

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA



***Análisis de procesos físico-biológicos acoplados
en la Bahía de San Quintín, B.C., México.***

T E S I S

***QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS
P R E S E N T A***

Sergio Bernardo Jiménez Hernández

Ensenada, Baja California, México, junio de 2005.

Análisis de procesos físico-biológicos acoplados en la Bahía de San Quintín, B.C., México.

Resumen

Se presenta un análisis de los procesos físico-biológicos acoplados en la Bahía de San Quintín (BSQ), B.C bajo un marco de modelación numérica usando un modelo de transporte que acopla la hidrodinámica con la estructura trófica primaria característica de BSQ. Particularmente se estudia la variabilidad de la Productividad Primaria (PP) en la BSQ y se analiza el control que ejercen sobre ésta distintos esquemas de forzamiento hidrodinámico y parametrización biológica. El modelo biológico considerado es la dinámica de Fitoplancton, Zooplancton y Nutrientes (FZN) en términos de biomasa, expresada en su peso equivalente de nitrógeno, asociada y parametrizada al nivel trófico primario característico de la columna de agua de BSQ. La dinámica de FZN se reproduce a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas que se solucionan numéricamente en tiempo y espacio. La parametrización de la estructura biológica se hace a través de las constantes de: asimilación de nutrientes, mortalidades de fitoplancton y zooplancton, razón de ingestión -tasa de pastoreo-, razón de saturación de ingestión tipo Ivlev, asimilación media de nutrientes, coeficientes de atenuación de luz y por la fracción no asimilada de fitoplancton. La hidrodinámica se reproduce con base en las ecuaciones de conservación de momentum para aguas someras para el caso baro trópico, bidimensional y no-divergente. El modelo hidrodinámico se soluciona por diferencias finitas sobre una malla homogénea $\Delta x = \Delta y = 250$ m y un Δt máximo de 17 segundos. Los procesos físicos considerados son: marea, viento y el efecto de fricción con el fondo. Los modelos desarrollados son inicializados y calibrados con observaciones de nivel del mar y corrientes. El acoplamiento de los modelos -hidrodinámicos y de la dinámica de FZN- se hace en el marco de una ecuación de transporte para elementos no-conservativos. Se analizan distintos escenarios de acoplamiento físico-biológico considerando que el Δt_H hidrodinámico es menor que el Δt_B biológico. Particularmente, se exploran escenarios de acoplamiento en función de forzamientos hidrodinámicos de periodos cortos (<15 días) y la respuesta de la dinámica de FZN en cortos y largos periodos (>15 días), definiendo los campos residuales para ambos componentes. Los resultados indican que la hidrodinámica controla un 30% aproximadamente de PP en la BSQ y, que es la advección la principal característica hidrodinámica que contribuye a este porcentaje. Se puede ya clasificar a la BSQ en términos de su PP. Se logran identificar zonas alternativas para la ubicación de nuevos campos ostrícolas en función de la PP y disponibilidad de alimento para el ostión. Los rasgos hidrodinámicos de la BSQ permiten clasificarla en 5 regiones en términos de Tiempos de Residencia (TR). Se encuentra que los TR en BSQ están asociados a factores como lo son: formación de celdas de circulación, contracorrientes, canales, entre otros. Para una condición crítica, en la región superior que conecta los dos brazos de la bahía, el tiempo de residencia estimado fue de 21 días. Las simulaciones indican también que la conexión de la bahía al océano modula el intercambio de nutrientes entre éstos y que la bahía esta importando nutrientes del océano para abatir el déficit que se da en ella. Los escenarios de acoplamiento explorados muestran que Bahía San Quintín, tiene productividad nula, contrario a lo que se reporta en estudios de campo. Esto indica, que la dinámica de FZN debe estar soportada por otros procesos que no considera el modelo acoplado como puede ser la interacción agua-sedimento. Los eventos de surgencias generan pulsos de nutrientes que tienen una marcada influencia sobre la PP de Bahía Falsa y nula en BSS, formando regiones de alta concentración de nutrientes: margen sur de la boca de BSQ y parte alta de BF. Sin embargo, los resultados obtenidos por la modelación hidrodinámica muestra que son las corrientes residuales de marea, el principal esquema de bombeo de nutrientes del océano hacia la bahía. La regionalización de TR para BSQ puede ser un camino para acotar procesos biológicos (PP) y llegar a una estimación más real de la capacidad de carga del sistema.

ABSTRACT

The variability of the primary productivity in a coastal lagoon of San Quintín Bay, BC, México, was analyzed in terms of physical and biological processes. A nonlinear, bi-dimensional model was used to coupled physical processes and primary productivity. The biological processes involved are represented by a Phytoplankton-Zooplankton-Nutrient Model, which uses the nitrogen content as a tracer for the state variables. Tides, wind and bottom friction drive the hydrodynamics in San Quintín Bay.

Numerical experiments showed that the interaction of the bay with the open sea regulates the nutrient exchanged and that the net flux of nutrients is towards the bay, mainly due to residual currents. There is also an indication that advection and diffusive processes play an important role in the nutrient exchange conditions. Circulation cells and countercurrents at the mouth of the bay have an important effect on resident time and, consequently, on the productivity in San Quintín Bay.

Key words: Primary productivity, physical-biological coupled model, San Quintín Bay.

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

Análisis de procesos físico-biológicos acoplados en la Bahía de
San Quintín, B.C., México

T E S I S

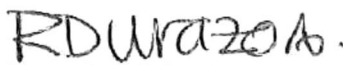
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS

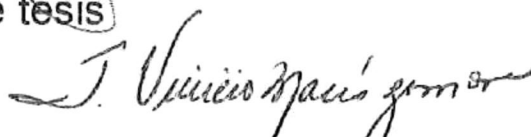
P R E S E N T A

Sergio Bernardo Jiménez Hernández

APROBADA POR


Dr. Adán Mejía Trejo
Director de tesis


Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Sinodal


Dr. J. Vinicio Macías Zamora
Sinodal


Dr. Zaúl García Esquivel
Sinodal


Dr. Eugenio Gómez Reyes
Sinodal

DEDICATORIA

A mi Gaby, esposa y compañera de vida, por su invaluable amor y apoyo.

A mis hijos Ricardo, Sergio y Esmeralda, que son la luz de mi vida.

A mi familia por su apoyo incondicional.

***“Cuando quieras ver mas allá que los demás, inténtalo
primero con los ojos cerrados.”***

Sergio Jiménez.

Noviembre de 2004.

A la memoria de mi amigo Pedro Ripa

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, Dr. Adán Mejía Trejo, por su apoyo y confianza y a todos los miembros de mi comité de tesis Dr. Reginaldo Durazo Arvizu, Dr. Vinicio Macias Zamora, Dr. Zaúl García Esquivel y Dr. Eugenio Gómez Reyes, por su disponibilidad y guía durante este trabajo.

Al Rector de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, Lic. Jesús Lavín Santos Del Prado, por su apoyo y confianza.

Al todo el personal del Departamento de PROMEP en la Universidad Autónoma de Tamaulipas.

A todo el grupo de trabajo de la Facultad de Ingeniería y a los compañeros del Instituto de Investigación en Ingeniería de la U.A.T., por su confianza, apoyo y sobre todo su amistad.

A mi gran amiga, Dra. Anamaría Escofet, un ejemplo de perseverancia y compañerismo.

A mis amigos de siempre del Instituto de Investigaciones Oceanológicas y de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California.

Al CONACYT y al PROMEP por las becas recibidas y apoyos para realizar mi estancia de trabajo doctoral.

INDICE

Resumen.....	ii
INDICE.....	viii
1 Introducción	1
1.1 Objetivo General.....	5
1.2 Objetivos particulares:	5
1.3 Hipótesis de trabajo	6
2 Metodología	6
3 Marco de referencia	8
3.1 La Bahía de San Quintín, B.C.....	8
3.2 Procesos Biológicos	11
3.2.1 Hábitat	12
3.2.2 Productividad Primaria	15
3.3 Procesos Físicos	22
3.3.1 Hidrología	22
3.3.2 Uso y calidad del agua	23
3.3.3 Mareas.....	26
3.3.4 Hidrodinámica.....	26
4 Procesos físico-biológicos acoplados	28
4.1 Marco teórico	28
4.1.1 Panorama general sobre modelos acoplados	28
4.2 Modelo Hidrodinámico	31
4.2.1 Ecuaciones que gobiernan la hidrodinámica en la BSQ.....	31
4.2.2 Condiciones de frontera	33
4.2.3 Esquema numérico y criterio de estabilidad	34
4.2.4 Resultados de modelación hidrodinámica	34
4.2.5 Escenarios hidrodinámicos de BSQ	35
4.2.6 Conclusiones sobre la Hidrodinámica de BSQ	48
4.3 Modelo de la Dinámica Biológica.....	50

4.3.1	Dinámica de Fitoplancton, Zooplancton y Nutrientes	50
4.3.2	Simulación de la dinámica de FZN en Bahía de San Quintín.....	50
4.3.3	Parametrización de procesos biológicos	54
4.3.4	Resultados de modelación biológica	57
4.3.5	Productividad Primaria	59
4.4	Acoplamiento Físico-Biológico.....	60
4.4.1	Acoplamiento de modelos	62
4.4.2	Ecuación de transporte.....	63
4.4.3	Procesos físico-biológicos acoplados en Bahía de San Quintín.....	63
4.4.4	Resultados de la simulación acoplada.	64
5	Discusiones y conclusiones	71
6	Bibliografía.....	75
	ANEXOS	82
	Anexo 1. Condiciones hidrodinámicas específicas para acoplamiento con monitoreos de campo biológicos.....	83
	Condiciones hidrodinámicas para la Bahía de San Quintín, B.C. el 7 de abril de 2000.	83
	Anexo 2. Casos especiales de patrones de forzamiento hidrodinámico	91
	Anexo 3. Artículos asociados.....	95
	Influence of Physical and Biological processes on Primary Productivity in a Coastal Lagoon of San Quintín Bay, B.C., México. Enviado a la revista Ecological Modelling, noviembre de 2004.	95
	A Numerical Investigation of the Dynamics of San Quintín Bay, B.C.: Transport Processes. Enviado a la revista Ocean Dynamics, octubre de 2004.	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.-Coeficientes de correlación para series de tiempo de variables físico-biológicas en BSQ. [Zertuche-González y Álvarez-Borrego, 1978] I.....	18
Tabla 2.- Producción Primaria anual en la Bahía de San Quintín [Lara-Lara y Álvarez-Borrego, 1975].....	20
Tabla 3.- Concentración de nutrientes en Bahía falsa.	25
Tabla 4.- Principales componentes de marea para la Bahía de San Quintín, B.C. (Ocampo-Torres, 1980).	33
Tabla 5.- Conjunto de experimentos numéricos para definir los diferentes escenarios hidrodinámicos en la BSQ bajo distintos esquemas de forzamiento.	35
Tabla 6.- Definición de variables y parámetros para el modelo biológico de Fitoplancton, Zooplancton y Nutrientes.....	52
Tabla 7.- Condiciones iniciales de los campos de Fitoplancton, Zooplancton y Nutrientes para el frente marino, Boca y cuerpo de la Bahía de San Quintín.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Plano de macro localización de la Bahía de San Quintín, B.C.	9
Figura 2.- Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para M_2 a) Corriente residual. b) Campos de verticidad.....	40
Figura 3.- Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para K_1 a) Corriente residual. b) Campos de verticidad.....	41
Figura 4.- Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para $M_2 + K_1$ a) Corriente residual. b) Campos de verticidad.....	42
Figura 5. Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para M_2 + sistema de vientos de brisa a) Corriente residual. b) Campos de verticidad.....	43
Figura 6.- Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para M_2 y vientos del NW a) Corriente residual. b) Campos de verticidad.....	44
Figura 7.- Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para $M_2 + K_1$ mas vientos de brisa a) Corriente residual. b) Campos de verticidad.....	45
Figura 8. Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para $M_2 + K_1$ mas vientos del NW a) Corriente residual. b) Campos de verticidad.....	46
Figura 9. Contornos de concentración promedio asociados a las descarga del Arroyo San Simón para un elemento conservativo y relativos a un periodo de 45 días de simulación y un forzamiento con M_2 y vientos en sistema de brisas.	47
Figura 10. Representación espacial de tiempos de residencia (días) en la Bahía de San Quintín, B.C., obtenidos por aproximación numérica para distintos puntos dentro de la bahía.	47
Figura 11.- Variabilidad temporal de los campos de fitoplancton, zooplancton y nutrientes para el caso 1 (ver tabla 5).....	58
Figura 12.- Plano fase referido al F-N para el caso 1; aquí se puede observar la convergencia de la solución a una condición de equilibrio estable.....	59
Figura 13.- Condición inicial de los campos biológicos e hidrodinámicos para un forzamiento de marea M_2 y viento tipo de brisas.	65

Figura 14.- Campos de concentración de variables biológicas para el caso presentado en la fig. 13 pero 12 horas después.....	65
Figura 15.- Campos de concentración de variables biológicas para el caso presentado en la fig. 13 pero 24 horas después.....	66
Figura 16.- Campos de concentración de variables biológicas para el caso presentado en la fig. 13 pero 48 horas después.....	66
Figura 17.- Campos de concentración de variables biológicas para el caso presentado en la fig. 13 pero 60 horas después.....	67

1 Introducción

El manejo sustentable de ecosistemas costeros ha representado un reto. La falta de una política clara de conservación y aprovechamiento racional de sus recursos naturales ha generado la degradación de humedales costeros haciéndolos mas vulnerable ante cambios climáticos globales (Palacios-Aponte, 2004).

En México los humedales costeros son un rasgo característico de muchas de nuestras costas y representan un eslabón importante para economías locales. Sin embargo, la diversidad de sus recursos naturales y la fragilidad de muchas de sus especies bióticas no han sido debidamente consideradas en sus esquemas productivos generado conflictos ambientales críticos (ver por ejemplo: Mesta y Martínez, 2004).

La Bahía de San Quintín (BSQ), en B.C., es un cuerpo de agua costero -antiestuarino- donde el aprovechamiento de sus recursos ha generado conflictos ambientales asociados principalmente a la agricultura intensiva que se da adyacente a ésta; lo que ha ocasionado un abatimiento de niveles freáticos e intrusión salina en el acuífero. Otro aspecto es el aprovechamiento ostrícola en BSQ, basado en una especie introducida, que si bien ha mostrado buenos rendimientos, no se ha evaluado su efecto ecológico. Los campos ostrícolas cubren cerca de 180 ha de las 2,400 ha que tiene la bahía, principalmente en Bahía Falsa (BF). Las expectativas del desarrollo ostrícola en BSQ contemplan la expansión a nuevos sitios de dentro de la bahía.

La ostricultura es la segunda actividad económica más importancia en BSQ, con una producción promedio anual de 2,500 toneladas por año; una de las más importantes del país. BSQ es el cuerpo de agua certificado más importante del país para la producción de moluscos. Desde el inicio de la industria ostrícola en los años 70's, los ostricultores han hecho frente a una infinidad de problemas como son: elección de los mejores sitios, producción y exportación de semillas, fijación de la semilla, enfermedades y cambios climáticos. En la actualidad, el mayor problema que enfrentan y para el cual no han

encontrado una solución adecuada, es la alta tasa de mortandad que se da en algunos sitios de las zonas de cultivo en determinadas épocas del año. Entre las causas atribuidas a esta mortandad se encuentran: problemas de índole vírales; calidad del alimento disponible para el ostión; y, las condiciones ambientales en la bahía afectadas por eventos del “El Niño” y surgencias.

Aunado a esto último y a las actuales expectativas de intensificar e incrementar las zonas de cultivos de ostión en BSQ, los ostricultores enfrentan el reto de proyectar su desarrollo bajo un esquema sustentable. Como se sabe, el crecimiento del ostión depende particularmente de la dinámica de su nivel trófico primario (Powell *et al.* 1992). Entonces, cualquier esfuerzo que permita evaluar la posibilidad de intensificar e incrementar las zonas de ostricultivo en la BSQ, deberá partir de un amplio conocimiento de la PP y de su correlación con el crecimiento del ostión.

Aunque existen muchos antecedentes sobre el control que ejercen los aspectos físicos como la marea, vientos y surgencias en la PP de la BSQ (ver por ejemplo Álvarez-Borrego y López-Álvarez, 1975; Álvarez-Borrego y Che-Barragán, 1976; Farfán, 1981; Millán-Núñez *et al.*, 1982; Zertuche-González y Álvarez-Borrego, 1978) no hay una evaluación clara que defina cómo y en qué proporción los aspectos físicos y/o biológicos contribuyen a la variabilidad de la PP en la BSQ y menos aún, cual es su relación con el crecimiento del ostión.

La PP de un cuerpo de agua costero define la capacidad del sistema acuático para soportar vida en él. El fitoplancton que contribuyen significativamente a la PP en los océanos (95%, Valiela, 1995) forma parte del eslabón primario básico de la cadena trófica que da sustento al ostión (Arrigo *et al.*, 1998). Por lo que la variabilidad de la PP es un signo vital en un cuerpo de agua costero.

Un aspecto importante en los estudios de la PP es el conocer los factores ambientales que la limitan. Por lo que se analizan las aportaciones y pérdidas de energía y/o biomasa. Dentro de las principales aportaciones de energética está la radiación solar,

que puede considerarse como ilimitada en términos de disponibilidad potencial, sólo limitada por aspectos tales como: posición geográfica (latitud), transparencia de las aguas, decaimiento y razones de asimilación fótica. Otro factor que limita la PP es la disponibilidad de nutrientes, particularmente los inorgánicos disueltos, donde las fuentes de origen local están relacionadas al reciclamiento y remineralización, mientras que los aspectos externos están asociados a procesos de transporte como: aportes terrígenos por vía fluvial e intercambio -advectivo/difusión- con la frontera oceánica. Otro factor limitante para la PP es la dinámica de procesos biogeoquímicos, que definen los flujos energéticos en el nivel trófico primario.

Dado que el aporte terrígeno de nutrientes hacia un cuerpo de agua costero es sustancial y debido a las pocas limitaciones de radiación que se dan en sitios, los ecosistemas costeros se consideran predominantemente productivos, es decir, la producción de biomasa rebasa los posibles sumideros de ésta como lo puede ser la respiración (Valiela, 1995). Aunado a esto, la estructura y dinámica ecológica de una laguna costera bajo influencia de surgencia -como lo es la BSQ- hace que la disponibilidad energética hacia niveles tróficos superiores sea muy alta (Boje y Tomczak, 1978).

Cuando los aportes de nutrientes a un cuerpo de agua costero no son sustantivos, la PP se ve limitada. Esta condición se puede dar, cuando no hay aportes terrígenos suficientes o cuando la dinámica y procesos biogeoquímicos característicos de las comunidades de plancton (Fitoplancton, Zooplancton y Nutrientes) generan un déficit en éstos. Los procesos de transporte -difusión y advección- de nutrientes juegan un papel determinante en éste último aspecto. La BSQ pudiera quedar enmarcada bajo este panorama.

Los procesos de transporte, mas allá de definir flujos de los componentes del plancton, establecen el acoplamiento que se entre estas componentes (Mann y Lazier, 1996). Es por eso, que la circulación en una laguna costera como la BSQ, así como los factores

hidrodinámicos que la generan, juegan un papel determinante en los aspectos bióticos de éste cuerpo de agua.

Por otra parte, la dinámica de FZN ha sido estudiada tradicionalmente desde el punto de vista biológico, aislando la posible contribución de aspectos tan determinantes como pueden ser los hidrodinámicos, por ejemplo. Esto no ha sido un capricho y ha evolucionado de tal forma que en la actualidad, bajo el marco de la globalidad y las interconexiones, la dinámica de FZN es analizada bajo esquemas multidisciplinarios que permite la integración de nuevos procesos y variables a su estudio. (Wroblewski, 1983; y Franks, 1995). Hofmann y Lascara (1998) presentan un trabajo donde la dinámica de FZN es analizada en correlación con la PP.

Los procesos globales han sesgado los estudios de la dinámica de FZN a marcos de referencia igualmente globales, excluyendo generalmente a los cuerpos de agua costeros. Aunado a esto, la actual disponibilidad de información a través de datos satelitales, obliga a sesgar los estudios a escalas de referencia espacial y temporal que permiten asimilarlos; igualmente aquí, los cuerpos de agua costeros son generalmente excluidos. (Ver por ejemplo: Eckman, 1994; Eppley y Peterson, 1979; Kühn y Radach, 1997).

Los estudios multidisciplinarios de la dinámica de FZN llevados a cabo en zonas costeras, han adecuado la parametrización de procesos solo a nivel global. Dicha parametrización es muy diferente a la aplicable a una laguna costera dada su estructura ecológica. Puntualizando en esto, la parametrización de procesos biológicos asociados a la dinámica de FZN ha sido validada sólo en el contexto global (Franks, 1995; Hofmann y Lascara, 1998 y poco se ha hecho para condiciones costeras (Henderson y Steele, 1996; Lam, 1984; Millán-Núñez *et al.*, 1982).

La variabilidad en la PP de un cuerpo de agua costero y aún en los océanos, tiene un amplio espectro de señales, cada una de ellas asociadas potencialmente a un agente causante. El papel que los cuerpos de agua costeros juegan como subsistema, en

estudios y modelaciones globales de la variabilidad de la PP, no ha sido definido claramente y sin duda deben jugar un papel importante (Gordón, 1996).

En este trabajo se analiza la variabilidad de la PP en la BSQ con la finalidad de identificar el papel que juegan los procesos hidrodinámicos y la dinámica de FZN. Para esto se implementa un modelo físico-biológico acoplado que reproduce tanto la hidrodinámica bidimensional de la BSQ así como su dinámica trófica primaria en la columna de agua.

La importancia para el manejo sustentable de BSQ de los resultados de este trabajo se espera contribuya a una mayor productividad de la misma y la búsqueda de nuevos horizontes en la explotación del ostión en la zona. Particularmente, conocer los mecanismos de causa-efecto que gobiernan la variabilidad de la PP en BSQ, brindarán un soporte teórico importante para definir el comportamiento y potencial productivo de regiones costeras en la bahía.

1.1 Objetivo General

Analizar los procesos físico-biológicos en la Bahía de San Quintín, B.C., para identificar la contribución de forzamientos hidrodinámicos y dinámica Fitoplancton-Zooplancton-Nutrientes en la variabilidad de la Productividad Primaria del sistema.

1.2 Objetivos particulares:

1. Identificar los mecanismos que controlan la circulación y la dinámica de poblaciones de Fitoplancton, Zooplancton y concentración de Nutrientes (FZN) en la BSQ.

2. Implementar un modelo físico-biológico, que permita acoplar la hidrodinámica de BSQ con la estructura trófica primaria en columna de agua (FZN).
3. Evaluar la variabilidad de la Productividad Primaria en la BSQ bajo distintos escenarios de acoplamiento (forzamientos hidrodinámicos vs. parametrización biológica).
4. Llevar a cabo una regionalizar la BSQ en términos de tiempos de residencia y procesos biológicos que influyan en la variabilidad de la PP de BSQ, como esquemas de referencia para su manejo.

1.3 Hipótesis de trabajo

La variabilidad de la Productividad Primaria en un cuerpo de agua costero esta estrechamente vinculada a la dinámica biológica de su nivel trófico primario, a los forzamientos hidrodinámicos que gobiernan la circulación y a procesos de transporte. Analizando su acoplamiento a través de modelos numéricos se puede evaluar la contribución y control que ejercen sobre la Productividad Primaria tanto forzamientos hidrodinámicos como la estructura dinámica ataxonómica del plancton en la columna de agua del sistema.

2 Metodología

El trabajo tiene cuatro fases. La primera, consiste en una recopilación bibliográfica y de adquisición de datos existentes sobre aspectos biológicos e hidrodinámicos en BSQ. La segunda fase consiste, en planteamiento y desarrollo de modelos numéricos que reproduzcan: la hidrodinámica bidimensional de BSQ, la dinámica del plancton (fitoplancton, zooplancton y nutrientes) en la columna de agua de BSQ y un modelo acoplado que integre la parte física con la biológica y permita analizar

la variabilidad de la productividad primaria en la BSQ. La tercera etapa se enfoca al planteamiento de los trabajos de campo y monitoreo de variables apropiadas para calibrar y validar los modelos desarrollados. La cuarta etapa corresponde al planteamiento del diseño experimental -simulación numérica- para analizar el control hidrodinámico y/o biológico de la productividad primaria en la BSQ bajo distintos escenarios.

En el capítulo I, se presenta la introducción de motivos, objetivos, hipótesis y metodología de trabajo. Igualmente, en el primer capítulo se hace una recopilación de los antecedentes y estudios previos que existen sobre aspectos hidrodinámicos y biológicos -productivos- que se han desarrollado hasta la fecha en la BSQ. Se construye así un panorama de las condiciones actuales de la bahía, su evolución y posible condición futura. En el capítulo dos, se hace un análisis de la información recopilada sobre aspectos hidrodinámicos de la BSQ para definir, el tipo de modelo hidrodinámico que reproduzca adecuadamente los patrones de circulación en la bahía. En éste capítulo, se definen las ecuaciones que gobiernan al modelo hidrodinámico, su solución numérica, calibración y validación de resultados. En el capítulo tres, se hace un recuento de la información y antecedentes que hay en la BSQ y que permite, reproducir la dinámica de FZN en la bahía; se presentan antecedentes teóricos sobre este aspecto que se enfocan a la parametrización de los procesos biológicos considerados. En el capítulo cuarto, se presenta el marco de referencia teórico y numérico que permite construir un modelo físico y biológico acoplado para analizar la variabilidad de PP en la BSQ bajo distintos escenarios. Los trabajos futuros contemplan la calibración y validación de los modelos biológicos y el acoplado así como, la integración de la dinámica poblacional del ostión que será un cuarto modelo numérico a desarrollar. Finalmente, en el último capítulo se presenta la discusión y la conclusión de los resultados obtenidos en este trabajo.

3 Marco de referencia

3.1 *La Bahía de San Quintín, B.C.*

La Bahía San Quintín (BSQ), es una de las lagunas costeras de mayor importancia en la región noroeste de México (Ver Figura 1). Desde la década de los setentas, BSQ ha tenido una vocación primaria para la ostricultura extensiva y sus canales principales han sido utilizados como rutas de navegación para pesca ribereña. No obstante, durante los últimos 10 años la dinámica social de la laguna comenzó a cambiar debido, al nuevo esquema organizacional de los ostricultores; aspectos legales de tenencia de tierra; manejo de nuevas especies cultivables; el desarrollo de pesca deportiva, y el creciente interés por establecer un parque acuícola y/o turístico en la zona. Los datos hidrológicos y biológicos generados por las instituciones académicas durante 1974 y 1985, han sido la base para la formulación de "estudios de impacto ambiental" en Bahía San Quintín durante los últimos 8 años. La deficiencia de información actualizada y la creciente actividad acuacultural y de agricultura en la región, despertó un renovado interés de la comunidad académica en Bahía San Quintín. A partir de 1995, se iniciaron numerosos proyectos de investigación ambiental en BSQ, cuyos resultados han sido publicados en revistas especializadas y que representan sólo una porción del avance de dichas investigaciones.

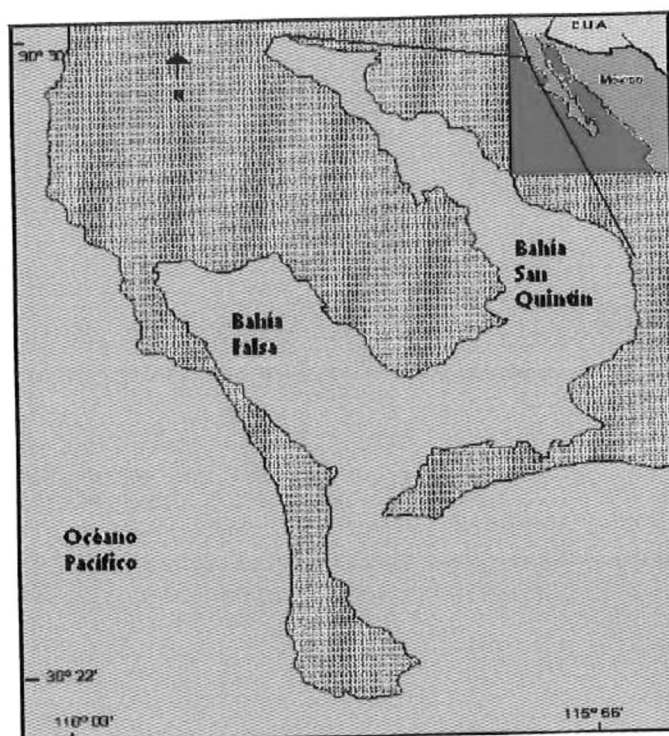


Figura 1. Plano de macro localización de la Bahía de San Quintín, B.C.

La BSQ, es una laguna costera somera típica de zonas áridas templadas, del tipo de marismas de inundación, cubierta en gran parte de su lecho por pastos marinos, que no recibe aporte de agua dulce permanente. Tiene una superficie de 41.6 km², de los cuales cerca del 20 % quedan expuestos durante las mareas más bajas. Tiene una forma aproximada de "Y" orientada en dirección norte-sur; su comunicación con el mar es permanente a través de una boca localizada en la rama inferior de la "Y" de aproximadamente 1 km. de ancho. Al brazo este de la laguna se le denomina Bahía San Quintín (BSQ), mientras que el oeste se conoce como Bahía Falsa (BF).

La región de San Quintín tiene como límites; al norte el paralelo 31° 19' 36" que pasa por el poblado San Vicente y continua al ejido Pai-pai, al sur el paralelo 28°, que colinda con el Estado de B. C. S. y al Oeste el Océano Pacífico.

El clima predominante de la región es seco. Se distinguen los regímenes de lluvia: el de verano julio, agosto y septiembre y otro régimen el de invierno diciembre, enero, febrero, marzo.

San Quintín es un cuerpo de agua altamente productivo, con una productividad fitoplanctónica tres o cuatro veces mayor que la del mar abierto, por lo que las actividades de pesca artesanal y deportiva están estrechamente ligadas a la laguna. La pesca de abulón, langosta, almeja piso, sardina, macarela y charrito, entre otras especies, se realizan en forma continua desde los años 20. A partir de 1976 se inician actividades acuaculturales en Bahía Falsa. Actualmente hay cultivos de ostión japonés (*Crassostrea gigas*), ostión europeo (*Ostrea edulis*), mejillón azul (*Mytilus edulis*) y almeja manila (*Chione succinta*). También existe extracción de alga roja (*Geridium cartilagineum*).

A pesar de ser San Quintín una laguna tan productiva, de gran importancia para la economía local y estatal, refugio de poblaciones enormes de aves migratorias y residentes, no cuenta con ningún tipo de regulación que permita un uso racional de los recursos ni un ordenamiento del uso de suelo. Según un reporte hecho por Bárbara Massey, Co-Directora de Pro Esteros desde su fundación hasta 1994, los principales problemas en la BSQ son:

En la punta de la barra sur, conocida como Punta Azufre, se han establecido campos pesqueros, con población muy grande y sin ningún control sanitario, lo que produce una gran cantidad de basura y destrucción del hábitat.

En la Marisma del este, en la zona situada entre el Molino Viejo y el Cementerio Inglés, encontramos una serie de tiraderos clandestinos de basura. Aunque no ha cambiado mucho la marisma, sí podemos ver variaciones significativas en las tierras altas colindantes con ésta, en las que la vegetación ha sido removida, con las consecuencias lógicas de terreno que pierde vegetación: desplazamiento de tierra por el viento, invasión de vegetación no nativa (hielitos), etc.

El cultivo de ostiones se restringe a la Bahía Falsa bajo el rubro de "Parque acuacultural" con régimen federal. (Torres-Fernández, 1986).

3.2 Procesos Biológicos

A fines de los 70's en una serie de campañas de observaciones, se generaron series de tiempo de nivel del mar, velocidad de corriente, temperatura, salinidad, oxígeno, fosfato inorgánico, clorofila a, cestón, abundancia de especies de Fitoplancton, carbono y nitrógeno orgánico particulado y productividad primaria para la boca de Bahía San Quintín, Baja California, por 18 días durante el verano de 1977 (Lara-Lara, 1979). Esto se hizo, para determinar algunos factores que causan variabilidad de éstas propiedades ecológicas y como marco para algunas generalidades acerca de la dirección y magnitud de los flujos en la unión entre la bahía y las aguas litorales durante la estación de verano. La Bahía de San Quintín es considerada de interés para un desarrollo de la maricultura.

