Otras investigaciones de otros grupos en la zona han sido: determinación de flujos de nutrientes en los sedimentos, con el fin de conocer el impacto del desarrollo agrícola en la zona, lo que ha indicado que los niveles actuales de nutrientes en el sistema podrían poner en peligro el futuro del ecosistema, incluyendo las pesquerías (De La Lanza Espino and Verdugo, 1998); determinación de la distribución en los sedimentos de insecticidas organofosforados de "nueva generación", compuestos altamente tóxicos (Readman et al., 1992).

Objetivos

El propósito final de este trabajo de tesis es el estudio y análisis de los procesos de dispersión de contaminantes en el complejo lagunar de Altata / Ensenada del Pabellón, es decir, estimar a través de un modelo numérico el transporte de sustancias pasivas mezcladas (disueltas o no) con el agua. Para esto se requiere cumplir con los siguiente objetivos:

General: La adaptación de un modelo bidimensional apropiado para zonas someras, con el fin de simular la circulación barotrópica en el complejo lagunar. Este modelo es similar al modelo HAMSOM, ya aplicado con éxito en regiones tan distintas como el Mar del Norte (Backhaus, 1985), Mar de Luzón en Indochina (Pohlmann, 1985), Estrecho de Georgia (Crean et al, 1988), Golfo de California (Carbajal, 1993) y Delta del Río Colorado (Carbajal 1997).

Particular: Acoplar el modelo anterior con un modelo de dispersión de partículas pasivas que calcule las trayectorias lagrangianas de los corpúsculos utilizando el campo de velocidades del modelo de circulación.

Metodología

El Equipo requerido fue:

- Lancha
- Ecosonda con termómetro
- Corrientímetro
- CTD
- Computadora
- GPS

La metodología a seguir fue:

- 1) Medición de la batimetría. Esta consiste en medir la profundidad en diferentes puntos del sistema (utilizando para ello un GPS y una ecosonda), para luego corregirla por mareas.
- 2) Construcción de la retícula de batimetría. Se recopilan los datos de profundidades medidas in situ y con programas de computadora se interpolan y extrapolan para obtener una batimetría "digital" del sistema.
- 3) Recopilación o medición de los datos necesarios para alimentar el modelo: amplitudes y fases de marea en la boca de la laguna, datos de viento, descargas medias del río Culiacán, ubicación geográfica de las zonas de escurrimientos agrícolas. Esto se obtiene de la literatura existente.
- 4) Adaptación del modelo de circulación. Consiste en modificar el programa de computadora para que se adapte a Altata / Ensenada del Pabellón, introduciéndole los datos de los puntos 2) y 3).
- 5) Simulación bidimensional barotrópica de la circulación con mareas y viento, es decir, experimentos numéricos asistidos por computadora que permitieron reproducir el comportamiento de las mareas y las corrientes en el sistema lagunar.
- 6) Desarrollo del modelo de advección-difusión.
- 7) Cálculos de dispersión con el modelo.

Capítulo 2. Circulación

Todo cuerpo material en movimiento está sujeto a las leyes de la mecánica clásica que fundó Sir Isaac Newton en el siglo XVIII ² y el agua de los mares no es la excepción. De estas leyes la más difundida es la llamada *segunda ley de Newton*, que establece que conociendo la masa y todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo *puntual* es posible determinar su trayectoria. O con símbolos matemáticos, representado en la ecuación:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a},$$

donde el vector \vec{F} es la suma de todas las fuerzas aplicadas a un cuerpo puntual de masa m , y el vector \vec{a} es la aceleración que esas fuerzas le producen al cuerpo.

Con cuerpo puntual nos referimos a uno que se pueda describir en su movimiento como un punto, es decir, que sea suficientemente pequeño comparado con las distancias que recorre. Si imaginamos a una parcela de agua como formada por una miríada de gránulos puntuales con movimiento relativamente independiente unos de otros, podemos aplicar a cada uno la segunda ley de Newton para describir el movimiento de toda la parcela (su traslación y sus deformaciones). Bajo este concepto llegamos a una mecánica de fluidos, que es la herramienta principal en la determinación de la circulación en oceanografía. Así, desarrollando la segunda ley de Newton se llega a las ecuaciones principales de la mecánica de fluidos, las cuales son utilizadas en cualquier modelo de circulación: *las ecuaciones de Navier–Stokes*. Estas ecuaciones junto con las ecuaciones de conservación de masa y energía, así como condiciones de frontera son las que determinan el campo de velocidades de cualquier parcela de agua. A continuación damos una breve descripción de estas ecuaciones como se usan en el modelo de circulación utilizado en este trabajo de tesis.

Sistema de ecuaciones

Lo importante en las ecuaciones del movimiento son las fuerzas involucradas, y al discriminar entre significativas y no significativas es cuando se empieza a construir un modelo. El modelo utilizado en este trabajo es similar al conocido modelo HAMSOM (*Hamburg Shelf Ocean Model*) que ha sido desarrollado por el Dr. Jan Backhaus y sus colegas del *Institut für Meereskunde* ³ de la Universidad de Hamburgo (Backhaus 1983, 1985). Dicho modelo es uno tridimensional baroclínico apto para zonas someras. Lo siguiente probablemente sólo sea comprensible para personas con un avanzado conocimiento de la mecánica de fluidos. Aquellos lectores que no estén interesados en las generalidades del

² Estrictamente, deberíamos aclarar que se trata de cuerpos moviéndose a velocidades no relativistas (es decir, “lentamente”) y suficientemente masivos, de forma tal que las leyes de la mecánica relativista y de la mecánica cuántica sean eludibles. El agua de los océanos y, en general, todos los cuerpos que observamos moverse cotidianamente caen en este grupo.

³ Instituto para el Clima.

modelo de circulación aplicado en esta tesis pueden obviar esta parte (hasta la sección Integración Vertical). Por otro lado, los que estén interesados en los detalles del modelo HAMOSM pueden referirse a una descripción reciente con las modificaciones actuales (Huang, 1995).

En las ecuaciones del movimiento involucradas en HAMSOM se considera como marco de referencia a la tierra rotante, lo que introduce fuerzas inerciales y de Coriolis.⁴ Las demás fuerzas involucradas son la viscosidad, la fricción con el viento y con el fondo (introducidas como condiciones de frontera), el gradiente de presión y la atracción gravitacional de la tierra. No se toman en cuenta la atracción gravitacional directa con la luna y el sol para generar mareas, debido a lo pequeño del sistema lagunar comparado con la longitud de onda de las mareas. En cambio, las mareas se simulan por *co-oscilación* con la marea del golfo de California, es decir, simplemente se perturba la altura del mar en la boca reproduciendo las mareas del golfo. Estas perturbaciones se propagarán por toda la laguna, simulando así las mareas. Otras características del modelo, algunas de las cuales son aproximaciones típicas, son: el fluido se considera incompresible; se aplica la aproximación hidrostática a la ecuación de movimiento vertical; los esfuerzos de Reynolds se parametrizan de acuerdo a la teoría K; sólo se consideran las componentes horizontales de la aceleración de Coriolis y se utiliza la aproximación de Boussinesq (LeBlond, 1978).⁵ Las ecuaciones de Navier-Stokes como se usan en el modelo HAMSOM, también conocidas como las ecuaciones de la hidrodinámica para aguas someras, son las siguientes (Carbajal, 1993):

Ecuación de movimiento en la dirección x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x$$

Ecuación de movimiento en la dirección y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y$$

Ecuación hidrostática:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0$$

⁴ Estas fuerzas suelen llamarse también pseudo-fuerzas, ya que estrictamente no son una fuerza pues no surgen de la interacción entre cuerpos, sino que simplemente son una consecuencia de medir el movimiento con respecto a un sistema no inercial.

⁵ Esta aproximación consiste en introducir una linealización en las ecuaciones del movimiento a través de una presión y una densidad de perturbación.

donde u , v , y w son las velocidades en las direcciones x , y y z , t es el tiempo, f es el parámetro de Coriolis, ρ es la densidad, p la presión, A_h y A_v son los coeficientes de viscosidad turbulenta horizontal y vertical, F_x y F_y son cualquier fuerza externa adicional (como la gravitacional con la luna y el sol) en la dirección x y en la y , y g la aceleración producida por la gravedad.

Otras condiciones físicas a las que está sujeto el sistema se expresan a través de ecuaciones adicionales relacionadas con la conservación de la masa y con el estado termodinámico del sistema. Así, hay que agregar al anterior conjunto las siguientes ecuaciones:

Ecuación de continuidad (conservación de la masa):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

*Ecuaciones de conservación para la salinidad y temperatura:*⁶

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_{sh} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_{sh} \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_{sv} \frac{\partial S}{\partial z} \right) + Q_s$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_{sh} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_{sh} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_{sv} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T$$

Ecuación de estado para el agua de mar (UNESCO):

$$\rho = f(S, T, p)$$

Aún es necesario agregar más información al modelo en forma de ecuaciones que deberán resolverse simultáneamente con las anteriores. Se trata de las condiciones que prevalecen en las fronteras de la parcela de agua (fondo, superficie, línea de costa, etc.), así como las condiciones existentes en el instante inicial de la modelación. A estas restricciones o ecuaciones adicionales necesarias para llegar a la solución de cualquier conjunto de ecuaciones diferenciales se le conoce como *condiciones iniciales y de frontera*.

Condiciones de frontera

En la superficie ($z=\zeta$)

Condición cinemática en forma lineal:

⁶ Ya que el modelo bidimensional es barotrópico estas ecuaciones para la salinidad y la temperatura no entran en juego.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = w_s,$$

donde ζ es la altura de la superficie del mar sobre el nivel medio del mar y el subíndice S se refiere a "superficie".

Condiciones dinámicas:

En la superficie el esfuerzo del viento τ_s está dado por:

$$A_v \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_s \equiv \tau_s^x = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} / \rho$$

$$A_v \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_s \equiv \tau_s^y = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} / \rho.$$

La presión es continua a través de la interfaz aire-agua:

$$p_s = p_a.$$

La condición de frontera en superficie para la temperatura está dada por:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_s = Q,$$

donde Q es el flujo total de calor ganado por el mar.

En el fondo ($z=-H$)

Condición cinemática:

$$w_b + u_b \frac{\partial H}{\partial x} + v_b \frac{\partial H}{\partial y} = 0,$$

donde el subíndice b indica que se trata de cantidades en el fondo.

Condiciones dinámicas:

El esfuerzo ejercido por el fondo marino en la columna de agua está expresado por:

$$A_v \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_b \equiv \tau_b^x = F_C u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$$

$$A_v \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_b \equiv \tau_b^y = F_C v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$$

donde F_C es una constantes que resulta de considerar el término de fricción de forma implícita.

En las paredes laterales

Condición cinemática:

Se fuerza a que el flujo normal en las paredes laterales de la cuenca sea nulo:

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0,$$

donde \vec{n} es un vector unitario normal a la pared de la cuenca (a la costa) en el punto en cuestión.

Condición dinámica:

Se asume que no hay esfuerzo transmitido lateralmente por el costado de la pared, es decir, una condición de no deslizamiento:

$$A_H \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} = 0.$$

La presión es continua a través de las paredes:

$$p_p = p_i$$

donde el subíndice p se refiere a la pared y el i se refiere a la parte interna de la cuenca.

En la frontera abierta

En la frontera abierta varios tipos de condiciones de frontera son aplicadas. La elevación de la superficie del mar, como ya habíamos apuntado, queda sujeta a siete armónicos de mareas de la Tabla 1, en la página 30. Las velocidades son determinadas con la condición simplificada de radiación de Orlanski (Orlanski, 1976). La temperatura y la salinidad son establecidas con la condición de gradiente cero. Los gradientes de velocidad son iguales a cero en la frontera abierta.

Integración vertical

De termodinámica clásica sabemos que todas las variables termodinámicas de cualquier sistema siempre son dependientes entre sí, salvo contadas excepciones. Esto quiere decir que la variación de cualquiera de las características fisicoquímicas de una sustancia (la temperatura, la presión, la salinidad, etc.) siempre hará variar a las demás. La densidad de una solución salina es un ejemplo típico. Aumentar la cantidad de sal en ella hace que aumente también su densidad. De igual forma, si incrementamos la presión el líquido se contrae haciéndose más denso y, contrariamente, si aumentamos su temperatura el líquido se expande haciéndose menos denso. A esta condición general en la que la densidad es marcadamente una función de la temperatura, la salinidad y la presión, se le llama situación *baroclínica*. Esta es la que prevalece en mar abierto como se ve claramente en cualquier perfil de salinidad o densidad.

Por otro lado, puede ocurrir que la dependencia de la densidad con la temperatura y la salinidad quede "enmascarada" debido a que estas cantidades no varían en todo el sistema. Piénsese, por ejemplo, en un lago somero de salinidad y temperatura homogéneas. A esta condición se le conoce como situación *barotrópica*.⁷ En una situación tal las isopicnas, o superficies de igual densidad, siempre son paralelas entre sí ya que ésta cantidad sólo dependerá de la profundidad. Asimismo, dado que el agua es casi incompresible, la dependencia de la densidad con la presión es lineal y las isobaras, o superficies de igual presión, serán paralelas a las isopicnas. Por otro lado, en una situación baroclínica la dependencia de la densidad y la presión con las otras variables deforman las isopicnas y las isobaras de forma tal que dejan de ser paralelas entre sí. Así, el paralelismo entre isobaras e isopicnas suele utilizarse también como definición de situación barotrópica o baroclínica.

Las corrientes verticales (la convección), así como las variaciones en las corrientes horizontales (la variación de la advección) en los sistemas acuáticos naturales se origina en gran medida por variaciones de la densidad a lo largo de la columna de agua.⁸ Una estratificación "anormal" o inestable del agua en la que capas densas descansan sobre capas poco densas origina fuertes corrientes (verticales y horizontales) imposibles de soslayar en cualquier modelación seria. Sin embargo, en una situación barotrópica, en la que la estratificación del agua es "natural" o estable (pues depende únicamente de la profundidad) no habrá convección, y la advección será la misma a lo largo de toda la columna de agua.⁹ Así, basta con un modelo bidimensional que describa únicamente los movimientos horizontales para modelar la circulación en un sistema tal.

⁷ Si no causa confusión, puede pensarse —como se expresa a menudo— que en esta situación la densidad es únicamente una función de la presión.

⁸ Aún en una situación barotrópica existen variaciones en las corrientes a lo largo de la columna de agua producidas por el efecto del viento en la superficie, lo que ocasiona el llamado "arrastre de Eckman".

⁹ Estrictamente esto no es del todo cierto, pues existen también componentes verticales de la circulación debido a la aceleración de Coriolis, a la turbulencia y a la difusión molecular. Sin embargo, estas contribuciones son tan pequeñas que se pueden despreciar sin remordimiento.

Como se observa de las ecuaciones de la hidrodinámica para aguas someras, se trata de un modelo baroclínico general capaz de describir la circulación tridimensional. Sin embargo, aún en los sistemas acuáticos baroclínicos (como los estuarios) en los que sólo una modelación de este mismo tipo puede dar la descripción completa de la circulación, es posible y necesario hacer también una modelación barotrópica para poder determinar qué tan fuertes son las corrientes producidas por la *baroclinicidad* del sistema. Así, integramos las ecuaciones anteriores sobre la variable z para obtener un promedio vertical sobre toda la columna de agua, y convertir al modelo baroclínico en uno barotrópico que describa únicamente la circulación bidimensional. Las ecuaciones resultantes quedan en términos de los *transportes horizontales* U y V (Huang, 1995):

$$U = \int_{-H}^{\zeta} u dz$$

$$V = \int_{-H}^{\zeta} v dz$$

Se omiten los detalles. El lector interesado en ellos puede recurrir a (Huang, 1995). A continuación mostramos únicamente los resultados finales:

Ecuaciones de Navier–Stokes verticalmente integradas:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{(H + \zeta)R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{(H + \zeta)R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - fV = -\frac{g(H + \zeta)}{R \cos \phi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} + A_H \nabla_H^2 U + \tau_{(s)}^{(\lambda)} - \tau_{(b)}^{(\lambda)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{(H + \zeta)R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{(H + \zeta)R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + fU = -\frac{g(H + \zeta)}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} + A_H \nabla_H^2 V + \tau_{(s)}^{(\lambda)} - \tau_{(b)}^{(\lambda)}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial (\cos \phi V)}{\partial \phi} = 0$$

donde la notación es la siguiente:

ϕ	latitud
λ	longitud
t	tiempo (s)
U	transporte en la dirección zonal
V	transporte en la dirección meridional
ζ	elevación de la superficie del mar

R	radio de la tierra en m
H	profundidad en m
g	aceleración debida a la gravedad
$\tau_{(s)}^{(\lambda),(\phi)} = \lambda_w (W^{(\lambda)}, W^{(\phi)}) \sqrt{W^{2(\lambda)} + W^{2(\phi)}}$	estrés del viento
λ_w	constante de proporcionalidad
$W^{(\lambda)}, W^{(\phi)}$	componentes de la velocidad del viento
$\tau_{(b)}^{(\lambda),(\phi)} = \frac{r(U,V)}{(h+\zeta)^2} \sqrt{U^2 + V^2}$	fricción con el fondo
r	coeficiente de fricción
$f = 2\Omega \text{sen}\phi$	parámetro de Coriolis
Ω	velocidad angular de la tierra
A_H	coeficiente horizontal de viscosidad
turbulenta	
∇_H^2	operador laplaciano

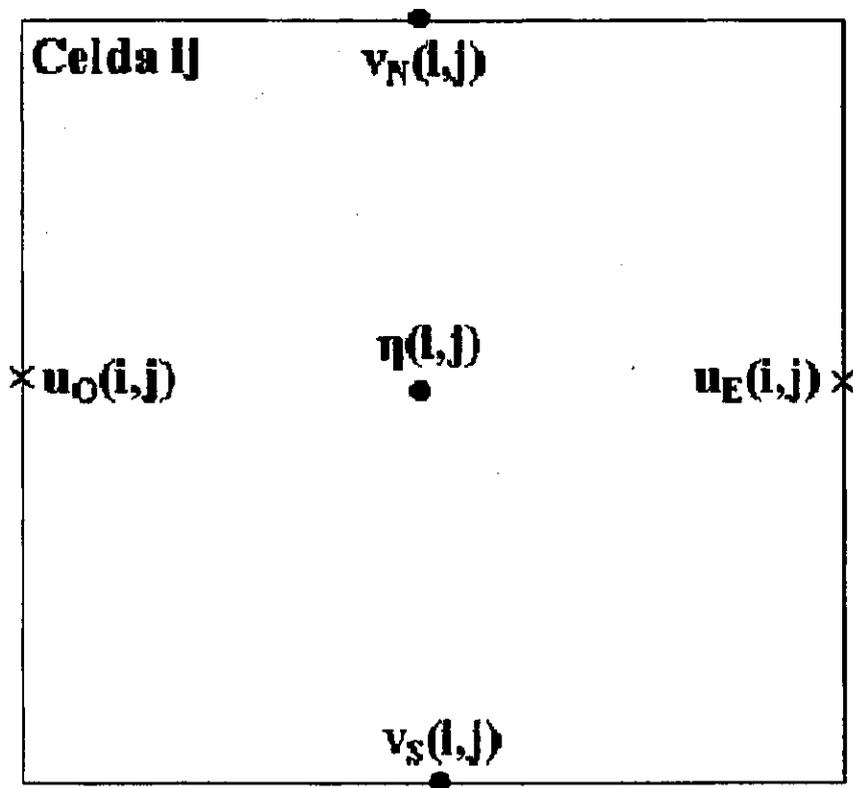


Figura 2 Malla Arakawa-C bidimensional

Solución de las ecuaciones

La no linealidad de las ecuaciones de Navier-Stokes y la complejidad del mar hacen que sea literalmente imposible para cualquier cuenca natural encontrar una solución analítica para cualesquiera condiciones de frontera. Así, es necesario convertir las derivadas de las ecuaciones diferenciales en cocientes de diferencias finitas para llegar a un sistema de ecuaciones algebraicas. Este sistema se puede resolver por cualquier método establecido. El modelo de circulación utilizado discretiza las ecuaciones presentadas anteriormente seccionando el tiempo en lapsos de un cierto valor Δt , y seccionando el espacio a través de la malla tipo Arakawa-C bidimensional (Arakawa y Lamb, 1977) que se muestra en la Figura 2. La celda computacional principal se puede ver como un cuadrado con las velocidades en los lados y la densidad y la presión definidos en el centro. Las fronteras de la cuenca se ajustan de forma tal que siempre una celda entera sea tierra o agua. Para resolver el sistema de ecuaciones algebraicas que surgen de discretizar con esta malla las ecuaciones de Navier-Stokes, el modelo (al igual que HAMSOM) utiliza el método de sobre-relajaciones sucesivas (SOR: *Successive Over Relaxation*), que es un método matricial de solución de ecuaciones algebraicas que se deriva del de Jacobi. Nuevamente, los detalles se omiten y el lector interesado puede recurrir a Huang (1995).

Finalmente, las ecuaciones se pueden discretizar de forma tal que las variables correspondientes a un paso de tiempo futuro dependan siempre de variables de un paso de tiempo pasado, es decir, de cantidades ya conocidas. Esto es lo que se conoce como un modelo explícito. Por otro lado puede llegarse a un sistema en el que variables de un paso de tiempo futuro dependan también de variables de un tiempo futuro. Esto es lo que se conoce como un modelo implícito. El modelo aplicado en este trabajo de tesis, al igual que el modelo HAMSOM, es un modelo semi—implícito, lo que quiere decir que saca un promedio de instantes futuros y pasados.

Adaptación del modelo

En nuestro caso, adaptar el modelo de circulación significó alimentarlo con los datos necesarios de entrada, así como modificar el código fuente del programa de computadora para introducir dichos datos. Estos son características físicas relacionadas con la dinámica en Altata / Ensenada del Pabellón, como son la batimetría, las amplitudes y fases de las mareas y la descarga del río Culiacán.

Batimetría

El dato más importante de cualquier modelo de circulación es la batimetría de la cuenca, esto es, las profundidades de la laguna en distintos puntos referenciadas a un cierto nivel. El nivel que se escoge generalmente es el nivel medio del mar.

Así, utilizando una ecosonda, un GPS ¹⁰ y un reloj, navegando por la zona se registran las profundidades para distintas estaciones. Pero dado que la laguna está sometida a los efectos de las mareas, las profundidades medidas dependerán del instante en el que se haga la medición. Para corregir los datos se debe conocer la altura de la marea en la laguna, lo que se puede hacer utilizando un estadal y registrando el nivel del agua –digamos– para cada media hora. El ideal sería registrar la marea durante todo el periodo de medición, pero también es posible hacerlo sólo en un periodo menor para después inferirla durante el tiempo en que no se midió. Esto último fue lo que se hizo en nuestro caso.

Del 7 al 9 de diciembre de 1998 se llevaron a cabo mediciones de la batimetría en el complejo lagunar. Utilizando una embarcación menor, una ecosonda *Foruno FCV-667* y un GPS *MAGELLAN 2000*, basándonos en una carta de navegación, en la morfología de la cuenca y en la experiencia de los pescadores locales, hicimos las 105 estaciones ¹¹ que se muestran en la Figura 3. Estos datos, después de hacer la corrección por mareas, nos llevaron a la determinación de la batimetría. Para hacer dicha corrección medimos la altura del mar durante 21 horas con un estadal clavado en la orilla en un punto cercano a la desembocadura del río Culiacán en la laguna (es decir, la cabeza del estuario), en un poblado llamado El Castillo.¹² Bien, los lugares más cercanos a la boca de la laguna de los cuales se tienen datos de marea son Mazatlán al sur, y Topolobampo al norte. En la Figura 4 se muestran las mareas para estos lugares (respecto al nivel de bajamar media inferior), como aparecen en las tablas de predicción de mareas de la página electrónica del CICESE (ver CICESE en la Bibliografía) para el mismo periodo de tiempo en que hicimos la medición de la batimetría. Junto a ellas se ha ajustado libremente –ya que no conocemos el nivel medio del mar en El Castillo– la marea que medimos con el estadal. Nótese que si le agregamos una hora a la fase de la marea de Topolobampo, ésta queda ajustada con la del Castillo. Con esto *matamos dos pájaros de un tiro*, ya que así, por un lado “extrapolamos” nuestros datos de marea a todo el periodo de medición, y por el otro hallamos la relación entre el nivel medio del mar y el cero de nuestro estadal en las mediciones que hicimos. Es necesario hacer notar que detrás de lo anterior hay dos suposiciones: primero, que la marea afecta a todo el sistema lagunar por igual (algo que ahora sabemos es falso) y segundo, que una marea como la de Topolobampo se comportará de manera idéntica en El Castillo, de tal suerte que resultara un nivel medio del mar equivalente.

Otro punto importante a mencionar es que nuestras mediciones fueron hechas en periodos de minutos y los datos de marea con los que contamos están dados por hora. Pero para solventar esta pequeña dificultad basta con hacer

¹⁰ Un GPS es un aparato que determina su posición en el globo terrestre mediante el uso de satélites. Las siglas significan *Global Positioning System*. Se trata de un dispositivo ampliamente utilizado hoy en día en toda clase de navegación, ya sea comercial, militar, deportiva o científica.

¹¹ Algunas estaciones han sido eliminadas por errores en las mediciones en la posición, con el GPS (caían en tierra, por ejemplo). En una extensa región de Ensenada del Pabellón, como se puede ver de la figura, no se hicieron mediciones debido a que la zona es muy somera.

¹² El ideal hubiera sido también medir el nivel de la marea en la boca del sistema, pero fue imposible desembarcar ahí debido al oleaje. Esto nos hubiera permitido conocer, a priori, el desfase de la marea entre la boca y la cabeza del estuario.

interpolaciones lineales cada hora en los datos de marea, obteniendo así una altura para cada minuto.

El hecho de que la marea en El Castillo esté desfasada en una hora con respecto a Topolobampo (que está más al norte de la boca de la laguna y por lo tanto le llega la onda de marea después) es algo interesante que se explica por la dinámica del sistema (morfología de la cuenca, efecto Coriolis y rozamiento con el fondo), como se hará más adelante. Así, con lo anterior en mente podemos ajustar apropiadamente la batimetría medida, considerando el error introducido por dicho desfase. Posteriormente se hablará de los experimentos que reproducen el nivel del mar en el sistema lagunar. En ellos se ha observado que el desfase en el nivel del mar se da en dos regiones bien definidas (cada una de las secciones principales de la laguna, Altata y Ensenada del Pabellón), siendo uniforme en cada una de ellas. En los experimentos hechos con el armónico M_2 (el más significativo) se observó que la marea en Altata tiene una amplitud de 30 *cm*, mientras que en Pabellón es de 10 *cm*. Por lo tanto, podemos afirmar que dado el desfase de la marea, en Altata se ha introducido un error en las mediciones de ± 30 *cm* en la Bahía de Altata y de ± 10 *cm* en Ensenada del Pabellón. Así, dado que la profundidad promedio en Altata es de 5 *m* y en Pabellón de 1 *m*, tenemos un error en las mediciones de profundidad del 6% en Altata, aproximadamente, y de hasta el 10% en Ensenada del Pabellón. Nótese que aunque el error en esta última laguna pudiera parecer grande, se contrapone a ello el factor de eliminar todas las profundidades inferiores a 1 *m* dentro de las simulaciones con el modelo, por cuestiones de estabilidad numérica. Este artificio numérico elimina el error de los 10 *cm* en todas las profundidades inferiores a un metro (donde sería más significativo) y por lo tanto, agregado a que el mapa de isobatas que obtuvimos tiene la misma estructura que la que se ha encontrado en estudios previos (Peraza-Vizcarra, 1973) nos sentimos confiados en que la batimetría utilizada en los experimentos es adecuada, y que el número de estaciones utilizadas en la medición de batimetría fue suficiente y representativo.

Finalmente, con las profundidades dadas para distintas posiciones y hechas las correcciones por mareas, se procede a escoger un ancho de malla y se extrapola (a las zonas someras) e interpola para obtener la batimetría de toda la laguna. Esto se hizo utilizando el programa de computadora comercial Surfer,¹³ versión 6.01, y aplicamos el método de Kriging. Basados en la malla tipo Arakawa-C, construimos un matriz numérica de 208 renglones por 271 columnas con un ancho de malla de 180×180 *m*. En la Figura 5 se muestran estos resultados.¹⁴

¹³ Es necesario tener el mapa de la zona digitalizado para obtener la batimetría con computadora.

