

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

**INFLUENCIA DE REMOLINOS Y PROCESOS DE MEZCLA
EN EL INTERCAMBIO DE AGUA ENTRE UNA LAGUNA Y EL MAR
ABIERTO, BAHÍA SAN QUINTÍN, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO**



T E S I S

que para cubrir los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

Presenta

TERESA VIDAL JUÁREZ

Ensenada, Baja California, México, enero del 2014.

RESUMEN

El trabajo estudia la relación existente entre los mecanismos principales que controlan intercambio de agua entre un cuerpo costero y el océano. Estudios previos han demostrado que en lagunas con entradas estrechas y circulación controlada por la marea, el intercambio de agua es explicado mediante el modelo llamado bombeo por marea. Si las paredes por donde sale el flujo, tienen esquinas pronunciadas y condición de no-deslizamiento, el flujo alcanza a formar una estructura de dos remolinos encontrados (dipolo) logrando cambiar los procesos de mezcla. El bombeo por marea, la formación de remolinos y los procesos de mezcla han sido estudiados de forma independiente, por lo que el trabajo los integra para determinar si mejoran la distribución de parcelas de agua en una laguna, evitando así el reciclamiento. Para ello se propuso a Bahía de San Quintín (BSQ), Baja California, México como zona de estudio, pues dadas las características del lugar, es posible estudiar la formación de remolinos. Basándonos en mediciones hidrodinámicas, se identificaron diferentes escenarios para representarlos numéricamente utilizando el modelo Delft3D el cual probó que la presencia de dipolos, mezcla por marea y bombeo por marea optimizan la renovación de agua entre BSQ y el mar abierto. Los resultados numéricos muestran a detalle el bombeo por marea en BSQ. En las inmediaciones de la boca de la laguna, se probó la formación periódica del dipolo, el cual logra escapar de la fuente y reduce la reincorporación de agua. La marea, la dirección y magnitud del viento: desplazan el agua recién expulsada hacia la costa este aumentando la renovación. Las zonas de mayor mezcla sucedieron en el sitio de remolinos, la mezcla permite la homogenización de agua proveniente de la laguna con agua con características oceánicas lo cual evita el reciclamiento durante el bombeo. En conjunto, la formación periódica de remolinos y la mezcla por marea durante el bombeo, incrementan la renovación de agua en una laguna costera con una entrada estrecha. Entender el intercambio de agua entre laguna-océano, permite aprovechar la fertilización natural del sistema.

Palabras Clave: bombeo por marea, dipolo, mezcla por marea, Bahía San Quintín.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

**INFLUENCIA DE REMOLINOS Y PROCESOS DE MEZCLA
EN EL INTERCAMBIO DE AGUA ENTRE UNA LAGUNA Y EL MAR ABIERTO,
BAHÍA SAN QUINTÍN, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO**

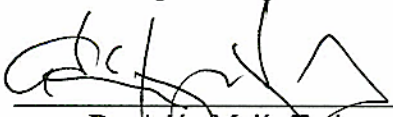
TESIS

que para cubrir los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta

TERESA VIDAL JUÁREZ

Aprobada por:


Dr. Adán Mejía Trejo
Director de tesis


Dr. Oscar E. Delgado González
Sinodal


Dr. Víctor F. Camacho Ibar
Sinodal


Dra. Amaia Ruiz de Alegría Arzaburu
Sinodal

A mis padres...

*Por la comprensión y finalmente apoyo
en mis decisiones tomadas en el
tiempo correcto o incorrecto*

Los quiere,

Su hija

AGRADECIMIENTOS

A mi director Dr. Adán Mejía por su orientación e ideas en la elaboración de la tesis. Por su apoyo en salidas a congresos y estancias (obviamente para mejorar mi aprendizaje). Por ser un excelente asesor con la disposición de tratar temas de clase, de vida y creer en mí trabajo.

Agradecer a la Dra. Amaia Ruiz de Alegría primeramente por abrirme la perspectiva al estudio en otras áreas de la oceanografía costera e inducirme a participar en otros proyectos.

A ambos doctores por incluirme en sus proyectos de donde han salido futuros trabajos y colaboraciones.

A mis sinodales Dra. Amaia Ruiz, Dr. Víctor Camacho, Dr. Oscar Delgado por las revisiones, comentarios y sugerencias que mejoraron mi trabajo de tesis.

Al CONACyT, proyecto SEP-CONACyT 54376 "Estudio Integral del ciclo del nitrógeno en Bahía Falsa, Baja California" y proyecto de investigación UABC 403-1-C-70-16 "Variación estacional de las condiciones hidrodinámicas e hidrográficas en el sistema Bahía Santa María y Bahía San Quintín, Baja California" con los cuales fue posible realizar y terminar el presente trabajo.

A la Dra. Cecilia Enríquez por otorgarme el tiempo para corregir y revisar aspectos de la modelación.

A amigos y compañeros (que dejaré en anonimato), que sin su presencia, habría terminado a tiempo mi trabajo de tesis pero seguramente no habría vivido tan agradables momentos.

CONTENIDO

	Página
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi
I INTRODUCCIÓN	1
I.1. Objetivo	2
I.1.1. Objetivos particulares	3
I.2. Marco teórico.	3
I.2.1. Bombeo por marea	3
I.2.2. Formación de remolinos.....	4
I.2.3. Procesos de mezcla	6
I.3. Modelación numérica	7
I.3.1. Malla	9
I.3.2. Modelación de flujos.....	10
I.3.2. Modelación del oleaje	11
II ZONA DE ESTUDIO	12
II.1. Características de la zona.....	12
II.1.1. Morfología	14
II.1.2. Meteorología.....	14
II.1.3. Hidrodinámica	15
III METODOLOGIA	17
III.1. Recolección y análisis de datos	17
III.1.1. Datos de marea, corriente, viento y oleaje	17
III.1.2. Datos de las características físicas del agua	19
III.1.3. Seguimiento de boyas de deriva.....	20

V.5. Limitaciones del trabajo	52
VI CONCLUSIÓN	54
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	55

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Evidencia de la existencia de remolinos en BSQ.	2
2	Modelo conceptual del bombeo por marea.	4
3	Modelo conceptual de la estructura y formación de un dipolo.	5
4	Variación temporal de la posición del centro del dipolo $Y(t)$ para diferentes relaciones W/UT .	6
5	Esquema de la zona estratificada por una diferencia entre dos tipos de agua.	7
6	Malla de tipo “staggered” utilizada por el modelo Delft3D para resolver las ecuaciones de movimiento.	9
7	Bahía San Quintín y localización de los instrumentos.	13
8	Corriente residual (componente de máxima variabilidad) para un periodo de mareas viva en un transecto cercano a la boca de BSQ.	16
9	Esquema del funcionamiento del anclaje a) ADPs “A” y “B” y b) ADP “C”.	18
10	Localización inicial de las boyas liberadas en campo bajo durante bajamar (reflujo).	20
11	Malla curvilínea sometida a pruebas de sensibilidad al efectuarse un forzamiento por marea.	21
12	Posición inicial de boyas virtuales.	23
13	Serie de temporal de viento (panel superior) y marea (panel inferior) en BSQ.	28
14	Viento típico diario (panel izquierdo) y rosa de viento anual (panel derecho) en BSQ.	29

15	Rosa anual del oleaje a ~21 km fuera de la costa de BSQ.	29
16	Serie de tiempo de la marea (panel inferior derecho) y mediciones de corrientes en BSQ durante mareas vivas por medio de los ADP “A” (panel superior derecho), ADP “B” (panel superior izquierdo) y el ADP “C” (panel inferior izquierdo).	30
17	Diagrama Hovmöller de la temperatura del agua en un transecto (entre los lances L6 al L1) fuera de la laguna y cercano a la boca.	31
18	Diagrama Hovmöller de la evolución temporal de la temperatura del agua en el sitio representado por ● en la Figura 7.	32
19	Trayectorias y velocidades que adquieren las boyas liberadas a lo largo del canal de BSQ (Figura 9, posiciones iniciales) el día 05 de noviembre del 2010 durante bajamar.	33
20	Pruebas de sensibilidad y estabilidad del modelo utilizando parámetros de tiempo de cómputo (panel izquierdo), marea simulada (panel superior derecho) y energía cinética calculada (panel inferior derecho).	35
21	Serie de tiempo de la marea simulada (panel inferior derecho) y datos de corrientes simulados en BSQ durante mareas vivas por medio de los puntos virtuales de observación “A” (panel superior derecho), “B” (panel superior izquierdo) y “C” (panel inferior izquierdo).	36
22	Campo de velocidad después de 16 días con respecto al tiempo inicial de ejecución en condiciones de flujo (panel derecho) y reflujo (panel izquierdo) bajo marea viva.	37
23	Alcance de boyas (panel izquierdo) al principio (color rojo) y en un punto intermedio durante la pleamar (color azul) en mareas vivas (panel derecho)	38
24	Trayectoria de boyas de deriva (panel izquierdo) posicionadas en forma radial y liberadas en condición de flujo (línea continua) y reflujo (línea punteada) en mareas vivas (panel derecho).	39
25	Simulación de vorticidad y trayectoria de boyas deriva en marea viva bajo condiciones de flujo (panel izquierdo) y reflujo (panel derecho).	41
26	Residual de la vorticidad (panel izquierdo) en un ciclo de marea	42

(panel derecho)

27	Residual de la velocidad promedio (panel izquierdo) en un ciclo de marea (panel derecho).	43
28	Residual de la velocidad vertical (panel izquierdo) en un ciclo de marea (panel derecho).	44
29	Propagación de un oleaje típico ($H_s=4$ m, $T_p=15$ s; dirección del oleaje 305° , panel izquierdo) y un oleaje de verano ($H_s=2$ m, $T_p=12$ s; dirección del oleaje 220° , panel izquierdo)	45
30	Efecto del viento evaluado mediante la diferencia del campo de velocidad (panel superior izquierdo) y el seguimiento de boyas de deriva (panel inferior izquierdo) al considerar marea (líneas continuas) y marea-viento (líneas punteadas) bajo un mismo tiempo y en condiciones de marea muerta (panel derecho).	46
31	Esquema del intercambio de agua entre BSQ, BSM y el mar abierto.	52

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Principales componentes armónicas de marea obtenidas de una estación ubicada en la boca de BSQ.	15
2	Variabilidad de la magnitud del viento en un día normal en BSQ.	25
3	Propagación del oleaje tipo swell en BSQ.	25

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El intercambio de agua entre el océano y un cuerpo costero de único y estrecho acceso, ha sido investigado desde principios de los años 50 fundamentando que dicho proceso esta apropiadamente representado por el modelo “bombeo por marea”. El modelo describe que para entradas estrechas, el agua se incorpora de forma radial y sale en forma de chorro (*Stommel y Farmer, 1952*). Desde otra perspectiva, si las paredes por donde pasa el flujo tienen esquinas pronunciadas y poseen la condición no-deslizamiento, entonces el flujo se bifurcará hasta generar dos remolinos (*Wells y van Heijst, 2003*). Si los remolinos son capaces de escapar de la fuente, estas estructuras mejoran la renovación de agua del cuerpo costero (*Wells y van Heijst, 2004*), pues la vorticidad asociada a los remolinos logra cambiar los efectos de mezcla por marea (*Provenzale, 1999*). La mezcla ya sea por marea y/o viento puede controlar el grado de estratificación en la columna de agua, consiguiendo formar frentes de transición entre agua bien mezclada y estratificada (*Simpson et al., 1990*).

El intercambio de agua entre el océano-laguna, los remolinos, la mezcla por marea y viento y los frentes de transición han sido estudiados en diferentes sitios sin embargo, cada uno ha sido estudiado por separado. Si bien el bombeo por marea explica el intercambio de agua, la presencia de remolinos tiene un efecto en la circulación y procesos de mezcla que intensifica el intercambio de agua entre la laguna y el océano (*Wells y van Heijst, 2003*).

Para estudiar el intercambio océano-laguna, identificar la trayectoria que siguen las parcelas de agua en diferentes orígenes y ver el efecto de los remolinos en los procesos de mezcla e intercambio de agua, se utilizó el modelo numérico Delft3D para reproducir la circulación de Bahía San Quintín (BSQ), que debido a sus características, permite la formación de remolinos (delimitados por la mancha que contrasta agua de diferentes características en las afueras de BSQ, Figura 1).

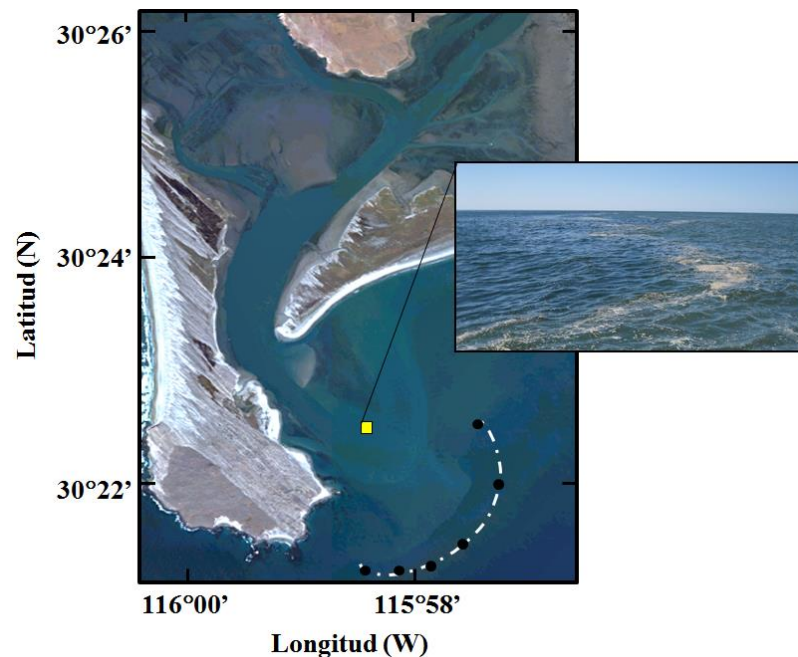


Figura 1: Evidencia de formación de remolinos en BSQ. El alcance de los remolinos se encuentra delimitado por una mancha que contrasta dos colores de agua con diferentes características en las afueras de la laguna (marcada con línea punteada). La imagen corresponde al día y fue obtenida de

A continuación se enumeran los objetivos y conceptos teóricos. Se describen los conceptos de bombeo por marea, dipolo, procesos de mezcla por marea y conceptos de modelación numérica. En el capítulo 2 se introducen y detallan las características de la zona de estudio. El capítulo 3 menciona la metodología para estudiar el intercambio y procesos de mezcla basándose en la modelación del sitio. La modelación fue validada de forma cualitativa y cuantitativa a partir del análisis de datos obtenidos de mediciones de campo. Los resultados se presentan en el capítulo 4, las discusiones en el capítulo 5 y conclusiones en el capítulo 6.

I.1 OBJETIVO

Este estudio comprende como objetivo principal, describir el intercambio de agua entre el mar abierto y un cuerpo costero que por sus características, genera la formación de remolinos y procesos de mezcla.

I.1.1 Objetivos particulares

- Representar la hidrodinámica del sistema BSQ-océano utilizando el modelo numérico Delft3D (*Hydro-Morphodynamics, 2011*).
- Validar el modelo utilizando observaciones de campo.
- Fundamentar múltiples escenarios para interpretar cómo influyen los procesos de mezcla y la formación de remolinos en el intercambio de agua en una laguna.

I.2 MARCO TEÓRICO

La formación periódica de dipolos, puede ser examinada a partir de simulaciones numéricas u observaciones de un flujo pasando a través de un cuerpo costero con entrada estrecha (*Signell y Butman, 1992; Brown et al., 2001*). Un dipolo es el acople de dos remolinos encontrados. Ambos remolinos se forman cuando un flujo sale por las esquinas pronunciadas de un canal por lo cual, el flujo se divide en dos y forma vorticidades contrarias. La formación de los remolinos dependerá de factores como el flujo y ancho del canal (*Wells y van Heijst, 2004*).

Conjuntamente al modelo conceptual de bombeo por marea, la formación de estas estructuras parece ayudar al transporte de nutrientes (*Wolanski et al., 1988*) y renovación de agua mediante procesos de mezcla. Si la vorticidad, la fricción de fondo y la corriente inducida por la marea provocan turbidez, entonces los procesos de mezcla se acrecentarán (*Wells y van Heijst, 2004*).

I.2.1. Bombeo por marea

Si consideramos que la marea es el forzamiento principal que rige el movimiento del agua dentro de un cuerpo costero, la expulsión e intrusión de agua puede ser descrita por el modelo conceptual llamado “bombeo por marea” de *Stommel y Farmer (1952)*. En este modelo, se describe la simetría del refluo en forma de chorro y la del flujo en forma radial (Figura 2), siempre y cuando el flujo pase a través de una entrada (boca) estrecha.

Si la longitud del refluo (durante bajamar) es igual a la longitud de flujo (durante pleamar), el resultado es un constante reciclamiento pues la laguna reincorpora el agua que recién expulsa. Por el contrario, si la longitud del refluo es mayor que la del flujo, el efecto será la incorporación de agua nueva a la laguna ya que agua que sale del cuerpo, no regresa a la fuente.

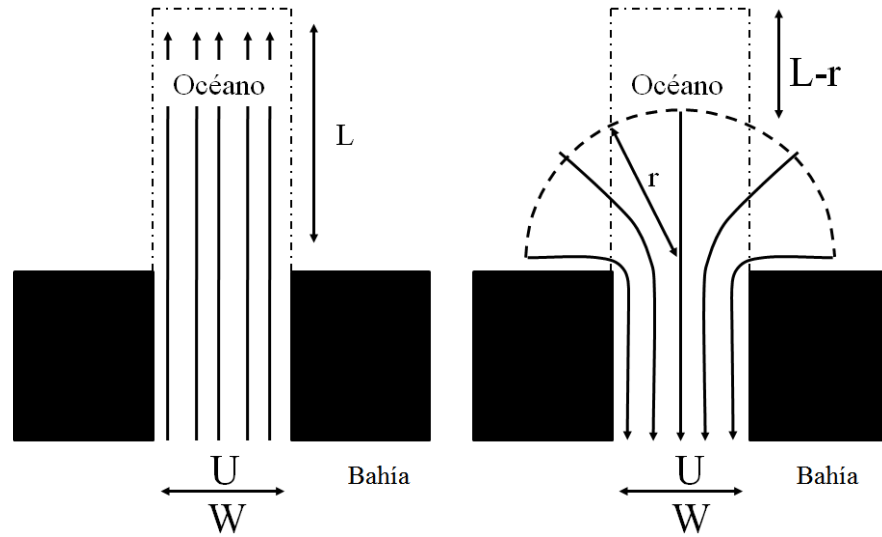


Figura 2: Modelo conceptual del bombeo por marea. Simetría del refluo (izquierda) y flujo (derecha). Donde W es el ancho del canal, U es la intensidad de la corriente, L es el alcance del refluo y r el radio que alcanza la succión. (Modificado de Wells y van Heijst, 2003).