De acuerdo a Lara-Lara (1979), la alternancia de los eventos de surgencias en zona costera de BSQ es una de las causas de la variabilidad de propiedades fisicoquímicas en el sistema. Las mareas semidiurnas fueron la principal causa de la variabilidad de la temperatura. Las variables conservativas tales como la temperatura y la salinidad tienen un componente semidiurno más grande que los diurnos. La mayoría de las variables no conservativas (clorofila a y concentración de fosfatos, por ejemplo) tiene variabilidad tanto diurna como semidiurna debido a que los procesos biológicos dependen fuertemente de los ciclos de radiación solar. La relación entre los componentes de variabilidad para el oxígeno fue intermedia entre las relaciones de las variables conservativas y no conservativas. La variabilidad del seston fue principalmente debida a la turbulencia producida por los vientos y las corrientes maréales. La carencia de correlación entre carbono orgánico particulado y nitrógeno, y al amplio rango de la relación C: N particulado, indican que el seston derivado de la bahía de muy amplia variación en el contenido orgánico representa la mayoría de la materia particulada suspendida. Más del 99% de la materia orgánica particulada es detritus, producido principalmente por la degradación de los pastos marinos. Las surgencias y el intercambio de la bahía con el océano son las responsables de las altas concentraciones de clorofila a y de fosfato inorgánico que se manifiestan en la bahía. Sólo durante la segunda urgencia (los últimos 7 días del período de muestreo) parece

existir una exportación significativa a partir de la bahía, y muestran y se observan por las fluctuaciones medias de la temperatura, oxígeno y clorofila a. Para las demás variables y durante otros momentos del período de muestreo no existieron promedios de fluctuación significativos en los flujos. El hecho que haya habido una sola estación en la boca de la bahía hace difícil la evaluación de la fluctuación de los flujos. Las diatomeas fueron siempre el grupo fitoplanctónico más abundante. La productividad primaria fue siempre mayor en la superficie, con un valor medio de $27 \text{ mgC/m}^3/\text{hora}$ durante todo el período de muestreo. Los máximos valores de productividad en la superficie, se obtuvieron en el período posterior a la aparición de la surgencia (arriba de $44 \text{ mgC/m}^3/\text{hora}$). Un valor promedio de $122 \text{ mgC/m}^3/\text{hora}$ fue encontrado en toda la columna de agua durante los 18 días que duró el muestreo. Estos valores, son comparables a los máximos de productividad encontradas en otras áreas de surgencias. El promedio de la tasa de asimilación superficial fue de $6.6 \text{ mgC (mgChla/hora)}$, que indica que es una agua rica en nutrientes. (Lara-Lara, 1979).

3.2.1 Hábitat

La característica dominante de Bahía San Quintín son sus planicies lodosas, la vegetación característica de este hábitat es de dos tipos: la marina que consiste en extensos bancos del pasto marino *Zostera marina*, el cual cubre extensas áreas mejor desarrolladas en la parte media de la bahía, éstos pastos permanecen ligeramente sumergidos durante la marea baja, y el otro tipo de vegetación consiste en una extensa marisma, que abarca casi la mitad de los márgenes más bajos de bahía y esta sujeta a el régimen de mareas. Ambos tipos de vegetación son contiguos, pero usualmente se encuentran separados por una amplia o estrecha franja de arena o lodos. Los canales más hondos de la bahía (~ 4 pies) en marea baja se encuentran libres de pastos marinos, existen canales con una profundidad menor a esta y grandes extensiones someras, que al verse expuestas en marea baja se puede observar que están bordeados por la *Zostera marina*. Generalmente los canales tienen una profundidad de 18 a 24 pies, con un registro de 38 pies. El brazo este de la bahía posee sólo escasos

parches de pasto marino. La flora algal de la bahía es inconspicua a excepción de las epifitas de *Zostera marina*, las macroalgas están confinadas a la playa rocosa a lo largo de la península entre los dos brazos de la bahía. A pesar de esto, varias especies se pueden encontrar con una abundancia moderada. Las planicies poseen numerosos canales de marea que corren a través de la marisma y las planicies lodosas, en estas planicies es posible observar colonias de algas verdes- Estos tapetes algales es común encontrarlos en áreas arcillo-silicosas de la zona intermareal. (Gorsline y Stewart, 1962; Barnard, 1962; Álvarez-Borrego y Nájera de Muñoz, 1979; Dawson, 1962; Ibarra-Obando y Aguilar-Rosas, 1985; Barnard, 1964; Hernández-Becerril y Álvarez-Borrego, 1983).

En la Bahía de San Quintín, hay extensas marismas sujetas a inundación periódica por las mareas, se encuentran a lo largo del margen norte y este del brazo este de la bahía. La morfología de esta área es de dunas pequeñas y planicies sin rocas, por el contrario la parte central y oeste de la bahía se caracterizan por sus bordes agudos con afloramiento de roca volcánica, las marismas se ubican en la parte noroeste del brazo este y se encuentran en cuatro planicies relativamente pequeñas que se encuentran entre estos afloramientos. Las marismas predominan en la playa sureste y sur de la bahía. La zona baja de la marisma en casi todas las áreas consisten en una banda de *Spartina foliosa*, por encima de la zona de *Spartina* predomina la marisma de *Salicornia virginica* sola o mezclada con otras especies. En tiempos pasados el brazo oeste de la bahía estuvo inundado, es por esto que estas marismas son más viejas que aquellas que se desarrollaron a lo largo de la playa interna del brazo de la Bahía San Quintín.

Bahía San Quintín, abriga poblaciones muy importantes de varias especies y subespecies de aves que se encuentran amenazadas o en peligro de extinción. La Bahía de San Quintín es el sitio de invernación del 30 al 50% de la población total del ganso de collar (*Branta bernicla*) que inverte en México. En 1992 un censo terrestre documentó un total de 31,925 aves playeras migratorias en este humedal. El 85.5% de éstas se encontraron en Bahía San Quintín, 3.6% en las salinas, y el 10.9% en Laguna

Figueroa. Este dato sobre las aves en la zona de estudio es trascendente en la búsqueda de fuentes de nutrientes por aporte de heces fecales.

Ibarra-Obando et al., (2001) estudiaron el metabolismo bentónico de BSQ. Estos autores presentan los resultados de la medición del metabolismo bentónico correspondientes al periodo febrero 97 – agosto 99. El trabajo reporta datos de campo de muestreos realizados dos veces al año en el periodo señalado: febrero y agosto. La metodología aplicada consistió en la instalación de domos de acrílico en tres sitios de la bahía, y las determinaciones de los flujos de nutrientes inorgánicos disueltos (fosfatos, silicatos, amonio), oxígeno, alcalinidad total y pH en un lapso de 24 horas. Otras variables medidas incluyeron la concentración de clorofila, producción primaria y respiración en la columna de agua. El trabajo buscó diferencias entre verano - invierno, sitios y noche – día. De la misma manera, se buscó analizar la comparación entre el metabolismo del bentos y el de la columna de agua. Los resultados del trabajo de Ibarra-Obando et al., (2001) indican un mayor metabolismo bentónico durante el verano, reflejado en los flujos de nutrientes y oxígeno. En el caso de los fosfatos, la diferencia invierno – verano es de un orden de magnitud. La diferencia estacional en la temperatura del agua es de aproximadamente 4°C, por lo que el metabolismo no parece estar respondiendo a esta variable, sino más bien, a la variación en los aportes de materia orgánica reactiva hacia los sedimentos, como resultado de la producción primaria. Silicatos, alcalinidad y oxígeno son las variables que han mostrado diferencias significativas entre sitios, siendo casi siempre la estación situada cerca de la boca de la bahía la que muestra valores extremos.

De acuerdo a Álvarez-Borrego y Nájera de Muñoz (1979), la zona de San Quintín está conformada por diferentes tipos de suelo: Palustre, en los márgenes de Bahía de San Quintín con morfología plana: eólica, en la costa de la barra arenosa de Bahía Falsa; Litoral, en la línea de costa, especialmente en algunos sitios al oeste de Bahía Falsa.

Los suelos de la planicie costera oeste, de Colonett a Campo Viejo, están limitados debido a la agricultura intensiva que ahí se practica y debido a los químicos utilizados presenta fases sódicas y salinas.

3.2.2 Productividad Primaria

Los primeros trabajos de campo sobre la Productividad Primaria (PP) en la BSQ, son de carácter exploratorio (Dawson, 1951 y Dawson, 1962) y hacen un análisis comparativo entre la vegetación costera de la bahía y los eventos de surgencias. Mientras que Barnard (1962), Barnard (1964) y Gorsline y Stewart (1962) realizan estudios sobre las comunidades bentónicas de la bahía.

En la década de los 70's y principios de los 80's es cuando se da la mayor contribución al conocimiento de la estructura biológica de la BSQ. Los trabajos sobre hidrografía descriptiva aportan importantes datos sobre el comportamiento de variables físico-químicas como lo son: temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto, pH, alcalinidad, entre otras. (Chávez-Comparan, 1973; Álvarez-Borrego y Che-Barragán, 1976; Álvarez-Borrego *et al.*, 1977 y Chávez-Nishikawa y Álvarez-Borrego 1974). De éstos trabajos, se concluyen que los brazos de la laguna (BF y BSQ) tienen comportamientos diferentes y que, en general, la dinámica biológica esta muy correlacionada con la marea.

La PP en la bahía fue estudiada por Lara-Lara y Álvarez-Borrego (1975) analizando el ciclo anual de clorofilas y de productividad orgánica primaria. Álvarez-Borrego y López-Álvarez (1975) conducen un estudio sobre la biomasa fitoplanctónica y su distribución por grupo taxonómico siendo complementado por otro trabajo del mismo autor Álvarez-Borrego y Nájera (1979). En un trabajo integrador y considerando las evidencias del control que ejercen las mareas sobre la PP, Lara-Lara (1979) estudia el intercambio de propiedades ecológicas de la bahía por efectos de marea. Una conclusión importante de éstos trabajos sobre la PP es que su variabilidad responde, además de la

modulación por marea y eventos de surgencia, a la condición antiestuarina de la bahía, es decir, la influencia fluvial es nula y que la bahía funciona como una cuenca de remineralización. Esto hace que la bahía no sea tan productiva como otros cuerpos de agua costeros al estar restringido el aporte de nutrientes terrígenos y limitándose a los que importa de su comunicación con el mar. Farfán (1981) corrobora que el flujo de nutrientes a la bahía lo controla su comunicación con el mar.

En un trabajo más reciente, Camacho-Ibar *et al.*, (1997) manifiestan que la PP está limitada por nutrientes, encontrando concentraciones menores en la bahía que en su frente oceánico. Menciona también, que en la bahía opera como un sistema heterotrófico donde la producción neta es negativa, es decir, la respiración es mayor que la producción bruta (el sistema consume un 10% más de materia orgánica de lo que produce). Es interesante analizar hacia donde conduce a la bahía este déficit productivo.

Camacho-Ibar *et al.*, (1997) también mencionan que hay un alto contenido de fosfatos en la columna de agua y que están asociados a la oxidación de la materia orgánica en sedimentos por sulfato reducción. Esto indica que la oxidación aeróbica, por óxidos de magnesio y nitratos ha sido agotada. Esto apoya la hipótesis de que la bahía funciona como una cuenca de remineralización, y que la posible fuga de nutrientes orgánicos en la columna de agua por sedimentación es compensada por flujos bénticos de nutrientes inorgánicos disueltos. Es importante hacer notar aquí, que es posible que el déficit de nutrientes de origen nitrogenado se deba a una fuga del sistema por la formación de nitrógeno gaseoso.

Por otra parte Ibarra-Obando y Elguea-Cazares (1987), destacan el papel tan importante que juegan los pastos marinos en diversos aspectos ambientales de la BSQ. Uno de ellos es el de funcionar como trampas de materia orgánica evitando que esta se fugue del sistema por arrastre y favorecer así su oxidación y remineralización.

Lara-Lara (1979) encontró una estrecha relación entre la ocurrencia de surgencias adyacentes a la Boca, la marea y los cambios de variables ecológicas observadas en la BSQ. Zertuche-González y Álvarez-Borrego (1978) establecen que se da una influencia de la marea sobre la distribución de propiedades químicas en la bahía. Por su parte Millán-Núñez *et al.*, (1982) definen una estrecha correlación entre fenómenos físicos y la distribución de nutrientes en la bahía.

Bajo este marco de referencia se da una conclusión clara: la distribución de propiedades físico-químicas en la BSQ y la variabilidad de la PP están estrechamente correlacionados con los procesos físicos que en ella se manifiestan: mareas, vientos y surgencias, principalmente.

De lo anterior surgen preguntas tales como:

1. ¿Qué porcentaje de la variabilidad de la PP es explicado por los forzamientos hidrodinámicos?
2. ¿Qué papel juegan las surgencias en la bahía?
3. ¿Por qué si se da un déficit de nutrientes en la bahía no hay un decaimiento notorio en su productividad?
4. ¿qué tanto influyen las actividades de aprovechamiento ostrícola y de otros bivalvos en la PP de la bahía?
5. ¿Cuál será la capacidad de carga de la bahía para el aprovechamiento del ostión y si existen puntos alternativos potenciales para nuevos campos ostrícolas?
6. ¿Existe una señal palpable del posible efecto de nitrificación del sistema por influencia de los campos agrícolas cercanos?

En BSQ se identificó, que las variaciones de temperatura y salinidad tienen una componente semidiurna importante con máximos asociados a marea alta y mínimos a marea baja. Analizando una serie de tiempo de 15 días de datos horarios de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto. Zertuche-González y Álvarez-Borrego (1978) concluye, que la temperatura tiene una componente de onda larga del orden de dos semanas con valores mayores hacia el séptimo día mientras que fosfatos, salinidad y oxígeno disuelto la presentaron también, pero menos marcada. A temperaturas bajas correspondieron salinidades y fosfatos altos y oxígeno bajo; pero con mayor correlación entre temperatura y oxígeno. Estos autores señalan que la marea debería de manifestar un control amplio sobre la variabilidad de las propiedades analizadas sin embargo reconocen que ésta se ve afectada por otras causas como lo son: calentamiento y evaporación no uniforme en el interior de la bahía debido a: batimetría irregular, a canales y bajos, a la presencia de corrientes a lo largo de la playa en el exterior de la boca, condiciones oceánicas como lo son las surgencias, oleaje y la homogenización de la columna de agua por procesos turbulentos. En su trabajo, presentan coeficientes de correlación entre las series de tiempo de las variables analizadas y las cuales se muestran en la Tabla 1. El mayor coeficiente de correlación se encontró entre la marea y la temperatura con -0.74.

Tabla 1.-Coeficientes de correlación para series de tiempo de variables físico-biológicas en BSQ. [Zertuche-González y Álvarez-Borrego, 1978] I.

	Marea	T ⁰ C	S ⁰ /‰	O ₂
PO ₄	0.06	-0.16	0.28	-0.33
Marea		-0.74	-0.44	-0.05
T ⁰ C			0.47	0.54
S ⁰ /‰				0.09

Es importante destacar, que en BSQ la marea y la radiación solar son los principales agentes que fuerzan al sistema. La marea tiene frecuencias semidiurna y diurnas predominantemente; mientras la radiación tiene variación diurna. Esto ocasiona

asimetría entre los máximos de temperatura asociados a mareas altas y bajas. Además la variabilidad de propiedades en BSQ tiene una componente de onda larga del orden de dos semanas y que es afectada por eventos de surgencias (Zertuche-González y Álvarez-Borrego, 1978).

El agua que aflora en los eventos de surgencias frente a BSQ, tiene menor temperatura, menor concentración de oxígeno disuelto, mayor salinidad y en general mayor concentración de nutrientes; estas condiciones son distintas a las que guarda la zona normalmente.

En el interior de la BSQ, se presenta una fuerte remineralización de nutrientes orgánicos por la actividad bacteriana sobre la materia orgánica la cual es atrapada por los pastos marinos (Álvarez-Borrego, 1976).

Zertuche-González y Álvarez-Borrego (1978), apoyados en sus resultados y en los de Álvarez-Borrego y Che-Barragán (1976) concluyen que el fosfato en la BSQ no es limitante para el crecimiento del fitoplancton ya que sus concentraciones son altas la mayor parte del tiempo.

La variabilidad anual de la PP en BSQ, fue estudiada por Lara-Lara y Álvarez-Borrego (1975). En este trabajo se menciona, que el fitoplancton en BSQ alcanza su clímax en verano disminuyendo hacia el otoño; correspondiendo un aumento de nutrientes (fosfatos) a bajas concentraciones de fitoplancton y una disminución de nutrientes a un incremento de fitoplancton. Esto último muestra un desfase en lo máximo de estas dos variables.

Lara-Lara y Álvarez-Borrego (1975), también concluye que la BSQ es una bahía productiva predominando BF sobre BSS. Tiene un patrón de sucesión de fitoplancton típico de una laguna costera, dándose una mayor influencia marina sobre BF. De acuerdo a estos autores, las concentraciones de nutrientes no son limitantes en la sucesión del fitoplancton, ya que sólo presenta una ligera depresión de su ciclo. Los

factores limitantes en la PP son la irradiancia, los intensos gradientes térmicos y la influencia oceánica como las surgencias. Las mareas influyen fuertemente la variación diurna de concentraciones de Clorofila 'a'. La distribución de pigmentos muestra que el fitoplancton en BSQ se da en forma de "manchas o parches" aunque no alcanzan a distinguirlos claramente pero reportan cambios de concentración hasta de un 300% en pocas horas para una sola localidad.

Datos sobre Producción Primaria en BSQ son resumidos en el trabajo presentado por Lara-Lara y Álvarez-Borrego (1975) y se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.- Producción Primaria anual en la Bahía de San Quintín [Lara-Lara y Álvarez-Borrego, 1975]

Estación	Clorofila <i>a</i> (mg/m ³)	Producción Primaria Calculada (gr C/m ³ /día)
Enero: 1	1.3	0.2
8	1.0	0.2
11	2.6	0.5
15	2.1	0.4
18	3.7	0.7
Marzo: 1	2.1	0.6
8	1.7	0.5
11	3.5	1.0
15	1.6	0.5
18	5.2	1.5
Julio: 1	2.6	0.7
8	0.5	0.1
11	8.0	2.3
15	0.5	0.1
18	5.9	1.5
Octubre: 1	2.1	0.5
8	0.5	0.1

Estación	Clorofila <i>a</i> (mg/m ³)	Producción Primaria Calculada (gr C/m ³ /día)
11	3.8	1.0
15	0.0	0.0
18	5.8	1.5

Por otra parte, los campos ostrícolas juegan un papel determinante en la productividad de la bahía y ha sido bien documentada su evolución. Chávez-Nishikawa (1974) recomendó las especies ostrícolas más apropiadas para cultivar en la bahía con base a un estudio de afinidad de diversos especímenes con las condiciones hidrográficas prevalecientes en la bahía. También recomiendan, en función de su comportamiento ambiental, a Bahía Falsa como la más apropiada para la ostricultura. Acosta-Ruiz (1985) presenta un trabajo sobre esquemas de la nutrición para el ostión. Pro-Gracia (1990) y García-Esquivel (1999) conducen los trabajos más recientes para el aprovechamiento óptimo del ostión en la zona de BF implementando modelos de crecimiento y analizando problemáticas recientes de mortandad presumiblemente asociadas a los eventos de El Niño.

En complemento, y en términos de productividad secundaria en BSQ, existe una gran abundancia de fanerógamas marinas -Pastos Marinos- como lo son: *Spartina foliosa*, *Salicornia virginica* y *Zostera marina* (Neuenschwander *et al.*, 1979).

Ballester-Grijalva, (1993) determinaron la producción primaria neta aérea, producción aérea total, biomasa, tiempo de renovación, tasa de biodegradación y producción total del detrito en BSQ para la zona cubierta por *Spartina foliosa* (222 ha). Estos autores encontraron que el tiempo de renovación es lento (5.4 meses) comparado con otras lagunas costeras de la región. La producción neta aérea total fue de 4.72 gr/m²/día y la tasa de degradación de 63%/159 días estimaron que la producción de detritus total es de 1,050 ton/222 ha/159 días.

3.3 Procesos Físicos

La BSQ es un cuerpo de agua costero relativamente somero. El área total de la bahía es aproximadamente de 41.6 km² referida a N.M.M. (Nivel Medio del Mar) y la comunicación al mar es por medio de un canal estrecho y sinuoso de 1.36 Km. de ancho. El volumen del prisma de marea es de 20 millones de metros cúbicos (Ocampo-Torres, 1980). La BSQ esta constituida por dos cuencas una llamada Bahía Falsa (BF) de origen tectónico y la otra llamada Bahía San Quintín (el cual se denominará Brazo Bahía San Quintín: BBSQ) -conocida en un tiempo como Bahía San Simón- que es un valle de río inundado. Ambos brazos están orientados al NW. Bahía Falsa tiene 5.6 Km. de largo y consiste en una plataforma submarina poco profunda (<2 m). La otra rama se caracteriza por un fondo más irregular, con un canal de 10.5 m en su primer tercio, denominado Canal principal-Bahía San Quintín, donde se reportan corrientes de marea que alcanzan hasta 1 m/s. El canal de entrada a BSQ se mantiene permanentemente abierto al océano y su profundidad máxima es de 15 metros disminuyendo hacia el interior de la laguna. (Del-Valle-Lucero y Cabrera-Muro, 1981; Ocampo-Torres, 1980).

3.3.1 Hidrología

Los humedales de Bahía San Quintín tienen 54.38 km², donde más del 40% de su extensión es expuesta durante las mareas más bajas en primavera.

3.3.1.1 Cuencas hidrológicas

Las cuencas hidrológicas asociadas a BSQ se encuentran determinadas por los siguientes acuíferos: la cuenca de Santo Domingo, 1,660 km², la cuenca de San Quintín, 950 km² y la cuenca de San Simón 1,930 km², juntas abarcan un total de ~ 4,500 km². Estas tres cuencas están incluidas en la región hidrológica 1 (Ensenada), las cuales drenan al Océano Pacífico. (González-Fragoso, 1992; Arce *et al.*, 1981).

Arroyos Santo Domingo y La Escopeta se localizan en la parte norte del valle. Arroyo Santo Domingo (30 Km. de longitud) se origina en el Cañón de Santo Domingo (200-

400m SNM) y desemboca en la Bocana de Santo Domingo. Arroyo Nueva York, localizado en la parte central del valle, fluye de la Sierra Juárez (a 400 m SNM) y corre a través del Cañón Nueva York (25 Km. de longitud). Este arroyo cruza los poblados del Buen Pastor, Las Palomas y San Quintín. Actualmente, está canalizado y desemboca en la parte sur de Laguna Figueroa.

El arroyo San Simón (95 Km. de longitud) se localiza en la parte sur del valle, y proviene de los escurrimientos de los arroyos Santa Eulalia y El Rosario, al desembocar este arroyo forma un amplio delta en Bahía de San Quintín. La cuenca de éste arroyo es la que está directamente vinculada con la actividad agrícola del Valle de San Quintín que directa o indirectamente influye sobre las condiciones hidrográficas de BSQ.

Los tributarios en la región fluyen de manera intermitente y las inundaciones sólo ocurren, principalmente, durante la temporada de lluvias (Nov.-Mar.). El arroyo Santo Domingo tiene cerca de 1100 km², con un volumen medio anual de 7'000,000 m³ 0, y un flujo medio anual de 0.210 m/sec, y una lámina de escurrimiento de 6 mm.

En la región, el rango en el coeficiente de flujo es de 0-5% del volumen precipitado relacionado con permeabilidad del terreno que va de media a baja. Debido a la topografía y a tipo de rocas, el flujo es semiparalelo, con forma dendrítica y desemboca en la costa del Pacífico.

3.3.2 Uso y calidad del agua

El sistema del acuífero costero entorno a BSQ, es el primer recurso utilizable para el abastecimiento de agua a la región. Es explotado por medio de norias y pozos con valores estáticos que varían de 2 a 30 m y de 10 a 60 m, respectivamente. La media en el rango del flujo extraído varía de 2 a 20 l/sec., la calidad del agua es tolerable (525-144 mg/l de sólidos disueltos) a una salinidad de (1400 mg/l). El flujo subterráneo tiende a ser hacia el suroeste. Existe una laguna temporal al sur de la

colonia Lázaro Cárdenas, que se forma por el flujo intermitente de las sierras. El agua superficial no es utilizada en el área. El flujo colectado durante las lluvias es utilizado para dar de beber al ganado, mientras que el agua subterránea se utiliza para la agricultura y para uso doméstico. La concentración de metales pesados en los sedimentos superficiales de Bahía San Quintín se ha mantenido en niveles naturales por procesos de remineralización y transporte debido a las surgencias intensas en el área. (Beltrán Gómez, 1996).

Un estudio en 1995 sobre metales pesados en sedimentos superficiales en Bahía Falsa, encontró dos fuentes principales de aporte: del océano y del continente. El primero transporta metales pesados (especialmente cadmio y zinc) a través de las surgencias, la segunda fuente abastece principalmente hierro y cobre proveniente de la erosión de las rocas graníticas y volcánicas del área de San Quintín, las cuales son ricas también en aluminio, hierro, manganeso, cromo y níquel.

El papel potencial de los órganos clorados utilizados en la agricultura en el Valle de San Quintín, en los humedales no ha sido evaluado. Esos contaminantes pueden ser transportados a la bahía por el viento o por el flujo de agua durante la época de lluvias.

De acuerdo a la SARH 1979, la calidad del agua en el término de coliformes, ha estado siempre por debajo de los límites establecidos por la FDA y cumple con los requisitos del Gobierno Mexicano y los requerimientos establecidos por el Programa Mexicano de Sanidad de Moluscos Bivalvos (PMSMB), para la exportación de moluscos cultivados.

Otro estudio en Bahía Falsa usando el método del número más probable (documentó valores bajos en coliformes fecales en ocho estaciones de muestreo, pero en el invierno de 1992-93 los valores medios se dispararon más alto de lo usual (264 TC ml^{-1} y 29 FC 100 ml^{-1}). Debido a la alta precipitación pluvial (en Enero de 1993 fue de 376 mm) lo que causó una gran afluencia de aguas a la bahía, esto trajo consigo un decremento en la salinidad y un incremento en la concentración de bacterias coliformes por arriba de los 2,400 T°C 100ml^{-1} y 140 FC 100 ml^{-1} . La productividad primaria esta dominada por

el fitoplancton (~60%) y los pastos marinos (~30%). La productividad primaria (clorofila a) decrece de la boca al interior de la laguna. El efecto de las mareas fue registrada por la variación diurna observada en clorofila. (Gutiérrez-Galindo y Flores-Muñoz, 1982; Cajal- Medrano, 1979; Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1984; Flores-Báez, 1987; Jiménez-Castro, 1993; Verdeja-García. y Aguirre, 1988; Smith *et al.*, 1997)

La concentración de nutrientes (fosfatos y silicatos) aumenta usualmente de la boca hacia el interior de la laguna, y es más alta dentro de la laguna que en el mar. Los valores máximos son de 4 mM para fosfatos y más de 38 mM para silicatos. La concentración de nutrientes en la boca es más alta durante el verano que en el invierno, debido al efecto de las surgencias como se ve en la Tabla 3.

Tabla 3.- Concentración de nutrientes en Bahía falsa.

Parámetros	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Fuente
T C	13-26	17-21.5	15.0-17.5	12.0-18.5	1,2
S%	34.5-36.5	33.0-35.0	33.0-36.50	34.25-37	1,2
O ₂ ml/l	4.0-7.0	3.0-5.0	5.5-7.5	5-7.5	1,2
PH	8.2-8.5	8.0-8.3	8.1-8.3	8.1-8.4	6,1,2,8
% Sat O ₂	-	67-110	100-140	100-140	1,2,8
Nitratos	0.6-1.4	0.30-.64	-	0.40-1.48	3
Fosfatos		1.1-3.2	0.61-4.36	0.7-2.30	3
Silicatos		7.0-20	5.0-38.5	-	3
P. primaria (mg C/m ³ /día)	39.9	23.6	10.6	9.0	4,7
Clorofila a mg/m ³	0.8 a 15.7	0.00-8.56	0.0-5.8	1.0-3.7	5,9

1) Chávez Nishikawa y Álvarez Borrego, 1974. 2) Álvarez Borrego *et al.*, 1975. 3) Álvarez Borrego y Chee Barragán, 1976. 4) Álvarez Borrego, Lara Lara y Acosta Ruiz 1977 5) Millán-Núñez y Álvarez-Borrego, 1977. 6) Álvarez Borrego, Acosta Ruiz y Lara Lara, 1977. 7) Parra Valdez, 1976. 8) Ballester-Grijalva, 1975. 9) Lara Lara y Álvarez-Borrego, 1975.

3.3.3 Mareas

Las mareas en BSQ tienen unos componentes astronómicos principales con señales semidiurnas y modeladas por vientos (ó meteorológicas). La media en el rango de las mareas es de 2.22 m, con una media en el rango de mareas equinocciales de 3.18 m. Las mareas astronómicas son el principal factor en la dinámica de las aguas en el área. La corriente de marea es unidireccional en respuesta al flujo de marea y de manera muy fuerte a lo largo de los canales longitudinales, especialmente durante el reflujo. (Rango 25-40 cm. /sec). Las olas provocadas por la marea se propagan lentamente en las aguas someras de BF más que en BBSQ. El efecto de las mareas meteorológicas es más importante cerca de la cabeza de BBSQ que en la boca de BF. (Ocampo-Torres, 1980; Del-Valle-Lucero y Cabrera-Muro, 1981; Lara-Lara, 1979).

3.3.4 Hidrodinámica

La hidrodinámica de la BSQ, ha sido estudiada desde la década de los 70's (Chávez-Comparan, 1973; Chávez-Nishikawa y Álvarez-Borrego, 1974; Álvarez-Borrego *et al.*, 1977; Del-Valle-Lucero y Cabrera-Muro, 1981). En estos primeros trabajos se describe la importancia que juega la marea en la circulación de la bahía. En general, se puede decir que la variabilidad dinámica de Bahía de San Quintín son: mareas, vientos, surgencias y radiación solar.

La hidrodinámica de la BSQ, de acuerdo a los antecedentes presentados, es gobernada por los procesos físicos siguientes:

- Mareas: Componente semidiurna y diurna contribuyen proporcionalmente a su variabilidad y sus procesos advectivos son importantes Ocampo-Torres (1980).

- Vientos: Sistema de brisas y vientos asociados a surgencias son las características predominantes. La dirección predominante del viento es del NW con una velocidad promedio de 7 m/s y variación diurna.
- Efectos de fricción.
- Márgenes de inundación.
- Gradientes de densidad mínimos: no hay aportes de agua dulce significativos y aunque la evaporación y alta salinidad caracterizan a la bahía, no se alcanza a formar una estructura vertical por efectos turbulentos debidos a la marea principalmente. (Plascencia-Díaz, 1980; Monreal-Gómez, 1980; Martori-Oxamendi, 1989).

Los efectos de rotación no son significativos dado que la longitud característica de la BSQ que es de 12 Km., aproximadamente, y el radio de deformación de Rossby para la latitud a la que se encuentra es del orden de 120 Km., diez veces más que la longitud característica considerada para la bahía. Sin embargo, es importante considerar este factor para la estimación e interpretación de las corrientes residuales para un cuerpo de agua costero. (Winant, 2004).

Debido a lo poco profundo de la BSQ y a la turbulencia causada por las corrientes de marea no se aprecian gradientes verticales significativos de densidad, temperatura y salinidad en la bahía. En general, a lo largo de todo el año, se presentan gradientes horizontales de temperatura y salinidad, con valores que se incrementan de la boca a los extremos de la bahía. En algunas ocasiones durante el invierno, con temperaturas del aire entre 0-4°C, los gradientes se invierten con valores de 15° en la boca y de 12° en los extremos. Las bajas temperaturas son el resultado de eventos de surgencias durante el verano en el frente marino a BSQ. La BBSQ tiene mayor salinidad que BF, en promedio 1°/‰ mayor. Esto se debe en gran medida al tiempo de residencia mayor de BBSQ respecto a BF. La salinidad en los extremos de la bahía puede variar de 37°/‰ a 33°/‰ (Lara-Lara, 1979).

Aunque se sabe que los ciclos de marea y radiación solar causan cambios en las propiedades de agua en la BSQ, esta no ha sido adecuadamente registrada ya que los muestreos hechos sólo cubren periodos cortos de tiempo. (Ver por ejemplo: Chávez-Nishikawa y Álvarez-Borrego, 1974 y Álvarez-Borrego y Nájera, 1979).

4 Procesos físico-biológicos acoplados

4.1 Marco teórico

El estudio conjunto de procesos físicos y biológicos asociados a la PP de un sistema acuático es relativamente reciente y se ha enfocado principalmente a condiciones oceánicas y muy poco a lagunas costeras. (Ver: Platt y Denman, 1975; Wroblewski, 1983; Franks, 1986; Fasham *et al.*, 1990; Chen *et al.*, 1997; Denman, 1997; Stones *et al.*, 1999; entre otros).