¹⁴ Este mapa batimétrico es una representación de la matriz de batimetría utilizada en el programa que calcula la circulación del sistema. Por lo tanto es una aproximación, ya que como se ha mencionado las profundidades menores a un metro han sido desechadas por cuestiones de estabilidad de cómputo. Tampoco se incluyen todas las islas en la parte somera de Pabellón, pues están en un rango de alturas inferior al rango de mareas. Aún así, la estructura del mapa coincide con la de estudios previos (Peraza-Vizcarra, 1973). Es importante notar que sólo se ha obtenido la batimetría dentro del sistema lagunar; las profundidades en la plataforma continental no participan en la modelación

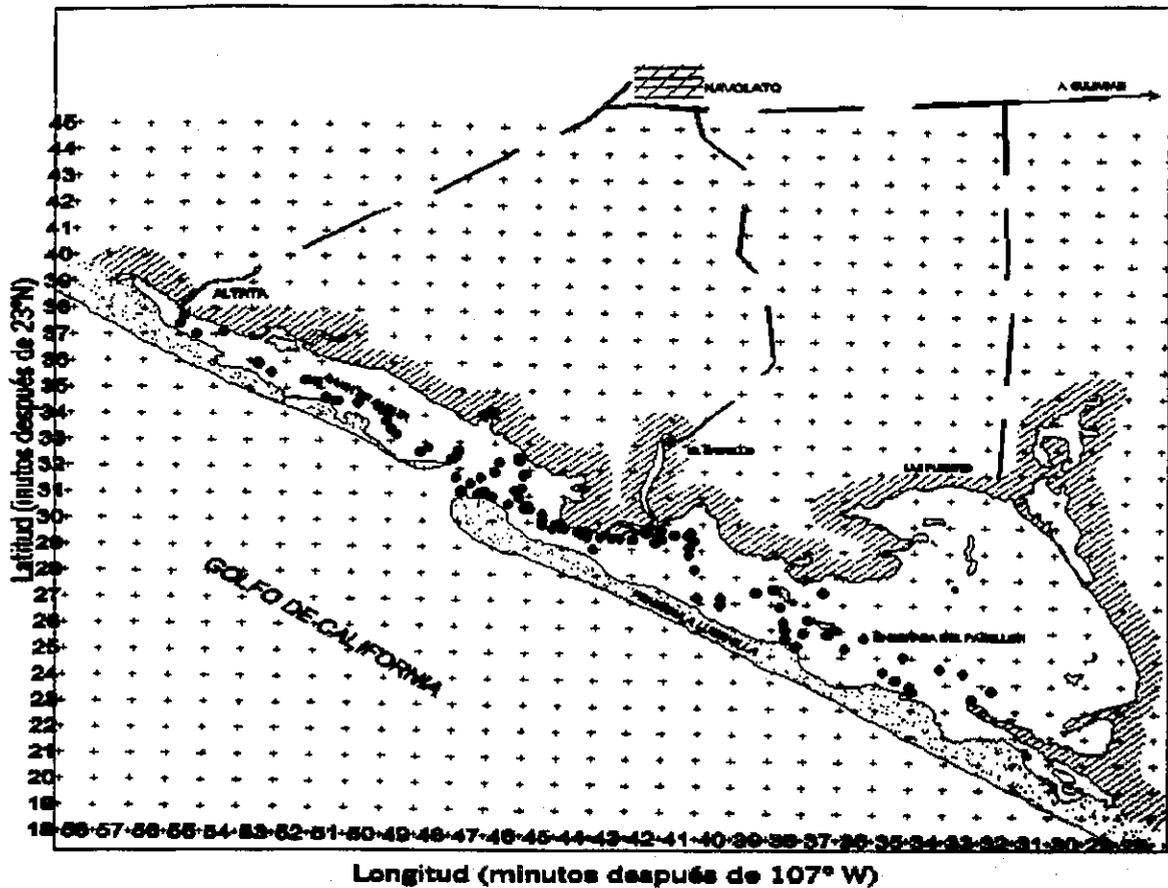


Figura 3. Estaciones de la salida de campo de XII/98. Observe la Figura 1, donde se muestran las principales características del sistema.

Mareas

Los datos relacionados con las mareas no sólo son necesarios para obtener la batimetría de la laguna, sino también para forzar el modelo. Forzar el modelo quiere decir someterlo a condiciones variables de frontera abierta que reproduzcan lo que ocurre en la realidad, como el movimiento de las mareas o el esfuerzo del viento. Bien, como cualquier señal en la naturaleza, la marea se puede descomponer en un análisis de Fourier en la suma de varias funciones sinusoidales llamadas *armónicos de marea*, cada uno con su amplitud y su fase. Es bien sabido que basta con siete de estos armónicos para reproducir con gran precisión la marea en casi cualquier parte del mundo (ver, por ejemplo, Pugh, 1987). Así, también son necesarias las amplitudes y fases para cada una de las componentes de marea en la boca de la laguna, ya que es ahí donde las mareas actúan sobre ésta —es decir, donde la fuerzan. Lógicamente, estas cantidades varían para el mismo armónico de marea dependiendo del lugar. Para obtener estos datos para nuestra laguna nuevamente recurrimos a la interpolación lineal, en este caso, entre los datos que se tienen de las tablas UNAM para Topolobampo y para Mazatlán (UNAM, 1994), pesando las distancias de estas ciudades a la boca de la Tonina. Esto se justifica dado que la longitud de onda de cualquier

marea es de varios miles de kilómetros, mientras que la distancia (a lo largo de la costa) de Mazatlán a la boca es de solo 203 Km. y la de la boca a Topolobampo de 174 Km. Las mareas utilizadas y sus periodos se muestran en la Tabla 1, mientras que los resultados para las amplitudes y fases están en la Tabla 2.

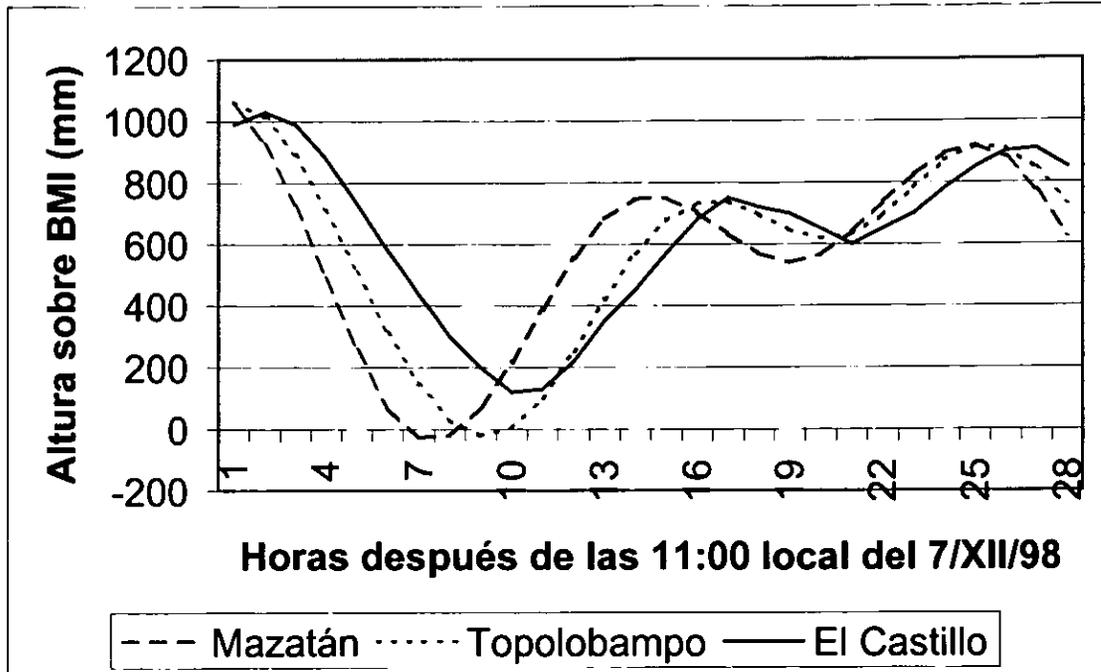


Figura 4. Elevación de la marea en Mazatlán, Topolobampo y El Castillo a partir del 7/XII/98, 11:00 hrs (local)



Figura 5. Batimetría de Altata / Pabellón

<i>Marea</i>	<i>Periodo (hr)</i>
M₂	12.42
S₂	12.00
N₂	12.66
K₂	11.97
K₁	23.93
O₁	25.82
P₁	24.07

Tabla 1 Componentes de marea utilizadas en el modelo y sus periodos

Marea	Topolobampo		Mazatlán		Boca de Altata		
	Amplitud (mm)	Fase (°) al 105° W	Amplitud (mm)	Fase (°) al 105° W	Amplitud (mm)	Fase (°) al 105° W	Fase (°) Greenwich
M ₂	300	297.91	349	255.93	322.57	278.57	481.26
S ₂	212	293.76	242	252.19	225.82	274.61	484.67
N ₂	065	305.02	081	254.58	072.37	281.79	486.87
K ₂	068	292.17	064	251.08	066.16	273.24	489.82
K ₁	256	087.84	201	072.24	230.67	080.65	185.94
O ₁	174	082.68	139	067.36	157.88	075.62	173.22
P ₁	087	090.98	067	069.61	077.79	081.14	185.85

Tabla 2 Amplitudes y fases de marea en la boca de Altata

Sin embargo, los valores de las fases no se pueden aplicar ciegamente si queremos reproducir las mareas ocurridas los días de las mediciones de diciembre de 1998. Para esto tienen que ser corregidos por lo que se conoce como *argumentos astronómicos* (Carbajal, 1993). Estos son cantidades que se suman a la fase principal de las funciones de onda de marea, y que pretenden corregir variaciones astronómicas de largo plazo en la periodicidad de las ondas de marea. Estas variaciones pueden ser, por ejemplo, el desplazamiento del perihelio y el afelio, la precesión de la tierra, etc. Así, recurriendo a las tablas (Hamburg, 1967) se obtuvieron los argumentos astronómicos para el 30 de noviembre (7991 horas después del comienzo del año) de 1998 que se muestran en la Tabla 3. De esta forma, dejando que el programa evolucione y se establezca después de 15 periodos de M₂, el primer resultado obtenido es el del 7 de diciembre a las 11:05 a.m. (hora local). Almacenando la información de los siguientes 4 periodos se reprodujo todo el periodo de medición de diciembre del 98.

Marea	Argumentos Astronómicos
M ₂	66.10
S ₂	330.10
N ₂	85.94
K ₂	99.76
K ₁	319.03
O ₁	109.18
P ₁	5.97

Tabla 3 Argumentos astronómicos en grados para el 30/XI/98, 16:00 hrs. (local), referenciados a Greenwich (calculados a partir de los datos de las tablas Hamburg 1967, para el 1° de enero de 1999)

Descarga del río

Para reproducir en el modelo el flujo del río Φ se establece una nueva condición de frontera. Esta consiste en fijar una elevación constante en cualquier conjunto de celdas que correspondan a toda una sección transversal en el río. Será este volumen adicional "de perturbación" el que producirá el flujo deseado. Efectivamente, si h es la altura adicional sobre el nivel medio del mar, n el número de celdas en las que se perturba, l el ancho de la malla y Δt el lapso de tiempo de perturbación, tenemos que:

$$\Phi = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}} = \frac{n \cdot h \cdot l^2}{\Delta t},$$

ya que la malla es cuadrada. De aquí se obtiene inmediatamente

$$h = \frac{\Delta t \cdot \Phi}{n \cdot l^2}$$

Para flujos típicos h es del orden de 10 cm.

Todos los flujos que se utilizan en los experimentos siguientes se verificaron con programas de apoyo utilizando el paquete MATLAB. En algunas ocasiones fue necesario corregir el valor de h por un factor hasta obtener el flujo deseado.

Viento

Los vientos predominantes a lo largo del año vienen del noroeste, con magnitudes promedio de unos 5 m/s. (Peraza-Vizcarra, 1973).

Resultados y discusión

Armónico M_2

Para tener una idea global del tipo de mareas que dominan en el sistema lagunar recurrimos al número de forma F (Dietrich et al, 1975). Esta es una cantidad que, basada en las amplitudes de las principales mareas diurnas (O_1 y K_1) y semidiurnas (M_2 y S_2), nos permite conocer qué clase de marea es la que prevalece en cierto lugar a través de la relación empírica $F = (O_1 + K_1)/(S_2 + M_2)$ (los símbolos representan las amplitudes de cada marea). Utilizando los valores de la Tabla 2 obtenemos para Altata / Ensenada del Pabellón un número de forma $F = 0.71$, que corresponde a una marea *mixta dominante semidiurna*. Así, el armónico de marea más importante en el sistema es M_2 . La Figura 6 muestra la simulación del nivel del mar en el sistema lagunar, forzando en la boca

únicamente con esta componente de marea. Se muestran cuatro instantes correspondientes a fracciones del periodo de la marea. Principalmente resaltan las regiones correspondientes a cada sección (Altata y Pabellón), teniendo una zona de transición en el canal que las une. Así, la oscilación de cada sección es hasta cierto punto independiente de la de la otra, teniendo un nodo en el canal mencionado. La marea en Altata tiene un amplitud cercana a los 30 cm (igual a la amplitud de M_2 para la boca), mientras que Ensenada del Pabellón permanece cercana al nivel medio del mar la mayor parte del tiempo, sin superar los 10 cm por encima de éste. Una forma de corroborar el buen funcionamiento del modelo es comparar estos resultados con la Figura 7, donde se muestra el flujo en la boca producido únicamente por este armónico de marea. Se observa que las dos regiones están a la misma altura (el nivel medio del mar) cerca de los 2/16 y los 10/16 del periodo de M_2 , es decir, cuando el flujo y el reflujo son máximos, respectivamente. Y por otro lado, la diferencia de alturas es máxima a las 6/16 y 14/16 del periodo de M_2 , esto es, aproximadamente cuando el flujo en la boca es nulo.

La Figura 8 muestra un mapa de corrientes producidas por M_2 ,¹⁵ para dos instantes de la simulación. Como se puede ver las corrientes más intensas se dan en el estrangulamiento entre las dos lagunas (hasta 0.93 m/s), donde se presenta el gradiente de altura del nivel del mar ya mencionado, y en la parte norte de la boca de la laguna (hasta 0.35 m/s). Tanto la posición de estos máximos de velocidad como su magnitud está de acuerdo con estudios previos, donde Peraza-Vizcarra (1973) midió corrientes en diversos puntos del sistema lagunar. Asimismo, se observan fuertes corrientes en los canales de Altata. El agua en Ensenada del Pabellón permanece estancada en comparación.

Finalmente, la corriente residual producida por M_2 (obtenida como un promedio vectorial en todo un ciclo de marea) en la parte central del sistema se muestra en la Figura 9 (la boca no aparece en la imagen). Esta corriente tendrá consecuencias interesantes en la migración de partículas desde el río Culiacán.

¹⁵ Se trata de las velocidades, *no de los transportes horizontales* (es decir, los transportes se han dividido por la profundidad en cada punto)

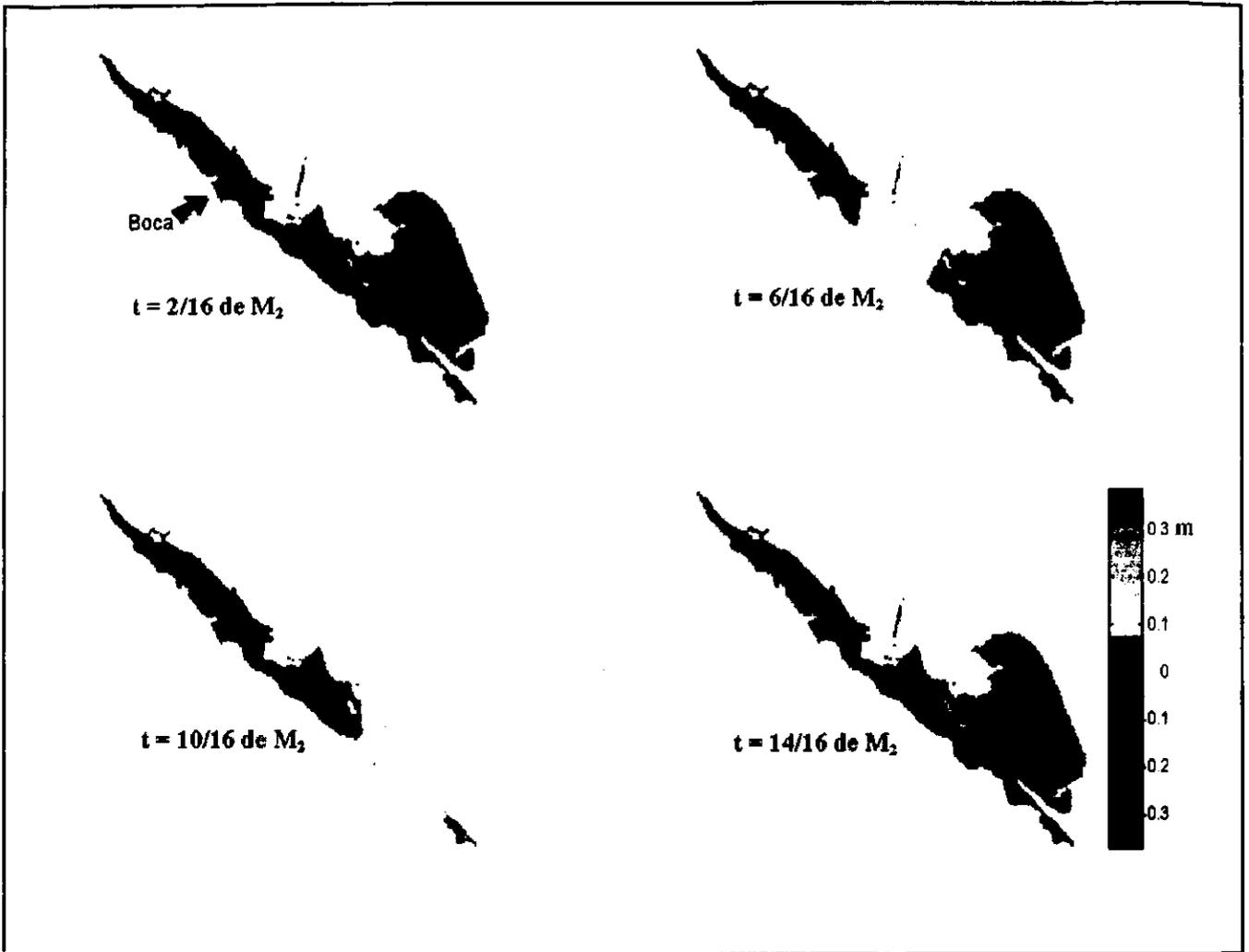


Figura 6 Simulación del nivel del mar producido por M_2

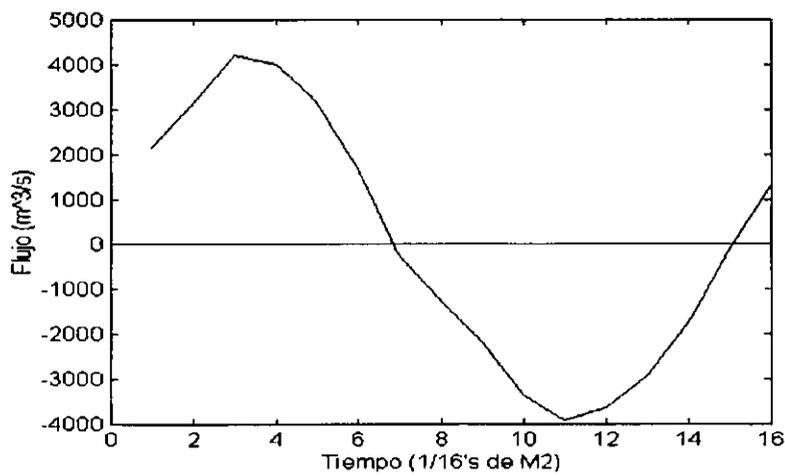


Figura 7 Flujo en la boca producido por M_2

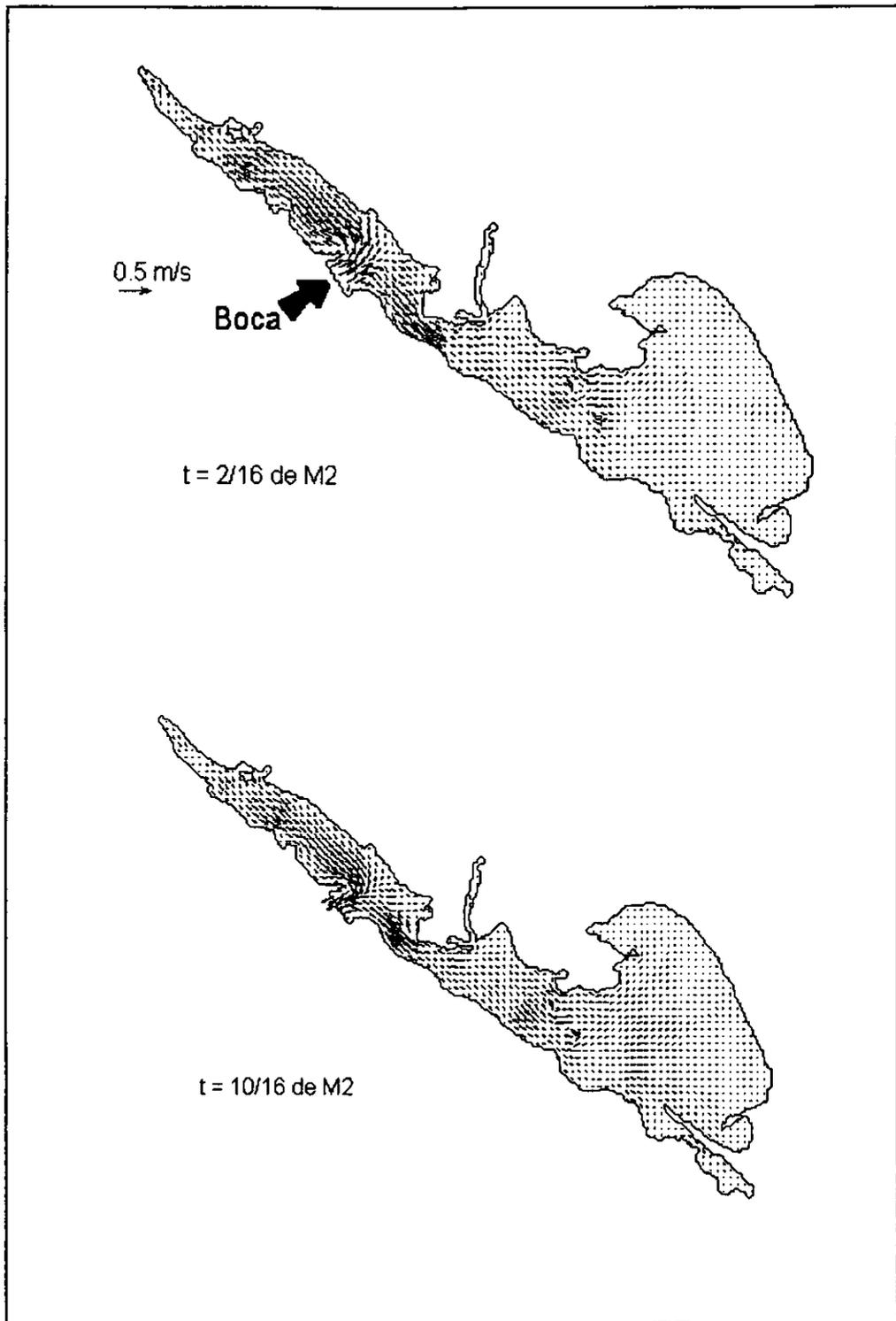


Figura 8 Corrientes inducidas por M_2

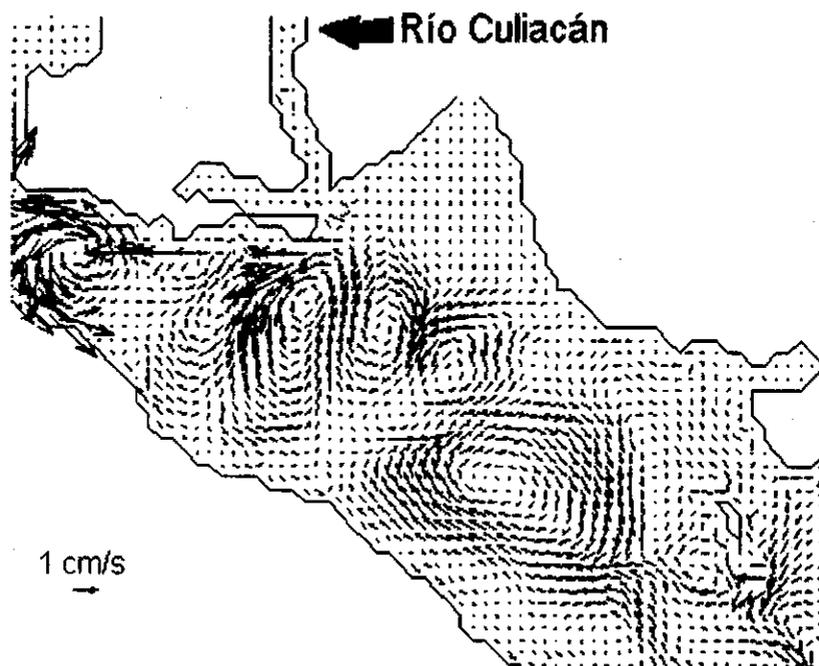


Figura 9 Corriente residual producida por M_2

Principales armónicos de marea

En la Figura 10 se observa la comparación de lo que hemos llamado marea predicha en El Castillo, es decir la marea predicha en Topolobampo desfasada una hora, y la señal con que se forzó en la boca para los días del muestreo de diciembre de 1998. Se observa que, excepto por la amplitud, la similitud es grande. Al construir la batimetría observamos (como se mencionó en la sección Batimetría) que la onda de marea tarda más de una hora en llegar de la boca de la laguna a su cabeza (en donde se encuentra El Castillo); en concreto: una hora, más el tiempo que le tome a la onda de marea ir desde la boca de Altata hasta Topolobampo. La dinámica de la laguna, tal y como lo muestran los experimentos realizados con M_2 , explica este retardo que ya ha sido reportado en estudios anteriores (Peraza-Vizcarra, 1973). Las dos últimas gráficas se pueden superponer para calcular exactamente el desfase entre la boca y El Castillo, obligando a que coincidan los puntos críticos de cada señal. Con esto se ha observado que (considerando un coeficiente de fricción con el fondo de 0.0025) dicha diferencia de fase es de 2.9 horas.

Este desfase se explica, principalmente, por la morfología de la cuenca y la fricción con el fondo: a medida que la onda avanza hacia El Castillo entra en regiones cada vez más someras, lo que retarda la señal. Más aún, si uno considera

que la onda de marea se comporta como una onda de Airy, se puede utilizar la expresión

$$T = \frac{L}{\sqrt{gh}}$$

para calcular el retardo de la señal, donde T es el tiempo que le toma a la onda recorrer la distancia L , g es la aceleración producida por la gravedad y h la profundidad promedio de la zona que recorre (Pugh, 1987). Así, si medimos en un mapa la distancia que recorre la onda (a lo largo de la costa) desde la boca, llenando primero Altata hacia el norte y luego de regreso hacia Pabellón, cruzando por el Canal y finalmente entrando a la desembocadura del río Culiacán hasta El Castillo obtenemos, más o menos, $L = 58 \text{ Km}$. Considerando una profundidad promedio h de 5 m nos resulta en un tiempo de recorrido, T , de 2.3 horas. La Figura 11 muestra la comparación del nivel del mar en la boca, introduciendo el desfase mencionado (de casi 3 horas), con la medición in situ en El Castillo. Esta cantidad está de acuerdo con lo observado por Peraza-Vizcarra (1973), quién midió un retardo hasta de 2 horas entre la boca y la desembocadura del río Culiacán (considérese que El Castillo está aguas arriba sobre el río).