Por consiguiente, un bombeo efectivo sucede cuando el alcance del flujo de salida (L) excede la longitud radial de la zona de succión (r).

$$\frac{L}{r} = \left(2\pi^7 f^3 \frac{l_x}{U} \right)^{1/6}. \quad (1)$$

Donde l_x es la excursión de la marea, U es el ancho de la entrada y f es toda la fracción circular donde el agua es succionada. De la ecuación 1, un criterio simple del bombeo por marea, es el requisito de que la excursión de la marea supere significativamente el ancho de la boca (Chadwick y Largier, 1996).

I.2.2. Formación de remolinos

Cuando las esquinas de un canal estrecho son pronunciadas, el reflujo alcanzará a formar dos remolinos con vorticidades encontradas. Cuando un flujo pasa por un canal (bajo condiciones de no deslizamiento en las paredes) las esquinas provocan que el flujo se separe y comience a girar en dirección al borde más cercano debido al gradiente de presión. Aquí se considera un dipolo, un acople de dos remolinos con vorticidades encontradas (Figura 3).

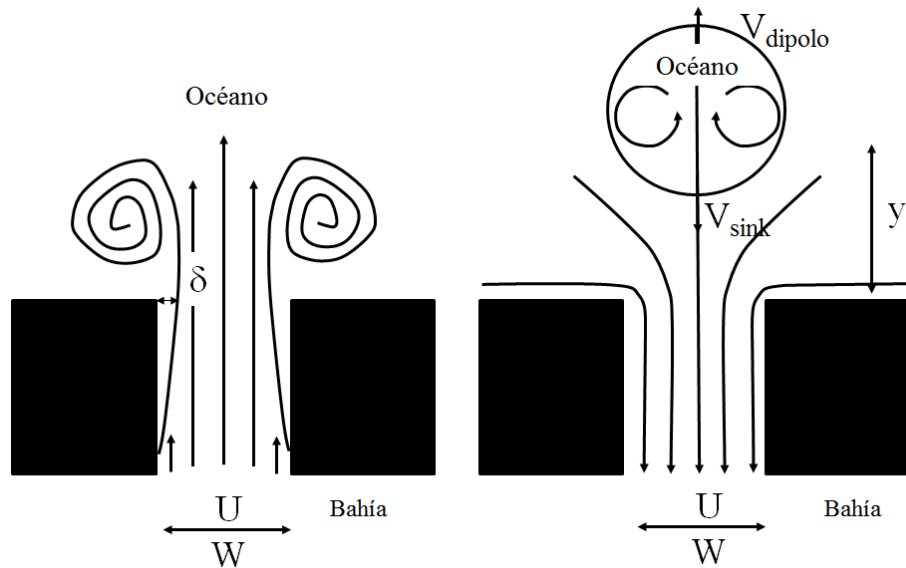


Figura 3: Modelo conceptual de la estructura y formación de un dipolo. Formación de remolinos durante el reflujo (izquierda) y advección de los remolinos que conforman un dipolo en condiciones de flujo (derecha). Donde W es el ancho del canal, U es la intensidad de la corriente, y la distancia entre el centro del dipolo y el fin del canal, V_{dipolo} la velocidad del dipolo cuando escapa, V_{sink} la velocidad del dipolo por succión de la fuente y δ la capa viscosa. (Modificado de Wells y van Heijst, 2003).

Si la velocidad de advección del dipolo (V_{dipolo}) es mayor que la del flujo de entrada (U), el dipolo será capaz de propagarse mar adentro. Si la velocidad de advección del dipolo (V_{dipolo}) es menor que la del flujo de entrada (U), el flujo succionará al dipolo con una velocidad V_{sink} haciendo que el agua que acaba de salir, vuelva a entrar. Se ha

mostrado que la parte central de un remolino es hermética, de tal forma que en el centro, trazadores pasivos pueden permanecer atrapados por un largo tiempo y ser transportados grandes distancias (Provenzale, 1999).

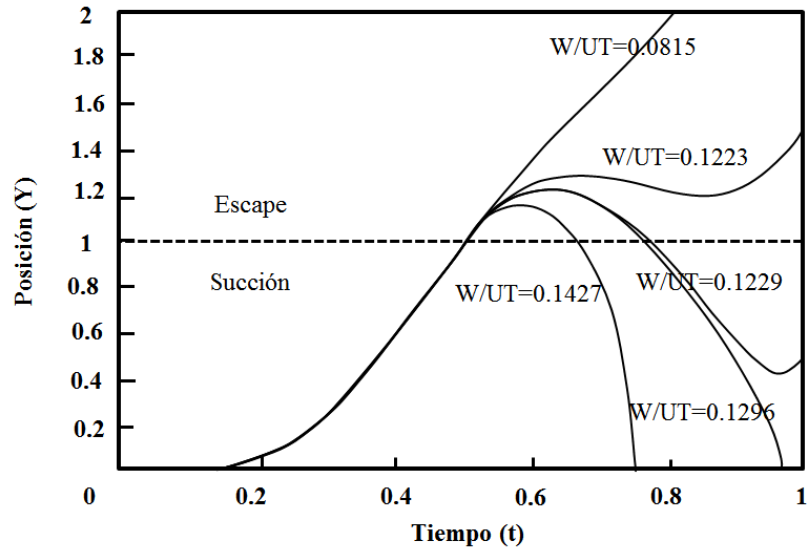


Figura 4: Variación temporal de la posición del centro del dipolo $Y(t)$ para diferentes relaciones W/UT . En línea punteada, la distancia crítica que debe superar el remolino para escapar sin ser succionado. Donde W es el ancho del canal, U es la intensidad de la corriente T el periodo de la marea, Y la distancia entre el centro del dipolo y el fin del canal y t el tiempo. (Modificado de Wells y van Heijst, 2004).

Para conocer si el dipolo escapa o regresa a la fuente, Wells y van Heijst (2003) retoman el trabajo de Kashiwai (1984) para calcular la trayectoria del dipolo. Ellos encuentran que si la relación ancho del canal, periodo e intensidad de la corriente es $W/UT < 0.1229$ (Figura 4), entonces el dipolo logrará escapar de la fuente sin ser succionado.

1.2.3. Procesos de mezcla

Los gradientes de densidad inducen la circulación del agua, donde el agua más pesada es transportada por el fondo y la más ligera por la superficie. La diferencia entre los dos

tipos de agua genera una estratificación que se perturba en el tiempo y espacio según la mezcla generada por forzamientos de viento (en la superficie del agua) o marea (en el fondo del océano) los cuales actúan independientemente (Figura 5) (Simpson *et al.*, 1990).

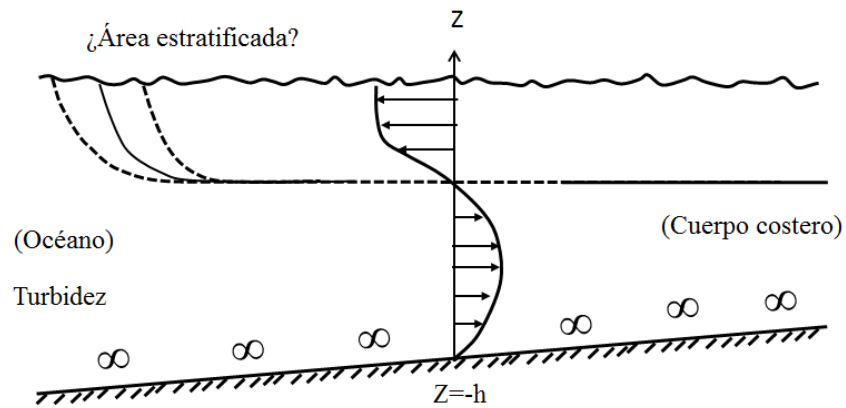


Figura 5: Esquema de la zona estratificada por una diferencia entre dos tipos de agua. $U(z)$ es el perfil vertical de las velocidades donde agua ligera viaja por la superficie y el agua pesada por el fondo. (Modificado de Simpson *et al.*, 2004).

La mezcla por marea puede ser descrita promediando el campo del flujo residual (Zimmerman, 1986) no obstante, este cálculo se subestima cuando existe la formación de remolinos (Beerens *et al.*, 1995). Los remolinos pueden cambiar las propiedades de mezcla del flujo por marea, pues la vorticidad genera una barrera entre el interior y exterior del remolino (Provenzale, 1999). En aguas someras, el movimiento vertical asociado a la turbidez generada por la extensión del acople de dos remolinos, llega a modificar el transporte de sedimentos determinando la suspensión, según la estructura del dipolo (Albagnac *et al.*, 2008).

1.3 MODELACIÓN NUMÉRICA

Con el fin de llevar a cabo simulaciones numéricas sobre la hidrodinámica entre el océano y cuerpo costero, se utilizó el modelo morfodinámico Delft3D. El modelo

resuelve las ecuaciones de movimiento para aguas someras y acopla el oleaje con corrientes. A diferencia de otros modelos, el Delft3D maneja procesos hidráulicos en forma de bloques independientes permitiendo analizar resultados de forma sencilla. Este mismo modelo ha sido previamente probado en cuerpos costeros similares a nuestra zona de estudio (Choi y Lee, 2004; Dissanayake y Wurpts, 2013).

El modelo resuelve las ecuaciones de movimiento horizontal para aguas someras de la siguiente forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + M_x, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + M_y. \quad (2.2)$$

Utilizando la profundidad promedio, las ecuaciones 2.1 y 2.2 se calculan a partir de la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

para un supuesto de presión hidrostática:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g \rho_0 h. \quad (4)$$

Donde u y v es la velocidad horizontal en el eje x y y respectivamente, mientras que la velocidad en la vertical se denota por la w en el eje z . La viscosidad turbulenta está descrita en el término v_v . Los gradientes de presión (barotrópica y baroclínica) se representan por la P_x y P_y . Las fuerzas F_x y F_y representan la tensión de Reynolds en las ecuaciones de momentum. M_x y M_y son las contribuciones debido a fuentes externas. f es el parámetro de Coriolis, ρ_0 la densidad del agua y h la profundidad.

I.3.1 Malla

Cada módulo del modelo Delft3D resuelve las ecuaciones de movimiento haciendo uso de una malla de tipo “staggered” es decir con un desfase (Figura 6). En donde las líneas continuas pertenecen a la malla; (-) la velocidad de la componente horizontal (u); (|) la velocidad de la componente vertical (v); (+) el nivel medio del mar (η); y ($\bullet$) la profundidad (*Hydro-Morphodynamics, 2011*).

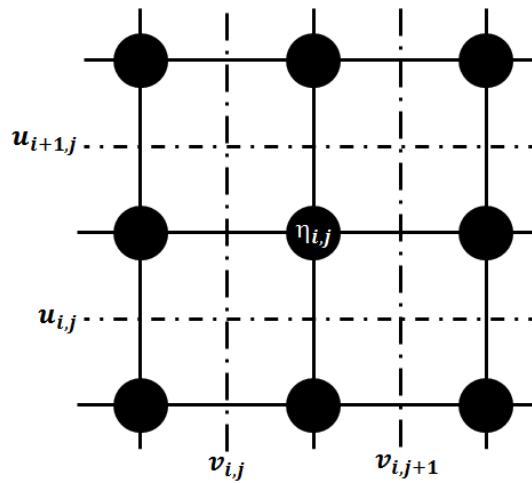


Figura 6: Malla de tipo “staggered” utilizada por el modelo Delft3D para resolver las ecuaciones de movimiento.

Las ecuaciones de aguas poco profundas en 2D se discretizan haciendo uso de una malla desfasada (Arakawa C-grid). Las ecuaciones de aguas someras se resuelven mediante el método de factorización implícita ADI (Alternating Direction Implicit) el cual resuelve un problema de dos dimensiones en uno. Las componentes de velocidad horizontal u y v se calculan una vez cada intervalo de tiempo (Δt). La advección vertical y el término de viscosidad se integran implícitamente. Los términos de advección y viscosidad horizontal se integran de forma explícita. El paso de tiempo de la advección horizontal está limitado por la condición de Courant-Friedrichs-Lewy, la cual proporciona estabilidad numérica.

1.3.2 Modelación de flujos

La solución de las ecuaciones de movimiento para aguas someras consiste en pasar de un modelo físico-matemático a un modelo numérico en el cual se resuelven las ecuaciones de movimiento con ciertas condiciones iniciales. Entonces la solución se vuelve un problema de frontera cuando se refiere a fronteras abiertas o no naturales. Puesto que la naturaleza permite la propagación de ondas a lo largo del océano, las fronteras abiertas deberán de estar lo suficientemente alejadas del área de interés. El motivo es impedir la reflexión de ondas, la cual se evita utilizando la condición de frontera de Riemann. Esta condición resuelve las ecuaciones de movimiento de forma lineal e invariante sin tomar en cuenta la fuerza de Coriolis ni la fricción de fondo (Verboom y Slob, 1984):

$$R = U \pm 2\sqrt{gH}. \quad (5)$$

Una frontera abierta puede ser forzada generando una señal a partir de componentes armónicas cuyos periodos coinciden con movimientos astronómicos (marea armónica), o bien utilizando una serie de tiempo. La marea astronómica se aproxima mediante:

$$F(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t - \varphi_i). \quad (6)$$

Donde A se refiere a la amplitud de la onda componente i , ω la frecuencia de la onda componente i , φ el desfase de la onda componente i , t el tiempo calculado y N el número de componentes consideradas. Para simular una corriente de flujo continuo se usó una serie de tiempo.

Las condiciones de frontera para las ecuaciones de momento en la superficie libre son:

$$\begin{aligned}\frac{v_V}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} &= \frac{1}{\rho_0} |\overline{\tau_s}| \cos(\theta), \\ \frac{v_V}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} &= \frac{1}{\rho_0} |\overline{\tau_s}| \sin(\theta).\end{aligned}\tag{7}$$

En donde el esfuerzo del viento está dada por:

$$\vec{\tau}_s = \rho_0 C_d \overline{u_*^s} |\overline{u_*^s}|.\tag{8}$$

Donde ρ_0 es la densidad del aire, u_*^s la velocidad del viento a una altura determinada y C_d el coeficiente de arrastre que dependerá de u_*^s .

1.3.3 Modelación del oleaje

Con el fin de entender la influencia del oleaje en los remolinos y los procesos de mezcla, se utilizó el modelo espectral de tercera generación SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) (Booij *et al.* 1999; Ris *et al.*, 1999) integrado en Delft3D a través del módulo WAVE. A través del modelo SWAN, se propaga oleaje de aguas profundas a someras considerando la acción del viento, disipación de energía por fricción, ruptura de la ola, refracción y dispersión. La evolución del espectro del oleaje se describe por la ecuación de balance de la acción espectral:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}.\tag{9}$$

La cual considera que la densidad de la acción $N(\sigma, \theta)$ es igual a la densidad de energía $E(\sigma, \theta)$ dividida por la frecuencia relativa σ según la dirección de incidencia del oleaje θ .

CAPÍTULO 2

ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio de este trabajo es Bahía de San Quintín (BSQ), localizada en el extremo occidental de la península de Baja California en la parte noroeste de México. Abarca los paralelos 30° 24' y 30° 30' latitud Norte entre los meridianos 115° 57' y 116° 01' longitud Oeste (Figura 7). El presente capítulo describe y caracteriza la zona de estudio.

II.1 CARÁCTERÍSTICAS DE LA ZONA

BSQ se encuentra en una zona árida y volcánica. El clima es mediterráneo, por consiguiente, las tasas de evaporación son altas. BSQ comprende una laguna hipersalina (Álvarez-Borrego, *et al.*, 1975) y semicerrada, cuenta con sólo una entrada que comunica las aguas interiores con el mar adyacente. La laguna cuenta con aporte fluvial esporádico y aporte pluvial mínimo (Álvarez-Borrego, *et al.*, 1975) sin embargo, BSQ es una región considerada como altamente productiva.

La alta productividad primaria que concurre en BSQ se debe a los eventos de surgencia, en donde agua rica en nutrientes es transportada del mar al interior de la bahía por la única entrada existente (Lara-Lara *et al.*, 1980; García-Esquivel *et al.*, 2004). Bahía Santa María (BSM) es la vía de comunicación entre BSQ y el mar abierto (Figura 7). Estudios sobre la dinámica de nutrientes han reportado que la estacionalidad del metabolismo neto del ecosistema (MNE), es controlada por la intrusión de carbono orgánico proveniente del océano (Camacho-Ibar *et al.*, 2003). Durante periodos no Niño, el transporte océano-laguna suministró nitrógeno nuevo al interior de BSQ con cada flujo de la marea. Las variaciones en los aportes de nutrientes en una parte son controlados por la cantidad de agua oceánica que entra a la bahía, eventos de surgencia y variaciones estacionales (Hernández-Ayón *et al.*, 2004).