El acoplamiento de estudios, información de campo y de modelación de procesos físicos y biológicos, en general, enfrenta -en su estado de arte- el problema de la compatibilidad de escalas espacio-temporales y la parametrización de los procesos involucrados -uno de ellos es la Productividad Primaria-. Particularmente, el conocer la correlación entre los agentes causales y las respuestas del sistema es algo que se busca definir claramente en los estudios de productividad en ambientes acuáticos (ver: Stones *et al.*, 1999; Arrigo *et al.*, 1998; Hofmann y Powell, 1998; Franks, 1995; Gordón, 1996; entre otros).

4.1.1 Panorama general sobre modelos acoplados

En este campo de estudio, existen dos importantes vertientes. La primera está enfocada al análisis de series de tiempo de variables físico-biológicas del cual se infieren sobre sus posibles interconexiones en términos estadísticos (ver por ejemplo:

Makas (1998) y Hollowed (1992) y la segunda vertiente que enfoca sus esfuerzos en el desarrollo de modelos que acoplan componentes biológicos y físicos para analizar así sus posibles *interdependencias* (ver por ejemplo: Walsh y Dugdale, 1971; Haidvogel *et al.*, 1991, Franks, 1995; Denman, 1997; Chen *et al.*, 1997).

En un contexto global, los modelos acoplados particularmente los físico-biológicos, han tomado una gran relevancia en el estudio de fenómenos como el calentamiento global, el Niño, la destrucción de la capa de ozono, entre otros. Este tipo de trabajos ha puesto de manifiesto lo importante que resulta considerar las interacciones físico-biológicas para inferir los posibles efectos -a corto, mediano y largo plazo- de una acción antropogénica sobre su ambiente Franks (1995).

Organizaciones como GLOBEC (Global Ocean Ecosystem Dynamics) y LOICZ (Gordón, 1996), entre otras, han canalizado sus esfuerzos para formar grupos multidisciplinarios de expertos y recabar información que les permita emitir recomendaciones sobre el estudio de procesos de manifestación global.

El planteamiento de un esquema físico-biológico acoplado puede ir de lo sencillo a lo complejo, como lo señala Dusek (1997) y Eckman (1994). Un proceso biológico en un ecosistema costero se torna multivariado cuando queremos añadir a su descripción la componente hidrodinámica. Sin embargo, debe quedar claro que para describir la dinámica de ambientes costeros es necesario incluir en sus predictores las interconexiones entre lo físico y lo biológico, es decir, entre lo biótico y lo abiótico.

Los nutrientes, son dispersados por las corrientes en una laguna costera y potencialmente los ponen a disposición de organismos que no pueden obtenerlos por sus propios medios; la oxigenación de un cuerpo de agua se maximiza cuando en su interfase con la atmósfera se intensifican los efectos turbulentos (Libes, 1992). Estos son ejemplos de procesos acoplados que se dan a diferentes escalas de tiempo y espacio en un cuerpo de agua costero.

Los modelos clásicos de componentes biológicos y físicos acoplados están representados por los llamados FZN (Fitoplancton, Zooplancton y Nutrientes), los cuales reproducen la dinámica poblacional del fitoplancton y zooplancton en función de una disponibilidad de nutrientes que es advectada y/o difundida por un determinado patrón hidrodinámico (Henderson, 1996).

Resulta valioso generar modelos numéricos que simulen el comportamiento de variables oceanográficas y ambientales que intervienen en la evolución de una zona costera. La adecuada aplicación de estos modelos puede apoyar la toma de decisiones que conduzcan a un mejor desarrollo de estas regiones.

La modelación numérica de ambientes costeros ha sufrido, en los últimos años, una depuración gracias al advenimiento de nuevas tecnologías de computación, información satelital y mejores aparatos para medir variables oceanográficas; esto ha fortalecido la capacidad de predicción en estas regiones (Carey y Yuen, 1992). Se ha puesto especial atención a desarrollar modelos que describan los esquemas de contaminación de las aguas costeras producto de la descarga de aguas residuales o derrames de hidrocarburos (v.g. Lam, 1984). Sin embargo, la mayoría de los modelos dependen de un proceso de calibración para validar sus resultados. En muchos casos, recabar la información de campo necesaria para calibrar un modelo resulta altamente costosa ya sea por el equipo requerido y/o por la temporalidad de los muestreos (Grant, 1986).

El desarrollo en las zonas costeras de nuestro país ha sufrido una evolución anárquica como consecuencia de la falta de una adecuada planeación y ordenamiento de su crecimiento. El agotamiento de recursos, esquemas graves de contaminación de cuerpos de agua, procesos erosivos, asolvamiento intensos, modificaciones de usos de suelo no compatibles con la vocación natural, etc., son los principales indicadores de esta problemática ambiental que enfrenta la zona costera.

Para alentar un desarrollo sustentable de las zonas costeras, es necesario contar con herramientas adecuadas de evaluación tanto del manejo de los recursos naturales

propios de estas regiones, como de técnicas de proyección -simulación dinámica-. Así, podrán ser evaluados los proyectos de desarrollo compatibles con las vocaciones naturales y las políticas establecidas por un sistema de administración ambiental del área costera.

En la actualidad, por ejemplo, un modelo de dispersión de contaminantes en cuerpos de agua no involucra o contempla los efectos indirectos a causa de los esquemas de desarrollo a mediano y largo plazo que se tengan contemplado en el área en estudio. Esta condición limita el establecer eficientes sistemas de administración de zonas costeras. (Lam, 1984 y Sherwin, 1992).

4.2 Modelo Hidrodinámico

Basándose en el esquema presentado en la sección 3.3.4., se aplica un modelo barotrópico bidimensional que considera efectos de fricción de fondo y forzado por mareas y viento para reproducir el patrón hidrodinámico de BSQ.

4.2.1 Ecuaciones que gobiernan la hidrodinámica en la BSQ.

La hidrodinámica en la BSQ, se reproduce con las ecuaciones de conservación de momentum horizontal y conservación de masa para aguas someras para el caso barotrópico, bidimensional y no-divergente Johns (1983). Los agentes considerados que fuerzan al sistema son la marea, viento y el efecto de fricción con el fondo. El sistema de ecuaciones asociadas es:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_M \nabla_H^2 u + \mathfrak{T}_{sx} - \mathfrak{T}_{bx} + fv, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_M \nabla_H^2 v + \mathfrak{T}_{sy} - \mathfrak{T}_{by} - fu, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [u (h + \eta)] + \frac{\partial}{\partial y} [v (h + \eta)] = 0, \quad (3)$$

donde η , es la elevación de la superficie, u y v son las componentes x y y de la velocidad verticalmente promediada, respectivamente, h es la profundidad, g es la aceleración de la gravedad, f , parámetro de Coriolis, A_M es el coeficiente de difusión horizontal y, $\mathfrak{S}_s$ y $\mathfrak{S}_b$, son los elementos de fricción de superficie y fondo, respectivamente. Aquí, el término ∇^2 es el operador Laplaciano horizontal.

El término del esfuerzo de fricción superficial por efecto del viento se estima como:

$$\mathfrak{S}_s = \frac{1}{2} \rho_a C_D \vec{V} |\vec{V}|, \quad (4)$$

Donde, ρ_a es la densidad, C_D es el coeficiente de arrastre y $\vec{V}$, la velocidad del viento. El coeficiente de arrastre del viento se define por la fórmula $10^3 C_D = 0.61 + 0.063 |\vec{V}|$ para $6 \text{ m s}^{-1} < |\vec{V}| < 22 \text{ m s}^{-1}$ y para $|\vec{V}| < 6 \text{ m s}^{-1}$. C_D es igual a 1.1×10^{-3} (Gill, 1982).

El esfuerzo de fricción de fondo es según Bowden (1983):

$$\tau_b = C_b \frac{\vec{u}^2}{h} \quad (5)$$

Donde, C_b representa el coeficiente de fricción de fondo. Considerando un fondo lodoso, C_b varia de 0 a 0.25 (Fischer, 1970) usando el valor de 0.20 en todas las simulaciones. La variable h , representa la profundidad y u , el vector de velocidad de corriente.

4.2.2 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera aplicadas al modelo hidrodinámico son: para las fronteras rígidas, los gradientes normales son cero y los flujos tangenciales a esta también son definidos nulos; en la frontera abierta (Orlansky, 1976), el modelo se fuerza por marea a través del término de gradientes de presión en la ecuación de movimiento (6) con la función (Leendertse, 1967):

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \theta_i), \quad (6)$$

Donde, η representa la altura de marea para el tiempo ' t ' en la frontera abierta, A_i , ω_i , y θ_i representan la amplitud, frecuencia y fase de la i -ésima componente de marea y ' n ' número de componentes armónicos considerados.

El esquema de marea que se fuerza en la boca de BSQ incluye las componentes de marea características para la bahía según Ocampo-Torres (1980), las cuales se describen en la Tabla 4.

Tabla 4.- Principales componentes de marea para la Bahía de San Quintín, B.C. (Ocampo-Torres, 1980).

Componente de marea	M ₂	K ₁
Frecuencia [ciclos/hr]	0.0851	0.04155
Amplitud [m]	0.48	0.31
Fase [grados]	285.2	95.6

4.2.3 Esquema numérico y criterio de estabilidad

El sistema de ecuaciones (1, 2 y 3) se resuelve usando un método explícito de diferencias finitas sobre una malla tipo Richardson y la evolución en tiempo se resuelve usando el esquema de "salto de rana". Como criterio de estabilidad, se usa la condición de Courant-Friedrich-Lewis (CFL) donde el incremento del tiempo y espacio quedan relacionados como (Dawson *et al.*, 1983).

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{gh_{\max} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)}}, \quad (7)$$

Donde, $h_{\max}$ es la profundidad máxima en la bahía (=10.5 m), ' g ', es la gravedad (9.81 m/s²) y $\Delta x = \Delta y = 250$ m, son los incrementos de la malla. De esta manera el incremento del tiempo, Δt , deberá ser menor a 17 segundos para evitar problemas de inestabilidad numérica. El dominio numérico del modelo es de 12.5 km de largo y 6 km de ancho.

4.2.4 Resultados de modelación hidrodinámica

Para reconstruir el comportamiento hidrodinámico de BSQ, se consideraron una serie de experimentos numéricos. Un primer grupo de experimento se enfocó a analizar los patrones de circulación ante distintos esquemas de forzamiento (ver tabla 5), definiendo para los casos presentados los campos de corrientes y verticidad residual. En segundo grupo de experimento se planteó para analizar los procesos de transporte en BSQ, particularmente se estudió el caso de las aportaciones esporádicas del Arroyo San Simón. El tercer experimento consistió en un análisis de trayectorias lagrangeanas para determinar tiempos de residencia dentro de la bahía y buscar una zonificación de estos.

Tabla 5.- Conjunto de experimentos numéricos para definir los diferentes escenarios hidrodinámicos en la BSQ bajo distintos esquemas de forzamiento.

4.2.4.1.1 Condición de forzamiento				
Experimento	Componente de marea		Viento	
	M₂	K₁	Brisa SE (5 m/s)	NW (7 m/s)
1	x			
2		x		
3	x	x		
4	x		X	
5	x			x
6		x	X	
7		x		x
8	x	x	X	
9	x	x		x

La calibración del modelo hidrodinámico fue hecha usando datos históricos de campañas de campo a través de un corrientímetro instalado en BF durante 3 meses, un sensor de temperatura localizado en Bf cubriendo dos periodos anuales y mediciones de nivel del mar con variación anual (García-Esquivel, 2000).

4.2.5 Escenarios hidrodinámicos de BSQ

En esta sección se describen los patrones hidrodinámicos de la BSQ bajo distintos escenarios de forzamiento.

4.2.5.1 Forzamiento por mareas (experimentos 1, 2 y 3, ver Tabla 5)

Como ya se mencionó anteriormente, los patrones de circulación simulados corresponden a distintos esquemas de forzamiento. El forzamiento armónico mas importante que se consideró para BSQ fue M_2 y K_1 de acuerdo con Ocampo-Torres, 1980. Inicialmente, el modelo se corre hasta que se alcanza una condición de respuesta, es decir, los patrones son similares para cada ciclo simulado. La elevación de la superficie en distintos puntos de control de la bahía así como sus desfases de marea encontrados corresponde a los reportados por Martori-Oxamendi (1989) y Ocampo-Torres (1980). Un análisis espectral de los resultados encontrados muestra un pico bien definido relacionado a un periodo de 6 horas asociado a efectos friccionales como previamente reporta Martori-Oxamendi (1989). La propagación de la señal de marea no presenta una distorsión importante en BF sólo una muy ligera en BSS, con un desfaseamiento aproximado de 45 minutos.

Experimento 1. Este escenario corresponde sólo a un forzamiento de marea con el armónico M_2 . Las corrientes residuales encontradas se presentan en la Fig. 2. a, mostrando una estructura importante a lo largo de los canales y en la boca de la bahía que se manifiesta dinámicamente muy activa. Altos valores de verticidad relativa (Fig. 2.b) se encuentran tanto en los canales principales, en la boca y en pequeñas regiones en la parte alta de BSS, esto relacionado a efectos de fuertes efectos de fricción de fondo.

Experimento 2. Para un escenario de simulación forzando sólo con el armónico de marea K_1 . Las corrientes residuales encontradas son muy débiles, no presentan patrones de circulación importante a lo largo de los canales (Fig. 3) como los que se distinguen para el caso M_2 .

Experimento 3. La figura 4, muestra las corrientes residuales correspondientes a cos de forzamiento con la suma de armónicos K_1 y M_2 . Referente a las residuales para éste caso, se elaboraron tres experimentos complementarios, K_1+M_2 en mareas vivas, muertas y en la transición. Promedias en un periodo de M_2 .

4.2.5.2 Forzamiento combinado por marea y esfuerzo del viento (Experimentos 4, 5, 6, 7, 8 y 9, ver Tabla 5)

En esta segunda serie de experimentos, el modelo es igualmente inicializado con solo el forzamiento de marea hasta que se llega a una condición estable (de 10 a 15 periodos, aproximadamente) y posteriormente se activa el forzamiento por viento. En las figuras 5 y 6, se representan las corrientes residuales para un forzamiento con el armónico de marea M_2 y un forzamiento por viento para un régimen de brisas y para los vientos dominantes del NW (reportados como vientos dominantes para BSQ, Arreola-Contreras, 1989), respectivamente.

En el primer caso (fig. 5), los vientos soplan de noroeste durante el día y del sureste durante la noche con una intensidad que varía de 0 a 8 m s^{-1} (Arreola-Contreras, 1989). En el segundo caso (fig. 6), la dirección del viento se mantiene por un periodo continuo de 36 horas con intensidades hasta de 10 m s^{-1} (Del Valle Lucero, 1981a).

Para el régimen de brisas (fig. 5), las corrientes residuales presentan alto valor a lo largo de los canales principales y se forman celdas de circulación en BF y en la parte baja de BSS. La formación de contracorrientes es un rasgo importante en este caso, sobre todo en la boca de la bahía y parte intermedia de BSQ; estos últimos resultados ya habían sido discutidos por Del Valle (1981a y 1981b) y Martori-Oxamendi (1989).

Las corrientes residuales en la boca de la boca de BSQ por un retardo en la onda de marea y por un balance de continuidad en la circulación. (Ver Fig. 2, 5 y 6).

Las celdas de circulación que se forman en BF, presentan un giro anticiclónico permanente que se debilita con la afluencia o la salida de la marea indistintamente. La celda de circulación que se forma en la parte sureste de BSQ cambia de sentido, es ciclónica cuando sube la marea y anticiclónica cuando baja. Cuando la marea sube, se

intensifican los patrones de circulación sobre los canales principales, formando contracorrientes laterales a éstos.

En las Fig. 7 y 8 se ilustra la respuesta hidrodinámica ante un forzamiento por marea con los armónicos $K_1 + M_2$ y régimen de vientos de brisas y NW, respectivamente. El patrón de verticidad para los vientos del NW y forzamiento con marea $K_1 + M_2$ (fig. 8b) muestra que se da una fuerte mezcla a lo largo del canal principal y la boca de BSQ, con un giro permanente en BF.

Los patrones de corriente y verticidad en BSS, muestran una estructura compleja con formación de numerosas celdas de circulación (fig. 6a, b). La condición local de BSS y estructura de circulación la aíslan en gran parte de la influencia de la boca, al formarse un giro permanente en la parte baja de este brazo de la bahía, que reduce el intercambio de agua de esta parte de BSQ.

Una vez que los patrones de viento se modifican, se da un rápido cambio en los esquemas de circulación y verticidad (fig. 7b y 8b). La inversión de la corriente residual muestra una importante dependencia de las condiciones de viento. La verticidad se intensifica en la boca y parte central de BSQ, mostrando la formación de una débil celda de circulación en BF.

4.2.5.3 Descarga del Arroyo San Simón

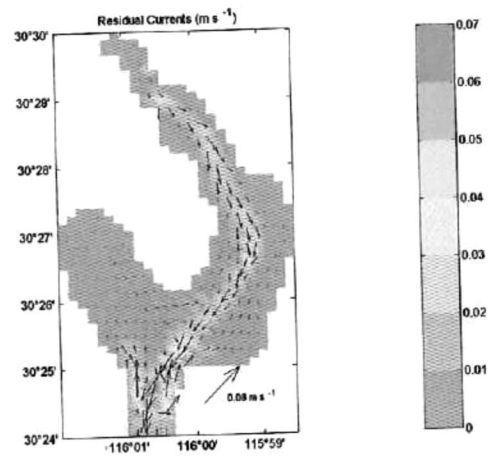
Para analizar la influencia de los aportes de Arroyo San Simón a la bahía, se modeló el transporte de un elemento conservativo. Se consideró un flujo de descarga permanente del ASS hacia la bahía por un periodo largo con una concentración de 1000 unidades por punto de malla. Las simulaciones del efluente muestran una estructura que no es muy sensible ante la intensificación de vientos menores a 4 m s^{-1} . Cuando la velocidad del viento, $|\vec{V}|$ se incrementa de 4 m s^{-1} a 8 m s^{-1} , se intensifican entonces los patrones

de dispersión del elemento conservativo simulado. Las celdas de circulación causan la formación de manchones producto de la acumulación de material en su centro. (fig.9).

4.2.5.4 Trayectorias Lagrangeanas y tiempos de residencia

De acuerdo a la simulación de trayectorias lagrangeanas que se implantó con el modelo., la BSQ se puede clasificar en 4 grandes regiones en función de los tiempos de residencia encontrados (fig. 11). La Región I, la más dinámica, incluye la boca de la bahía y los canales principales de ésta, presentando tiempos de residencia que van de 5 a 6.5 horas. La Región II, la parte alta de Bf, presenta tiempos de residencia que van de 3.4 a 4.5 días. La Región III, que corresponde a la parte baja de BSS e interfase entre los dos brazos de la bahía, presenta tiempos de residencia de 5.5 a 8.5 días. La ultima, Región IV, que corresponde a la parte alta de BSS (la zona más alejada de la boca) presenta los tiempos de residencia mayores de la bahía, que en promedio son de 21 días (fig.10).

a)



b)

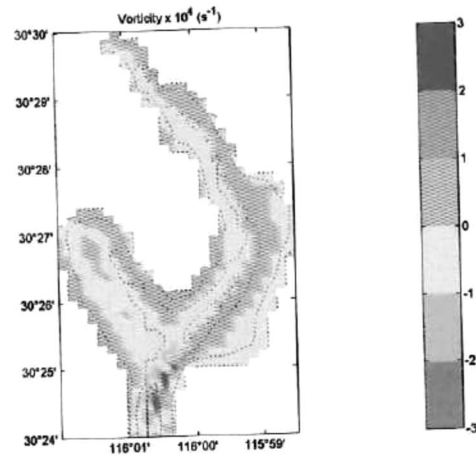
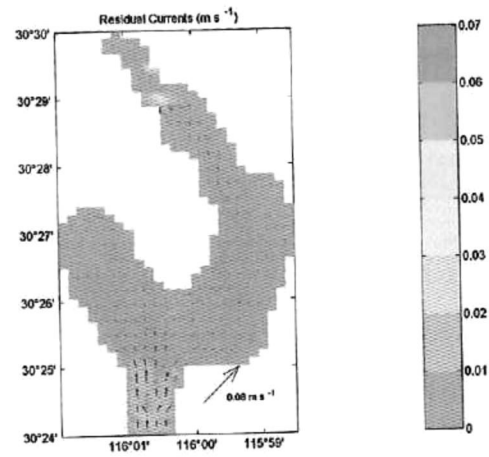


Figura 2.- Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para M2 a) Corriente residual. b) Campos de vorticidad.

a)



b)

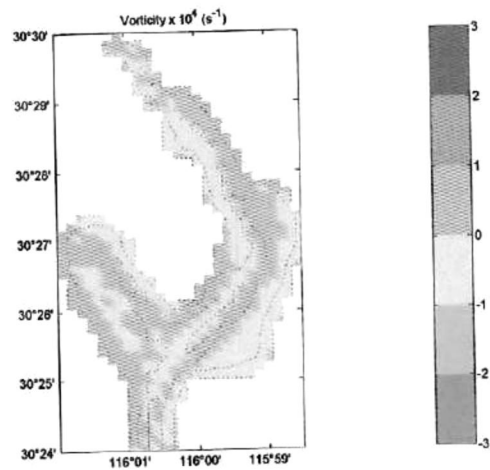
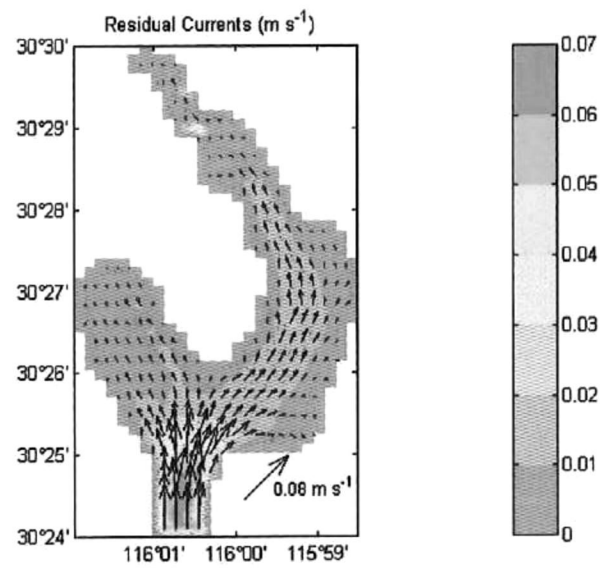


Figura 3.- Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para K1 a) Corriente residual. b) Campos de vorticidad.

a)



b)

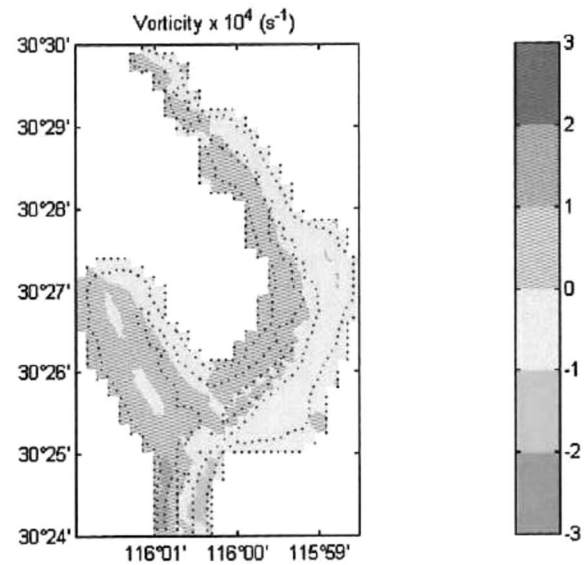
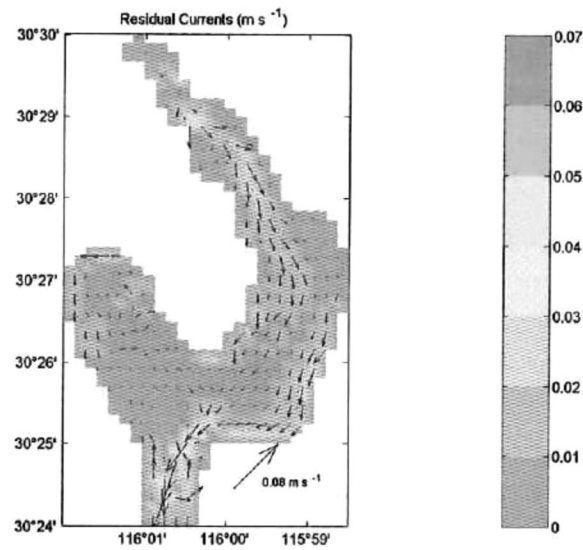


Figura 4.- Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para $M_2 + K_1$ a) Corriente residual. b) Campos de vorticidad.

a)



b)

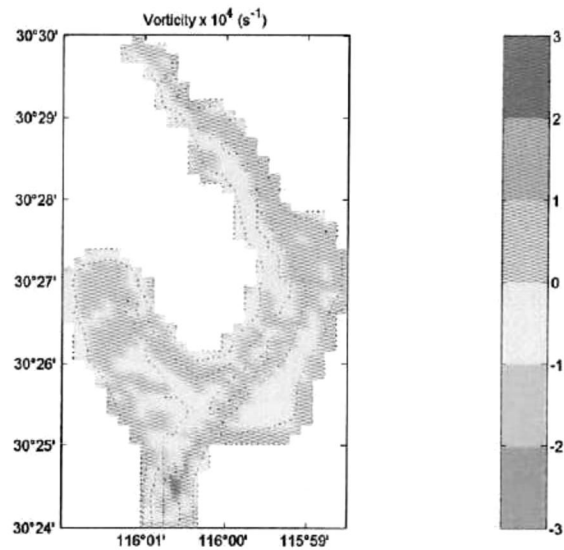
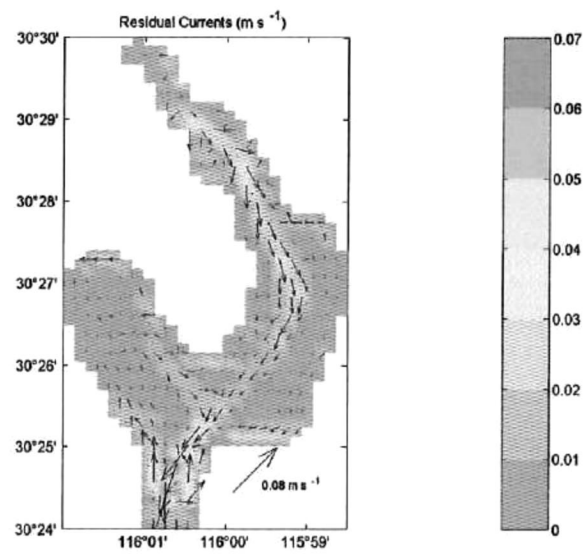


Figura 5. Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para M2 + sistema de vientos de brisa
a) Corriente residual. b) Campos de vorticidad.

a)



b)

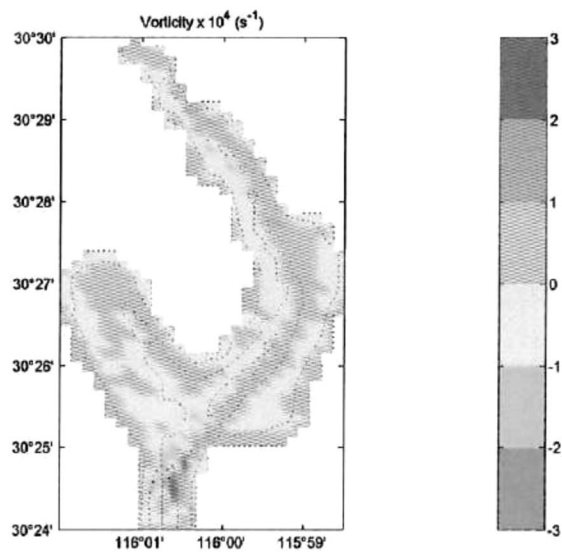
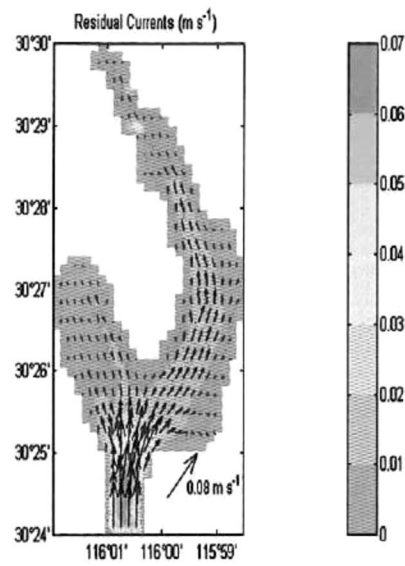


Figura 6.- Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para M2 y vientos del NW a) Corriente residual. b) Campos de vorticidad.

a)



b)

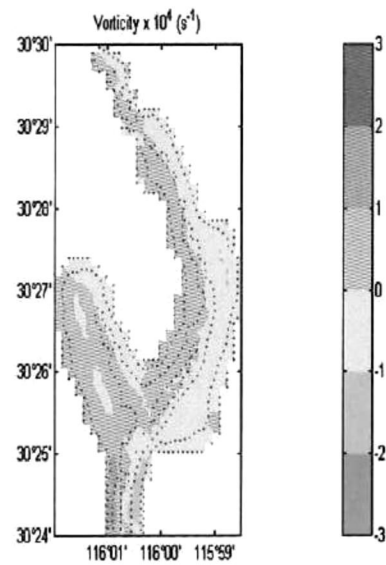
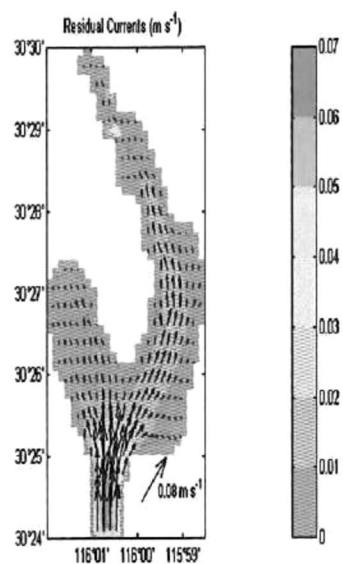


Figura 7.- Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para M2 + K₁ mas vientos de brisa a) Corriente residual. b) Campos de vorticidad.

a)



b)

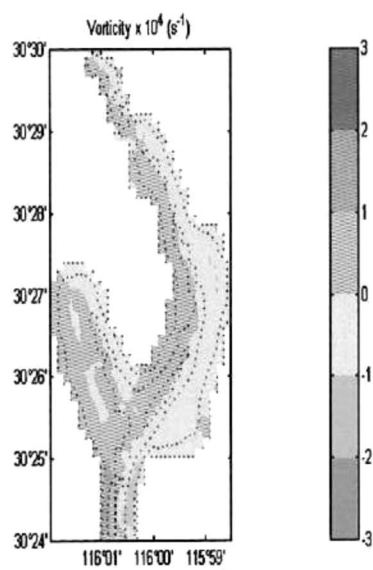


Figura 8. Patrones de circulación de la Bahía de San Quintín para $M2 + K_1$ mas vientos del NW a) Corriente residual. b) Campos de vorticidad.

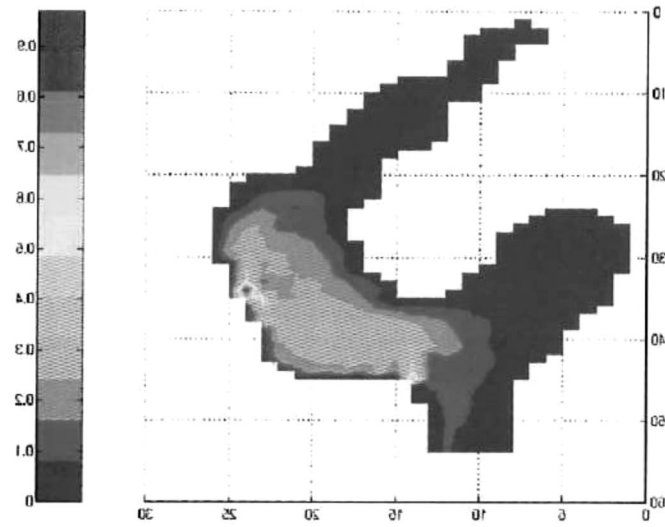


Figura 9. Contornos de concentración promedio asociados a las descarga del Arroyo San Simón para un elemento conservativo y relativos a un periodo de 45 días de simulación y un forzamiento con M_2 y vientos en sistema de brisas.

