

Simulación de la circulación en el sistema lagunar Chacahua-Pastoría, Oaxaca, México

Rosario Sanay-González **, María Adela Monreal Gómez * & David Alberto Salas de León *

Resumen

Simulación de la circulación en el sistema lagunar Chacahua-Pastoría, Oaxaca, México. Se presentan resultados de un modelo numérico no-lineal de circulación, aplicado al sistema lagunar Chacahua-Pastoría, en Oaxaca, México. La boca de la laguna de Chacahua estuvo cerrada posiblemente como respuesta a la disminución de las descargas del río Verde y a la construcción de una boca en la laguna Pastoría. Posteriormente la boca de Chacahua se abrió por efecto del huracán Paulina y por dragado. En este estudio se modeló la circulación de las aguas del sistema lagunar con la boca de Chacahua cerrada y abierta. El modelo usa batimetría real y las ecuaciones no-lineales de conservación de masa y momento para aguas poco profundas. Se efectuaron cuatro experimentos numéricos para simular el campo de corrientes bajo diferentes geometrías y condiciones de descarga de agua dulce. Con los resultados obtenidos se calculó la circulación residual. Los resultados muestran que cuando la boca de Chacahua estaba cerrada, la circulación en esa laguna fue casi nula. Al abrir la boca se incrementó la circulación; el flujo de los ríos

Abstract

Simulation of the circulation on the Chacahua-Pastoría lagoon system, Oaxaca, Mexico. Results of a non-linear numerical model applied to the Chacahua-Pastoría lagoon system in Oaxaca, Mexico, are presented. The inlet at Chacahua lagoon was closed owing to the reduction of the river discharge and the construction of a mouth at the Pastoría lagoon. Later the mouth of the Chacahua lagoon was open by the effect of the Paulina hurricane and by the dredging. The circulation in the lagoon system was modeled with the mouth of Chacahua lagoon open and closed. The model incorporates topography, and the non-linear shallow-water equations. Four numerical experiments were performed to simulate the circulation under different geometry and fresh water discharge conditions. Using these results the residual circulation was obtained. The closing of the entrance channel on the Chacahua lagoon produce a non-circulation field at this lagoon. When the Chacahua mouth is open the circulation is enhanced. The river discharge enhances the circulation mainly in the northwestern part of the Pastoría lagoon. The residual circulation

Résumé

Simulation de la circulation dans le système lagunaire Chacahua-Pastoría, Oaxaca, Mexique. Un modèle numérique non linéaire de circulation appliqué au système lagunaire Chacahua-Pastoría de Oaxaca, Mexico, est présenté. L'embouchure de la lagune de Chacahua a été fermée possiblement comme réponse à la diminution des décharges du río Verde et à la construction d'une embouchure dans la lagune de Pastoría. Ultérieurement, la bouche de Chacahua s'est ouverte par effet de l'ouragan Paulina et par dragage. Dans cette étude la circulation des eaux du système lagunaire a été modélisée, avec la bouche fermée ou ouverte. Le modèle utilise la bathymétrie réelle et des équations non linéaires de conservation de masse et moment pour des eaux peu profondes. Quatre expériences numériques ont été effectuées pour simuler le champ des courants sous différentes géométries et conditions de décharge d'eau douce. Avec les résultats obtenus la circulation résiduelle fut calculée. Les résultats montrent que lorsque la bouche de Chacahua était fermée, la circulation dans la lagune était quasi nulle. L'ouverture de l'embouchure

* Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, México 04510 D.F.
Correo electrónico: monreal@mar.icmyl.unam.mx

** Para correspondencia, correo electrónico: salas@mar.icmyl.unam.mx

** Dirección actual: Geological Sciences Department, University of South Carolina, 701 Sumter Street, Columbia, South Carolina 29208, Estados Unidos.

Correo electrónico: rsanay@geol.sc.edu

tiende a modificar únicamente el patrón de corrientes cercano a las zonas de descargas. La circulación residual muestra la existencia de un flujo neto de agua de Chacahua hacia Pastoría que podría ser la razón por la cual la boca de Chacahua se cerró en épocas pasadas. La boca de Pastoría presenta asimetría en los flujos de marea, siendo más rápido el flujo de entrada lo cual podría ocasionar la formación de un delta interno.

Palabras clave: Asimetría en bocas, circulación residual, dragado, huracán Paulina, lagunas costeras, modelo.

results exhibit a net flow from Chacahua to the Pastoria lagoon that could be the reason by which the Chacahua mouth was closed in the past. A tidal velocity asymmetry was observed at the Pastoria inlet; the flood is faster than the ebb. This asymmetry could results in the formation of an internal delta.

Key words: Coastal lagoons, dredging, model, Paulina hurricane, residual currents, tidal velocity asymmetry.

augmente la circulation; le débit des rivières tendant à modifier uniquement les courants près des zones de décharge. La circulation résiduelle montre l'existence d'un flux net d'eau de Chacahua vers Pastoría qui pourrait être la raison pour laquelle la bouche de Chacahua se ferma en époques antérieures. L'embouchure de Pastoría présente une asymétrie dans les flux de marées, avec un flux d'entrée plus rapide qui pourrait occasionner la formation d'un delta interne.

Mots clefs: Asymétrie d'embouchures, circulation résiduelle, dragage, ouragan Paulina, lagunes côtières, modèle.

Introducción

La presión social que ejerce el acelerado crecimiento de la población, los requerimientos de agua, de energía eléctrica y la necesidad de producir más y mejores alimentos en los países en desarrollo, han motivado la acelerada construcción de presas, las cuales retienen el agua y los sedimentos transportados por los ríos, que de otra manera fluirían libremente hacia las zonas costeras.

Las principales consecuencias por la retención de las aguas fluviales debido a las presas son que la zona costera sufre cambios en su fisiografía (erosión o sedimentación), incremento en la salinidad y cambios en la temperatura del agua; así como una sucesión de especies dulceacuícolas (con alta tolerancia a las fuertes variaciones de la salinidad) por especies netamente marinas (Day *et al.* 1995). Es importante mencionar que la falta de estudios de campo y de predicción o modelación ha tenido consecuencias irreversibles para diferentes regiones costeras. En algunas ocasiones el resultado es que se tienen que efectuar costosos trabajos de dragado para rehabilitar la zona afectada, sin lograrlo del todo.

Un ejemplo de una región fuertemente impactada por acciones como las antes mencionadas es el sistema lagunar Chacahua-Pastoría, el cual se encuentra dentro del "Parque Nacional Lagunas de Chacahua" en Oaxaca, México. En el sistema lagunar Chacahua-Pastoría se han desarrollado diversos estudios relacionados con la abundancia y distribución de la flora y fauna, dada su importancia como zona de desove, crianza, alimentación y protección para diferentes especies marinas y dulceacuícolas de importancia comercial. Este sistema es considerado dentro de los más importantes para las pesquerías del camarón y con potencial para desarrollos acuícolas en el sur de México (Anónimo 1990). Por otro lado, la hidrodinámica del sistema ha sido poco estudiada, no existen o son muy limitados los datos observacionales de corrientes, nivel de la superficie libre e hidrografía en general.

