



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México



03096

Balance Físico-Químico de la laguna Lagartero, Oaxaca e Influencia del Bombeo de Agua de Mar por Energía del Oleaje

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

Maestro en Ciencias (Química Acuática)

Presenta:

QUÍM. IVÁN PENIÉ RODRÍGUEZ

Directores de Tesis: **Dr. Steven P. R. Czitrom Baus**
Dra. Guadalupe de la Lanza Espino

Comité Tutorial: **Dr. Federico Páez Osuna**
Dra. Ana C. Ruiz Fernández
Dr. Victor F. Camacho Ibar

México, D. F., 2005

m346260



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

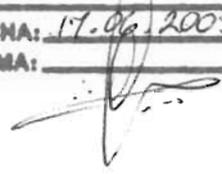
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: JUAN PENE RODRÍGUEZ

FECHA: 17.06.2005

FIRMA: _____



*“El pesimista se queja del viento,
el optimista espera que cambie,
el realista ajusta las velas”*

William Arthur Ward

DEDICATORIA

***A MI QUERIDA HIJA CLAUDIA IRIS,
SIEMPRE MUY CERCA DE MI CORAZÓN***

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló con el financiamiento de la DGEP, UNAM, así como con el apoyo personal de mis directores de tesis, Dr. Steven Czitrom y la Dra. Guadalupe de la Lanza, quienes con su experiencia y útiles enseñanzas me han mostrado en todo momento el camino a seguir.

Agradezco a los doctores Carolina Ruiz, Federico Páez y Victor Camacho, integrantes del jurado de tesis, por la revisión y sus aceptados señalamientos al manuscrito.

Quiero agradecerle especialmente a mis padres, Dinorita y Pancho, así como a mis hermanos Mana y Panchi, por darme la vida, junto con las armas y herramientas para sobrellevarla.

A la MCIPD María A. Ozuna por su apoyo total e incondicional durante los buenos y malos tiempos en este país.

A mi hermano mexicano, el Ing. Erik Márquez y su familia, mi familia, por la amistad sincera, el afecto y colaboración en todo momento.

A Lissette Govantes, mi sostén principal desde Cuba; ya que gracias a sus rezos, apoyo y cariño, he podido sobrellevar un poco mejor la separación forzosa con los míos. Sin su comprensión hubiera sido imposible.

Al Técnico Académico Salvador “Chava” Hernández, por compartir conmigo su vasta experiencia, las largas horas de carretera, el trabajo de campo y de laboratorio.

A José Galán y El “Mundo”, pescadores de Cacalotepec, Oaxaca, quienes sin su ayuda hubiera sido imposible realizar los muestreos con seguridad y eficiencia.

A Inés, Peter Reye y todo el personal del Hotel Inés por toda su colaboración durante el trabajo de campo.

A la “Ozuniza” en pleno por el apapacho constante, desde cualquier rincón del mundo por donde se ha diseminado el “clan” familiar.

A los integrantes del Laboratorio de Oceanografía Física del ICMYL de la UNAM, por el espacio, las posibilidades técnicas y sobre todo por el buen café.

A mi comadre Gabby y su familia, mi otra familia, por el apoyo, fundamentalmente en las fechas más duras de mi estancia acá.

A mis ex-compañeros del Instituto de Oceanología, cuna de mi formación, en especial del Laboratorio de Química, Oceanografía Física, la Biblioteca,

Ecología, Colecciones y “los Pececitos”, pues de todos conservo aun un bonito recuerdo y se que de una forma u otra también contribuyeron con su granito de arena.

A mi padrino “Manín” y a la Sra. Emma por esa “protección mágica” y mantenerme siempre muy cerca de mi “folclor”.

A mis hermanos masones MM: Jorge Pedroso, MM: Lázaro Tabranes y CM: Ángel Govantes, a todos los HH: de la Muy Respetable Logia “Mártires de la Libertad” y “Presidente Luis Companys No. 271”, por su aliento constante, ejemplo y apoyo moral.

A mis amigos Maru, Margarita, Ángeles, Baby, Alma, Alejandra, Claudia, Lucía, Edith, Yamy, Lizzye, Laly, Chucho, Gil, Nelson, Heriberto, Alejandro, Axa, Armando, los “Robe’s”, Jorge Luis, Mayito, EL Migue, Hermes, Jorgito, Maxi, El Tocayo, Carlitos, Paquitín, Mujica, Richard, Roldys, Manolo, Raúl, Luisín, Viñals, Eliécer y Juan-K, así como a la banda colombiana de siempre del “Gato Macho” y a todo el Barrio Atarés, por esos agradables momentos.

A la Coordinación del Postgrado en Ciencias del Mar de la UNAM por el apoyo en las gestiones de salida de Cuba, por permitirme ser su egresado y sobre todo a México, que pese a lo que pese, me ha adoptado muy bien como mi segunda patria.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | I |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. HIPÓTESIS..... | 4 |
| III. OBJETIVOS..... | 4 |
| IV. ANTECEDENTES..... | 5 |
| 4.1 EL SIBEO..... | 5 |
| 4.2 Zona de Estudio..... | 6 |
| V. METODOLOGÍAS..... | 12 |
| 5.1 Estrategia de Muestreos..... | 12 |
| 5.2 Cálculo de Volumen de la Laguna..... | 12 |
| 5.3 Modelo de Volumen y Salinidad | 16 |
| 5.4 Métodos Analíticos..... | 17 |
| 5.5 Tratamiento estadístico de los datos..... | 18 |
| 5.6 Aplicación del modelo de LOICZ..... | 18 |
| 5.6.1 Balance de agua..... | 19 |
| 5.6.2 Balance de sales..... | 20 |
| 5.6.3 Balance de nutrientes..... | 21 |
| 5.6.4 Cálculos Estequiométricos..... | 23 |
| 5.7 Estimación del flujo de agua del río Cacalotepec..... | 24 |
| 5.8 Evaluación del efecto del SIBEO..... | 25 |
| VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 27 |
| 6.1 Volumen..... | 27 |
| 6.2 Salinidad..... | 30 |
| 6.3 Modelo de Volumen y Salinidad..... | 32 |
| 6.4 Nitrógeno y Fósforo Totales en Agua..... | 35 |
| 6.5 Aportes de nitrógeno y fósforo del río Cacalotepec..... | 41 |
| 6.6 Balances de nitrógeno y fósforo en la laguna Lagartero..... | 42 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.6.1 | Balances de agua y sales..... | 42 |
| 6.6.2 | Balance de nutrientes..... | 43 |
| 6.6.3 | Cálculos Estequiométricos..... | 47 |
| 6.7 | Efecto del SIBEO en los Balances de Volumen y Salinidad..... | 48 |
| 6.7.1 | Escenario I. Bombeo discontinuo, cierre de la boca-barra en flujo de marea..... | 49 |
| 6.7.2 | Escenario II. Bombeo continuo, cierre de la boca-barra en flujo de marea..... | 50 |
| 6.7.3 | Escenario III. Bombeo discontinuo, cierre de la boca-barra en reflujo de marea..... | 51 |
| 6.7.4 | Escenario IV. Bombeo continuo, cierre de la boca-barra en reflujo de marea..... | 52 |
| 6.8 | Efecto del SIBEO en el Balance de Nitrógeno y Fósforo..... | 53 |
| VII. | CONCLUSIONES..... | 57 |
| VIII. | LITERATURA CITADA..... | 59 |
| IX. | ANEXOS..... | 66 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Temperatura y salinidad de la laguna Lagartero..... | 8 |
| Tabla 2. Programa de muestreos..... | 12 |
| Tabla 3. Proporciones <i>DIP</i> /Pt y <i>DIN</i> /Nt en cuerpos de agua costeros del Pacífico mexicano..... | 23 |
| Tabla 4. Escenarios de posible manejo de la laguna Lagartero a través del SIBEO..... | 25 |
| Tabla 5. Volumen de la laguna (m ³) calculado por diferentes métodos..... | 30 |
| Tabla 6. Salinidad vs. altura de la columna de agua en la laguna..... | 31 |
| Tabla 7. Salinidad en la laguna Lagartero..... | 32 |
| Tabla 8. Volumen estacional de la laguna Lagartero, calculado por el modelo y por el ‘método de los conos’..... | 35 |
| Tabla 9. Nitrógeno total en lagunas costeras del Pacífico mexicano..... | 36 |
| Tabla 10. Estado trófico de las aguas costeras según su contenido de nitrógeno y fósforo (Smith <i>et al.</i> , 1999)..... | 38 |
| Tabla 11. Cuadro comparativo de la concentración de nitrógeno total en algunos ríos..... | 39 |
| Tabla 12. Fósforo total en lagunas costeras del Pacífico mexicano..... | 40 |
| Tabla 13. Cuadro comparativo de la concentración de fósforo en algunos ríos..... | 40 |
| Tabla 14. Flujo de agua del río Cacalotepec hacia la laguna Lagartero..... | 41 |
| Tabla 15. Aportes de nitrógeno y fósforo por el río Cacalotepec..... | 41 |
| Tabla 16. Balance de agua y tiempo de residencia hidráulico en la laguna Lagartero..... | 42 |
| Tabla 17. Balance de sales, tiempo de residencia por mareas y total en la laguna Lagartero..... | 42 |
| Tabla 18. Balance de nitrógeno y fósforo en la laguna Lagartero..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Tabla 19. Cuadro comparativo del balance de N y P en lagunas del Pacífico mexicano..... | 46 |
| Tabla 20. Balance de agua (F^s_r) y tiempo de residencia hidráulico (τ^s_{AD}) en la laguna Lagartero con el empleo del SIBEO..... | 53 |
| Tabla 21. Balance de sales (F^s_x), tiempo de residencia por mareas (τ^s_{Mar}) y total (τ^s_T) en la laguna Lagartero con el empleo del SIBEO..... | 54 |
| Tabla 22. Balance de nitrógeno y fósforo en la laguna Lagartero con el empleo del SIBEO..... | 54 |
| Tabla 23. Dilución conservativa de las concentraciones de nitrógeno y fósforo por el bombeo de agua de mar..... | 55 |
| Tabla 24. Concentración de OD en la laguna Lagartero y mar adyacente (% vs.)..... | 56 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Representación esquemática del SIBEO..... | 5 |
| Figura 2. Laguna Lagartero, Oaxaca, México..... | 6 |
| Figura 3. Boca-barra de arena de la laguna Lagartero, (A) abierta, (B) cerrada..... | 7 |
| Figura 4. Topografía de la zona de estudio. La línea roja delimita el área de inundación lagunar..... | 9 |
| Figura 5. Punto ‘1’ de la figura 4: lugar por donde se suele abrir artificialmente la barra de arena..... | 10 |
| Figura 6. Punto ‘2’ de la figura 4: puente de acceso a la zona de la playa, por donde ingresa el agua del río a la laguna..... | 10 |
| Figura 7. Representación esquemática del volumen de la laguna..... | 13 |
| Figura 8. Representación ‘analítica’ del volumen de la laguna como un cono..... | 14 |
| Figura 9. Parámetros de la interpolación del volumen con la barra abierta.... | 15 |
| Figura 10. Balance de agua y sales en la laguna Lagartero..... | 21 |
| Figura 11. Balance de nitrógeno y fósforo en la laguna Lagartero..... | 22 |
| Figura 12. Zona de las esclusas que comunican el río Cacalotepec con la laguna (A) septiembre de 2002; (B) septiembre de 2003..... | 24 |
| Figura 13. Representación esquemática de los diferentes volúmenes de agua de la laguna Lagartero..... | 28 |
| Figura 14. Batimetría de la laguna Lagartero..... | 28 |
| Figura 15. Área de inundación de la laguna Lagartero, A) después de cerrarse la barra; B) antes de abrirse la barra..... | 29 |
| Figura 16. Flujo de agua dulce durante el ciclo anual. Los números negativos indican salidas netas de la laguna..... | 33 |
| Figura 17. Procesos involucrados en la variación del contenido de sales en la laguna Lagartero..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 18. Calibración del modelo de volumen (m^3) y salinidad..... | 34 |
| Figura 19. Concentración de nitrógeno total en la laguna Lagartero y mar adyacente. Los rótulos corresponden al resultado de la prueba SNK..... | 37 |
| Figura 20. Concentración de fósforo total en la laguna Lagartero y mar adyacente. Los rótulos corresponden al resultado de la prueba SNK..... | 39 |
| Figura 21. Balance de agua y sales en la laguna Lagartero. El volumen de la laguna está en $10^6 m^3$; los flujos de agua en $m^3/día$ y los flujos de sales en $10^3/día$ | 43 |
| Figura 22. Balance de nitrógeno (A) y fósforo (B) en la laguna Lagartero. Las concentraciones están en $mmol/m^3$ y los balances en $10^3 mol/día$ | 44 |
| Figura 23. Variación del volumen (A) y salinidad (B) de la laguna Lagartero en el escenario I (cierre de la boca-barra durante el flujo de marea). Los segmentos gruesos indican los períodos de bombeo..... | 49 |
| Figura 24. Variación del volumen (A) y salinidad (B) de la laguna Lagartero en el escenario II (cierre de la boca-barra durante el flujo de marea y bombeo continuo)..... | 50 |
| Figura 25. Variación del volumen (A) y salinidad (B) de la laguna Lagartero en el escenario III (cierre de la boca-barra durante el reflujo de marea). Las líneas rojas indican los períodos de bombeo..... | 51 |
| Figura 26. Variación del volumen (A) y salinidad (B) de la laguna Lagartero en el escenario IV (cierre de la boca-barra durante el reflujo de marea y bombeo continuo)..... | 52 |