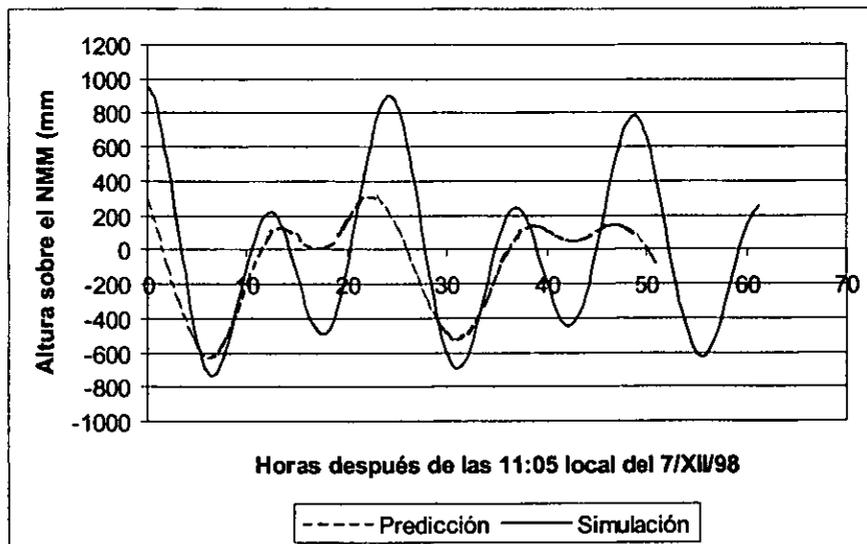


Figura 10 Comparación de la marea de forzamiento en la boca con la predicha en El Castillo

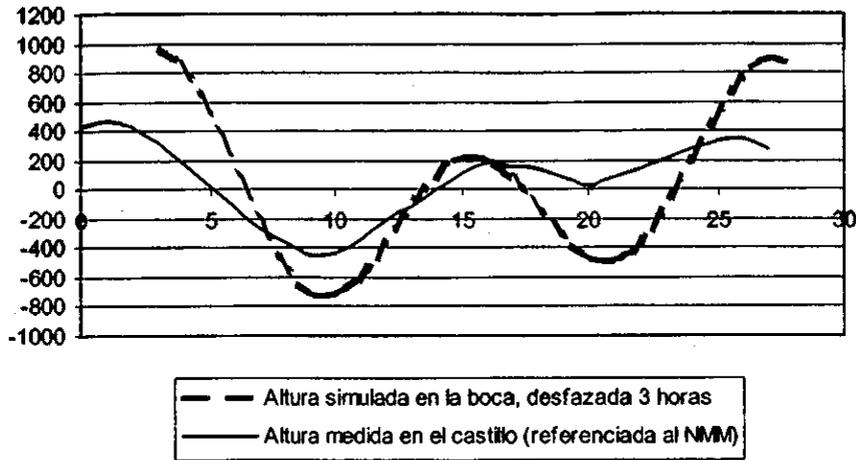


Figura 11 Comparación del nivel del mar medido en El Castillo con la simulación

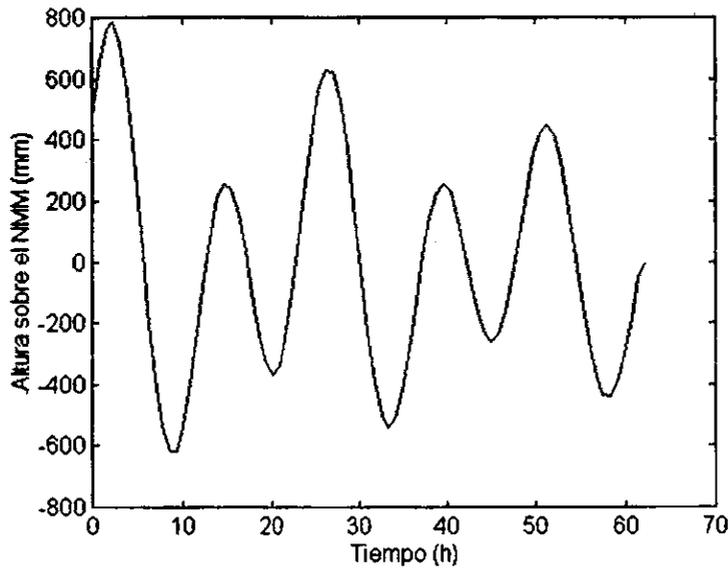


Figura 12 Marea simulada en la boca con todos los armónicos

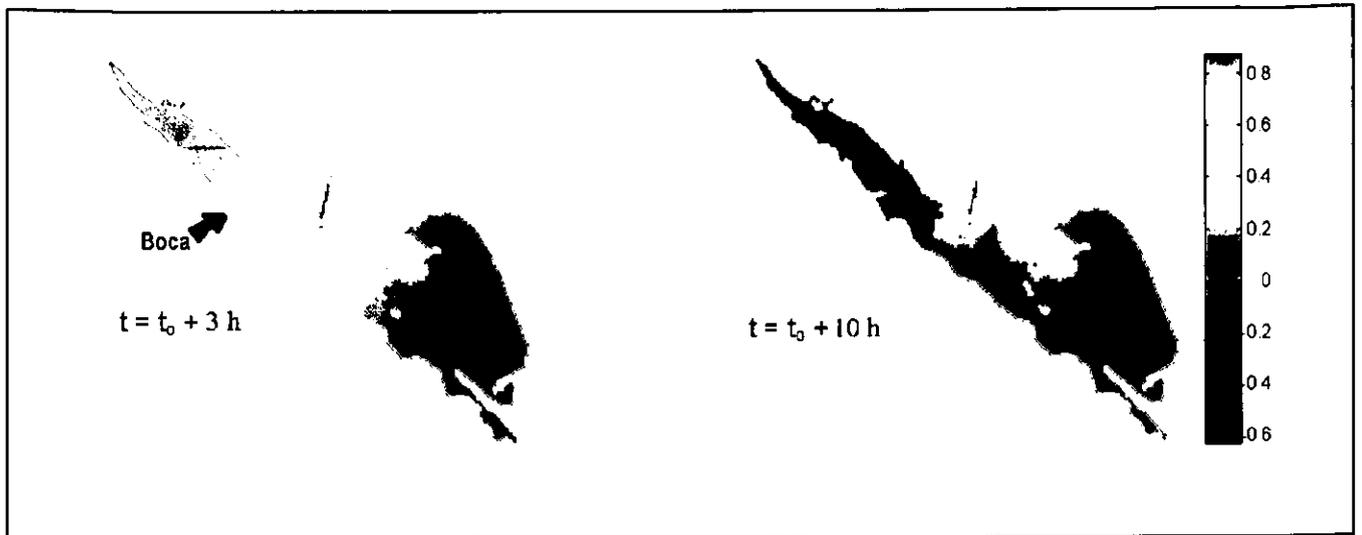


Figura 13 Simulación de todas las mareas

En la Figura 12 se ve la simulación del nivel del mar en la boca del sistema forzando con los siete armónicos de marea (es decir, la señal de perturbación). En la Figura 13 se reproducen dos instantes de esta simulación. Se trata de una situación correspondiente a marea viva y podemos observar nuevamente el gradiente ya mencionado, siendo la amplitud de la marea en Altata (1.4 m) mucho mayor que en el caso de M_2 .

Al realizar la simulación con los siete armónicos los resultados de corrientes producidas por M_2 se modifican únicamente en la magnitud, como era de esperarse. Es decir, los máximos de velocidad se siguen dando en el mismo lugar sólo que ahora en el canal se obtienen velocidades hasta de 1.5 m/s y en la boca al norte de 0.64 m/s . Esto está ilustrado en la Figura 14. En la Figura 15 podemos ver las series de tiempo para la magnitud de las velocidades en los lugares mencionados. Los puntos exactos se muestran con cruces en la Figura 16, donde se ve una ampliación de la parte central del sistema. Las magnitudes de las velocidades máximas en estos sitios coinciden con lo reportado anteriormente por Peraza-Vizcarra (1973). Comparando estos datos con la Figura 12, se observa que las velocidades máximas en los puntos reportados corresponden a los flujos y reflujos máximos.

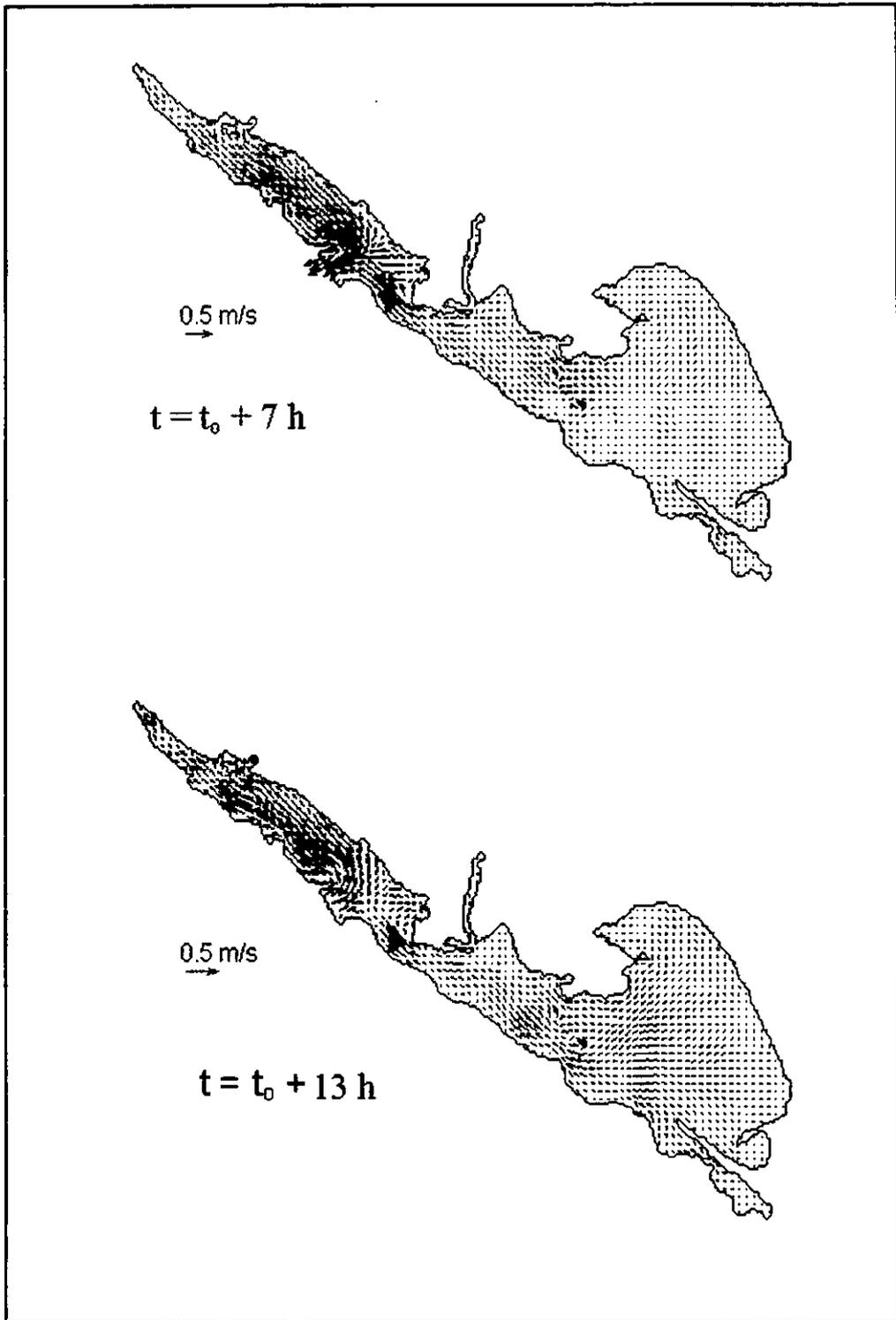


Figura 14 Corriente inducida por los siete armónicos de marea

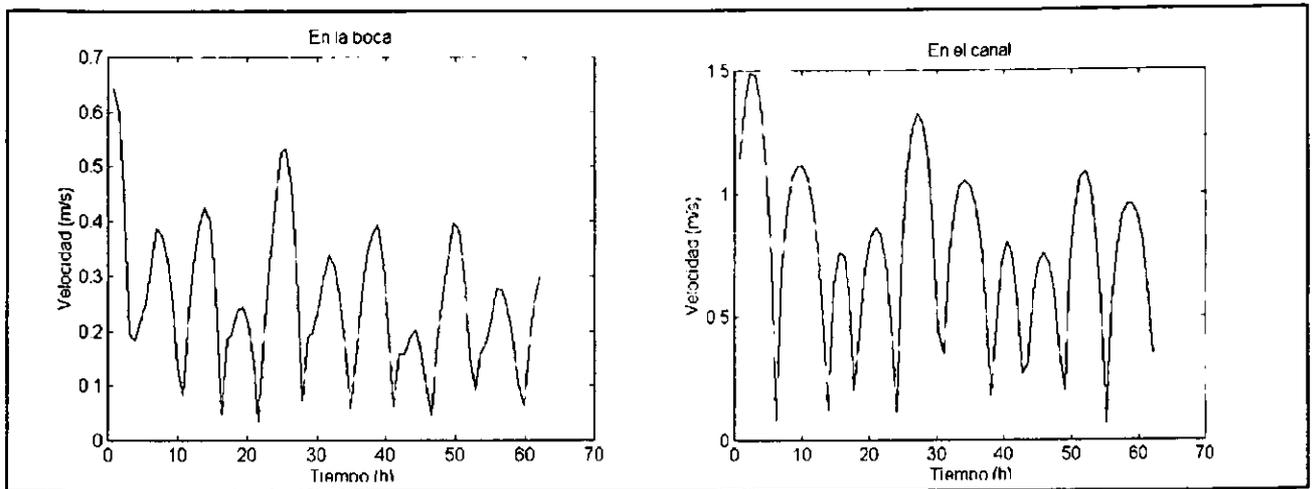


Figura 15 Series de tiempo para la magnitud de la velocidad en la boca y en el canal

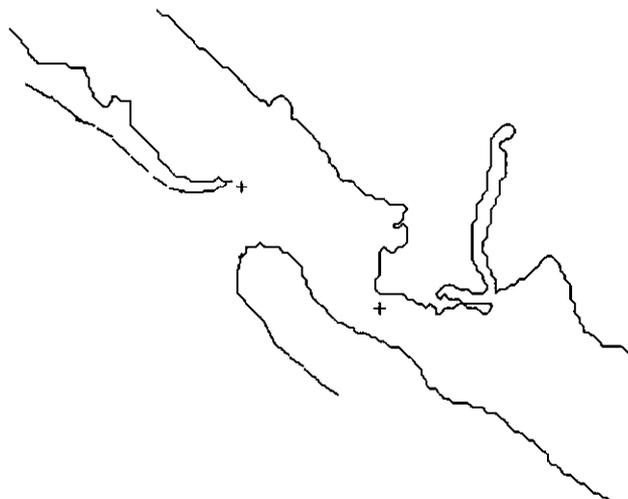


Figura 16 Puntos donde se calcularon las series de tiempo

Viento

Los vientos predominantes en el sistema a lo largo del año vienen del noroeste, teniendo una magnitud promedio de 5 m/s (Peraza-Vizcarra, 1973). En la parte superior de la Figura 17 se muestran los resultados de un experimento en donde se grafica con colores la magnitud de la corriente producida únicamente por un viento de este tipo. Si se le compara con la corriente residual de M_2 (parte inferior de la Figura) se observa que el viento es sumamente significativo en la dinámica del sistema, ya que las magnitudes rebasan en unas tres o cuatro veces a las corrientes residuales de marea M_2 en varias zonas. Así, se puede afirmar que la

dinámica del sistema está determinada por el viento, principalmente. Nótese la influencia de los canales longitudinales en la dinámica producida por el viento.

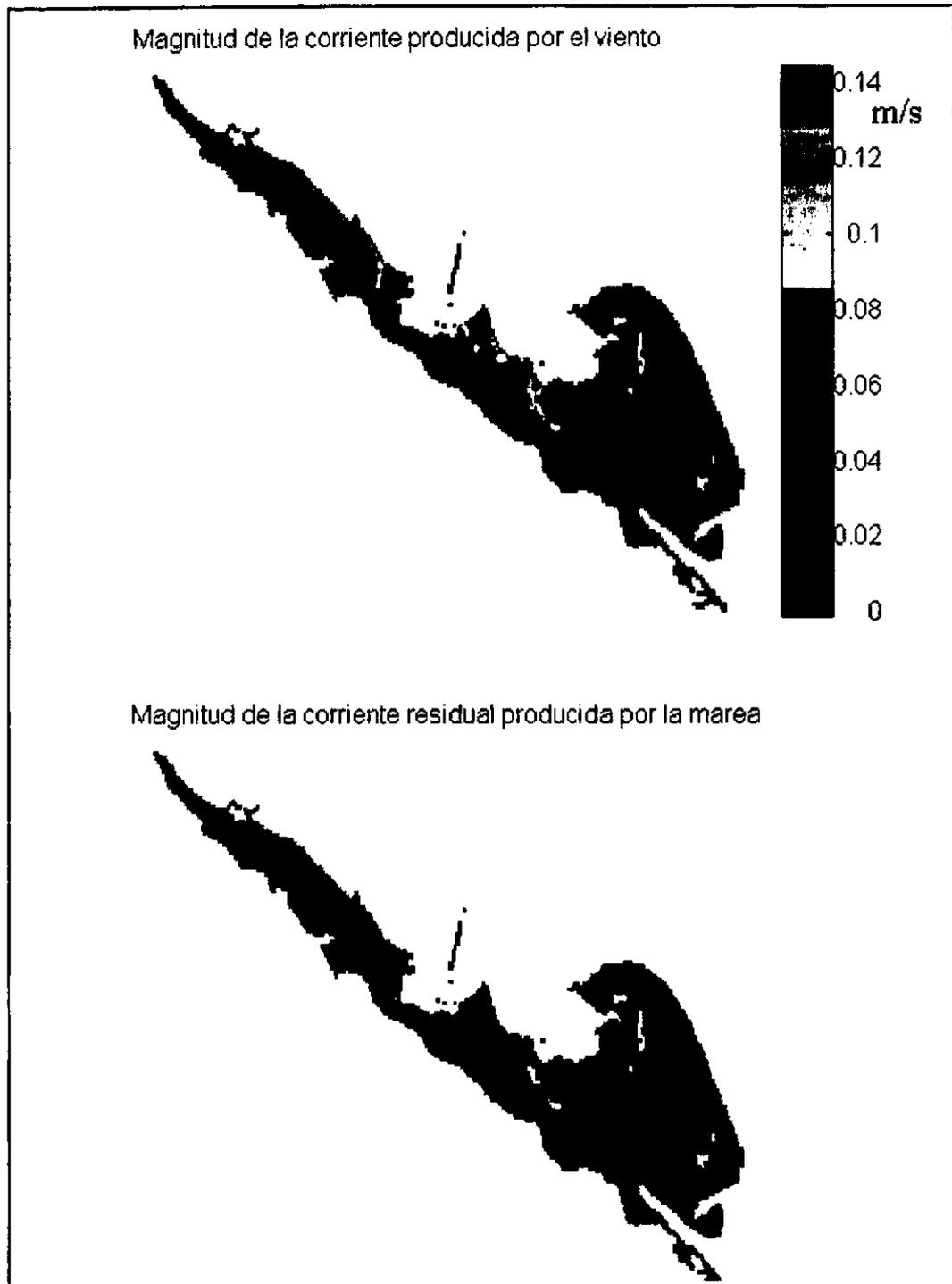


Figura 17 Comparación de la magnitud de la corriente (residual) producida por viento y por marea M_2

Por último, las Figuras 18 y 19 muestran la estructura de las corrientes producidas únicamente por el viento de 5 m/s, NO y SE, respectivamente.

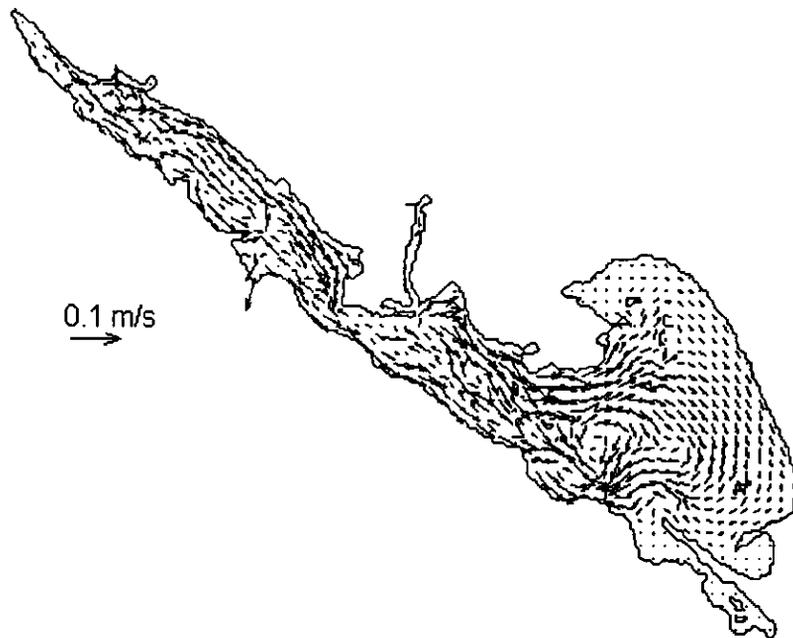


Figura 18 Corrientes producidas únicamente por un viento del NO (5 m/s)

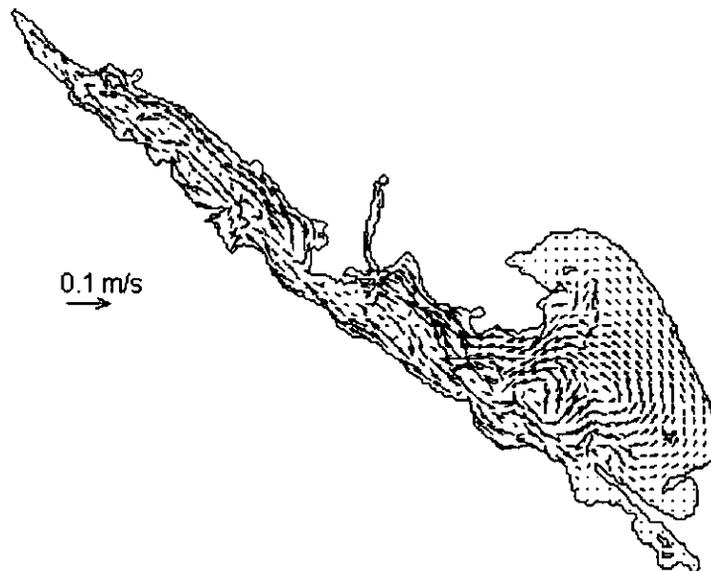


Figura 19 Corrientes producidas únicamente por viento del SE (5 m/s)

Capítulo 3. Advección y Difusión de Partículas Pasivas

Se le llama *advección* al proceso a través del cual las corrientes en algún fluido transportan materia de un lado a otro. Esto es lo que observamos cuando dejamos flotar sobre un río algún objeto ligero, digamos, un pedazo de corcho. El corcho sigue las corrientes del río completamente sometido a ellas y en su movimiento pone en evidencia las líneas de flujo del agua. Lo mismo le ocurre con las corrientes superficiales oceánicas a las boyas seguidas por satélite que hoy en día son tan comunes en la oceanografía.

La *difusión*, como la advección, también es un proceso a través del cual la materia es trasladada de una parte de un sistema a otra. Pero ahora los agentes de transporte no son las corrientes, sino los aleatorios movimientos moleculares. Esto es lo que observamos, por ejemplo, cuando dejamos caer una gota de algún líquido coloreado en agua (proceso común para los que tienen una pecera en la casa). Si se ha dejado caer con cuidado, en un principio la gota estará concentrada en una pequeña región del recipiente pero poco a poco irá desapareciendo, mezclándose con el agua hasta que la composición quede homogénea. Se dice entonces que el líquido coloreado se ha *difundido* a través del agua. No hay necesidad de remover con una cuchara para que este proceso tenga lugar, o de perturbar al sistema de alguna forma: ocurre aunque el agua en el recipiente esté completamente estática. Las moléculas (del agua y del líquido coloreado) hacen todo el trabajo. Así, la gota del líquido coloreado fue transportada –difundida– desde el punto en el que cayó al agua hasta todos y cada uno de los puntos del recipiente. Y quien no lo crea puede seguir agregando gotas hasta observar, después del tiempo requerido, como todo el líquido en el recipiente se tiñe homogéneamente de color. Lo mismo le ocurriría a una pequeña partícula de polvo flotando en la superficie de algún líquido. Si pudiéramos seguir su trayectoria (viéndola a través de un microscopio) observaríamos un movimiento completamente errático, producto del golpeteo irregular y azaroso de las moléculas del agua a su alrededor. La partícula de polvo se difunde a través de la superficie del líquido.¹⁶

Cuando un líquido está en movimiento las corrientes que en él se generan afectan al movimiento de las partículas boyantes tanto, o más, que el movimiento difusivo al que están sometidas. Decimos, entonces, que las partículas están sujetas a un proceso simultáneo de advección y difusión. En este caso dinámico se dice que la difusión es *turbulenta*, es decir, está acrecentada por la “agitación” del agua, por la viscosidad, por la fricción con las paredes del recipiente. Esto es lo que le ocurre a las partículas sedimentarias, al polvo, a los granos de arena que llegan a una laguna o al mar. Así, estudiando la advección-difusión de esta clase de sustancias se puede determinar el destino en una laguna de contaminantes adheridos a sólidos o en forma de pequeñas gotas de algún líquido altamente

¹⁶ A esta clase de movimiento se le conoce como *movimiento browniano*, o *caminata al azar*. A pesar de todos los avances actuales en tecnología y desarrollo de teorías físicas modernas (como la mecánica cuántica) el simple movimiento browniano es, como ya lo había hecho notar Einstein, la evidencia más palpable y fuerte para sustentar la visión molecular de la materia.

cohesivo (como las de aceite), o bien disueltas en el agua. Tal es el caso de contaminantes como los organoclorados y numerosos hidrocarburos.

Finalmente, es importante distinguir entre difusión molecular y turbulenta. Debido al viento, mareas, oleaje y efectos baroclínicos el movimiento en el mar de las partículas de agua es extremadamente complejo. Es por ahora prácticamente imposible describir estos movimientos en detalle. Por esta razón, el flujo se define como el resultado de un flujo medio y otro aleatorio:

$$\vec{v} = \vec{v}_M + \vec{v}_A.$$

Pero al sustituir esta definición en las ecuaciones del movimiento se obtienen más incógnitas que ecuaciones. El problema se resuelve suponiendo que productos entre las componentes de la velocidad son proporcionales al gradiente del flujo medio:

$$v_i v_j = K \nabla v_M,$$

dónde K es el llamado *coeficiente de difusión turbulenta*. El coeficiente de difusión molecular es universal para cualquier líquido, pero el de difusión turbulenta no. Éste, además de depender de propiedades físicas del líquido, también depende del flujo. El modelo de circulación utilizado en este presente trabajo de tesis resuelve las ecuaciones del movimiento con esta aproximación, lo que reproduce una dinámica turbulenta.

Ecuación de advección-difusión

El problema teórico del transporte de sustancias (pasivas o no) en sistemas marinos es algo que ha cobrado interés en los últimos años (ver, por ejemplo: Buffoni et al 1996 y 1999, Bobba et al, 1996). El propósito principal de este trabajo de tesis es estudiar los procesos de dispersión aplicando un sencillo modelo numérico de transporte de partículas pasivas en Altata/Ensenada del Pabellón. Físicamente estos procesos de transporte están representados en la ecuación de advección-difusión (Crank, 1979):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = K \nabla^2 C$$

Donde C es la concentración¹⁷ de alguna sustancia pasiva y K es un coeficiente de difusión turbulenta. Quien esté familiarizado con ecuaciones de difusión notará que la ecuación anterior es casi la típica ecuación de difusión, excepto por el

¹⁷ Estrictamente, en el caso de partículas que se difunden en un líquido en vez de concentración debe hablarse de la probabilidad de hallar a una partícula en un punto del espacio. Pero como se sabe de mecánica estadística esa probabilidad está relacionada con la concentración de las partículas, así que podemos utilizar "concentración" independientemente de si hablamos de partículas o líquidos difusores.

término advectivo $\mathbf{v} \cdot \nabla C$. Nótese que en este término aparece el campo de velocidades *del fluido*, el cual es una incógnita en la ecuación y se puede obtener a partir de un modelo de circulación. Para ello nosotros utilizamos un modelo similar al modelo HAMSOM. Y la parte de la ecuación correspondiente a los procesos de difusión se puede eliminar sustituyendo el efecto difusivo por pequeñas contribuciones aleatorias a las componentes de la velocidad de las partículas del fluido. Este método de solución de la ecuación de transporte se llama método de Monte Carlo. Así, simplemente reducimos numéricamente el proceso de advección-difusión a un único proceso de advección "aleatoria", en donde las trayectorias de las partículas se determinarán a través de un método "lagrangiano", como se explicará en la siguiente sección.