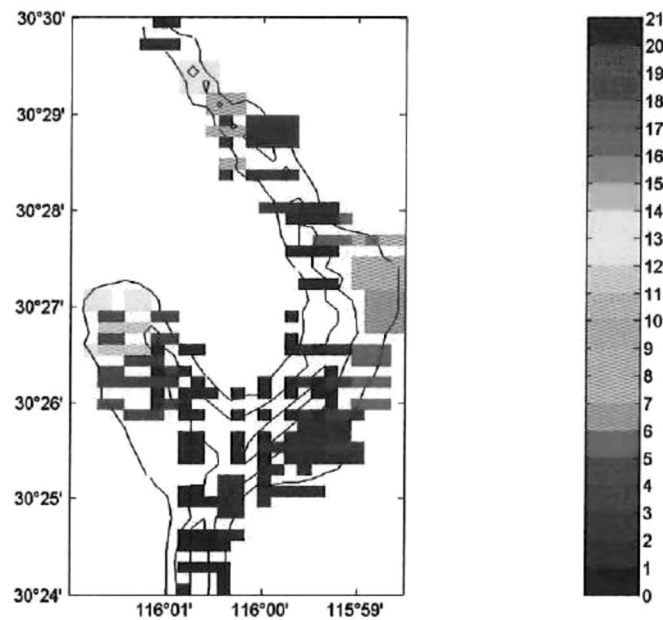


Figura 10. Representación espacial de tiempos de residencia (días) en la Bahía de San Quintín, B.C., obtenidos por aproximación numérica para distintos puntos dentro de la bahía.

4.2.6 Conclusiones sobre la Hidrodinámica de BSQ

Las comparaciones de los resultados obtenidos con el modelo muestran una adecuada correlación con datos de campo reportados en la bibliografía y con patrones de circulación extrapolados con mediciones puntuales de corrientes.

El forzamiento por marea con el armónico M_2 , es el principal mecanismo que define la hidrodinámica de BSQ. Los vientos, intensifican la formación de celdas de circulación y contracorrientes residuales, principalmente en BF y en la boca de la bahía.

La marea efectivamente es el principal agente que fuerza la dinámica en la bahía como lo definió Del Valle Lucero (1981a y 1981b), Plascencia-Díaz (1980) y Martori-Oxamendi (1989). Sin embargo, el viento y los efectos de fricción, en ese orden, juegan un papel determinante en la formación de patrones de circulación –giros y contracorrientes- que definen patrones de transporte y controlan los tiempos de residencia dentro de BSQ.

Los tiempos de residencia estimados a través del seguimiento de trayectoria lagrangeanas están muy en acuerdo con los datos reportados por Juárez-Villareal (1982). Sin embargo, la aproximación numérica permitió reconocer que sólo la parte alta de BSS tiene los tiempos de residencia más altos y la parte baja de BSS intercambia sus aguas no solo por la boca de BSQ sino que aporta un agua a BF a través de una contracorriente pegada a la costa norte en la zona del canal principal de la bahía.

El patrón de dispersión del Arroyo San Simón muestra que su zona de influencia está definida por la parte baja de BSS y parte sur del canal principal de BSS que funciona como barra y aísla a BF de la influencia del arroyo, aunque bajo ciertas condiciones de viento (no mostradas) puede llegar hasta esta parte de la bahía.

Los patrones de circulación residual obtenidos forzando el modelo con la componente de marea M_2 y bajo condiciones de viento en régimen de brisas son los que mas se

apegan a los resultados de campo reportados por Martoti-Oxamendi (1989). Esto refuerza la hipótesis de Ocampo-Torres (1980) y Del Valle Lucero (1981a y 1981b) de que la frecuencia M_2 de la marea explica el mayor porcentaje (>70%) de la variabilidad de la circulación en BSQ.

Tomando en cuenta los patrones de circulación mostrado en la figura no.5, los cuales se obtienen con forzamiento de marea M_2 y bajo condiciones de viento en régimen de brisas se identifica que:

Se forman dos celdas de circulación permanentes en BSQ. Una de ellas en la parte alta de BF con verticidad negativa. Otro giro, se forma en la parte sur de BSQ, entre su dos brazos, siendo de mayor extensión que el primer giro y con verticidad positiva.

La corriente principal en BSQ, esta asociada a sus canales y afecta directamente hasta la parte baja de BSS. El patrón de vorticidad asociada, indica una intensa mezcla sobre los márgenes de los canales principales de la bahía.

Se forman tres principales sistemas de contracorriente dentro de la bahía. Dos de éstas, están asociadas a las márgenes de la boca y que están reportadas por Martoti-Oxamendi (1989). La contracorriente norte de la boca modula el intercambio de agua en BF mientras, que la contracorriente de la margen sur influye en los patrones simulados de dispersión de la descarga del arroyo San Simón. La tercera contracorriente se forma en la parte norte del canal que comunica a ambos brazos de la bahía, ésta contracorriente lleva aguas de BSS a BF definiendo tiempo de residencia para éstas aguas que pueden ser mayores a 30 días.

El patrón de circulación identificado para BSS indica, que ésta funciona como una extensa llanura de inundación con una intensa mezcla hacia el centro de ella. Sólo en su parte alta, las corrientes son nulas y manifiesta los tiempos de residencia más altos encontrados (>21 días).

4.3 Modelo de la Dinámica Biológica

4.3.1 Dinámica de Fitoplancton, Zooplancton y Nutrientes

Una forma de evaluar la productividad de un sistema acuático es analizar la dinámica de su nivel trófico primario representado por el plancton y comunidades bentónicas como las bacterias Mann y Lazier (1996).

En un estudio sobre flujo de nutrientes en la interfase agua sedimento en una laguna costera se concluyó, que el estancamiento de materia orgánica en sedimentos conduce a la liberación de PO_4 y NH_4 . El amonio es fijado en una tasa más lenta que el fosfato y sólo bajo condiciones tóxicas. El estancamiento produjo una alta redistribución de amonio de los sedimentos; el micro biota fue responsable de 1/3 de la fijación sedimentaria y el plancton de 1/4 del consumo. El NH_4 fue disminuido en 25% por la productividad primaria, cerca del 30% por el micro biota y menos del 50% fue fijado por cambios o reacciones físico-químicas {Arenas-Fuentes90}.

El proceso bioquímico de liberación de nutrientes en la interfase agua-sedimento no está controlado por la carga orgánica sino por la naturaleza, estado y micro ambiente biótico (De-La-Lanza, 1987).

4.3.2 Simulación de la dinámica de FZN en Bahía de San Quintín

No se cuenta con algún antecedente de un estudio en la BSQ donde se trate la dinámica de FZN acoplada con la hidrodinámica de la bahía de manera específica. Sin embargo, se cuenta con trabajos que tratan por separado alguno de estos tres componentes (Farfán, 1981; Álvarez-Borrego *et al.*, 1977; Lara-Lara, 1979). Por esto, nos referiremos a la Dinámica de FZN desde el punto de vista conceptual y hablaremos del planteamiento, mecanismos y procesos que los relacionan y su modelación de forma conjunta con la hidrodinámica local.

La dinámica de FZN tiene sus antecedentes en los modelos clásicos de Depredador-Presa desarrollado por Lotka-Volterra (Wroblewski, 1983). En términos de dinámica de poblaciones, un modelo simple de FZN es un modelo ataxonómico (Mann y Lazier, 1996), es decir, no distingue entre las diferentes especies que integran cada uno de los componentes. El zooplancton queda representado por su fracción herbívora, los nutrientes son totales y se refieren a los inorgánicos disueltos y finalmente el fitoplancton integra a todos los organismos autótrofos planctónicos.

La forma de trabajar conjuntamente FZN, es a través de concentraciones de biomasa equivalente en términos de nitrógeno (ver por ejemplo: Steele y Henderson, 1981; Wroblewski, 1983; Fasham *et al.*, 1990).

4.3.2.1 Ecuaciones que gobiernan la Dinámica de FZN

Las ecuaciones que gobiernan la dinámica de FZN surgen de expresar estos campos en términos de biomasa y de analizar los procesos que definen sus fuentes y sumideros como sigue (Fasham *et al.*, 1990):

i) Fitoplancton

$$\frac{dP}{dt} = \frac{V_m N}{(k_s + N)} f(I_0) P - mP - R_m \Lambda P (1 - e^{-\Lambda P}) Z \quad (8)$$

ii) Zooplancton

$$\frac{dZ}{dt} = (1 - \gamma) R_m \Lambda P (1 - e^{-\Lambda P}) Z - gZ \quad (9)$$

iii) Nutrientes

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{V_m N}{(k_s + N)} f(I_0)P + mP + gZ + \gamma R_m \Lambda P(1 - e^{-\Lambda P})Z. \quad (10)$$

Donde,

$P + Z + N = N_t$; para el caso no advectivo ni difusivo

Tabla 6.- Definición de variables y parámetros para el modelo biológico de Fitoplancton, Zooplancton y Nutrientes.

Parámetro	Definición	Valor típico	Razón adimensional	Referencia
g	Razón de mortandad del Zooplancton	0.2 día^{-1}	$g/V_m = \omega$	Edwards, 1999.
k_s	Constante de saturación de asimilación media de nutrientes	$0.1 \text{ } \mu\text{g de N/litro}$	$k_s/N_t = \alpha$	Franks <i>et al.</i> , 1986a, b.
m	Razón de mortandad del Fitoplancton	0.1 día^{-1}	$m/V_m = \varepsilon$	Franks <i>et al.</i> , 1986a, b.
R_m	Máxima razón de crecimiento de Zooplancton	0.25 día^{-1}	$R_m/V_m = \beta$	Lara-Lara and Matus-Hernández, 1997.
V_m	Máxima razón de crecimiento de Fitoplancton o asimilación de nutrientes	0.25 día^{-1}	-	$\beta = R_m/V_m \leq 1$ (Wroblewski and O'Brien, 1976) We used $\beta = 0.9$
γ	Fracción no-	0.3	-	Valiela (1995)

Parámetro	Definición	Valor típico	Razón adimensional	Referencia
	asimilada de pastoreo			
Λ	Constante I_{lev}	0.5 μg de N/litro	ΛN_t	$\alpha = \Lambda N_t$; (Wroblewski and O'Brien, 1976) where α is the I_{lev} dimensionless constant 1.0. [$N_t = 47.6 \text{ mg N m}^{-3}$] (Ruan, 2001).
N_t	Nutrientes totales	μg de N/litro	-	
N_t	Nutrientes totales	μg de N/litro	-	.
Z	Profundidad	m	-	
K_{ext}	Constante de atenuación	0.1; 0.06-0.08[1/m]		Álvarez-Borrego <i>et al.</i> , 1977; Osorno-Velázquez, 2000.
I_0	Irradiancia	20 W/m^2		Cabello-Pasini <i>et al.</i> , 2004

[Fuente: Franks *et al.*, (1986)]

La parametrización de la estructura biológica del FZN se hace a través de las constantes de: asimilación de nutrientes, mortandades de fitoplancton y zooplancton, razón de ingestión -tasa de pastoreo-, razón de saturación de ingestión tipo I_{lev} , asimilación media de nutrientes, coeficiente de atenuación de luz y por la fracción no asimilada de fitoplancton Franks *et al.*, (1986). Las variables y constantes utilizadas en el sistema de ecuaciones de la dinámica biológica se definen en la Tabla 6. Para la

ecuación de nutrientes, la expresión, I_0 , representa la irradiancia, z , la profundidad y F (I_0), función de decaimiento exponencial de la irradiancia con la profundidad Platt y Denman (1975).

4.3.3 Parametrización de procesos biológicos

La definición cuantitativa de las constantes que parametrizan los procesos en la dinámica FZN, se hizo en función de antecedentes e información de campo para ambientes costeros y fueron rectificadas sus valores con datos particulares para la BSQ que han sido reportados en la bibliografía. Es importante reconocer que cada constante puede tener un amplio margen de valores posibles en función de las condiciones ambientales reinantes.

Las condiciones iniciales de los campos de FZN se tomaron de datos reportados por Farfán y Álvarez-Borrego (1982) y Camacho-Ibar *et al.*, (1997).

Los porcentajes de peso orgánico seco, carbón y nitrógeno para el zooplancton en BSQ son de 90.6, 36.7 y 10.3, respectivamente. En promedio, la razón C/N para Zooplancton es de 3.6 y de 20.2 para *Zostera marina* Farfán y Álvarez-Borrego (1982).

Respecto al zooplancton en BSQ en el estudio conducido por Farfán y Álvarez-Borrego (1982) en BSQ menciona, que este está constituido principalmente por copépodos *Calanoides* ($\approx 80\%$) que son organismos omnívoros. Esto se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7.- Condiciones iniciales de los campos de Fitoplancton, Zooplancton y Nutrientes para el frente marino, Boca y cuerpo de la Bahía de San Quintín

	Fitoplancton	Zooplancton	Nutrientes	Referencia
	[mmol N/m ³]			
Frente Marino				
Boca			1.87	Camacho-Ibar, et al. (1997)
Bahía Falsa				
BSQ				
Cabeza				

La tasa de pastoreo del zooplancton sobre el fitoplancton para la BSQ no se conoce. Sin embargo, en el trabajo reportado por Lara-Lara y Matus-Hernández (1997), presentan resultados de una estimación de tasas de pastoreo para una zona cercana a la BSQ. Esta información corresponde a la Bahía de Todos Santos a uno 200 Km. al norte de BSQ y fue determinada en el cuerpo central de la bahía. Los valores que reporta este autor son de 25% de asimilación diaria, es decir, $R_m=0.25/\text{día}$.

Datos de concentración de fosfatos para la BSQ son reportados por Álvarez-Borrego y Che-Barragán (1976) e indican que éstos varían de 1.5 a 2.9 μM , para el verano, y de 0.7 a 2.0 μM para el invierno.

En condiciones de surgencia, en un estudio conducido en un frente marino a 50 Km. al norte de BSQ se reportaron los parámetros físico-químicos siguientes para una estación costera: 7.0 m/l de oxígeno disuelto, 130 de porcentaje de saturación de oxígeno, pH igual 8.4, concentración de nitratos y fosfatos de 5 μM y 1 μM respectivamente. Estos valores, se reportan en el estudio, fueron disminuyendo en estaciones más lejanas a la costa. En este estudio se indica claramente que la mayor actividad fotosintética ocurre

en la franja cercana a la costa (15 Km.), existiendo un fuerte gradiente hacia mar adentro. La concentración de clorofila *a* en las estaciones más cercanas a la costa durante el evento de surgencia estudiado varió de 0.5-1.5 mg/m³ llegando a un valor máximo registrado de 20 mg/m³ Cardona-Canizales *et al.*, (1990).

La variabilidad fitoplanctónica en la región sólo se conoce parcialmente. Millán-Núñez y Loya-Salinas (1993), por ejemplo, encontró para la BTS que en el mes de junio de 1986 la densidad fitoplanctónica fue de 910,941 cel/l de las cuales un 58% corresponden a diatomeas >20µm; sin embargo, en noviembre del mismo año, detecta en su estudio el afloramiento de células pequeñas (<20 µm) propias de un evento de surgencias en etapa de preflorecimiento.

La composición zooplanctónica en la BSQ se reporta con máxima variabilidad de biomasa en la cabeza de sus ramales donde la salinidad y temperatura son mayores. Por el contrario en la zona de canales mostró menor variabilidad espacio temporal. Se reporta en este estudio que la especie de zooplancton dominante es del género *Calanus* Castro-Barrera (1982).

En un estudio hecho en una laguna tropical sobre flujo de nutrientes en la interfase agua sedimento se concluye que el amonio, nitrato y fosfatos son, en promedio, aportados del sedimento al agua y que la laguna estudiada exporta nutrientes inorgánicos disueltos al mar adyacente e importa materia orgánica particulada Valdez y León (1994).

La concentración de pigmentos fotosintéticos para la BSQ puede variar de 13 mg/m³ hasta 15 mg/m³ en temporada de verano igualmente pasa con los fosfatos. Esto implica una alta concentración de nutrientes. Se menciona que las surgencias deben de ser responsables de la alta productividad de la BSQ respecto al estero de Punta Banda. La variabilidad de clorofilas en BSQ tiene una frecuencia característica de dos semanas que muestra la alternancia de eventos de surgencia en la zona (Millán-Núñez y Álvarez-Borrego, 1978).

La calidad del agua al año en BF es óptima para el cultivo del ostión, salvo en invierno donde los aportes fluviales incrementa la concentración de coliformes fecales y la calidad del agua disminuye (la salinidad baja hasta 6‰ y se incrementa la concentración de bacterias coliformes hasta 2,400 CT/100 ml y 140 CF/100 ml) (Orozco-Borbón *et al.*, 1994).

4.3.4 Resultados de modelación biológica

A continuación, se presentan distintos escenarios simulados de la dinámica de FZN para BSQ obtenidos por medio del modelo numérico físico-biológico acoplado. En primer término, se presentan las gráficas temporales de los campos de FZN y su plano fase para ilustrar la estabilidad de las simulaciones (Fig. 11 y 12).

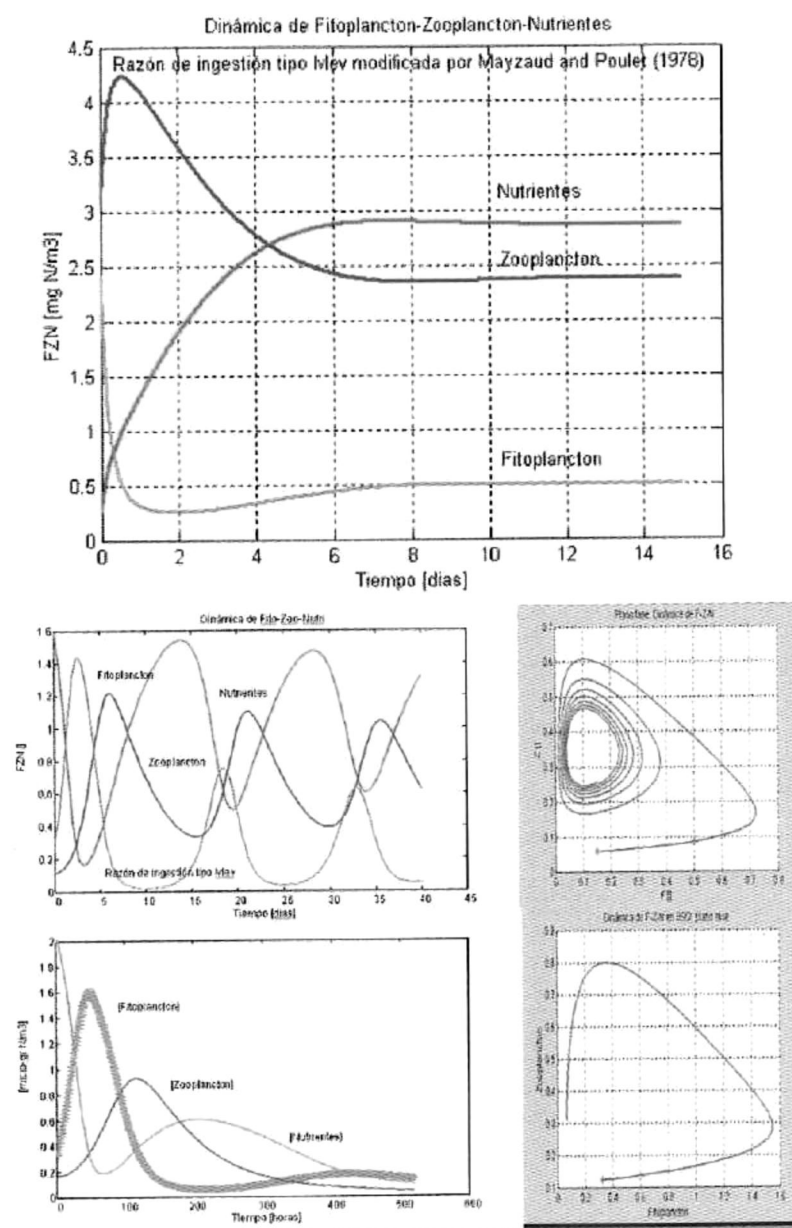


Figura 11.- Variabilidad temporal de los campos de fitoplancton, zooplancton y nutrientes para el caso 1 (ver tabla 5).

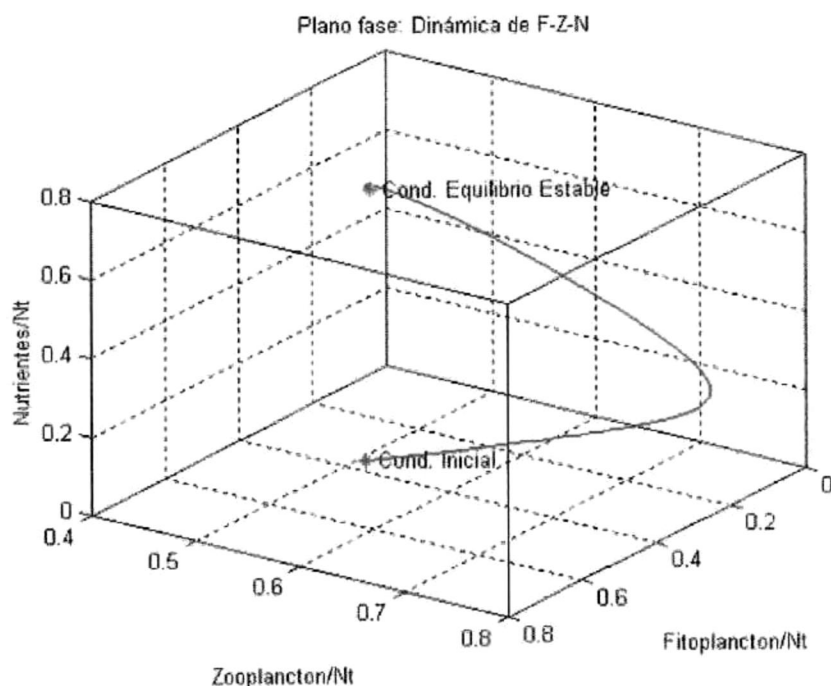


Figura 12.- Plano fase referido al F-N para el caso 1; aquí se puede observar la convergencia de la solución a una condición de equilibrio estable.

4.3.5 Productividad Primaria

La Producción Primaria como ya se definió en la introducción de este trabajo, es una medida del potencial productivo y del estado autotrófico o heterotrófico de un cuerpo de agua.

Un aspecto importante al trabajar con modelos físico-biológicos acoplados es definir que contribución tiene cada uno de los campos en el control de procesos como lo son productividad primaria neta y la nueva producción. Existen algunos trabajos que definen criterios para asociar la nueva-producción a los procesos advectivo y difusivo como un factor ' f ' (Eppley y Peterson, 1979; Franks *et al.*, 1986; Stones *et al.*, 1999).

La razón entre la nueva producción y la producción neta se puede expresar como:

$$f = \frac{\text{Nueva_Produccion}}{\text{Produccion_Total}}. \quad (11)$$

En términos físicos, la Nueva Producción puede expresarse como la producción asociada a la difusión y advección y la producción total como la asimilación de nutrientes en el sistema (Franks *et al.*, 1986; Stones *et al.*, 1999). De esta manera, la ecuación 11 se puede redefinir como:

$$f = \frac{\text{Difusion_Adveccion}}{\text{Asimilacion_de_nutrientes}}. \quad (12)$$

El término de transporte -difusión menos advección- es el componente abiótico de la estimación del parámetro '*f*' y la asimilación de nutrientes por el fitoplancton es la parte biótica de éste. Conociendo los valores de '*f*', estimados por un modelo acoplado, se puede calcular la productividad del sistema. (Ver por ejemplo: Eppley y Peterson, 1979; Franks *et al.*, 1986; Franks, 1997; Stones *et al.*, 1999)

4.4 Acoplamiento Físico-Biológico

La dinámica de un ecosistema costero esta definida por dependencias, interconexiones y múltiples variantes que relacionan a sus componentes bióticos y abióticos (Beer, 1997).

La relación entre variables hidrodinámicas y biofísicas en un ecosistema costero puede modelarse por un conjunto de ecuaciones dinámicas relativamente fácil de postular pero difícil de validar. Este esfuerzo estuvo limitado, en sus alcances, hasta el advenimiento de las computadoras y mejores equipos para medir variables oceanográficas como: temperatura, salinidad, campo de velocidad, pH, oxígeno disuelto y nutrientes, entre otras. Sin embargo, y aún con buenos datos de campo, la arquitectura de cómputo y los algoritmos matemáticos utilizados para la solución de las ecuaciones dinámicas también

han representado un obstáculo cuando se quiere modelar la interacción entre variables bióticas y abióticas con distintas escalas de manifestación espacial y/o temporal. (Mann y Lazier, 1996).

La respuesta de un ecosistema costero a causa de un forzamiento hidrodinámico ha sido algo que quisiéramos conocer adecuadamente. Sin embargo, esta respuesta no se da en las mismas frecuencias que el forzamiento hidrodinámico. Como por ejemplo: los efectos ambientales por la descarga de aguas residuales en cuerpos de agua costeros, la productividad primaria en una laguna costera y su dependencia del campo hidrodinámico, el balance o no de los ciclos biogeoquímicos por efectos hidrodinámicos, entre otros.

La solución conjunta de las ecuaciones gobernantes de procesos hidrodinámicos con bioquímicos se ve acotada en sus alcances y capacidad predictiva, principalmente, por la incompatibilidad espacial y temporal que surge al parametrizar los procesos involucrados. Surge como alternativa trabajar independientemente cada proceso, bajo el campo espacial y temporal (dominio de la frecuencia) correspondiente, y acoplar sus campos y dinámica posteriormente, Franks (1997). Bajo este contexto se puede estructurar una base de sus interacciones (sinergia) más confiable y certera.

La manifestación biológica de un ecosistema costero ante un forzamiento hidrodinámico puede ser evaluada analizando los procesos biofísicos resultantes en el dominio de la frecuencia. De esta manera, se pueden correlacionar componentes del forzamiento de corto periodo con procesos biológicos inducidos en bajas frecuencias.

Cambios en un ecosistema costero, pueden inferirse evaluando la respuesta dinámica del sistema ante la presencia de elementos, compuestos o energías anómalas. Bajo este contexto se pueden cuantificar situaciones como: balance de procesos bioquímicos e hidrodinámicos, efectos de una señal antropogénica, la contribución costera al balance oceánico de compuestos como el CO_2 , entre otros.

Uno de los problemas que enfrenta la modelación conjunta de procesos físicos y biológicos es la disponibilidad de datos suficientes y confiables para inicializar y calibrar los modelos (Franks, 1995). Una estrategia aquí ha sido la asimilación de información de sensores remotos (v.g., SeaWiFS, TOPEX/POSEIDON y Ocean Color projects).

Otra problemática que enfrentan los modelos físico-biológicos es, el gran número de variables y procesos involucrados y la definición de criterios para su parametrización; manifestándose aquí la incompatibilidad de escalas de referencia para su acoplamiento tanto en tiempo como espacio (v.g., Masón, 1994). Técnicas espectrales y marcos de referencia en el espacio de la frecuencia parecen una alternativa para esto.

4.4.1 Acoplamiento de modelos

Los procesos físicos y biológicos están, en condiciones naturales, vinculados tanto espacial como temporalmente. Sin embargo, cuando se quiere modelar conjuntamente dichos procesos ambos han tenido que ser aislados y su dinámica se construye a través de un conjunto de ecuaciones gobernantes particulares para cada caso -físico y biológico.

El principal problema que hay que enfrentar en la modelación conjunta de procesos físicos y biológicos es su compatibilidad espacial y temporal. Dicha compatibilidad depende principalmente de dos aspectos fundamentales. El primero es la definición del marco numérico requerido para que la solución de las ecuaciones sea estable. El segundo y más determinante es la parametrización que se hace de los procesos considerados en cada campo.

Desde el punto de vista numérico y una vez definida la malla espacial que se trabajará, las restricciones del acoplamiento quedarán asociadas a los incrementos de tiempo requeridos para que las soluciones numéricas sean estables. (Criterios CFL).

4.4.2 Ecuación de transporte

En primer término, definiremos la ecuación que permite acoplar el campo físico y el biológico y que está representada por la ecuación de transporte:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (u C_i) - \frac{\partial}{\partial y} (v C_i) + \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C_i}{\partial y}) + F_i, \quad (13)$$

La variable $C_{i=1, 2, 3}$, representa los campos biológicos de Fitoplancton, Zooplancton y Nutrientes, respectivamente. Aquí la función F_i , representa las ecuaciones de los campos biológicos respectivos. El campo de velocidad u , y v son producto del sistema de ecuaciones hidrodinámicas. D_x y D_y , son los coeficientes de difusión turbulenta para los campos biológicos.

4.4.3 Procesos físico-biológicos acoplados en Bahía de San Quintín

La BSQ representa una laguna costera ideal para el estudio de procesos físico-biológicos acoplados. Su condición antiestuarina, producto de un escaso aporte fluvial a la bahía, filtra el efecto continental de aporte de nutrientes al sistema que muchas veces, por las características de la cuenca y de la diversidad de actividades humanas asociadas a ésta, es muy difícil de cuantificar, sobre todo en términos de periodicidad. De esta manera, la BSQ está íntimamente ligada a su comunicación con el océano. Aunado a esto, la BSQ se encuentra en una zona costera donde las surgencias y eventos de escala global como el fenómeno de El Niño generan cambios en sus condiciones ambientales normales generando señales en el sistema que han podido ser evaluadas directa o indirectamente (ver por ejemplo: Lara-Lara y Álvarez-Borrego, 1975; Farfán, 1981).

A continuación se presenta una serie de antecedentes que ilustran de manera cuantitativa y/o cualitativa el acoplamiento de procesos físicos y biológicos en BSQ.

1. La distribución de valores superficiales de fosfatos y silicatos se incrementan de la boca a los extremos de la BSQ (Álvarez-Borrego y Che-Barragán, 1976). Esto indica, de acuerdo a los autores anteriores, que la bahía tiene un mecanismo para concentrar nutrientes inorgánicos. Sugieren también, que la distribución de nutrientes inorgánicos esta asociada a la alta concentración de pastos marinos en el fondo de la bahía y que éstos actúan como trampa del material en suspensión que es exportado del mar adyacente por mareas. Esta acumulación, causa una alta concentración de materia orgánica en los sedimentos la cual es remineralizada produciendo nutrientes inorgánicos que se incorporan a la columna de agua por la marea y corrientes inducidas por el viento. Aunado a lo anterior, la bahía recibe en primavera y verano pulsos de nutrientes inorgánicos del mar por eventos de surgencias. Esto causa que la concentración de nutrientes en la boca sea mayor durante el verano que en el invierno.

4.4.4 Resultados de la simulación acoplada.

Para analizar la dinámica de los procesos físico-biológicos acoplados se hizo un planteamiento experimental, donde se parte de la reproducción de la dinámica biológica (FZN) –la cual se presenta en la sección 4.3.5-. El modelo acoplado se inicializa con la concentración de los campos de FNZ que muestran una solución del sistema de ecuaciones biológicas (ecuaciones 8, 9 y 10) y posteriormente se corre el modelo acoplado bajo el contexto de la ecuación de transporte (EC. 13).

En la fig. 13, se presentan las condiciones iniciales de concentración de los campos biológicos (FZN) que dieron pie a la simulación de escenarios acoplados.

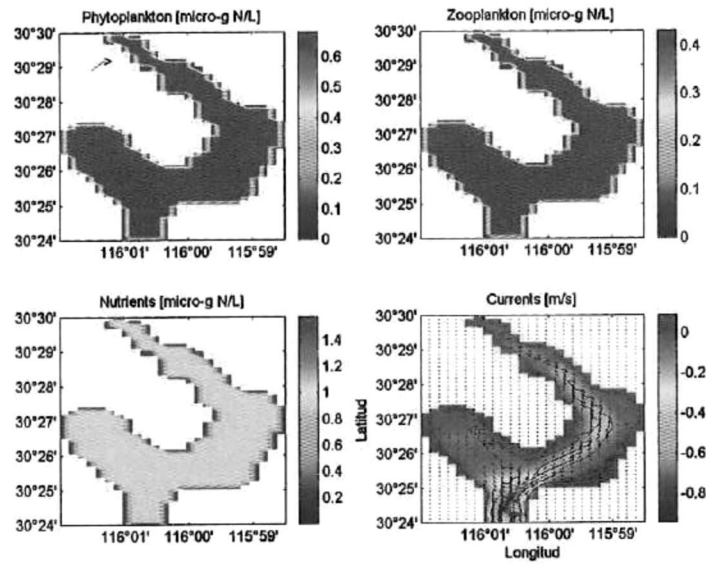


Figura 13.- Condición inicial de los campos biológicos e hidrodinámicos para un forzamiento de marea M_2 y viento tipo de brisas.