En este trabajo se utiliza un modelo barotrópico bidimensional verticalmente integrado, para simular la circulación inducida por la marea, el viento y las descarga de agua dulce en el sistema lagunar Chacahua-Pastoría bajo diferentes escenarios de descargas de los ríos. El objetivo global es

entender los procesos físicos que gobiernan la estabilidad de las bocas del sistema lagunar, dado que el deterioro de las lagunas se relaciona con los prolongados periodos que permanecen las bocas cerradas. En particular, este trabajo busca contribuir al conocimiento de la dinámica del sistema lagunar, enfocándose en el efecto de la descarga de los ríos y de la apertura de la boca de Chacahua en la circulación transitoria y residual. Es importante enfatizar que el modelo utilizado considera la densidad del agua del sistema lagunar y de los ríos uniforme y constante, lo cual representa la mayor limitante de estos resultados numéricos.

Área de estudio

El sistema lagunar Chacahua-Pastoría se localiza entre los 15°57' y los 16°21' N y los 97°48' y los 97°32' O (Fig. 1). Las dos lagunas tienen bocas que permiten el intercambio de agua con el Océano Pacífico y están conectadas entre sí por un canal artificial angosto (15 m), con 6 m de profundidad en promedio y con una extensión de 2.5 km de largo. La boca de la laguna de Pastoría es artificial, mientras que la de la laguna de Chacahua era natural. La boca de la laguna de Chacahua se cerró en 1981, coincidiendo con la desviación o retención de

las descargas del Río Verde y la construcción de una boca artificial en la laguna de Pastoría.

En general, ambas bocas presentan inestabilidades, referente a las tasas de erosión/depositación de sedimentos, que resultan en el asolvamiento, e inclusive, en el cierre de las mismas, Ledesma-Vázquez *et al.* (1992) registra la formación de un delta interno en la laguna de Pastoría. Su comunicación con el mar es usualmente rehabilitado por medio de dragado y en ocasiones, en forma natural por el paso de huracanes, por ejemplo en 1997 el huracán Paulina contribuyó significativamente a que se abriera la boca de la laguna de Chacahua la cual había a permanecido cerrada desde 1981.

La precipitación media en la región es de 1,300 mm año⁻¹ (Anónimo 1989). En términos generales, se presenta un periodo lluvioso que va de mayo a octubre y uno de secas, que comprende de noviembre a abril (Madrigal 1986). Los principales escurrimientos a las lagunas provienen de los ríos San Francisco y Chalcalapa e indirectamente del río Verde. El río San Francisco descarga en la laguna de Chacahua y el río Chalcalapa en la laguna de Pastoría. El río Verde en épocas de lluvia tiene un gasto promedio de 16 m³ s⁻¹ y en épocas de secas disminuye considerablemente hasta ser casi imperceptible. El río San Francisco por su parte, tiene un escurrimiento medio de 4 m³ s⁻¹

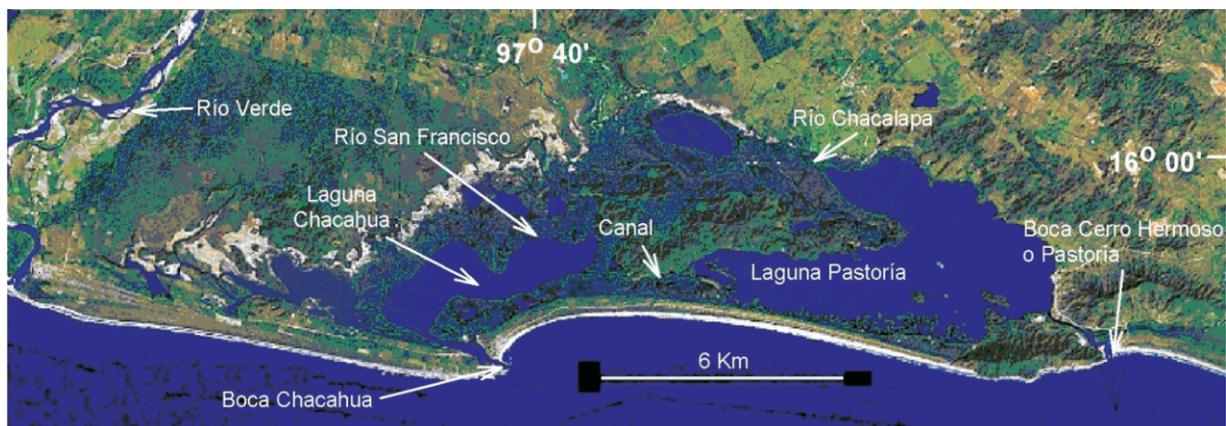


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

en la época de lluvias y durante la época de secas no corre caudal alguno. Para el río Chacalapa no se tiene información (Ramón-Díaz 1995).

Los vientos dominantes proceden en la mayor parte del año del suroeste, con una intensidad promedio de 2.5 m s^{-1} . Ocasionalmente proceden del sur y sureste con la misma intensidad. Las mareas son mixtas con dominancia semi-diurna, la componente de marea más importante en la región es la M_2 (Sanay-González 1997).

Antecedentes

Diversos estudios observacionales revelan un deterioro de la laguna de Chacahua causado por el prolongado cierre de la boca. Cruz-Lazo & Gómez-Márquez (1985) registran la existencia de zonas hipersalinas (50 psu), las cuales antes del cierre de la bocabarra de Chacahua eran importantes viveros de camarón. Teodoro & Ortiz (1990) encuentran una composición biológica diferente entre las dos lagunas. Ledesma-Vázquez *et al.* (1992) registran la formación de sedimentos negros dominantes (reducidos), esto para la laguna de Chacahua, en los cuales la descomposición anaeróbica provocaba malos olores (ácido sulfúrico). Así mismo, en esta laguna se registró la proliferación del alga *Lyngbia aestuarii* característica de aguas estancadas, formando extensas capas en la superficie del agua (Ledesma-Vázquez *et al.* 1992). Torres-Moye *et al.* (1993) encontraron que las condiciones físicas y químicas de la laguna Pastoría reflejaban la influencia de las aguas oceánicas que recibe, mientras que para la laguna de Chacahua, registran procesos de eutroficación.

Las mediciones hidrográficas antes y después del cierre de la boca barra de Chacahua son escasas. Martínez (1980) registra datos hidrográficos del sistema lagunar antes del cierre de la boca, donde la temperatura y la salinidad fluctúan entre 26 y 33°C y entre 37 y 40 ups respectivamente. El

pH oscila entre 7 y 9.6 con un valor promedio de 7.6 y las concentraciones de oxígeno disuelto fluctúan entre 2.4 y 8.6 ppm con un promedio de 5.4 ppm. Estudios posteriores al cierre de la boca barra (Madrigal 1986, Cruz-Lazo & Gómez-Márquez 1985) revelan que durante la época de secas el nivel del agua de las lagunas baja considerablemente y se presentan condiciones de hipersalinidad. De acuerdo a Ramón-Díaz (1995) la circulación inducida por la marea oceánica solo es significativa en la laguna Pastoría, mientras que para la laguna de Chacahua es prácticamente nula, esto debido al efecto de amortiguamiento que sufre la onda de marea en el canal que conecta a las lagunas.