Con este modelo se espera reproducir grosso modo las tendencias que siguen los contaminantes en el sistema lagunar, en cuanto a su distribución se refiere.

Modelo de advección-difusión

Estrictamente hablando, desde el punto de vista matemático, no podemos afirmar que hayamos obtenido en este trabajo de tesis una solución de la ecuación de advección-difusión. Lo que hemos hecho es realizar experimentos numéricos que nos han permitido simular los procesos advectivos y difusivos en el sistema lagunar. Resolver la ecuación para este sistema nos hubiera llevado al mismo resultado y lo justifica la sencillez del método, que a continuación se explica.

Consideremos partículas pasivas. Con "pasivo" queremos decir que se trata de un corpúsculo que no reacciona químicamente y que no interactúa con la biota. Además vamos a suponer que no se hunde y que no se transporta por vía aérea. Así, lo único que afecta a esta clase de partículas son los procesos físicos de advección y difusión, que las transportan de un lado del sistema a otro. Estrictamente hablando no existe sustancia alguna que cumpla con estos requisitos. Cuando se suele hablar de sustancias conservativas dentro de los estuarios se piensa inmediatamente en aceites. Y aunque estos tienen un comportamiento conservativo, su movimiento dentro del sistema está más ligado a la dirección del viento (por permanecer siempre en la superficie) antes que al movimiento de las aguas (que si bien está fuertemente influenciada por el viento también lo está por muchos otros factores, como ya se ha visto). Sin embargo, hay algunos compuestos que cumplen varios requisitos de "sustancia pasiva": varios metales pesados como el mercurio, cadmio, cobre, zinc plomo, hidrocarburos halogenados que incluyen insecticidas como el DDT y químicos industriales en el grupo de los bifenilos policlorinados (PCBs, por sus siglas en inglés)¹⁸ (Clark, 1989). Asimismo, existen buenas razones para pensar que ciertas partículas sedimentarias, las arcillas, pueden cumplir en buena medida con un comportamiento "pasivo". A continuación veremos por qué:

Para que se pueda considerar como pasiva a una partícula sedimentaria que entra a un estuario es necesario que tenga un tiempo de depositación mayor que su tiempo de residencia en el sistema. Esto es, que tarde más en hundirse

¹⁸ Los PCBs son sustancias orgánicas de origen sintético poco degradables y altamente tóxicas.

hasta el fondo que el tiempo promedio que pasa dentro de la laguna. Las arcillas son partículas sedimentarias con radios menores a las 4 micras y con velocidades de depositación inferiores a los 0.3 metros por día en agua pura a 20 °C (King, 1975). Estas velocidades de depositación se pueden calcular a partir de la conocida ley de Stokes para la velocidad terminal V de un cuerpo esférico que cae dentro de un fluido (Kundu, 1990):

$$V = \frac{2a^2 g(\rho' - \rho)}{9\mu}$$

donde a es el radio del cuerpo, ρ' su densidad, g la aceleración producida por la gravedad, μ el coeficiente viscosidad dinámica del fluido y ρ su densidad. Así, por ejemplo, con base en esta fórmula una partícula de arcilla de $a = 0.25$ micras se depositará a lo largo de una columna de agua de 2 m (más o menos la profundidad promedio entre la boca y la cabeza del sistema Altata / Ensenada del Pabellón) en aproximadamente 500 días, considerando una ρ' de 2.5 gr/cm³ (Whitten and Brooks, 1972) y una μ de 0.01 gr/cm s (Neuman and Pierson, 1966). Esto está perfectamente de acuerdo con los datos de King (1990). Y ya que el agua de cualquier sistema acuático natural no está estática sino, por el contrario, en continuo movimiento, podemos inferir que este valor no es sino una cota inferior y que en realidad las partículas tardarán mucho más tiempo en depositarse debido a la turbulencia. Por otro lado, como se mencionará más adelante, el tiempo de residencia en nuestro sistema considerando un flujo en el río de 80 m³/s es de unos 462 días. Así, es claro que las partículas de arcilla bien se pueden considerar como "físicamente pasivas" ya que, en promedio, la mayoría saldrían del sistema antes de depositar, salvo que quedaran atrapadas en giros.

Por otro lado, se sabe que la capacidad de las partículas sedimentarias para capturar metales pesados (como ocurre con el Niquel y el Zinc, según Förstner and Wittmann, 1979) y sustancias orgánicas como los PCBs (Camacho-Ibar and McEvoy, 1996) depende del tamaño de las partículas de forma inversamente proporcional: cuanto la partícula es más pequeña tanto más es capaz de capturar metales y compuestos orgánicos. Así, las arcillas son buenos receptores de esta clase de sustancias. Esto, aunado a que pueden absorber algunos otros compuestos orgánicos de peso molecular intermedio (conservativos por ser poco reactivos) como las moléculas de numerosos organoclorados y posiblemente algunos organofosforados (comunicación personal, Dr. Federico Páez Osuna), convierte a estas partículas en excelentes trazadores *cuasi-pasivos* de contaminación (bajo ciertas condiciones de estabilidad en el pH y la salinidad, pues variaciones fuertes en estas características pueden provocar que las arcillas liberen las sustancias absorbidas).

Así, tomando en cuenta lo anterior, pasemos ahora al desarrollo del modelo de advección-difusión. Concentrémonos por el momento únicamente en el proceso advectivo al que están sometidas las partículas en cuestión. Supongamos a una flotando en la superficie de la laguna, o en cualquier punto en la columna de agua (ya que el modelo es bidimensional), en cierta celda ij de la malla Arakawa C (Figura 2, página 24), como se muestra en la Figura 20. Para determinar la

trayectoria que seguirá dicho corpúsculo necesitamos conocer dos cosas: primero, la velocidad del agua en su posición ya que esa será la velocidad a la que estará sometida la partícula y, segundo, el desplazamiento que le producirá dicha velocidad. Así, sean (X, Y) las coordenadas globales de la partícula en la laguna, medidas con respecto a cierto sistema de referencia cartesiano; sean (X_o, Y_o) las coordenadas del origen de la malla Arakawa C, medidas con respecto al mismo sistema,¹⁹ y (X', Y') las distancias del corpúsculo a las fronteras de la celda, como se muestra en la Figura. Para obtener la velocidad en el punto (X, Y) a partir de las velocidades discretizadas según la malla Arakawa-C, se hará una interpolación lineal utilizando las variables primadas.

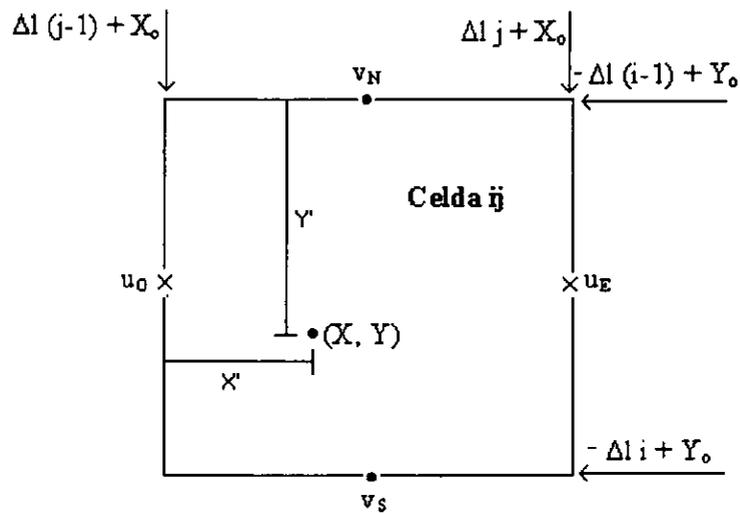


Figura 20 Esquema para deducir la advección de una partícula en la posición (X, Y) .

Así, si (u, v) es la velocidad en el punto (X, Y) , se tiene:

$$u(X') = \frac{u_E - u_O}{\Delta l} X' + u_O$$

$$v(Y') = \frac{v_S - v_N}{\Delta l} Y' + v_N$$

expresiones que se comprueban fácilmente haciendo a las variables primadas 0 o Δl . En términos de las variables globales (X, Y) se tiene:

$$u(X) = \frac{X - \Delta l(j-1) - X_o}{\Delta l} (u_E - u_O) + u_O$$

$$v(Y) = \frac{-Y - \Delta l(i-1) + Y_o}{\Delta l} (v_S - v_N) + v_N$$

¹⁹ El sistema global puede ser, por ejemplo, un sistema de coordenadas UTM. En nuestro caso (X_o, Y_o) son las coordenadas del vértice superior izquierdo de toda la malla Arakawa-C.

ya que, como se ve de la Figura,²⁰

$$X' = X - \Delta l(j-1) - X_0$$

$$Y' = -Y - \Delta l(i-1) + Y_0$$

Para simplificar las expresiones para la velocidad, así como los cálculos futuros, se define:

$$\Delta u \equiv u_E - u_O$$

$$\Delta v \equiv v_N - v_S$$

$$J \equiv -\Delta l(j-1) - X_0$$

$$I \equiv \Delta l(i-1) - Y_0$$

para llegar a

Ecuación 1

$$u(X) = \frac{\Delta u}{\Delta l}(X + J) + u_O$$

$$v(Y) = \frac{\Delta v}{\Delta l}(Y + I) + v_N$$

Bien, ahora se pueden integrar estas expresiones desde la posición (X_{n-1}, Y_{n-1}) hasta la posición (X_n, Y_n) , y desde el tiempo t , hasta el tiempo $t + \Delta t$. Ya que hemos llegado a expresiones simétricas para u y v , basta con que detallemos únicamente el caso de una de estas variables, pudiéndose inferir fácilmente el de la otra. Así, consideremos el caso de u :

$$\frac{dX}{dt} = u(X)$$

$$\Rightarrow \int_{X_{n-1}}^{X_n} \frac{dX}{u(X)} = \int_t^{t+\Delta t} dt = \Delta t,$$

y utilizando la expresión para $u(X)$ de la Ecuación 1, la integral en X se convierte en:

²⁰ La asimetría en este punto entre las ecuaciones en X y en Y radica en lo siguiente: mientras que para X la dirección de crecimiento en coordenadas UTM (derecha) coincide con la de crecimiento para la coordenada j en notación matricial, para Y ocurre lo inverso. Efectivamente, la variable Y aumenta hacia arriba en coordenadas UTM, mientras que en notación matricial i aumenta hacia abajo.

$$\frac{\Delta l}{\Delta u} \int_{u(X_{n-1})}^{u(X_n)} \frac{d(u(X))}{u(X)} = \frac{\Delta l}{\Delta u} \ln \left(\frac{u(X_n)}{u(X_{n-1})} \right),$$

siempre que Δu y $u(X_n)$ sean distintos de cero.²¹ Regresando a la variable X tendremos:

Ecuación 2

$$\frac{\Delta l}{\Delta u} \ln \left(\frac{\Delta u(X_n + J) + \Delta l \cdot u_0}{\Delta u(X_{n-1} + J) + \Delta l \cdot u_0} \right) = \Delta t, (\Delta u \neq 0)$$

Ahora podemos despejar X_n para obtener una expresión que nos permita predecir el desplazamiento de la partícula:

Ecuación 3

$$X_n = \left(X_{n-1} + J + \frac{\Delta l}{\Delta u} u_0 \right) e^{\frac{\Delta u \Delta t}{\Delta l}} - \frac{\Delta l}{\Delta u} u_0 - J, \text{ si } \Delta u \neq 0.$$

En el caso en que Δu sea cero, de la Ecuación 1 tenemos $u(X) = u_0$, y la integral resulta en:

Ecuación 4

$$X_n = X_{n-1} + u_0 \Delta t, \text{ si } \Delta u = 0.$$

Si $u(X_{n-1}) = 0$ quiere decir que para un paso anterior $u(X_n)$ fue cero. Como esto no debió ocurrir siquiera nos podemos concentrar únicamente en este caso. En este caso no tenemos que integrar, ya que la velocidad final no es una incógnita. Así, no es difícil demostrar de la Ecuación 1 que

$$X_n = -J - \frac{\Delta l}{\Delta u} u_0, \text{ si } u(X_n) = 0.$$

Ahora, observando la Ecuación 1 se infiere que haciendo las sustituciones $X \rightarrow Y$, $u_0 \rightarrow v_N$, $\Delta u \rightarrow \Delta v$, $J \rightarrow I$, obtenemos inmediatamente de estas últimas expresiones las correspondientes para Y_n :

²¹ No importa si $u(X)$ es cero para algún punto en el dominio $[X_{n-1}, X_n]$. Se puede demostrar que en este caso la integral no diverge. Dada la definición de $u(X)$, sólo cuando u_0 y u_E tengan signos distintos existirá algún punto (sólo uno) en el dominio para el cual $u(X) = 0$.

$$Y_n = \left(Y_{n-1} + I + \frac{\Delta l}{\Delta v} v_N \right) e^{\frac{\Delta u \Delta t}{\Delta l}} - \frac{\Delta l}{\Delta v} v_N - I, \text{ si } \Delta v \neq 0$$

$$Y_n = Y_{n-1} + v_N \Delta t, \text{ si } \Delta v = 0$$

$$Y_n = -I - \frac{\Delta l}{\Delta v} v_N, \text{ si } v(Y_n) = 0.$$

Así, hemos obtenido expresiones que nos permiten conocer una posición futura de una partícula siempre que conozcamos la posición actual y el campo de velocidades en la malla Arakawa-C. El paso de tiempo Δt es el mismo que del modelo de circulación. Sin embargo hay todavía un detalle a tratar: ¿Qué ocurre si la partícula es advectada más allá de la celda en la que se encuentra, en el mismo paso de tiempo? Para reducir el error al mínimo deberíamos mover esa partícula hasta la frontera de la caja para después moverla utilizando las velocidades de la caja contigua, y repetir el proceso tantas veces como sea necesario hasta que haya transcurrido todo el lapso Δt . Analicemos, nuevamente, el caso para X y deduzcamos el de Y en virtud de la simetría de las ecuaciones. Lo único que necesitamos saber, en realidad, es cuál es el tiempo Δt_{fron} necesario para llevar a la partícula exactamente a la frontera de la caja. Así, recurrimos simplemente a la Ecuación 2, tomando en cuenta que ahora X_n está en la alguna de las fronteras:

$$\Delta t_{\text{fron}X} = \frac{\Delta l}{\Delta u} \ln \left(\frac{\Delta u(X_n + J) + \Delta l \cdot u_0}{\Delta u(X_{n-1} + J) + \Delta l \cdot u_0} \right), \text{ si } \Delta u \neq 0$$

y utilizando la Ecuación 4:

$$\Delta t_{\text{fron}X} = \frac{X_n - X_{n-1}}{u_0}, \text{ si } \Delta u = 0 \text{ y } u_0 \neq 0,$$

donde X_n está en alguna frontera, es decir, observando la Figura 20:

$$X_n = j \Delta l + X_0 \equiv \Delta l \cdot J, \text{ si la fuga fue hacia el este}$$

$$X_n = (j-1) \Delta l + X_0 \equiv -J, \text{ si la fuga fue hacia el oeste}$$

En el caso de que $\Delta u = 0$ y también $u_0 = 0$ la velocidad a la que está sometida la partícula es idénticamente cero (u_E sería cero también y por lo tanto la interpolación lineal sería cero), y no habría desplazamiento en X para ese paso de tiempo y, por lo tanto, no habría fuga y este análisis no se aplicaría. Por otro lado, si $u(X_n) = 0$ en la frontera no podemos obtener un Δt_{fron} pues no podríamos haber integrado ya que la integral diverge. Esto se interpreta como que, ya que la partícula va pasando por puntos en los cuales la velocidad es cada vez menor, le toma un tiempo infinito llegar hasta la frontera. Sin embargo, dejar que la partícula sea advectada más allá de la caja actual (salvo que también ahí $u(X_n) =$

0) no le puede tomar más de Δt . Así, para un campo de velocidades bien comportado y con significado físico, lo único que se puede hacer en estos casos es dejar que la partícula sea advectada más allá de la frontera.

Ahora bien, haciendo nuevamente las sustituciones $X \rightarrow Y$, $u_O \rightarrow v_N$, $\Delta u \rightarrow \Delta v$ y $J \rightarrow I$, obtenemos las expresiones correspondientes para Y :

$$\Delta t_{fronY} = \frac{\Delta l}{\Delta v} \ln \left(\frac{\Delta v(Y_n + I) + \Delta l \cdot v_N}{\Delta v(Y_{n-1} + I) + \Delta l \cdot v_N} \right), \text{ si } \Delta v \neq 0$$

y

$$\Delta t_{fronY} = \frac{Y_n - Y_{n-1}}{v_N}, \text{ si } \Delta v = 0 \text{ y } v_N \neq 0,$$

donde, nuevamente de la Figura 20,

$$Y_n = -i \Delta l + Y_o \equiv -\Delta l - I, \text{ si la fuga es hacia el sur}$$

$$Y_n = -(i-1) \Delta l + Y_o \equiv -I, \text{ si la fuga es hacia el norte}$$

Obtenemos así dos pasos de tiempo para llevar a la partícula a las fronteras Norte-Sur o Este-Oeste, dependiendo de por dónde se salga. Es importante recalcar que debemos aplicar el mismo Δt_{fron} tanto en las ecuaciones para X como en aquellas para Y . Así, surge la duda de cuál de los dos pasos de tiempo (Δt_{fronX} o Δt_{fronY}) debemos utilizar si la fuga es por ambas fronteras como se muestra en la Figura 21. Las posiciones inicial y final de la partícula se han representado con puntos negros (la dirección del movimiento con una flecha). Bien, el Δt_{fron} que se escoja afectará simultáneamente al movimiento en X y en Y . De la Figura se ve que el Δt_{fronY} movería a la partícula hasta el punto 2, mientras que el Δt_{fronX} lo haría hasta 1, como quisiéramos. Es claro de la Figura que $\Delta t_{fronX} < \Delta t_{fronY}$ (si la partícula ha de llegar a 2, antes debe pasar por 1). Así, deducimos que en caso de una fuga por ambas fronteras el paso de tiempo a tomar para mover la partícula a la frontera correcta es el mínimo entre Δt_{fronX} y Δt_{fronY} .

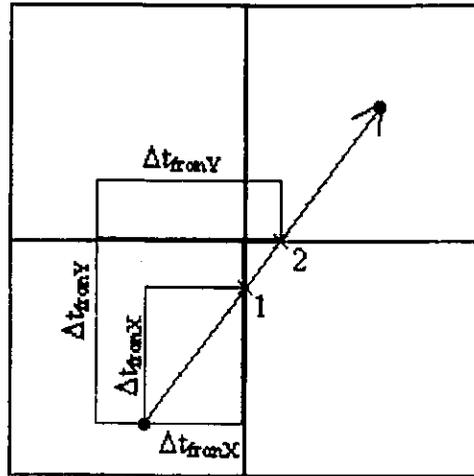


Figura 21 Esquema para deducir el Δt_{fron} adecuado

Una vez habiendo movido la partícula a la frontera se vuelven a utilizar las expresiones para X_n y Y_n para encontrar una nueva posición, pero ahora utilizando un nuevo paso de tiempo $\Delta t_{rest} = \Delta t - \Delta t_{fron}$. En caso de que en este paso de tiempo la partícula vuelva a fugarse se repite el proceso cuantas veces sea necesario, obteniendo sucesivamente pasos de tiempo Δt_{rest} cada vez menores. El procedimiento continua hasta que Δt_{rest} sea tan pequeño que la fuga sea imposible.

Ahora sólo nos resta introducir la componente difusiva de la velocidad. Para esto sólo agregamos una cierta cantidad u_A y v_A (la A es por "aleatorio") a las expresiones que ya hemos obtenido para $u(X)$ y $v(Y)$ (Ecuación 1):

$$u(X) = \frac{\Delta u}{\Delta l} (X + J) + u_O + u_A$$

$$v(Y) = \frac{\Delta v}{\Delta l} (Y + I) + v_N + v_A$$

Notemos que si definimos:

$$u_O' \equiv u_O + u_A$$

$$v_N' \equiv v_N + v_A$$

obtenemos expresiones que tienen una forma idéntica a las que ya hemos deducido. Así, si hacemos la sustituciones $u_O \rightarrow u_O'$ y $v_N \rightarrow v_N'$ en todas las expresiones que hemos obtenido tendremos finalmente las fórmulas necesarias para calcular la advección y la difusión de cualquier número de partículas. Sólo nos falta determinar la distribución de probabilidad para las velocidades aleatorias. Quisiéramos que se tratara de una distribución normal (una campana de

Gauss) teniendo como velocidad más probable 0 m/s, variando desde $-V$ hasta $+V$. Una tal distribución está dada por la expresión:

Ecuación 5

$$f(r) = V \cdot S(r) \left(e^{-r^2/\sigma} - 1 \right),$$

donde $S(r)$ es la función *signo*, es decir:

$$S(r) = \begin{cases} r & \text{si } r > 0 \\ -r & \text{si } r < 0 \end{cases}$$

σ es un número real mayor que cero y r es una variable discreta que pertenece a un conjunto de probabilidad homogéneo (en el que cada elemento es igualmente probable de “ocurrir”). En la Figura 22 se muestra la gráfica de esta distribución.

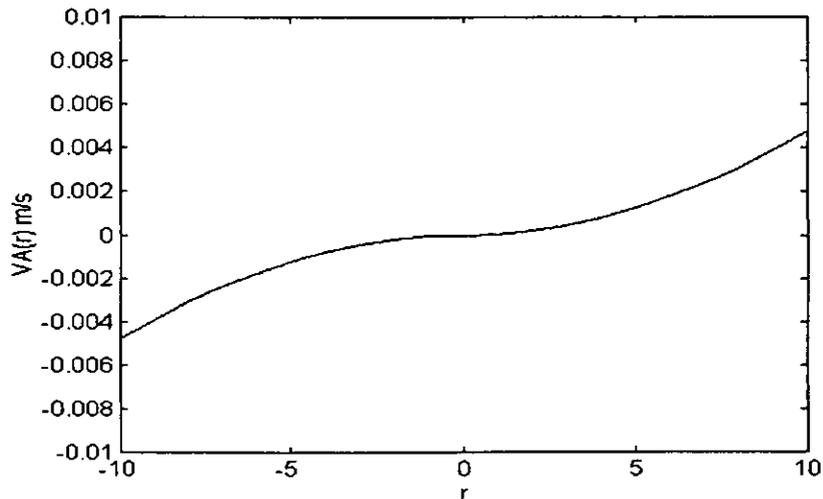


Figura 22. Distribución de probabilidad para las velocidades aleatorias

Criterio para las magnitudes de V y σ

Para que el modelo de transporte esté completo aún falta por contestar una pregunta: ¿Qué valor darles a los parámetros de la función de la velocidad aleatoria? Como se ve de la Ecuación 5 estos parámetros son V y σ . Si queremos algo de seriedad y realismo en nuestro modelo no podemos simplemente utilizar cualquier valor. Necesitamos entonces algún criterio. Para llegar a él ejerzamos el siguiente razonamiento: Primero, ¿qué efecto físico tiene la modificación del valor de estos parámetros? Quizá con σ no esté muy claro, pero en el caso de V es ineludible: aumentar su valor significa imprimir mayor velocidad “difusiva” a las partículas, es decir, tiene como efecto una mayor difusión de las partículas en

un paso de tiempo igual.²² Así, es evidente que hay una estrecha relación (directa) entre V y el coeficiente de difusión *molecular* A , y σ debe encontrarse en una situación similar. A continuación llegaremos a dicha relación.

Supongamos que en un líquido en reposo (sin corrientes) colocamos cierto número de partículas concentradas todas en un cierto punto (en el origen del sistema de coordenadas, digamos) y dejamos que se difundan. Sólo nos interesa la difusión horizontal, así que podemos hacer un promedio vertical de la concentración. Ya que las partículas no interactúan las unas con las otras, y dado que el espacio horizontal es isotrópico (tenemos simetría axial alrededor del punto inicial de dispersión), este problema no es otra cosa que una "caminata al azar", es decir, el bien conocido *movimiento browniano*. Para este problema particular es bien conocida la relación (ver por ejemplo, Latorre et al., 1996, donde se ve una aplicación de la *caminata al azar* a la difusión en biofísica):

$$\langle r^2 \rangle = 2At$$

dónde $\langle r^2 \rangle$ es la distancia cuadrática media al origen, A es el coeficiente de difusión y t el tiempo. Ya que

$$\langle r^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^2,$$

donde r_i es la posición de cada una de las N partículas, tenemos para el coeficiente de difusión:

$$A = \frac{1}{2Nt} \sum_{i=1}^N r_i^2$$

Con esta ecuación podemos hacer el experimento numérico de difusión en agua estancada con nuestro modelo. Para cada paso de tiempo j obtendremos así un coeficiente de difusión A_j dado por:

$$A_j = \frac{1}{2Nt_j} \sum_{i=1}^N r_i^j{}^2,$$

²² No debe perderse de vista la relación evidente entre V y el paso de tiempo Δt en el cual el modelo calcula las posiciones sucesivas de las partículas durante su difusión, ya que V es finalmente un efecto promedio a lo largo del tiempo. Por ejemplo, en los resultados que mostraremos más adelante se ha usado un Δt de algunas decenas de minutos. Después de unos cien pasos de tiempo (varios días) la mancha de partículas ha recorrido algunos kilómetros, lo cuál es sensato. Pero si Δt fuera de unos pocos segundos estos mismos resultados no tendrían sentido. Es decir, en este caso debería tomarse un valor distinto para V (o, equivalentemente, una escala espacial diferente de forma tal que las partículas no hubieran recorrido kilómetros sino, digamos, algunos centímetros).

donde $t_j = j\Delta t$. Dejando evolucionar el experimento un tiempo razonable podemos obtener un promedio para A ; éste sería el valor del coeficiente de difusión correspondiente a los parámetros V y σ .

Se llevaron a cabo múltiples experimentos de este tipo. En la Figura 23 se ilustra un resultado típico y la Tabla 4 muestra los resultados cuantitativos de varios. Si uno recurre a los manuales de fórmulas y constantes físicas (Handbook of Chemistry and Physics, 1947, por ejemplo), descubre que un coeficiente típico de una sustancia que se difunde en agua pura es del orden de 1×10^{-8} o $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Así, con esto en mente, valores para V y σ como los señalados con un asterisco parecieran ser los más adecuados.

Tabla 4 Criterio para los valores de V y σ

σ	V (m/s)	A (m^2/s)	
1000	0.100	10^{-4}	
1000	0.010	10^{-7}	*
1000	0.001	10^{-10}	
500	0.010	10^{-6}	
100	0.100	10^{-2}	
100	0.010	10^{-5}	
100	0.001	10^{-8}	*
10	0.100	10^{-1}	
10	0.010	10^{-4}	
10	0.001	10^{-7}	*

A este criterio del coeficiente de difusión molecular se puede agregar el siguiente: la velocidad aleatoria máxima no debería ser mayor que la máxima velocidad del agua. Y según los resultados del modelo de circulación, las velocidades máximas producidas por el armónico de marea M_2 cerca de la desembocadura del río son de 35 cm/s . Así, casi todos los resultados presentados en la siguiente sección son de experimentos hechos con $\sigma = 1000$ y $V = 0.010 \text{ m/s}$, para un paso de tiempo $\Delta t = 46.5$ minutos (un dieciseisavo del periodo de M_2). Solamente se ha realizado un experimento con partículas "altamente difusivas" ($V = 25 \text{ cm/s}$).