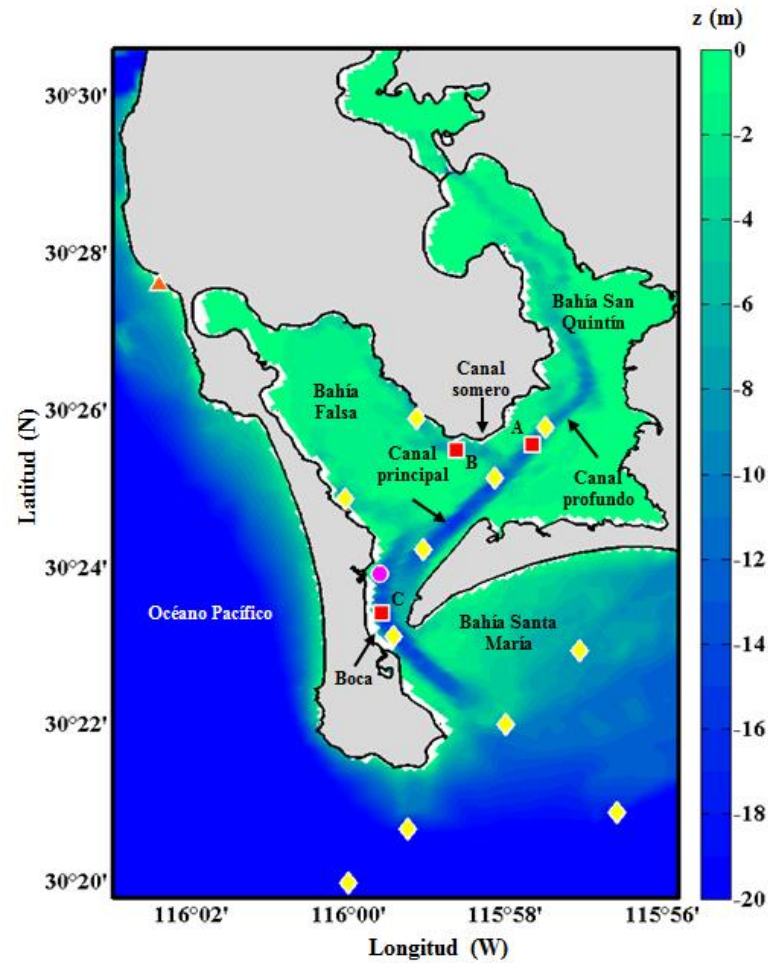


Figura 7: Bahía San Quintín y localización de los instrumentos. Donde (▲) representa a la ubicación de la estación meteorológica, (●) la ubicación de una boya que mide las características del agua, (◆) puntos de lances para mediciones con CTD y (■) la localización de los 3 ADP's (Acoustic Doppler Profiler) para medición de las corrientes, nivel del mar y temperatura.

I.1.1 Morfología

Puesto que es un área volcánica, la formación geológica de BSQ proviene de erupciones volcánicas en la transición del Pleistoceno al Holoceno (*Woodford, 1928*). Las barras que dividen a la laguna del océano (oeste y sur), están compuestas principalmente de arena con pocas zonas de grava al norte de la barra oeste. Un muestreo de sedimentos reveló que BSQ está compuesta principalmente por lodo (limos arenosos de color verde y grisáceo y arcilla) (*Daesslé et al., 2009*).

Bahía San Quintín comprende una laguna costera somera con un área de 42 km² (*Osorno-Velzaquez, 2000*) y una profundidad promedio de 2 m (Figura 7). El brazo oeste de la laguna es comúnmente llamado Bahía San Quintín o Bahía San Simón mientras que el brazo este es llamado Bahía Falsa. Un canal principal en forma de “y” cruza por todo el interior de la bahía. El brazo este del canal llega a alcanzar 8 m de profundidad mientras que el brazo oeste es más somero alcanzando apenas los 4 m. La zona más profunda del canal se encuentra en la boca de la bahía.

La boca es la única comunicación que existe con Bahía Santa María (BSM) y el océano. Es un transecto estrecho de no más de 1 km de ancho y 16 m de profundidad máxima. Un corte transversal en la boca, permite distinguir un canal profundo (lado oeste de la boca) y un canal somero (lado este de la boca).

II.1.2 Meteorología

Los datos de las condiciones meteorológicas en BSQ provienen de una estación tipo AWS2700 ubicada en el brazo izquierdo de la bahía (30° 27' 38" N, 116° 02' 23" W, representada por ▲ en Figura 7), lugar conocido como la Chorera. Actualmente, la estación meteorológica se ha mantenido en funcionamiento desde finales del mes de junio del 2002. De acuerdo con el reporte técnico de *Gil-Silva et al. (2011)*:

Las velocidades de los vientos oscilan entre los 3 y 5 m/s. Las máximas velocidades se presentan en el periodo de marzo a junio (periodo de primavera)

y mantienen un rango de 4m/s, mientras que las velocidades más bajas se manifiestan durante el otoño e invierno. Durante primavera y verano la dirección del viento es predominantemente del Noroeste. Sin embargo, en otoño e invierno las direcciones del viento vienen del Norte.

La temperatura atmosférica oscila entre los 12 y 20 °C, las máximas en verano son entre los 17 y 20 °C y en la primavera e invierno los valores oscilan entre los 13 y 14 °C. La Humedad relativa oscila entre 70 y 90 %, de enero a septiembre se mantienen en los 80 y 90% mientras el resto del año por debajo del 80%. La presión atmosférica oscila entre 1005 y 1016 mb durante los meses de abril a septiembre, intervalo que aumenta hasta los 1027 mb para los meses de otoño e invierno. La mayor radiación solar es durante la primavera y verano, con una reducción para los meses de otoño e invierno.

II.1.3 Hidrodinámica

El tipo de marea es mixta con dominio semidiurno y con rangos de 1 m en mareas muertas y 2.5 m en mareas vivas (Ocampo, 1980). Los armónicos principales que rigen la marea son la M2, K1, O1 y S2 ordenados de mayor a menor importancia (Tabla 1). La marea es el principal forzamiento que rige la hidrodinámica del agua en BSQ, explicando del 89 al 97% de la variabilidad de las corrientes (Angulo-Larios, 2006).

Armónico	Amplitud (m)	Frecuencia (grados por ciclo)	Fase (grados)
M2	0.49	29.16	294.67
K1	0.39	15.12	95.79
O1	0.22	14.04	89.58
S2	0.17	29.88	249.86

Tabla I. Principales componentes armónicas de marea obtenidas de una estación ubicada en el boca de BSQ (Tomado de Angulo-Larios, 2006).

En la boca de la laguna, las corrientes totales alcanzaron velocidades mayores a 100 cm/s mientras que las corrientes residuales fueron de ~ 10 cm/s (Angulo-Larios, 2006; Flores-Vidal, 2006). Flores-Vidal (2006) estudió la circulación residual en BSQ y mostró que en presencia de vientos, la circulación se lleva a cabo en dos capas, donde el forzamiento del viento domina la capa superficial y la marea domina la capa de fondo. En la boca de BSQ, la circulación es homogénea en la vertical y tiene un patrón de circulación (Figura 8). Este patrón consta de un flujo de entrada en el canal profundo y un flujo de salida neto en los bancos de arena adyacentes (Valle-Levinson *et al.*, 2009). El comportamiento se encuentra modulado por la mareas a través de interacciones no lineales con la batimetría (Zimmerman, 1978; Li y O'Donnell 2005; Winant, 2008).

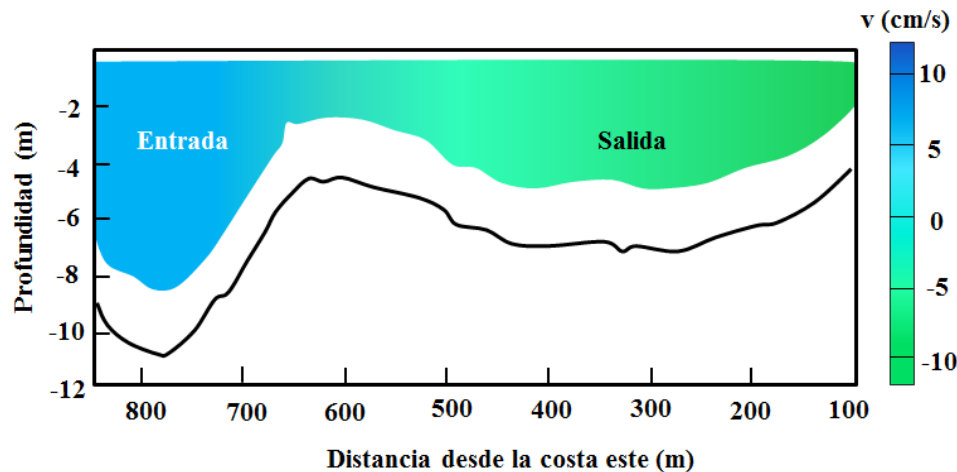


Figura 8: Corriente residual (componente de máxima variabilidad) para un periodo de mareas viva en un transecto cercano a la boca de BSQ (Modificado de Flores-Vidal, 2006).

Con el fin de determinar áreas propicias para actividades de acuicultura, Delgado *et al.* (2010) utilizaron un modelo hidrodinámico en 2 dimensiones para determinar la productividad basándose en la entrada y salida de nutrientes y el cálculo de tiempos de residencia por medio del seguimiento de partículas.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

Con el fin de entender los procesos físicos que generan y mejoran el intercambio de agua entre una laguna y el océano, se caracterizó la hidrodinámica del área de estudio, mediante el uso de un modelo numérico. Antes de utilizar el modelo como herramienta, se contrastó la marea con datos de corriente, viento, oleaje y propiedades físicas del agua para entender procesos físicos generales del área de estudio. Los datos sirvieron para 1) generar y validar las condiciones que crean y asemejan la circulación en BSQ y 2) identificar diferentes escenarios de forzamiento (dirección e intensidad de corrientes, oleaje y viento) con el fin de observar procesos de mezcla y formación de remolinos.

III.1 RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Entre los años 2004 y 2013, en BSQ se han realizado diferentes campañas de medición (en distintos intervalos de tiempo y espacio) para evaluar procesos físicos, químicos y biológicos. A continuación se muestra la metodología llevada a cabo para recolectar y analizar los datos de campo con los cuales se validó el modelo y se recrearon los escenarios que representen la hidrodinámica de BSQ.

III.1.1 Datos de marea, corriente, viento y oleaje

La serie temporal de marea fue la única que se obtuvo a partir de un modelo de predicción (Mar v1.0, 2011) elaborado por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

Los datos de magnitud y dirección de las corrientes provinieron de la instalación de 3 anclajes ADPs (Acoustic Doppler Profiler). Cada ADP midió durante 27 días en intervalos de tiempo de $\Delta t=10$ min y fueron anclados entre los meses de mayo y junio del año 2004, en las zonas de mayor profundidad del canal (representados por ■ en la

Figura 7). Los ADPs “A” y “B” (modelo *Aquadopp Profiler 1000-kHz*; marca *Nortek*) fueron anclados a 8 y 7 m de profundidad respectivamente (en el interior de la laguna) mientras que el ADP “C” (modelo *Work Horse 1200 kHz*; marca *RD Instruments*) fue anclado a 15 m (en la boca). La zona de blanqueo del *RD Instrument* es de 0.4 m mientras que la del *Nortek* es de 1m, el espesor de las capas que constituyen la columna de agua fue de 0.5 m para todos los perfiladores (Figura 9).

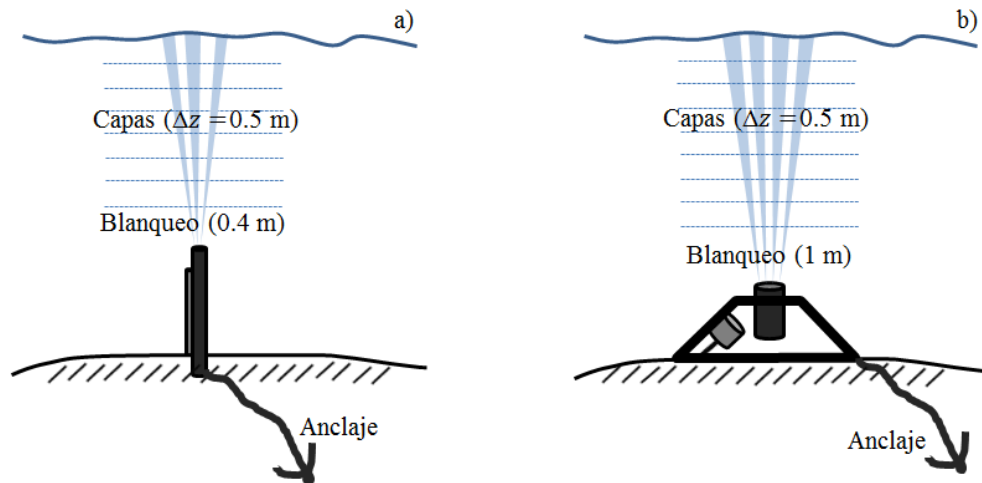


Figura 9: Esquema del funcionamiento del anclaje a) ADPs “A” y “B” (modificado de <http://www.nortek-as.com>) y b) ADP “C” (modificado de <http://www.rdinstruments.com>).

Los datos de dirección y magnitud del viento fueron extraídos de la estación meteorológica automatizada (modelo AWS2700; marca Aanderaa) ubicada en la Chorera (representada por ▲ en la Figura 7). El intervalo de tiempo de muestreo fue de $\Delta t = 30$ min con datos desde junio del 2002 hasta la fecha.

Para el análisis, primeramente se procedió a girar las direcciones de los datos de corriente y viento en contra de las manecillas del reloj, ambas correspondiendo con el norte geográfico. Los datos que no cumplieron con los estándares de calidad (2σ), fueron eliminados. Posteriormente fueron filtrados con un filtro pasa bajas con el fin de eliminar las altas frecuencias (>0.0139) y determinar las componentes armónicas que

explican el mayor porcentaje de la circulación en BSQ. Finalmente, para cada intervalo de tiempo, se calculó una velocidad y dirección promedio.

Hasta el momento no se han instalado instrumentos para medir las características del oleaje de la zona próxima a BSQ. Sin embargo, la mayor parte del año, el oleaje que llega a las costas de Baja California es de tipo swell y proviene de tormentas extra-tropicales (*Snodgrass, et al., 1966*). Por otro lado, en verano existe oleaje proveniente del hemisferio sur (*Collard, et al., 2009*).

El oleaje que se hizo incidir en el modelo numérico provino del análisis estadístico de datos del año 2004 obtenidos de la boya más cercana a BSQ, la NOAA 4604 ubicada en 32° 24' 11" N y 119° 32' 8" W y del pronóstico de la boya virtual *Buoyweather* ubicada en 30.5° N y 116.25° W. Ambas boyas ofrecen parámetros de oleaje (altura significativa, dirección, periodo y espectros) y meteorológicos (dirección y magnitud del viento y temperatura atmosférica).

III.1.2 Datos de las características físicas del agua

Utilizando un CTD (modelo CastAway™ CTD, marca YSI) se hicieron lances para medir salinidad, temperatura y densidad a través de la columna de agua en localidades dentro y fuera de la laguna (representados por ♦ en la Figura 7). Los datos fueron recolectados durante todo el año 2012 y 2013 con una periodicidad mensual y durante una pleamar (flujo) y una bajamar (reflujo).

En el sitio donde se encuentra la boya fija (representados por ● en la Figura 7), se realizó otro experimento hecho mediante lances con CTD a intervalos de tiempo de $\Delta t = 1$ hr y durante una pleamar

Los datos de las características físicas del agua se analizaron mediante un diagrama Hovmöller, para observar diferencias entre transectos o intervalos de tiempo. Finalmente se analizó cada una de las variables por separado para distinguir variaciones anuales o anomalías.

II.2.2.3 Seguimiento de boyas de deriva

Con el fin de caracterizar la distribución de las corrientes superficiales en el área de estudio, se realizó una serie de experimentos utilizando boyas de deriva y posicionadores satelitales. El experimento consistió en liberar boyas a lo largo del canal profundo en un transecto cercano a la boca primeramente durante bajamar (Figura 10) y posteriormente durante pleamar. Los posicionadores midieron la velocidad superficial y las coordenadas x y y de las respectivas boyas en intervalos de tiempo de $\Delta t = 10$ s.

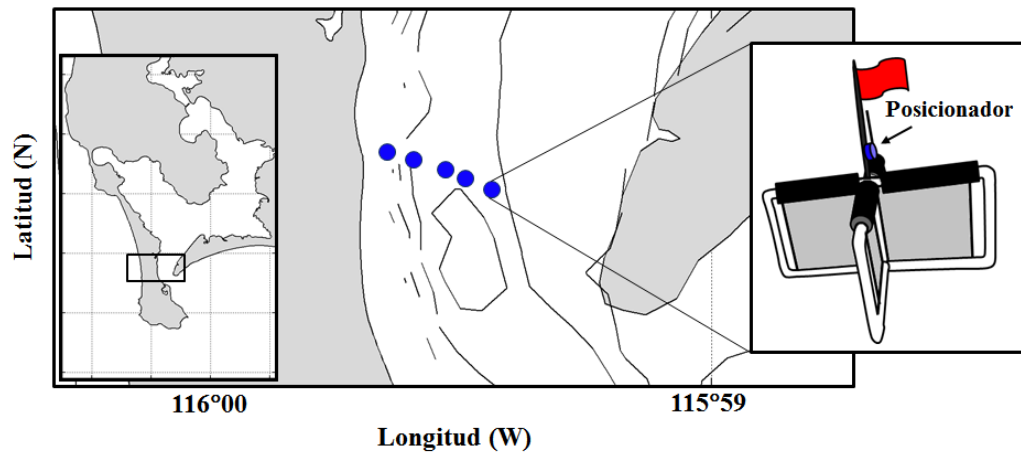


Figura 10: Bosquejo y localización inicial de las boyas liberadas en campo durante bajamar (reflujo).

Los datos de velocidad y posiciones de las boyas liberadas fueron analizados para identificar trayectorias y observar la formación de remolinos.

III.2 MODELACIÓN NUMÉRICA

Para la modelación numérica se utilizó una malla curvilínea que hizo posible variar la resolución dentro de la misma malla. De tal forma que la resolución de espacio dentro de la laguna, fue mayor que la resolución de espacio fuera de la laguna y mar abierto. La diferencia de resolución de malla permitió enfatizar procesos de menor escala como los que ocurren en canales y bajos. Debido a que el oleaje se obtiene a partir de las boyas

más cercanas a BSQ, la malla cubrió un radio de 21 km fuera de la costa (distancia de la boya más próxima a BSQ). La forma radial de la malla permitió 3 tipos de fronteras. Una cerrada para la costa, una abierta en el lado norte (línea azul en Figura 11) y otra para cubrir el resto del dominio (línea roja Figura 11).