Material y métodos

Para la época de realización de este estudio no existían resultados publicados de observaciones de variación del nivel del agua, o de corrientes en el sistema lagunar. La única información disponible eran los datos de las tablas de predicción de mareas del Instituto de Geofísica de la UNAM y una limitada serie de mediciones de corrientes en la boca de la laguna Pastoría efectuadas por los autores de este escrito. De las tablas de marea (Tabla I) se obtuvieron las condiciones de forzamiento impuestas en el modelo numérico en las bocas de las lagunas. Los datos medidos fueron usados para validar cualitativamente los resultados de las corrientes resultantes del modelo numérico.

El 19 de junio de 1995 se efectuaron mediciones horarias en la boca de la laguna Pastoría de corriente, presión, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto. El periodo total de mediciones fue de 24 h, aproximadamente dos ciclos de marea de la M_2 , la componente principal de la marea en la zona de estudio (Tabla I). Las mediciones de corrientes se hicieron usando un correntómetro tipo Vanes (Kjerfve & Madeiros 1989). Las mediciones de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto se realizaron con una sonda marca Hidrolab

Tabla I. Amplitudes y fases de las principales componentes de marea, para las estaciones de Acapulco, Puerto Ángel y Salina Cruz. La fase es con respecto al meridiano local 90° O (datos de la tabla de predicción de mareas, Anónimo 1993).

Componente	Acapulco (Guerrero)		Puerto Ángel (Oaxaca)		Salina Cruz (Oaxaca)	
	Amplitud (m)	Fase ($^{\circ}$)	Amplitud (m)	Fase ($^{\circ}$)	Amplitud (m)	Fase ($^{\circ}$)
M ₂	0.185	57.37	0.424	66.92	0.493	68.77
S ₂	0.082	239.80	0.067	170.77	0.082	162.64
N ₂	0.057	6.52	0.103	31.17	0.109	33.62
K ₂	0.024	244.47	0.016	173.24	0.015	141.23
K ₁	0.117	53.65	0.101	33.25	0.102	27.14
O ₁	0.090	64.06	0.074	53.19	0.070	52.79
P ₁	0.038	53.66	0.031	32.14	0.033	27.38

modelo H20. Las mediciones se efectuaron a tres profundidades: superficie (10% de la profundidad total), a media agua (50% de la profundidad) y fondo (10% por arriba del fondo).

El modelo numérico aplicado es un modelo barotrópico no-lineal que resuelve las ecuaciones para ondas en aguas poco profundas y conservación de masa. Las

características del modelo numérico se encuentran en Monreal-Gómez & Salas de León (1985, 1990).

La malla numérica es homogénea sobre el sistema lagunar, con un paso espacial de 200 m (Fig. 2). Para todos los casos simulados se usó batimetría real. La integración temporal fue efectuada con un intervalo de 49.68 segundos, usando el método de salto de rana. Las

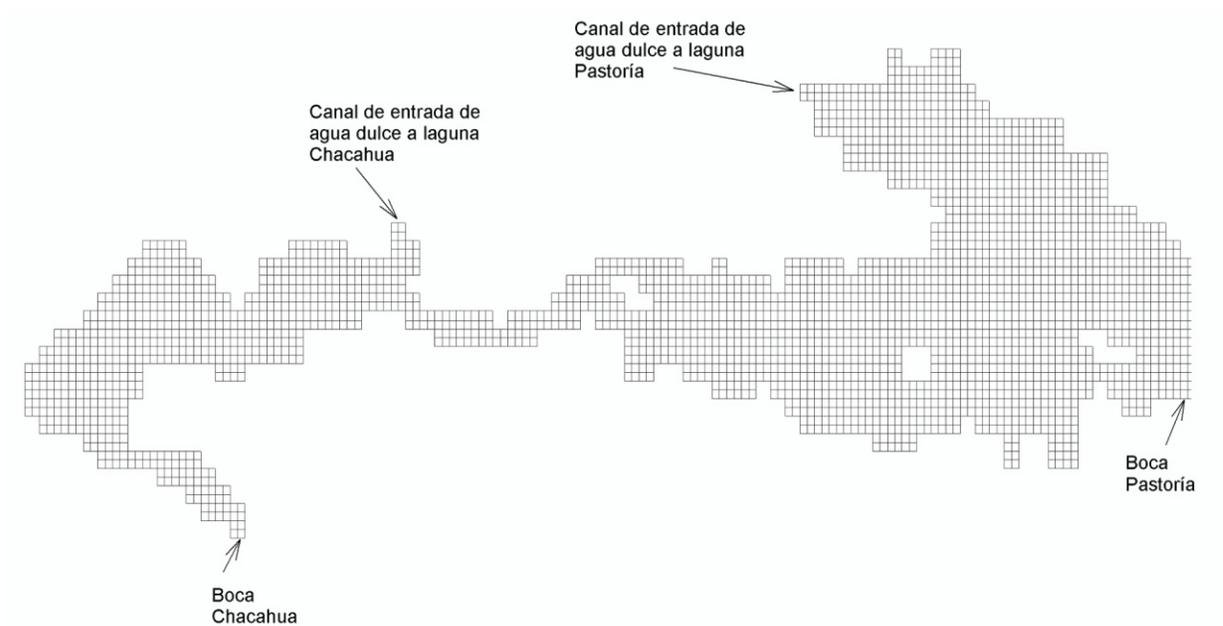


Figura 2. Malla numérica usada en la solución del modelo.

condiciones de frontera utilizadas fueron: libre deslizamiento en las fronteras cerradas; para las bocas y ríos se impuso el forzamiento por la marea (oscilación de la superficie libre) que llega del océano y la descarga de los ríos, respectivamente. En la superficie libre se impuso el esfuerzo del viento y la rugosidad del fondo fue parametrizada con una función cuadrática de la velocidad.

Se realizaron un total de cuatro experimentos numéricos. En todos los casos se impuso el forzamiento inducido por la marea. En el primero se considero la boca de Chacahua cerrada y la de Pastoría abierta. En el segundo se consideraron las dos bocas abiertas. En el tercer experimento se incluyo la descarga de los ríos Chacalapa ($8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y San Francisco ($4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y en el último experimento además de los forzamientos antes indicados, se incluyo el efecto del esfuerzo del viento sobre la superficie libre. En la tabla II se registran las características de los forzamientos utilizados en cada experimento numérico. Las variaciones de marea utilizadas corresponden al resultado de la interpolación de los datos de las estaciones mareográficas próximas a las bocas (Anónimo 1993). Los aportes de los ríos corresponden a las descargas que se tenían proyectadas por la

Comisión Nacional del Agua a partir de 1998. El esfuerzo del viento corresponde al viento promedio registrado para la región (Sanay-González 1997).

Resultados

Datos medidos en campo

De las mediciones *in situ* se encontró que la velocidad de flujo (corriente de entrada) es mayor que en el reflujó (Fig. 3) y que la duración de reflujó es dos horas mayor que la de flujo. Las series de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto muestran un comportamiento similar en las tres profundidades de muestreo (Figs. 4a-c), indicando que la columna de agua permanece verticalmente mezclada durante todo el ciclo de marea.