RESUMEN

La laguna Lagartero ha experimentado cambios relacionados con alteraciones del régimen hidrológico y el asolvamiento de su boca-barra de arena, que la ha aislado del mar adyacente por períodos cada vez más prolongados. Una posible solución a estos problemas consiste en bombear agua de mar hacia el interior de la laguna por medio de un Sistema de Bombeo por Energía del Oleaje. El objetivo del presente trabajo es evaluar el balance físico-químico y la influencia del SIBEO en el manejo costero. Se determinó la variación estacional de volumen y salinidad y se modeló un ciclo anual de ambas variables. De igual forma se describió la variación temporal de la concentración de nitrógeno y fósforo, y se estimaron los balances de ambos nutrientes empleando el modelo de cajas implementado por LOICZ. Con ambos modelos se determinó de forma teórica la influencia del SIBEO en los respectivos balances de volumen, salinidad, nitrógeno y fósforo. A partir de los resultados del modelo de volumen y salinidad se concluyó que la fase de marea en que se cierra la boca-barra, definió en buena medida el ciclo anual de salinidad, debido a que en cada fase de flujo se introduce por la boca aproximadamente la tercera parte del volumen total de la laguna. El nitrógeno ($79 \pm 52 \mu\text{M}$) y fósforo totales ($19 \pm 13 \mu\text{M}$), se determinaron en niveles elevados, predominando condiciones hipertróficas durante la mayor parte del año. Dichos niveles fueron similares a los de lagunas de México impactadas antrópicamente. No obstante, los aportes de aguas subterráneas, así como de la población asentada en sus inmediaciones poseen relativamente poca importancia, por lo que las elevadas concentraciones de los nutrientes observadas posiblemente provinieron de los sedimentos y la vegetación circundante. Por medio del modelo de balance de nutrientes se determinó que el tiempo de residencia total del agua fue de 2.4 días, con mayor intercambio por mareas cuando la boca-barra se encontró abierta. Durante estos períodos la laguna Lagartero exportó nitrógeno y fósforo de forma neta, con balances promedios de $\Delta DIN = +53 \times 10^3 \text{ mol/día}$ y $\Delta DIP = +6.7 \times 10^3 \text{ mol/día}$. Potencialmente predominaron la desnitrificación y características heterotróficas en el período de estudio. Los aportes de nitrógeno y fósforo a través del SIBEO fueron reducidos (8.5 molNt/día y 1.3 molPt/día), si se comparan con los ingresos de ambos nutrientes por el río Cacalotepec (50.2 y $19.2 \times 10^3 \text{ mol/día}$ de nitrógeno y fósforo totales respectivamente). No obstante, se demostró la conveniencia de emplear el SIBEO como herramienta de manejo costero en la laguna Lagartero, ya que condicionaría un mayor número de aperturas de la boca-barra de comunicación marina; permitiría un mayor recambio del agua de la laguna; estabilizaría la salinidad a niveles adecuados incluso para el cultivo de especies; promovería la oxigenación de las aguas, así como la dilución de las elevadas concentraciones de nitrógeno y fósforo.

I. INTRODUCCIÓN

México posee una plataforma continental de 500,000 km², con una superficie de lagunas costeras de 12,500 km² y superficie estuarina de 16,000 km². Aun cuando en años recientes se ha progresado en la protección y conservación de este importante recurso nacional, la seguridad, salud y las condiciones ambientales, en algunos cuerpos de agua costeros continúan deteriorándose (CNA-CONACYT, 2004).

Actualmente, la mayoría de estos cuerpos de agua a nivel mundial están amenazados debido al creciente impacto antropogénico, tanto de forma directa, como en la cuenca que las rodea. Asimismo, las variaciones globales y locales del clima incrementan el proceso de azolve y en consecuencia promueven cambios e impactos de índole geomorfológico en los ecosistemas costeros (Sudermann y Radach, 1997).

En la vertiente del Pacífico mexicano un considerable número de lagunas costeras se encuentra aislado del mar por barras de arena, formadas por la acumulación de sedimentos provenientes del transporte litoral. Las barras se abren ocasionalmente durante la época de lluvias cuando la descarga de agua dulce supera la tendencia de la acumulación de sedimentos en las bocas (Contreras, 1991, Latournerie *et al.*, 1995).

Mientras las barras se mantienen abiertas, la productividad de las lagunas se incrementa sustancialmente por el ingreso de larvas de diversos organismos que abastecen sus pesquerías; sin embargo, dichos períodos son de naturaleza eventual lo que dificulta la planeación de actividades pesqueras (Páez-Osuna, 2001).

El restablecimiento de las lagunas costeras como áreas de crianza de especies mediante el dragado de canales de comunicación marina es una práctica común en México. Esta técnica en ocasiones ha tenido buenos resultados, incrementándose la productividad pesquera (Gámez y de la Lanza, 1992). En otros casos, sin embargo, el dragado de canales, que tiene un costo elevado (API, 2000), ha traído impactos ambientales negativos como la destrucción de los productivos ecosistemas de manglar (FAO-SEMARNAP, 1995).

Buscando una solución al aislamiento de las lagunas costeras, en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se han desarrollado Sistemas de Bombeo por Energía de Oleaje (Merino y Ruíz, 1987; Czitrom *et al.*, 1993). Por medio de estos sistemas, se persigue mantener el intercambio de agua entre los cuerpos de agua costeros y el mar adyacente, permitiendo así una mejor ventilación de las aguas interiores, así como estimular su productividad pesquera (Czitrom, 2000).

El empleo del SIBEO para el manejo costero no tiene antecedentes, por lo que previo a su utilización se necesita evaluar los posibles efectos abióticos y bióticos sobre la zona costera susceptible de ser manejada. Dentro de las características abióticas más importantes de las

lagunas costeras se encuentran los flujos de nutrientes (Li, 1997; Páez-Osuna, 2001), cuya alteración pudiera ser una manifestación primaria de las consecuencias del empleo del SIBEO.

En la zona costera los aportes continentales de nitrógeno y fósforo a menudo son abundantes, por lo que en general carece de sentido determinar la “limitación de un nutriente”, sino el “desequilibrio entre entradas y salidas”, ya que alguno de ellos puede ser introducido más con respecto al otro (de la Lanza, 1991a; Nowicki *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2002). Esto ocurre sobre todo en estuarios y lagunas costeras alteradas por actividades humanas, llegando a provocar efectos nocivos tanto en los cuerpos de agua costeros como en el mar adyacente (Justic' *et al.*, 1995; San Diego-McGlone *et al.*, 2000; Yamamuro, 2000; Alonso-Rodríguez y Páez-Osuna, 2003).

En los sistemas acuáticos someros, con una elevada relación superficie-volumen, los sedimentos igualmente juegan un papel substancial en el flujo de nutrientes (Nixon *et al.*, 1976), constituyendo un reservorio al poseer abundante materia orgánica en diferentes grados de descomposición, que con el tiempo puede redistribuir nitrógeno y fósforo a la columna de agua (de la Lanza, 1991b; Accornero *et al.*, 2003; Denis y Grenz, 2003).

La dinámica de especies químicas en ambientes costeros aun no está del todo comprendida por la comunidad internacional. Ello se debe, por una parte, a la complejidad misma de los ciclos biogeoquímicos y por otra parte, a la dificultad material de las observaciones espacio-temporales. Es por ello que frecuentemente se recurre a modelos matemáticos que simulen aproximadamente las variaciones de nutrientes, a partir de las cuales se pronostican las tendencias posibles de un determinado ecosistema (Gordon *et al.*, 1996; Páez-Osuna *et al.*, 1997; Poumian-Tapia *et al.*, 1997; Camacho-Ibar *et al.*, 1999; Reckhow y Chapra, 1999 y Schlezinger, 2002).

Los primeros modelos matemáticos de balances biogeoquímicos en zona costera surgieron para cuantificar la respuesta de este tipo de ecosistemas a los aportes antropogénicos (Pritchard, 1969; Elliott, 1976). También han sido aplicados en estudios sobre productividad biológica (Prego, 1992; Ríos, 1992). La principal característica que tienen en común los modelos publicados hasta la actualidad, consiste en considerar los diferentes aportes terrestres como trazadores, obteniéndose los flujos residuales deseados resolviendo las ecuaciones de conservación de la masa, con lo cual se requieren muestreos puntuales. Se dividen los cuerpos de agua en cajas, en las cuales el balance de salinidad se mantiene a través de una combinación de procesos de advección y mezcla espacial (Rosón, 1992).

Las estimaciones realizadas a partir de estos modelos son de carácter potencial y deben ser interpretadas con precaución. El éxito de las mismas radica en considerar y determinar adecuadamente los flujos de nutrientes con mayor importancia en el ecosistema en

cuestión, dada la imposibilidad práctica de modelar la totalidad de los factores incidentes en el medio natural (Murray y Parslow, 1999; Reckhow y Chapra, 1999; Webster *et al.*, 2000).

Una tendencia importante en la modelación de cajas del presupuesto y dinámica biogeoquímica de nitrógeno y fósforo, reúne los trabajos que desprecian la variación de la concentración de un parámetro no-conservativo (Y) en una escala de tiempo determinada, por lo que consideran el estado estacionario ($dY/dt = 0$), evaluando las entradas y salidas más importantes del parámetro. De esta forma, se calcula el flujo biogeoquímico (ΔY) de manera algebraica, que constituye la base de la metodología LOICZ, para el cálculo de los presupuestos de nitrógeno y fósforo (Gordon *et al.*, 1996).

$$\Delta Y = \sum FY_{salidas} - \sum FY_{entradas} \quad (1)$$

En México se han investigado 24 cuerpos de agua costeros por medio de esta metodología, obteniéndose resultados diversos (LOICZ-IGBP, 2004). En todos ellos, la comunicación con el mar adyacente es permanente o semi-permanente, por bocas que se mantienen la mayor parte del año abiertas. La laguna Lagartero, Oaxaca, debido a su aislamiento prolongado del mar adyacente es diferente al resto de las zonas estudiadas en México, ya que mientras los balances de agua y salinidad se pueden calcular para todo el año, el balance de nutrientes es solo objetivo determinarlo en los períodos en que se encuentre la boca-barra abierta. En dichos períodos las variaciones de volumen, salinidad y nutrientes son considerables, por lo que no se debe aplicar el estado estacionario.

Por otra parte, la laguna Lagartero es somera y relativamente pequeña, por lo que se puede considerar completamente mezclada la mayor parte del año, que es una de las condiciones de partida más importantes en el modelo de LOICZ (Gordon *et al.*, 1996).

El interés del presente trabajo consiste en evaluar las características físico-químicas de la laguna Lagartero, Oaxaca; modelar su dinámica y a continuación estimar teóricamente las implicaciones del empleo del SIBEO en el manejo de la laguna.

II. HIPÓTESIS

El bombeo de agua a través del SIBEO modificará la dinámica natural de volumen, salinidad, nitrógeno y fósforo en la laguna Lagartero, lo cual es posible predecir si se conocen sus respectivos balances en el ambiente lagunar.

III. OBJETIVOS

Objetivo General: Evaluar el balance físico-químico y la influencia del SIBEO en el manejo de la laguna Lagartero.

Objetivos específicos

- Determinar durante un año la variación estacional de volumen y salinidad en la laguna Lagartero.
- Modelar el ciclo anual de volumen y salinidad en la laguna Lagartero.
- Determinar durante un año la variación temporal de nitrógeno y fósforo totales en la laguna Lagartero.
- Modelar los balances de nitrógeno y fósforo de la laguna Lagartero.
- Estimar la influencia del SIBEO en el balance de volumen, salinidad, nitrógeno y fósforo de la laguna Lagartero.

IV. ANTECEDENTES

4.1 EL SIBEO

Uno de los sistemas de bombeo desarrollados en la UNAM, el SIBEO por sus siglas (Czitrom *et al.*, 1996, 2000), consiste de un tubo de succión o resonante y uno de desagüe conectados mediante un elemento de bombeo (Figura 1).