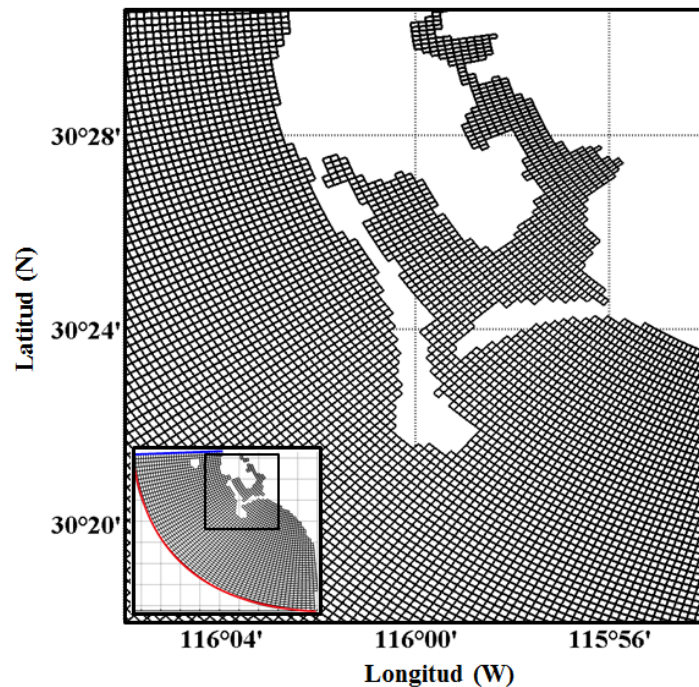


Figura 11. Malla curvilínea sometida a pruebas de sensibilidad al efectuarse un forzamiento por marea. Para una mejor visualización se ha graficado la malla con una resolución máxima de $\Delta x=220$ m y $\Delta y=260$ m y una resolución mínima de $\Delta x=200$ m y $\Delta y=140$ m.

El valor inicial del nivel medio del mar fue de 0 m ($\eta=0$) y el de la densidad del agua fue de 1025 kg/m^3 . Los valores de viscosidad, difusión, densidad del aire y aceleración de la gravedad fueron de $10 \text{ m}^2/\text{s}$, $1 \text{ m}^2/\text{s}$, 1 kg/m^3 y 9.81 m/s^2 respectivamente. Mientras que la condición en las paredes de los canales fue de no deslizamiento, en el fondo la fricción se calculó a partir de la fórmula de Chezy. Los periodos de tiempo de los resultados simulados fueron de un mes con el fin de permitir la estabilidad del modelo y obtener series en donde se incluyan dos mareas vivas y dos mareas muertas.

Los datos de batimetría se obtuvieron de tres fuentes. Para la región del mar abierto se utilizaron los datos provenientes del banco de datos de Etopo1 de la NOAA (*Amante y Eakins, 2009*) con resolución de 1 minuto. Para el área de Bahía Santa María se utilizaron datos de la carta náutica proveniente de la Secretaría de Marina (*EUM Secretaría de Marina, 2008*). En el interior de BSQ se usaron los datos de las campañas de medición del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO-UABC) y la Secretaría de Marina. La recopilación de diferentes fuentes generó una variación en la resolución de datos batimétricos, de modo que la interpolación realizada fue de tipo triangular en lugar de un promedio. Este tipo de interpolación arregla los datos dentro de una malla de tipo Delaunay.

Al modelo primeramente se le realizan pruebas de sensibilidad para elegir una resolución de espacio y tiempo que optimice el tiempo de cómputo. La comparación de los resultados del modelo con datos de campo, permitió validar el modelo e identificar diferentes escenarios de forzamiento con el fin de observar si los procesos de mezcla y formación de remolinos mejoran el intercambio de agua entre la laguna y mar abierto.

III.2.1 Pruebas de estabilidad y sensibilidad del modelo numérico

Puesto que la marea es el forzamiento principal que rige el movimiento de las aguas en BSQ, en la frontera oeste de la malla se aplicó un forzamiento de tipo armónico semidiurno (M_2), con amplitud de 1 m y fase de 294.67° y una frecuencia de 29.16 grados/ciclo en el lado oeste de la malla. Esta prueba se aplicó variando los intervalos de tiempo y resoluciones de espacio a $\Delta t=5$ min, $\Delta t=1$ min, $\Delta t=0.5$ min y $\Delta x \cong \Delta y \sim 50$ m, $\Delta x \cong \Delta y \sim 100$ m respectivamente. Para cada una de las pruebas se calculó la energía cinética total determinada por:

$$E_{C_{tot}} = \frac{1}{2} \iiint \rho_0 (u^2 + v^2) dx dy dz \quad (10)$$

La prueba de sensibilidad consistió en comparar el tiempo de cómputo con la estabilidad de los resultados obtenidos al variar el intervalo de tiempo y/o resolución de

mallá. Finalmente se eligió una resolución de espacio y tiempo tal que, en el menor tiempo posible, el modelo calculara los resultados correctos. La resolución elegida sirvió para hacer las pruebas de validación y ejecutar los distintos escenarios que semejaran la circulación en BSQ.

III.2.2 Validación del modelo

Para corroborar la validación del modelo, se colocaron estaciones de monitoreo virtuales en los sitios donde se hicieron lances de CTD y anclajes de ADP's (representados por ●, ◆ y ■ en la Figura 7). En esta prueba se experimentó con boyas de deriva colocadas a lo largo del canal e interior de la laguna (Figura 12).

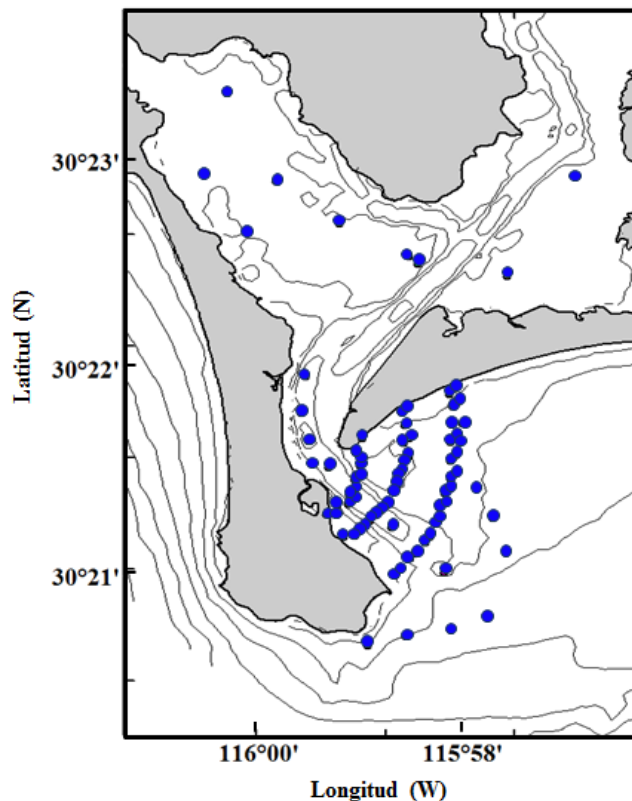


Figura 12: Posición inicial de boyas virtuales. Experimentos realizados en las diferentes pruebas para estudiar los remolinos, procesos de mezcla e intercambio de agua entre océano y laguna.

Por medio de la ecuación 3, se aplicó un forzamiento por marea similar al de BSQ. Bastaron sólo 4 componentes armónicos para representar el 90% de la dinámica que existe en el interior de la bahía (*Angulo-Larios, 2006*) (los valores de fase y amplitud de los armónicos se pueden ver en la Tabla I).

Las estaciones virtuales capturaron datos de corrientes, elevación del nivel del mar y energía turbulenta puntuales. La comparación de datos de corrientes de los diferentes ADPs sirvió para cuantificar y cualificar los resultados de modelación de la circulación del agua en el interior de la laguna.

Las boyas fueron liberadas en diferentes estados de la marea (flujo y reflujo) para estudiar las trayectorias. La comparación de las trayectorias de las boyas virtuales y reales sirvió para validar la formación de los remolinos y determinar la procedencia del agua. Los experimentos con boyas estimaron el alcance de los remolinos, confirmando la advección de los mismos.

III.2.3 Escenarios para modelar

Habiendo validado el modelo y a partir de la interpretación de datos de campo, se ejecutaron diferentes pruebas en donde se variaron los forzamientos. En todas las pruebas se efectuaron los mismos experimentos de boyas de deriva realizados para el validar el modelo (Figura 12) y se mantuvieron las mismas estaciones de monitoreo virtuales (representados por ●, ◆ y ■ en la Figura 7).

Los resultados de modelación de las diferentes pruebas fueron comparados entre sí para estudiar el efecto que tiene la formación de remolinos y los procesos de mezcla en el intercambio de agua. El porcentaje de boyas que salieron y se reincorporaron a la laguna, representaron la cantidad de agua que renueva y/o recicla.

En la primera prueba se forzó por marea y viento constante en espacio y dirección pero variable en tiempo (Tabla II). Los valores del coeficiente de arrastre y la densidad del aire fueron los predeterminados por el modelo.

La interpolación en tiempo fue lineal. El forzamiento por viento se aplicó para un día en marea viva, y un día de marea muerta.

No.	Horas (hr)	Dirección (°)	Magnitud (m/s)
1	00	315	3.0
2	08	315	2.5
3	16	315	5
4	24	315	3

Tabla II. Variabilidad de la magnitud del viento en un día normal en BSQ.

En la segunda prueba se forzó por marea y oleaje. Con la misma malla con la que se incide la marea se propagó un oleaje de tipo swell sin oleaje producido por viento local. El oleaje fue uniforme y se propagó de la frontera norte y oeste para un instante en intervalos de 8 horas. Las constantes son las predeterminadas por el modelo.

No.	Altura Significante H_s (m)	Periodo pico T_p (s)	Dirección (grados)
1	2	12	220
2	4	15	305
3	4	15	315

Tabla III. Propagación del oleaje tipo swell en BSQ. Datos obtenidos a partir del análisis de datos provenientes de las boyas más cercanas a la bahía.

La tercera y última prueba forzó marea, viento y oleaje. Para ello se utilizó un viento con magnitud de 5 m/s con 315° de dirección (No. 3, Tabla II) y un oleaje de 10 segundos de periodo pico y una altura significativa de 2 m en dirección 305° (No. 1 y 2, Tabla III).

Para analizar el efecto que causa un forzamiento de marea, marea-viento y marea-viento-oleaje se calcularon las diferencias entre campos de velocidad promedio. Para analizar los procesos de mezcla se analizaron vorticidades y se calculó un promedio de la vorticidad en un ciclo de marea. Un último experimento fue analizar la velocidad vertical (obtenida de una modelación en 3D) en un ciclo de marea.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

El cálculo analítico de la relación $W/UT < 0.1229$ (utilizando valores próximos a los de BSQ; $W = 900$ m, $U = 1.0$ m/s, $T = 432000$ s), infirió que en BSQ sí existe la formación de remolinos capaces de escapar de la fuente, ya que $W/UT_{BSQ} = 0.0208$. Por consiguiente, se analizaron datos de corriente, viento, características físicas del agua y seguimiento de boyas de deriva para calibrar un modelo hidrodinámico de tal forma que representara la circulación de agua en BSQ. Aprobada la calibración, se analizaron los resultados del modelo para cumplir con el objetivo general del presente trabajo.

IV.1. DATOS

Para identificar de dónde procede el agua que entra a BSQ y definir las condiciones de frontera del modelo numérico, se analizaron las características del agua (perfil de densidad, temperatura y salinidad), magnitud y dirección del viento, velocidad y dirección de las corrientes y marea. Aunque las mediciones de campo de los distintos parámetros físicos no fueron simultáneas, se analizaron datos recolectados bajo condiciones similares.

Los datos mostraron una dependencia de la marea para realizar el bombeo de agua en la laguna. Agua bien mezclada entró por la boca de la bahía y circuló por los canales (canalizando el agua) hasta repartirla por la laguna. Así también se detectó la formación periódica de remolinos.

IV.1.1. Marea, viento, oleaje y corrientes.

Una serie temporal de viento y marea de 12 días mostró el comportamiento típico de ambos forzamientos en BSQ (Figura 13). La serie abarcó una marea viva y una marea muerta. Ambas series correspondieron al mes de junio del 2004.

La serie temporal de marea (panel inferior) mostró una marea mixta con dominancia en las componentes semidiurnas. Durante mareas vivas se observa una amplitud de 2 ± 0.5 m y en marea muertas un mínimo de 1 ± 0.5 m. La serie temporal del viento (panel superior) mostró un viento predominantemente del noroeste.

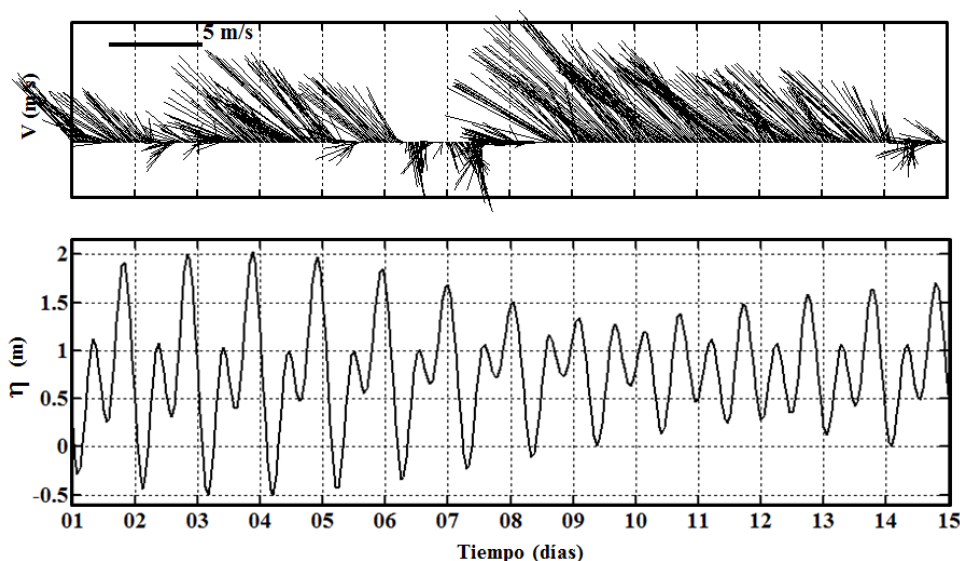


Figura 13. Serie de temporal de viento (panel superior) y marea (panel inferior) en BSQ. Las series corresponden a datos del mes de junio del 2004, donde los datos de viento fueron recolectados de la estación meteorológica la Chorera y la serie de marea de un modelo de predicción (Mar v1.0)

Al haber realizado un análisis más detallado de la variabilidad del viento (Figura 14) para un día normal (usando datos del año 2004), la velocidad del viento presentó un patrón de comportamiento (panel izquierdo). El promedio diario de la magnitud del viento, las velocidades máximas (5-6 m/s) se alcanzaron entre las 14 y 18 horas mientras que las mínimas (2-3 m/s) se alcanzaron entre las 7 y 9 horas del día.

La rosa de vientos (panel derecho) mostró una mayor ocurrencia de vientos provenientes del noroeste sin embargo, existió una incidencia mínima de vientos provenientes del norte y noreste.

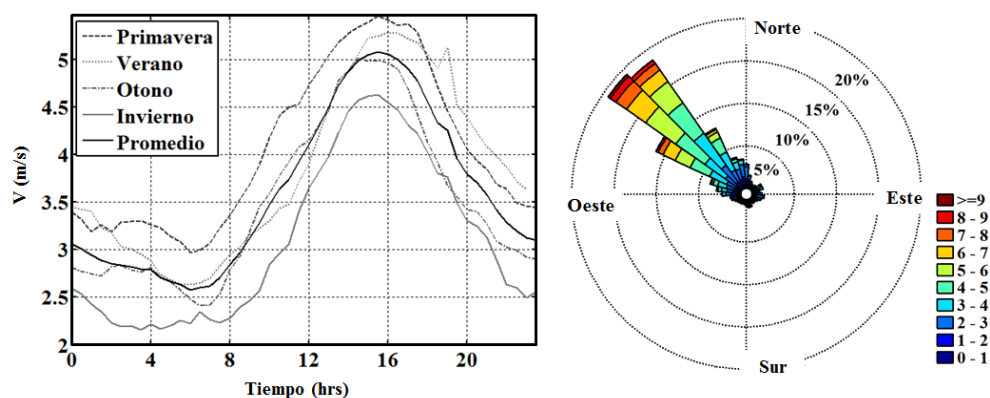


Figura 14. Viento típico diario (panel izquierdo) y rosa de viento anual (panel derecho) en BSQ. El análisis del viento corresponde a datos extraídos de enero a diciembre del año 2004 de la estación meteorológica la Chorera.

El análisis de los datos de oleaje de las boyas *NOAA 4604* y *Buoyweather* mostró un oleaje predominantemente del noroeste, sin embargo, en temporadas de verano se detectó oleaje proveniente del suroeste. En promedio, la altura significativa osciló entre 2 y 3 m. El periodo osciló entre los 8 y 10 segundos y periodo pico promedio fue de 12 segundos. La Figura 15 muestra una rosa de oleaje correspondiente a datos del año 2010 debido a que el registro del 2004 no estuvo completo.

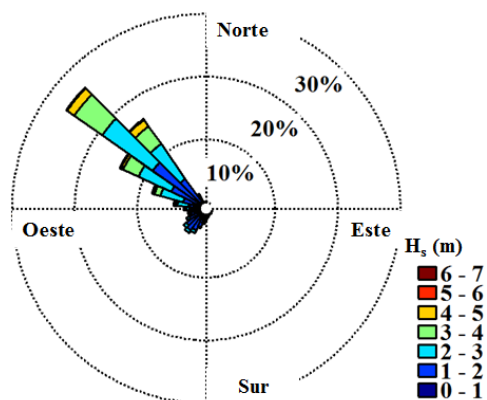


Figura 15 Rosa anual del oleaje a ~21 km fuera de la costa de BSQ. El análisis del oleaje corresponde a datos de enero a diciembre del año 2010.

Los datos de las corrientes en los 3 ADPs (representados por ■ en Figura 7), mostraron un comportamiento similar al de la marea. Es decir, la dirección es una durante pleamar y se invierte paralelamente durante bajamar (Figura 16). Entre cada periodo de marea, las máximas velocidades ocurren cuando existe el mayor gradiente de presión. Al comparar los tiempos en donde se observaron las mínimas velocidades de corrientes entre ADPs, en las estaciones ubicadas en el canal profundo y somero se detectó un retraso de la señal.