Comparando la velocidad a media agua con cada uno de los parámetros medidos a la misma profundidad (Fig. 5), se observa que la salinidad y el oxígeno disuelto se encuentran en fase con la velocidad, mientras que la temperatura tiene un desfase de 180° . Durante el flujo, el agua es mas salada, más fría y con mayor contenido de oxígeno disuelto que durante el reflujó.

Tabla II. Características de las diferentes condiciones de frontera y forzamiento utilizadas en los experimentos numéricos.

Experimento	Amplitud y fase de la componente de marea M_2 (m / grados)		Descarga de río ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)		Velocidad del viento (m s^{-1} / grados)
	Chacahua	Pastoría	San Francisco (Chacahua)	Chacalapa (Pastoría)	
1	-	0.384 / 61.88	-	-	-
2	0.384 / 61.88	0.384 / 61.88	-	-	-
3	0.384 / 61.88	0.384 / 61.88	4	8	-
4	0.384 / 61.88	0.384 / 61.88	4	8	2.5 / 225

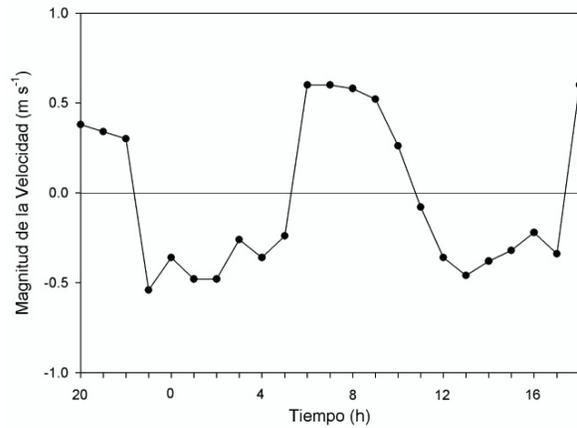


Figura 3. Magnitud de la velocidad en la boca de laguna Pastoría. Los valores positivos son flujo y los negativos son reflujo.

Resultados numéricos

Flujos transitorios

Los resultados numéricos del transporte transitorio son presentados en cuatro etapas del ciclo de marea con intervalos de 3 h, iniciando en la máxima llenante con respecto a la boca de Pastoría.

Los resultados del primer experimento, boca de Chacahua cerrada y la de Pastoría abierta, sin descarga de agua dulce (Fig. 6), considerado como el caso base. Muestran que durante el máximo de la llenante (Fig. 6a), la circulación en la laguna de Pastoría refleja una respuesta directa del forzamiento en la boca. El transporte es hacia el oeste, con máximo transporte cerca de la boca y disminuyendo drásticamente hacia el norte y el oeste. Por otro lado, la circulación en el canal y en la laguna de Chacahua es hacia la laguna de Pastoría, este movimiento presenta un desfase de 180° con respecto al movimiento del agua en la boca de la laguna Pastoría. Después de un cuarto de ciclo de marea, el flujo en la laguna de Pastoría disminuye mientras que en el canal y en la laguna de Chacahua aumenta. Durante el máximo reflujo (Fig. 6c) nuevamente se observa una respuesta “uniforme” de la laguna de Pastoría, mientras que la laguna de Chacahua muestra el periodo de transición entre entrante y saliente. A tres cuartos del

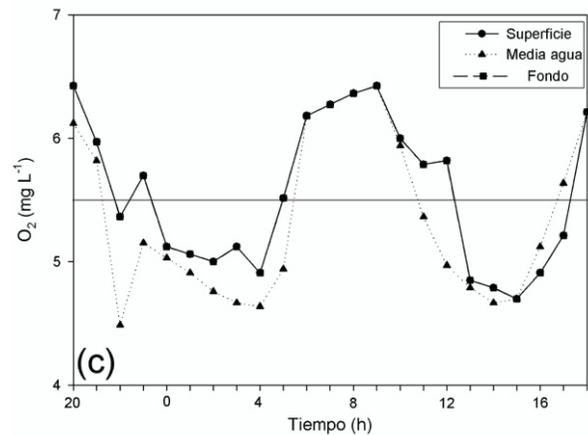
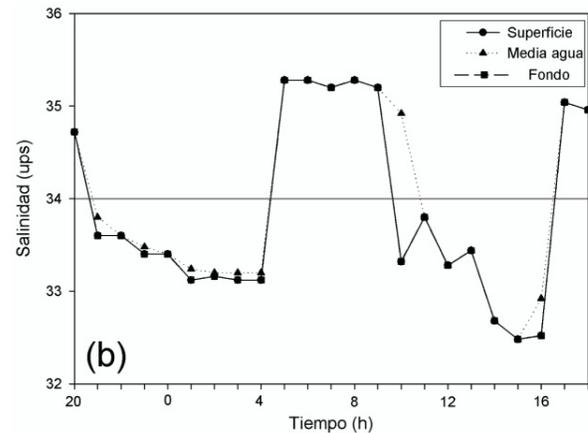
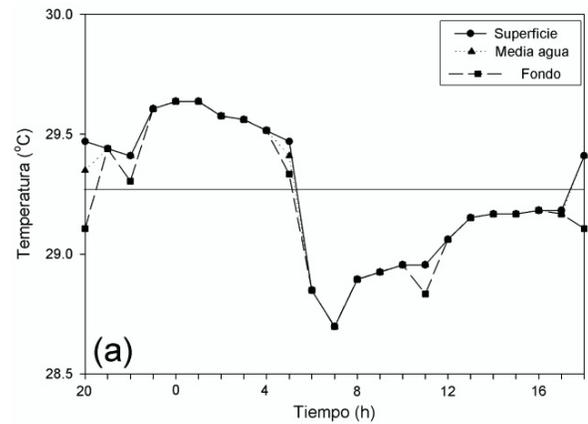


Figura 4. Variación temporal de: a) temperatura (°C), b) salinidad (ups) y c) oxígeno disuelto (mg L⁻¹) en la boca de la laguna Pastoría en la superficie, media

ciclo de marea las corrientes en la laguna de Pastoría son de nuevo de poca intensidad con un patrón de circulación en dirección de la boca de Pastoría (Fig. 6d), mientras que en la laguna de Chacahua se alcanzan los máximos transportes de reflujo. En resumen, la laguna