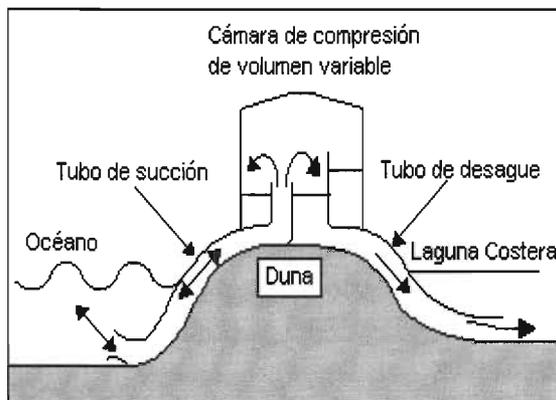


Figura. 1 Representación esquemática del SIBEO

Un vacío parcial mantiene el agua de ambos lados de la barra de arena a nivel de la cámara de compresión en el elemento de bombeo. En operación, la señal de presión oscilatoria del oleaje impulsa un movimiento de vaivén en el tubo de succión que derrama agua de mar en el interior de la bomba con el paso de cada ola. El líquido derramado desciende por gravedad al cuerpo de agua receptor con lo que se constituye el bombeo.

El sistema se mantiene en operación óptima por medio de un sistema de sintonización que induce la resonancia con el oleaje incidente a diversas frecuencias (Czitrom, 2002). Al no tener partes móviles, las larvas de especies marinas son transportadas sin deterioro a través del SIBEO, por lo que este sistema se puede usar tanto para el manejo biológico de ecosistemas costeros, como para su depuración de contaminantes.

El costo del SIBEO es bajo, comprende solo una fracción del dragado de canales y el importe de operación se reduce al mantenimiento, ya que utiliza el oleaje, una fuente inagotable de energía limpia (API, 2000; Czitrom, 2000).

Los estudios acerca de su funcionamiento se encuentran avanzados (Godoy, 1999), sin embargo, como herramienta de manejo costero, debe mejorarse el entendimiento de los impactos ambientales que pudiese provocar. Para ello hay que estudiar los cambios abióticos y bióticos que se inducirían en los cuerpos de agua bajo el efecto del bombeo, fundamentalmente en el balance de volumen, salinidad y nutrientes, por una parte, así como en la flora y fauna locales por otro.

Entre 1995-2000, en la laguna Lagartero y la comunidad de Cacalotepec, Oaxaca, se llevó a cabo un proyecto multidisciplinario de desarrollo tecnológico y social, con base en el sistema SIBEO, para el manejo comunitario sustentable de este ecosistema lagunar costero. Dicho programa, entre otros objetivos, se focalizó en elevar la productividad de la laguna y mitigar los efectos del azolvamiento en la barra, a partir del bombeo de agua de mar y de especies comerciales en su estadio larval.

Mediante pruebas de campo con un prototipo a escala 1:4 y la aplicación de modelos numéricos, Czitrom *et al.* (1996) corroboraron la capacidad del SIBEO para bombear hasta $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$; con el oleaje incidente frente a la laguna Lagartero y el correspondiente escalado 1:1 de la bomba.

4.2 Zona de estudio

La laguna Lagartero, se encuentra en la provincia geológica de la Sierra Madre del Sur y a la sub-provincia Costas del Sur (Álvarez y Gaitán, 1994), con coordenadas centrales $15^{\circ}56'50''\text{N}$ y $97^{\circ}22'30''\text{W}$, aledaña al poblado de Cacalotepec, municipio de Jamiltepec, en el Estado de Oaxaca (Figura 2). En dicho poblado habitan alrededor de 650 personas (Reid *et al.*, 1999) y según Rodríguez y Ziga (1999), la actividad turística en la laguna y sus inmediaciones es reducida.

En la unidad costera número VIII a la que pertenece, la plataforma continental y planicie costera se caracterizan por el predominio de las rocas metamórficas, ígneas intrusivas y materiales sedimentarios no consolidados, resultantes del continente y la abrasión marina, que en su conjunto favorecen la formación de dunas (Álvarez y Gaitán, 1994).



Figura 2. Laguna Lagartero, Oaxaca, México.

La laguna Lagartero ocupa un área permanentemente inundada de 2.4 km^2 , posee una profundidad promedio de 90 cm y está rodeada por un frondoso manglar, no impactado

antrópicamente, cuyos árboles a menudo sobrepasan los siete metros de altura. En su gran mayoría el mangle está constituido por *Rhizophora mangle* (mangle rojo) y en menor escala por *Avicenia germinans* (mangle negro), ubicado en la periferia del bosque. Sobre esta misma zona, en los períodos de sequía, crece la vegetación halófila como *Sauceda*, *Cressa* y *Salicornia*, en aproximadamente el 10% del área que ocupa todo el manglar.

La laguna se comunica con el océano Pacífico a través de un meándrico canal de un kilómetro de longitud, con una profundidad de 2.5 m. Dicho canal se encuentra la mayor parte del año cerrado por una barra de arena, producto del azolvamiento. Los períodos de aislamiento de la laguna se han hecho más largos con los años, posiblemente debido a la merma de precipitación pluvial, como consecuencia del proceso de deforestación acelerado en la sierra circundante (Czitrom, 2000).

Cuando la boca-barra de arena se abre, se produce un desagüe que dura entre varias horas y días (Comunidad de Pescadores de Cacalotepec, Comunicación Personal). En ese período la sección transversal de la boca-barra presenta alrededor de cinco metros de ancho como promedio y dos metros de profundidad aproximadamente (Figura 3). Terminado el desagüe, mientras la barra permanece abierta, se produce un intercambio de agua con el mar forzado por las mareas. Con la disminución paulatina de la descarga de agua dulce que mantiene la barra abierta, se van re-depositando sedimentos en la boca-barra hasta que ésta se cierra nuevamente, como fue observado por Staines y Rodríguez (2000) en otro ambiente similar.



Figura 3. Boca-barra de arena de la laguna Lagartero, (A) abierta, (B) cerrada.

El clima de la región es cálido sub-húmedo, por lo que el aporte de aguas continentales es reducido durante la mayor parte del año. La entrada de agua dulce fundamental proviene del río Cacalotepec que desemboca en el canal durante la época de lluvias de julio a septiembre (Ecoplaneación Consultores, 1998).

El régimen de salinidad va desde oligohalino hasta condiciones polihalinas, según la temporada climática (6-38). La temperatura muestra características típicas de los sistemas lagunares costeros poco profundos; esto es, mínima variación en los meses de sequías y una ligera estratificación horizontal al principio de las lluvias. Cabe destacar que la variabilidad espacial de ambos indicadores hidrológicos en la laguna es menos importante que los cambios observados de una temporada climática a otra (Tabla 1). En los informes existentes de diversos proyectos, se destacó un patrón de distribución horizontal prácticamente homogéneo, lo cual señala el carácter mezclado de sus aguas (Ecoplaneación Consultores, 1998; de la Lanza y Hernández, 1999; Penié *et al.*, 2004).

Tabla 1. Temperatura y salinidad de la laguna Lagartero (Tomado de de la Lanza y Hernández, 1999).

| PARÁMETRO | May-1995 | | Dic-1997 | | Feb-1998 | | Abr-1998 | | Sep-1998 | | Dic-1998 | |
|------------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|-----|----------|-----|
| | MÍN | MÁX | MÍN | MÁX | MÍN | MÁX | MÍN | MÁX | MÍN | MÁX | MÍN | MÁX |
| Temp. (°C) | 28 | 33 | ---- | ---- | 25 | 28 | 28 | 30 | 30 | 33 | 28 | 31 |
| Salinidad | 21.0 | 25.0 | 14.0 | 23.0 | 18.0 | 22.0 | 30.0 | 32.0 | 4.0 | 7.0 | 5.0 | 8.0 |

Desde el punto de vista hidroquímico la laguna Lagartero ha sido poco estudiada. De la Lanza y Hernández (1999) encontraron elevados contenidos de oxígeno, que sobrepasan 80 % de saturación y concentraciones de nutrientes nitrogenados típicos en esta vertiente del litoral mexicano (0-0.7 NO₂ µM, 0-12 NH₄ µM y 0-15.5 NO₃ µM). Los mismos autores reportaron elevadas concentraciones de ortofosfatos (7.5 µM) y de clorofila *a* (hasta 248 mg/m³), identificando áreas, sobre todo en el canal, como moderadamente eutrofizadas. No obstante, durante el estudio mencionado predominó la homogeneidad del agua en la laguna, lo cual es típico de cuerpos de agua someros y relativamente pequeños, con elevada relación superficie-volumen (Nixon *et al.*, 1976; Contreras *et al.*, 1996)

En la laguna Lagartero se practicaban pesquerías del camarón blanco, por medio de técnicas artesanales. La limitación del acceso de las postlarvas a la laguna ha resultado en una disminución de la producción camarónica, anteriormente calculada en una tonelada anual. Sólo la ocurrencia de huracanes o ciclones ha permitido la apertura natural de la barra de arena en los últimos cinco años y, seguido a estos cortos períodos de tres semanas como máximo, se ha observado un incremento en la población de camarones (Comunidad de Pescadores de Cacalotepec, Comunicación Personal).

En el cuerpo lagunar también se encontraron concentraciones relativamente altas de especies depredadoras del camarón como el pato buzo y la jaiba; peces como la lisa, sábalo y el pargo. Un futuro plan de manejo acuícola debe incluir la pesca organizada de estas especies para potenciar las pesquerías del crustáceo (Osuna *et al.*, 1999).

Las características topográficas de las inmediaciones de la laguna, tienen una trascendental influencia en las variaciones en el volumen de la laguna, así como los flujos de agua involucrados, debido a las características de la zona de inundación de la laguna (Figura 4).

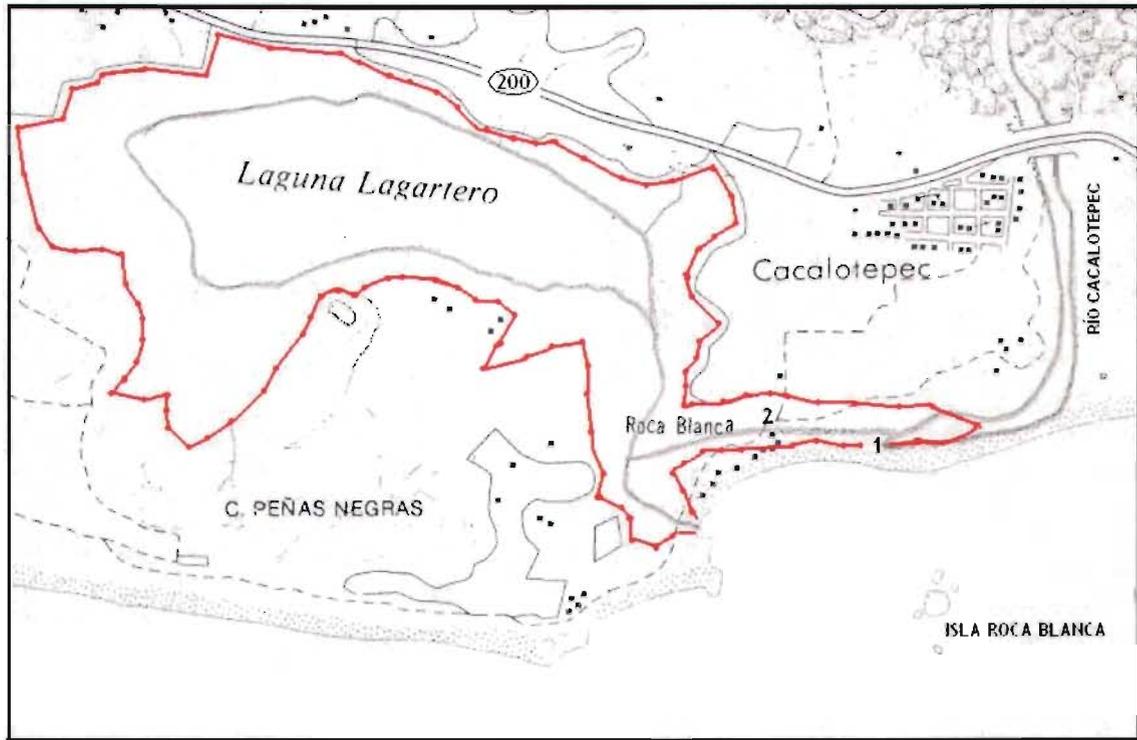


Figura 4. Topografía de la zona de estudio. La línea roja delimita el área de inundación lagunar

Según testimonio de pescadores de la Comunidad de Cacalotepec, en el período de lluvias, el agua puede alcanzar hasta las cercanías de la 'Carretera 200', ubicada al norte de la laguna, inundando el bosque de manglar y la vegetación halófila. Este es un aspecto a tomar en consideración, dado que las crecidas de la laguna, no solo involucran cambios en las estimaciones del volumen a partir del modelo, sino en las aperturas naturales de la barra y en el aporte de nitrógeno y fósforo hacia la misma.