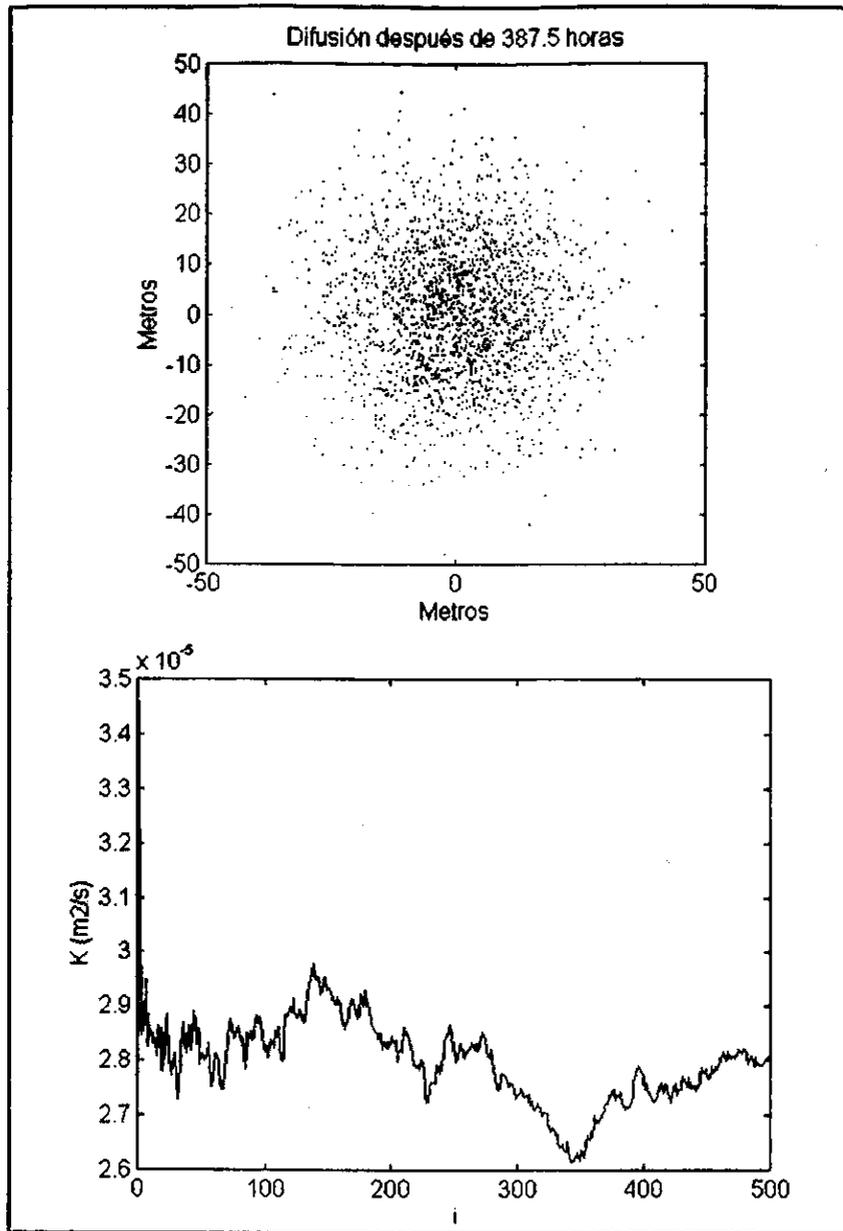


Figura 23. Ejemplo de los resultados de un experimento de difusión en agua estancada.

Resultados y discusión

Difusión por M_2 desde el río Culiacán

En una ampliación del centro del sistema lagunar (Figura 24) se presentan los resultados de un experimento de transporte de mil partículas desde la desembocadura del río Culiacán (todas las demás Figuras de transporte desde el río tienen la misma posición inicial), donde el único generador de corrientes es el armónico de marea M_2 (no hay flujo en el río). Se muestra la evolución de las partículas a lo largo de 150 periodos de marea (aproximadamente dos meses y medio). Se puede observar que las partículas tienden a acumularse en un

remolino. Este resultado es interesante, ya que demuestra que las corrientes de marea son incapaces de sacar a las partículas que ingresan al sistema lagunar por el río, dadas las condiciones de difusividad $\sigma = 1000$ y $V = 0.010$ m/s. Sustancias altamente difusivas tendrán un comportamiento diferente partiendo del mismo punto y sometidas a la misma dinámica, tal y como lo muestra la Figura 25, donde se ven los resultados de un experimento con $\sigma = 1000$ y $V = 0.025$ m/s. Ahí se puede observar que las partículas representan a una sustancia tan difusiva que ya no son atrapadas en el mismo giro y la gran mayoría de ellas escapa por la costa cercana al punto del que partieron. Sin embargo, algunas partículas eventualmente son atrapadas en otros dos giros. Como sea, lo importante a destacar es que en ambos experimentos las sustancias no son llevadas hasta la boca del sistema.

La Figura 26 muestra un experimento con dos mil partículas colocadas, nuevamente, cerca de la desembocadura del río. Se ha dejado que el experimento evolucione por 180 periodos de M_2 . Este experimento muestra que un flujo del río suficientemente fuerte (140 m³/s) es capaz de vencer las corrientes de marea y llevar a las sustancias hasta Altata. Este experimento, como todos los que siguen, se ha hecho con una amplitud de velocidad aleatoria $V = 0.010$ m/s. Compárese con el experimento de Figura 27, en el que se ha cambiado la corriente del río por la que existe en la literatura actual (80 m³/s, en SEMARNAP-CNA 1996) y que era el flujo del río hasta hace algunos años. Aquí se demuestra que este flujo ya es insuficiente para vencer los giros que se presentan en la desembocadura del río. Sólo algunas partículas logran llegar a Altata arrastradas por la corriente del río, otras pocas son atrapadas en giros más alejados de la desembocadura, en Ensenada del Pabellón. La gran mayoría son atrapadas en un giro muy cercano a la desembocadura. Sin embargo, se observa que poco a poco las partículas van abandonando el giro para ir a la boca. Así, aunque la mayoría permanecen en el giro, se puede concluir que eventualmente las partículas serán llevadas hasta la boca. En el caso del flujo de 140 m³/s el tiempo de residencia, calculado a partir de la corriente residual de marea en la boca y del volumen de la cuenca, es de 101 días, mientras que en el caso del flujo de 80 m³/s es de 462. Así las cosas, es comprensible el nivel de contaminación que tiene actualmente el sistema lagunar, ya que el flujo de 80 m³/s, que era el que existía desde hace varios años en el río Culiacán (SEMARNAP-CNA 1996), es insuficiente para llevar las partículas hasta el mar. Más aún, hoy día el flujo en el río es mucho menor (se piensa que de 3.5 m³/s) y, como se verá más adelante, la situación podría llegar a ser preocupante.

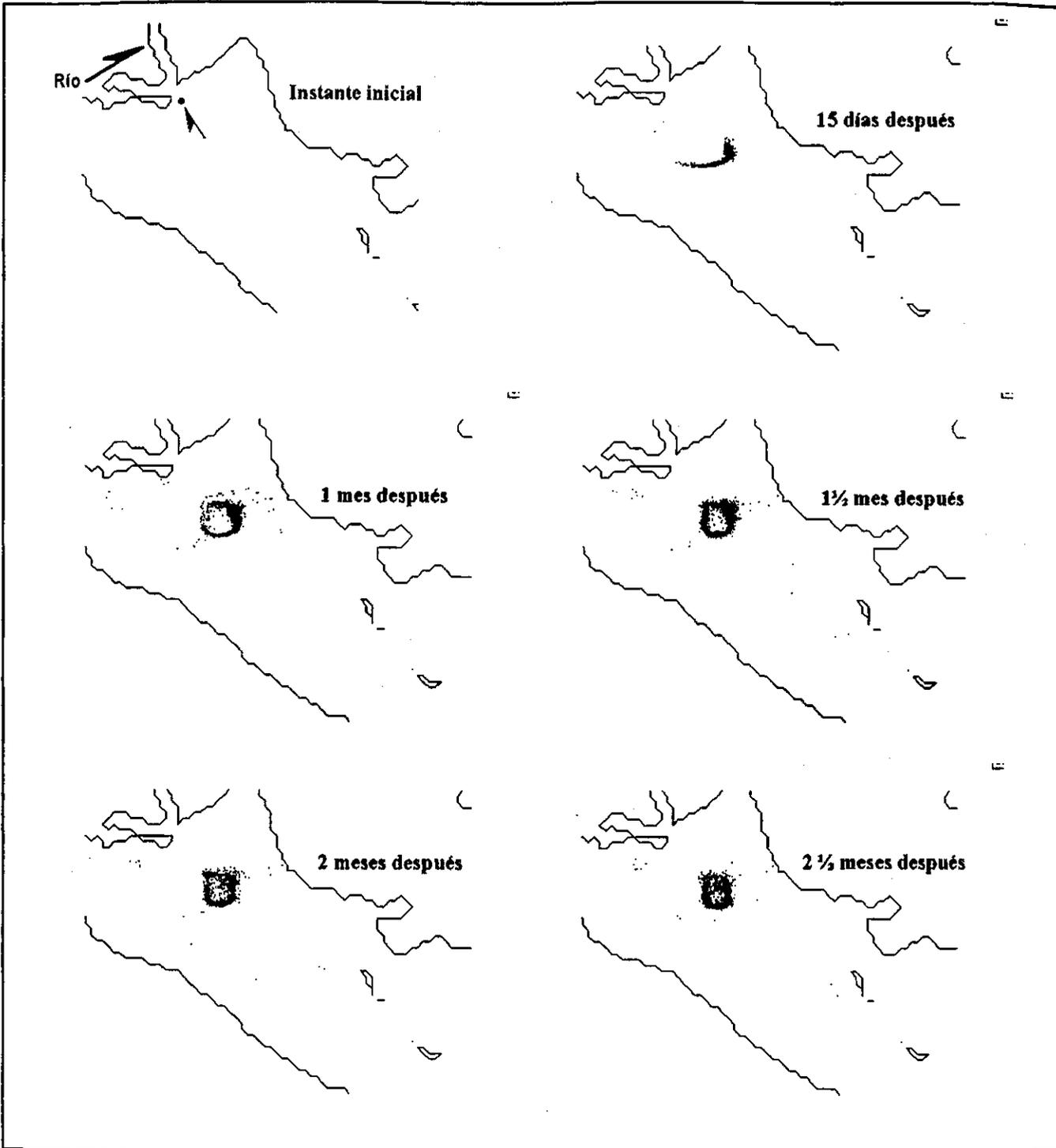


Figura 24. Transporte desde el río producido únicamente por M_2 (sin flujo en el río) La flecha indica la posición inicial de las partículas.

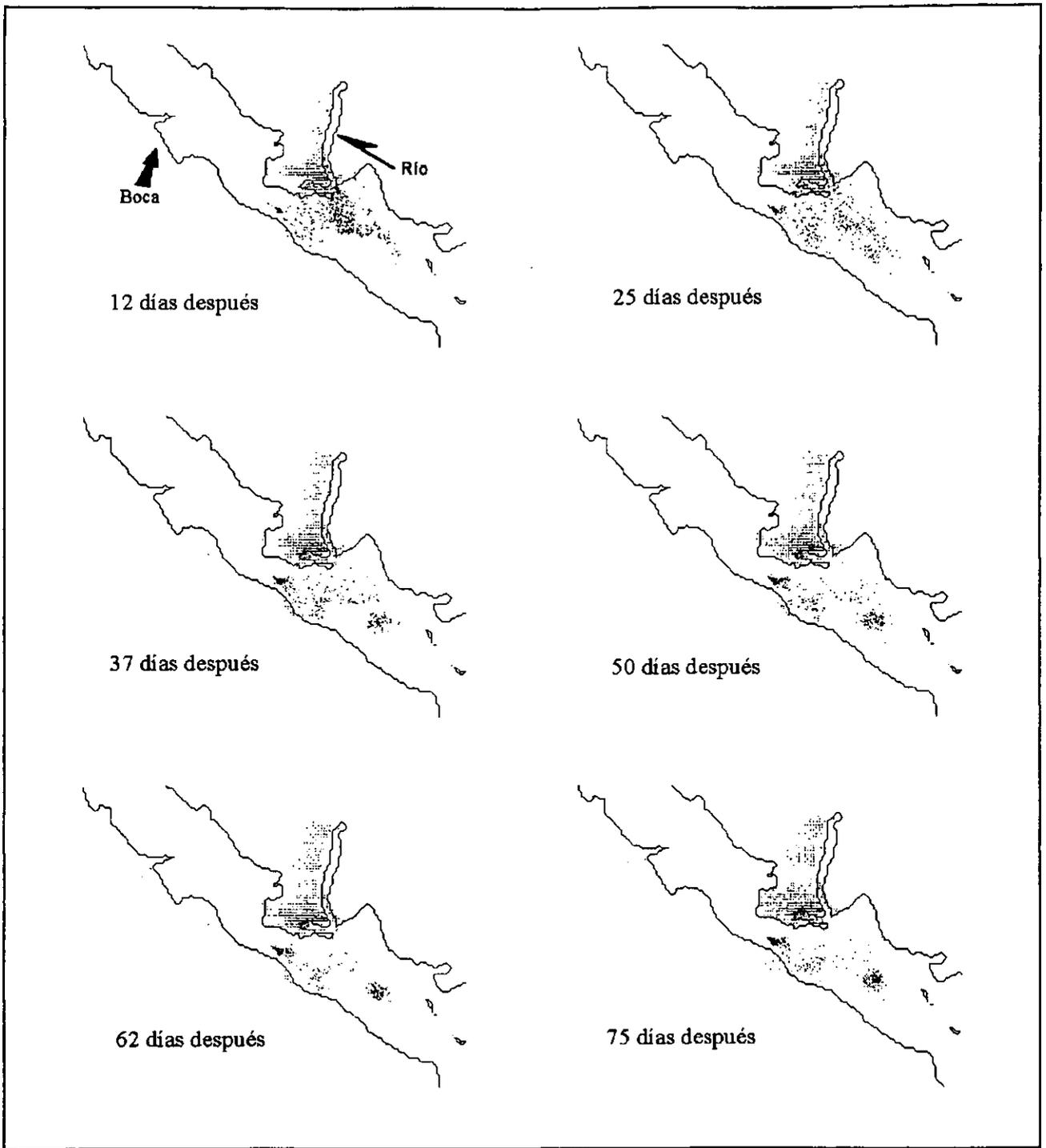


Figura 25. Transporte desde el río producido únicamente por M_2 (sin flujo en el río) para una sustancia altamente difusiva.

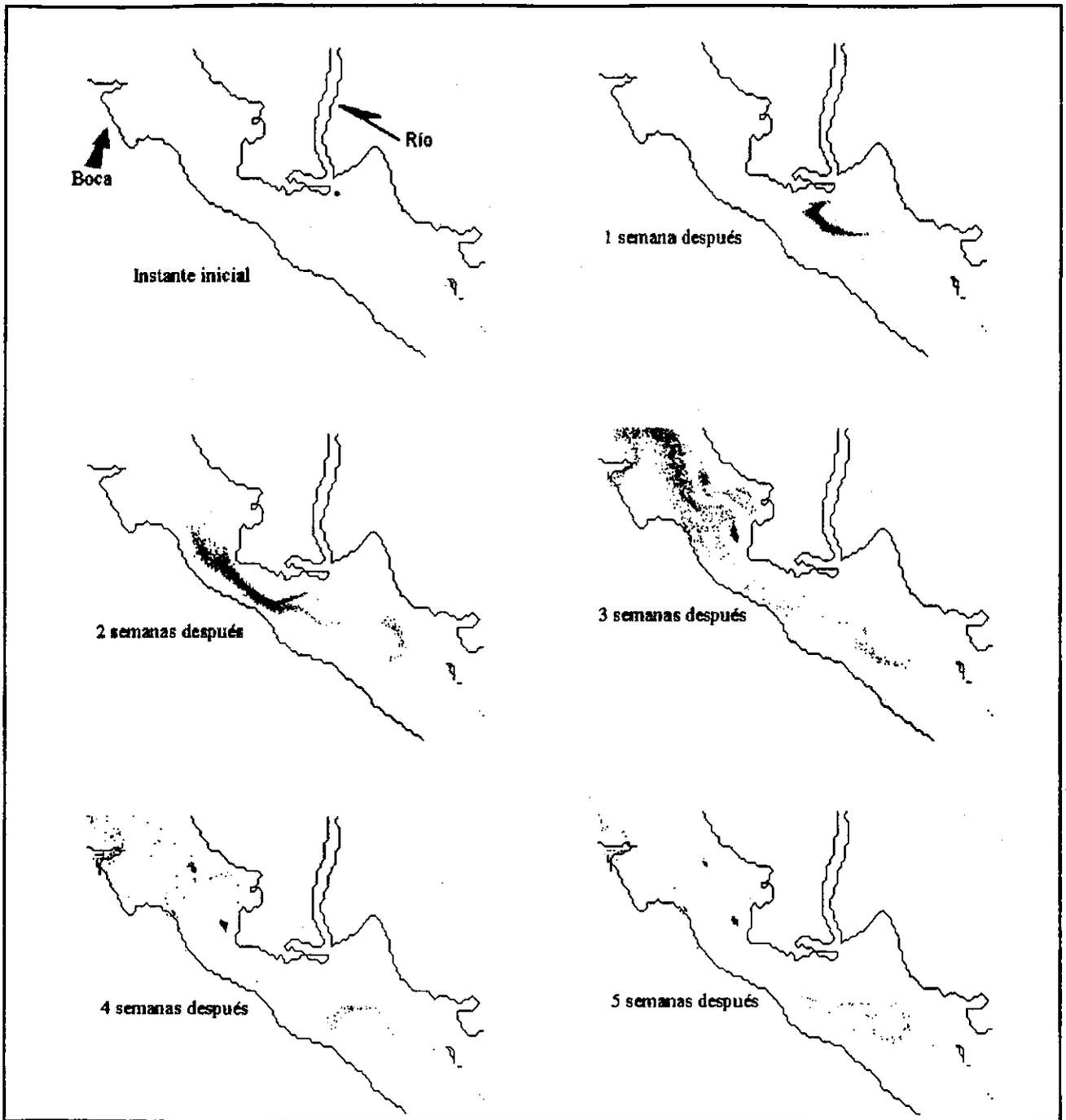


Figura 26. Difusión de partículas producida por M_2 y por la corriente del río (flujo $140 \text{ m}^3/\text{s}$)

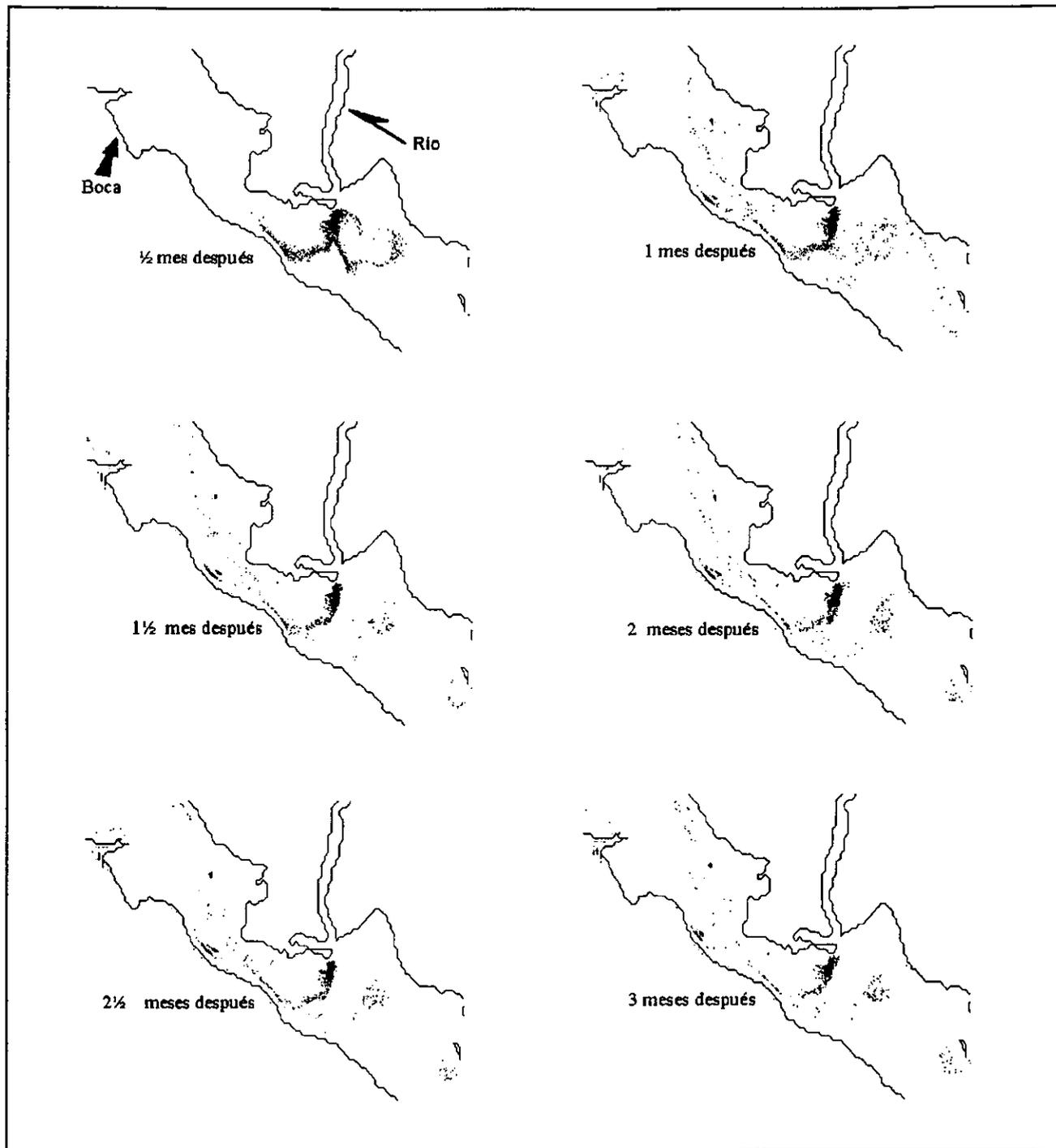


Figura 27. Difusión producida por M_2 y la corriente del río ($80 \text{ m}^3/\text{s}$).

Un experimento similar, pero con viento del sureste (5 m/s) se muestra en la Figura 28. Aunque uno podría esperar que dicho viento fuera tal que llevara a las sustancias hacia Altata y eventualmente hacia la boca esto no es así. Ocurre exactamente lo opuesto: son llevadas hacia la zona noreste de Pabellón. Esto se entiende bien si se compara con la Figura 19, donde se observa la corriente producida únicamente por un viento de este tipo. De igual forma, un experimento con viento del noroeste de 5 m/s (el más común en la zona), Figura 29, muestra que las partículas son atrapadas en dos pequeños giros (probablemente los mismos que de la marea M_2 , pero distorsionados por el viento). Una comparación con la Figura 18, donde se muestra las corrientes producidas únicamente por un viento de este tipo, esclarece la situación. En ambos casos, las partículas siguen las corrientes generadas por el viento, que como ya se mencionó, son las más significativas. Debido a los múltiples presas y desvíos con propósito de riego a todo lo largo del río Culiacán el caudal ha sido disminuido drásticamente. Se cree que en la actualidad el flujo del río es de $3.5\text{ m}^3/\text{s}$ (Paez.Osuna, comunicación personal). Los experimentos de difusión desde el río hechos con este flujo se muestran en las Figuras 30 y 31, sin y con viento del NO (5 m/s), respectivamente. En ellas se observa que las partículas siguen siendo atrapadas (como se esperaba) en giros dentro de Pabellón, incapaces de llegar a la boca. Las gráficas de los experimentos con viento SE se omiten ya que no difieren demasiado de los realizados con flujo de $80\text{ m}^3/\text{s}$.

Bien, todo lo visto en esta sección se puede resumir más o menos así: Todo lo que entra al sistema lagunar por Ensenada del Pabellón permanecerá, generalmente, en Ensenada del Pabellón, mientras que las sustancias que lleguen a Altata podrán salir fácilmente por la boca. Esto, que se explica inmediatamente a partir de la dinámica mareal del sistema, como ya se vio en el capítulo anterior, explica en cierta forma la distribución de sedimentos en el sistema. Según estudios previos (Peraza-Vizcarra, 1973, Green-Ruiz, 1996) Pabellón tiene un fondo principalmente compuesto por limos y arcillas, sedimentos típicamente terrígenos (de ingreso por río), mientras que Altata tiene sedimentos arenosos, típicos de un ambiente marino. La batimetría somera de Pabellón queda así también explicada.