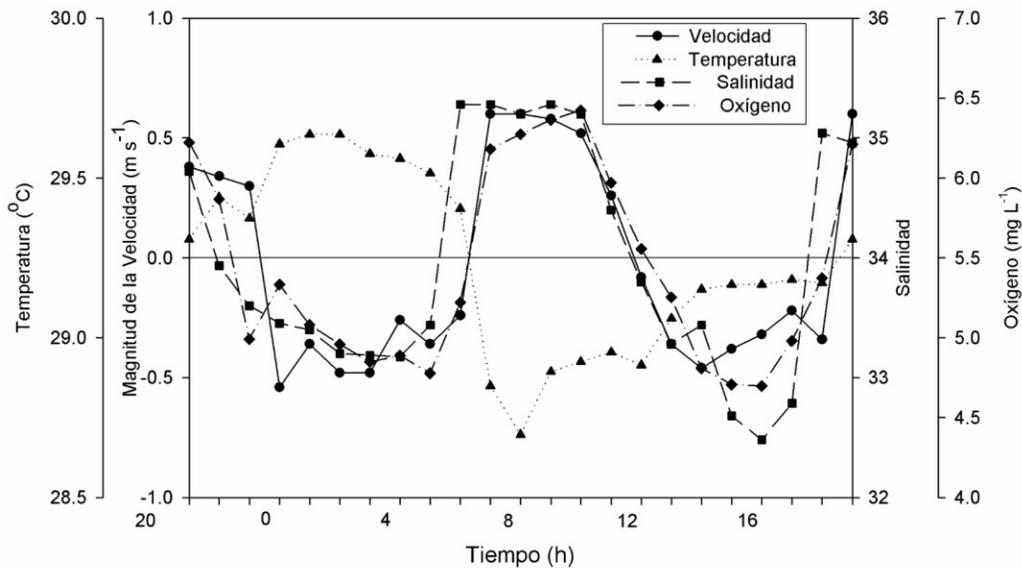


Figura 5. Variación de la velocidad, temperatura (°C), salinidad (ups) y oxígeno disuelto (mg L⁻¹) a media agua en la boca de la laguna Pastoría.

de Pastoría responde directamente al forzamiento existente en la boca de Pastoría, mientras que la laguna de Chacahua responde a la diferencia de nivel de la superficie libre existente entre las lagunas. Este gradiente de presión barotrópico es máximo durante los periodos de calma (cambio de flujo a reflujos y viceversa) y es cuando el transporte en el canal y en la laguna de Chacahua alcanza su máximo valor. Es importante notar que la circulación en la laguna de Chacahua es casi nula, a excepción de la zona cercana al canal.

De los resultados del segundo experimento numérico (Fig. 7), que corresponde al caso de la boca de Chacahua abierta y sin descarga de ríos se observa como ambas lagunas responden en forma directa al forzamiento impuesto en las bocas. Durante la máxima llenante (Fig. 7a), ambas lagunas presentan un transporte hacia el canal, con máximos valores en las entradas de las lagunas y mínimos en el canal. Aunque el forzamiento impuesto en ambas lagunas es el mismo, las características de las entradas (ancho, profundo, forma) hace que el intercambio de agua del sistema lagunar con el mar sea mucho

mayor en la laguna de Pastoría que en la laguna de Chacahua. Esta diferencia de transporte hace que se siga formando un gradiente barotrópico entre las lagunas y que la circulación en el canal y la parte este de la laguna de Chacahua sea gobernada principalmente por este gradiente de presión (similar al primer experimento). En general, la apertura de la boca de la laguna de Chacahua origina una mayor circulación en la parte oeste de la laguna de Chacahua y un cambio de fase en la respuesta del canal y la parte este de la laguna de Chacahua al gradiente de presión barotrópico formado entre las lagunas. Finalmente, la circulación transitoria de la laguna de Pastoría permanece casi inalterada después de la apertura de la laguna de Chacahua.

Cuando se incluyen las descargas de los ríos Chacalapa (8 m³ s⁻¹) y San Francisco (4 m³ s⁻¹), además de las dos bocas abiertas (tercer experimento) se observa que se incrementa la circulación solamente en las áreas cercanas a los ríos (Fig. 8). El patrón de circulación transitoria en las cuatro etapas de un ciclo de marea, sugiere que el agua del río

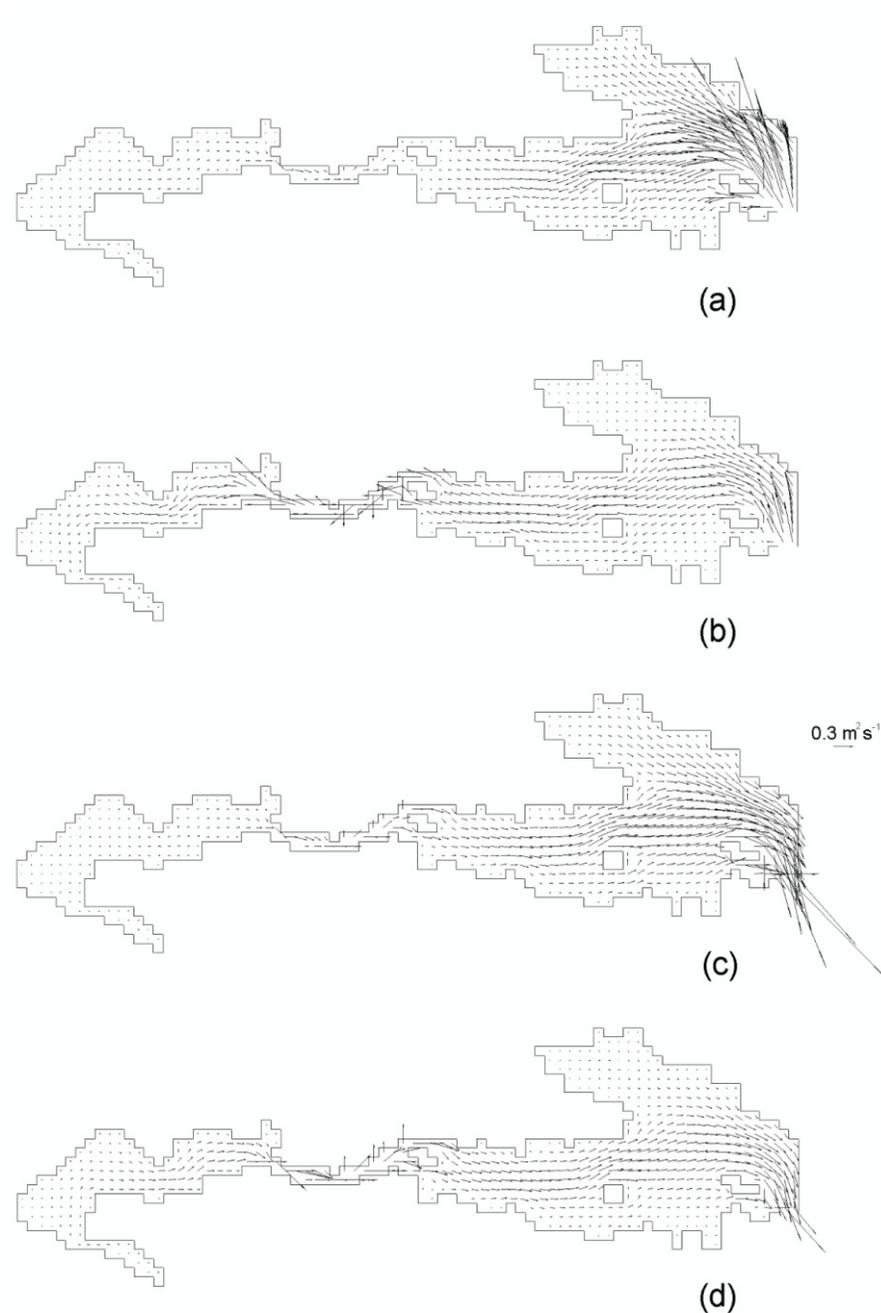


Figura 6. Resultados de la simulación numérica de la circulación cuando la boca de Chacahua esta cerrada y sin aportes de agua dulce al sistema: a) inicio del ciclo de marea, b) un cuarto, c) un medio y d) tres cuartos del ciclo de marea.