Es conocido que el aporte principal de agua dulce a la laguna proviene del río Cacalotepec que, debido al movimiento de arenas y sedimentos en la franja costera, no desemboca directamente al mar en la mayor parte del período lluvioso, presentando un brazo hacia el oeste al aproximarse a la duna. Desde el 'punto 1' (Figura 4), se extiende su cause hasta llegar al canal de comunicación marina de la laguna, pasando por las esclusas del camino que une a la Comunidad de Cacalotepec con la Playa Roca Blanca ('punto 2' en la figura 4).

Cuando el nivel de la laguna es máximo, en ocasiones los habitantes de las inmediaciones de la desembocadura del río Cacalotepec abren artificialmente la barra de arena por este lugar (Figura 5), evitando así que sus terrenos particulares se inunden. Ello también

provoca que no se abra la barra principal de la laguna, que es la que comunica el canal con el mar, ya que el cauce del río Cacalotepec se dirige directamente al mar por el 'punto 1', en vez de por las esclusas del puente (Figura 6, Comunidad de Pescadores de Cacalotepec, Comunicación Personal).



Figura 5. Punto '1' de la figura 4: lugar por donde se suele abrir artificialmente la barra de arena.



Figura 6. Punto '2' de la figura 4: puente de acceso a la zona de la playa, por donde ingresa el agua del río a la laguna.

El brazo del río Cacalotepec, comprendido entre los 'puntos 1 y 2', durante el estiaje no se seca ni se comunica con la laguna. El agua permanece estancada en una superficie de 500 m² aproximadamente, empobreciendo paulatinamente su calidad, alcanzando un color diferente al del cuerpo lagunar y olor a ácido sulfhídrico, hasta la llegada del período lluvioso, cuando el aumento del nivel de agua permite que fluya por las esclusas hasta el interior de la laguna o eventualmente al mar.

El brazo del río Cacalotepec, comprendido entre los ‘puntos 1 y 2’, durante el estiaje no se seca ni se comunica con la laguna. El agua permanece estancada en una superficie de 500 m² aproximadamente, empobreciendo paulatinamente su calidad, alcanzando un color diferente al del cuerpo lagunar y olor a ácido sulfhídrico, hasta la llegada del período lluvioso, cuando el aumento del nivel de agua permite que fluya por las esclusas hasta el interior de la laguna o eventualmente al mar.

V. METODOLOGÍA

5.1 Estrategia de muestreos

Se realizaron seis muestreos a lo largo de un año (periodicidad bimensual, Tabla 2). En cada muestreo se determinaron *in-situ* la temperatura, salinidad, profundidad y oxígeno disuelto (OD). En envases plásticos se recolectaron directamente muestras de agua que se trasladaron en hieleras hacia el Laboratorio de Hidrobiología, del Instituto de Biología, UNAM, para la determinación de nitrógeno y fósforo totales (Nt y Pt).

Tabla 2. Programa de muestreos.

| MUESTREO | FECHA |
|----------|---------------------------------------|
| I | 28-30 de septiembre, 2002* ‡ |
| II | 4-6 de diciembre, 2002‡ |
| III | 26-28 de febrero, 2003 |
| IV | 23-26 de abril, 2003 |
| V | 11-14 de junio, 2003 |
| VI | 20 de agosto-4 de septiembre, 2003* ‡ |

* Barra abierta

‡ Aporte del río Cacalotepec.

Tomando en consideración el carácter mezclado de las aguas de la laguna Lagartero, así como su relativa poca extensión y profundidad, se muestreó una sola estación para describir los cambios en las variables antes mencionadas, ubicada hacia el centro y sur de la laguna, para un mejor acceso y navegación. La profundidad de la laguna se infirió a partir de mediciones de la altura sobre el espejo de agua de una muesca que se grabó en un árbol de manglar. Para describir los flujos de N y P igualmente se consideraron dos estaciones más, en el mar exterior y en el afluente del río Cacalotepec, en la zona anterior a las esclusas que lo comunican con la laguna (Figura 6).

5.2 Cálculo de volumen de la laguna

Como se verá más adelante, el modelo diseñado en esta investigación calcula, a partir de datos iniciales de salinidad y volumen de la laguna, una secuencia de volúmenes y salinidades que se deben validar contra las mediciones efectuadas durante el programa de muestreo bimestral realizado a lo largo de un año. La salinidad es un parámetro que se mide fácilmente a partir de una muestra de agua. La medición del volumen, sin embargo, conlleva complicaciones importantes ya que implica la determinación de la topografía de la zona aledaña a la laguna que se inunda, además de la batimetría del espejo de agua que se encuentra permanentemente inundado.

En vista de las dificultades en medir el volumen en diferentes momentos, los valores arrojados por el modelo se compararon contra interpolaciones entre volúmenes de la laguna medidos en dos momentos críticos: en cuanto se cerró la barra en septiembre de 2002 y justo antes de abrirse en agosto de 2003 (volumen máximo), que son los puntos inicial y

final del modelo. Como se verá más adelante, el grado de cercanía entre los valores arrojados por el modelo y estas mediciones es una medida del éxito del modelo.

Para el cálculo del volumen se georreferenciaron las márgenes de la laguna y se midió la altura de la columna de agua (h), en el borde interior del manglar, en los dos momentos críticos mencionados. Los correspondientes volúmenes de inundación (V_I), se obtuvieron por medio del programa SURFER.

El volumen base (V_B) o zona permanentemente inundada, fue calculado a partir de la batimetría de la laguna Lagartero realizada en 1997 (Osuna *et al.*, 1999). El área ocupada por la isobata de 'cero metros' de la batimetría, multiplicada por ' h ', permitió calcular el volumen central de la laguna (V_C), en los períodos de estudio.

El volumen total fue la sumatoria de $V_I + V_B + V_C$, como se ejemplifica en la figura 7; que para los meses de septiembre de 2002 y agosto de 2003 constituyeron los puntos de inicio y final del modelo que calcula la variación del propio volumen y la salinidad de la laguna.

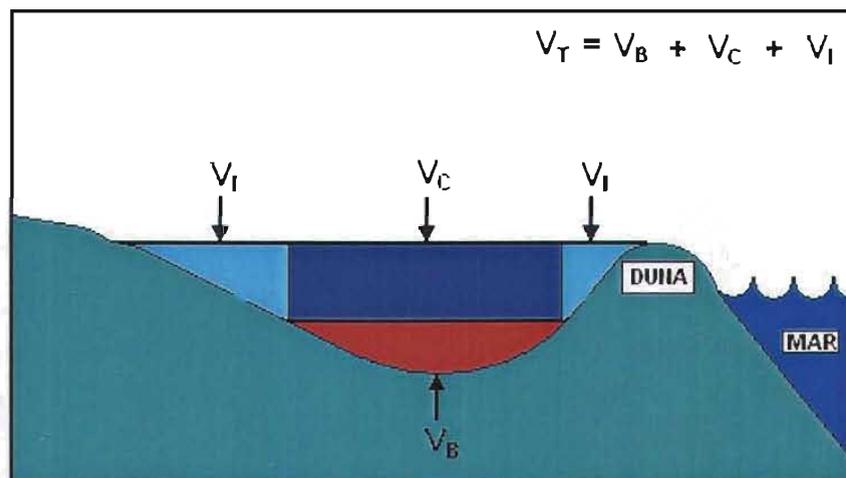


Figura 7. Representación esquemática del volumen de la laguna

Como solo se realizaron mediciones de ' V_I ' justo antes de abrir la barra e inmediatamente después que cerró, se aplicó un método geométrico para interpolar el volumen de la laguna en el resto de los períodos de interés, con el objetivo de compararlo con los valores obtenidos a través del modelo. Por este método, se considera que la variación del volumen ' V_I ' describe la forma geométrica de un cono, presente en las márgenes de varios cuerpos de agua costeros (Bird, 1976; Wei *et al.*, 2001).

El supuesto cono tiene como base el área georreferenciada después de cerrarse la boca-barra (A_{DC}), incluye también a la superficie descrita por la cota de cero metros de la batimetría (A_B); la altura de los correspondientes ‘conos intermedios’ (h) corresponde al nivel de agua de la laguna que fue determinado en cada muestreo (Figura 8).

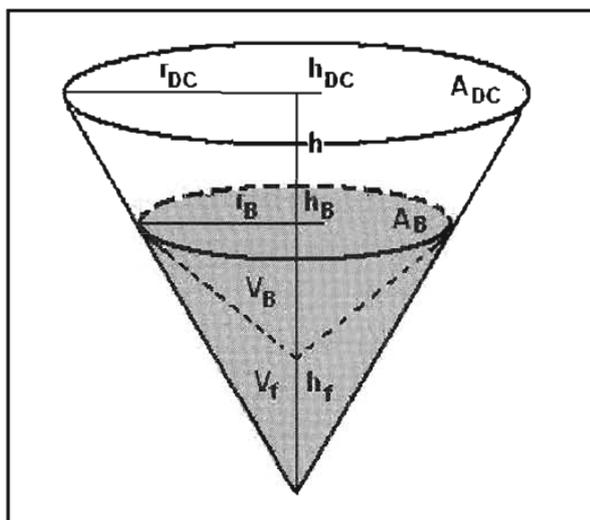


Figura 8. Representación ‘analítica’ del volumen de la laguna como un cono.

La zona en color gris representa un cono hipotético, de base (A_B) y radio promedio (r_B) que coinciden con los que presentaría la batimetría de la laguna, igualmente en la cota de cero metros. Una porción de dicho cono representaría el volumen ‘ V_B ’.

La zona en blanco representa lo que aumentaría el volumen estacional de la laguna dada su zona de inundación, por encima de ‘ V_B ’. El valor máximo de volumen de este cono es proporcional al volumen de la laguna al cerrarse la barra (V_{DC}), al que habría que sustraerle el volumen hipotético (V_f) y sumarle ‘ V_B ’ para obtener el volumen real de la laguna.

Como el volumen del cono es igual a $\pi hr^2/3$, cualquier valor entre el volumen más bajo (la batimetría) y el volumen después que se cierra la barra, se puede representar por medio de la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\pi(h + h_f)r^2}{3} - V_f + V_B \quad (2)$$

De la ecuación anterior, ‘ h ’ se midió en cada muestreo y ‘ V_B ’ se obtiene de la batimetría realizada por Osuna *et al.* (1999), como ya se señaló. Debido a que el radio y la altura de un cono conservan una relación lineal, a partir del esquema de la figura 8, se puede definir que:

$$\frac{r - r_B}{h} = \frac{r_{DC} - r_B}{h_{DC}} \quad (3)$$

De la ecuación 3 se puede despejar el radio promedio de la laguna (r) para la correspondiente 'h' estacional:

$$r = \left(\frac{r_{DC} - r_B}{h_{DC}} \right) h + r_B \quad (4)$$

Aquí $r_B = \sqrt{\frac{A_B}{\pi}}$ y $r_{DC} = \sqrt{\frac{A_{DC}}{\pi}}$, ya que las respectivas áreas fueron medidas por medio de la georreferenciación.

Pero en $r = 0$, $h = -h_f$, por tanto el valor de h_f puede ser determinado por:

$$h_f = r_B \left(-\frac{h_{DC}}{r_{DC} - r_B} \right) \quad (5)$$

De igual forma, el volumen del cono hipotético, ' V_f ', se puede obtener de la ecuación 6:

$$V_f = \frac{\pi h_f r_B^2}{3} \quad (6)$$

Siguiendo el mismo procedimiento, a partir de los datos del nivel del agua, el volumen de la laguna cuando la barra se encuentra abierta se puede calcular a través de una segunda interpolación, entre los volúmenes antes de abrirse la barra (cuya área también fue georreferenciada) y después de cerrarse (Figura 9).

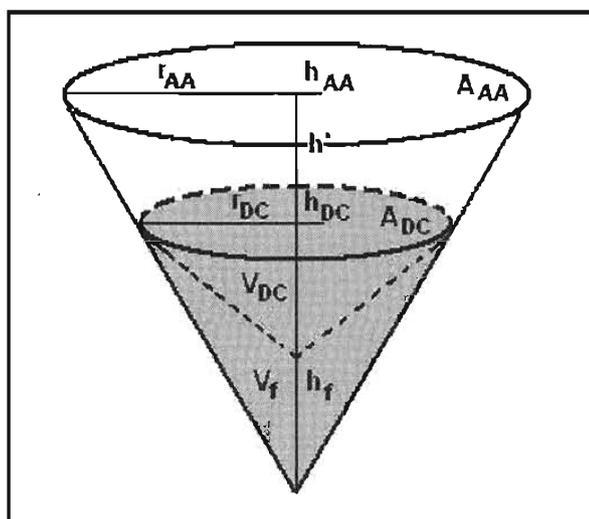


Figura 9. Parámetros de la interpolación del volumen con la barra abierta.