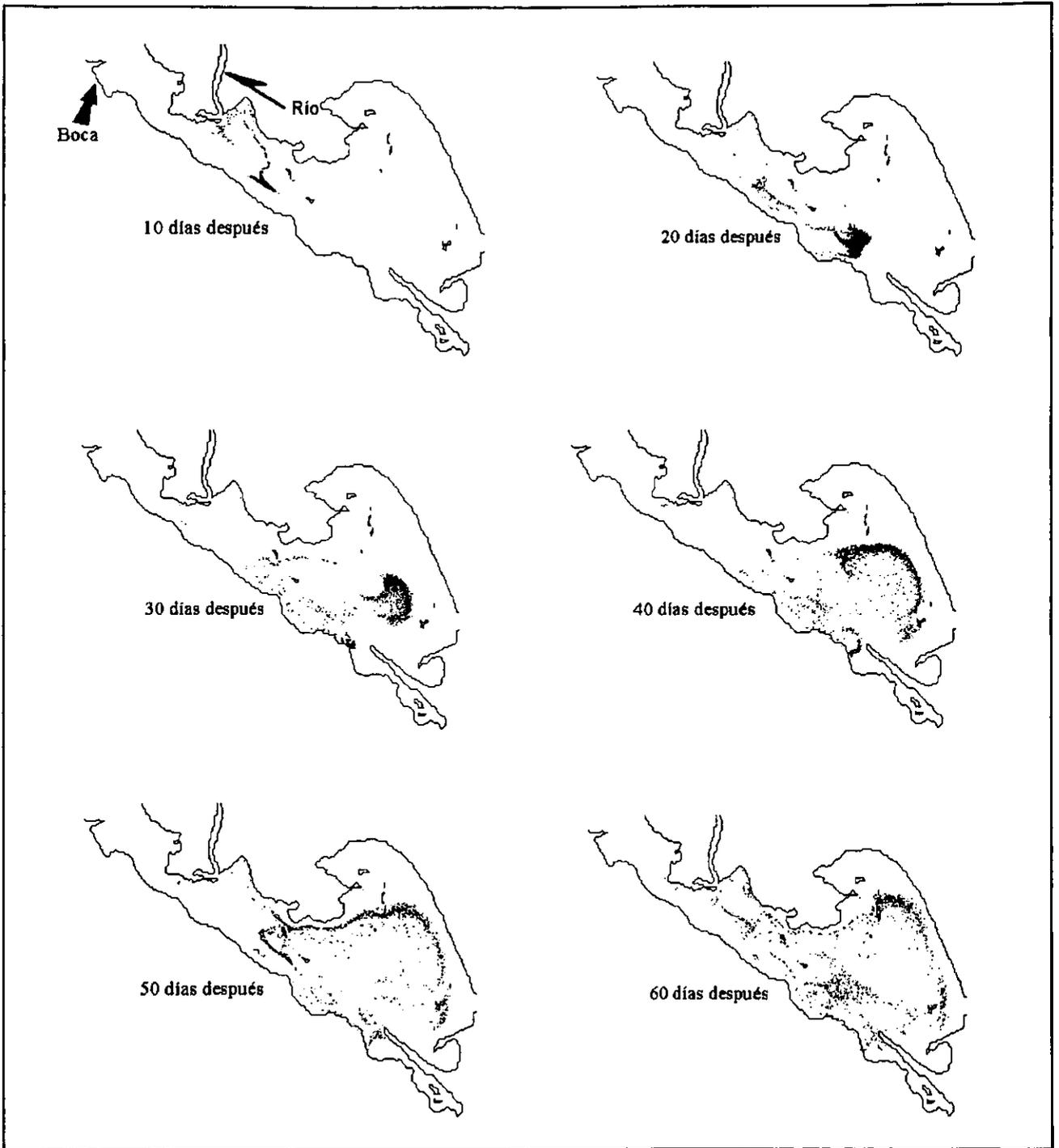


Figura 28. Difusión con M_2 , río ($80 \text{ m}^3/\text{s}$) y viento SE (5 m/s)

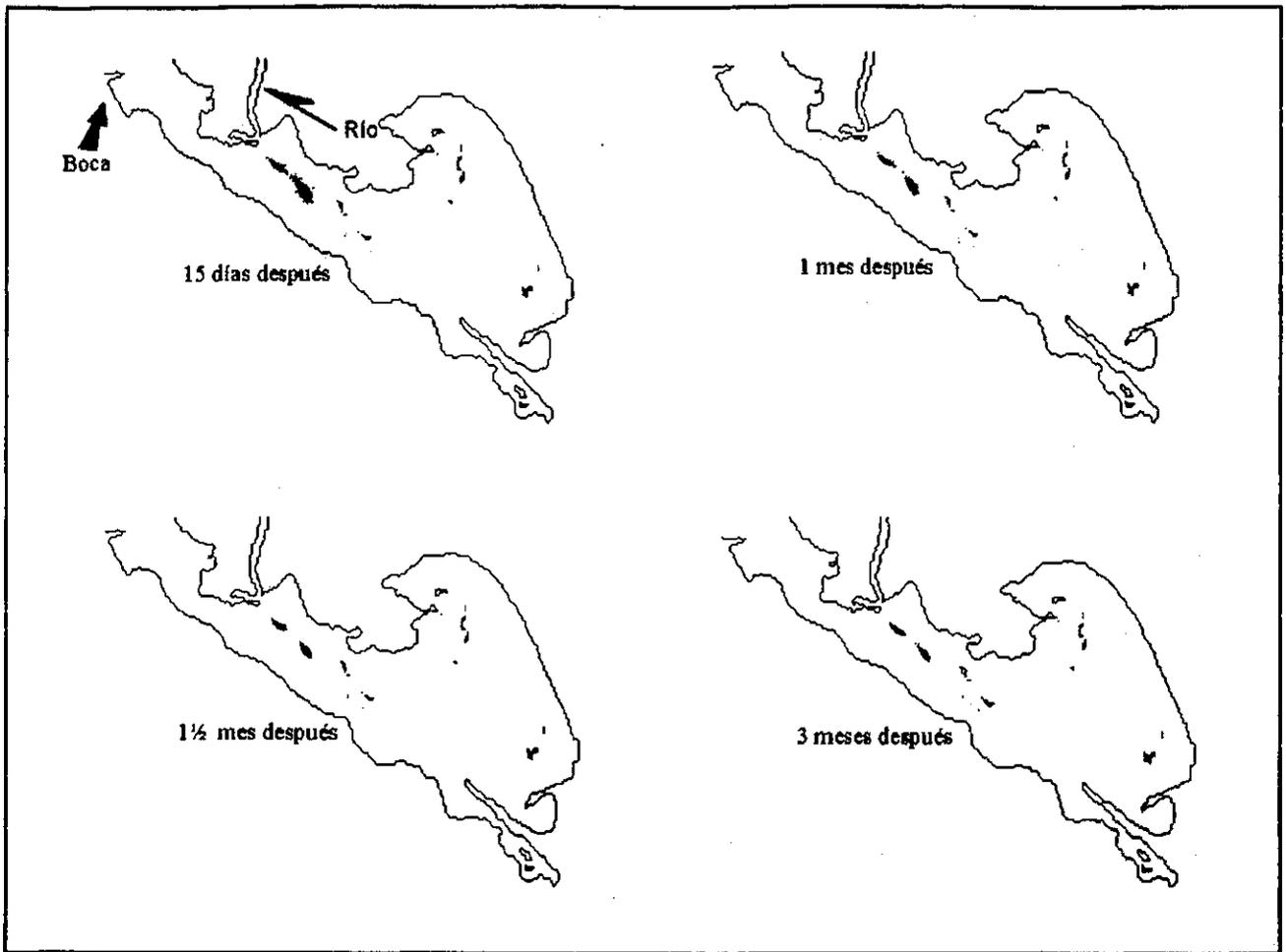


Figura 29. Difusión por marea M2, río ($80\text{m}^3/\text{s}$) y viento NO (5 m/s)

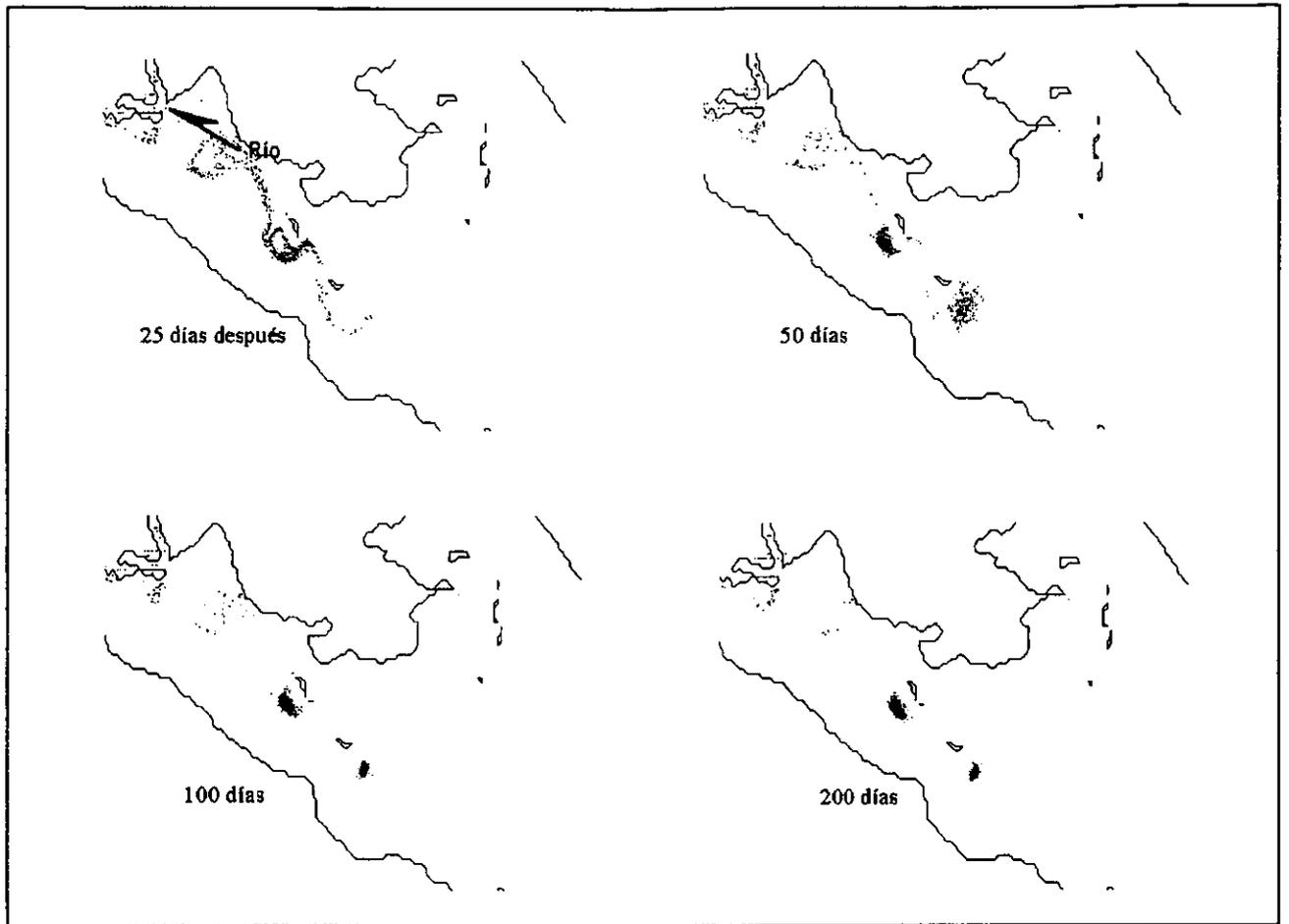


Figura 30. Difusión desde el río ($3.5 \text{ m}^3/\text{s}$), marea M_2 , sin viento

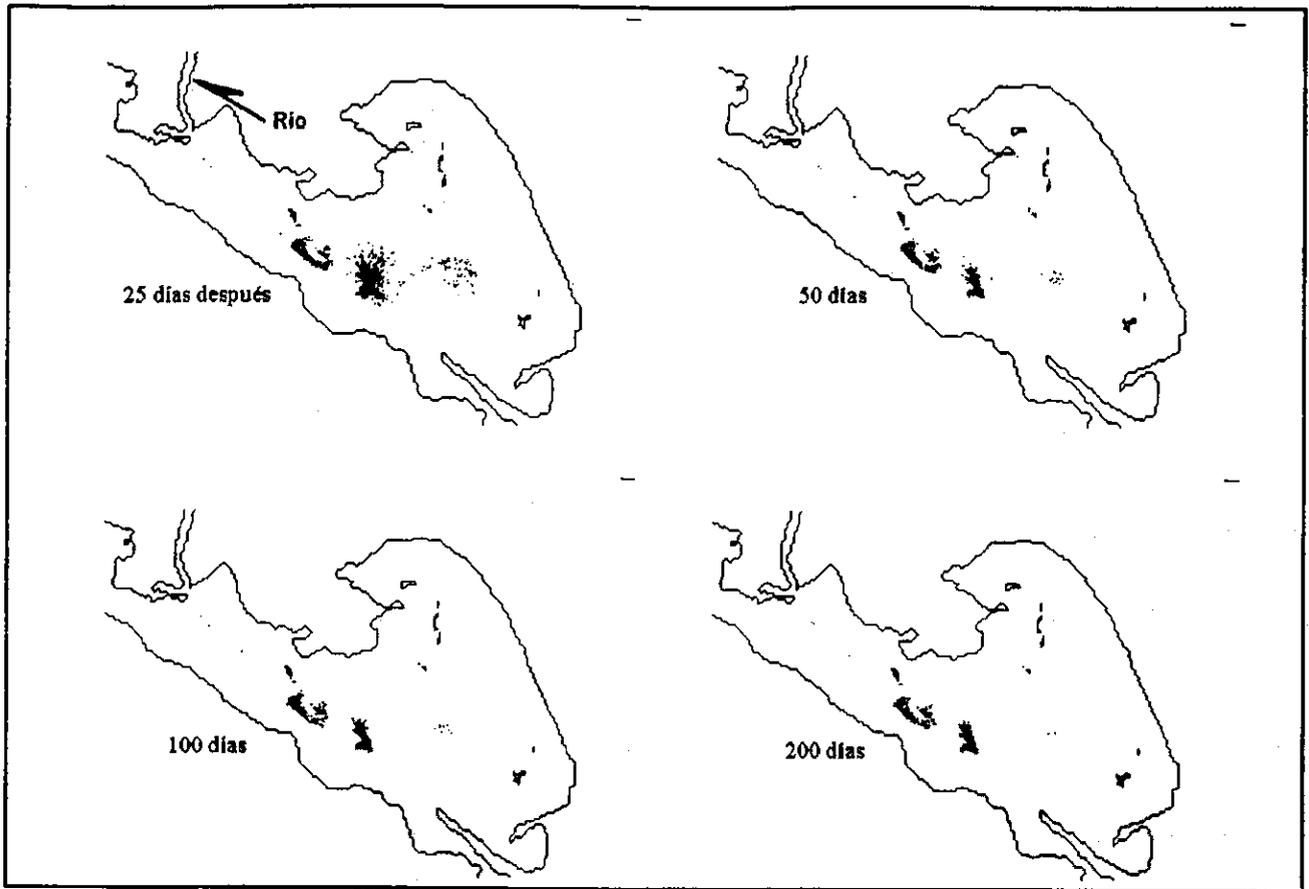


Figura 31. Difusión desde el río ($3.5 \text{ m}^3/\text{s}$), M_2 , con viento NO de 5 m/s

Difusión por M_2 desde zonas de escurrimientos agrícolas

En la Figura 32 se muestra un experimento de difusión con 1600 partículas colocadas en dos grupos de 800 en dos zonas de escurrimientos agrícolas (determinadas en comunicación personal con el Dr. Federico Páez). Estas son zonas en donde el agua de desecho de los cultivos entra al sistema lagunar. Las flechas triangulares muestran los puntos de posición inicial. El flujo del río es nulo, como prácticamente ocurre en la realidad. Se observa que las partículas tienden a acumularse en dos zonas bien definidas. Compárese esta con Figuras 33 y 34, donde se muestran concentraciones en los sedimentos superficiales de compuestos relacionados (en cierta forma) con los escurrimientos agrícolas: la concentración de carbono orgánico (Perez-Bernal, 1999) y la razón de carbohidratos a carbón orgánico (Páez-Osuna et al., 1998a).

Los resultados de un experimento más realista en este mismo rubro se muestran en la Figura 35, donde se ha agregado el que se piensa es el flujo actual del río ($3.5 \text{ m}^3/\text{s}$). Las posiciones iniciales son las mismas que las de la Figura 32. La diferencia entre estas dos Figuras no es grande, pero se observa que el efecto del río es el de llevar más rápidamente a sus destinos finales a las partículas.

Ahora se ha dejado evolucionar 100 días más el experimento: Se observa que las partículas al norte se salen del sistema (depositándose en las playas), y las que avanzan hacia el sudeste se aproximan más a la zona de alta concentración de carbono y carbohidratos mostradas en las Figuras 33 y 34.

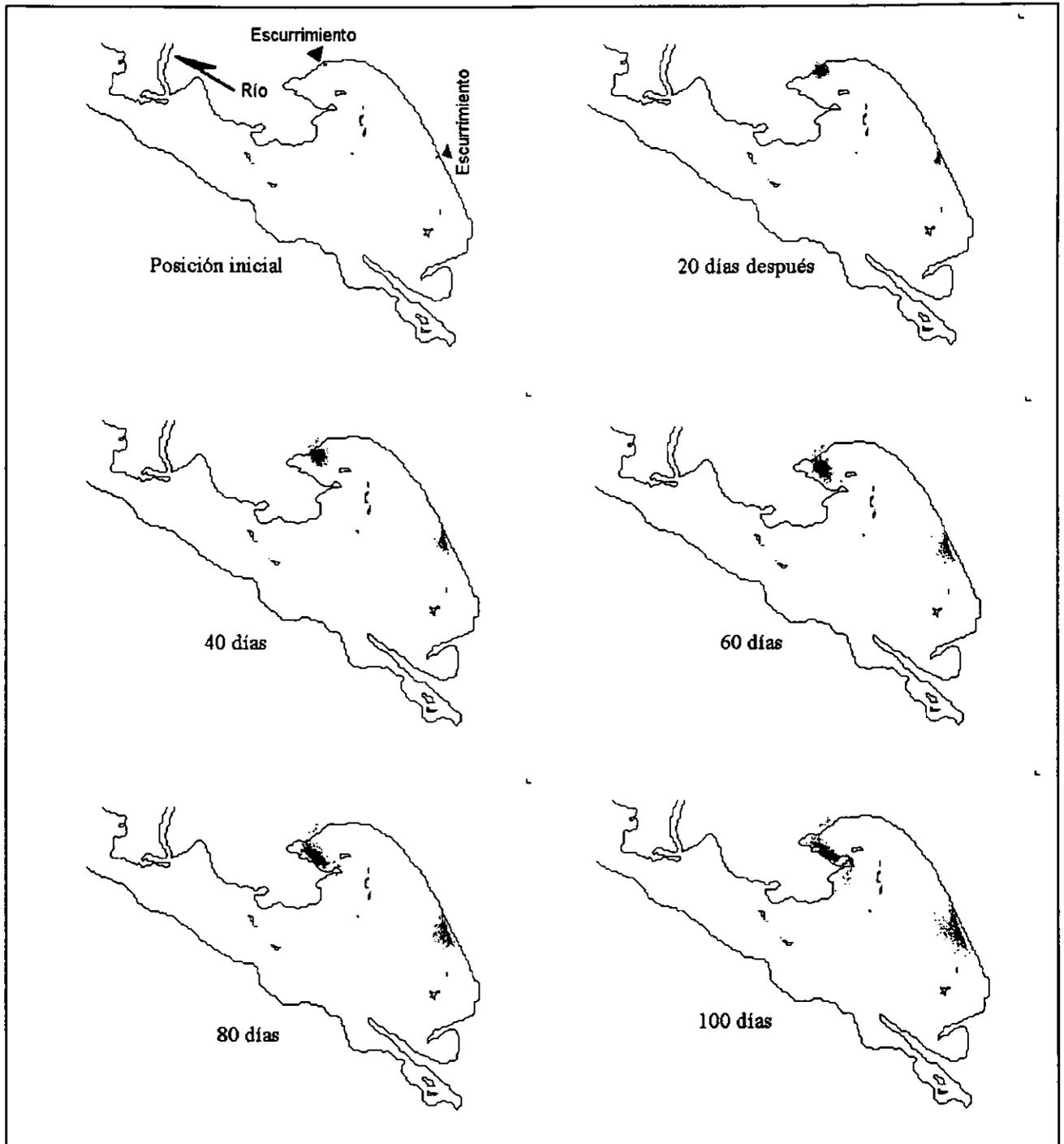


Figura 32. Experimento de difusión en las zonas de escurrimientos por deshechos agrícolas

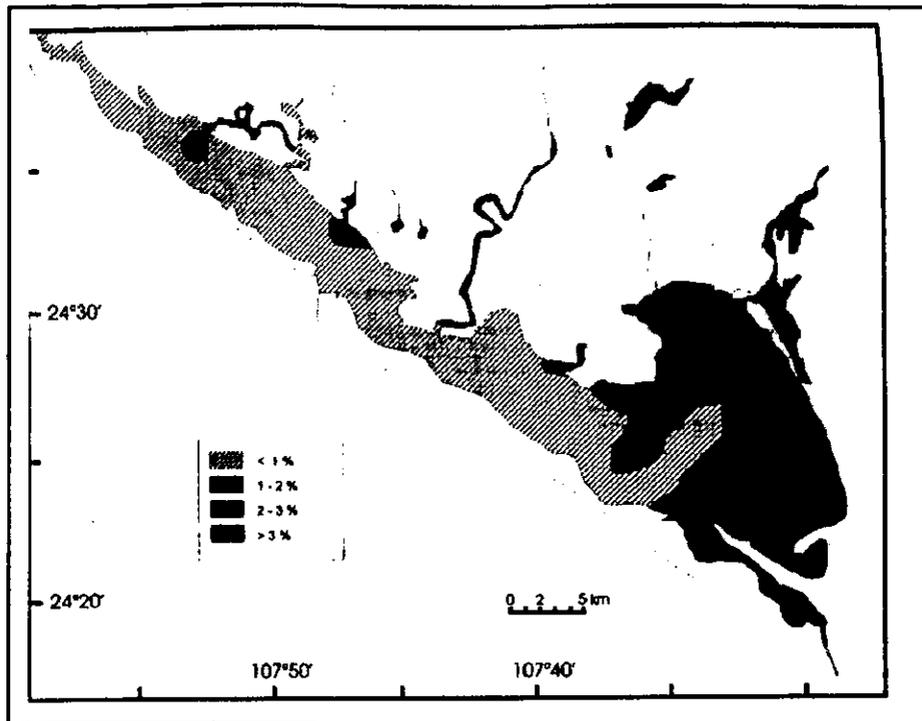


Figura 33. Concentración de carbono orgánico en los sedimentos superficiales del sistema lagunar (Pérez Bernal 1999).

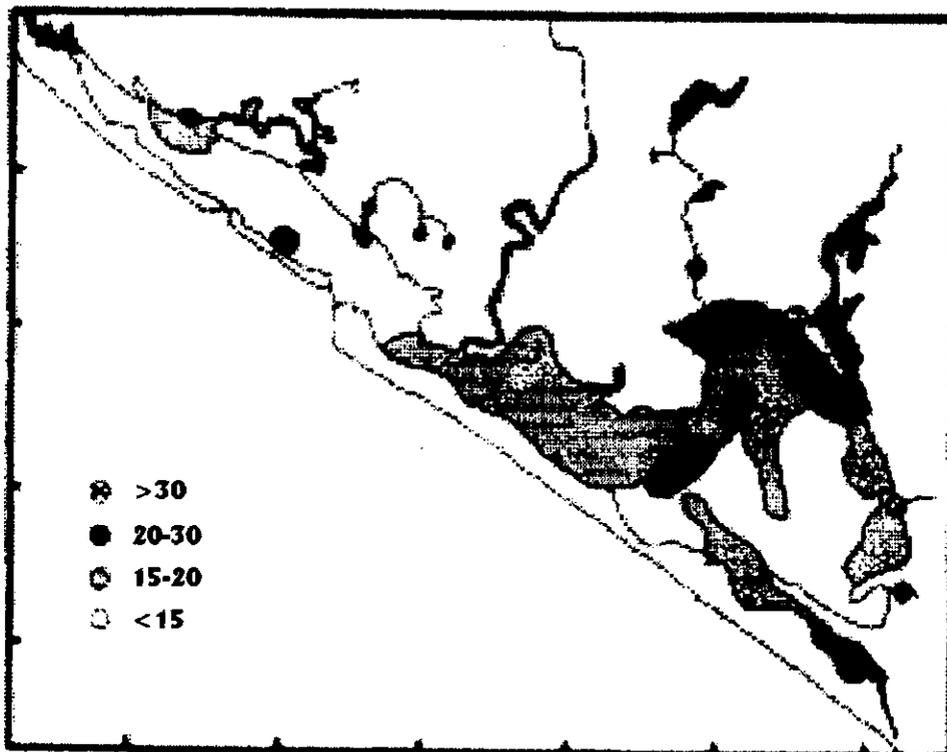


Figura 34. Distribución de la razón de carbohidratos a carbón orgánico (multiplicada por 100) en la capa superficial de sedimentos (tomada de Pérez-Osuna et al., 1998a).

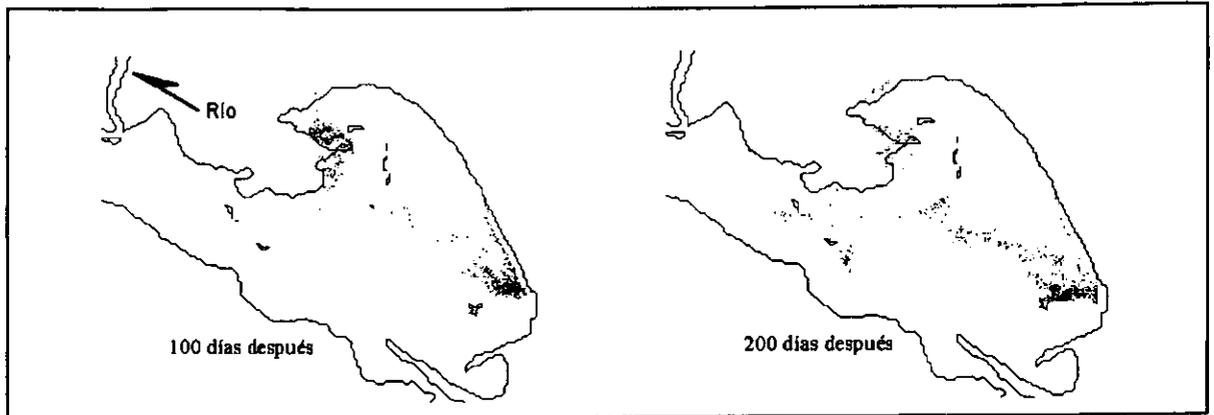


Figura 35. Difusión a partir de las zonas de escurrimiento agrícola, con M_2 y río con un flujo de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$

Experimentos con viento NO y SE de 5 m/s se muestran en la Figuras 36 y 37, respectivamente. Ahí se observa que, si bien las partículas de las zonas de escurrimientos al sur tienden a salir del sistema inmediatamente en ambos casos, las partículas de las zonas del norte se mantienen en regiones de alta concentración de carbono y carbohidratos, como se muestra en las Figuras 33 y 34.

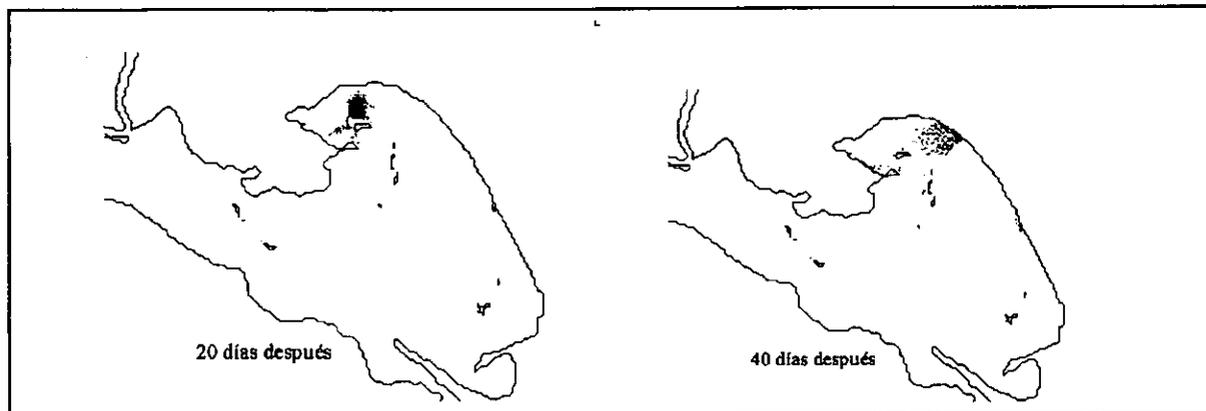


Figura 36. Difusión a partir de las zonas de escurrimiento agrícola. M_2 río con flujo de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y viento NO, 5 m/s

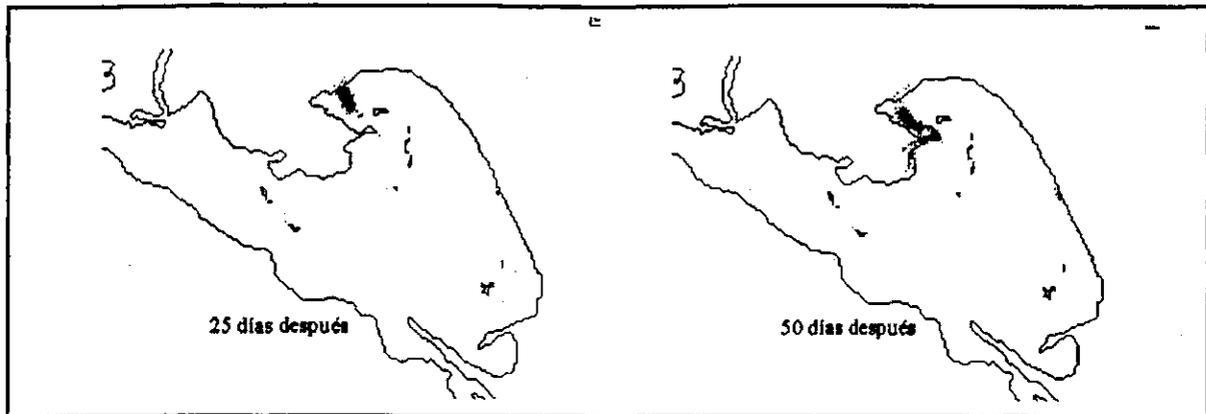
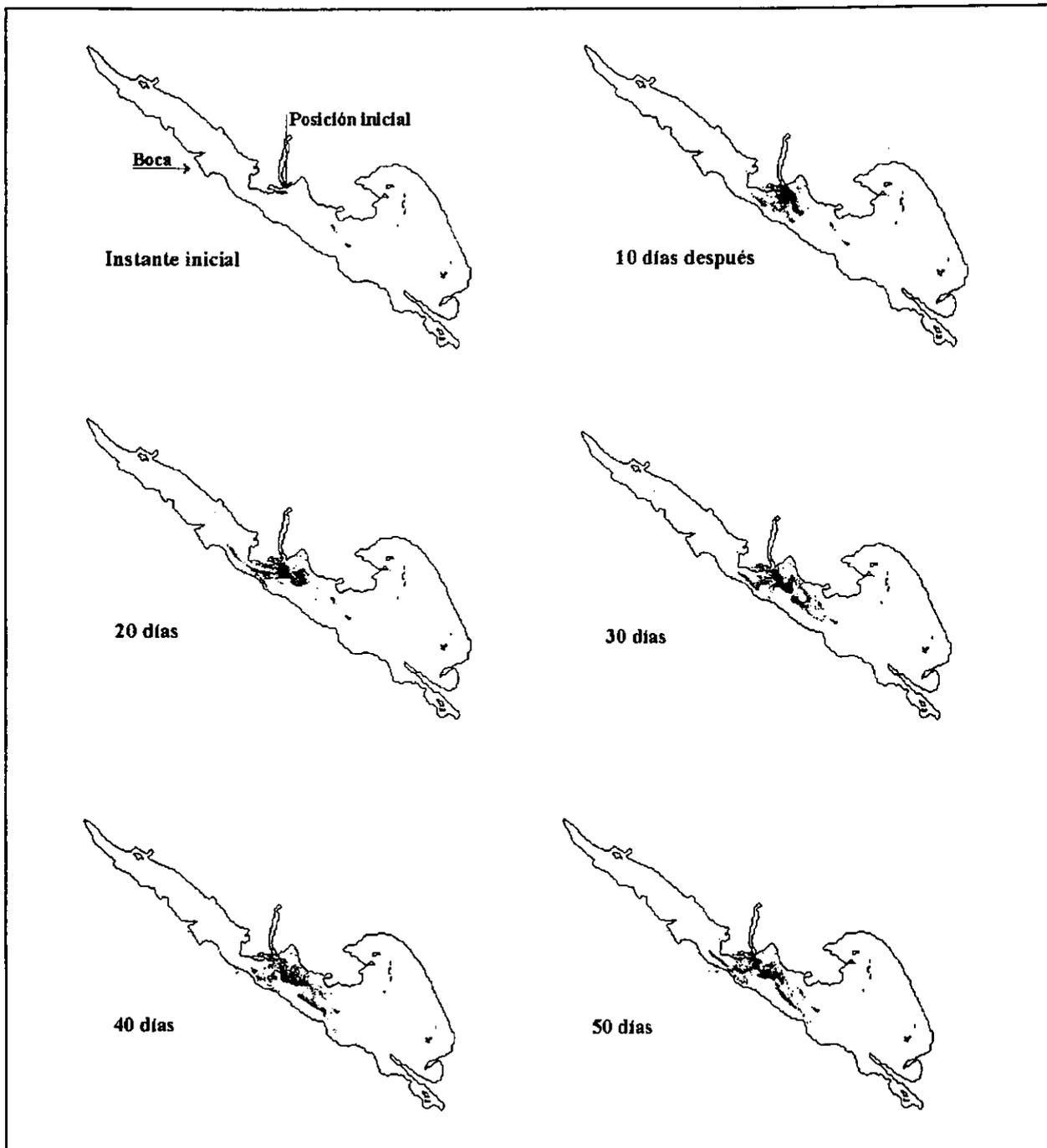


Figura 37. Difusión a partir de las zonas de escurrimiento agrícola. M_2 río con flujo de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y viento SE, 5 m/s

Difusión por todas las mareas desde el río Culiacán

Los experimentos más completos se muestran en las páginas siguientes: se trata de la difusión de 4000 partículas con un flujo en el río de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y los siete armónicos de marea. La Figura 38 (separada en dos páginas) muestra un experimento sin viento. El que en este experimento las partículas en un principio (antes de los 30 días) se concentran en la zona central del sistema, en frente a la desembocadura del río, está de acuerdo con que la marea M_2 es la más influyente en la zona (comparar con la Figura 24). Este es un experimento en el que algunas de las partículas alcanzan la boca del sistema (entre los 90 y los 100 días ocurre una fuga de partículas por la boca), sin embargo es claro que la gran mayoría de las partículas siguen permaneciendo en Ensenada del Pabellón; y en todo caso, en la realidad las partículas probablemente sedimentarían mucho antes de poder alcanzar la boca. A medida que avanza el experimento las partículas se concentran a lo largo del sistema, siguiendo la orientación de los canales centrales.