Chacalapa, río que descarga en la laguna de Pastoría, permanecerá poco tiempo en la laguna. Por ejemplo, durante el reflujó (Figs. 8d-e) el agua del río es transportada directamente hacia el mar. Por otro lado, la descarga del río San Francisco, río que descarga en la laguna de Chacahua, es

transportada hacia la laguna de Pastoría en parte del reflujó etapa de la marea (Figs. 8c-d) y hacia la parte oeste de la laguna de Chacahua durante el resto del periodo de marea (Figs. 8a-b).

El transporte transitorio correspondiente al cuarto experimento numérico (no

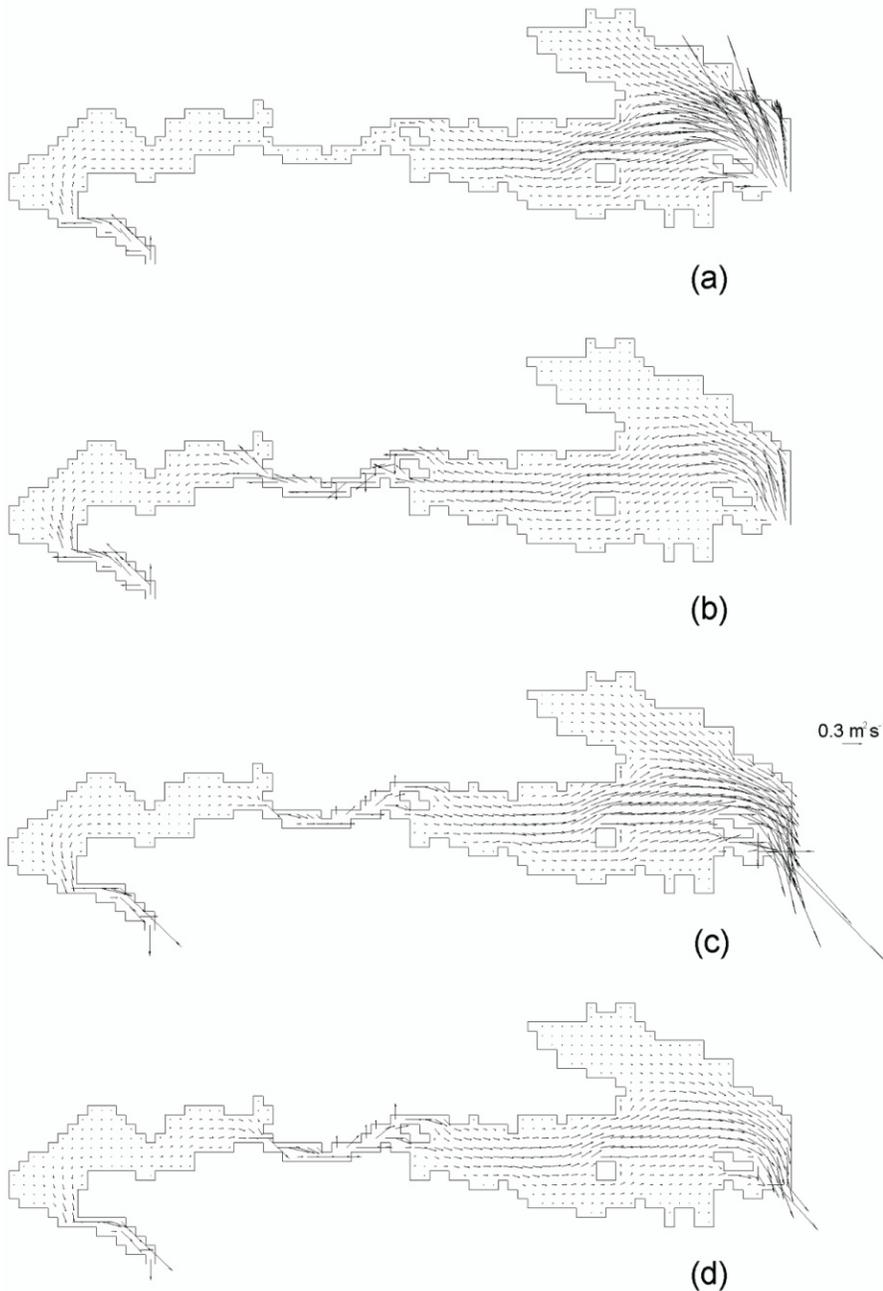


Figura 7. Resultados de la simulación numérica de la circulación cuando la boca de Chacahua esta abierta y sin aportes de agua dulce al sistema: a) inicio del ciclo de marea, b) un cuarto, c) un medio y d) tres cuartos del ciclo de marea.

mostrados aquí), el cual incluye viento como forzamiento, es muy similar a los resultados del tercer caso.

Flujo residual

El transporte residual (promedio temporal del

transporte transitorio en diez ciclos se marea) del experimento cuatro: bocas de Chacahua y Pastoría abiertas, esfuerzo de viento, forzamiento por marea y descarga de agua dulce de los ríos (Fig. 9), muestra que la circulación residual en la laguna de Chacahua es prácticamente nula y que hay un flujo