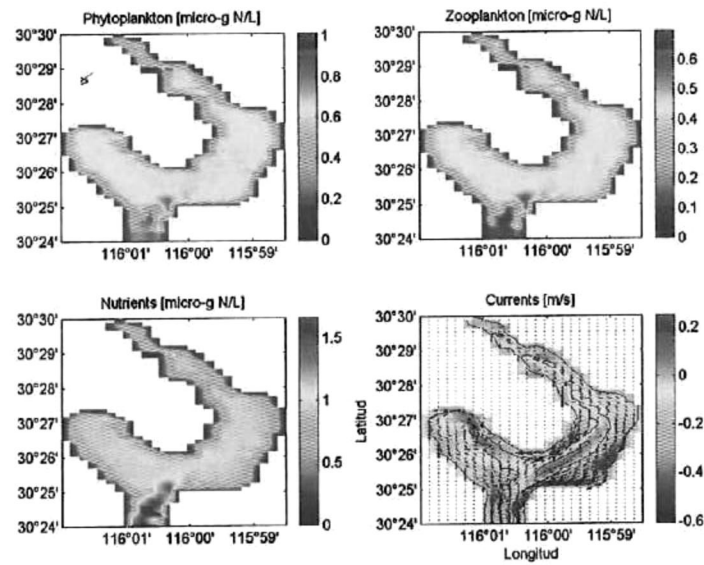


Figura 14.- Campos de concentración de variables biológicas para el caso presentado en la fig. 13 pero 12 horas después.

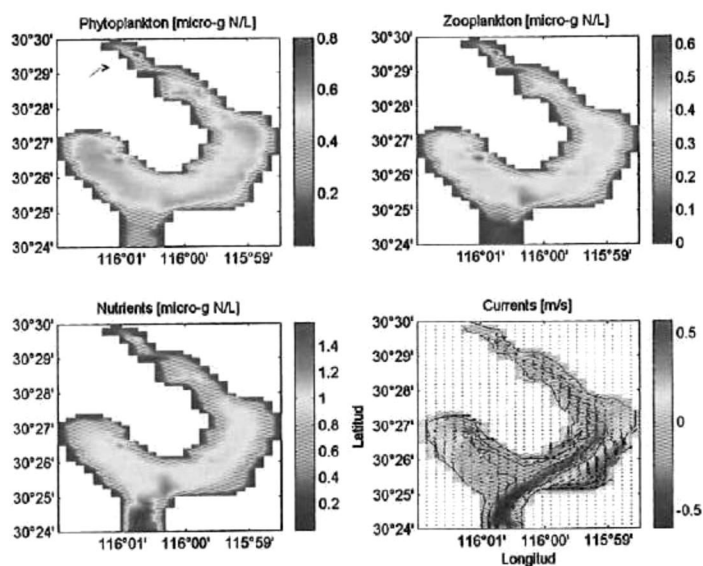


Figura 15.- Campos de concentración de variables biológicas para el caso presentado en la fig. 13 pero 24 horas después.

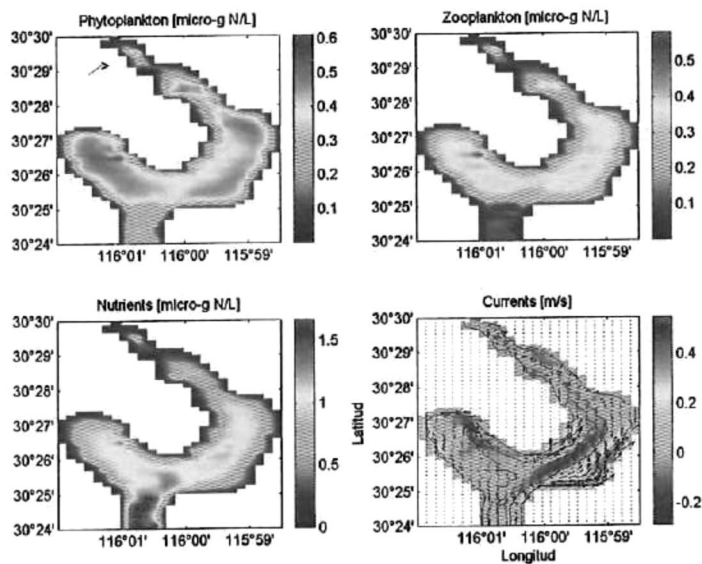


Figura 16.- Campos de concentración de variables biológicas para el caso presentado en la fig. 13 pero 48 horas después.

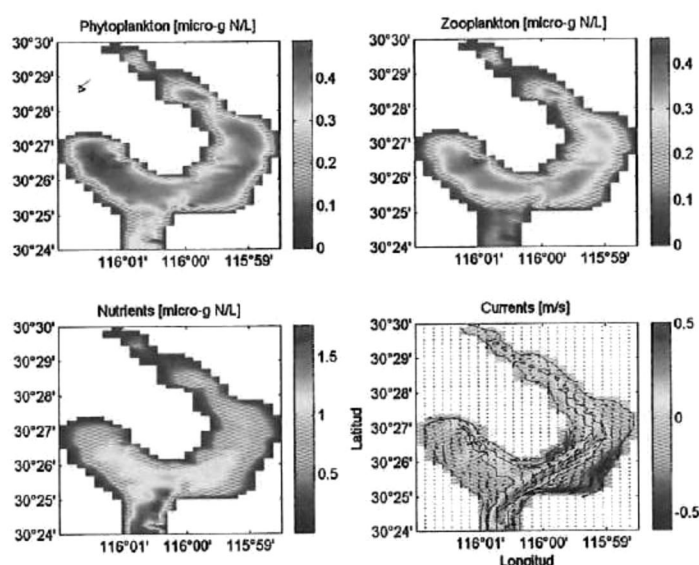


Figura 17.- Campos de concentración de variables biológicas para el caso presentado en la fig. 13 pero 60 horas después.

Para analizar la influencia de la parametrización de los procesos biológicos en su acoplamiento con la hidrodinámica, se construyeron escenarios variados con el coeficiente de asimilación de luz (K_{ext}) y las condiciones de forzamiento hidrodinámico.

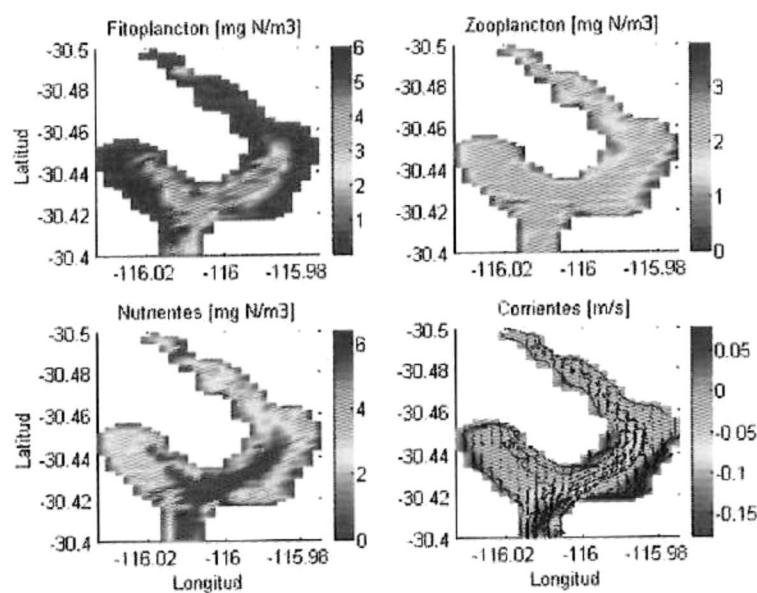


Figura 18. Campo instantáneo de concentraciones de fitoplancton, zooplancton y nutrientes después de 24 horas de simulación con un forzamiento hidrodinámico con el armónico M_2 , una condición de viento de brisas y con un $K_{ext} = 1.1 \text{ m}^{-1}$.

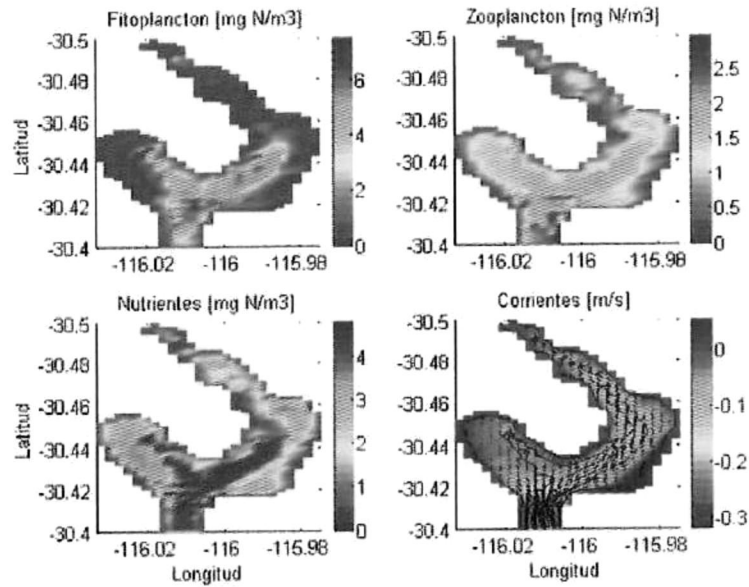


Figura 19. Campo instantáneo de concentraciones de fitoplancton, zooplancton y nutrientes después de 72 horas de simulación con un forzamiento hidrodinámico semejante al caso de la fig. 18.

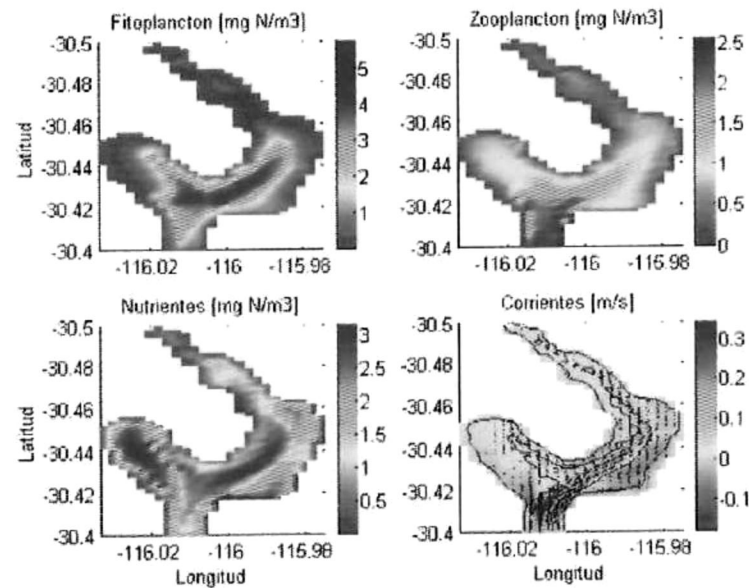


Figura 20. Campos promedio de fitoplancton, zooplancton y nutrientes para 14 días de simulación con un forzamiento hidrodinámico dado en la figura 18.

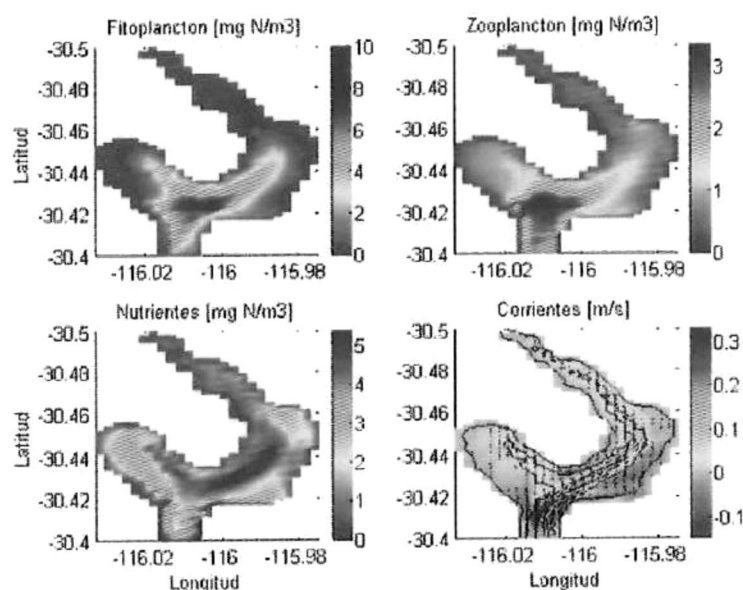


Figura 21. Campos promedio de fitoplancton, zooplancton y nutrientes para 14 días de simulación para una condición de surgencias y un forzamiento hidrodinámico con forzamiento armónico M_2 , vientos del NW (predominantes en BSQ) y un $K_{ext} = 1.1 \text{ m}^{-1}$.

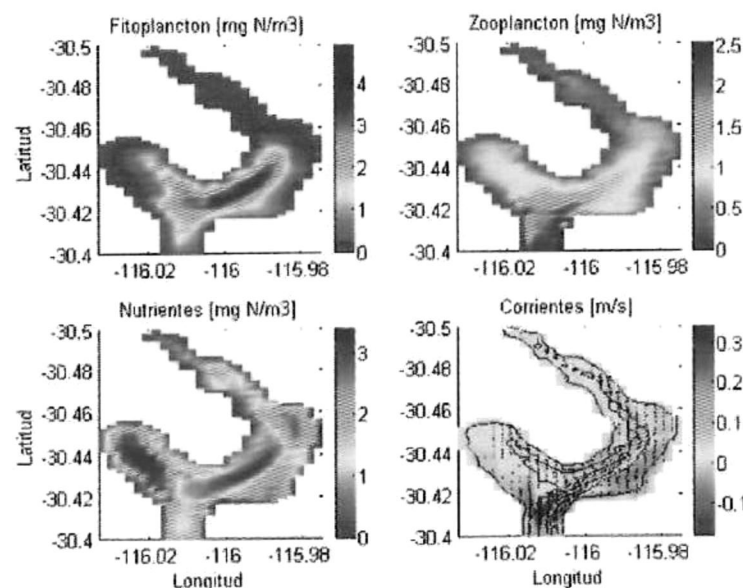


Figura 22. Campos promedio de fitoplancton, zooplancton y nutrientes para 14 días de simulación con un $K_{ext} = 0.85 \text{ m}^{-1}$, con un forzamiento hidrodinámico dado en la figura 21.

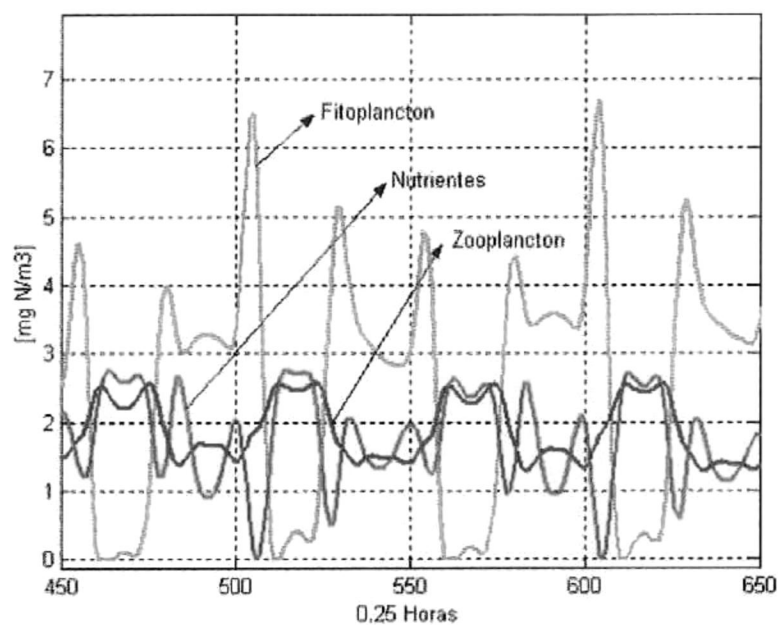


Figura 23. Serie temporal de campos de fitoplancton, zooplancton y nutrientes para el caso presentado en la fig. 20 para un periodo de 111 a 163 días; para un punto ubicado en la parte central de Bahía Falsa.

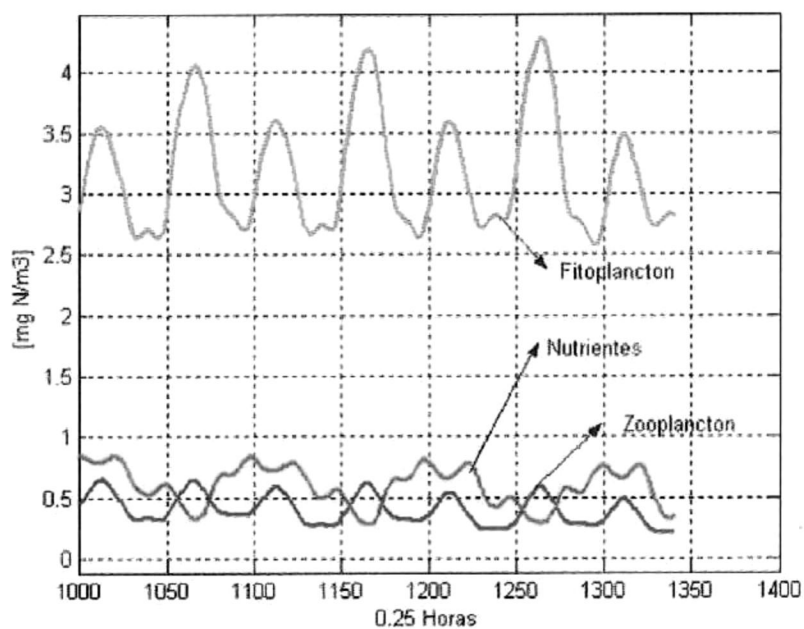


Figura 24. Serie temporal de campos de fitoplancton, zooplancton y nutrientes para el caso presentado en la fig. 22 para un periodo de 250 a 350 horas; para un punto ubicado sobre la "Y" en el canal principal de BSQ.

5 Discusiones y conclusiones

El modelo físico-biológico acoplado, permite hacer una descripción espacial y temporal de los campos de concentración de NFZ y es útil para identificar los patrones de concentración y disipación de éstos bajo distintas condiciones ambientales.

El análisis de la PP en BSQ, muestra ser sensible a las condiciones de disponibilidad de nutrientes y a los procesos de transporte característico de éstos. La simulación de los escenarios presentados en las Fig. 20, 21 y 22, revelan el papel dominante que juega el intercambio de nutrientes entre la BSQ y el océano y que sustentan la PP de ésta.

La dinámica de NFZ que se reproduce con el modelo acoplado, indica que dentro de la BSQ la concentración promedio de nutrientes es menor que las condiciones oceánicas adyacentes. Aunado a esto, y apoyados por la hipótesis de que la bahía funciona como cuenca de remineralización, los resultados muestran que los procesos advectivos y difusivos juegan un papel determinante en esta condición; esto al margen del poco aporte terrígeno y antropogénico de nutrientes a la zona vía continental. Los resultados de campos promediados de NFN, sobre todo en condiciones de surgencias (fig. 21), revelan que la bahía depende de los nutrientes que exporta del océano y que éstos son distribuidos en ella por procesos físicos (advección y difusión).

El aporte de nutrientes a la BSQ por efecto de surgencias es importante (fig. 21) y ante la circunstancia de que un patrón geostrófico (Álvarez-Borrego, 2002), mantiene más frecuentemente las condiciones de surgencias frente a BSQ; se encuentra que este fenómeno es un proceso acoplado en la bahía que motiva y maximiza la exportación de nutrientes del océano a ésta.

Por otro lado, las celdas de circulación y patrones de contracorrientes, inducidos por la hidrodinámica del sistema, generan parcelas de agua con tiempos de residencia - estadías- que se asocian a las regiones más productivas del sistema, como fue el caso

de la parte alta de BF, la parte baja de BSS, la margen sur de la boca y la zona frente a la desembocadura del arroyo San Simón (fig. 20). Esta condición pone de manifiesto el papel trascendental que juegan los procesos físicos en la PP de BSQ. En este aspecto, es importante distinguir la utilidad potencial del modelo acoplado para estimar la capacidad de carga de la BSQ para un manejo sustentable de las actividades de acuicultura que se dan en ésta.

Dado que la dinámica de FZN de la bahía se comporta mas apegada al caso de la fig. 20 que al de la fig. 22, se corrobora la hipótesis de que el factor limitante en la PP de la bahía es la luz, aunado a que el bombeo de nutrientes, principalmente por advección y difusión turbulenta, de la boca hacia la bahía, contribuye a minimizar la deficiencia de éstos en el sistema por la falta de otras fuentes como lo sería un aporte fluvial permanente. Es muy probable que la nula actividad de producción en columna de agua en zonas someras en la bahía sea la que motive las extensas llanuras cubiertas de pastos marinos donde además se dan las más altas concentraciones de nutrientes en suspensión como se puede apreciar en la fig. 20. Se encontró que la PP en las zonas someras de la bahía se anula para $K_{ext} > 1.15 \text{ m}^{-1}$; implicando que los nutrientes estén en exceso en dichas regiones y se incorporen a otros procesos productivos no considerados por el modelo.

Se encuentra una clara diferencia en términos de la dinámica físico-biológica, entre BF y BSS; la poca influencia oceánica hacia la parte alta de BSS es probable que active otro balance biológico y la fase detritica tenga que considerarse para buscar mecanismos de control y explicación para la PP en BSS. En esta región, productores primarios como los pastos marinos deben estar jugando un papel predominante en la producción primaria bajo otros esquemas (por ejemplo, la re-mineralización) que no son considerados por el modelo.

Los resultados obtenidos con el modelo, podrán apoyar al planteamiento de trabajos de monitoreo de campo de la BSQ para distintos fines, entre ellos los asociados a su aprovechamiento acuícola. Sin embargo, para que se tenga una mejor capacidad de

predicción del modelo será necesario implementar los procesos biológicos relativos a la fase de interacción agua-sedimento, la cual parece ser determinante sobre todo para la región alta de BSS.

La dinámica de FZN genera que dentro de la BSQ la concentración de nutrientes sea menor que las condiciones oceánicas adyacentes, aunado a esto y apoyados por la hipótesis de que la bahía funciona como cuenca de remineralización, los procesos advectivos juegan en consecuencia un papel determinante en esta condición; esto al margen del poco aporte terrígeno y antropogénico de nutrientes a la zona. Esto puede tener dos explicaciones. Una, que los nutrientes en la columna de agua son reciclados rápidamente y que por advección la bahía exporta nutrientes inorgánicos al océano e importa materia orgánica de éste; O bien, que la fuga de nutrientes de la columna de agua por depósito de material orgánico es subsanada en parte por el flujo béntico de nutrientes inorgánicos productos de la remineralización y generándose una fuga constante, no equilibrada, de nitrógeno gaseoso a la atmósfera que contribuye al déficit de nutrientes en la bahía.

Resultados de campo, reportados por Camacho-Ibar (1997), indican que la sulfato reducción está activada en los sedimentos de la bahía y que sus aguas se vean enriquecidas de fosfatos por lo que estos no son limitantes para la productividad de la bahía. Esto último implica también, que los nitratos en sedimento han sido totalmente reducidos.

Los resultados obtenidos indican que la hidrodinámica controla un 30%, aproximadamente, de PP en la BSQ y que es la advección la principal característica hidrodinámica que contribuye a este porcentaje. Se puede ya regionalizar la BSQ en términos de su PP. Se logran identificar zonas alternativas para la ubicación de nuevos campos ostrícolas en función de la PP y disponibilidad de alimento para el ostión. Los rasgos hidrodinámicos de la BSQ permiten clasificarla en 4 regiones donde los tiempos de residencia están asociados a factores como lo son: formación de celdas de circulación, contracorrientes, canales, entre otros. Para una condición crítica, en la

región superior que conecta los dos brazos de la bahía, el tiempo de residencia estimado fue de 21 días. Las simulaciones indican también que la conexión de la bahía al océano modula el intercambio de nutrientes entre éstos y que la bahía está importando nutrientes del océano para abatir el déficit que se da en ella.

6 Bibliografía

- Álvarez-Borrego, S. y Che-Barragán, A. 1976. Distribución Superficial de Fosfatos Y Silicatos En Bahía de San Quintín, B.C. *Ciencias Marinas* 3, 51-61.
- Álvarez-Borrego, S. y López-Álvarez, C. 1975. Distribución de Biomasa de Fitoplancton Por Grupos Taxonómicos En Bahía de San Quintín, B.C. A Través de un Ciclo Anual. Instituto Nacional de Pesca (reporte) Dirección de Acuicultura de la S.R.H.
- Álvarez-Borrego, S. y Nájera, S. 1979. Series de Tiempo de Fitoplancton En Dos Lagunas Costeras de Baja California. *Ciencias Marinas* 6, 75-88.
- Álvarez-Borrego, S. y S. Nájera de Muñoz. 1979. Series de tiempo de fitoplancton en dos lagunas costeras de Baja California. *Ciencias Marinas* 6 (1 y 2):75-88.
- Álvarez-Borrego, S., Acosta-Ruiz, M.J. y Lara-Lara, J.R. 1977. Hidrológica Comparativa de Dos Antiestuarios de Baja California. *Ciencias Marinas* 4, 1-11.
- Arce, P.H.R., C.V.M. Morineau. Y O.R.M. Silver. 1981. Plan de Desarrollo Urbano, San Quintín-Lázaro Cárdenas, Baja California México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Arquitectura. U.A.B.C.
- Arrigo, K.R., Weiss, K.R. y Jr., .W.O.S. 1998. Physical Forcing of Phytoplankton Dynamics in the Southwest Ross Sea. *J. Marine Res.* 35, 1007--1021.
- Barnard, J.L. 1962. Benthic marine exploration of Bahía de San Quintín, Baja California, 1960-61. *General. Pacific Naturalist*. 3(6, 7):251-274.
- Barnard, J.L. 1962. Benthic marine exploration of Bahía de San Quintín, Baja California, 1960-61. *General. Pacific Naturalist*. 3(6,7):251-274.
- Barnard, J.L. 1964. Marine amphipoda of Bahía de San Quintín, Baja California. *Pacific Naturalist* 4(3)58-77.
- Barnard, J.L. 1964. Marine amphipoda of Bahía de San Quintín, Baja California. *Pacific Naturalist* 4(3)58-77.
- Beer, T. 1997. *Environmental Oceanography*. 2da. edición. CRC Press. 367p.
- Beltrán Gómez L. 1996, actualización hidrogeológica, del Valle de San Quintín, Baja California, Coordinación de Hidrología Subterránea, Gerencia Estatal en Baja California. Comisión Nacional del Agua. (México). 42pp.
- Berdeja-García, Y. y A .M., Aguirre, 1988. Estudio de evaluación de la calidad de agua y producto en la Bahía de San Quintín, Ensenada, B.C. Zona de producción de moluscos bivalvos. Informe Técnico presentado a la Secretaría de Salud. Subsecretaría de Regulación Sanitaria y Desarrollo. Dirección General de Investigación y Desarrollo Tecnológico. 51pp.
- Boje, R. y Tomczak, M. 1978. *Upwelling Ecosystems*, Germany: Springer-Verlag.
- Bowden, K.F. (1983) *Physical oceanography of coastal waters*, New York: Haltsted Press: a division of John Wiley & Sons,
- Cajal- Medrano, R. 1979. Concentración de DDT y sus metabolitos en los cultivos de ostión J.A. (*Crassostrea gigas* y *Ostrea edulis*) en el Estero de Punta Banda y Bahía San Quintín, B.C. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas-Universidad Autónoma de Baja California. 46pp.

- Calderón- Aguilera, L.E. 1992. Análisis de la infauna béntica de Bahía de San Quintín, Baja California, con énfasis en su utilidad en la evaluación de impacto ambiental. *Ciencias Marinas* 18(4):27-46.
- Calderón-Aguilera, L.E. y A. Jorajuria-Corbo. 1986. Nuevos registros de especies de poliquetos (Annelida: Polychaeta) para la Bahía de San Quintín, Baja California, México. *Ciencias Marinas* 12(3):41-61.
- Camacho-Ibar, V.F., Carriquiry, J.D. y Smith, S.V. 1997. Comparison of Carbon, Nitrogen y Phosphorus Fluxes in Mexican Coastal Lagoons: Bahía San Quintín, B.C. (A Teaching Example), *LAND-OCEAN INTERACTIONS IN THE COASTAL ZONE (LOICZ)*.
- Cantú-Martínez, P.C. 1987. Nuevo registro de *Tectidrilus diversus* Erséus, 1982 (Oligochaeta: Tubificidae) para la Bahía de San Quintín, Baja California. *Ciencias Marinas* 13(3):63-68.
- Cardona-Canizales, C., Millán-Núñez, R., Lara-Lara, J.R. y Valdez-Olguín, J.E. 1990. Variabilidad Espacio Temporal de la Clorofila a En Una Zona de Surgencias Frente a Baja California. *Ciencias Marinas* 16, 53-65.
- Carey, J. y Yuen, P. 1992. U.S. Ocean resources 2000. National Sciences Foundation y National Oceanic y Atmospheric Association. 19 pp.
- Carrillo-Sánchez, C.G. 1985. Variación estacional del contenido de materia orgánica en sedimentos biodepositación en Bahía San Quintín Baja California, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. 55pp.
- Castro-Barrera, T. 1982. Densidad, Diversidad Y Distribución de Los Grupos Zooplanctónicos En Relación con Algunos Nutrientes Y Productos de Degradación de la Clorofila a, En la Bahía de San Quintín, Baja California. *Ciencias Marinas* 8, 1-19.
- Chávez-Comparan, A.G. 1973. Hidrología de Bahía de San Quintín En Invierno Y Primavera. Tesis de Licenciatura .
- Chávez-Nishikawa, A.G. y Álvarez-Borrego, S. 1974. Hidrología de Bahía de San Quintín En Invierno Y Primavera. *Ciencias Marinas* 1, 31-62.
- Chen, C., Wiesenburg, D.A. y Xie, L. 1997. Influences of River Discharge on Biological Production in the Inner Shelf: A Coupled Biological y Physical Model of the Louisiana-Texas Shelf. *J. Marine Res.* 55, 293-320.
- Dawson, E.Y. 1962. Benthic marine exploration of Bahía de San Quintín, Baja California. 1960-61. Marine y marsh vegetation. *Pacific Naturalist*. 3(7):275-280.
- Dawson, G.P., Johns, B. y Soslby, R.L. 1983. A numerical model of shallow-water over topography. *Physical Oceanography of Coastal y Shelf Seas* 267-320.
- Del-Valle-Lucero, D.-V.- y Cabrera-Muro, D.-V.-a.H.R. 1981. Aplicación de un Modelo Numérico Unidimensional a Bahía San Quintín, B.C. Verano de 1977. *Ciencias Marinas* 7, 1-15.
- Denman, K. 1997. A coupled 1-D biological-physical model of the subarctic pacific ocean with Ekman upwelling y iron limitation. *IOS seminars*.
- Díaz-Castañeda y V. Rodríguez-Villanueva. 1998. Polychaete fauna from San Quintín Bay, Baja California, México. *Bull. Southern California Acad. Sci.* 97(1):9-32.
- Dusek, D. 1997. An overview of a coupled 1-D physical-biological mixed layer model.

- Eckman, J.E. 1994. Modelling physical-biological coupling in the ocean: the U.S. GLOBEC Program. *Deep Sea Research* 41, 1-5 .
- Eppley, R.W. y Peterson, B.J. 1979. Particulate Organic Matter Flux y Planktonic New Production in the Deep Ocean. *Nature* 282, 677-680.
- Farfán, B.C. 1981. Variability y Tidal Exchange of Dissolved Inorganic Nitrogenous Nutrients y Suspended Organic Matter in San Quintin Bay, Baja California,
- Farfán, B.C. y Álvarez-Borrego, S. 1982. Contenidos de Carbono Y Nitrógeno En Zooplancton Y Pastos Marinos (*Zostera Marina*) En Bahía de San Quintín, Baja California. *Ciencias Marinas* 8, 125-133.
- Farfán, B.C. y Álvarez-Borrego, S. 1983. Variability and fluxes of nitrogen and organic carbon at the mouth of a coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 17: 599-612.
- Fasham, M.J.R., Ducklow, H.W. y McKelvie, S.M. 1990. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer. *J. Marine Res.* 48, 591-639.
- Fischer, H.B. 1970. A Method for Predicting Pollutant Transport in Tidal Waters, University of California, USA: University of California, Water Resources Center.
- Flores-Baez, B., S. Sañudo-Wilhelmy, E. Gutierrez Galindo y M.S. Galindo-Bect. 1987. DDT en la Almeja Pismo Tivela stultorum. (Mawe) de San Quintín, Baja California. *Ciencias Marinas* 13(2): 19-24.
- Flores-Uzeta, O. 1996. Anfipodos epifaunales de la localidad El Chute, San Quintín, B.C.: Biología y diversidad. Informe Técnico, Comunicaciones Académicas, Serie Ecología, CICESE, 33p, CTECT9605.
- Franks, P. 1986. Prediction of Phytoplankton Growth in Response to the Frictional Decay of a Warm-Core-Ring. *J. Geophys. Res.* 91, 7603-7610.
- Franks, P. 1995. Coupled physical-biological models in oceanography. U.S. National Report to IUGG, 1991-1994. *Rev. Geophys.* 33.
- Franks, P. 1997. new models for the exploration of biological processes at fronts. *J. Marine Res.* 54, 161--167.
- Franks, P., Wroblewski, J.S. y Flierl, G.R. 1986. Behavior of simple plankton model with food-level acclimation by herbivores. *Marine Biology* 91, 121-129 .
- Gill, A.E. 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, USA: International Geophysics Series Vol. 30.
- González-Fragoso, J. 1992. Bahía San Quintín un diagnóstico para su protección. Informe Técnico preparado con apoyo de Pronatura, ProEsteros y CICESE. Ensenada, B.C. México. 119p.
- Gordón, D.C. 1996. LOICZ Biogeochemical modelling guidelines. LOICZ reports y Studies .
- Gorsline, D.S. y R.A. Stewart. 1962. Benthic marine exploration of Bahía de San Quintín, Baja California. 1960-61. *Marine y quaternary geology. Pacific Naturalist.* 3(8):283-319.
- Grant, W.E. 1986. *Systems Analysis y Simulation in Wildlife y Fisheries Sciences*, New York: John Wiley & Sons.
- Grinnell, J. 1928. A distributional summation of the ornithology of Lower California. *Univ. Of Calif. Publ. Zool.* 32:1-300.
- Gutiérrez-Galindo, B.A., G. Flores-Muñoz. y J.A. López-Mendoza. 1984. DDT en el ostión *Crassostrea gigas* (Thunberg) cultivado en Bahía San Quintín, Baja California. *Ciencias Marinas* 10 (3):17-30.