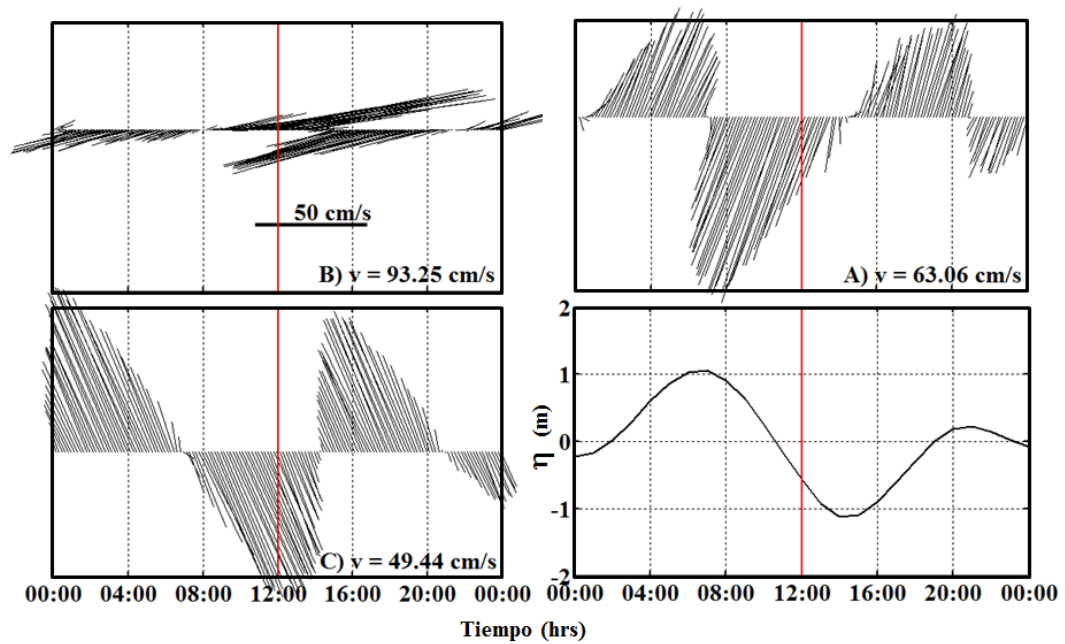


Figura 16. Serie de tiempo de la marea (panel inferior derecho) y mediciones de corrientes en BSQ durante mareas vivas por medio de los ADP “A” (panel superior derecho), ADP “B” (panel superior izquierdo) y el ADP “C” (panel inferior izquierdo) propias del día 6 de junio del 2004. Los valores de velocidad corresponden al promedio de la velocidad en la hora indicada con la línea roja.

La dirección de las corrientes en la boca (ADP “C”, panel inferior izquierdo) y el canal profundo (ADP “A”, panel superior derecha) siguieron la orientación del canal, alcanzando velocidades máximas por arriba de los 100 cm/s.

Las corrientes del canal somero parecieron no estar tan canalizadas, alcanzando velocidades máximas de 95 cm/s y permitiendo diversidad en direcciones. La dirección

predominante fue hacia el noreste durante bajamar y hacia el suroeste durante pleamar. Ambas direcciones estuvieron orientadas perpendicularmente al canal (ADP “B”, panel superior izquierda).

IV.1.2. Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en la columna de agua

Por medio de un diagrama Hovmöller, se analizaron los datos obtenidos a partir de los experimentos realizados con CTD. Los datos mostraron un afloramiento de agua en las inmediaciones de la boca (Figura 17) y la procedencia del agua en la laguna (en un punto) durante una pleamar (Figura 18).

El afloramiento se hizo evidente durante ambos años de muestreo (2013) sin embargo, su intensidad y localización varió en tiempo. Los afloramientos grandes se dieron durante la primavera y verano, las menores en otoño e invierno. La extensión horizontal de los brotes cubrió desde 1 hasta 3 km aproximadamente.

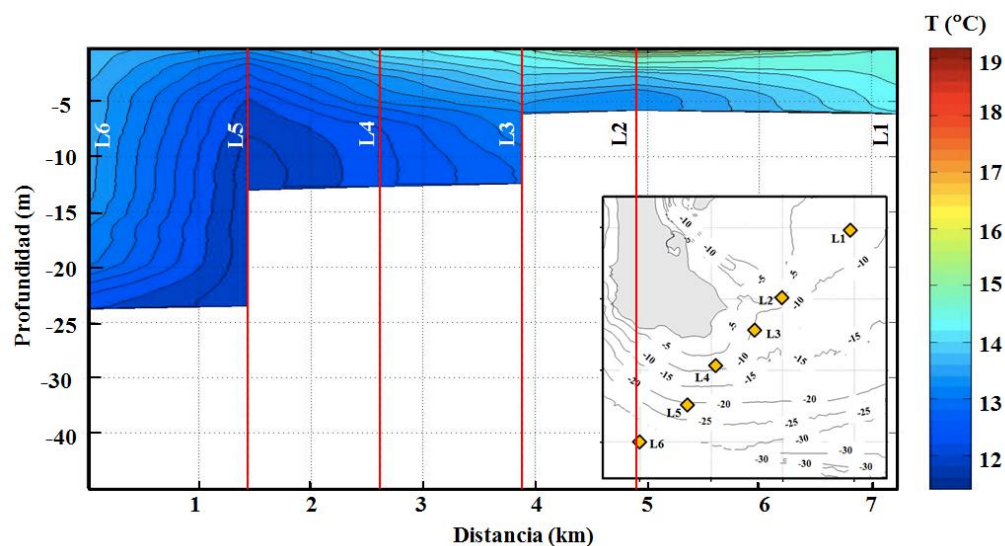


Figura 17. Corte transversal de la columna de agua en un transecto (entre los lances L6 al L1) fuera de la laguna y cercano a la boca. La figura corresponde a datos del mes de agosto 2013, recolectados mediante lances de CTD.

El afloramiento con mayor alcance en la vertical se produjo cuando el nivel del mar alcanzó los 20 m de profundidad y su alcance en la horizontal cubrió un área intermedia entre los lances L6 y L3.

Por otro parte, la evolución temporal de la temperatura en la columna de agua en un punto próximo a la boca (representado por ● en Figura 7), sugirió una circulación de agua bien mezclada. Con respecto al tiempo y temperatura inicial, a medida que el nivel del agua subió la temperatura descendió.

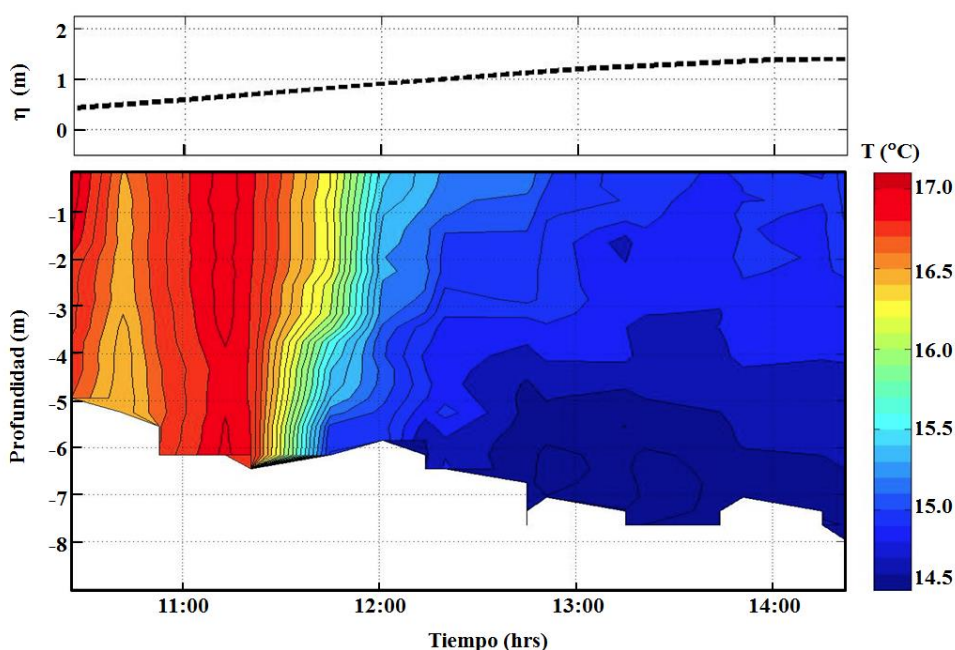


Figura 18. Evolución temporal de la temperatura del respecto a la profundidad en la localidad marcada con ● en la Figura 7. La figura corresponde a datos del día 28 de junio del 2013, recolectados mediante lances de CTD.

Durante pleamar, agua proveniente del océano incursionó por el fondo y la columna de agua comenzó a estratificarse. Se infirió que la estratificación y el descenso de temperatura se debieron al transporte de agua de océano-laguna.

Durante el tiempo inicial y hasta las 11 horas, una peculiaridad se hizo evidente. Aunque el nivel de la marea comenzó a subir (lo cual implicaría un descenso en la

temperatura pues agua más fría proveniente del océano entra), la temperatura ascendió. Este suceso permite inferir que existe una corriente que transporta aguas internas a esta zona de la laguna.

IV.1.3. Seguimiento de boyas de deriva

Bajo condiciones de reflujo, las boyas salieron de BSQ siguiendo trayectorias en forma de espiral (Figura 19). La espiral indujo vorticidad y la vorticidad confirma la existencia de remolinos.

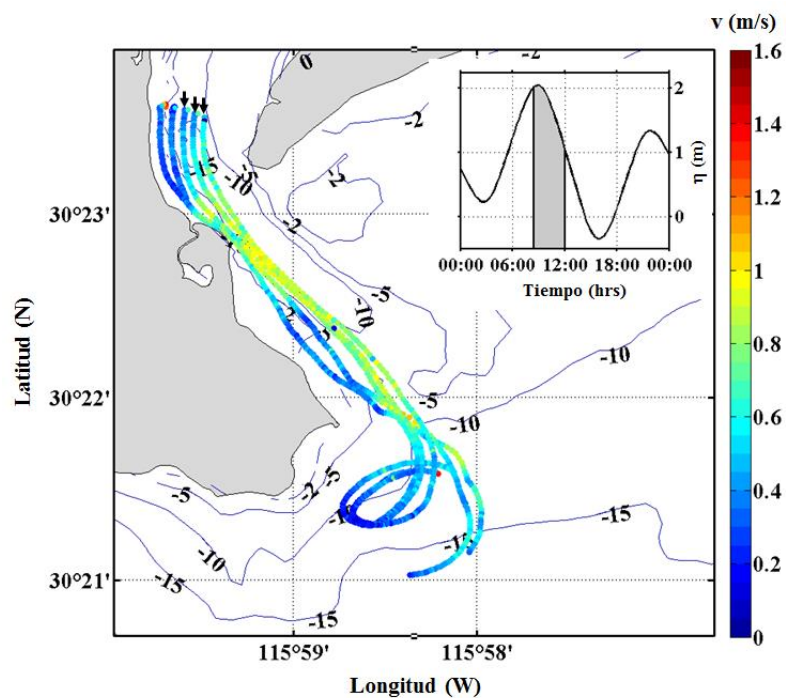


Figura 19. Trayectorias y velocidades que adquieren las boyas liberadas a lo largo del canal de BSQ (Figura 10, posiciones iniciales) el día 05 de noviembre del 2010 durante bajamar.

Las boyas liberadas por encima del canal (3, indicadas con flecha) son las que alcanzaron las máximas velocidades y fueron las primeras en seguir las trayectorias en forma de espiral ente los 10 y 15 m de profundidad.

Las boyas liberadas sobre el extremo oeste y somero del canal, tuvieron velocidades bajas. Ambas recuperaron velocidad al reincorporarse sobre el canal profundo, sin embargo, el sitio donde formaron la espiral fue más allá de los 15 m de profundidad.

IV.2. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA

El patrón de circulación y magnitudes de las corrientes en BSQ se representó forzando el modelo con la marea, el oleaje y el viento. La comparación de datos medidos (marea, corrientes y trayectoria de boyas) con los resultados de las simulaciones fueron utilizados para examinar la estabilidad y validación de la modelación.

IV.2.1. Tiempo de cómputo y energía cinética calculada

El tiempo de cómputo, la marea simulada y la energía cinética calculada (Figura 20), fueron parámetros para revisar la estabilidad numérica y la sensibilidad del modelo. Las pruebas consistieron en variar la resolución de la malla y los intervalos de tiempo.

Los mayores tiempos de cómputo comparando resoluciones de malla, los realizó la malla $\Delta x \cong \Delta y \sim 100$ m. Los mayores tiempos de cómputo, comparando intervalos de tiempo, los realizó el intervalo $\Delta t = 5$ min. La prueba que consideró una resolución de $\Delta x \cong \Delta y \sim 50$ m e intervalo de tiempo $\Delta t = 5$ min, no pudo calcular el tiempo de cómputo pues se truncó al haber excedido el valor límite de Courant-Friedrichs-Lewy.

Todas las ejecuciones (excepto la truncada) fueron precisas y modelaron correctamente el tipo de marea inducida. Al analizar la marea simulada sobre una malla con resolución $\Delta x \cong \Delta y \sim 100$ m, se observó una variación en el forzamiento inducido sobre el primer día. Después del segundo día, todos los experimentos representaron correctamente la marea.

La energía cinética calculada consiguió mostrar la sobrestimación o subestimación de los datos de salida. Aunque todas las pruebas (excepto la truncada) representaron

correctamente la marea, al considerar intervalos de tiempo de $\Delta t = 5$ min y resolución de malla de $\Delta x \cong \Delta y \sim 100$ m, la energía cinética se subestimó.

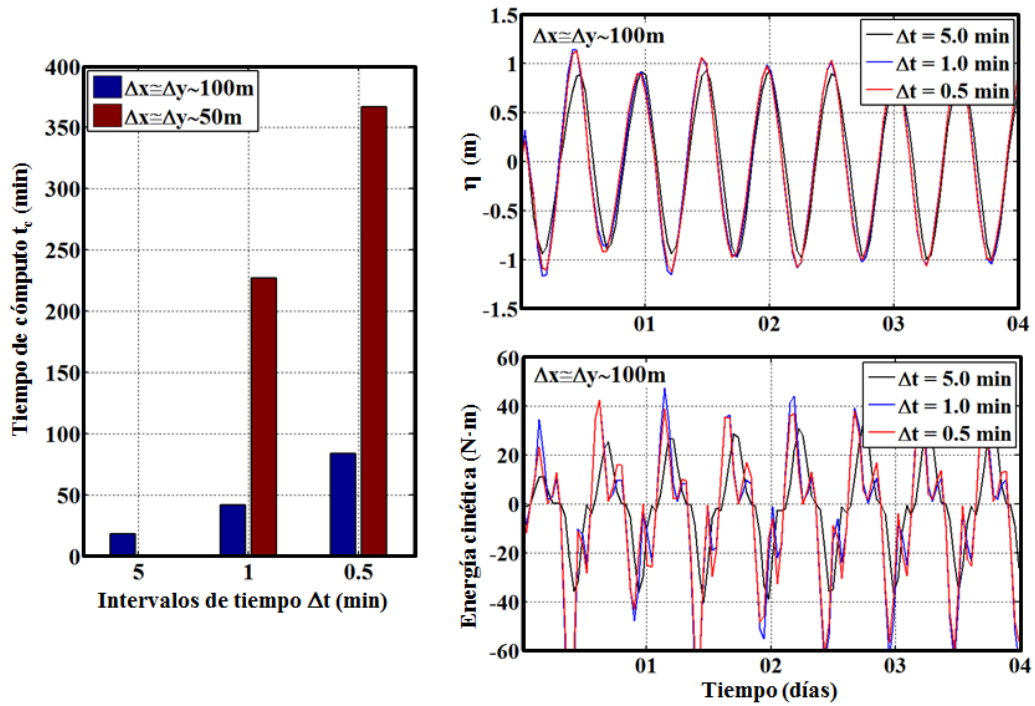


Figura 20. Pruebas de sensibilidad y estabilidad del modelo utilizando parámetros de tiempo de cómputo (panel izquierdo), marea simulada (panel superior derecho) y energía cinética calculada (panel inferior derecho).

IV.2.2. Serie de corrientes en los sitios de anclaje de los 3 ADPs

En los puntos de observación, que representaban los anclajes de ADP (representados por ■, Figura 7), se graficó una serie de tiempo del promedio de las corrientes en la columna de agua (Figura 21).

Los valores mínimos de velocidad se dieron en bajamar o pleamar. Durante mareas vivas las máximas velocidades se midieron en la boca y alcanzaron velocidades máximas de ~ 100 cm/s. El rango de velocidades máximas en el canal profundo y el somero, se mantuvo entre los 35 cm/s y 70 cm/s respectivamente. Al comparar entre sí los tiempos de mínima velocidad de cada uno de los puntos de observación, se detectó

un desfase de retraso en las estaciones ubicadas en el canal profundo (ADP “A”) y somero (ADP “B”).

El sentido de las corrientes en la boca y el canal profundo siguió la orientación del canal según la marea. Las direcciones de las corrientes en el canal somero sufrieron ligeras variaciones.

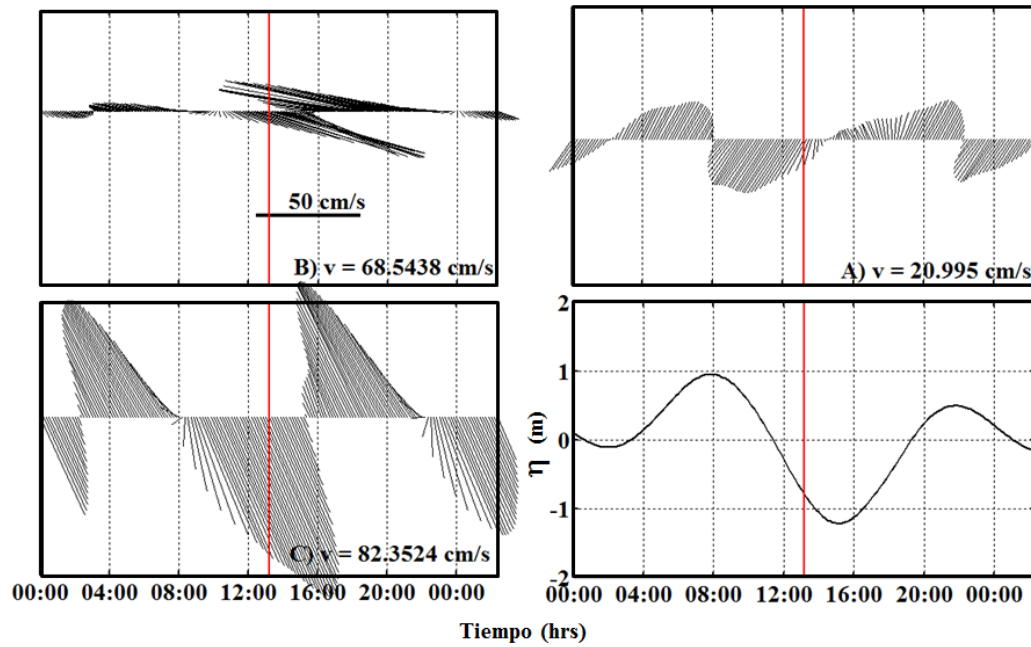


Figura 21. Serie de tiempo de la marea simulada (panel inferior derecho) y datos de corrientes simulados en BSQ durante mareas vivas por medio de los puntos virtuales de observación “A” (panel superior derecho), “B” (panel superior izquierdo) y “C” (panel inferior izquierdo) después de 16 días con respecto al tiempo inicial de ejecución. Los valores de velocidad corresponden al promedio de la velocidad en la hora indicada con la línea roja.