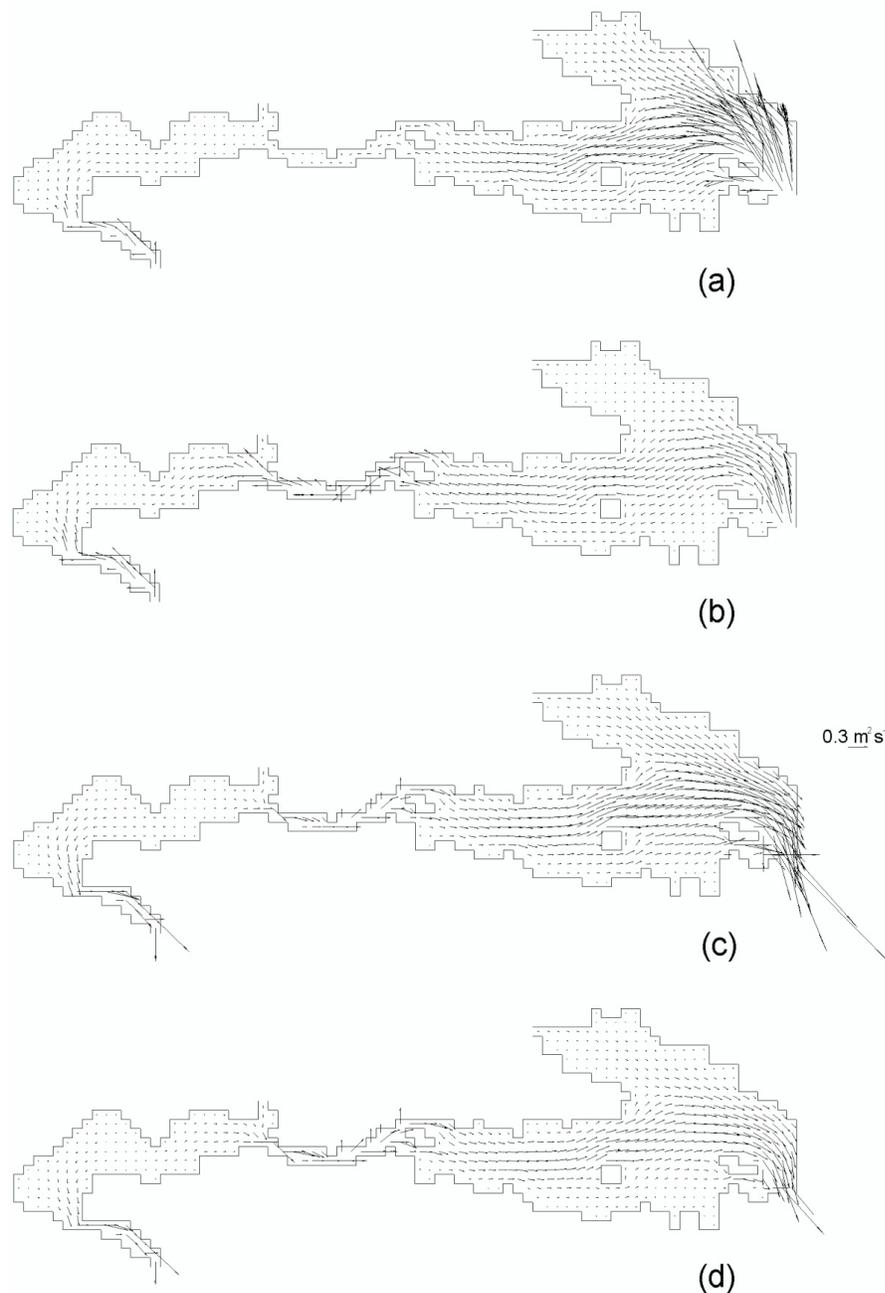


Figura 8. Resultados de la simulación numérica de la circulación cuando la boca de Chacahua esta abierta y con aportes de agua dulce a las lagunas de Pastoría y Chacahua respectivamente: a) inicio del ciclo de marea, b) un cuarto, c) un medio y d) tres cuartos del ciclo de marea.

residual de la laguna de Chacahua hacia la laguna de Pastoría a través del canal de conexión. Aunado a este flujo casi unidireccional, se encuentran diversos giros en la laguna de Pastoría. La descarga del río Chacalapa se dirige hacia el mar, mientras que la descarga del río San Francisco afecta ambas

lagunas.

Discusión

Los resultados de los datos medidos en la boca de Pastoría muestran que la velocidad de la corriente de entrada es mayor que la de salida

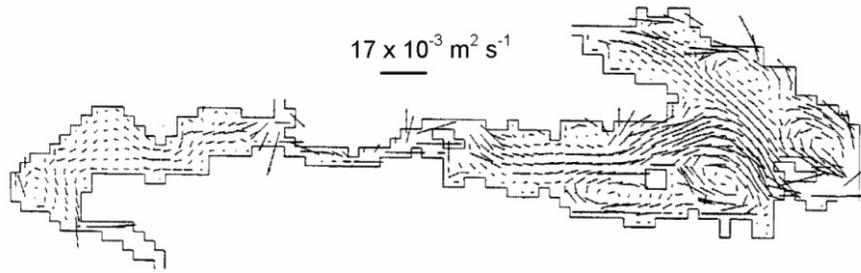


Figura 9. Resultados del cálculo de la circulación residual, promedio en diez ciclos de marea de los resultados correspondientes al experimento 4. Las condiciones de forzamiento son: fondo real, forzamiento por marea, bocas de Chacahua y Pastoría abiertas, esfuerzo de viento en la superficie libre y descargas de agua dulce por los ríos Chacalapa y San Francisco.

y que la duración del reflujos es dos horas mayor que la de flujo, esto indica una asimetría en los flujos de entrada y salida, lo cual puede ocasionar un transporte neto de material en suspensión y/o carga de fondo.

Las series de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto muestran un comportamiento similar en las tres profundidades de muestreo, lo que indica que la columna de agua se encontraba completamente mezclada en la región próxima a la boca. Este resultado apoya la decisión de aplicar un modelo barotrópico bidimensional, verticalmente integrado. Sin embargo, los gradientes horizontales de densidad no son considerados, lo cual representa una importante limitante a los resultados numéricos aquí registrados. Estos gradientes baroclínicos pueden originarse por la entrada de agua de diferente densidad proveniente de los ríos, del mar, por calentamiento o por evaporación en el interior de la laguna y contribuir a modificar el patrón de circulación.

Comparando la velocidad a media agua con cada uno de los parámetros medidos a la misma profundidad, se observa que la salinidad y el oxígeno disuelto se encuentran en fase con la velocidad, mientras que la temperatura tiene un desfase de 180° . Durante el flujo el agua es más salada, más fría y con mayor contenido de oxígeno disuelto que durante el reflujos, lo que sugiere la existencia de un aporte de agua dulce próximo a la boca

de Pastoría. Este flujo de agua dulce tendría una gran cantidad de detritus y material en suspensión, que al oxidarse disminuye la cantidad de oxígeno disuelto. Sin embargo, este aporte de agua dulce no fue identificado durante el estudio.

Los resultados del experimento numérico considerando la boca de Chacahua cerrada muestran que la circulación en la laguna de Chacahua fue prácticamente nula. Este caso representa la situación del sistema lagunar durante todo el tiempo en que estuvo cerrada la boca de Chacahua y que dio resultado a una fuerte eutroficación.

Cuando la boca de Chacahua está abierta y no hay descarga de agua dulce, los resultados muestran, para el principio del ciclo de marea, un flujo de entrada por las dos bocas, con corrientes más intensas por la boca de Pastoría que por la boca de Chacahua. Esto último puede deberse a la orientación de los canales de entrada. En la boca de Chacahua, el canal de entrada es casi paralelo al frente de onda de marea (Anónimo 1993); por lo que, gran parte de la energía de la onda de marea puede ser reflejada en las proximidades de la boca de Chacahua. El canal de la boca de Pastoría es perpendicular a la línea de costa lo que permite un paso fácil de la onda de marea.

En los experimentos donde se consideró la boca de Chacahua abierta, los patrones de corrientes muestran que el canal de conexión es un punto de interacción de la onda de marea

que entra por las bocas de las lagunas, formándose una zona en la cual la velocidad de la corriente es aproximadamente cero, de no movimiento, cuya posición oscila en función del ciclo de marea.