- Gutiérrez-Galindo, E.A., G. Flores-Muñoz. 1982. Disponibilidad biológica de mercurio en las aguas de la costa Norte de Baja California. *Ciencias Marinas* 12 (2): 85-98.
- Haidvogel, D.B., Wilkin, J.L. y Young, R. 1991. A semi-spectral primitive equation ocean circulation model using vertical sigma y orthogonal curvilinear horizontal coordinates. *J. Comput. Phys.* 94, 151-185.
- Henderson, E.W. y Steele, J.H. 1996. A Shelf Plankton Model: Description y Testing. Scottish Fisheries Research Report.
- Hernandez-Becerril, D.U. y S. Alvarez-Borrego. 1983. Diatomeas bentónicas en Bahía San Quintín. *Ciencias Marinas* 9(2):121-131.
- Hofmann, E.E. y Lascara, M. 1998. Overview of interdisciplinary modeling for marine ecosystems. *The Sea* 10.
- Hofmann, E.E. y Powell, T.M. 1998. Environmental variability effects on marine fisheries: four case histories. *Ecological Applications* 8, S23-S32.
- Hollowed, A.B. 1992. spatial y temporal distributions of Pacific hake, *Merluccius productus*, larvae y estimates of survival during early life history stages. *CalCOFI* 33, 100-123.
- Ibarra-Obando, S.E. 1990. Lagunas costeras de Baja California. *Ciencia y Desarrollo. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México.* 15 (92):39-49.
- Ibarra-Obando, S.E. y R. Aguilar-Rosas. 1985. Macroalgas flotantes y epifitas asociadas con *Zostera Marina* L. en Bahía de San Quintín (B.C. México) durante verano-otoño 1982: Biomasa y composición taxonómica. *Ciencias Marinas.* 11(3):89-104.
- Ibarra-Obando, S.E., V. Camacho-Ibar, J.D. Carriquiry and S.V. Smith. 2001. Upwelling and lagoonal ecosystems of the dry Pacific coast of Baja California, México. In: U. Seeliger, and B. Kjerfve (Eds.). *Coastal Marine Ecosystems of Latin America.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg: 315-330.
- Jiménez-Castro, C.M. 1993. Hidrocarburos clorados en huevos de la gaviota occidental *Larus occidentalis* en la costa occidental de México-EUA. Tesis de Maestría-CICESE. 83. pp.
- Johns, B. 1983. *Physical Oceanography of Coastal y Shelf Seas*, New York, USA: Elsevier.
- Keen, A. M. 1962. A new west Mexican subgenus y a new species of Montacutidae (Mollusca: Pelecypoda), with a list of mollusca from Bahía de San Quintín. *Pacific Naturalist.* 3(9)322-328.
- King, R.E. 1962. A new species of Parahemiurus y notes on *Tubulovesicula lindbergi* (Trematoda: Hemiuridae) from fishes of Bahía de San Quintín, Baja California. *Pacific Naturalist.* 3(10) 231-336.
- King, R.E. 1962. A new species of Parahemiurus y notes on *Tubulovesicula lindbergi* (Trematoda: Hemiuridae) from fishes of Bahía de San Quintín, Baja California. *Pacific Naturalist.* 3(10) 231-336.
- Kühn, W. y Radach, G. 1997. A one-diemnsional physical-biological model study of the pelagic nitrogen cycling during the spring bloom in the northern North Sea - FLEX'76-. *J. Marine Res.* 55, 687-734.
- Lam, D.C.L. 1984. *Effluent transport y difussion models for the coastal zone.* New York: Springer-Verlag.
- Lara-Lara, J. R., 1979. Variability y tidal exchange of ecological properties in a coastal lagoon. Degree of Master of Science. Oregon State University. 184 p.

- Lara-Lara, J.R. 1979. Variability y Tidal Exchange of Ecological Properties in a Coastal Lagoon.
- Lara-Lara, J.R. y Álvarez-Borrego, S. 1975. Ciclo Anual de Clorofilas y Producción Orgánica Primaria en Bahía de San Quintín, B.C. *Ciencias Marinas* 2, 77-97.
- Lara-Lara, J.R. y Matus-Hernández, M.E. 1997. Tasas Diarias de Pastoreo Del Macrozooplankton En la Costa de Baja California. *Ciencias Marinas* 23, 43-70.
- Leendertse, J.J. 1967. Aspects of a computational model for long-period water propagation, San Monica, California, USA: United States Air Force Project Rand.
- Libes, J.M. 1992. An Introduction to Marine Biogeochemistry. USA. Ed. Wiley.
- Makas, D. 1998. Interdecadal change of zooplankton seasonality at Ocean Station P. Institute of Ocean Sciences. IOS seminars.
- Mann, K.H. y Lazier, J.R.N. 1996. Dynamics of Marine Ecosystems: Biological-Physical Interactions in the Oceans. 2do Edition.
- Martori-Oxamendi, J.I. 1989. Variabilidad de la Circulación Y Sus Causas En Bahía de San Quintín, B.C., B.C., México: Tesis de Maestría. CICESE.
- Massey, W.B., y E. Palacios. 1994. Avifauna of the wetlands of Baja California, México: Current status. *Studies in Avian Biology* 15:45-57.
- Menzies, J.R. 1962. The marine isopod fauna of Bahía de San Quintín, Baja California, México. *Pacific Naturalist* 3(11):337-348.
- Mesta, M.E. y M.A. Martínez. 2004. Identificación y caracterización de conflictos en zonas marino costeras. En: EL MANEJO COSTERO EN MEXICO, editado por Rivera-Arriaga, E., G.J. Villalobos-Zapata, I. Azuz-Adeath y F. Rosado-May. EPOMEX, CETYS, UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO y SEMARNAT. 654 p.
- Millán-Núñez, E. y Loya-Salinas, D.H. 1993. Variabilidad Temporal Del Fitoplancton En Una Zona Costera Del Noroeste de Baja California. *Ciencias Marinas* 19, 60-74.
- Millán-Núñez, R. y Álvarez-Borrego, S. 1978. Series de Tiempo de Clorofilas a, B Y C, Y Sus Feofitinas En Las Bocas de Dos Lagunas Costeras. *Ciencias Marinas* 5, 41-52.
- Millán-Núñez, R., Álvarez-Borrego, S. y Nelson, D.M. 1982. Effects of Physical Phenomena on the Distribution of Nutrients y Phytoplankton Productivity in a Coastal Lagoon. *Est. Coast. Shelf Sci.* 15, 317-335.
- Monreal-Gómez, M.A. 1980. Aplicaciones de un Modelo de Dispersión En Bahía de San Quintín, Baja California, México, B.C., México: Tesis de Licenciatura. Escuela de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.
- Monreal-Gómez, M.A. 1980. Aplicaciones de un modelo de dispersión, en Bahía San Quintín, Baja California. 80pp. Tesis de Maestría. CICESE. Ensenada.
- Mooney H.A., y A.T. Harrison. 1972. The vegetational gradient on the lower slopes of Sierra San Pedro Martir in northwest Baja California. Stanford University. Stanford, California, U.S.A. *Madroño* (21):439-4445
- Neuenschwander, L.F., Thorsted Jr., T.H. y R.J. Vogl. 1979. The Salt Marsh y Transitional Vegetation of Bahía de San Quintín. *Bull. Southern California Acad. Sci.* 78 (3): 163-182.
- Nishikawa, K.A 1970. The fisheries Development in Baja California. In: *Memoirs of the VII Symposium of Baja California*. Asoc. Cultural de las Californias Mexicali- Los Angeles.
- Oberbauer, A.T. 1992. Vegetation of northwestern Baja California. *Fremontia* 20(2):3 -10.

- Ocampo-Torres, F.J. 1980. Análisis de Mareas Y Predección de Velocidad Mediante un Modelo Unidimensional En Bahía San Quintín, B.C. Tesis de Licenciatura.
- Orlansky, I. 1976. a simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. J. Comp. Phys. 21, 251-269.
- Orozco-Borbón, M.V., Segovia-Zavala, J.A., Delgadillo-Hinojosa, F. y Muñoz-Barbosa, A. 1994. Estudio Bacteriológico de Agua de Mar Para el Cultivo de Moluscos Bivalvos En Baja California. Ciencias Marinas 20, 183-198.
- Orozco-Zavala, J.I. 1991. Factibilidad Hidrológica del arroyo Santo Domingo, B.C.N. Tesis Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Guadalajara. 264pp.
- Orozco-Zavala, J.I. 1991. Factibilidad Hidrológica del arroyo Santo Domingo, B.C.N. Tesis Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Guadalajara. 264pp.
- Palacios, E. 1992. Anidación del Gallito Marino Californiano (*Sterna antillarum*) en Baja California: su relación con gradientes ambientales y de disturbio, e implicaciones para el manejo. Tesis de Maestría. CICESE. Ensenada, B.C. 90pp.
- Palacio-Aponte, A.G. 2004. Riesgos naturales y susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes. Aplicación de SIG en la costa baja acumulativa del suroeste de Campeche. En: EL MANEJO COSTERO EN MEXICO, editado por Rivera-Arriaga, E., G.J. Villalobos-Zapata, I. Azuz-Adeath y F. Rosado-May. EPOMEX, CETYS, UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO y SEMARNAT. 654 p.
- Placencia, D.R.M. 1980. Análisis de temperatura, salinidad y determinación de circulación por gradientes de densidad en Bahía San Quintín, B. C. Tesis profesional. Esc. Sup. Cienc. Mar. U.A.B.C. 120 p.
- Plascencia-Díaz, R.M. 1980. Análisis de Temperatura, Salinidad Y Determinación de Circulación Por Gradientes de Densidad En Bahía San Quintín, B.C., B.C., México: Tesis de Licenciatura. Escuela de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.
- Platt, T. y Denman, K.L. 1975. A general equation for the mesoscale distribution of phytoplankton in the sea. Mem. Soc. Roy. Sci. de Liege 7, 31-42.
- Powell, E.N., Hofmann, E.E., Klinck, J.M. y Ray, S.M. 1992. Modeling Oyster Populations I. A Cometary on Filtration Rate. Is Faster Always Better? Journal of Shellfish Research 11, 387-398.
- Reish, J.D. 1963. A quantitative study of the benthic polychaetous annelids of Bahía de San Quintín, Baja California. Pacific Naturalist 3(14):400-435.
- Roberts, N.C. 1989. Baja California Plant Field Guide. Natural History Publ. Co.U.S.A. 309p.
- Rosales-Casian, J.A. 1996. Ictiofauna de la Bahía de San Quintín, Baja California, México, y su costa adyacente. Ciencias Marinas 22(4):443-458.
- Rosales-Casian, J.A. 1997. Estructura de la comunidad de peces y el uso de los ambientes de bahías, lagunas y costa abierta en el Pacífico norte de Baja California. Tesis Doctor en Ciencias. CICESE. Ensenada. 201pp.
- Ruiz-Campos, G. y González-Guzmán, S. 1996. First freshwater record of Pacific lamprey, *Lampetra tridentata* From Baja California, México. California Fish and Game 82 (3):144-146.
- Sherwin, T.J. 1992. Methods for determining pollutant dispersion in Tidal Waters. UCES Report: U89-5 I: 3.

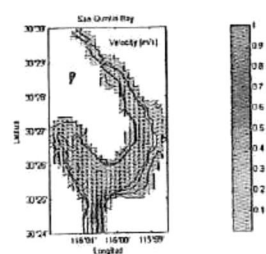
- Smith, S.V., S. Ibarra-Obando., P.R. Boundreau y V.F. Camacho-Ibar. (Compilers y editors). 1997. Land-Ocean interactions in the coastal zone (LOICZ). Comparison of carbón, nitrogen y phosphorus fluxes in Mexican coastal lagoons.
- Soto, H.J.A. 1987. Identificación taxonómica de malezas en cultivo de tomate (*Lycopersicum sculentum* Mill.) en la región de San Quintín, B.C. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias-U.A.B.C. 62p.
- Steele, J.H. y Henderson, E.W. 1981. A simple plankton model. *Am. Nat.* 117, 676-691.
- Stones, A., Menkes, C., Radenac, M.H., Dandonneau, Y., Grima, N., Eldin, G., Mémery, L., Navarette, C., André, J.M., Moutin, T. y Raimbault, P. (1999) The Coupled Physical-New Production System in the Equatorial Pacific During the 1992-1995 El Niño. *J. Geophys. Res.* 3323-3339.
- Torres-Fernández, H.V. 1986. Estudio de factibilidad para la creación de un distrito de acuacultura en el área de Bahía de San Quintín, Baja California. México. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas-U.A.B.C. Ensenada, B.C. 122p.
- Unitt, P., A. Rea, E. Palacios, E. Mellink, L. Alfaro y S. González. 1995. Noteworthy records of birds in Northwestern Baja California, México. *Western Birds* 26:144-154.
- Valdez, D. y León, E.R.d. 1994. Flujos de Amonio, Nitrito, Nitrato Y Fosfato a Través de la Interfase Sedimento-Agua En Una Laguna Tropical. *Ciencias Marinas* 20, 65-80.
- Valiela, I. 1995. *Marine Ecological Processes*, New York, USA: Spriger-Verlag.
- Walsh, J.J. y Dugdale, R.C. 1971. A simulation model of the nitrogen flow in the peruvian upwelling system. *INVESTIGACIONES PESQUERAS* 35, 309-329.
- Ward H.D., T.L. Tibbitts., J.D. Mason, A.L. Seidl., D.V. Derksen., W.D. Eldridge., J.L. Aguilar., B. Sanabria-García. 1991. Migration patterns y distribution of Brant subpopulation in Mexico. *Progree Report*. Alaska Fish y Wildlife Research Center. U.S. Fish y Wildlife Service 27pp.
- Wroblewski, J.S. 1983. The role of modeling in biological oceanography. *Ocean Science y Engiennering* 8, 245-285.
- Zertuche-González, J.A. y Álvarez-Borrego, S. 1978. Series de Tiempo de Variables Fisicoquímicas En Las Bocas de Dos Antiestuarios de B.C. *Ciencias Marinas* 5, 91-103.

ANEXOS

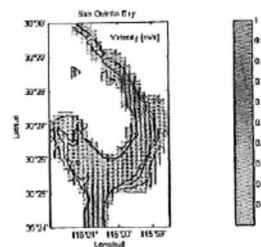
Anexo 1. Condiciones hidrodinámicas específicas para acoplamiento con monitoreos de campo biológicos.

Condiciones hidrodinámicas para la Bahía de San Quintín, B.C. el 7 de abril de 2000.

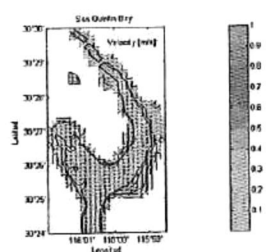
Tiempo local: 00:00 horas



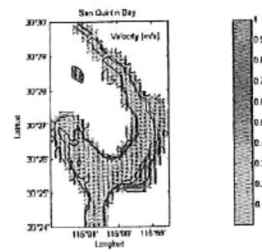
01:00 horas



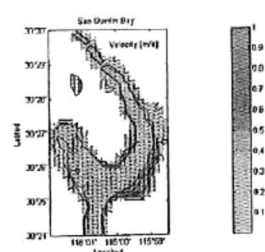
02:00 horas



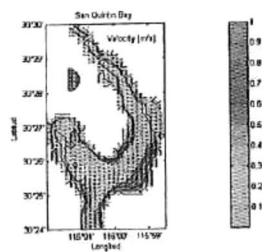
03:00 horas



04:00 horas

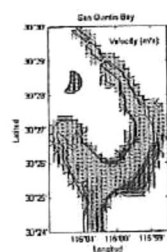


05:00 horas

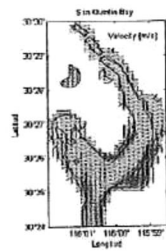
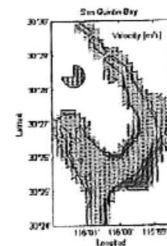


06:00 horas

07:00 horas



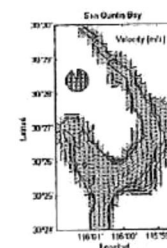
08:00 horas



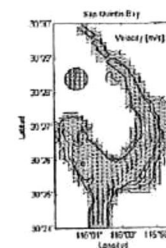
09:00 horas



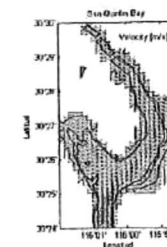
10:00 horas



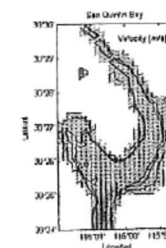
11:00 horas



12:00 horas

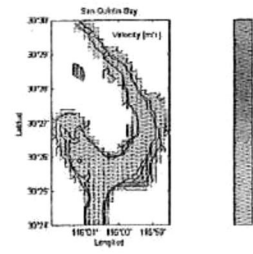
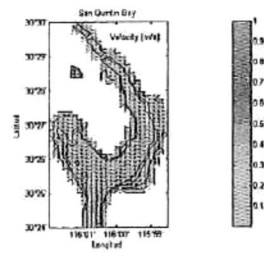


13:00 horas



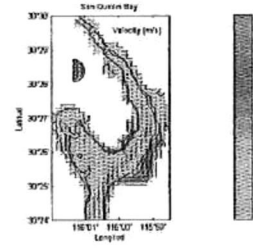
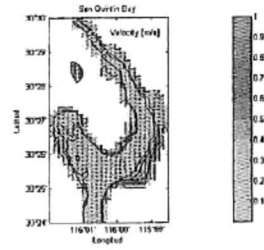
14:00 horas

15:00 horas



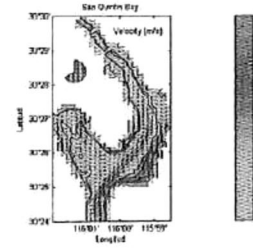
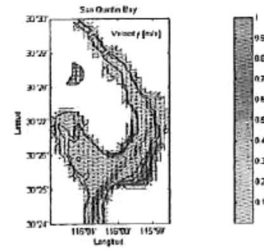
16:00 horas

17:00 horas



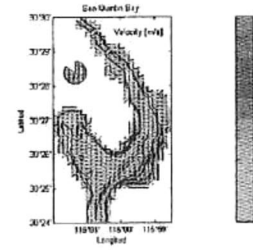
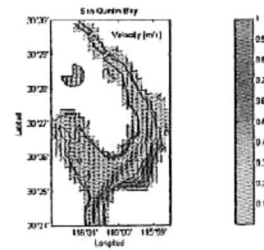
18:00 horas

19:00 horas



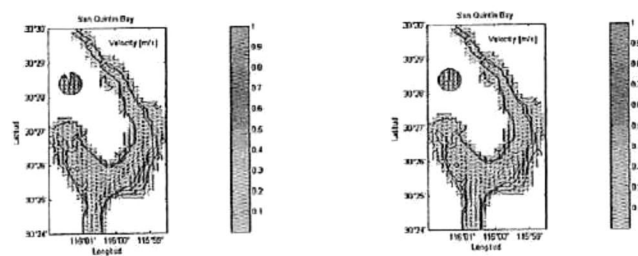
20:00 horas

21:00 horas

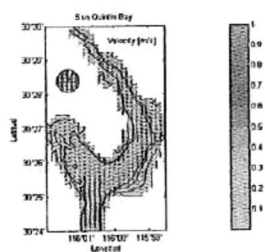


22:00 horas

23:00 horas

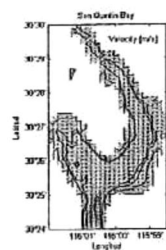


24:00 horas



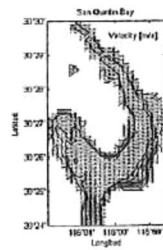
Condiciones hidrodinámicas para la Bahía de San Quintín, B.C. el 12 de junio de 2000.

Tiempo local: 00:00 horas

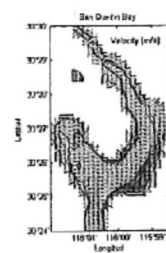


00:00 horas

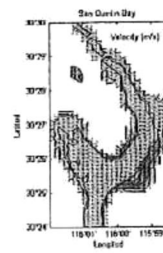
01:00 horas



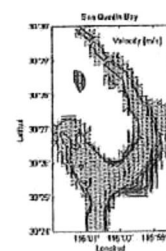
02:00 horas



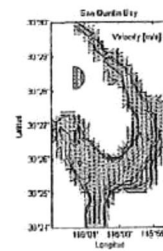
03:00 horas



04:00 horas

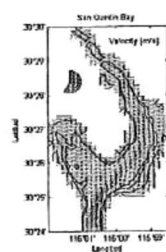


05:00 horas

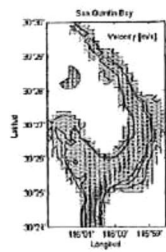
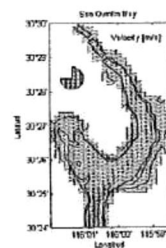


06:00 horas

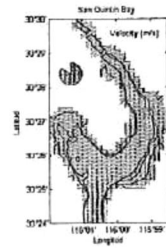
07:00 horas



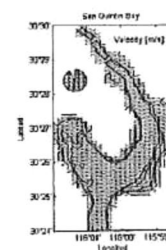
08:00 horas



09:00 horas



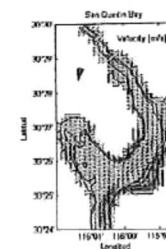
10:00 horas



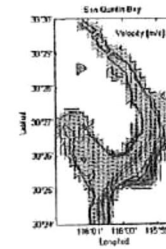
11:00 horas



12:00 horas

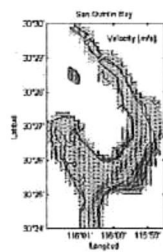
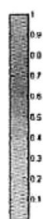
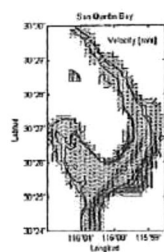


13:00 horas



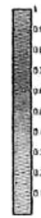
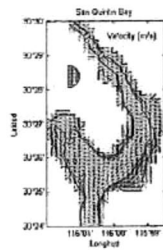
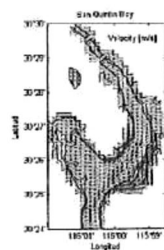
14:00 horas

15:00 horas



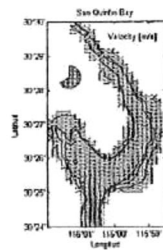
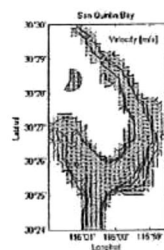
16:00 horas

17:00 horas



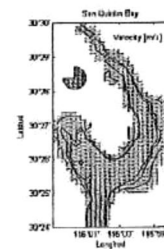
18:00 horas

19:00 horas



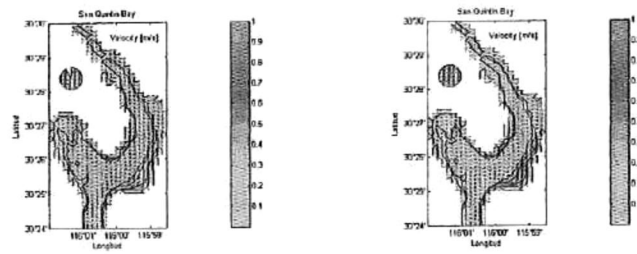
20:00 horas

21:00 horas

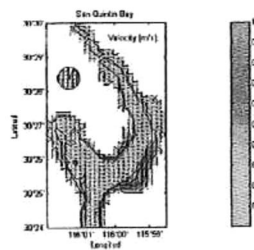


22:00 horas

23:00 horas



24:00 horas



Anexo 2. Casos especiales de patrones de forzamiento hidrodinámico

Caso 1: Partiendo de nivel cero como condición inicial y promediando con periodo M_2
(Archivo de datos: sqdcaso1.dat)

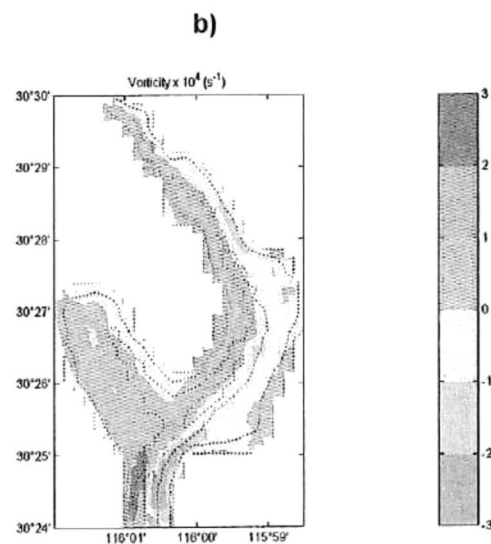
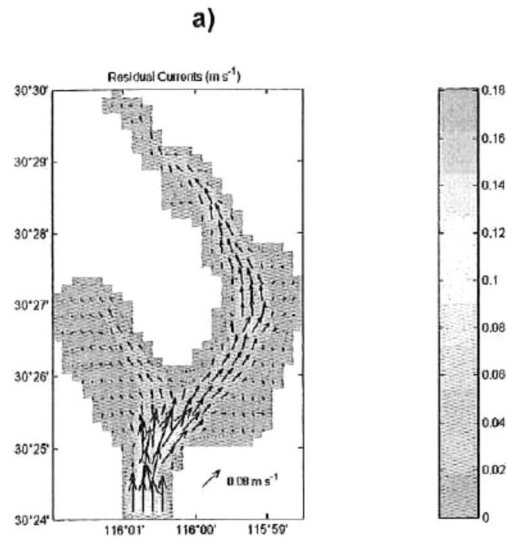
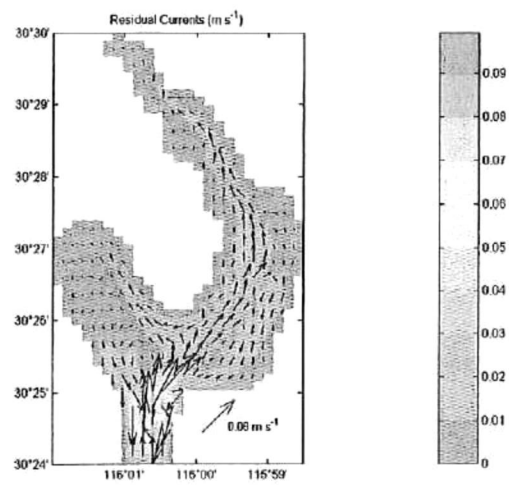


Figura A.2.1.- $M_2 + K_1$ driven circulation in San Quintín Bay. a) Residual Currents. b) Vorticity field.

Caso 2: Partiendo de marea alta como condición inicial y promediando con periodo M_2
(Archivo de datos: sqdcaso2.dat)

a)



b)

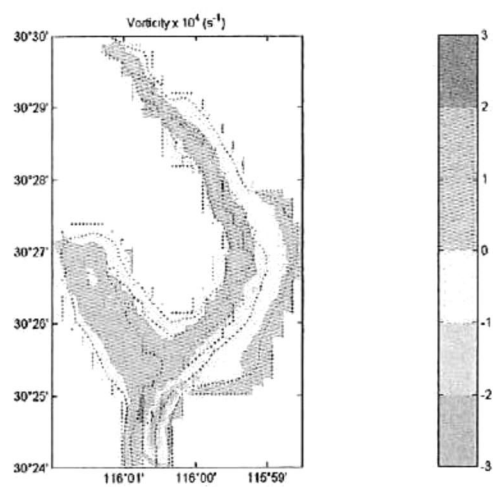


Figura A.2.2. $M_2 + K_1$ driven circulation in San Quintin Bay. a) Residual Currents. b) Vorticity field.

Caso 3: Partiendo de marea intermedia como condición inicial y promediando con periodo M_2 (Archivo de datos: sqdCaso2.dat)

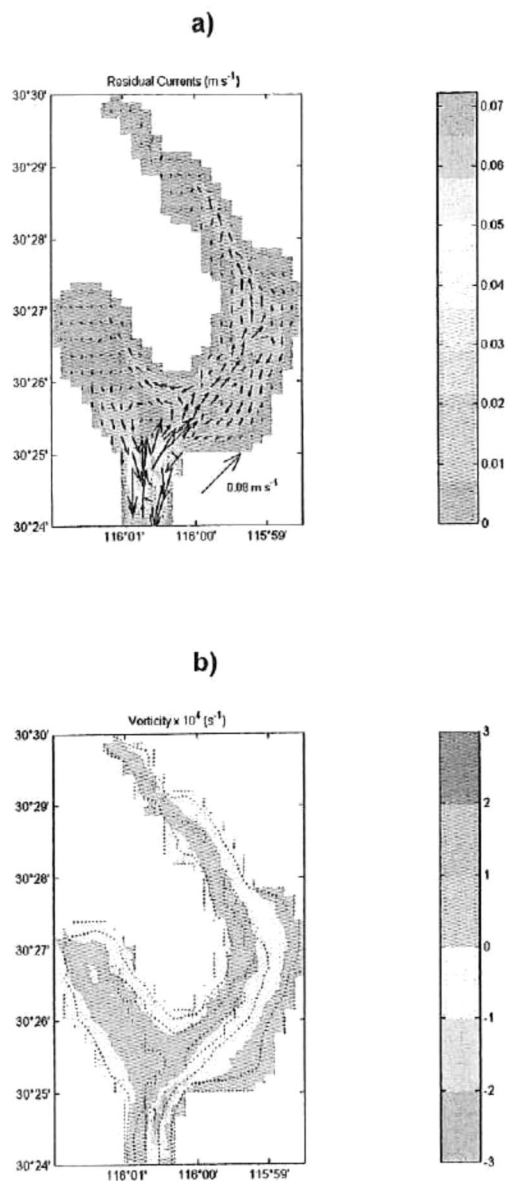
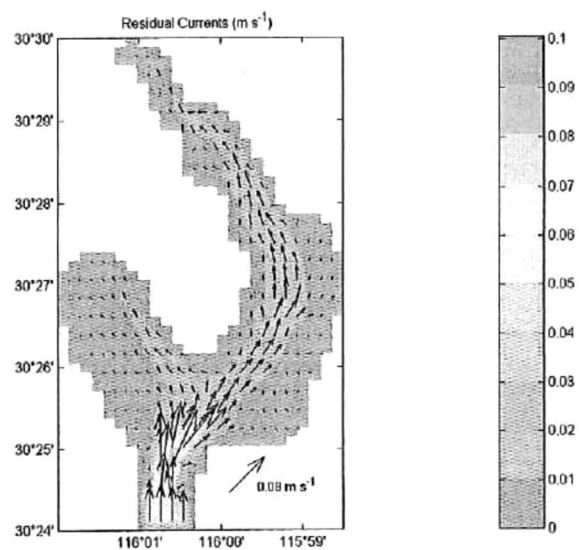


Figura A.2.3. $M_2 + K_1$ driven circulation in San Quintín Bay. a) Residual Currents. b) Vorticity field.

Caso 4: Partiendo de marea baja como condición inicial y promediando con periodo M_2 (Archivo de datos: sqdCaso2.dat)

a)



b)

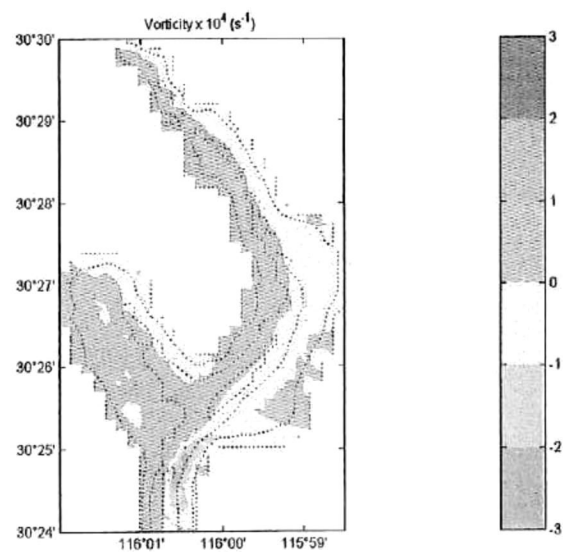


Figura A.2.4. $M_2 + K_1$ driven circulation in San Quintin Bay. a) Residual Currents. b) Vorticity field.