IV.2.3. Campo de velocidad de las corrientes

En el campo de velocidad promedio de las corrientes en BSQ, se observaron patrones de circulación del agua (Figura 22). Durante la pleamar, agua oceánica entra y se canaliza en la boca ocasionando un aumento en la velocidad de la corriente. El agua circula por los canales y se distribuye por toda la bahía. En bajamar y sobre todo durante

mareas muertas, se observan zonas de sequía en los sitios más someros de la bahía. En las afueras y cercano a la boca de BSQ, el campo de velocidad muestra la formación de remolinos.

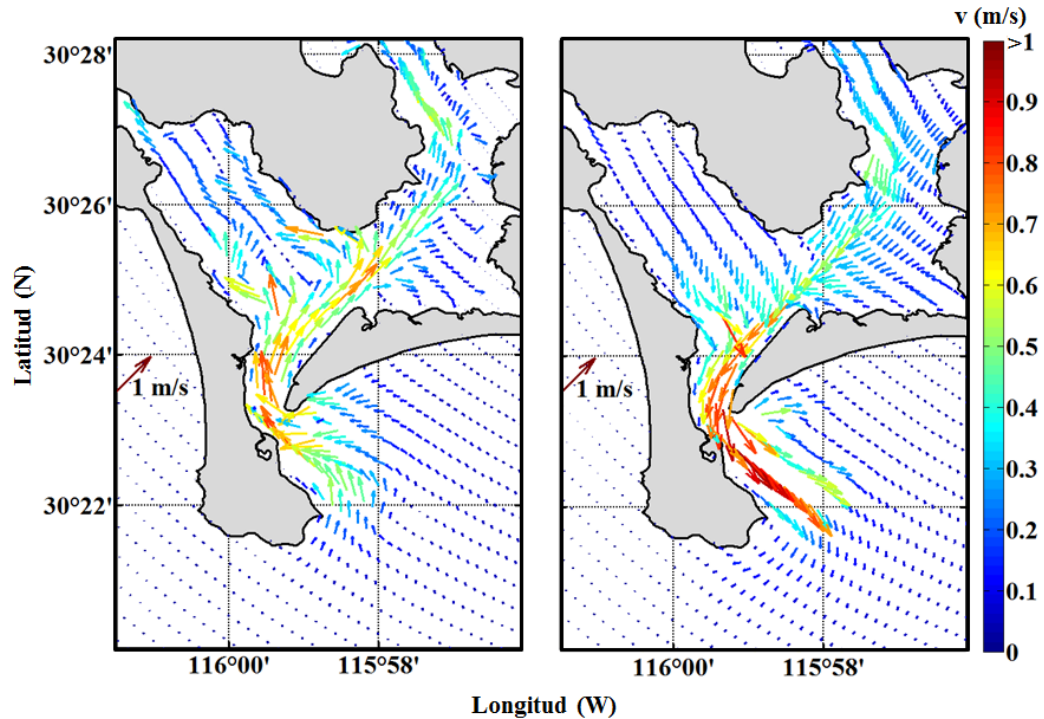


Figura 22. Campo de velocidad después de 16 días con respecto al tiempo inicial de ejecución en condiciones de flujo (panel derecho) y reflujo (panel izquierdo) bajo marea viva. La no visualización de remolinos en la figura, se debió a la resolución del campo de velocidad.

IV.2.4. Seguimiento de boyas de deriva

La posición de boyas de deriva virtuales, proporcionó detalles de los remolinos y el alcance que tuvo el agua según la marea (Figura 23). Las boyas de color rojo representaron el alcance del agua al inicio de la pleamar. Las boyas de color azul representaron el alcance del agua en un punto intermedio durante la pleamar.

Antes de que la pleamar iniciara, la mayor parte de las boyas formaron trayectorias de espirales con direcciones anticiclónicas. Algunas de las boyas se mantuvieron girando (ver flecha verde, Figura 23) y lograron trayectorias de máximo 2 espirales. La segunda

espiral siempre más grande que la primera. Un mínimo número de boyas que salieron del lado este del canal, formaron trayectorias de una espiral con dirección ciclónica.

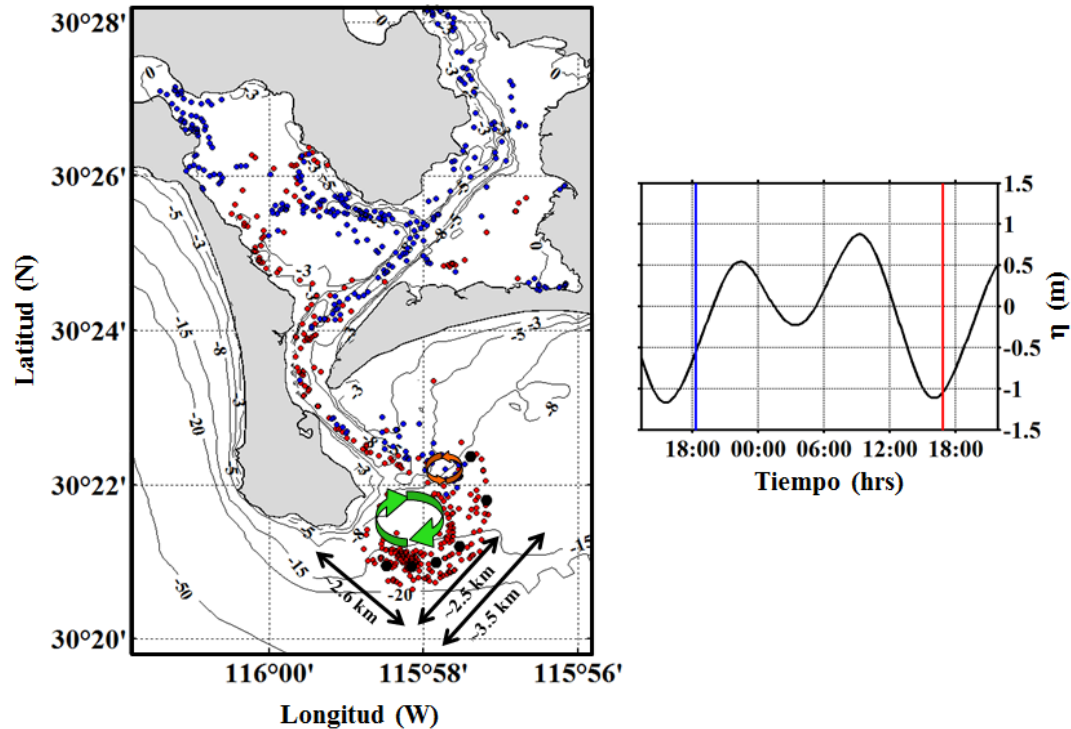


Figura 23. Alcance de boyas (panel izquierdo) al principio (color rojo) y en un punto intermedio durante la pleamar (color azul) en mareas vivas (panel derecho). Las flechas indican el movimiento de las boyas en esa zona. El color naranja indica una vorticidad ciclónica y el verde una vorticidad anticiclónica). Los puntos negros corresponden al límite (medido) donde existe el contraste de colores de agua en las afueras de BSQ.

Las boyas reflejaron la forma que adquiere el acople de dos remolinos encontrados (dipolo). La extensión máxima del dipolo fue de un radio de ~ 3.5 km y coincidió con las dimensiones que tiene la mancha que contrasta 2 tipos de agua en las afueras de BSQ. Durante mareas vivas, las boyas azules liberadas durante pleamar alcanzaron todas las extremidades de Bahía Falsa y BSQ.

Las boyas rojas liberadas durante bajamar salieron de la bahía alcanzando un máximo límite de ~ 2.6 km fuera de la costa. La ubicación de este límite fue similar al límite

donde es posible percibir un contraste de colores de agua en las afueras de BSQ (Figura 1).

Otro experimento con boyas inicialmente arregladas en forma radial a las afueras de la laguna, mostró cómo es la circulación del agua en BSQ. Las boyas fueron introducidas (líneas continuas) o expulsadas (líneas punteadas) de la laguna a través de la única entrada existente, según la marea Figura 24.

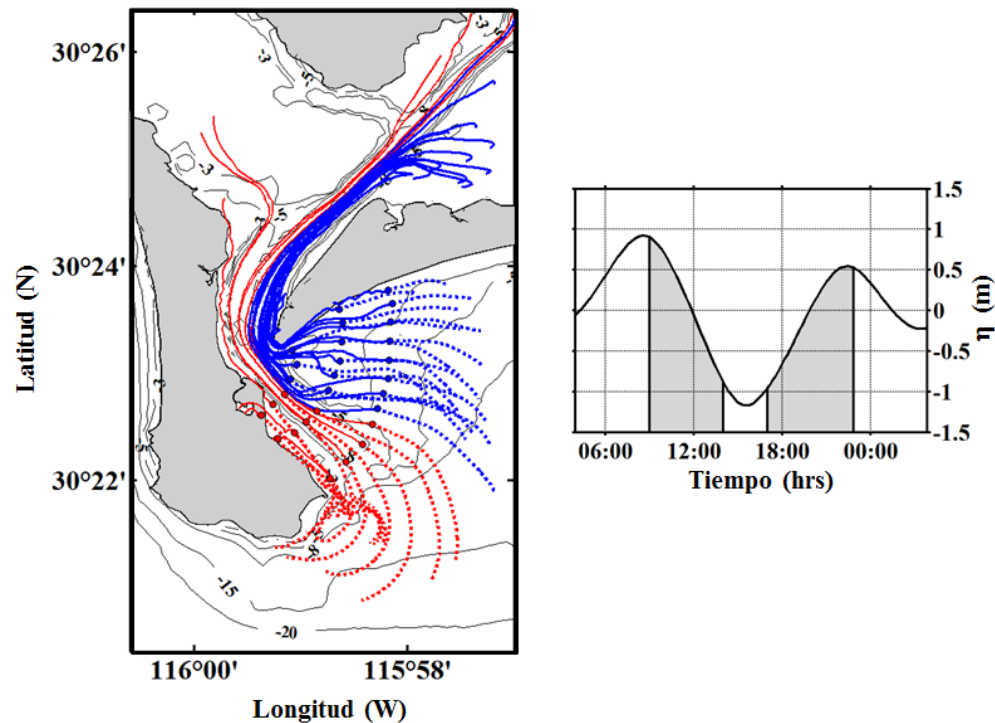


Figura 24. Trayectoria de boyas de deriva (panel izquierdo) posicionadas en forma radial y liberadas en condición de flujo (línea continua) y refluo (línea punteada) en mareas vivas (panel derecho). La posición de las boyas fue dividida en boyas del lado este (líneas azules) y lado oeste (líneas rojas)

Al diferenciar las boyas en 2 secciones, lado oeste (líneas rojas) y lado este (líneas azules), las boyas del lado oeste fluyeron sobre la lateral izquierda del canal y entraron a la laguna durante el flujo (Figura 24). Una porción de las boyas se dirigió hacia el canal Sonora y otra parte siguió por el canal principal. Al llegar a la bifurcación, una parte de

las boyas que restaban se fueron por el canal somero (hacia Bahía Falsa) y el resto siguió por el canal profundo (hacia Bahía San Quintín).

Las boyas del lado este entraron a la laguna y fluyeron sobre la lateral derecha del canal hasta llegar a la bifurcación. Más del 90% de las boyas siguió por el canal profundo (hacia Bahía San Quintín).

Durante el reflujo, las boyas del lado este salieron de forma radial. En cambio en el lado oeste, una porción de boyas salió de forma radial mientras que las boyas canalizadas, formaron trayectorias en forma de una o 2 espirales siendo capaces de viajar ~2.6 km lejos de la costa.

Algunas de las boyas permanecieron girando dentro de los ~2.6 km, otras fueron succionadas por la laguna. En cambio, al añadir forzamientos de viento y oleaje, una cantidad significativa de boyas se mantuvo girando, otra se trasladó hacia la sección este y muy pocas boyas fueron succionadas.

IV.2.5. Vorticidad

Un contraste entre vorticidades mostró la estructura del dipolo (Figura 25). La generación del dipolo se dio durante el reflujo y alcanzó las vorticidades máximas. Alrededor del sitio de máxima vorticidad, las boyas formaron una primera espiral.

Transcurrido el tiempo y conforme se avanzaba a un estado de flujo, el dipolo empezó a desplazarse hacia mar abierto y la vorticidad comenzó a perder fuerza. Este desplazamiento generó en la trayectoria de las boyas, la formación de una segunda espiral más alejada de la zona de liberación y más grande que la primera. Finalmente el tiempo volvió a transcurrir y se volvió a pasar a un estado de flujo, el dipolo se volvió a generar y se volvió a repetir el ciclo.

La vorticidad anticiclónica (remolino oeste), se formó a 5 m sobre la profundidad del mar y se desplazó hasta alcanzar 20 m. En cambio la vorticidad ciclónica (remolino este) se formó sobre 5 m con respecto al fondo marino y se desvaneció. La vorticidad ciclónica fue menor que la vorticidad anticiclónica.

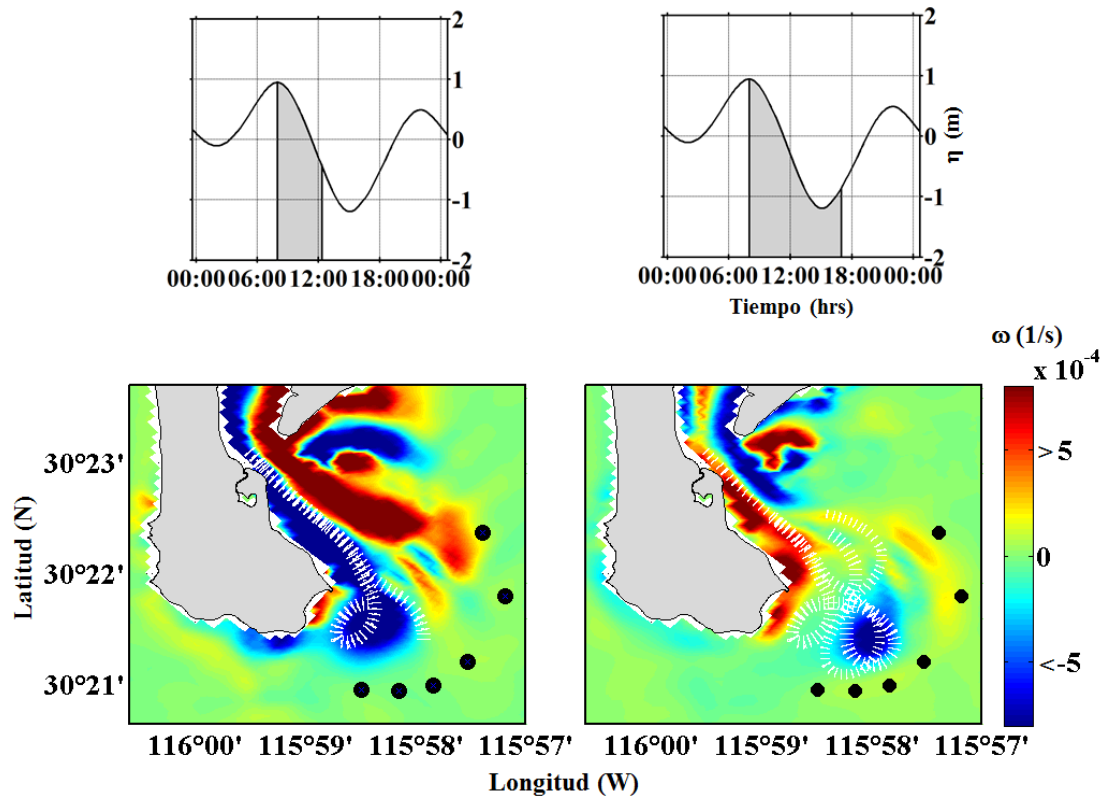


Figura 25. Simulación de vorticidad y trayectoria de boyas deriva en marea viva bajo condiciones de flujo (panel izquierdo) y reflujo (panel derecho). El tiempo corresponde al transcurso de 16 días después de haber ejecutado la prueba y los puntos negros corresponden al límite (medido) donde existe el contraste de colores de agua en las afueras de BSQ.

IV.2.6. Residual de la vorticidad.

Un promedio de la vorticidad durante un ciclo de marea, nos pudo mostrar las zonas de turbidez. Los mayores y menores índices de vorticidad promedio se dieron dentro del canal y alrededor de la zona donde se forman los remolinos. Justo ahí, en el lado oeste se observó una vorticidad negativa (anticiclónica) y en el lado oeste se observó una vorticidad ligeramente positiva (cyclónica) (Figura 26).

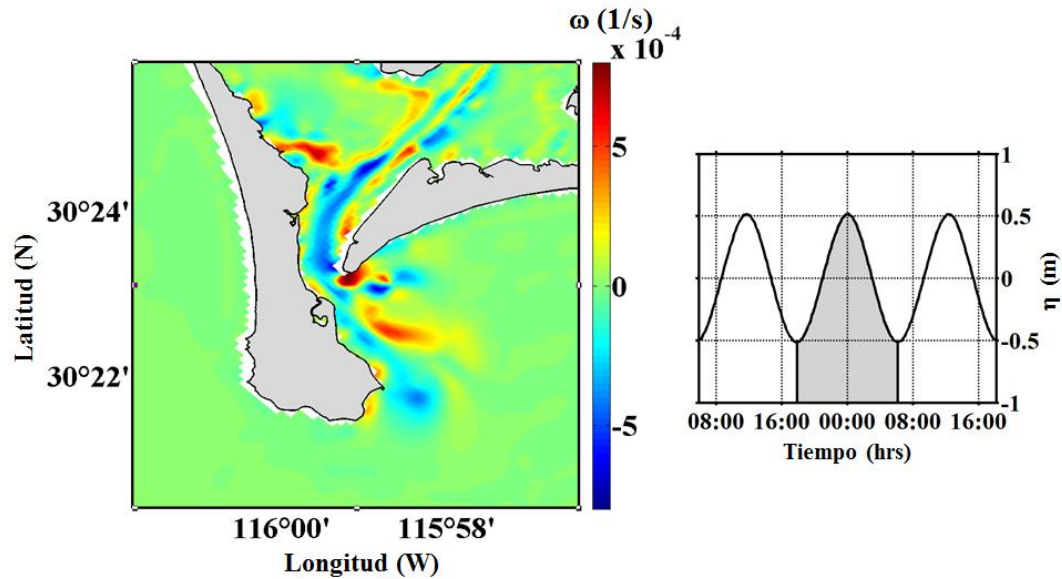


Figura 26. Residual de la vorticidad (panel izquierdo) en un ciclo de marea (panel derecho). La marea fue calculada en base a una componente armónica (M_2) similar a la de BSQ.