La existencia de un transporte neto debido a las corrientes residuales en sistemas lagunares con dos bocas ha sido ampliamente investigado (Ridderinkhof 1989, Van de Kreek & Dean 1975, Ridderinkhof & Zimmerman 1990). Este efecto es asociado a asimetrías en los mecanismos de forzamiento del sistema. Ridderinkhof & Zimmerman (1990) establecen que una asimetría en los flujos de marea puede ocasionar forzamientos de material en suspensión hacia adentro (forzamiento interno), o hacia fuera (forzamiento externo) de las lagunas. El forzamiento externo está asociado a una diferencia en las amplitudes o fases y a descargas de agua dulce, mientras que el forzamiento interno (geometría del sistema, fricción con el fondo) son las diferentes respuestas de las cuencas a un mismo forzamiento. En el caso de la laguna de Pastoría, cuando se efectuaron las mediciones de corrientes, el sistema lagunar tenía solo una boca abierta. En este caso, las asimetrías en el flujo pueden deberse a la descarga de los ríos o a la presencia de componentes de marea de alta frecuencia, como la cuatrídurna (M_4).

El paso del huracán Paulina en la zona de estudio, aportó grandes cantidades de agua dulce por lluvia directa y a través de los drenes y canales, que ya estaban rehabilitados para esa época. Esto generó una presión hidráulica por un desnivel de más de 4 m con respecto al mar que, junto con un oleaje extraordinario de más de 6 m de altura sobre la playa (comunicación personal con los pobladores), frente al punto donde históricamente se encontraba la boca de Chacahua, rompieron la barra de arena y abrieron la boca de la laguna. En 1999 el canal fue dragado y se construyeron obras de protección en la boca. La distribución de la corriente residual debida a la rectificaron de la marea, descarga de los ríos y el efecto del viento, muestran un flujo neto de la laguna de Chacahua hacia la laguna de Pastoría, lo cual

debe tenerse en consideración ya que este efecto puede ser la causa por la cual la boca de Chacahua se cerró.

Conclusiones

De los resultados analizados se concluye que existe asimetría en los flujos de entrada y salida en la boca de la laguna de Pastoría, lo que hace que esa parte del sistema lagunar sea inestable.

En el canal que conecta las dos lagunas se presenta un punto de interacción de la onda de marea que genera una zona de poco movimiento y que haya una corriente neta de la laguna de Chacahua hacia la laguna de Pastoría.

La asimetría de la circulación en la boca de Pastoría y probablemente en la boca de Chacahua, es un problema que queda abierto para su estudio y que puede ser la clave para la estabilización de las bocas.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con apoyo del Fondo Pesquero de la Delegación Estatal del Instituto Nacional Indigenista en Oaxaca. Los autores agradecen al Biol. David Ortega y a los pobladores de Pastoría y Chacahua el apoyo recibido durante el proyecto. Asimismo, se agradece a dos árbitros anónimos sus comentarios para mejorar el presente trabajo. Se agradece a Aitor Aizpuru por la traducción al francés del resumen.

Referencias

- Anónimo. 1989. Datos básicos de geografía de México. Secretaría de Programación y Presupuesto de México, Instituto Nacional de estadística, Geografía e Informática, México. 356 pp.
- Anónimo. 1990. Bases para el ordenamiento costero-pesquero de Oaxaca y Chiapas (aspectos generales). Instituto Nacional de la Pesca, Dirección General de Acuicultura, México, D.F., 145 pp.

- Anónimo. 1993. Tablas de predicción de mareas, 1993. Instituto de Geofísica de la UNAM, México, 399 pp.
- Cruz-Lazo, J. & J.L. Gómez-Márquez. 1985. Estudio del aspecto trófico de cuatro especies ícticas en la Laguna de Chacahua, Oax. México. Memorias del Octavo Congreso Nacional de Zoología, Saltillo, Coahuila, México, agosto 26-30 (1985): 68-88.
- Day, J.W. Jr., D. Pont, P.F. Hensel & C. Ibanez. 1995. Impacts of sea-level rise on deltas in the Gulf of Mexico and the Mediterranean: The importance of pulsing events to sustainability. *Estuaries* 18: 636-647.
- Kjerfve, B. & C. Madeiros. 1989. Current Vanes for measuring tidal currents in estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 28: 87-93.
- Ledesma-Vázquez, J., V.R. Castro-Valdés, G. Torres-Moye & D. Ortega del Valle. 1992. Diagnóstico del transporte sedimentario para tres lagunas costeras en el estado de Oaxaca. Memorias del IX Congreso Nacional de Oceanografía, Veracruz, 246 pp.
- Madrigal, U.D. 1986. Hábitat y uso del suelo como indicadores de la problemática del Parque Nacional Lagunas de Chacahua, Oaxaca. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México, D.F., 172 pp.
- Martínez, P.J.A. 1980. Complemento de la ictiofauna de la Laguna de Chacahua, Oax. Tesis profesional, ENEP-Iztacala, México, D.F., 43 pp.
- Monreal-Gómez, M.A. & D.A. Salas de León. 1985. Barotropic and baroclinic modes in the Gulf of Mexico. Pp: 81-91 *In* Van Kriek, E. & R. Wollast (eds.), *Progress in Belgian Oceanographic Research*, The University of Antwerpen Press, Bélgica.
- Monreal-Gómez, M.A. & D.A. Salas de León. 1990. Simulación de la circulación en la bahía de Campeche. *Geofísica Internacional* 29(2): 101-111.
- Ramón-Díaz, M.A. 1995. Alternativas de apertura en la boca de la laguna de Chacahua, Oaxaca, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 106 p.
- Ridderinkhof, H. 1989. Tidal and residual flows in the western Dutch Wadden Sea, II: an analytical model to study the constant flow between connected basins. *Neth. J. Sea Res.* 22: 185-198.
- Ridderinkhof, H. & J.T.T. Zimmerman. 1990. Residual currents in the Western Dutch Wadden Sea. Pp: 93-104, *In* Cheng, R.T. (ed), *Residual currents and long-term transport*, Coastal and Estuarine Studies, Springer-Verlag, Nueva York, Vol. 38.
- Sanay-González, R. 1997. Simulación de la circulación en el sistema lagunar Chacahua-Pastoría, Oax. Tesis de maestría en Ciencias del Mar, Oceanografía Física, CCH-UACPyPUNAM, 107 pp.
- Teodoro, S.M.E. & J. Ortíz. 1990. Algunos aspectos ecológicos del zooplankton en las lagunas de Chacahua y Pastoría, Oaxaca. Memorias del VIII Congreso Nacional de Oceanografía, Mazatlán, 146 pp.
- Torres-Moye, G., J. Ledesma-Vázquez, R. Castro-Valdes & D. Ortega-del-Valle. 1993. Tidal inlet closure effects on tree coastal lagoons. *In* Ferman-Almada, J.L., L.G.M. Fuentes & D.W. Fisher Eds. *Coastal Management in Mexico: The Baja California Experience*. American Society of Civil Engineers, Nueva York, 156-164.
- Van de Kreek, J. & R.G. Dean. 1975. Tide-induced mass transport in lagoons. *J. Waterw. Harb. Coast. Eng. Div. ASCE*, Nueva York, 101, WW4: 393-404.

Recibido: 27 de marzo de 2006.

Aceptado: 4 de agosto de 2006.