Anexo 3. Artículos asociados.

Influence of Physical and Biological processes on Primary Productivity in a Coastal Lagoon of San Quintín Bay, B.C., México. Enviado a la revista Ecological Modelling, noviembre de 2004.

Elsevier Editorial(tm) for Ecological Modelling
Manuscript Draft

Manuscript Number:

Title: Influence of Physical and Biological processes on Primary Productivity in San Quintin Bay, B.C., Mexico

Article Type: Research Paper

Keywords: Primary productivity; physical-biological coupled model; San Quintin Bay

Corresponding Author: Ocean. Sergio Jimenez-Hernandez UNIVERSIDAD AUTONOMA DE TAMAULIPAS

Other Authors: Adan Mejia-Trejo, PhD; Zaul Garcia-Esquivel, PhD ,

Influence of Physical and Biological processes on Primary Productivity in San Quintin Bay, B.C., México.

Sergio Jiménez-Hernández¹
Adán Mejía-Trejo²
Zaúl García-Esquivel^{2,3}

¹Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Portuaria, Marítima y Costera (CIDIPORT)

Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT)
Edificio CIDIPORT, F.I., C.U. Tampico-Madero, UAT
Tampico 89337, Tamaulipas, México.
Tel.: 52(833)2412051; 52(833)2412000 ext 3542
E-mail: sjimenez@uat.edu.mx

²Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California
Km 106 Carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada 22860, Baja California, México
E-mail: amejia@uabc.mx²; sgarcia@uabc.mx³

Abstract

The variability of the primary productivity in San Quintín Bay, BC, Mexico, was analyzed in terms of physical and biological processes. A nonlinear, bi-dimensional model was used to couple physical processes and primary productivity. The biological processes involved are represented by a Phytoplankton-Zooplankton-Nutrient Model, which uses the nitrogen content as a tracer for the state variables. Tides, wind and bottom friction drive the hydrodynamics in San Quintin Bay. Numerical experiments showed that the interaction of the bay with the open sea regulates the nutrients exchanged and that the net flux of nutrients towards the bay is mainly due to residual currents. There is also an indication that advection and diffusive processes play an important role in the nutrient exchange conditions. Circulation cells inside within and countercurrents at the mouth of the bay have an important effect on resident times and, consequently, on the productivity in San Quintin Bay.

Influence of Physical and Biological processes on Primary Productivity in San Quintin Bay, B.C., México.

Sergio Jiménez-Hernández¹
Adán Mejía-Trejo²
Zaúl García-Esquivel^{2,3}

¹Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Portuaria, Marítima y Costera (CIDIPORT)

Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT)
Edificio CIDIPORT, F.I., C.U. Tampico-Madero, UAT
Tampico 89337, Tamaulipas, México.
Tel.: 52(833)2412051; 52(833)2412000 ext 3542
E-mail: sjimenez@uat.edu.mx

²Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California
Km 106 Carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada 22860, Baja California, México
E-mail: amejia@uabc.mx²; sgarcia@uabc.mx³

Abstract

The variability of the primary productivity in San Quintín Bay, BC, Mexico, was analyzed in terms of physical and biological processes. A nonlinear, bi-dimensional model was used to couple physical processes and primary productivity. The biological processes involved are represented by a Phytoplankton-Zooplankton-Nutrient Model, which uses the nitrogen content as a tracer for the state variables. Tides, wind and bottom friction drive the hydrodynamics in San Quintin Bay. Numerical experiments showed that the interaction of the bay with the open sea regulates the nutrients exchanged and that the net flux of nutrients towards the bay is mainly due to residual currents. There is also an indication that advection and diffusive processes play an important role in the nutrient exchange conditions. Circulation cells inside within and countercurrents at the mouth of the bay have an important effect on resident times and, consequently, on the productivity in San Quintin Bay.

Keywords: Primary productivity; physical-biological coupled model; San Quintin Bay.

1. Introduction

San Quintin Bay (SQB) is a shallow, non-estuarine lagoon with a narrow mouth (~1.2 Km) connected to the Pacific Ocean. It is located on the northwest of Baja California Peninsula, México, at 30°26' N and 116° W (Fig. 1). It has a mean and a maximum depth of 2 m and 12 m, respectively. The dynamic processes are driven mainly by tides (mixed, dominant semi-diurnal type) that generate an important water exchange with the coastal zone of approximately 80% of the total volume in every tidal cycle (Lara-Lara *et al.*, 1980). SQB is physically divided in two parts; Falsa Bay (FB) and San Simon Bay (SSB).

SQB is influenced by upwelling conditions in the near coastal zone during spring-summer seasons (Dawson, 1962; Cardona-Canizales *et al.*, 1990) which lead to an increase in the concentration of organic nutrients and chlorophyll *a* inside the bay (Lara-Lara *et al.*, 1980). Álvarez-Borrego (2004), suggested that upwelling conditions are increased by the ocean circulation off SQB. The permanent input of nutrients (Farfan and Alvarez-Borrego, 1983; Lara-Lara *et al.*, 1980) and the intense remineralization inside the bay (Camacho-Ibar *et al.*, 1997), makes SQB a heterotrophic coastal lagoon, which is anomalous compared to any other coastal body (Odum, 1972).

Primary Production (PP) showed maximum production during the summer (37.5 mgC/m³/hr) and minimum during autumn (8.3 mgC/m³/hr) (Lara-Lara and Álvarez-Borrego, 1975). Lara-Lara *et al.*, (1980) calculated, for the entire bay, a superficial mean value of 27.0 mgC/m³/hr and 122 mgC/m²/hr for the media integrated productivity.

PP is a fertility indicator and is mainly function of light intensity, nutrient availability, mixing and dispersion processes (Valiela, 1995). In a water body such as SQB, with an intense aquacultural activity (De la Torre-Castro, 2000), is very important to study the PP variability in order to establish an adequate sustained balance of environmental variables.

Studies of PP variability have been focused on oceanic conditions (Platt and Denman, 1975; Rothschild, 1988), and population dynamics analysis (Mann and Lazier, 1996) that involve three main PP components of the system: phytoplankton, zooplankton and dissolved nutrients (e.g. Franks *et al.*, 1986a, 1986b; Lee *et al.*, 2002). The use of physical-biological coupled models is a PP study technique which has been shown to be very useful in the analysis of transport processes on the ecosystem productivity (Melaku Cannu *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2002; Franks, 1995, 2002).

In this study, the PP in SQB is analyzed using a coupled physical-biological model that relates the hydrodynamics (barotropic and bidimensional) of the bay to the dynamics of nutrients, phytoplankton and zooplankton. The goal is to find the dominant processes (physical and biological), that control the spatial and temporal distribution of PP in SQB.

2. Materials and Methods

In order to evaluate the processes that control the PP in SQB, three different numerical experiments are considered. In the first experiment, the bidimensional hydrodynamics is modeled. In the second experiment, the primary throphic dynamics in the water column based on the balance between producers (phytoplankton), zooplankton (herbivores) and dissolved nutrients (nitrates) are simulated. In the third experiment both systems, the hydrodynamic and biological, are coupled.

2.1. Hydrodynamic model

A bidimensional, nonlinear, barotropic model was used; wind, tides, and bottom friction were included. The horizontal momentum conservation and continuity equations are (Johns, 1983):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_M \nabla_H^2 u + \mathfrak{I}_{sx} - \mathfrak{I}_{bx} + fv, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_M \nabla_H^2 v + \mathfrak{I}_{sy} - \mathfrak{I}_{by} - fu, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [u(h + \eta)] + \frac{\partial}{\partial y} [v(h + \eta)] = 0, \quad (3)$$

where η is the disturbed sea elevation, t is the time coordinate, u and v are the x and y velocity components respectively, h the depth, g the gravity acceleration, f the coriolis parameter, A_M the horizontal diffusion coefficient, $\tau_{s,(x,y)}$ and $\tau_{b,(x,y)}$ are the surface and bottom friction and ∇_H^2 is the horizontal Laplacian operator.

In order to calibrate the model to assure the most important dynamic characteristics of the bay, the main tidal harmonics (M_2 and K_1) in SQB were used Ocampo-Torres (1980). Model results such as sea level and phase shifts correspond with previous observations reported by Martori-Oxamendi (1989), Ocampo-Torres (1980) and Del-Valle-Lucero and Cabrera-Muro (1981).

2.2. Biological Model

The biological model (PZN model) is based on three state variables, phytoplankton (P), zooplankton (Z) and dissolved nutrients (N), modeled in terms of their nitrogen content, which is non-conservative and its concentration can be a limitation for P and Z (Franks, 2002). The following factors were used for the biomass-nitrogen conversion: C:N = 7.2, for phytoplankton and C:N = 3.6, for zooplankton (Farfán and Álvarez-Borrego, 1983). Source and sink processes are considered as defining the temporal dynamics (Fasham *et al.*, 1990). The PZN model solves the following equations for the state variables,

i) Phytoplankton

$$\frac{dP}{dt} = \frac{V_m N}{k_s + N} f(I_0) P - mP - R_m \Lambda P (1 - e^{-\Lambda P}) Z. \quad (4)$$

ii) Zooplankton

$$\frac{dZ}{dt} = (1 - \gamma) R_m \Lambda P (1 - e^{-\Lambda P}) Z - \zeta Z. \quad (5)$$

iii) Nutrients

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{V_m N}{k_s + N} f(I_0) P + mP + \zeta Z + \gamma R_m \Lambda P (1 - e^{-\Lambda P}) Z. \quad (6)$$

Where P , Z and N represent the state variables. P increases according to Michaelis-Mentel uptake of dissolved nutrients, with a maximum growth rate V_m and a half-saturation constant k_s . Light assimilation $f(I_0)$ depends of superficial irradiation. The loss terms of phytoplankton include a linear death rate of m (day^{-1}) and losses due to grazing, modified Ivlev type, experimentally obtained by Mayzaud and Poulet (1978) and Ruan (2001). For details on the Coupled Physical-Biological dynamics see Franks *et al.*, (1986a, b). It is

assumed that $P + Z + N = N_T$, where N_T is the total biomass of the system, leaving a conservative property of the Eqs. (4), (5) and (6), because,

$$\frac{dP}{dt} + \frac{dZ}{dt} + \frac{dN}{dt} = 0. \quad (7)$$

The parameters included in the PZN model and their values are described in Table 1.

Zooplankton maximal grazing rate has not been determined for SQB. However Lara-Lara and Matus-Hernández (1997) calculated it for a bay 250 Km north of SQB, obtaining values of $R_m=0.25/\text{day}$ for macrozooplankton and $R_m=0.42/\text{day}$, for microzooplankton. Initial state and boundary conditions for the PZN field are defined in Table 2.

2.3. Coupled Physical-Biological Dynamics

The biological equations were incorporated into the physical framework using the conservative equation:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u C_i) - \frac{\partial}{\partial y}(v C_i) + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial C_i}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial C_i}{\partial y}\right) + F_i, \quad (8)$$

where, the variable C_i represents Phytoplankton, Zooplankton or Nutrients field. Here F_i is defined according to the equations of the biological fields (Eqs. 4, 5, 6). The velocity parameters are obtained from the hydrodynamic equations. The turbulent diffusion coefficient

145 ($D_x = D_y$) used was $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$, as suggested by Mann and Lazier (1996) and Franks and
146 Walstad, (1997).

147 148 **3. Models Results**

149 **3.1. Hydrodynamic modeling results**

150 Figs. 2, 3 and 4, show the residual circulation field for the three different forcing
151 mechanisms; M_2 , M_2 + Breeze and M_2 + Northwesterly constant wind. These conditions are
152 considered the most representative fields for use in the coupling experiment. Some
153 characteristics of these physical conditions are highly relevant to the coupling. For instance,
154 the circulation cells in the northern part of False Bay (FB) and countercurrents in the mouth
155 and near the outflow of San Simon River (SSR). The circulation cells change residence times
156 and play an important role in the biological process, see Figs. 2, 3 and 4. (For details on the
157 hydrodynamics of SQB (residual currents) see Jiménez and Mejia-Trejo, 2004).

158

159 **3.2. Biological modeling results**

160 Eqs. (4), (5) and (6) describe the PZN dynamics. The model started with values shown
161 in Table 2 and was calibrated with the parameter-values given in Table 1.

162 At first, a stable equilibrium condition (SEC) is defined for the biological model with
163 initial field conditions for PZN ($N = 0.26 \text{ mg N/m}^3$; $P = 2.43 \text{ mg N/m}^3$; $Z = 3.04 \text{ mg N/m}^3$). Fig.
164 5, shows the temporal variability for the PZN fields. The SEC is reached after 11 days with
165 values of $N = 2.86 \text{ mg N/m}^3$; $P = 0.49 \text{ mg N/m}^3$ and $Z = 2.37 \text{ mg N/m}^3$ (Fig. 6 shows the
166 phase plane). The sensitivity analysis of the parameters was analyzed by Franks *et al.*,
167 (1986a, b) and Ruan (2001).

168

169 3.3. Coupled model results

170 Three different biological schemes (see Table 2) were applied using the hydrodynamic
171 forcing shown in Fig. 3 (Case 1, 2 and 3, shown in Figs. 9, 10 and 11, respectively). In all
172 three scenarios, the PZN fields started from the values obtained from the SEC. The instant
173 concentration of P, Z and N show the formation of zones of high and null accumulation of
174 these properties relating them to circulation cells and countercurrents (See Figs. 7 and 8). In
175 particular, Fig. 8 shows a high phytoplankton concentration near the main channel between
176 FB and SSB and determines the influence of the mouth in the distribution of nutrients in FB.
177 An Important result is the relation between the maximum phytoplankton concentration values
178 and the minimum concentration of nutrients. The Zooplankton distribution is rather
179 homogeneous. SSB shows low productivity mainly in the northern part.

180

181 Fig. 9, Case 1, shows the mean PZN field values on the 14th day of simulation. A $K_{ext} = 1.1 \text{ m}^{-1}$
182 ¹ is considered as a typical value for the bay for a low light condition. The figure also shows
183 high nutrient concentration zones in the shallower areas and low concentration in the
184 channels, where, in contrast, the productivity is high and the concentration of the
185 phytoplankton is maximum. The most productive area is the union between FB and SSB in
186 terms of maximum phytoplankton concentration. This maximum must be supported by the
187 advective and diffusive terms of nutrients from the mouth to the bay. FB and the southern part
188 of SSB dynamics are strongly influenced by the tidal forcing. The zooplankton concentration
189 is nearly homogeneous in the entire bay. However, an influence of the mouth in the lower part

of FB can be noticed. SSB shows less important productivity activity and a nutrients deficit which reduces drastically PP.

In order to analyze upwelling conditions and their role in the PZN dynamics in the bay (Case 3, in the Table 2), higher nutrient contribution, as a biological forcing, is considered (Fig. 11). For this case, a 14 day forcing is considered in contrast to the previous case. The nutrient contribution due to upwelling increases the phytoplankton concentration compared to Case 1 (Fig. 9). The intense pumping of nutrients from the mouth to the bay creates a maximum concentration of phytoplankton in the base of FB; this decreases toward the interior of the bay due to advective and diffusive processes. SSB shows a similar lower productive area. The zooplankton distribution due to upwelling does not alter the pattern even though it causes a high concentration along the main channel and a more extended area compared with the case shown in Fig. 9.

To test the hypothesis that PP in SQB is limited because of light restrictions rather than limited nutrient availability (Álvarez-Borrego, 2004; Camacho-Ibar, *et al.*, 1997), different values K_{ext} are used. Values over 1.1 m^{-1} , (Fig. 9) were considered as limiting light condition and values lower than 1 m^{-1} as non-limiting. In Case 2 (Fig. 10), for a $K_{ext} = 0.85 \text{ m}^{-1}$, modeling results show how the nutrient dependence is maximized in nearly all the bay in order to maintain the phytoplankton production; this mainly occurs because of the nutrient input from the mouth. For $K_{ext} < 1 \text{ m}^{-1}$, the production dependence in the bay is a function of nutrient availability and for $K_{ext} \geq 1 \text{ m}^{-1}$, the production is basically null in the shallow areas because of lack of light caused by the turbidity generated even considering nutrient input from the mouth. The nutrient concentration distribution in the entire bay shows two zones of maximum values; one is in the lower part of SSB and the most important in the high part of FB. The zooplankton

concentration distribution is not homogeneous as in the previous case, showing an intense activity in the mouth and in the lower part of FB but becoming very low in the northern part of SSB.

To distinguish the physical control over PP in the entire bay, the PZN fields for two places (BF and SSB) is shown; one located in the base of FB, affected by the main channel (Fig. 12), and the other one in a shallow area of SSB (Fig. 13). In both cases, a highly concentrated of nutrients can be found with a diurnal modulation. Nevertheless, in the case of SSB (Fig. 13), the concentration of all their fields (PZN) is downcast periodically.

4. Discussions and conclusions

A coupled physical-biological model is useful to describe the spatial and temporal evolution of PZN concentration and dissipation, under different scenarios. Modeling results show that PP in SQB is very sensitive to nutrient availability and transport processes. All three biological scenarios show that nutrient exchange with the near coastal area is important in maintaining SQB PP.

PZN dynamics modeling results show that in SQB the average nutrient concentration is lower than the near oceanic condition. Considering this result and with the hypothesis that SQB works as a remineralization water body, the advective and diffusive processes play a decisive role in this condition. It is necessary to note that SQB receives only a small nutrient contribution from the land (Barnard, 1962). The PZN averaged fields, mainly in upwelling condition (Fig. 10), show that the bay depends on imported nutrients from the ocean and that their distribution within the bay is due to physical processes (advection and diffusion).

The nutrient contribution from the ocean to SQB, due to upwelling makes the nutrient input more available (Álvarez-Borrego, 2004). Physical processes such as circulation cells and countercurrents increase residence times making some regions more productive than others; this is the case in the northern part of Falsa Bay, the lower part of SSB, the area next to San Simon river and the entrance to the open sea (Fig. 9).

PZN dynamics is more similar to Case 1 (Fig. 9) than Case 2 (Fig. 10), which corroborates the hypothesis that light is a limiting factor in SQB PP and that the nutrients pumping from the ocean are then redistributed by advective and diffusive processes to the rest of the bay. The ocean is the only possible source because of the null mainland contribution (Barnard, 1962). The low productivity in the shallow areas may play an important role in sea grass formation where the highest suspended nutrient concentration can be found (Fig. 9). PP in the shallow areas has low values for $K_{ext} > 1.1 \text{ m}^{-1}$ implying that the nutrients have high values in this region and that they can be attributed to another productive processes not considered in the model (bottom biogeochemical interactions, for example).

In terms of physical-biological dynamics, there is a difference between the SSB and FB. The reduced circulation in SSB probably activates another biological balance to compensate the nutrients deficit (see Fig. 13) and maybe the detritus, which is not considered among the biological processes in the modeling efforts, plays an important role in the PP in SQB. In this region the seagrass can be another source of PP which is not considered in the model. The model results can be used for several purposes, such as to support the planning of measuring fields in SQB and studies related to the use of aquaculture. However, to improve the model it is necessary to include the biological processes relating to water-sediment interactions which appear to be important in the northern part of SSB.

- 282 Cardona-Canizales, C., Millán-Núñez, R., Lara-Lara, J.R. and Valdez-Holguín, J.E., 1990.
 283 Variabilidad espacio temporal de la Clorofila *a* en una zona de surgencias frente a Baja
 284 California. *Ciencias Marinas* 16, 53-65.
- 285 Chen, C., Ji, R., Schwab, D.J., Beletsky, D., Fahnenstiel, G.L., Jiang, M., Johengen, T.H.,
 286 Vanderploeg, H., Eadie, B., Budd, J.W., Bundy, M.H., Gardner, W., Corner J. and
 287 Lavrentyev, P.T., 2002. A model of the coupled biological and physical dynamics in
 288 Lake Michigan. *Ecol. Model.* 152, 145-168.
- 289 Dawson, E.Y., 1962. Benthic marine exploration of Bahía de San Quintín, Baja California.
 290 1960-61. Marine y marsh vegetation. *Pacific Naturalist*. 3(7), 275-280.
- 291 De la Torre-Castro, M., 2000. Expanding Oyster Cultivation in San Quintín Bay, México:
 292 Possibilities and Constraints. MSc thesis. Dep. of Systems Ecology, Stockholm
 293 University. Sweden, 56 pp.
- 294 Del-Valle-Lucero, D.V. and Cabrera-Muro, H., 1981. Aplicación de un Modelo Numérico
 295 Unidimensional a Bahía San Quintín, B.C. Verano de 1977. *Ciencias Marinas* 7, 1-15.
- 296 Edwards, A., 1999. Zooplankton Mortality and the Dynamical Behavior of Plankton Population
 297 Models. *Bulletin of Mathematical Biology*. 61, 303-339.
- 298 Farfán, B.C. and Álvarez-Borrego, S., 1983. Variability and fluxes of nitrogen and organic
 299 carbon at the mouth of a coastal lagoon. *Estuary Coast. Shelf Sci.* 17, 599-612.
- 300 Fasham, M.J.R., Ducklow, H.W. and McKelvie, S.M., 1990. A nitrogen-based model of
 301 plankton dynamics in the oceanic mixed layer. *J. Marine Res.* 48, 591-639.
- 302 Franks, P., 1995. Coupled physical-biological models in oceanography. U.S. National Report
 303 to IUGG, 1991-1994. *Rev. Geophys.* 33, 1177-1187

- 304 Franks, P., 2002. NPZ Models of Plankton Dynamics: Their Construcction, Coupling to
305 Physics, and Application. *Journal of Oceanography* 58 (2), 379-387.
- 306 Franks, P., Wroblewski, J.S. and Flierl, G.F., 1986a. Behavior of simple plankton model with
307 food-level acclimation by herbivores. *Marine Biology* 91, 121-129.
- 308 Franks, P., Wroblewski, J.S. and Flierl, G.F., 1986b. Prediction of Phytoplankton Growth in
309 Response to the Frictional Decay o Warm-Core Ring. *J. Geophys. Res.* 91 (C6), 7603-
310 7610.
- 311 Franks, P.J.S. and Walstad, L.J., 1997. Phytoplankton Patches at Fronts: A Model of
312 Formation and Response to Wind Events. *J. Marine Res.* 55, 1-29.
- 313 Jiménez, S. and Mejía-Trejo, A., 2004. A Numerical Investigation of the Dynamics of San
314 Quintin Bay, B.C.: Transport Processes. In: XII International Conference on Physics of
315 Estuaries and Coastal Seas. Merida, Yuc. México.
- 316 Johns, B., 1983. *Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas*. New York, NY: Elsevier
317 Science Publishers.
- 318 Lara-Lara, J.R., Álvarez-Borrego, S. and Small L.F., 1980. Variability and tidal exchange of
319 ecological properties in a coastal lagoon. *Journal of Estuarine and Coastal Marine*
320 *Research*. 11, 613-637.
- 321 Lara-Lara, J.R. and Matus-Hernández, M.E., 1997. Tasas Diarias de Pastoreo Del
322 Macrozooplancton En la Costa de Baja California. *Ciencias Marinas* 23, 43-70.
- 323 Lara-Lara, J.R. and Álvarez-Borrego, S., 1975. Ciclo anual de clorofilas y producción
324 orgánica primaria en Bahía de San Quintín, B.C. *Ciencias Marinas* 2, 77-97.

- 325 Lee, J.Y., Tett, P., Jones, K., Jones, S., Luyten, P., Smith, C. and Allen, K.W., 2002. The
326 PROWQM physical-biological model with benthic-pelagic coupling applied to the
327 northern North Sea. *J. Sea Res.* 48, 287-331.
- 328 Mann, K.H. and Lazier, J.R.N., 1996. *Dynamics of Marine Ecosystems: Biological-Physical*
329 *Interactions in the Oceans*, USA: Blackwell Science, Inc., 394 pp.
- 330 Martori-Oxamendi, J.I., 1989. *Variabilidad de la Circulación Y Sus Causas En Bahía de San*
331 *Quintín*, B.C., B.C., México: MSc Thesis, CICESE. 65 pp.
- 332 Melaku Canu, D., Solidoro, C. and Umgiesser, G., 2003. Modelling the responses of the
333 Lagoon of Venice ecosystem to variations in physical forcing. *Ecol. Model.* 170, 265-
334 289.
- 335 Mayzaud, P and Poulet, S. A., 1978. The importance of the time factor in the response of
336 zooplankton to varying concentrations of naturally occurring particulate matter. *Limnol.*
337 *Oceanogr.* 23, 1144-1154.
- 338 Ocampo-Torres, F.J., 1980. *Análisis de Mareas Y Predicción de Velocidad Mediante un*
339 *Modelo Unidimensional En Bahía San Quintín*, B.C., BSc. Thesis.
- 340 Odum, E.P., 1972. *Ecología*, México, D.F. Interamericana. 639 pp.
- 341 Osorno-Velázquez, A.I., 2000. *Impacto del cultivo de moluscos filtroalimentadores en el*
342 *fitoplancton y calidad del agua de Bahía San Quintín*. MSc. Thesis, CICESE. 48 pp.
- 343 Platt, T. and Denman, K.L., 1975. A general equation for the mesoscale distribution of
344 phytoplankton in the sea. *Mem. soc. Roy. Sci. de Liege*, 7, 31-42.
- 345 Ruan, S., 2001. Oscillations in Plankton Models with Nutrient Recycling *J. Theor. Biol.* 208,
346 15-26.

- 347 Rothschild, B.J., 1988. Toward a Theory on Biological-Physical Interactions in the World
348 Ocean. NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 239.
349 Valiela, I., 1995. Marine Ecological Processes, New York, USA: Springer-Verlag., 686 pp.
350 Wroblewski, J.S. and O'Brien, J.J., 1976. A Spatial Model of Phytoplankton Patchiness.
351 Marine Biology 35, 161-175.

370 List of figures

371

372 Fig. 1. San Quintín Bay, B.C., México.

373 Fig. 2. M_2 driven circulation in San Quintin Bay: Residual Currents.

374 Fig. 3. M_2 + NW winds driven circulation in San Quintin Bay: Residual Currents.

375 Fig. 4. M_2 + Breeze driven circulation in San Quintin Bay: Residual Currents.

376 Fig. 5. Temporal variability for the Phytoplankton, Zooplankton and Nutrients fields. Details of

377 the parameters and initial conditions are in Table 1 and 2 respectively.

378 Fig. 6. Phase plane for the condition shown in Fig. 5.

379 Fig. 7. Phytoplankton, Zooplankton and Nutrients concentrations instant fields after 24 Hrs

380 with the M_2 + breeze forcing condition. $K_{ext} = 1.1 \text{ m}^{-1}$

381 Fig. 8. Phytoplankton, Zooplankton and Nutrients concentrations instant fields after 72 Hrs

382 with the M_2 + breeze forcing condition. $K_{ext} = 1.1 \text{ m}^{-1}$.

383 Fig. 9. Case 1. Phytoplankton, Zooplankton and Nutrients concentrations mean fields after 14

384 days with the M_2 + NW wind driven circulation forcing condition. $K_{ext} = 1.1 \text{ m}^{-1}$.

385 Fig. 10. Case 2. Phytoplankton, Zooplankton and Nutrients concentrations mean fields after

386 14 days with the M_2 + NW wind driven circulation forcing condition. $K_{ext} = 0.85 \text{ m}^{-1}$.

387 Fig. 11. Case 3. Phytoplankton, Zooplankton and Nutrients concentrations mean fields after

388 14 days with the upwelling biological forcing condition and M_2 + NW wind driven

389 circulation forcing condition. $K_{ext} = 1.1 \text{ m}^{-1}$.

390 Fig. 12. Hourly Phytoplankton, Zooplankton and Nutrients concentrations in a central point of

391 FB affected by the main channel (M_2 + NW wind driven circulation forcing condition and

392 $K_{ext} = 1.1 \text{ m}^{-1}$).

393 Fig. 13. Hourly Phytoplankton, Zooplankton and Nutrients concentrations in a shallow area of
394 SSB (M_2 + NW wind driven circulation forcing condition and $K_{ext} = 1.1 \text{ m}^{-1}$).
395
396

397 List of tables

398

399 Table 1. Parameters and their values used in PZN model for SQB simulations.

400 Table 2. Initial and boundary forcing conditions used in the Phytoplankton, Zooplankton and
401 Nutrients model.

Influence of Physical and Biological processes on Primary Productivity in San Quintin Bay, B.C., México.

Sergio Jiménez-Hernández¹

Adán Mejía-Trejo²

Zaúl García-Esquivel^{2,3}

¹Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Portuaria, Marítima y Costera (CIDIPORT)

Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT)
Edificio CIDIPORT, F.I., C.U. Tampico-Madero, UAT
Tampico 89515, Tamaulipas, México.
Tel.: 52(833)2412051; 52(833)2412000 ext 3542
E-mail: sjimenez@uat.edu.mx

²Instituto de Investigaciones Oceanológicas

Universidad Autónoma de Baja California
Km 106 Carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada 22860, Baja California, México
E-mail: amejia@uabc.mx²; sgarcia@uabc.mx³

List of figures

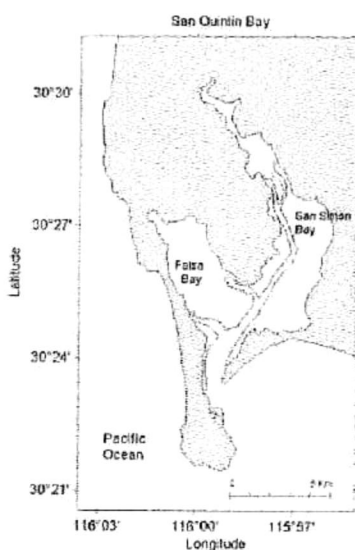


Fig. 1.

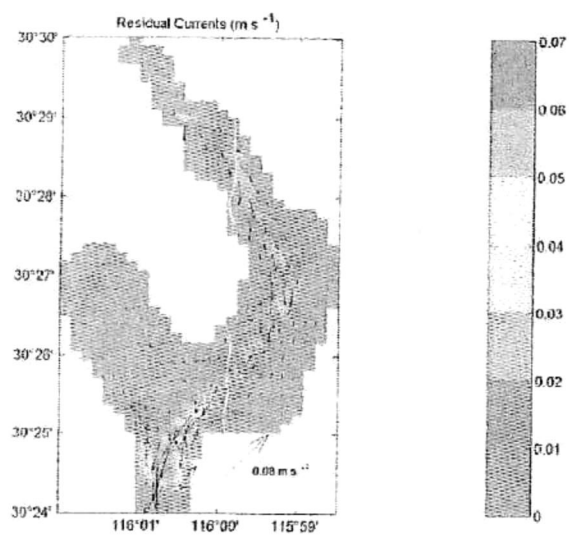


Fig. 2.

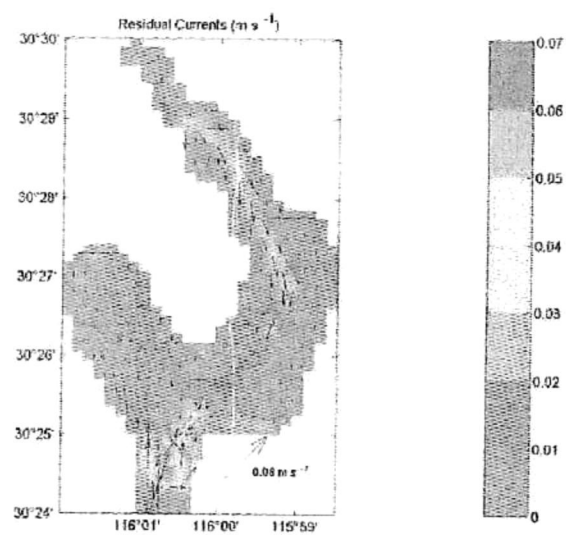


Fig. 3.

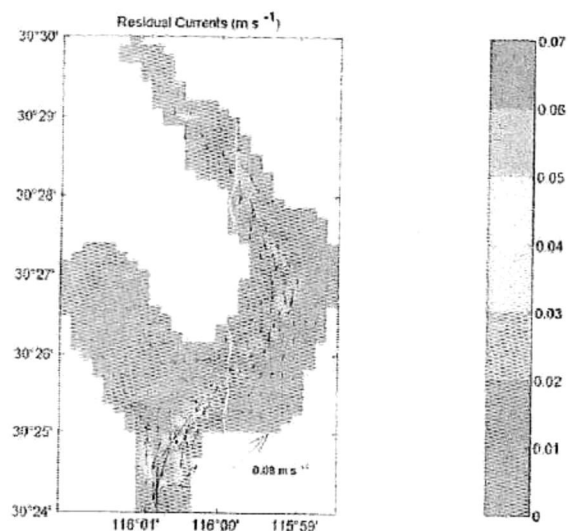


Fig. 2.