Se emplearon las ecuaciones dos a la seis para el cálculo de los diferentes parámetros, sustituyendo los puntos correspondientes; h' en este sistema es proporcional a $h - h_{DC}$.

5.3 Modelo de volumen y salinidad

Para simular la variación anual del volumen y la salinidad, se implementó un modelo de cajas similar al de Gordon *et al.* (1996), en el caso particular de que durante un ciclo anual no hay intercambio entre la laguna y el mar adyacente. Se consideró que el agua de la laguna estuvo totalmente mezclada y se emplearon las ecuaciones de conservación de masa en el tiempo:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = F_q + F_o + F_g + F_A + F_{Mar} + F_S \quad (7)$$

$$\frac{dSV}{dt} = S \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial S}{\partial t} = S_{Mar} F_S + (S_{Mar}, S_{Lag}) F_{Mar} \quad (8)$$

Donde F_q , F_o , F_g , F_A , F_S y F_{Mar} representan el flujo de agua de los escurrimientos superficiales, los aportes antropogénicos, el agua subterránea, el intercambio con la atmósfera, el empleo del SIBEO y intercambio con el océano adyacente respectivamente; S_{Mar} y S_{Lag} representan la salinidad del mar y la laguna respectivamente.

En la ecuación 7 F_A representa el valor neto del intercambio evaporación-precipitación; que en conjunto con los aportes de los escurrimientos terrígenos, superficiales y subterráneos y los aportes antropogénicos, pueden definirse convencionalmente en un término llamado 'balance de agua dulce' (AD en las ecuaciones 9 y 10). En los períodos en que no se abre la barra, tanto el volumen como la salinidad de la laguna estarán supeditados sólo a las variaciones de AD y ello se emplea en la calibración del modelo de volumen y salinidad como se explica más adelante.

Sustituyendo dV/dt en la ecuación 8 e integrando el resultado también en la ecuación 7, se obtienen las siguientes dos ecuaciones:

Para el volumen de la laguna:

$$V_f = V_i + [AD + F_{Mar} + F_S] \Delta t \quad (9)$$

Para la salinidad:

$$S_f = S_i e^{\left[(F_S + F_{Mar}) \left(\frac{S_{Mar}}{S_{Lag}} - 1 \right) + AD \right] \frac{\Delta t}{V_i}} \quad (10)$$

Para resolver estas ecuaciones es posible estimar el balance de agua dulce (AD), a partir de los valores de salinidad medidos en los muestreos, así como del cálculo de volumen de agua aproximado de la laguna. Utilizando los registros de salinidad, los correspondientes valores de AD entre muestreo y muestreo se despejan de la ecuación 10.

Durante los períodos en que se encuentra la boca-barra cerrada y no hay bombeo, los términos F_S y F_{Mar} se anulan. Por tanto, el segundo valor de salinidad (S_f) es reproducido a partir del primero (S_i), integrando de semana en semana¹. Este ajuste es una forma de estimar cual es el valor real del balance de agua dulce promedio entre medición y medición.

El punto de partida del modelo es el momento en que se cierra la boca-barra y el final poco antes de abrirse. El modelo se calibró reproduciendo exactamente los niveles de salinidad cuantificados y calculando la variación semanal del volumen, que en los valores extremos coincide razonablemente con los calculados por los otros métodos anteriormente mencionados.

5.4 Métodos analíticos

Tanto la temperatura como el oxígeno disuelto se evaluaron *in situ*, mientras que el resto de las muestras fueron preservadas en una hielera y trasladadas al Laboratorio de Hidrobiología, del Instituto de Biología, UNAM, para su posterior análisis.

Las mediciones de temperatura y OD se realizaron a través de un oxímetro Hanna, modelo HI 9142; la salinidad por medio de un refractómetro American Oceanics. El límite de detección para la determinación del OD fue de 0.2 mg/L. Para el cálculo del porcentaje de saturación de OD se empleó la ecuación de Weiss (UNESCO, 1973)

Todos los análisis químicos se ejecutaron por duplicado. Para las muestras de Nt y Pt en el agua, se tomaron 25 mL y se almacenaron a -4 °C. En el laboratorio se empleó la digestión Kjeldahl y se cuantificaron como amonio y fosfato respectivamente (de la Lanza, 1991b).

Para la determinación de amonio, la muestra digerida se trató con citrato alcalino, hipoclorito de sodio y fenol, para formar el complejo de azul de indofenol que se lee a 640 nm, con un límite de detección de 0.2 μ M y una precisión de 0.03 μ M para 50 muestras (Strickland y Parsons, 1972). El fosfato presente en la muestra, más el producido por la digestión, se hicieron reaccionar con el molibdato para formar un complejo de amonio

¹ Se extrapolan los resultados, considerando un paso de tiempo (Δt) de una semana, debido a que este es el tiempo mínimo en que se ha abierto la boca-barra, según se ha podido documentar (Comunidad de Pescadores de Cacalotepec, Comunicación Personal). Con ello, se calibra el modelo, para poder reproducir la variación anual del volumen y de la salinidad de la laguna.

molibdofosfato; por reducción controlada con ácido ascórbico se produce el azul de molibdeno, cuya cantidad es proporcional a la concentración de fosfato en la muestra. Las lecturas de absorbancia se realizaron a 882 nm, con un límite de detección de 0.03 μM y una precisión de 0.1 μM para 50 muestras (Strickland y Parsons, 1972).

5.5 Tratamiento estadístico de los datos

A los resultados de salinidad y altura de la columna de agua, cálculo de volumen por el modelo y el método de los conos, así como a la concentración de fósforo y nitrógeno total se le aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y se confeccionaron los correspondientes histogramas de frecuencia para cada variable (ver anexo 1). Como no presentaron una distribución normal, ni se pudieron normalizar mediante algoritmos de transformación ($\log x$, $\frac{1}{x}$ y \sqrt{x}), se aplicaron métodos no-paramétricos de análisis estadísticos (Spiegel, 1961).

Para verificar la variación temporal de Nt y Pt en los diferentes meses estudiados se realizó la prueba de Kruskal Walls. A continuación se definieron las diferencias por medio de la prueba Student Newman Keuls (SNK). Todas las pruebas estadísticas se realizaron con el programa STATISTIC- 6, con una probabilidad de $p = 0.05$.

5.6 Aplicación del modelo de LOICZ

Para evaluar el balance de N y P en la laguna Lagartero y posteriormente estimar el efecto del SIBEO sobre dichas variables, se aplicó el modelo de cajas "Balance de agua, sal, y de nutrientes relacionados estequiométricamente" (Gordon *et al.*, 1996). El modelo permite calcular balances de masas de variables específicas como volumen de agua, sedimentos, carbono, N y P entre otros, en un área geográfica y período de tiempo definidos (Camacho-Ibar, 2000).

El modelo se desarrolló en tres etapas: (I) balance de agua, (II) balance de sales y (III) balance de nutrientes, cuyas ecuaciones generales son las siguientes:

$$(I): \frac{dV_{Lag}}{dt} = -F_e + F_p + F_q + F_g + F_o + F_r \quad (11)$$

$$(II): \frac{dSV_{Lag}}{dt} = -F_e S_e + F_p S_p + F_q S_q + F_g S_g + F_o S_o + F_r S_r + F_x (S_{Mar} - S_{Lag}) \quad (12)$$

$$(III): \frac{dVY_{Lag}}{dt} = -F_e Y_e + F_p Y_p + F_q Y_q + F_g Y_g + F_o Y_o + F_r Y_r + F_x (Y_{Mar} - Y_{Lag}) + \Delta Y \quad (13)$$

Donde:

F_e , F_p , y F_r son los flujos de agua evaporada, precipitada, y el flujo residual respectivamente. F_q , F_g , F_o ya habían sido definidos en el apartado 5.3.

S_e , S_p , S_q , S_g , S_o y S_r son la salinidad del agua evaporada, precipitada, de los escurrimientos, subterránea, de los aportes antropogénicos y la salinidad residual (promedio de salinidad entre el mar y la laguna) respectivamente. F_x constituye el flujo de mezcla entre la laguna y el mar adyacente.

Y_e , Y_p , Y_q , Y_g , Y_r , Y_{Mar} y Y_{Lag} son la concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (*DIN*) o fósforo inorgánico disuelto (*DIP*) en el agua evaporada, precipitada, de los escurrimientos, subterránea, de los aportes antropogénicos, en el flujo residual, en el mar adyacente y en la laguna respectivamente. ΔY es el cambio no-conservativo de *DIN* o *DIP*, que es una medida de los flujos biogeoquímicos dentro del sistema (Gordon *et al.*, 1996).

5.6.1 Balance de agua

Dadas las características geomorfológicas y topográficas de la laguna Lagartero, se consideró aplicar el modelo en una sola caja, por lo que la ecuación 11 describe la ecuación de conservación del volumen de agua en la laguna.

Para las inmediaciones de la laguna Lagartero fue imposible contar con datos meteorológicos confiables, dada la remota ubicación de las estaciones meteorológicas del SMN (INEGI, 1996). Situación similar ocurrió con los datos de escurrimiento terrestre hacia la laguna. Por tal situación se hizo imposible evaluar directamente F_e , F_p y F_g .

Sin embargo, al permanecer la boca-barra de arena la mayor parte del año cerrada, es posible determinar $F_p + F_o + F_q + F_g - F_e$ por medio del balance de agua dulce (*AD*) como ya ha sido discutido en el apartado 5.3. Para calcular el balance de agua en los meses de septiembre de 2002 y 2003 se utilizó el *AD* entre junio y agosto, adicionándole el flujo de agua del río Cacalotepec, medido durante los muestreos, que se consideró igual a F_q , dadas las características de los aportes de agua dulce que recibe la laguna (Figura 10).

Debido a las fluctuaciones en el volumen y la salinidad de la laguna en los periodos en que se encuentra la boca-barra abierta, el carácter temporal del aporte de agua dulce y el efecto de las mareas, considerar el estado estacionario en el balance de agua introduciría un

elevado error (Smith y Hollibaugh, 1997). En función de lo anterior, el balance agua durante los períodos de apertura de la barra quedaría descrito por la ecuación 14:

$$\frac{dV_{Lag}}{dt} = F_q + AD + F_r \quad (14)$$

De donde se puede obtener F_r por:

$$F_r = \frac{dV_{Lag}}{dt} - F_q - AD = \frac{V_{DC} - V_{AA}}{\Delta t} - F_q - AD \quad (15)$$

El volumen de la laguna justo al abrirse la barra (V_{AA}) e inmediatamente después que cerró (V_{DC}) fueron medidos por georreferenciación y por el método de los conos como ha sido explicado anteriormente; Δt fue 10 y 21 días, en septiembre de 2002 y 2003 respectivamente. La determinación de F_q se detalla en el apartado 5.7.