IV.2.7. Residual de la velocidad

El cálculo del residual de la velocidad promedio permite identificar diferentes patrones de circulación. (Figura 27).

En la bifurcación que existe entre el canal profundo y el canal somero, justo al lado se observó una circulación ciclónica. Al final del canal que pasa por el lado oeste de BF, se observó una circulación anticiclónica. Muy cercano a la bifurcación que existe entre este canal y el canal principal, punto P_1 , se detectaron corrientes viniendo de diferentes direcciones. Un caso similar sucede en el punto P_2 , que aunque no hay bifurcación, la dirección del canal hace un cambio de casi 90° .

A lo largo de la boca, sobre la parte profunda del canal se detectó una corriente de entrada con velocidad $\sim 5 \text{ cm/s}$, mientras que en la parte somera del canal se detectó una corriente de salida con velocidad de $\sim 10 \text{ cm/s}$. Al termino del canal, una corriente anticiclónica y una corriente ciclónica de menor magnitud fue visible en el lado este y oeste respectivamente.

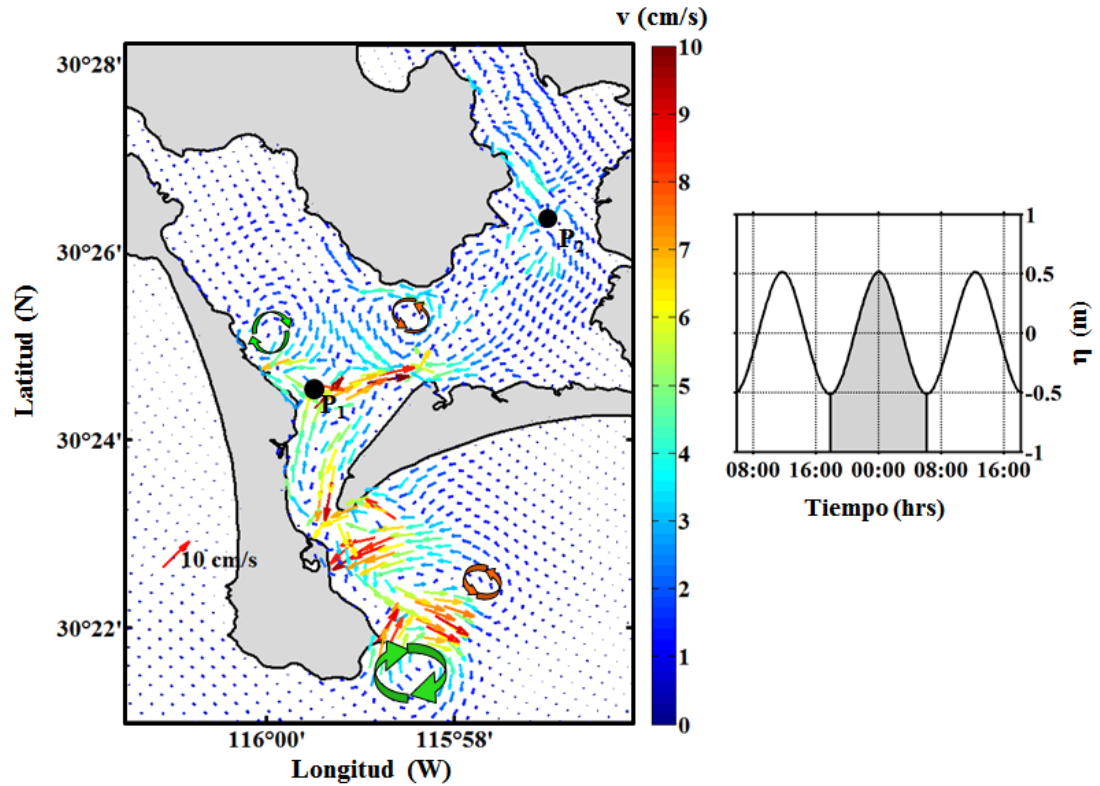


Figura 27. Residual de la velocidad promedio (panel izquierdo) en un ciclo de marea (panel derecho). La marea fue calculada en base a una componente armónica (M_2) similar a la de BSQ.

IV.2.8. Residual de la velocidad vertical.

El promedio de la velocidad vertical en un ciclo de marea, fue calculado para analizar los frentes de brotes de agua. Los puntos en forma de rombo representaron los lances medidos con CTD.

En las inmediaciones de la laguna, un afloramiento de agua (con velocidad vertical positiva) se hizo presente entre y alrededor de los puntos L3 al L6. La mayor concentración de afloramiento y hundimiento de agua ocurrió entre los puntos L3 y L2 respectivamente (Figura 28).

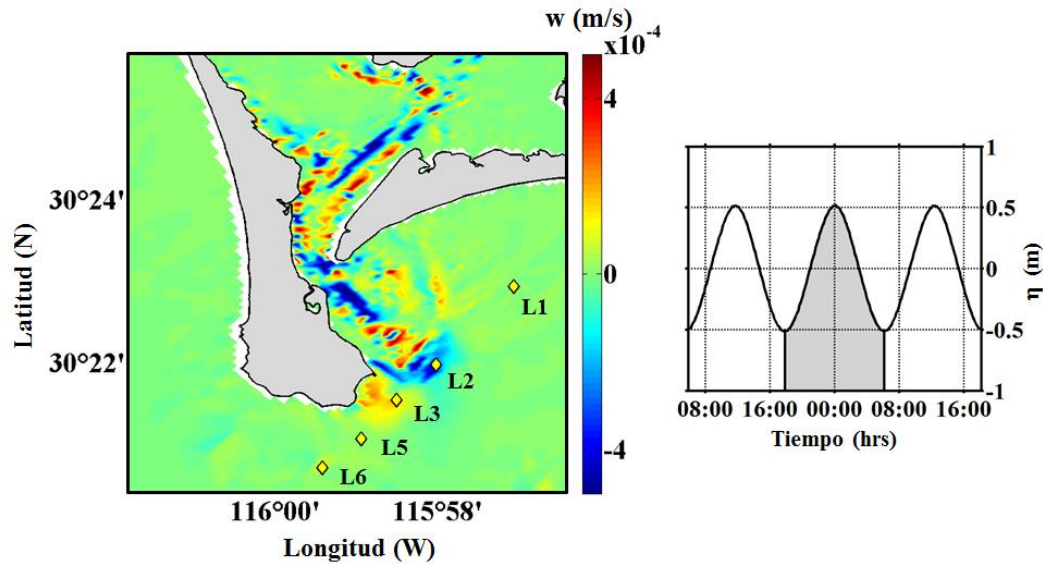


Figura 28. Residual de la velocidad vertical (panel izquierdo) en un ciclo de marea (panel derecho). La marea fue calculada en base a una componente armónica (M_2) similar a la de BSQ. Los puntos en forma de rombo se corresponden a los lances hechos para medir las características físicas del agua.

IV.2.9. Propagación del oleaje

La morfología de la laguna y sus alrededores, evitaron que el oleaje tipo swell propagado través de la zona de modelación (tanto típico como de verano), fuera capaz de penetrar la laguna.

Para ambos tipos de oleaje, gran parte de la energía de la ola se disipó al sur de la laguna. Los resultados numéricos muestran que en la punta de la barra oeste de BSQ, se concentra gran parte de la energía del oleaje.

La punta y el asomeramiento respectivamente difractan y refractan el oleaje creando focos de concentración de energía que inciden en la barra sur. La entrada estrecha de BSQ (boca) terminó por eliminar cualquier resto de energía (Figura 29).

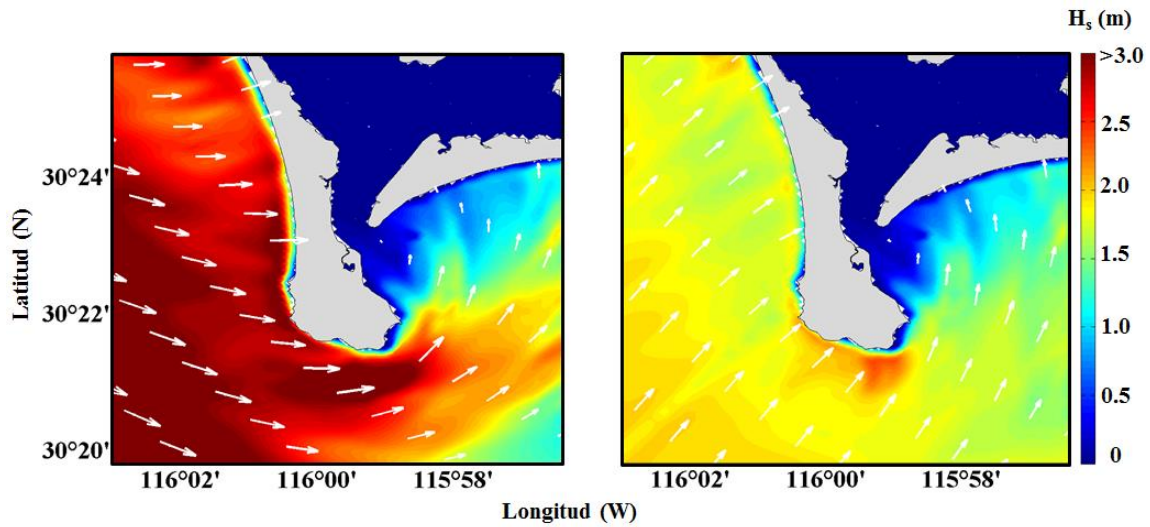


Figura 29. Propagación de un oleaje típico ($H_s=4$ m, $T_p=15$ s; dirección del oleaje 305° , panel izquierdo) y un oleaje de verano ($H_s=2$ m, $T_p=12$ s; dirección del oleaje 220° , panel izquierdo).

IV.2.10. Efectos de viento y oleaje.

Para ver los efectos del viento y oleaje, se hicieron experimento con boyas de deriva y se calculó la diferencia del campo de velocidades entre simulaciones que consideran marea, marea-viento, y marea-viento-oleaje. Tanto el campo de velocidad como el seguimiento de boyas, mostraron un transporte de agua producido por el efecto del viento y en menor medida por el oleaje.

La diferencia entre campos de velocidad marea y marea-viento, fue mínima en el mar profundo y el canal, mientras que la mayor diferencia se dio en las zonas de asomeramiento dentro y fuera de la laguna. Justo en las inmediaciones de la boca se observó un transporte de agua preferencialmente hacia el noreste (Figura 30).

Al considerar marea y marea-oleaje, la mayor diferencia entre campos de velocidad se observó en el sitio donde se concentró la energía del oleaje propagado, haya sido típico o de verano. Dentro de la laguna, la diferencia fue cero.

La diferencia máxima entre considerar marea y marea-viento-oleaje, osciló por los 10 cm/s, indicando un ligero transporte de agua. En las afueras de la laguna, el transporte

fue preferencialmente hacia el este. En las zonas donde se concentró la energía del oleaje, el transporte siguió la dirección del oleaje.

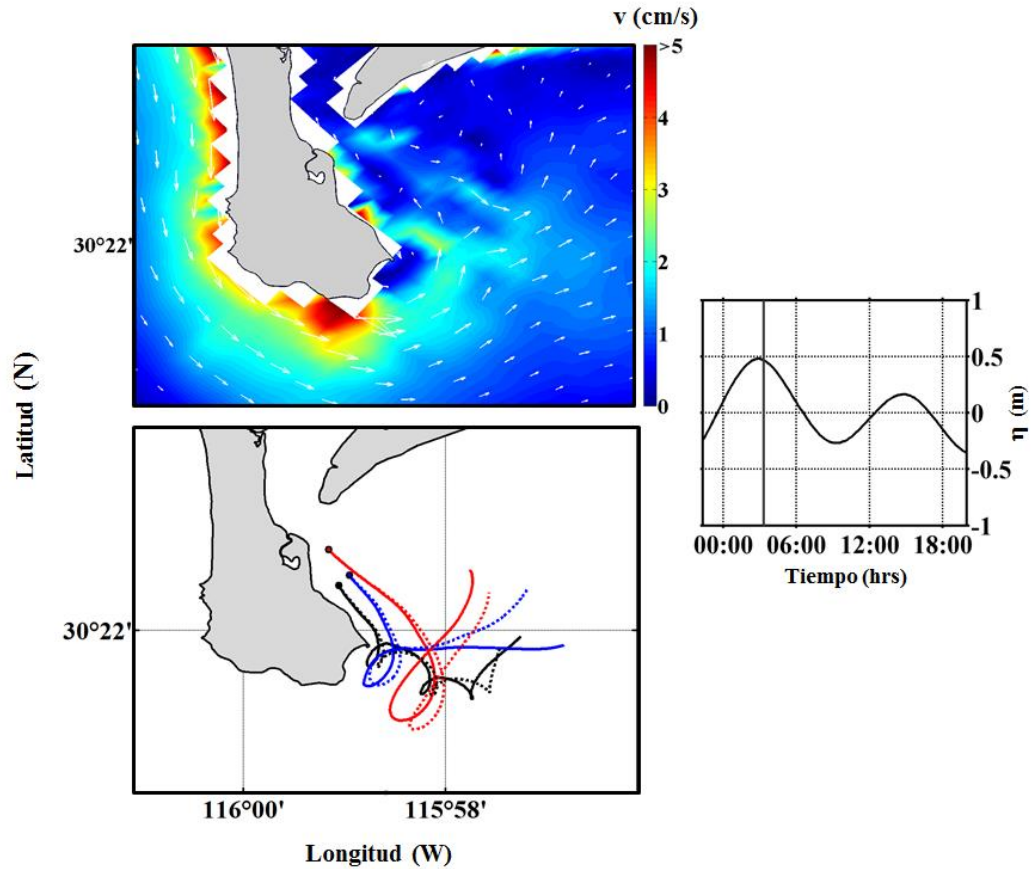


Figura 30. Efecto del viento evaluado mediante la diferencia del campo de velocidad (panel superior izquierdo) y el seguimiento de boyas de deriva (panel inferior izquierdo) al considerar marea (líneas continuas) y marea-viento (líneas punteadas) bajo un mismo tiempo y en condiciones de marea muerta (panel derecho).

En cuanto a las trayectorias de las boyas, éstas volvieron a tener forma de espirales con o sin viento. Cuando se consideró el viento, las espirales que formaron las boyas fueron más chicas y más alejadas de la costa (Figura 30). Este mismo suceso pero en menor medida ocurrió al considerar el efecto del oleaje.

CAPÍTULO 5

DISCUSIONES

A continuación se discute la elección de ciertos parámetros del modelo (sección V.2), su veracidad (sección V.2), la interpretación de los resultados de modelación (sección V.3 a V.5) y finalmente se discuten las limitaciones del trabajo (sección V.6). Por disposición, se presentan las discusiones por secciones para una mejor distribución de ideas.

V.1. Sensibilidad y estabilidad del modelo

Las variaciones en los tiempos de cómputo, mostraron que el modelo fue sensible a la resolución de espacio y tiempo. Al comparar los tiempos de cómputo, estabilidad y precisión entre las diferentes pruebas, se terminó por elegir un intervalo de tiempo $\Delta t=1$ s y una malla $\Delta x \cong \Delta y \sim 100$ m para correr las diferentes pruebas.

La elección de la malla sacrificó resolución espacial, con lo cual se perdió detalle en procesos que ocurren a escalas menores (evento sucedido en la medición de corrientes sobre el canal interior de BSQ), sin embargo, se optimizó el tiempo de cómputo.

V.2. Validación del modelo

Tanto los resultados del modelo del campo de velocidad y experimentos con boyas de deriva mostraron una circulación dependiente de la marea (*Angulo-Larios, 2006; Flores-Vidal, 2006; Delgado-González et al., 2010*).

El cálculo de la circulación residual a partir de corrientes modeladas, mostró que en la boca de la laguna, existe una corriente de salida por el canal profundo con velocidad de 5 cm/s y una corriente de entrada con velocidad de 10 cm/s en el canal somero, velocidades que concuerdan con lo registrado por *Valle-Levinson et al. (2009)* y *Flores-Vidal (2006)*.

La vorticidad y el seguimiento de boyas virtuales, evidenciaron la formación de remolinos. El sitio donde se forman y advectan los remolinos, concordó con el límite donde se observa el contraste entre agua con diferentes características ubicado en las afueras de BSQ.

Según las dimensiones del canal y la corriente producida por la marea, el cálculo analítico de la relación $W/UT_{BSQ} = 0.0208$, predijo que los remolinos escaparían de la fuente. Al observar cómo cambiaron las vorticidades con respecto a la marea, se observó que los remolinos fueron capaces de escapar de BSQ hacia mar adentro, concordando con la relación que predice si un dipolo podrá escapar o será succionado a la fuente (Wells y van Heijst, 2004).

Al analizar el residual de la velocidad vertical, se observaron valores altos entre las estaciones L3 y L6, sitio donde se presenta el afloramiento revelado a partir de datos medidos con CTD.

Con respecto a las velocidad máxima de las corrientes medidas y las reportadas por Angulo-Larios (2006) y Flores-Vidal (2006), el modelo subestimó la velocidad de las corrientes simuladas en el canal profundo, canal somero y la boca (ordenadas de mayor a menor). La velocidad máxima de las corrientes en los anclajes de la boca y canal interior de la laguna debería oscilar por los ~ 100 cm/s (Angulo-Larios, 2006; Flores-Vidal, 2006), sin embargo, la velocidad máxima de la corriente simulada en el boca, canal profundo y canal somero fue de ~ 100 cm/s, ~ 35 cm/s y ~ 70 cm/s respectivamente. Por otra parte, la dirección de la corriente simulada en el canal somero fue perpendicular a la medida y reportada por Angulo-Larios (2006) y Flores-Vidal (2006).

El sitio donde se dio la diferencia de dirección entre corrientes y la subestimación de velocidad, infiere que la discrepancia de debió a la baja resolución de la malla. La baja resolución pudo haber calculado una corriente que no consideró cambios de menor escala (< 50 m) en el canal, subestimando la velocidad. La escala de la malla también pudo haber desplazado el punto de observación virtual con respecto al medido, ocasionando una subestimación e incluso cambiando la orientación de la corriente.