(Fragmento de la figura 38. Ver página siguiente)

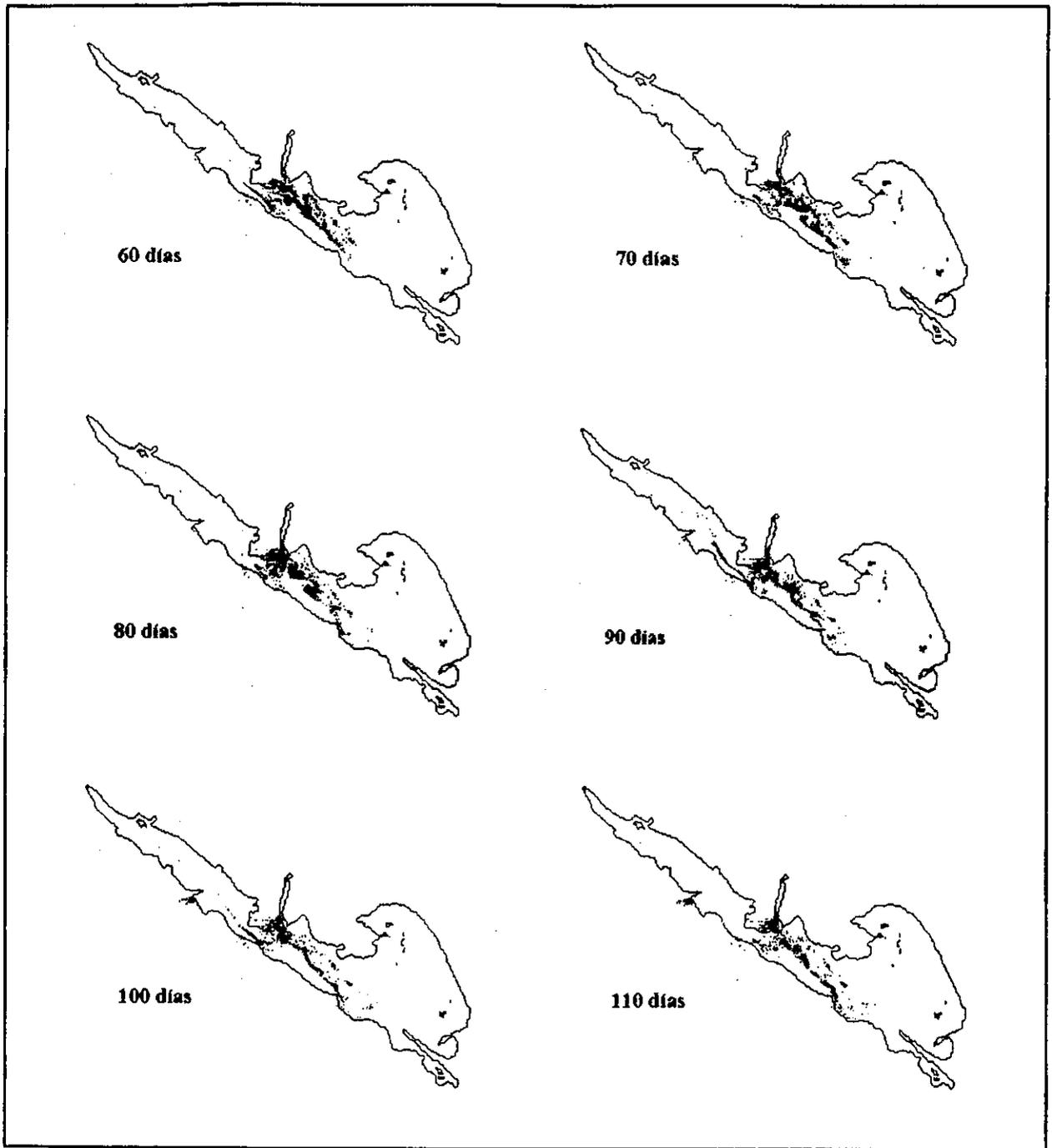
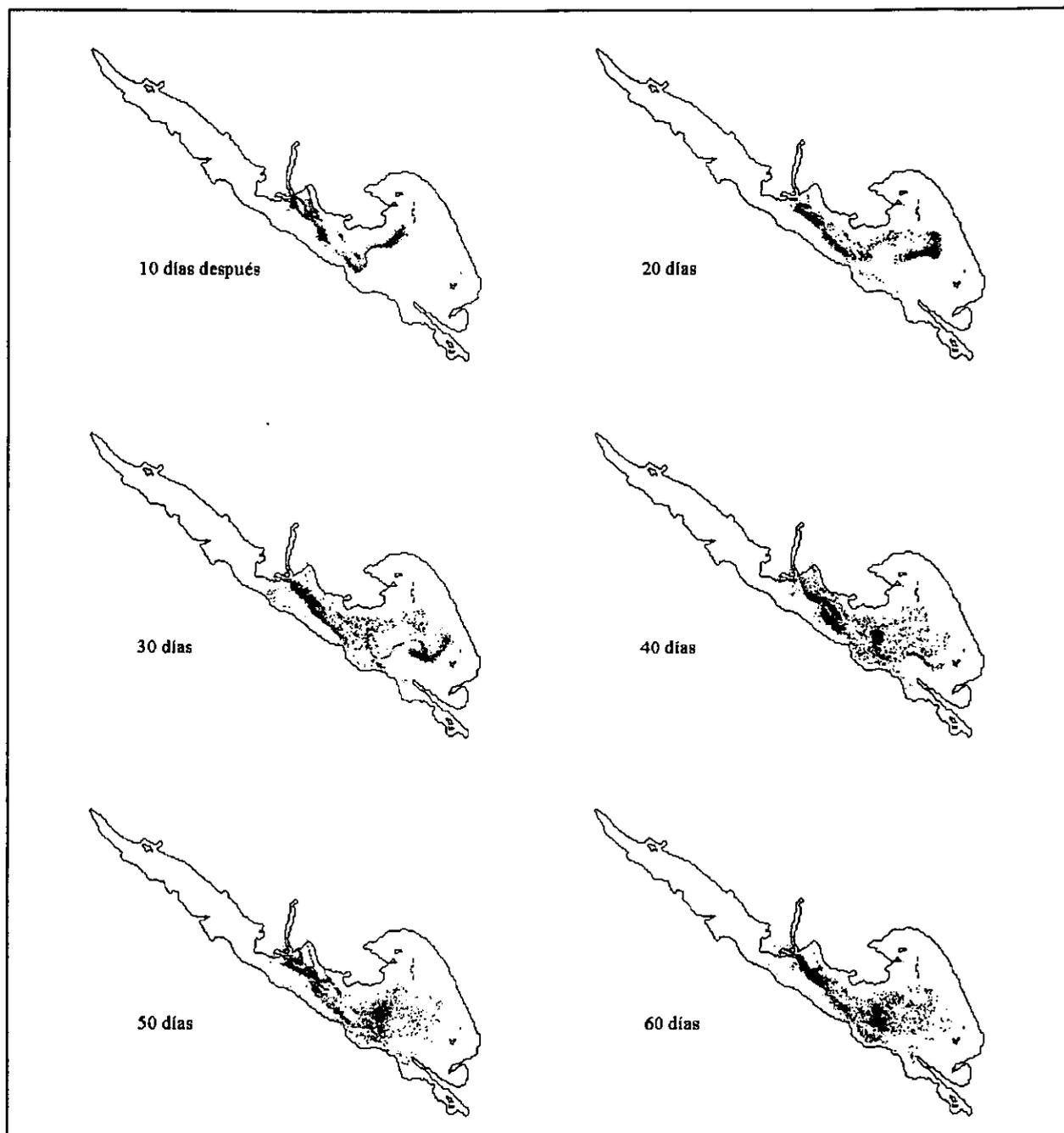


Figura 38. Difusión desde el río con flujo de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ producido por los siete armónicos de marea (sin viento).

La Figura 39 muestra un experimento como el de la 38, sólo que ahora hemos agregado el viento noroeste de 5 m/s que, como hemos dicho anteriormente, es el predominante en la zona. La posición inicial es la misma que en la Figura anterior. En este caso el viento obliga aún más a las partículas a permanecer en

Pabellón y no se observa la fuga de ningún grupo de ellas por la boca. Compárese con las Figuras 18 y 31.



(Fragmento de la Figura 39. Ver página siguiente)

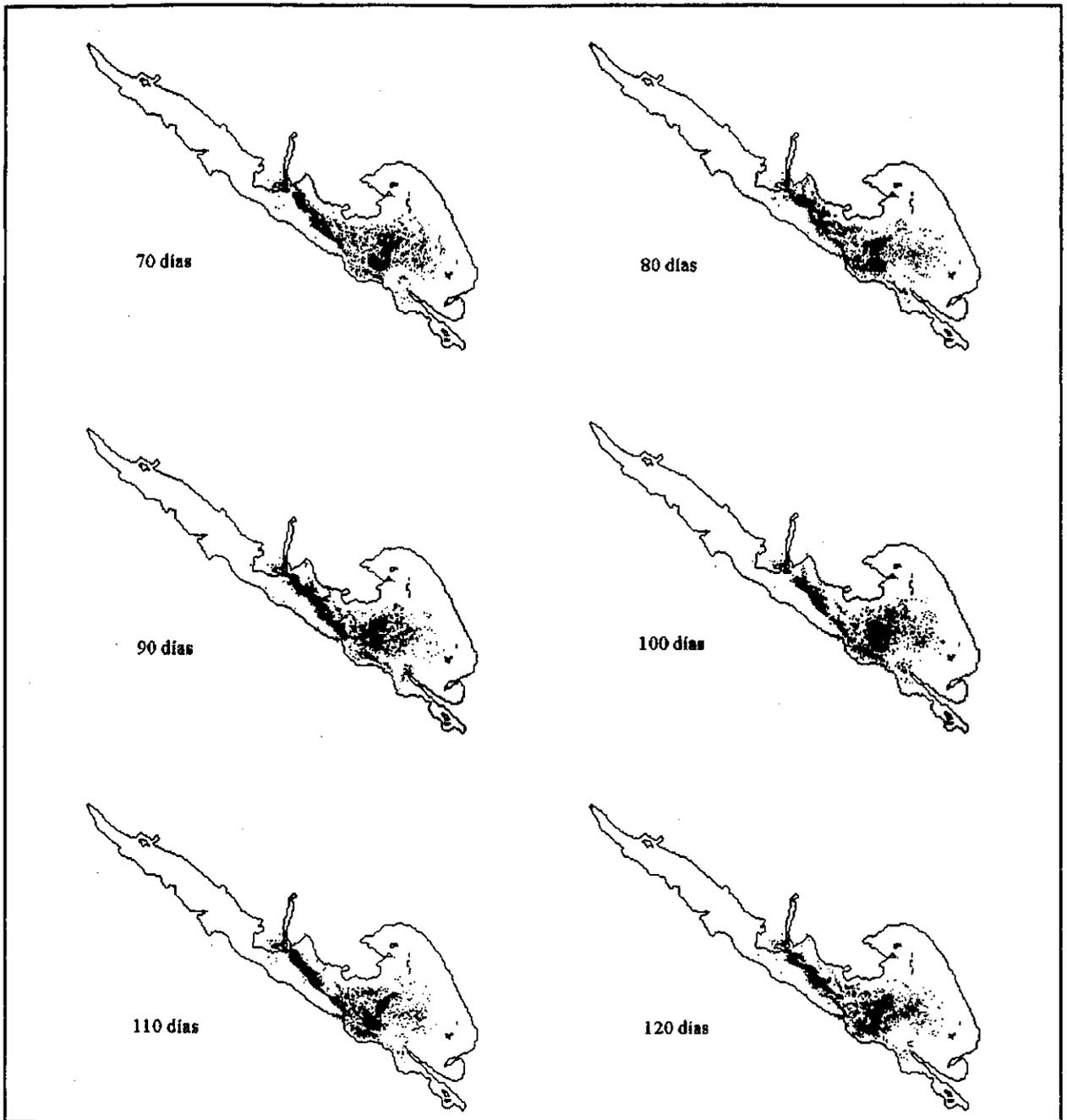
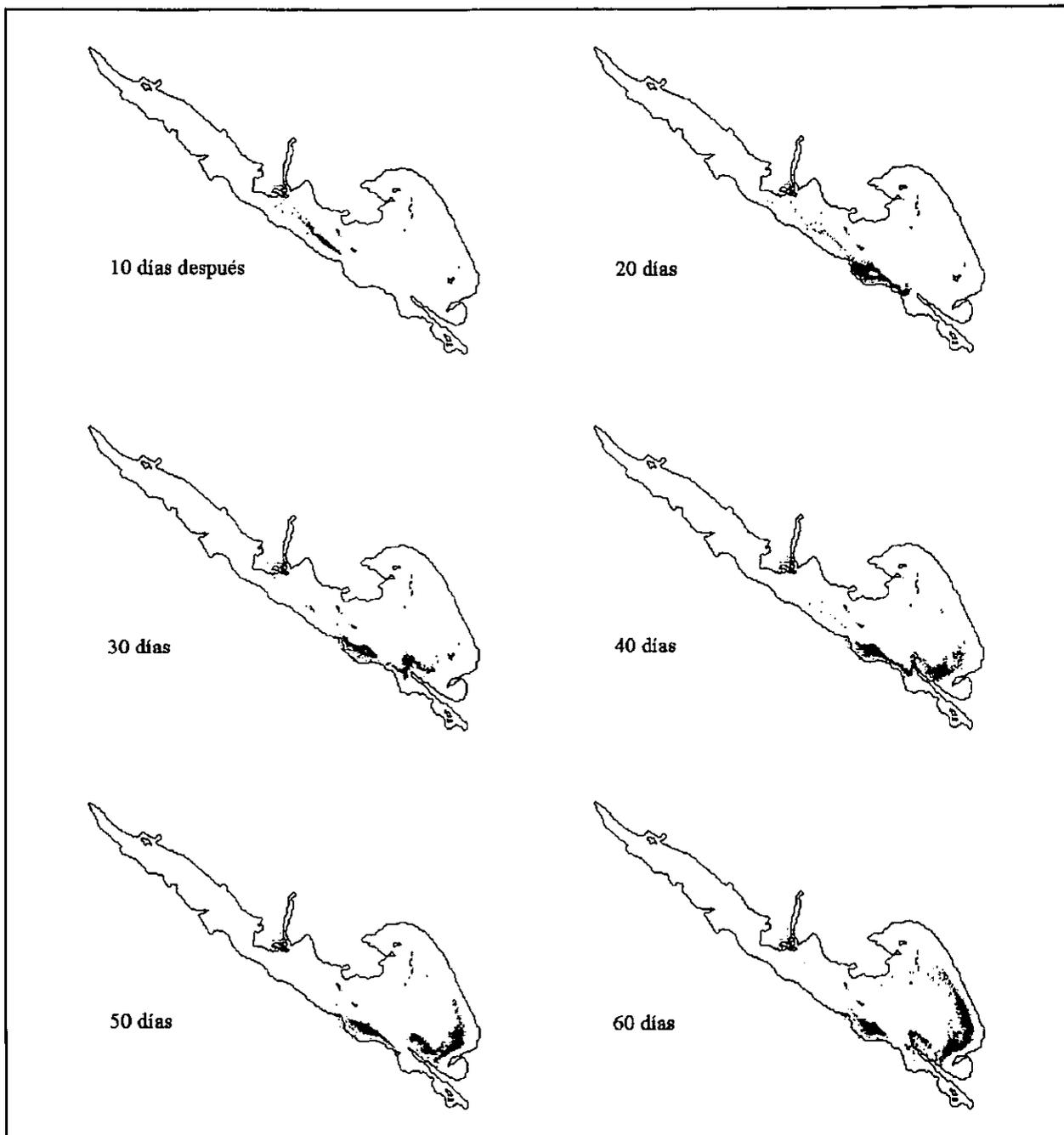


Figura 39. Difusión desde el río con flujo de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$, los siete armónicos de marea y viento del noroeste de 5 m/s

Por último, un experimento como los dos anteriores, pero con viento sureste, se muestra en la Figura 40. Como en otros experimentos realizados con este viento (ver Figura 28) las partículas permanecen en Pabellón, contrario a lo que podría pensarse por la dirección del viento, distribuyéndose siempre en forma cercana a la costa. Nuevamente, es interesante comparar con la Figura 19, donde se muestran las corrientes producidas únicamente por un viento de este tipo. Así,

este caso vuelve a corroborar que son las corrientes inducidas por el viento las más significativas dentro del sistema.



(Fragmento de la Figura 40 Ver página siguiente)

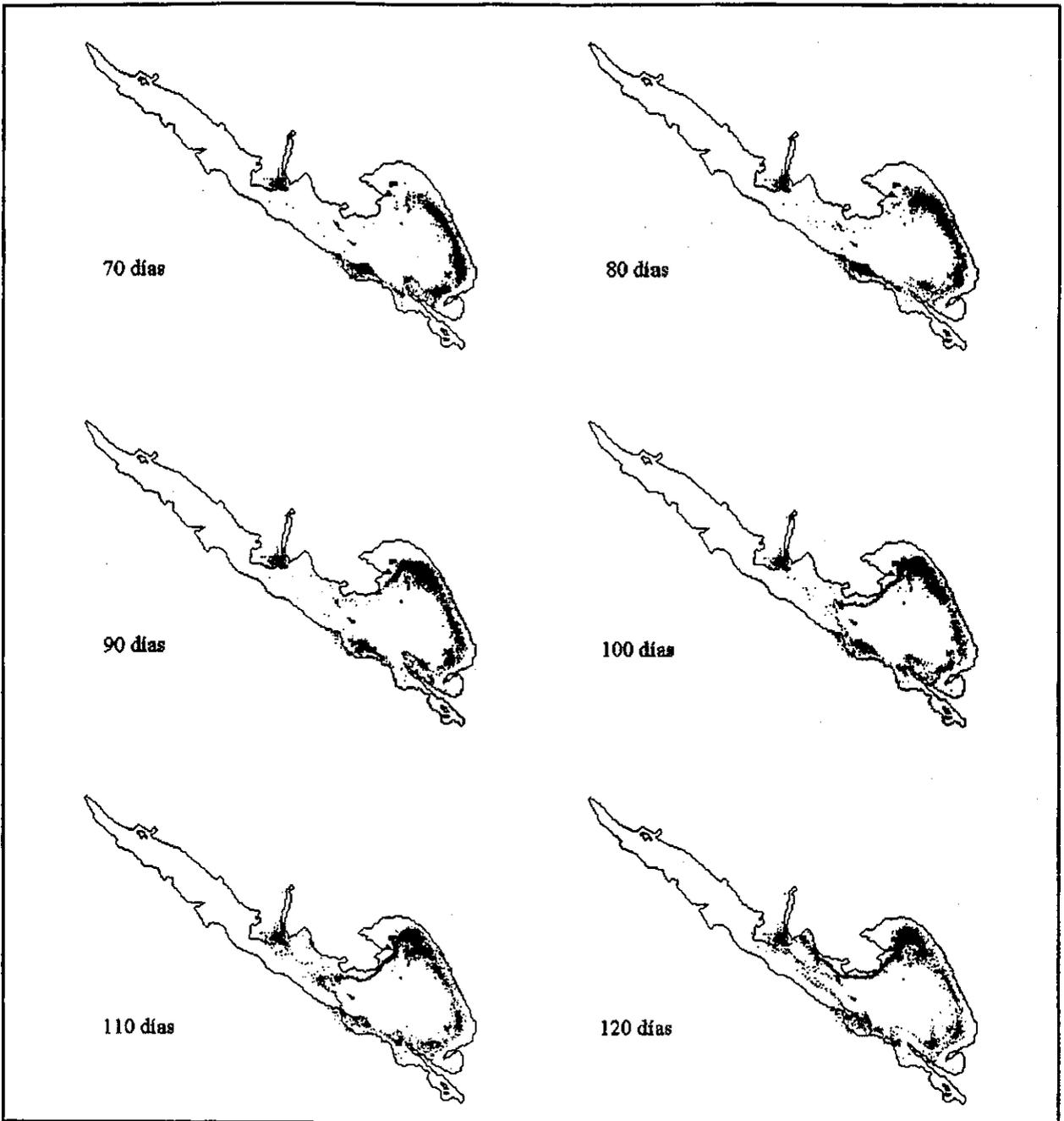


Figura 40. Difusión desde el río con flujo de 3.5 m³/s, los siete armónicos de marea y viento sureste de 5 m/s

Difusión por todas las mareas desde granjas camaronícolas

Como se había mencionado en la introducción de esta tesis, un problema cada vez mayor en cuanto a contaminación en el sistema lagunar se refiere proviene de las granjas camaronícolas. Una granja camaronícola, como su nombre lo indica, es una región aledaña a una laguna costera donde se cría o se "cultiva" camarón.

Esto se hace conservando larvas de camarón en tanques que permiten la entrada y salida del agua de la laguna. A dichas larvas se les proporcionan nutrientes (como fósforo y nitrógeno) que más tarde, en la época de la cosecha, serán arrojados con el agua de los tanques hacia la laguna.

La Figura 41 muestra un experimento en el que se han colocado mil partículas en cada uno de las cinco granjas camaronícolas señaladas con un asterisco y un número.²³ Se ha dejado que el sistema evolucione por más de dos meses, forzándolo con los siete armónicos de marea y el viento característico de la zona (noroeste de 5 m/s). Se observa que después de este tiempo, con la excepción de las granjas marcadas con 2 y 3, las partículas permanecen muy cerca de las posiciones originales. Efectivamente, después de 25 días muchas de las partículas de la granja número 2 han salido a la boca o se encuentran en medio de Altata. Por otro lado, en ese mismo tiempo, las partículas de la granja 3 siguen el trayecto común a las partículas que parten de la desembocadura del río bajo las mismas condiciones experimentales, es decir, se van hacia la parte noreste de Ensenada del Pabellón. Las otras granjas apenas dispersan las sustancias en zonas muy cercanas al punto inicial, con excepción quizá de la granja 4, en donde se observa un “deslizamiento” paralelo a la costa, hacia el sur de Ensenada del Pabellón.

²³ De hecho hay también una granja importante a orillas del río Culiacán, cerca del pueblo El Castillo, pero como ya hemos hecho varios experimentos de difusión desde la desembocadura del río no consideramos significativo incluir esta granja en este experimento.

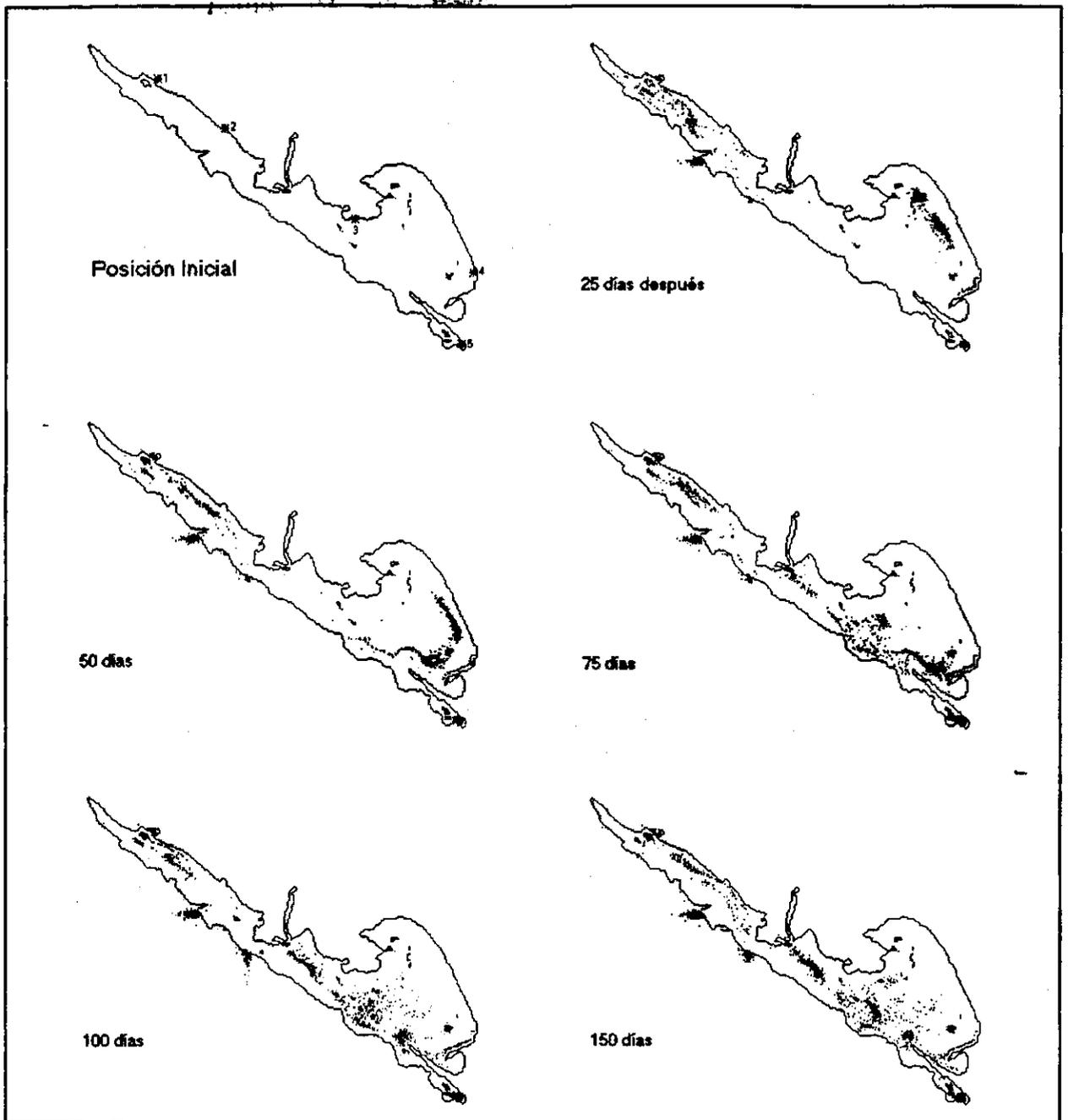


Figura 41. Experimento desde cinco granjas camaronícolas, con todas las mareas y viento del noroeste de 5 m/s

Correlación con la distribución de sedimentos y algunos metales pesados

En las siguientes Figuras se muestran mapas de concentración en los sedimentos de dos metales pesados con cierto comportamiento conservativo (cobre en la Figura 42 y níquel en la 43). Las gráficas han sido obtenidas a partir de los trabajos de Green-Ruiz (1996). Se puede observar que, grosso modo, estas gráficas están de acuerdo con todos los experimentos de difusión mostrados con anterioridad. No sólo a grandes rasgos (ya que en todas ellas se observa mayor concentración en la zona de Ensenada del Pabellón comparada con Altata), sino que también dentro de la sección de Ensenada del Pabellón (observar, por ejemplo, la zona somera del noreste). Recurriendo a esta fuente (Green-Ruiz, 1996) se puede ver que la distribución en los sedimentos de otros metales de este tipo también concuerdan con los experimentos numéricos realizados. Compárese con todas las Figuras correspondientes a los experimentos de difusión desde las zonas de escurrimientos agrícolas, así como con las Figuras 39 y 40, que muestran los experimentos más realistas relacionados con la difusión desde el río.