5.6.2 Balance de sales

La ecuación 12 describe el balance general de sales (cambio del volumen por la salinidad en el tiempo). El proceso que afecta directamente el balance de sales en la laguna es el intercambio con el mar adyacente (lo cual ocurrió solo durante septiembre de 2002 y 2003 en el período de estudio), que está representado en la ecuación por un término advectivo ($F_r S_r$) y otro de mezcla ($F_x(S_{Mar} - S_{Lag})$). En consecuencia, considerando que igualmente la masa de sales varía en el tiempo (estado no-estacionario), la ecuación 12 se puede reordenar de la siguiente forma:

$$\frac{dSV_{Lag}}{dt} = F_r S_r + F_x (S_{Mar} - S_{Lag}) \quad (16)$$

Por tanto el flujo de mezcla de agua entre la laguna y el mar adyacente se calculó considerando el cambio en la masa de sales en los períodos de apertura de la barra, el flujo residual, así como la diferencia de salinidades entre la laguna y el mar.

$$F_x = \left(\frac{dSV_{Lag}}{dt} - F_r S_r \right) * \left(\frac{1}{S_{Mar} - S_{Lag}} \right) = \left(\frac{S_{DC} V_{DC} - S_{AA} V_{AA}}{\Delta t} - F_r S_r \right) * \left(\frac{1}{S_{Mar} - S_{Lag}} \right) \quad (17)$$

En la figura 10 se esquematiza el balance de agua y sales en la laguna Lagartero:

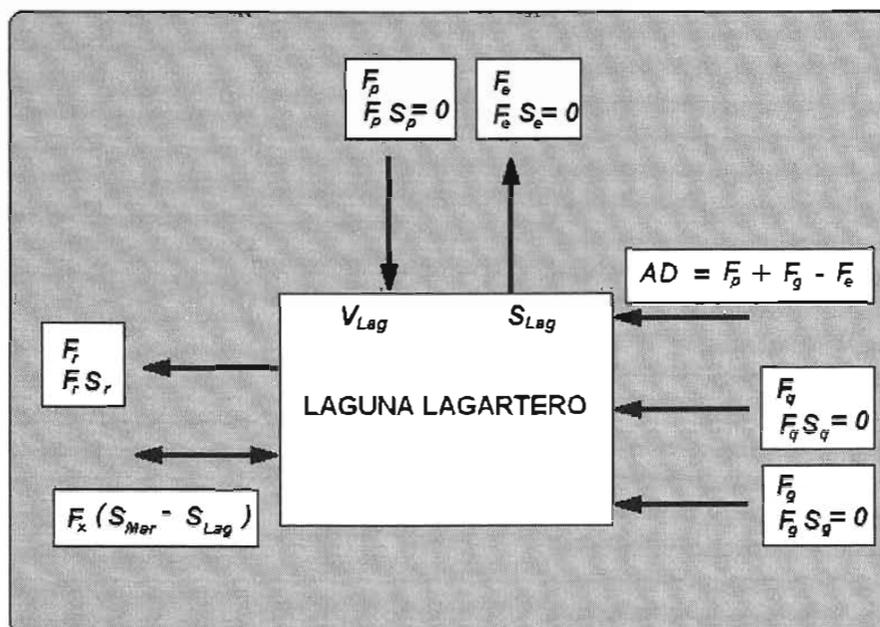


Figura 10. Balance de agua y sales en la laguna Lagartero

A partir de los valores del volumen total de la laguna (promedio del volumen durante las aperturas de la barra), F_r y F_x se estimaron los tiempos de residencia hidráulico, por mareas, así como el tiempo de residencia total en la laguna (Gordon *et al.*, 1996):

$$\text{Tiempo de residencia hidráulico: } \tau_{AD} = \frac{V_{Lag}}{F_r} \quad (18)$$

$$\text{Tiempo de residencia por mareas: } \tau_{AM} = \frac{V_{Lag}}{F_x} \quad (19)$$

$$\text{Tiempo de residencia total: } \tau_T = \frac{V_{Lag}}{|F_r| + F_x} \quad (20)$$

5.6.3 Balance de nutrientes

La ecuación 13 describe el balance de un nutriente 'Y'. Como en la laguna Lagartero tanto el aporte del río Cacalotepec como el intercambio con el mar se circunscribe a períodos cortos del año, la estimación del balance de nutrientes solo se determinó durante los meses de septiembre de 2002 y 2003. En el resto de los meses muestreados la barra se mantuvo

cerrada y el aporte del río Cacalotepec fue prácticamente nulo, por lo que carece de sentido evaluar el balance de nutrientes durante dichos períodos.

Se subestimó el intercambio de N y P con la atmósfera, puesto que en comparación con el resto de los intercambios, los términos $F_e Y_e$ y $F_p Y_p$ no fueron realmente significativos. Además, se sabe que las pérdidas de nitrógeno hacia la atmósfera serán debido a la volatilización del amonio (de la Lanza, 1994), pero se desconoce de algún mecanismo que describa un proceso semejante para el fósforo (Pérez-Osuna, 2001). Tanto la subestimación de este flujo, como el que ocurre a través de las aguas subterráneas y escurrimientos, pudieran constituir fuentes de error para el cálculo de los balances de nitrógeno y fósforo.

Dados los cambios en el volumen, la salinidad y la concentración de nutrientes durante las aperturas de la boca-barra, es probable que la masa de nutrientes también varíe en el tiempo. Por tanto, con la información disponible y considerando el estado no-estacionario, el balance de nutrientes quedaría determinado por la siguiente ecuación:

$$\Delta Y = \frac{dV Y_{Lag}}{dt} - F_q Y_q - F_r Y_r - F_x (Y_{Mar} - Y_{Lag}) = \frac{V_{DC} Y_{DC} - V_{AA} Y_{AA}}{\Delta t} - F_q Y_q - F_r Y_r - F_x (Y_{Mar} - Y_{Lag}) \quad (21)$$

Por analogía, Y_{DC} y Y_{AA} son las correspondientes concentraciones de N y P medidas al cerrarse y abrirse la barra respectivamente.

En la figura 11 se esquematiza el balance de nutrientes en la laguna Lagartero:

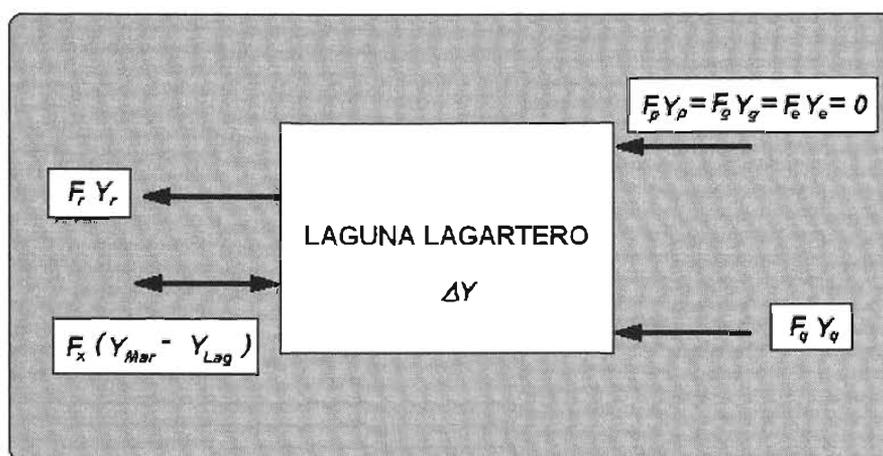


Figura 11. Balance de nitrógeno y fósforo en la laguna Lagartero

5.6.4 Cálculos Estequiométricos

Basado en la estequiometría simple, según la metodología LOICZ (Gordon *et al.*, 1996), la diferencia entre las entradas y salidas de nutrientes inorgánicos, relacionados adecuadamente al carbono orgánico representa el metabolismo neto de un ecosistema (*MNE*), que es la diferencia entre la producción primaria bruta y la respiración. Se realizaron estimaciones del *MNE* multiplicando la relación C:P esperada según Redfield, con signo negativo, por el flujo no-conservativo de fósforo inorgánico ($-106 \cdot \Delta DIP$).

De igual forma, se consideró que la desviación del flujo de nitrógeno inorgánico disuelto con base en lo “esperado”, según el flujo de fósforo inorgánico disuelto y la proporción Redfield ($\Delta DIN -16 \cdot \Delta DIP$) es proporcional a *fijación de nitrógeno – denitrificación* (Gordon *et al.*, 1996).

Como no se realizaron mediciones de nitrógeno y fósforo inorgánicos disueltos, para la aplicación del modelo de LOICZ, se estimaron sus contenidos a partir de los totales, considerando las proporciones presentes en cuerpos de agua costeros del Pacífico mexicano, donde los contenidos de amonio, nitratos y nitritos constituyen el 80% del Nt medido, así como la concentración de ortofosfatos es aproximadamente un 60% del Pt en estos cuerpos de agua (Tabla 3).

Tabla 3. Proporciones *DIP/Pt* y *DIN/Nt* en cuerpos de agua costeros del Pacífico mexicano.

| LAGUNA/BAHÍA | PO ₄ (μM) | Pt (μM) | DIP/Pt (%) | NH ₄ (μM) | NO ₃ +NO ₂ (μM) | Nt (μM) | DIN/Nt (%) |
|--|-------------------------|-----------------|---------------|-------------------------|--|-----------------|---------------|
| Topolobampo-Ohuira, Sin ⁽¹⁾ | 3.00 | 3.10 | 96.7 | 33.41* | ---- | 35.50 | 94.1 |
| Navachiste-San Ignacio, Sin ⁽¹⁾ | 2.02 | 2.09 | 96.7 | 33.48* | ---- | 35.50 | 94.3 |
| Santa María-La Reforma, Sin ⁽¹⁾ | 2.61 | 2.69 | 97.1 | 21.42* | ---- | 35.71 | 60.0 |
| Ceuta, Sin ⁽¹⁾ | 5.22 | 5.38 | 96.9 | 63.75* | ---- | 70.89 | 89.9 |
| Chautengo, Gro ⁽²⁾ | 1.17 | 1.98 | 58.9 | 8.88 | 0.60 | 10.18 | 93.1 |
| Mitla, Gro ⁽²⁾ | 1.00 | 1.84 | 54.7 | 4.79 | 0.62 | 5.95 | 90.9 |
| San Marcos, Gro ⁽²⁾ | 3.05 | 5.75 | 53.0 | 10.00 | 0.70 | 10.90 | 98.2 |
| Nuxco, Gro ⁽²⁾ | 0.95 | 2.00 | 47.5 | 2.58 | 0.26 | 3.30 | 86.1 |
| Chacagua, Oax ⁽³⁾ | 1.09 | 3.87 | 28.1 | 0.83 | 0.56 | 3.10 | 44.7 |
| Pastoría, Oax ⁽³⁾ | 0.79 | 1.47 | 53.6 | 1.19 | 0.20 | 2.00 | 69.5 |
| Manialtepec, Oax ⁽³⁾ | 0.83 | 1.33 | 62.6 | 1.18 | 0.32 | 3.87 | 38.7 |
| Superior e Inferior, Oax ⁽²⁾ | 2.50 | 6.80 | 36.8 | 4.26 | 1.85 | 6.69 | 91.3 |
| Mar Muerto, Oax ⁽²⁾ | 2.85 | 8.05 | 35.4 | 4.80 | 1.15 | 6.65 | 89.5 |
| La Joya-Buena Vista, Chis ⁽²⁾ | 4.29 | 10.78 | 39.8 | 7.00 | 1.50 | 9.15 | 92.9 |
| | | Promedio | 61.3 | | | Promedio | 80.9 |

⁽¹⁾ Garay-Morán, 2002

⁽²⁾ Contreras, 1991

⁽³⁾ Ecoplaneación Consultores, 1998

* Corresponde directamente a la concentración de DIN

En agua de ríos existen pocos estudios que hayan considerado las mediciones de N y P, tanto totales como inorgánicos disueltos. En el río Culiacán, Sinaloa, Guerrero-Galván (1997) encontró un porcentaje próximo al 90 %, tanto para DIP/Pt como para DIN/Nt . A partir de de la Lanza (2004), en el río Papagayo, Guerrero, se puede estimar que $DIP/Pt = 59.5\%$ y $DIN/Nt = 70.7\%$.

En el valor de ambas proporciones existe una estrecha dependencia con el contenido de materia orgánica presente en el agua de río. Según los mismos autores citados, en el río Papagayo se registró prácticamente el doble de materia orgánica que en el río Culiacán (60 y 32.7 mg/L respectivamente). No obstante encontrarse en la vertiente del Pacífico mexicano, ambos ríos pertenecen a cuencas hidrológicas diferentes, por lo que no es del todo confiable asignar un valor a la proporción entre los nutrientes totales y los inorgánicos disueltos. Sin embargo, debido a la acumulación de materia orgánica en la zona del brazo del río Cacalotepec durante el estiaje, es más probable que dicha proporción se asemeje a la encontrada en el río Papagayo, por lo que esta última se utilizó en el cálculo de DIN y DIP en el río Cacalotepec.

5.7 Estimación del flujo de agua del río Cacalotepec

Los flujos fueron determinados multiplicando la sección transversal de agua en la zona de esclusas que comunican al Río Cacalotepec con el cuerpo lagunar (Figura 12), por la velocidad del agua.



Figura 12. Zona de las esclusas que comunican el río Cacalotepec con la laguna (A) septiembre de 2002; (B) septiembre de 2003

La velocidad que prospectivamente se determinó cronometrando el desplazamiento de cuerpos a la deriva, fue medida con mayor precisión durante los dos últimos muestreos con el empleo de un correntómetro tipo molinete, modelo 'Price AA', previamente calibrado a los dos pasos o tiempos de medida (Quiñónez y Guzmán, 1986).

El diámetro de las esclusas del puente (Figura 12), se midió durante la época de sequía. En los meses en que se constató el aporte de agua dulce del río Cacalotepec por las esclusas (septiembre, diciembre y agosto), se determinó la fracción de las mismas por la cual circulaba el agua.

5.8 Evaluación del efecto del SIBEO

Los estudios acerca del funcionamiento del SIBEO se encuentran muy avanzados, como ya se ha mencionado. Sin embargo, su uso como herramienta de manejo costero es inédito y debe mejorarse el entendimiento de su mecanismo para evitar impactos ambientales negativos.

Para ello se evaluaron los cambios que se inducirían en el volumen de la laguna, así como en los balances de salinidad, nitrógeno y fósforo, con la adición de un flujo promedio del SIBEO de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Se consideró que dicho flujo presenta las características del agua de mar determinadas en la estación situada en el mar inmediato a la laguna.