Puesto que nuestro mayor interés es estudiar las zona de remolinos y los procesos de mezcla (ubicado a las afueras de BSQ), las coincidencias entre los resultados de salida del modelo y las mediciones en campo, certificaron que el modelo numérico aplicado a BSQ, representó bien la hidrodinámica en las inmediaciones de la laguna (con lo cual se aprobó la calibración y validación del modelo) a pesar de subestimar la velocidad de la corriente y la discrepancia de dirección de corriente en el interior de BSQ.

V.3. Procesos de mezcla

Las zonas de mayor vorticidad coincidieron con las zonas donde la intensidad de la corriente fue fuerte. Estas zonas fueron sobre el canal, sobre gradientes altos de batimetría (en las inmediaciones de BSQ) y en la zona de remolinos.

El lugar de donde se registró la serie temporal de temperatura durante una pleamar, fue un sitio de alta vorticidad y corrientes uniformes según los resultados de modelación. Lo cual explica la homogeneidad en la vertical debido a la constante mezcla producida por las paredes del canal y fricción de fondo.

Justo al sur de la barra oeste de BSQ, se cambia de 5 a 35 m de profundidad en una distancia menor a 5 km (entre los lances L2 a L6), generando un gradiente en la batimetría. Los resultados del modelo, reportaron valores de velocidad vertical altos en esta zona. Lo cual explicaría el afloramiento de agua detectado a partir de mediciones con lances de CTD, creando frentes producidos por la mezcla por marea (*Simpson et al., 1990*) cuando la corriente toca fondo.

En la zona donde se formaron los remolinos, se registraron valores altos de vorticidad y velocidad vertical, sitio donde es posible observar claramente el contraste de color de agua bien mezclada en las inmediaciones de BSQ.

Por lo tanto, la batimetría y la formación de los remolinos pueden acrecentar o cambiar los procesos de mezcla (*Provenzale, 1999; Wells y van Heijst, 2003*). La mezcla logró que agua recién expulsada, se renovara con agua proveniente del océano, mejorando el intercambio de agua entre laguna-océano.

V.4. Remolinos

Los experimentos realizados con boyas de deriva mostraron la formación y propagación de los remolinos. Ciertas boyas siguieron trayectorias en forma de 2 espirales, la segunda espiral más grande que la primera. La doble espiral se debió a que el remolino anticiclónico, que se formó en las inmediaciones de BSQ, tuvo la capacidad de moverse lejos de la fuente. La diferencia de tamaños en la espiral, fue consecuencia de la evolución del remolino producida por cambios en la intensidad de la corriente.

Aunque las boyas virtuales no lograron describir el remolino ciclónico, la vorticidad mostró la formación pero no la evolución del remolino. Se considera que la desaparición se debió a la poca profundidad que tiene el remolino para desarrollarse.

Dado que los resultados de modelación y campo mostraron que el remolino formado en BSQ fue capaz de escapar de la fuente, se infiere que al mismo tiempo que incrementa los procesos de mezcla, también ayuda a que el agua expulsada de la laguna alcance una distancia lejana a la fuente, evitando el reciclamiento del agua.

V.5. Efecto de los mecanismos de forzamiento en BSQ

Al considerar la marea, viento y oleaje como parámetros de forzamiento en el modelo aplicado a BSQ, se obtuvo una idea de cómo es la circulación y cómo ocurren los procesos físicos en la laguna (Figura 31).

Por medio de boyas, el parámetro viento dejó ver un efecto en la velocidad de las corriente superficiales en BSQ, tal como lo reporta *Flores-Vidal (2006)*. La dirección del viento y la línea de costa, se detectó un transporte de agua oceánica hacia la costa este explicado por el transporte de Ekman. El oleaje pareció ser un mecanismo sin mucha influencia en la circulación de BSQ. En las afueras de la laguna, el oleaje mostró un desplazamiento mínimo de agua transportándose en dirección a la propagación del oleaje.

Debido a la morfología de la laguna y a que la marea es el principal forzamiento que controla la circulación de BSQ, el seguimiento de boyas de deriva virtuales y la evolución temporal de los campos de velocidad, mostraron cómo agua entró de forma radial y salió en forma de chorro, tal como lo predice la teoría de intercambio de agua para cuerpos costeros con una entrada estrecha (*Stommel y Farmer, 1952; Chadwick y Largier, 1996*).

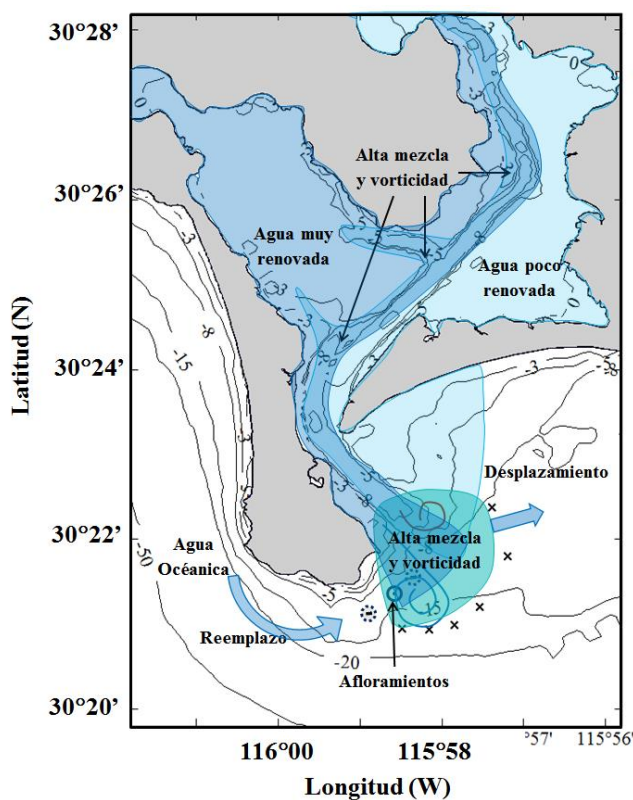


Figura 31. Esquema al considerar de considerar la marea, el viento y el oleaje como mecanismos de forzamiento en la circulación del agua.

Con el experimento de forzar una marea con sólo un armónico (M_2) y calcular la vorticidad residual, se detectó que la marea y la batimetría, son factores importantes en los procesos de mezcla por marea. La incursión de la marea al pasar por gradientes altos de batimetría (al sur de la barra oeste de BSQ), puede llegar a provocar afloramientos de agua los cuales variarán en tiempo y espacio según la marea.

Al dividir la forma radial en la que entra el agua en este y oeste, se pudo decir que agua proveniente del radio oeste circula por BF. En este radio, existe la formación periódica de remolinos los cuáles mezclan agua recién expulsada de la laguna con agua oceánica lo cual evitando el reciclamiento. Por otra parte en el radio este, el remolino formado no es capaz de desarrollarse, evitando la constante mezcla y ocasionando que agua recién expulsada vuelva a entrar a la laguna y circule por BSQ. Este acontecimiento podría explicar el por qué BF es más productiva que BSQ.

Si el alcance de los remolinos excede el límite radial de la zona de succión, entonces el bombeo se vuelve eficiente puesto que existe una renovación de agua y de nutrientes. Acontecimiento que explicaría el por qué aunque BSQ no tiene aportes importantes de río o lluvia, la laguna es altamente productiva a pesar de contar con sólo un estrecho acceso con el mar abierto.

V.6. Limitaciones del trabajo

Debido a que la marea es el principal mecanismo de forzamiento, a grandes rasgos, la modelación numérica explicó gran parte de la circulación de BSQ. Sin embargo, en el interior de la bahía, no fue posible reproducir los procesos con exactitud. La poca resolución en la malla y la falta de más datos de batimetría, pudieron influir en las diferencias entre datos de modelación y datos de medición.

Cabe agregar que los parámetros físicos (fricción, dispersión y densidad) fueron constantes en toda el área, sin embargo, estos parámetros varían en área y según el tipo de sedimento, biodiversidad y presencia de cultivos.

Aunque la modelación fue una herramienta útil para representar procesos de escala espacial mayor a la resolución de la malla, no lo fue para procesos a menor escala. Para mejorar el modelo aplicado a procesos en el interior de BSQ a micro-escala, se sugiere aumentar la resolución de la malla y variar espacialmente los valores de dispersión y fricción de fondo. Agregar movimientos debido a gradientes de densidad y considerar

los efectos de radiación puesto que el clima es mediterráneo y las temperaturas atmosféricas son altas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIÓN

La calibración de un modelo numérico para representar la circulación de agua en BSQ, hicieron posible el estudio de la influencia de los remolinos y procesos de mezcla en el intercambio de agua entre laguna-océano. Puesto que las diferencias entre corrientes medidas y simuladas se atribuyen a la falta de resolución de la malla, no se puede decir que el modelo no reproduce la hidrodinámica de BSQ puesto que sí representa otros procesos similares a los observados en campo.

Tal como indica el bombeo por marea, el agua entró a BSQ de forma radial y fue expulsada en forma de chorro a través de la única entrada existente. La relación canal e incursión de la marea, permite la formación periódica de remolinos encontrados o también llamado, dipolo. Debido a la poca profundidad, el remolino ciclónico no evoluciona. Por el contrario el remolino anticiclónico, el cual se desarrolla a mayor profundidad, logra escapar de la fuente. La vorticidad de los remolinos generó una zona de constante mezcla, donde agua oceánica se mezcla con agua recién expulsada de la laguna renovando el agua. Durante la pleamar, el agua que proviene de la zona de mezcla entra por la boca y circula por el canal hasta llenar BF. El agua que circula por BSQ a través del canal, proviene de las zonas de menor renovación de agua. El canal determinó la circulación del agua en BSQ.

Al analizar como los mecanismos de forzamiento, intervienen en la circulación de agua en BSQ y sus zonas aledañas, se detectó que para cuerpos costeros con entradas estrechas donde el mecanismo de forzamiento principal es la marea, la morfología de la laguna y los gradientes de batimetría son cruciales en los procesos de mezcla y formación de remolinos. Por un lado, los remolinos son capaces de transportar el agua recién expulsada de la laguna lejos de la fuente. Por otro lado, mezclan agua expulsada con agua proveniente del océano. Ambos, aumentan la renovación de agua con lo cual se mejora el intercambio de agua entre laguna-océano.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Albagnac J., Brancher P., Eiff O., Lacaze L. y Moulin F., 2008. Vortex dipole evolution in shallow water. En *Euromech Colloquium 501, Mixing of coastal, estuarine and riverine shallow flows*, Ancona, Italia, pp. 8-11.
- Álvarez-Borrego S., Ballesteros G., y Chee A., 1975. Estudio de algunas variables fisicoquímicas superficiales en la Bahía de San Quintín en verano, otoño e invierno. *Cienc. Mar.*, vol. 2, pp. 1–9.
- Amante C. y Eakins B.W., 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. En *NOAA Tech. Memorandum NESDIS NGDC*, pp. 19-24
- Angulo-Larios N.T., 2006. Hidrodinámica de la Bahía de San Quintín, B. C. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Marinas. En Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B. C., México, pp. 128.
- Beerens S.P., Ridderinkhof, H., Zimmerman, J.T.F., 1995. An analytic study of chaotic stirring in tidal areas. *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 4 (6), pp. 1011-102
- Booij N., Ris R. y Holthuijsen L., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Parte 1, Model description and validation. *J. Geophy. Res.*, vol. 104 (C4), pp. 7649–7666.
- Brown C.A., Jackson G.A. y Brooks D.A., 2001. Particle transport through a narrow tidal inlet due to tidal forcing and implications for larval transport. *J. Geophy. Res.*, vol. 105 (C10), pp. 24141–24156.
- Chadwick B. y Largier J., 1996. Tidal exchange at the Bay-Ocean boundary. *J. Geophy. Res.*, vol. 104 (C12), pp. 29901–29924.

- Choi K.W. y Lee J.H.W, 2004. Numerical determination of flushing time for stratified water bodies. *J. Mar. Syst.*, vol. 50 (3-4), pp. 263–281.
- Camacho-Ibar V.F., Carriquiry J.D. y Smith S.V., 2003. Non-conservative P and N fluxes and net ecosystem production in San Quintín Bay, México. *Estuaries*, vol. 26 (5), pp. 1220-1237.
- Daesslé L.W., Rendón-Márquez G., Camacho-Ibar V.F., Gutiérrez-Galindo E.A., Shumilin E. y Ortiz-Campo E., 2009. Geochemistry of modern sediments from San Quintin coastal lagoon, Baja California: Implication for provenance. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 26 (1), pp. 117-132.
- Delgado-González O., Marván-Gargollo F., Mejía-Trejo A. y Gil-Silva E., 2012. San Quintin Lagoon Hydrodynamics Case Study. *Water Resour. Manage. and Model.*, pp. 127-143.
- Dissanayake D. y Wurpts A., 2013. Modelling an anthropogenic effect of a tidal basin evolution applying tidal and wave boundary forcings: Ley Bay, East Frisian Wadden Sea. *Coast. Eng.*, vol. 82, pp. 9–24.
- EUM Secretaría de Marina, dirección general de investigación y desarrollo costa oeste (2002), 2008. Bahía Santa María B. C. En Carta SM-121.1, Datum WGS-84, 1ra. Ed. Dic.2004/ REIMP.CORR. A. M.
- Flores-Vidal X., 2006. Circulación residual en Bahía San Quintín, B. C. México. Tesis de Maestría. En Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada, Ensenada, B. C., México. Pp. 80.
- García-Esquivel Z., González-Gómez M.A., Ley-Lou F. y Mejía-Trejo A, 2003. Potencial ostrícola del brazo oeste de Bahía San Quintín: Biomasa actual y estimación preliminar de la capacidad de carga. *Cienc. Mar.* vol. 30, pp. 61-74,

- Gil-Silva E., Delgado-González O. y Mejía-Trejo A., 2011. Datos meteorológicos de la estación San Quintín, B.C., durante el periodo 2002-2009. *Inf. Tec. DOFIOSQ2002-09*, pp. 28.
- Hernández-Ayón M., Galindo-Bect M.S., Camacho-Ibar V.F., García-Esquivel Z., González-Gómez M.A. y Ley-Lou F. 2004. Dinámica de los nutrientes en el brazo oeste de la Bahía de San Quintín, Baja California, México, durante y después de El Niño 1997/1998. *Cienc. Mar.* vol. 30, pp. 129-142.
- Hydro-Morphodynamics, 2011. Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. En Delft3D User Manual, Copyright © 2011 Deltares, pp. 20-70.
- Kashiwai M., 1984. Tidal residual circulation produced by a tidal vortex part 2. Vorticity balance and kinetic energy. *J. Ocean. Soc. Japan*, vol. 40, pp. 437-444.
- Lara-Lara J.R., Alvarez-Borrego S. y Lawrence F.S, 1980. Variability and tidal exchange of ecological properties in a coastal lagoon. *Est. Coast. Mar. Sci.*, vol 11 (6), pp. 613-637.
- Li C.Y. y O'Donnell J., 2005. The effect of channel length on the residual circulation in tidally dominated channels. *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 35, pp. 1826–1840.
- Ocampo-Torres F.J., 1980. Análisis y predicción de velocidad mediante un modelo unidimensional en Bahía San Quintín, B.C, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas. En Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B. C., México, pp. 94.
- Osorno-Velazquez A., 2000. Impacto del cultivo de moluscos filtroalimentadores en el fitoplancton y calidad del agua en Bahía San Quintín. Tesis de maestría. En Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada, B.C., México, pp. 48.

- Provenzale A., 1999. Transport by coherent barotropic vortices. *J. Fluid Mech.*, vol. 31, pp. 55–93.
- Ris R., Booij N. y Holthuijsen L., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Parte 2, Verification. *J. Geophys. Res.*, vol. 104 (C4), pp. 7649–7666.
- Signell R.P. y Butman B., 1992. Modeling tidal exchange and dispersion in Boston Harbor. *J. Geophys. Res.*, vol. 97 (C4), pp. 15591–15606.
- Simpson J.H., Brown J., Matthews J. y Allen G., 1990. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries*, vol. 13 (2), pp. 125–132.
- Snodgrass F.E., Groves G.W., Hasselmann K.F., Miller G.R., Munk W.H. y Powers W.H., 1966. Propagation of Ocean Swell across the Pacific. En *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A. Math. and Phys. Sci.* vol. 259 (1103), pp. 431–497.
- Stommel H. y Farmer H.G., 1952. On the nature of estuarine circulation. *WHOI Tech. Rep.*, pp. 131.
- Valle-Levinson A., Gutierrez de Velasco G., Trasviña A., Souza A.J., Durazo G. y Ashish J.M., 2009. Residual Exchange Flows in Subtropical Estuaries. *Estuaries and Coasts*, vol. 32, pp. 54–67.
- Verboom G.K. y Slob A., 1984. “Weakly-reflective boundary conditions for two-dimensional water flow problems. *Adv. Water Resour.* vol. 7 (4), pp. 192–197. También presentado en “5th International Conference on Finite Elements in Water Resources, Burlington, Vermont, 1984, pp. 48, 209 y 213.
- Wells M.G. y van Heijst G.J.F., 2003. A model of tidal flushing of an estuary due to periodic dipole formation. *Dyn. Atmos. Oceans*. vol. 37 (3), pp. 223–244

- Wells M.G. y van Heijst G.J.F., 2004. Dipole formation by tidal flow in a channel. En Proceedings of the International Symposium on Shallow Flows, 16-18 June 2003, Delft, The Netherlands. Pp. 63-70
- Winant C.D., 2008. Three dimensional residual tidal circulation in an elongated, rotating, basin. *J. Phys. Oceanogr.* vol. 38, pp. 1278–1295.
- Wolanski E., Drew E., Abel K. y O'Brien J., 1988. Tidal jets, nutrient upwelling and their influence on the productivity of the algal *Halimeda* in the Ribbon Reefs, Great Barrier Reef. *Est. Coast. Shelf Sci.* vol. 26 (2), pp. 168–201.
- Woodford A.O., 1928. The San Quintín volcanic field, lower California. *Am. J. Sci.* vol. 15, pp. 337-345.
- Zimmerman J.T.F., 1978. Topographic generation of residual circulation by oscillatory (tidal) currents. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* vol. 11 (1), pp. 35–47.
- Zimmerman J.T.F., 1986. The tidal whirlpool, a review of horizontal dispersion by tidal and residual current. *Neth. J. Sea Res.* vol. 20, pp. 133–154.