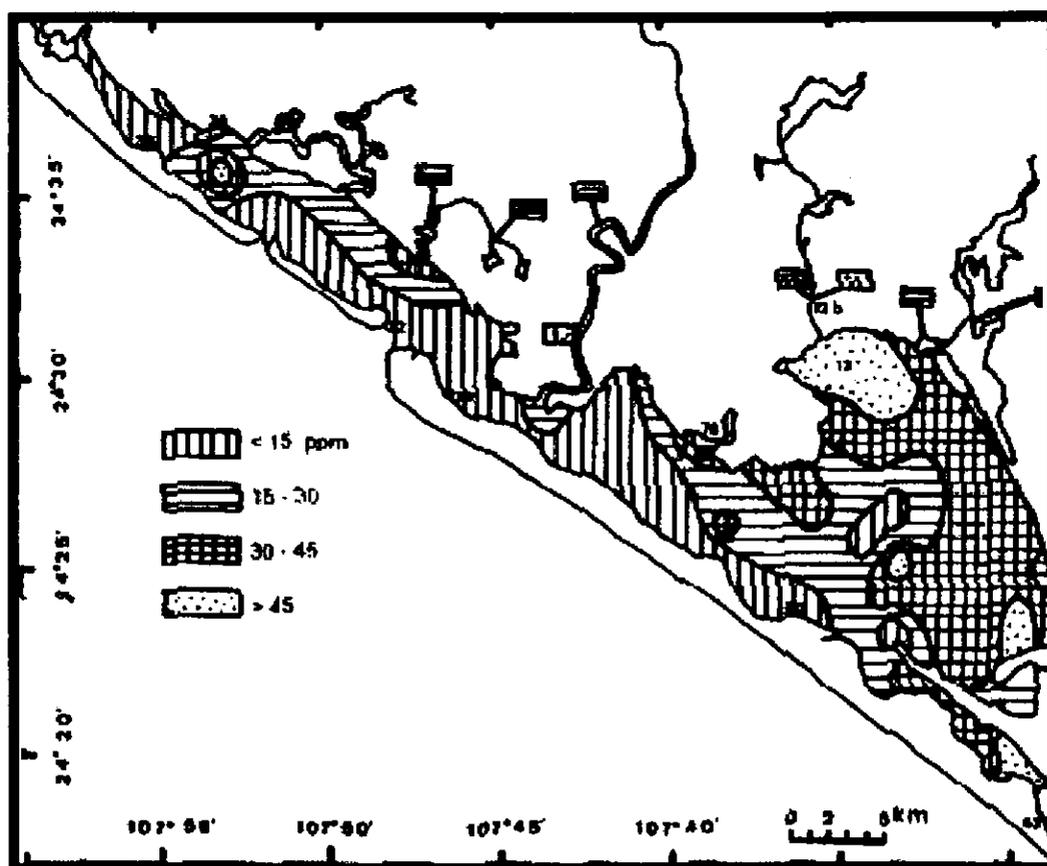


Figura 42. Distribución total de cobre en sedimentos (tomado de Green-Ruiz, 1996)

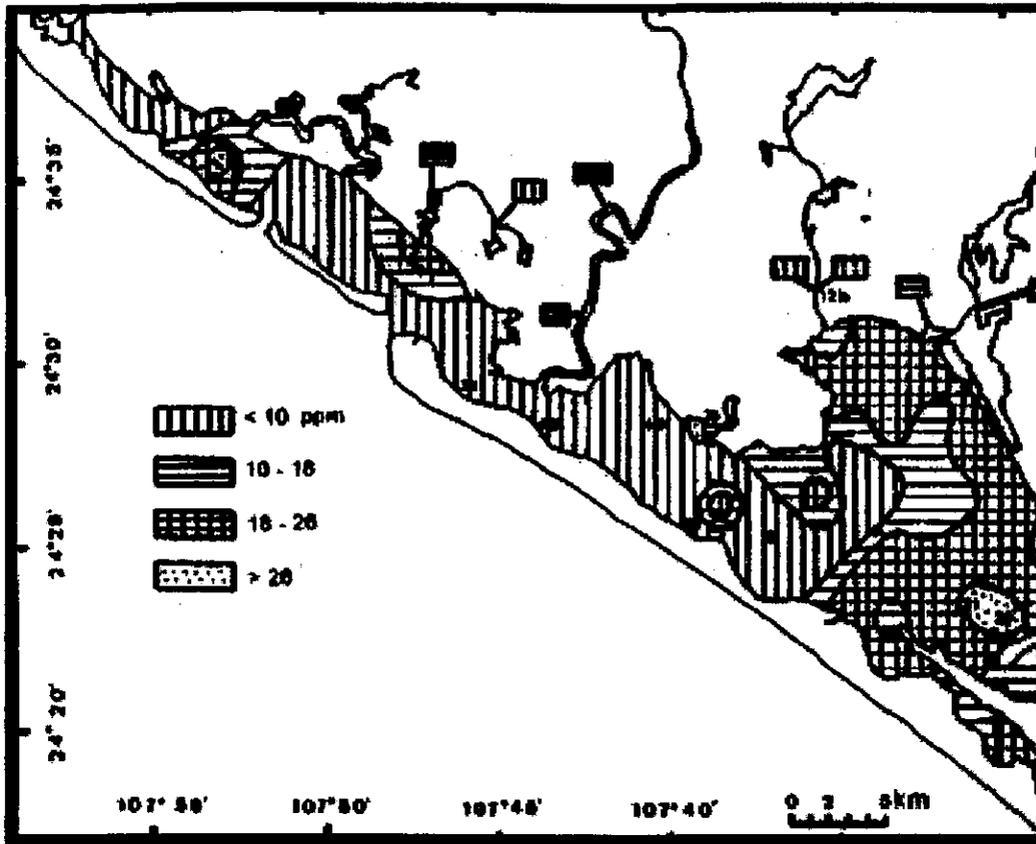


Figura 43. Distribución total de níquel en sedimentos (tomado de Green-Ruiz, 1996).

Finalmente, la Figura 44 muestra la distribución de los sedimentos en el complejo lagunar en función de su tamaño (Green-Ruiz, 1996), distribución de la que ya se ha hablado en algunas partes de este trabajo. A grandes rasgos se observan ambientes de origen marino en Altata y terrestre en Pabellón, pero también se ve que las zonas de material más fino están estrechamente relacionadas con las de alta concentración de carbonatos totales y de metales pesados, así como con las zonas de acumulación de partículas según los experimentos numéricos.

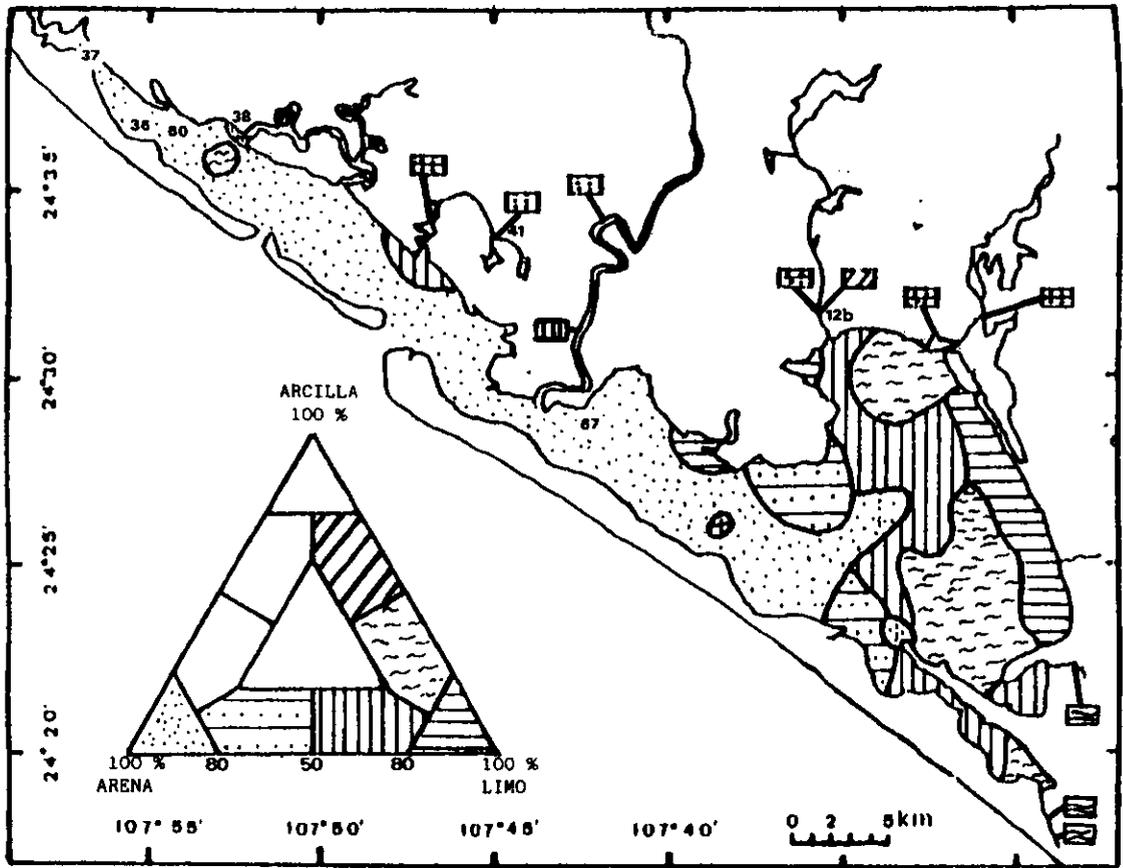


Figura 44. Distribución del tamaño medio de los sedimentos del sistema lagunar (tomado de Green-Ruiz, 1996)

Capítulo 4. Conclusiones

Circulación

1) Se adaptó un modelo hidrodinámico numérico de circulación bidimensional, similar a HAMSOM, para simular la dinámica del complejo lagunar Bahía de Altata / Ensenada del Pabellón.

2) Se simularon las mareas, la circulación inducida por el viento y el flujo del río Culiacán.

3) Los experimentos demostraron que la circulación del sistema está determinada fundamentalmente por el viento y por el armónico de marea M_2 . La altura del mar producida por la marea es tal que el sistema oscila teniendo dos regiones bien definidas: las formadas por cada una de las secciones principales de la laguna (Altata y Ensenada del Pabellón). Así, Altata que está altamente influenciada por la marea debido a la boca de la Tonina oscila con el máximo de amplitud mareal, mientras que Ensenada del Pabellón siempre permanece más calma. El canal que las une es el nodo de oscilación y presenta corrientes muy grandes. La señal de marea tiene un atraso de casi 3 horas, entre la boca y la cabeza del estuario (El Castillo), lo cual se puede explicar a partir de la morfología de la cuenca y por fricción con el fondo.

4) Esta dinámica está de acuerdo con la distribución de los sedimentos en el sistema lagunar, ya que los sedimentos de gran más grueso (origen marino) se encuentra en Altata y los de grano más fino (origen terrestre) en Ensenada del Pabellón. Así mismo, la dinámica concuerda con la distribución y magnitud de las corrientes observadas por Peraza-Vizcarra (1973).

Difusión

1) Se diseñó y adaptó un modelo bidimensional que sigue el método de Monte Carlo para simular la advección y difusión de sustancias pasivas en el sistema lagunar.

2) Se realizaron experimentos con dinámicas producidas por mareas y viento, y con descargas de ríos reales e hipotéticas, colocando partículas desde la desembocadura del río Culiacán, en las zonas de escurrimientos agrícolas y en las de granjas camaronícolas.

3) La difusión de partículas pasivas dentro del sistema está regida por cuatro factores:

- a) La corriente de marea. Los siete armónicos de marea juntos sí contribuyen a una mayor difusión (comparados con únicamente M_2), pero no a limpiar el sistema.
- b) El flujo del río (en el caso de las partículas que se difunden desde la desembocadura). Cuanto más intenso éste contribuye a limpiar al sistema. Un flujo como el que había hasta hace algunos años de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ (SEMARNAP-CNA, 1996), o inferior (como el actual), es insuficiente

para hacer esto. Se ha demostrado que un flujo intenso de $140 \text{ m}^3/\text{s}$ alcanza para llevar a las sustancias hasta la boca, pero podría bastar con un flujo inferior (pero, por supuesto, mayor que 80).

- c) La intensidad y la dirección del viento. Viento NO (el que prevalece a lo largo del año) contribuye al acarreo de partículas hacia Ensenada del Pabellón, acumulando a las partículas en giros. El viento SE, contrariamente a lo que podría suponerse, no contribuye tampoco a limpiar al sistema, sino que lleva a las partículas hacia la línea de costa de Ensenada del Pabellón.
- d) La "difusividad" de la sustancia, la cual está relacionada con los parámetros V y σ de la gaussiana. Cuanto mayor sea la difusividad aumenta la capacidad de la sustancia de escapar de los giros producidos por marea y viento y así, eventualmente, ser llevada hasta la boca.

4) Los experimentos realizados demuestran que el sistema podría tener poca capacidad de auto-reciclamiento. La gran mayoría de las partículas son incapaces de alcanzar la boca del sistema. Esto, nuevamente y como se explicó líneas arriba, está de acuerdo con la distribución de los sedimentos en el sistema lagunar, así como con la batimetría (Ensenada del Pabellón es somera por asolvamiento de partículas terrígenas). Asimismo, los experimentos están de acuerdo con concentraciones en los sedimentos de ciertas sustancias como carbono orgánico y algunos metales pesados.

5) Teniendo en cuenta que el flujo actual del río de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ proviene de los desechos industriales y aguas negras de la ciudad de Culiacán, la incapacidad de renovación del sistema es un asunto que podría resultar grave a futuro si se piensa en los planes de incrementar tanto la agricultura como las granjas camaronícolas.

Perspectivas

A este trabajo se le puede dar continuidad de la siguiente forma:

- 1) Aplicar un modelo tridimensional para calcular la circulación del sistema. Si bien, según nuestras mediciones de salinidad, ambas secciones del sistema lagunar presentan principalmente un ambiente marino hoy día, podría ser importante bajo ciertas condiciones la baroclinicidad.
- 2) Aplicar un modelo de transporte tridimensional, acoplado con el sistema de circulación tridimensional
- 3) Aplicar un modelo de transporte que considere depositación de las partículas y/o partículas no pasivas.
- 4) Refinar la batimetría considerando el retraso en la señal de marea.
- 5) Hacer experimentos con datos de viento más reales, y no con promedios.
- 6) Mejorar el modelo de transporte con algún criterio físico que relacione los parámetros de la gaussiana con coeficientes de difusión turbulenta.

Recomendaciones

Algunas medidas que se pueden tomar y que podrían contribuir a mejorar el flujo de las sustancias que entran a la boca desde el río:

- 1) Aumentar el flujo del río minimizando el desvío de agua para riego, abriendo las puertas de las represas, etc.
- 2) Dragar el canal que une a las dos lagunas.
- 3) Dar tratamiento a las aguas de desperdicio de las granjas, industrias y desechos domésticos.

Bibliografía

Arakawa, A. y V. R. Lamb, 1977: Computational design of the basic dynamic processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, 17, 173–263.

Ayala Castanares, A; Gutierrez Estrada, M; Galaviz Solis, A; Malpica Cruz, VM. 1994. Marine geology of the Altata-Pabellones lagoonal system, Sinaloa, Mexico *An. Inst. Cienc. Mar Limnol. Univ. Nac. Auton. Mex.*, vol. 21, no. 1-2, pp. 129-147.

Backhaus, J.O., 1983: A semi-implicit scheme for the shallow water equations for applications to shelf sea modelling. *Continental Shelf research*, 2, 243–254

Backhaus J. O., 1985: A three-dimensional model for the simulation of the shelf sea dynamics. *Deutsche hydrographische Zeitschrift*, 38, 165-254.

Bobba, A. G. Singh, V. P. Bengtsson, L. 1996. A Microcomputer Model of Contaminant Transport in an Aquatic System. *Environmental Monitoring and Assessment* 42 (3):265-283, September 1996. Kluwer Academic Publishers.

Buffoni, G., Cappelletti, A. Cupini, E. 1996. Advection-diffusion processes and residence times in semi-enclosed basins. *Int. J. Numerical Meth. Fluids* 22: 1207-1229.

Buffoni, G. Grifa, A. Zambianchi, E. 1999. Modelling of dispersion processes in a tide-forced flow. *Hydrobiologia* 393: 19–24,

Camacho-Ibar, V.F. and Macevoy, J. 1996. Total PCBs in Liverpool Bay Sediments. *Marine Environmental Research*. Vol. 41. No. 3. Pp 241-263.

Carbajal N., 1993: Modeling of the circulation in the Gulf of California. PhD. Thesis, Institute of Oceanography, University of Hamburg.

Carbajal N., A. Souza, R. Durazo, 1997: A numerical study of the ex-ROFI of the Colorado River. *Journal of Marine Systems* 12, 17-33.

Carvalho, Fowler, Gonzalez-Farias, Mee., 1996: Agrochemical residues in the Altata-Ensenada del Pabellón coastal lagoon (Sinaloa, México): a need for integrated coastal zone management. *International Journal of Environmental Health Research*. 6. 209-220

CICESE. Página de predicción de mareas. <http://oceanografia.cicese.mx/predmar/>

Crean P. B., T. S. Murty and J. A. Stronach, 1988: Mathematical modelling of tides and estuarine circulation, Lectures Notes on Coastal and Estuarine Studies, Springer Verlag, Vol. 30.

Crank. 1979. The Mathematics of Diffusion. Oxford Science Publications. Second Edition.

Clark, R. B. 1989. Marine Pollution. Oxford University Press. Second edition.

De La Lanza Espino, G; Verdugo, FF. 1998. Nutrient fluxes in sediment (NH sub(4) super(+)) and PO sub(4) super(-3)) in N.W. coastal lagoon Mexico associated with an agroindustrial basin. Water, Air, & Soil Pollution [Water, Air, Soil Pollut.], vol. 107, no. 1-4, pp. 105-120, Oct 1998.

Dietrich et al, 1975: Allgemeine Meereskunde, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.

Dressler R., 1981: Investigación sobre mareas y efectos del viento en la Laguna de Términos (México) mediante un modelo hidrodinámico-numérico. CICESE, informe técnico OC-82;01.

Förstner U, and Wittmann G. T. W. 1979. Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer-Verlag.

Gomez Aguirre, S; Gomez Noguera, SE. 1995. Observations on the winter plankton of Ensenada del Pabellon, Sinaloa, Mexico (January and March 1992). Revista de investigacion cientifica de la Universidad Autonoma de Baja California Sur. Serie ciencias del mar. La Paz [Rev. Invest. Cient. Univ. Auton. Baja Calif. Sur (Ser. Cienc. Mar)], vol. 6, no. 1-2, pp. 47-52.

Gomez Noguera, SE; Hendrickx, ME. 1997. Distribution and abundance of meiofauna in a subtropical coastal lagoon in the south-eastern Gulf of California, Mexico. Marine Pollution Bulletin, vol. 34, no. 7, pp. 582-587, Jul 1997.

Gomez-Noguera, SE, 1998. Systematics and Some Data on the Ecology of the Harpacticoid Fauna (Copepoda, Harpacticoida) from a Subtropical Coastal Lagoon in the South-eastern Gulf of California. Dissertation Abstracts International Part B: Science and Engineering, Nov 1998, vol. 59, no. 5, p. 2067

Gonzalez-Farias, Carvalho, Fowler, Mee, 1997: A tropical coastal lagoon affected by agricultural activities. The importance of radiolabelled pesticide studies. Environmental Behaviour of Crop Protection Chemicals. International Atomic Energy Agency. Vienna, 1997.

Green-Ruiz C. R., 1996: Geoquímica de los sedimentos de la laguna costera subtropical Altata-Ensenada del pabellón, Sinaloa México. Tesis de Maestría,

Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado del Colegio de Ciencias y Humanidades, UNAM.

Guerrero Galván S., 1997: Estudio biogeoquímico de los procesos de mezclado estuarino en una laguna costera subtropical de México. Tesis de Doctorado, Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado del Colegio de Ciencias y Humanidades, UNAM.

Hamburg, 1967. Deutsches Hydrographisches Institut. Nr. 2276. Tafeln der Astronomischen Argumente V_0+v und der Korrekturen v,j .

Handbook of Chemistry and Physics. 1947. 30th edition. Chemical Rubber Publishing Co.

Huang, Daji. 1995. Modelling Studies of Barotropic and Baroclinic Dynamics in the Bohai Sea. Beriche aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung

Izaguirre-Fierro, G., Páez-Osuna, F., Osuna-López, J.I., 1992. Heavy metals in fishes from Cualacan valley, Sinaloa, Mexico. Ciencias Marinas 18, 143-151.

King. C. A. M. 1975. Introduction to Marine Geology and Geomorphology. Edward Arnold (Publishers). First Edition in the USA.

Kundu, P. K. 1990. Fluid Mechanics. Academic Press. United Kingdom Edition.

Latorre, R; López-Barneo, J; Bezanilla, F; Lliás, R. 1996. Biofísica y Fisiología Celular. Universidad de Sevilla.

Lankford R. A., 1977: Coastal lagoons of Mexico. Their origin and classification. En Wiley M, (Editor) estuarine Processes. Academic Press, 11 pp., 183-215.

LeBlond PH and Mysak, LA. 1978. Waves in the Ocean. Elsevier Oceanography Series. First Edition

Montaño Ley, Y; Paez Osuna, F. 1994. Sediment transport in the Altata-Ensenada del Pabellon Lagoon System, Sinaloa, Mexico. Geofisica internacional. Mexico City, vol. 33, no. 2, pp. 271-281.

Neumann and Pierson. 1966. Principles of Physical Oceanography. Prentice Hall.

Osuna Lopez, JI; Frias Espericueta, MG; Zazueta Padilla, HM; Lopez Lopez, G. 1999. Heavy metals in the drowned oyster, *Crassostrea corteziensis*, from lagoon system Ensenada del Pabellon, Sinaloa, Mexico. Oceanides, vol. 14, no. 2, pp. 113-119.

Paez Osuna, F; Bojorquez Leyva, H; Izaguirre Fierro, G; Osuna, Lopez, JI; Gonzalez Farias, F. 1992. Carbon and phosphorus in sediments of a lagoon system associated to an agricultural drainage basin. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnologia*, Universidad Nacional Autonoma de Mexico. Mexico City vol. 19, no. 1, pp. 1-11.

Record 11 of 16

Paez-Osuna, F; Osuna-Lopez, JI; Izaguirre-Fierro, G; Zazueta-Padilla, HM. 1993. Heavy metals in oysters from a subtropical coastal lagoon associated with an agricultural drainage basin. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 50, no. 5, pp. 696-702.

Paez-Osuna, F; Osuna-Lopez, JI; Izaguirre-Fierro, G; Zazueta-Padilla, HM. 1993. Heavy metals in clams from a subtropical coastal lagoon associated with an agricultural drainage basin. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 50, no. 6, pp. 915-921.

Paez-Osuna, F; Osuna-Lopez, JI; Izaguirre-Fierro, G; Zazueta-Padilla, HM. 1994. Trace metals in mussels from the Ensenada del Pabellon Lagoon, México. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 28, no. 2, pp. 124-126.

Páez-Osuna, F; Bojórquez-Leyva, H; Green-Ruiz, C. 1998. Total carbohydrates : organic carbon in lagoon sediments as an indicator of organic effluents from agriculture and sugar-cane industry. *Environmental Pollution* 102, 321-326.

Páez-Osuna, F; Guerrero-Galván, SR; and Ruiz-Fernandez. AC. 1998. The environmental Impact of Shrimp Aquaculture and the Coastal Pollution in México. *Marine Pollution Bulletin*. Vol 36, No1, pp 65-75.

Páez-Osuna, Guerrero-Galván, Ruiz-Fernández, 1999 Discharge of Nutrients from Shrimp Farming to Coastal Waters of the Gulf of California. *Marine Pollution Bulletin*, Vol 38, No 7. pp 585-592.

Peraza-Vizacarra R., 1973: características hidrográficas y distribución de los sedimentos en el sistema estuarino Bahía de Altata-Ensenada del Pabellón Sinaloa. Tesis de oceanología, Escuela de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.

Pérez Bernal L.H. 1999. Concentración, distribución y fraccionamiento geoquímico del fósforo en los sedimentos de dos lagunas costeras del Noroeste de México. Tesis de maestría, Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado, Colegio de Ciencias y Humanidades, UNAM, 145 p. Rendón Villalobos, J. Rodolfo et al. 1999. Aplicación de un modelo hidrodinámico en una zona costera. *Ciencias Marinas*. Vol. 25, Número 3, pp. 293-323

Pohlmann T., 1985: Simulation von Bewegungsvorgänge im Südchinesischen Meer. Diplomarbeit im Fach Ozeanographie an der Universität Hamburg.

Pugh, D.T. 1987. Tides, Surges and Mean Sea-Level. A handbook for engineers and scientists. John Wiley and sons. First Edition.

Readman, JW; Kwong, LLiong Wee; Mee, LD; Bartocci, J; Nilve, G; Rodriguez-Solano, JA; Gonzalez-Farias, F. 1992. Persistent organophosphorus pesticides in tropical marine environments. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 24, no. 8, pp. 398-402,

Rendón Villalobos, J. Rodolfo et. al. 1999. Aplicación de un modelo hidrodinámico en una zona costera. *Ciencias Marinas*. Vol. 25, Número 3, pp. 293-323

Sanay-González R., 1997; Simulación de la circulación en el sistema lagunar Chacahua-Pastoría, Oax. Tesis de Maestría, Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado del Colegio de Ciencias y Humanidades, UNAM

Smith S.V., S. Ibarra-Obando, P.R. Boudreau and V. F. Camacho-Ibar, 1997: Land Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ). Comparison of carbon, nitrogen and phosphorus fluxes in mexican lagoons. *LOICZ Reports & Studies No. 10*.

SEMARNAP, CNA. Diciembre de 1996. Estudio de Clasificación del Río Culiacán en el Estado de Sinaloa, Informe Final.

UNAM. 1994. Tablas de Predicción de Mareas. Instituto de Geofísica.

Whitten and Brooks. 1972. A dictionary of Geology. Penguin Books. First Edition.