A partir de los datos de la calibración del modelo de volumen y salinidad, se evaluaron cuatro escenarios diferentes (Tabla 4), donde se incluyeron dos frecuencias de bombeo con el SIBEO: a) continuo durante todo el año y b) el bombeo solo en los periodos de máxima concentración de postlarvas del camarón blanco en el océano adyacente (abril-mayo y diciembre, Osuna *et al.* (1999)), debido a que el manejo de las pesquerías de dicho crustáceo constituye la principal aplicación del SIBEO en la laguna Lagartero (Czitrom, 2000). Para ambas frecuencias de bombeo se discutieron dos posibilidades de cierre de la boca-barra de arena: durante el flujo o en reflujos de marea, para verificar su posible efecto sobre la dinámica físico-química de la laguna.

Tabla 4. Escenarios de posible manejo de la laguna Lagartero a través del SIBEO.

| ESCENARIO | DESCRIPCIÓN |
|-----------|---|
| I | Bombeo discontinuo; cierre de la boca-barra en el flujo de marea |
| II | Bombeo continuo; cierre de la boca-barra en el flujo de marea |
| III | Bombeo discontinuo; cierre de la boca-barra en el reflujos de marea |
| IV | Bombeo continuo; cierre de la boca-barra en el reflujos de marea |

Para evaluar los efectos del bombeo, a través de diferentes escenarios, se consideró que la barra se abre cuando la laguna rebasa el volumen máximo “real”, calculado por el método de las georreferenciaciones.

En ese momento en el modelo se introduce un corte artificial, estimando un flujo neto de FO hacia fuera de la laguna, cuyo valor se despeja de la ecuación 9, considerando que el volumen de la laguna cuando termine el desagüe (V_f), será igual al que se determinó por el método de los conos, en el correspondiente estado de la marea.

El efecto del SIBEO en los balances de nitrógeno y fósforo fue verificado introduciendo el flujo medio estimado para un SIBEO ($F_S = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ó $8640 \text{ m}^3/\text{día}$), en las ecuaciones del modelo LOICZ. Este flujo fue calculado por Czitrom *et al.* (1996), a partir del oleaje incidente en el mar adyacente a la laguna. Las ecuaciones 22, 23 y 24 permitieron analizar el efecto del SIBEO en los respectivos balances en la laguna, recalculándose el flujo residual (F_r^S), el flujo de mezcla (F_x^S) y el flujo no-conservativo de N y P (ΔY^S), bajo el efecto del bombeo de agua de mar:

$$F_r^S = \frac{V_{DC} - V_{AA}}{\Delta t} - F_q - AD - F_S \quad (22)$$

$$F_x^S = \left(\frac{S_{DC}^S V_{DC} - S_{AA}^S V_{AA}}{\Delta t} - F_r^S S_r^S - F_S S_{Mar} \right) * \left(\frac{1}{S_{Mar} - S_{Lag}^S} \right) \quad (23)$$

$$\Delta Y = \frac{V_{DC} Y_{DC} - V_{AA} Y_{AA}}{\Delta t} - F_q Y_q - F_r^S Y_r - F_S Y_{Mar} - F_x^S (Y_{Mar} - Y_{Lag}) \quad (24)$$

Como no se tienen datos de la concentración de N y P antes y después de abrirse la barra en otro mes diferente a septiembre, para verificar el efecto del bombeo sobre los correspondientes presupuestos, se supone que la variación de la masa de los nutrientes en la laguna es similar siempre que la boca-barra se abra en la misma temporada climática.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Volumen

La variación estacional del volumen en la mayoría de las lagunas costeras del Pacífico Mexicano responde estrechamente a la geomorfología y variaciones climáticas, en especial a los regímenes de precipitación, evaporación y escurrimientos en el área correspondiente a su cuenca (Contreras, 1991; de la Lanza, 1994). De ello también dependen las aperturas temporales de la barra de la laguna Lagartero, que sólo ocurrieron durante el estudio en pocas semanas dentro del período lluvioso.

Durante el mes de abril del 2003, se alcanzó el nivel mínimo del volumen de agua de la laguna así como el máximo de salinidad. En junio la altura de la columna de agua ya había aumentado tres centímetros. Según los pobladores de Cacalotepec, hasta mediados de junio aun no había comenzado a llover y el río Cacalotepec no abastecía superficialmente de agua a la laguna, por lo que ese ligero aumento del volumen debe ser atribuido a las aguas subterráneas, fundamentado por las características de permeabilidad tanto de la sierra circundante (poco permeable) como de la estrecha planicie costera (muy permeable, Ecoplaneación Consultores, 1998).

Con la llegada del período de lluvias, comienza a arribar a la laguna agua dulce por escurrimiento fundamentalmente, que va aumentando el nivel de la laguna e inundando las áreas bajas adyacentes. El avance de las lluvias incrementa el nivel de la laguna y su zona de inundación, hasta que la presión hidrostática en el interior vence al proceso de acumulación de arenas en la boca-barra que la comunica con el mar. En ese momento se produce la apertura y el agua de la laguna sale hacia el mar hasta igualar los niveles en ambos lados de la barra.

Transcurrido este período de descarga del agua hacia el mar, vuelve a disminuir el área de inundación de la laguna y las mareas promueven el intercambio de agua con el mar durante dos semanas, aproximadamente. Cuando el aporte de agua dulce disminuye, nuevamente predomina la acumulación de sedimentos en la boca-barra que se cierra, aislando a la laguna, que debido a la evaporación experimenta un continuo proceso de disminución de volumen y aumento de la salinidad hasta el siguiente período lluvioso.

La figura 13 constituye un esquema simplificado de las distintas épocas críticas de la laguna. La línea horizontal junto al 'punto 1', marca la altura y volumen máximo de la laguna, antes de abrirse la boca-barra sobre la duna de arena. Cuando se abre la barra, sale hacia el mar toda la franja en distintos verdes y el nivel de agua disminuye hasta el punto marcado con el 'número 2', cuando se iguala con el nivel del mar. Al disminuir el aporte de agua dulce, se cierra la barra nuevamente y el nivel decrece paulatinamente, hasta alcanzar su valor mínimo (indicado en la figura con el 'punto 3'), debido a una evaporación mayor que las entradas de agua dulce a la laguna. En este momento la laguna alberga solamente el volumen de agua representado en color café.

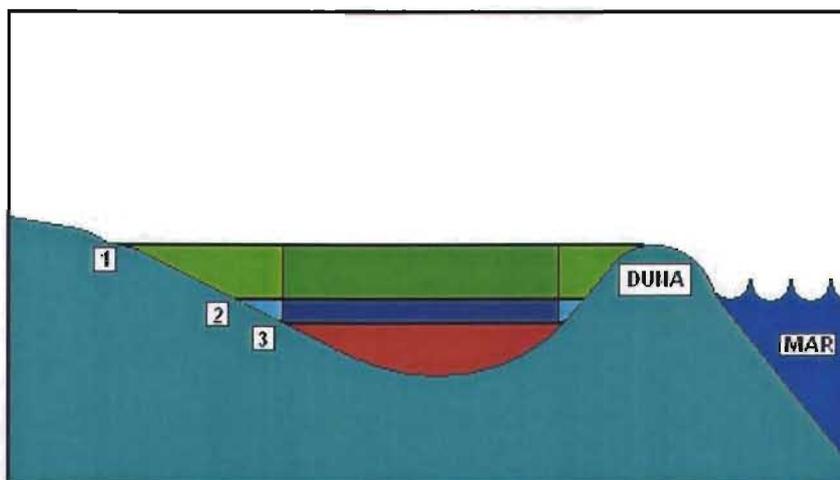


Figura 13. Representación esquemática de los diferentes volúmenes de agua de la laguna Lagartero.

En abril de 1997 se realizó una batimetría en la laguna cuando ésta se encontraba con el nivel más bajo, al final de la época de sequía (Figura 14). Utilizando los datos de la batimetría y la georeferenciación en el campo de los límites permanentemente inundados de la laguna (color café), se calculó el volumen mínimo (denominado 'volumen base', $V_B = 730,690 \text{ m}^3$).

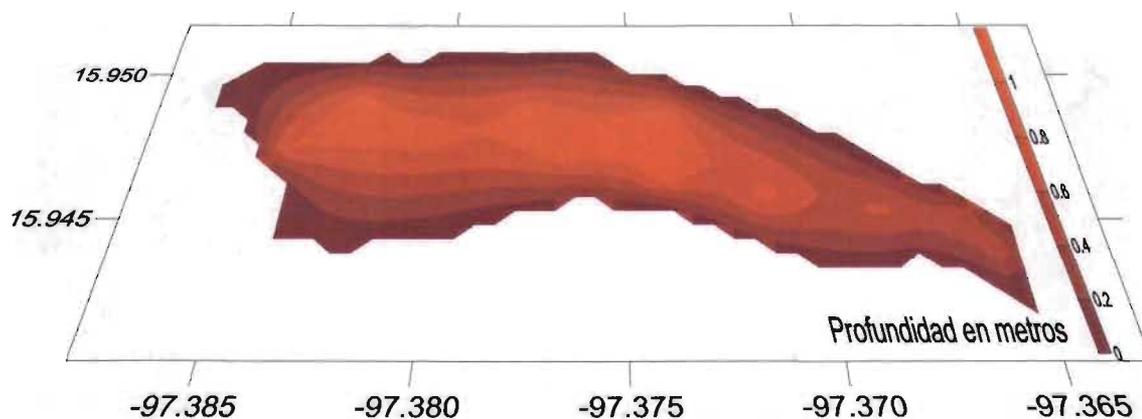


Figura 14. Batimetría de la laguna Lagartero (Elaborado a partir de Osuna *et al.*, 1999).

En la determinación del volumen a la altura de los puntos '1' y '2', se consideró la inundación progresiva de las zonas bajas adyacentes a la laguna (volumen de inundación, V_{I1} y V_{I2} respectivamente). Se georeferenciaron igualmente en el campo los correspondientes perímetros del margen de agua en ambos estadios de la laguna; se introdujeron al programa SURFER y se calculó el volumen de agua incluido en los colores azul o verde más claros en las figuras 13 y 15 ($V_{I2} = 533,904$ y $V_{I1} = 1,400,455 \text{ m}^3$, respectivamente).

El sistema SURFER emplea un método de interpolación geoestadístico que supone una pendiente regular, en este caso, de la zona de inundación (Isaaks y Srivastava, 1989). Ello constituiría una fuente de error en la estimación del volumen por este método, ya que a diferencia de la batimetría, en donde se georreferenciaron varias profundidades de la laguna, en el caso de las respectivas zonas de inundación, solo se determinaron las isobatas extremas.

Para calcular el volumen total, se adicionó lo que aumenta la 'porción central', o lo que se elevó el volumen de agua en la laguna en su zona inundada permanentemente (denominada 'volumen central', V_C , que en las figuras 15A y 15B se representa en colores verde o azul más intensos); los respectivos niveles se calcularon multiplicando el área estimada por la cota cero de la batimetría ($2,402,729 \text{ m}^2$), y la altura de la columna de agua registrada antes de abrirse y después de cerrarse la barra de arena ($V_{C1} = 2,715,083 \text{ m}^3$ y $V_{C2} = 1,641,392 \text{ m}^3$, respectivamente).

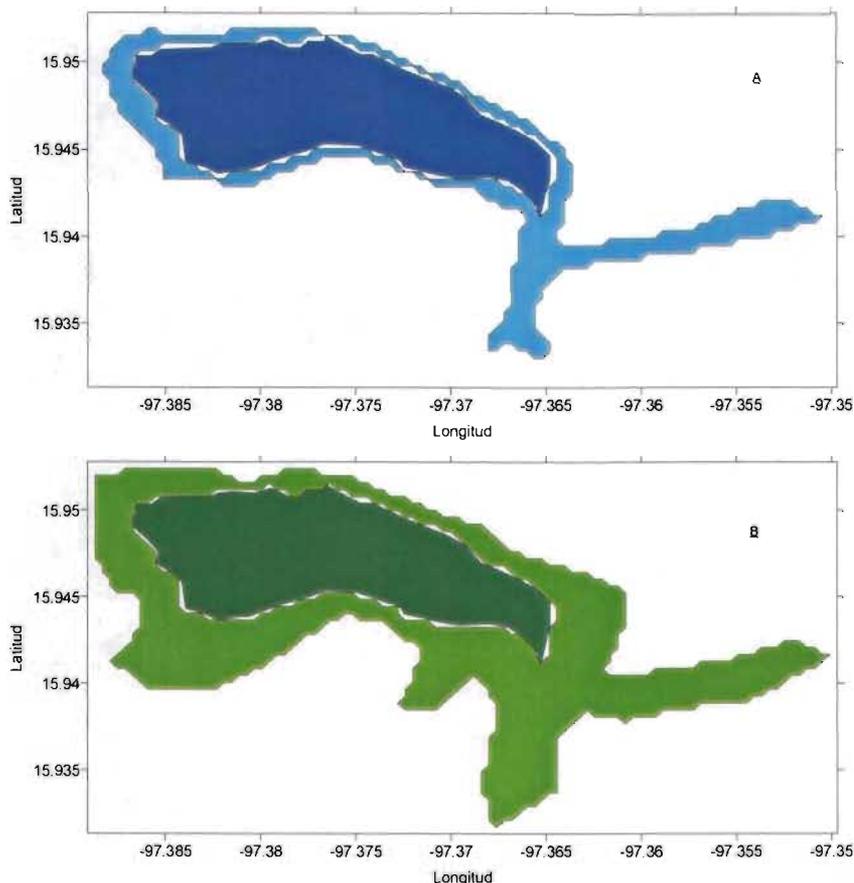


Figura 15. Área de inundación de la laguna Lagartero, A) después de cerrarse la barra; B) antes de abrirse la barra.