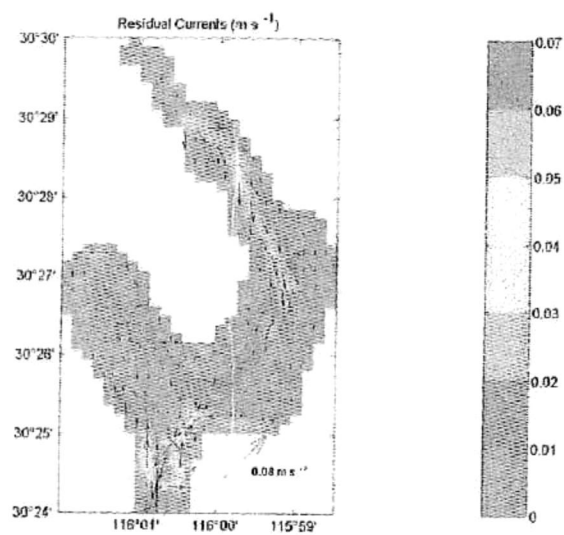


Fig. 3.

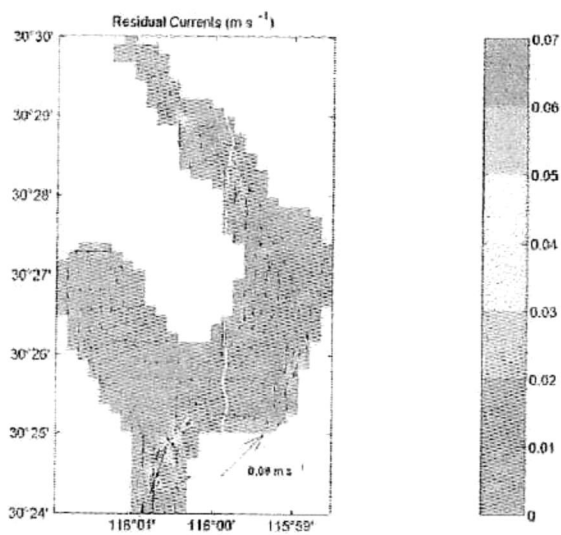


Fig. 4.

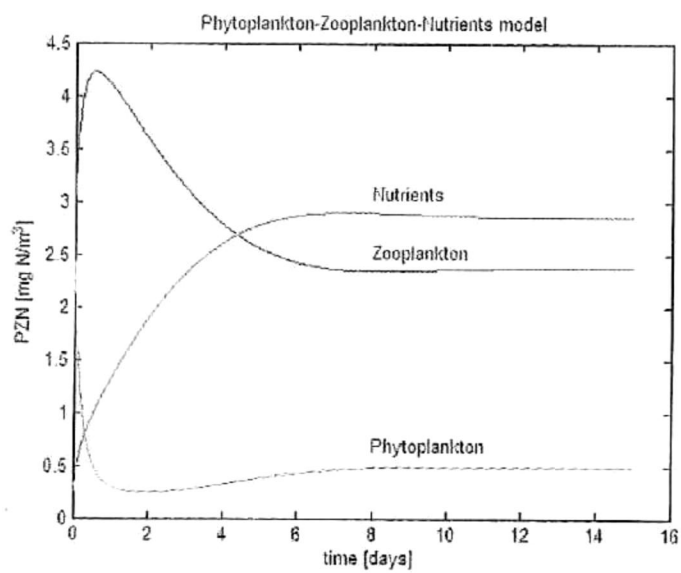


Fig. 5.

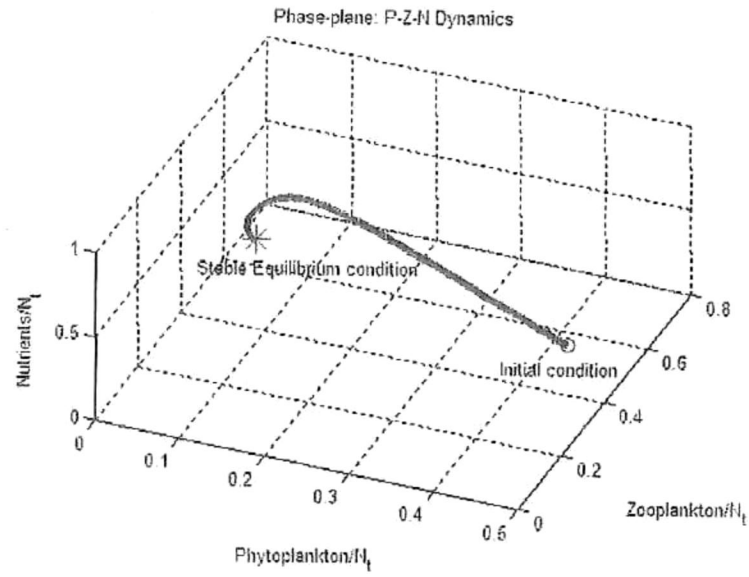


Fig. 6.

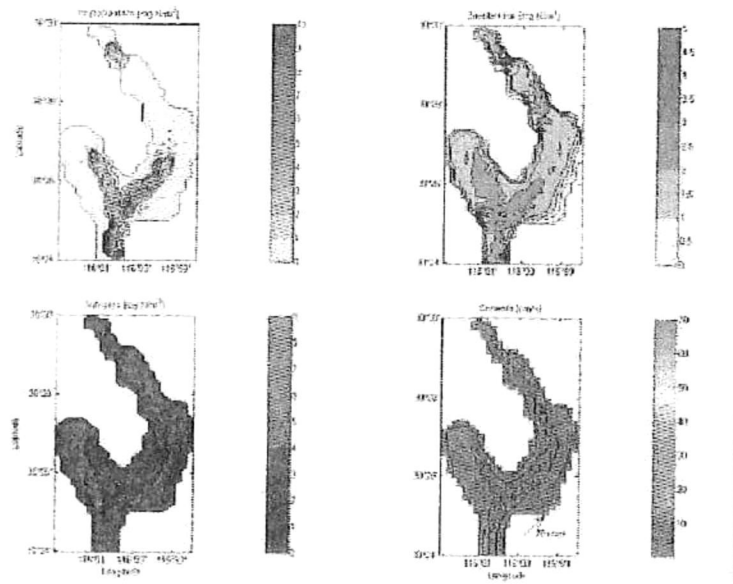


Fig. 7

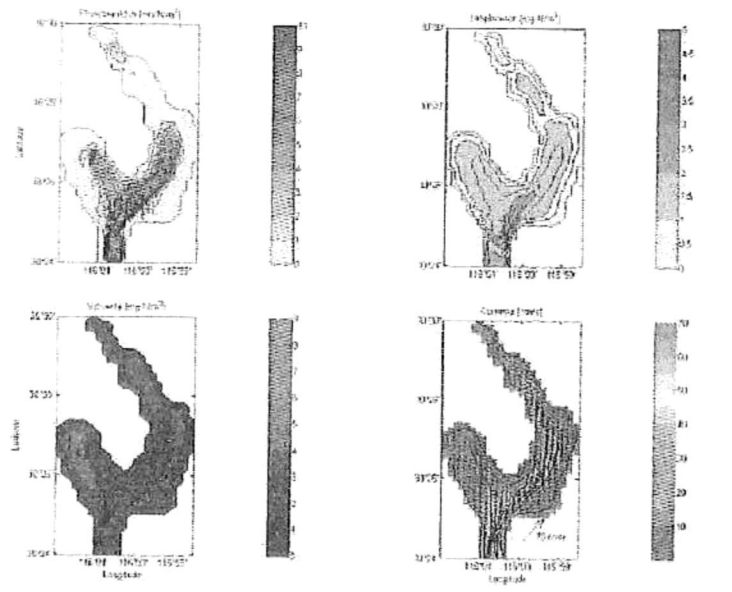


Fig. 8

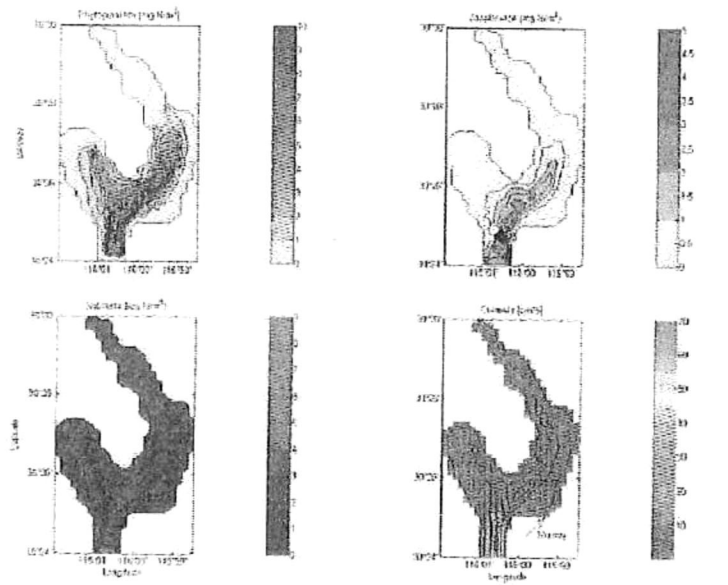


Fig. 9

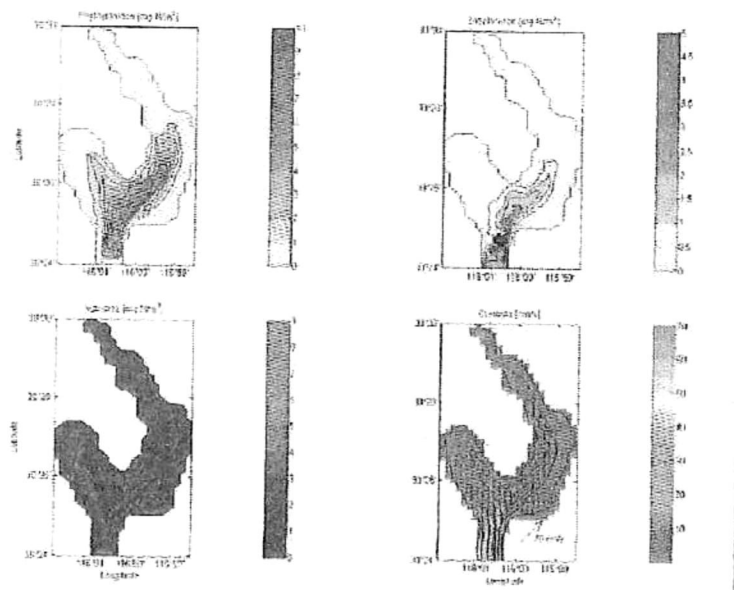


Fig. 10

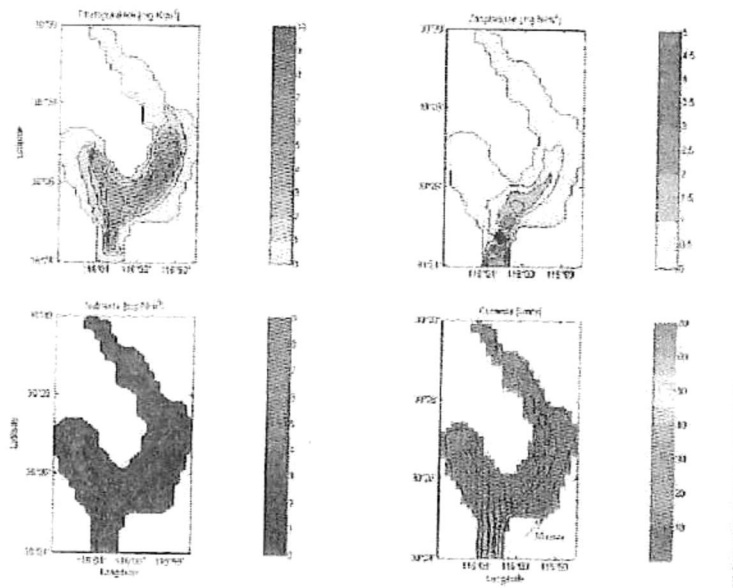


Fig. 11

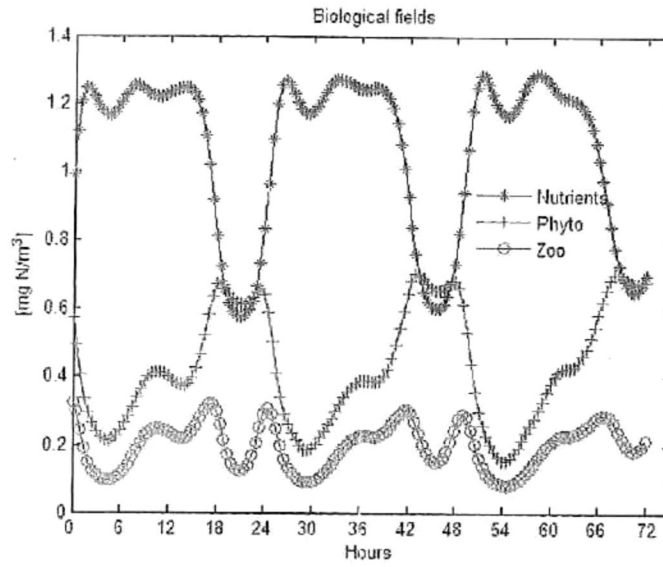


Fig. 12.

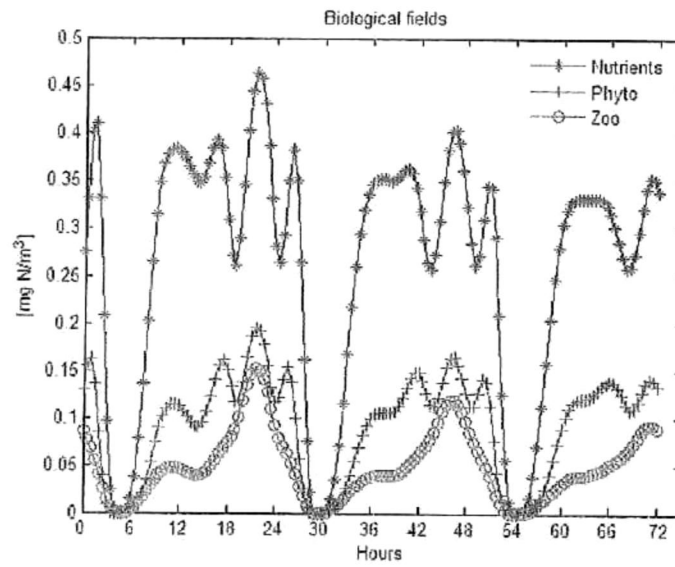


Fig. 13.

Influence of Physical and Biological processes on Primary Productivity in San Quintin Bay, B.C., México.

Sergio Jiménez-Hernández¹
Adán Mejía-Trejo²
Zaúl García-Esquivel^{2,3}

¹Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Portuaria, Marítima y Costera
(CIDIPORT)

Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT)
Edificio CIDIPORT, F.I., C.U. Tampico-Madero, UAT
Tampico 89515, Tamaulipas, México.
Tel.: 52(833)2412051; 52(833)2412000 ext 3542
E-mail: sjimenez@uat.edu.mx

² Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California
Km 106 Carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada 22860, Baja California, México
E-mail: amejia@uabc.mx²; sgarcia@uabc.mx³

List of tables

Table 1. Parameters and their values used in PZN model for SQB simulations.

Parameter	Definition	Value	Reference
ζ	Zooplankton death rate	(0.07 - 1.75); 0.15 day ⁻¹	Edwards, 1999.
k_s	Nutrient uptake half saturation constant (Michaelis-Menten constant)	1.0 mg N m ⁻³	Franks <i>et al.</i> , 1986a and 1986b.
m	Phytoplankton death rate	0.1 day ⁻¹	Franks <i>et al.</i> , 1986a and 1986b.
R_m	Zooplankton maximal grazing rate	(0.25 - 0.42); 0.25 day ⁻¹	Lara-Lara and Matus-Hernández, 1997.
V_m	Phytoplankton maximal Growth rate	0.27 day ⁻¹	$\beta = R_m/V_m \leq 1$ (Wroblewski and O'Brien, 1976). We used $\beta = 0.9$
γ	Unassimilated grazing fraction	0.3	Valiela, 1995.
Λ	Ivlev constant	0.021 [mg N m ⁻³] ⁻¹	$\alpha = \Lambda N_T$; (Wroblewski and O'Brien, 1976) where α is the Ivlev dimensionless constant 1.0. [$N_T = 47.6$ mg N m ⁻³] (Ruan, 2001).
K_{ext}	Attenuations constant	0.85 - 1.1 [m ⁻¹]	Álvarez-Borrego <i>et al.</i> , 1977; Osorno-Velázquez, 2000.
I_0	Superficial irradiation	10 W/m ²	Cabello-Pasini <i>et al.</i> , 2004.

Table 2. Initial and boundary conditions used in the Phytoplankton, Zooplankton and Nutrients model.

Location	Phytoplankton P	Zooplankton Z	Nutrients N	References
Initial conditions for the fields PZN to Case 1 [$K_{ext} = 1.1 \text{ m}^{-1}$] and 2 [$K_{ext} = 0.85 \text{ m}^{-1}$].	17.5 - 1,615 mgN/m ³ [2.43 N/m ³]*	0.01 - 6.08 mg N/m ³ [3.04 N/m ³]*	0.26 - 12.82 mg N/m ³ [0.26 N/m ³]*	Farfán and Álvarez-Borrego, 1983.
Biological forcing condition to Case 1 and 2.			1.87 mg N/m ³ at the mouth of SQB	Camacho-Ibar <i>et al.</i> , 1997.
Biological forcing to upwelling condition, Case 3.			70 mg N/m ³ at the mouth of SQB	Cardona-Canizales <i>et al.</i> 1990.

**A Numerical Investigation of the Dynamics of San Quintin Bay, B.C.:
Transport Processes. Enviado a la revista Ocean Dynamics, octubre de 2004.**

A Numerical Investigation of the Dynamics of San Quintin Bay, B.C.: Transport Processes

SERGIO JIMENEZ¹, ADAN MEJIA²

1. Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Portuaria, Marítima y Costera (CIDIPORT). Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller". Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT). Ed. CIDIPORT, C.U. Tampico-Madero, UAT. Tampico, CP 89000, Tam., México. email: sjimenez@uat.edu.mx
2. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California Apartado Postal 453. Ensenada, Baja California, 22800, México. email: amejia@uabc.mx

Keywords: numerical modelling, Coastal Lagoon, San Quintin Bay.

ABSTRACT

The transport processes in San Quintin Bay are investigated using a nonlinear two-dimensional hydrodynamic model. It is used as a numerical laboratory to isolate the response to specific forcing mechanisms such as tides and wind stress fields. The transport processes are studied using the transport equation of a conservative tracer and trajectories of free particles. The results show that most of the dynamics correspond to tidal forcing mainly along the deep channels. The wind driven circulation plays an important role in the rest of the bay. The hydrodynamics of the bay defines 4 important areas with a particular residence time, the lowest exchange rate of all, located in the furthest part of bay, and has an averaged residence time of up to 21 days.

INTRODUCTION

San Quintin Bay (SQB), B.C. is a hypersaline shallow lagoon located in the western coast of Baja California Peninsula, Mexico (30°27'N, 116°00'W). This bay covers an area of roughly 42 km², and consists of two sub-basins, Falsa Bay (FB) in the western side and San Simón Bay (SSB) in the eastern side (Fig.1). Both sub-basins have an extensive intertidal shoal with an averaged depth of 2 m and channels up to 12 m deep. The southern part of SQB is connected to the open sea through a mouth, 1 km wide with an averaged depth of 8 m. SQB is a net evaporative system since its salinity is always higher than the adjacent ocean (33.8 - 34.7 psu annual range) with a total system volume of 90×10^6 m³, and a water exchange time of approximately 14 days estimated from water and salt balances (Camacho-Ibar et al., 1997). Upwelling events occurring off SQB during spring and summer seasons are responsible for the lowest temperature (11.7°C) and highest salinities (35.28 psu) observed at the mouth. Tidal characteristics in BSQ are semidiurnal with a height range about 2.5 m during spring tides (Ocampo-Torres, 1980 and Martori-Oxamendi 1989). The current at the entrance is highly directional and reaches values up to 80 cm s⁻¹, and decreases toward the interior of the bay (Del Valle-Lucero and Cabrera-Muro, 1981a and 1981b; Ocampo-Torres, 1980). Plascencia-Díaz (1980) using temperature, salinity and σ_t profiles, mentioned that the circulation forced by density gradients is not relevant in the SQB. Martori-Oxamendi (1989) states that even though the residual circulation is one order of magnitude lower than the tidal, it is important to control the in-out fluxes giving permanent renovation of water to the system. The influence of the non-local wind stress on the variability of residual circulation is apparent in periods from 4 to 21 days, causing Ekman transport –in this time scales the dominant wind component parallel to the coast is a major factor inducing exchange with oceanic waters. This paper investigates the dynamics of San Quintin Bay using a wind and tidal driven nonlinear two-dimensional hydrodynamic transport model.

Methodology. The hydrodynamic model

The hydrodynamics of SQB is simulated using a two-dimensional model. It assumes a hydrostatic, Boussinesq fluid without rotation (See Dyer, 1973). The model domain is 12.5 km wide and 6 km long with a horizontal grid resolution equivalent to 250 m. The equations of motion are integrated in time using a leap-frog scheme, with a 15s time step on a finite difference mesh (an Arakawa C-grid). The values of mesh resolution and time step satisfy the CFL stability condition for a $h_{\max} = 12$ m (Dawson et al., 1983). At the SQB mouth, the elevation and velocity are imposed from the most important tidal components (K_1 and M_2 , see Table 1).

Table 1. - Main tidal components in San Quintin Bay (Ocampo-Torres, 1980).

Tidal component	M_2	K_1
Frequency [cycles/hr]	0.0851	0.04155
Amplitude [m]	0.48	0.31
Phase [degrees]	285.2	95.6

Along the land boundaries, a non-slip boundary condition was imposed. At the mouth of SQB, the forced boundary, a tidal forcing function through the pressure gradient terms in the equations of motion is imposed (Leendertse, 1967). The transport process was simulated using the equation defined by Fischer (1979) and the trajectory of particles was implemented with the "Walking-Particle Method" described by Ozmidov (1990).

Experimental numerical design

In order to study the hydrodynamics of SQB we consider three different groups of numerical experiments. The first experiment shows the hydrodynamical patterns for nine different forcing conditions (see Table 2), as well as the residual currents and vorticity and divergence associated. The second experiment focuses the attention in analyzing the transport processes associated to San Simon river discharge patterns. The third experiment describes the lagrangean trajectories of particles sowed at selected points of the bay and their estimated residence times.

Table 2 First group of experimental numeric design to reproduce the hydrodynamics of San Quintin Bay.

Experiment	Forcing conditions			
	Tidal component		Wind	
	M_2	K_1	Breeze (5 m/s)	NW (7 m/s)
1	x			
2		x		
3	x	x		
4	x		X	
5	x			x
6		x	X	
7		x		x
8	x	x	X	
9	x	x		x

RESULTS AND DISCUSSION

i) Tidal forcing (experiments 1, 2 and 3)

As we mentioned previously, the hydrodynamic patterns simulated correspond to different forcing conditions. The most important tidal harmonics considered in SQB where M_2 and K_1 , (Ocampo-Torres, 1980). Initially, the model is spun up from a state of rest to reach a steady response, in other words, the patterns are similar in each cycle. The elevation in different locations and phase delays, correspond to what were reported by Martori-Oxamendi (1989) and Ocampo-Torres (1980). A spectral analysis shows as well a peak corresponding to a 6 hours period related to frictional effects as previously reported Martori-Oxamendi (1989). The tidal signal propagates with no apparent distortion in BF and just slightly in BSS with a shift delay of approximately 45 minutes. M_2 tidal forcing (Experiment 1). Considering only M_2 tidal forcing, the residual currents (Fig. 2a) show important structure along the channels, as expected from the bathymetry, and the mouth which is very dynamically active. High values of relative vorticity (Fig. 2.b) are restricted as well to the channels, the mouth and a small region in SSB, it is related to strong bottom frictional effects. For the K_1 tidal component (Experiment 2), the residual currents are weaker and do not show important flows along the channels as the M_2 response. Figure 4 shows residual currents corresponding to K_1 plus M_2 tidal harmonics (Experiment 3).

ii) Tidal and wind stress forcing combined (Experiments 4, 5, 6, 7, 8 and 9)

In this first series of experiments, initially the model is spun up from rest until a steady response to the tidal and wind stress forcing was obtained. In order to eliminate initial transients, the model was allowed to evolve during ten days before the application of wind stress. Figures 5 and 6 represent the residual currents driven by M_2 tidal and wind forcing, a breeze regime and NW winds, respectively. In the first case, the winds are northwesterly during the day and southwesterly during the night, with an intensity reaching values up to 8 m s^{-1}

(Arreola-Contreras, 1989), in the second case, wind direction is from the NW and the intensity up to 10 m s^{-1} (Del Valle Lucero and Cabrera-Muro, 1981a). For a breeze regime, the residual currents show high values along the channels and cells formation in the central part of FB and in the lower part of SSB. There are currents flowing in opposite directions, compared to tidal forcing only, in the right side of the mouth and in the central part of the bay. Both currents were previously reported by Del Valle and Cabrera-Muro (1981a y 1981b) and Martori-Oxamendi (1989). The residual contra-current in the mouth can be explained by the shift delay in the tidal wave signal at the entrance of the bay and for the circulation cells that are formed near to the mouth (see Figs. 2). The FB circulation cell becomes a permanent anticyclonic gyre that weakens with the tidal inflow or outflow indistinctly. The circulation cell in the southeastern part of SQSB changes direction, it is cyclonic during the tidal inflow and anticyclonic during the tidal outflow. During the tidal inflow, the circulation intensifies along the main channel with countercurrents in both extremes. The vorticity pattern for $K_1 + M_2$ tidal forcing and northwesterly winds suggest strong mixing along the main channels and the mouth of SQB and a permanent cyclonic gyre in BF. The current and vorticity pattern in SSB suggests a lot of structure, i.e. formation of small eddies. This local condition in SSB inhibits the communication with the central part of SQB, creating the formation of a permanent gyre in the lower part of SSB reducing the exchange of water with the rest of the bay. Once the wind changes direction, the vorticity field and the current pattern change radically. The residual current reverse, showing the importance of the wind forcing direction. The vorticity field intensifies in the mouth and central part of SQB, showing the formation of a weaker cell in FB.

iii) San Simon River discharge

A conservative tracer is introduced into the model at a grid location representing the San Simon River discharge. Considering a permanent outflow, the simulations indicate that basic patterns of the concentration referred to the initial discharge value. The effluent simulations show a concentration structure insensitive to an increased wind velocity. When the wind speed, increases from 4 m s^{-1} to 8 m s^{-1} , the basic patterns of concentration remains unchanged while the concentration levels are dispersed but until reaching the half part of BF. Physical processes (mainly advection) caused the formation of a large concentration of particles in the weak current associated to circulation cells (eddies). (See Fig.3a).

iv) Lagrangean trajectories and residence time

According with the Residence Time (RT), we can subdivide SQB in four main regions (Fig. 3b). The region I, the most dynamical, includes the mouth and the main channels with an averaged residence time of 5 to 6.5 hrs. The region II, the furthest part of FB, has residence times from 3.4 to 4.5 days. The region III, the low part of SSB, has residence times from 5.5 to 8.5 days and the region IV, the lowest exchange rate of all, located in the furthest part of SSB, has an averaged residence times of 21 days (See fig.3b).

CONCLUSIONS

The transport processes in SQB are strongly tidal dependent with some wind driven changes. The wind produces horizontal velocity gradients, generating circulation cells inside the bay. The velocity fields in SQB related just to tidal forcing, show important structure just concentrated in the channels. The inclusion of diurnal tidal forcing in our model made little change of the distribution of the velocity, vorticity and elevation fields. The model results show a good agreement with field measurements taken from Martori-Oxamendi (1989) and Del Valle (1979). The formation of rings in three parts of the bay was caused by the interaction of topographic and wind forcing. The transport patterns under wind forcing were very patchy in time and space. The concentration zone was strongly controlled by the horizontal transport of particles during wind events. The 2-D model successfully reproduces the basic observed patterns of concentration fields in the ring zone at BF and BSS. The residence time is not constant neither specify for the whole bay. The hydrodynamic behavior of the bay defines 4 important areas with a particular residence time with an averaged residence times of 21 days. M_2 Tide is the main driving mechanism which controls the hydrodynamic of the bay. The wind forcing intensifies the circulation cells residual and counter-current in the mouth of the bay.

References

- Arreola-Contreras, J.L., Variabilidad espacial y temporal de las condiciones meteorológicas sobre la Bahía de San Quintín, Baja California, durante primavera y verano de 1986. B.A. thesis, 73pp., FCM, UABC, 1989.
- Camacho-Ibar, V. F., J.D. Carriquiry and S.V. Smith, Comparison of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes in Mexican Coastal Lagoons: Bahía San Quintín, B.C. (A Teaching Exam-pie). Rep. 10. Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ). 67 pp, 1997.

- Dawson, G.P., B. Johns and R.L. Soulsby, A numerical model of shallow-water over topography, in Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas, edited by B. Johns, pp. 267-320, Elsevier, London, 1983.
- Del-Valle-Lucero, I. and H. R. Cabrera-Muro, Aplicación de un modelo numérico unidimensional a Bahía San Quintín, B.C., Verano de 1977, Ciencias Marinas, 7, 1-15, 1981a.
- Del-Valle-Lucero, I., and H. R. Cabrera-Muro, Análisis estadístico de condiciones hidrológicas en la Bahía de San Quintín, B.C. Verano de 1977, Ciencias Marinas, 7, 17-29, 1981b.
- Del-Valle-Lucero, I., Aplicación de un modelo numérico y análisis de condiciones hidrodinámicas en Bahía de San Quintín, B.C., M.S. thesis, CICESE, 36 pp., 1979.
- Dyer, K.R., Estuaries: A Physical Introduction, 140 pp., Wiley, London, 1973.
- Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y., Koh, J. Imberger and N.H. Brooks, Mixing in Inland and Coastal Waters, 483 pp., Academic Press, Orlando Fla., 1979.
- Leendertse, J. J., Aspects of a computational model for long-period water-wave propagation, Rep. RM-5294-PR, 195 pp., RAND Corporation, Santa Monica, CA., USA, 1967.
- Martori-Oxarnendi, J. I., Variabilidad de la circulación y sus causas en Bahía de San Quintín, B.C. M.S. thesis, CICESE, 110pp., Mexico, 1989.
- Ocampo-Torres, F.J. (1980). Análisis de mareas y predicción de velocidad mediante un modelo unidimensional en Bahía San Quintín, B.C., B.A. thesis, FCM, UABC, 1980.
- Ozmidov, R.V., Diffusion of Contaminants in the Ocean, 283 pp, Kluwer Academic, London, 1990.
- Plascencia-Díaz, R. M., Análisis de temperatura, salinidad y determinación de circulación por gradientes de densidad en Bahía de San Quintín, B.C., B.A. thesis, 123 pp, FCM, UABC, 1980.

Figure 1. San Quintin Bay, BC, Mexico.

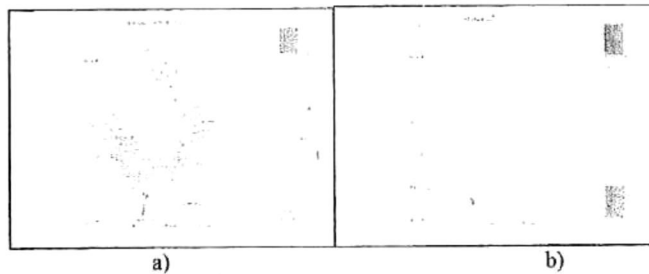


Figure 2. M_2 + Breeze driven circulation in San Quintin Bay. a) Residual Currents. b) Vorticity field.

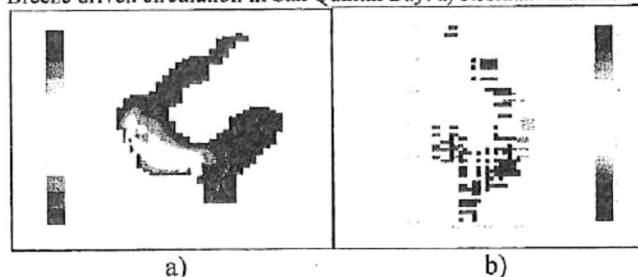


Figure 3. a) San Simon river discharge, relative average concentration contours of conservative material after 45 days discharge; using M_2 tidal forcing and Breeze wind. b) Estimate of Residence times for different parts in San Quintin Bay