Según estas mediciones, el volumen total de la laguna cuando la barra se cerró fue de $2,905,986 \text{ m}^3$ y cuando estaba a punto de abrirse de $4,846,228 \text{ m}^3$.

Ambos volúmenes son el punto de inicio y final respectivamente, de la calibración del modelo que calcula la variación de volumen y salinidad en la laguna. No obstante, en los períodos en que no se contó con georreferenciaciones del perímetro de la laguna, fue prácticamente imposible tener una medida adecuada del volumen. Esto fue particularmente importante durante el tiempo en que se encuentra la barra abierta, debido a que el modelo elaborado no es válido durante dichos períodos.

Por ello se diseñó el ‘método de los conos’ para la estimación del incremento del volumen hacia sus márgenes en proporción al nivel del agua. Este procedimiento, no tiene antecedentes en la literatura, sin embargo, se obtienen resultados satisfactorios al compararlos con los otros métodos empleados en la estimación del volumen (Tabla 5).

A pesar de la gran aproximación que representa definir el volumen de la laguna Lagartero como el de un cono, los volúmenes calculados son precisos respecto a los estimados por georreferenciación ($r = 0.996$) y guardan igualmente un coeficiente de correlación lineal elevado respecto a los resultados del modelo, como se verá más adelante.

Tabla 5. Volumen de la laguna (m^3) calculado por diferentes métodos.

| MUESTREO | GEORREF. | CONOS |
|----------------|-----------|-----------|
| Septiembre-02 | 2,905,986 | 3,187,164 |
| Junio-03 | 730,690 | 730,690 |
| Agosto-03 | 4,846,228 | 4,809,313 |
| Septiembre-03* | ---- | 4,184,801 |
| Septiembre-03‡ | ---- | 3,463,307 |

*Barra abierta en flujo de marea

‡Barra abierta en reflujos de marea

El volumen de la laguna cuando la boca-barra se encuentra abierta solo fue posible determinarlo por este método. Dichos volúmenes se emplean como punto inicial en los escenarios de bombeo con el SIBEO que consideran que la boca-barra se cierra en el transcurso del flujo o reflujos de marea.

6.2 Salinidad

Al igual que el volumen, la variación estacional de la salinidad en los cuerpos de agua costeros a menudo es un reflejo de las condiciones climáticas y topográficas de su entorno (Guerrero-Galván, 1993; Valdés-Lozano, 1995). La información recabada durante un año de muestreo, al respecto de la salinidad y altura de la columna de agua de la laguna Lagartero, constituyó una evidencia de su comportamiento hidrológico (Tabla 6). La relación entre ambos parámetros, a través del coeficiente de correlación no-paramétrico por rangos de Spearman, produjo un coeficiente de correlación altamente significativo, por lo que los parámetros son inversamente proporcionales.

Tabla 6. Salinidad y altura de la columna de agua en la laguna ($r = -0.80$).

| MUESTREO | SALINIDAD | ALTURA (m) |
|----------------|-----------|------------|
| Septiembre-02 | 11 | 0.70 |
| Diciembre-02 | 15 | 0.62 |
| Febrero-03 | 23 | 0.26 |
| Abril-03 | 38 | 0.00 |
| Junio-03 | 35 | 0.03 |
| Agosto-03 | 8 | 1.13 |
| Septiembre-03* | 20 | 1.00 |
| Septiembre-03‡ | 6 | 0.80 |

*Barra abierta en flujo de marea

‡Barra abierta en reflujos de marea

En el año de registros la laguna Lagartero presentó condiciones polihalinas, similar a lo observado en años precedentes (de la Lanza y Hernández, 1999). La salinidad aumentó en la época de sequía hasta el mes de abril. La disminución entre abril y junio, acompañada de un aumento del nivel de agua y volumen de la laguna, sin haber comenzado las lluvias ni los escurrimientos superficiales, fue un indicio del aporte de agua por los escurrimientos subterráneos.

Lo anterior puede ser resultado de que la Sierra de Juárez que circunda la laguna hacia el norte, tiene bajos porcentajes de permeabilidad, conformada predominantemente por rocas gneis, con fracturamientos generalmente rellenos por depósitos arcillosos. La planicie costera, en cambio, presenta elevada permeabilidad, por su granulometría gruesa y bajos contenidos de partículas finas (Ecoplaneación Consultores, 1998).

A diferencia de años anteriores en que la boca-barra se abrió por menos tiempo, en el período de agosto-septiembre de 2003 se mantuvo abierta por 21 días aproximadamente, debido a la incidencia de la tormenta tropical 'Carlos' durante los meses previos, que aportó abundantes precipitaciones (SMN, 2004).

Cuando la barra se encuentra abierta pueden ocurrir cambios bruscos en la salinidad de la laguna, debido a dos razones principales: (i) la entrada de agua dulce es máxima, por lo que hacia el final del reflujos la salinidad pudiera descender por debajo de 6, que fue la observada durante el último muestreo; (ii) con el flujo, a la laguna ingresa agua de mar en una proporción cercana a la tercera parte del volumen total de la laguna, estimado a partir de la diferencia en las alturas del nivel de agua (30 cm, aproximadamente), por lo que al final de dicha fase de marea la salinidad igualmente puede elevarse por encima de 20.

En los muestreos realizados se registró una salinidad ligeramente superior a la encontrada en años anteriores en la laguna (Tabla 7). Dados los cambios interanuales y fluctuaciones

en los regímenes de lluvias, evaporación y escurrimientos, el patrón de variación de la salinidad pudiera también presentar variaciones interanualmente.

Tabla 7. Salinidad en la laguna Lagartero.

| | ENE | FEB | ABR | JUN | JUL | AGO | SEP | DIC |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---|
| Salinidad Reportada en otros estudios | 14 (2001) ⁽¹⁾ | 20 (1998) ⁽²⁾ | 31 (1998) ⁽²⁾ 33(2000) ⁽¹⁾ | 18 (2000) ⁽¹⁾ | 9 (1998) ⁽²⁾ | 7 (1997) ⁽¹⁾ | 6 (1998) ⁽²⁾ | 16 (1997) ⁽¹⁾ 6 (1998) ⁽²⁾ |
| Salinidad en este estudio | ---- | 23 | 38 | 35 | ---- | 8 | 6-20 | 15 |

⁽¹⁾ Muestras discretas ejecutadas con ayuda de los pescadores del lugar.

⁽²⁾ De la Lanza y Hernández (1999).

Sin embargo, en la definición del inicio de cada ciclo anual de salinidad en la laguna es importante la fase de la marea en que se cierra la boca-barra de la laguna (Staines y Rodríguez, 2000), puesto que en el interior de la misma quedarían contenidas cantidades diferentes de sales, de cerrarse durante el flujo o reflujo de marea (Stern *et al.*, 1986; Sanay *et al.*, 1998).

La masa de sales es el producto del volumen por la salinidad de la laguna; según las mediciones realizadas, si la barra se cierra durante el flujo de marea, en la laguna quedarían aproximadamente 68 millones de kilogramos de sales, y cuando se cierra durante el reflujo de marea 29 millones de kilogramos, que coincidió con el ciclo observado.

A partir de la correspondiente masa de sales comenzaría la variación temporal de la salinidad en la laguna. Sin embargo, el inicio del ciclo pudiera ser manipulado por medio del SIBEO, con el sifoneo de agua en sentido contrario (desde la laguna hacia el mar).

6.3 Modelo de volumen y salinidad

Durante el período en que la laguna Lagartero se mantiene cerrada y no hay bombeo de agua de mar con el SIBEO, la variación de la salinidad depende solo del balance de agua dulce, fundamentalmente, de la relación precipitación/evaporación, el aporte pluvial, de aguas subterráneas y del escurrimiento, como ha sido observado por Contreras (1991) y Sanay *et al.* (1998) en otros ambientes acuáticos.

Por tanto, la ecuación 10 se puede re-escribir de la siguiente forma: $S_f = S_i e^{AD \left(\frac{\Delta t}{V_i} \right)}$; lo cual permite determinar el balance de agua dulce (*AD*) entre dos mediciones de salinidad de la laguna:

$$AD = \frac{V_i}{\Delta t} \ln \frac{S_f}{S_i} \quad (25)$$

A partir de que la boca-barra se cerró en septiembre, en promedio, AD presentó números negativos hasta la primera semana de abril (Figura 16), indicando un predominio neto de la evaporación. El flujo estimado estuvo entre -0.10 y $-0.14 \text{ m}^3/\text{s}$.

Entre abril y junio, las entradas y salidas de agua dulce a la laguna estuvieron cerca del balance, con un escaso predominio de las entradas ($0.02 \text{ m}^3/\text{s}$). A partir de la semana 35 (segunda de junio), hubo más entradas vía fluvial, con un promedio de $0.57 \text{ m}^3/\text{s}$, que provocó la apertura de la boca-barra de arena a finales de agosto.

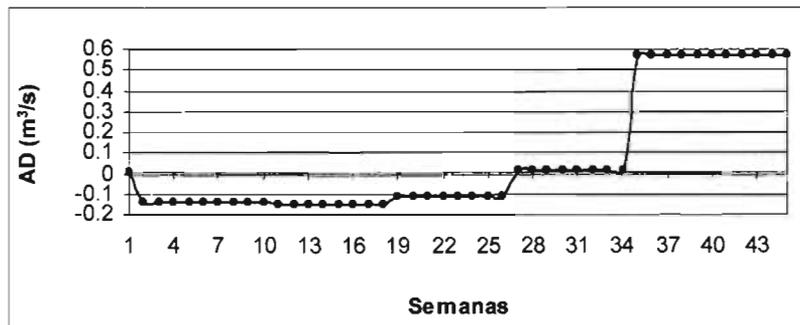


Figura 16. Flujo de agua dulce durante el ciclo anual. Los números negativos indican salidas netas de la laguna.

La calibración del modelo de volumen y salinidad se realizó reproduciendo exactamente los valores de salinidad observados y calculando el volumen residual correspondiente, por medio de estimaciones de AD . Los cambios en el volumen de agua en la laguna Lagartero se verificaron por los siguientes procesos (Figura 17): ingreso de agua por la escorrentía terrestre y el río Cacalotepec (Q); por las lluvias (P); por el efecto de las mareas (A_m) en la boca-barra que la comunica con el mar adyacente, solo en los momentos en que ésta se encuentra abierta y por el SIBEO. Las salidas de agua de la laguna, solo se producirían por evaporación (E) y nuevamente por la boca-barra (A_L).

Según este esquema, los procesos G , Q , P y E , aunque afectan la salinidad y el volumen de la laguna, no influyen directamente en la masa de sales, porque se refieren a entradas o salidas de agua dulce. Entonces, esta variable queda supeditada al intercambio de agua con el mar abierto, el cual solo ocurre por los procesos A_m y A_L o a través del bombeo con el SIBEO.

Utilizando las ecuaciones 9 y 10, se calcularon las respectivas variaciones semanales del volumen como de la salinidad durante un año (Figura 18), considerando como datos iniciales el volumen (calculado por georreferencia) y la salinidad de la laguna después de cerrarse la barra de arena.

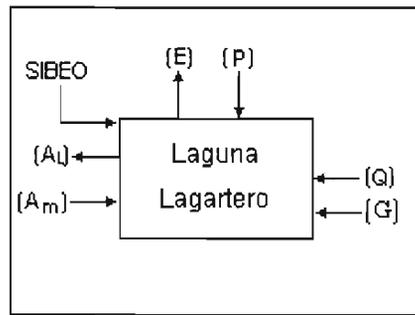


Figura 17. Procesos involucrados en la variación del contenido de sales en la laguna Lagartero.

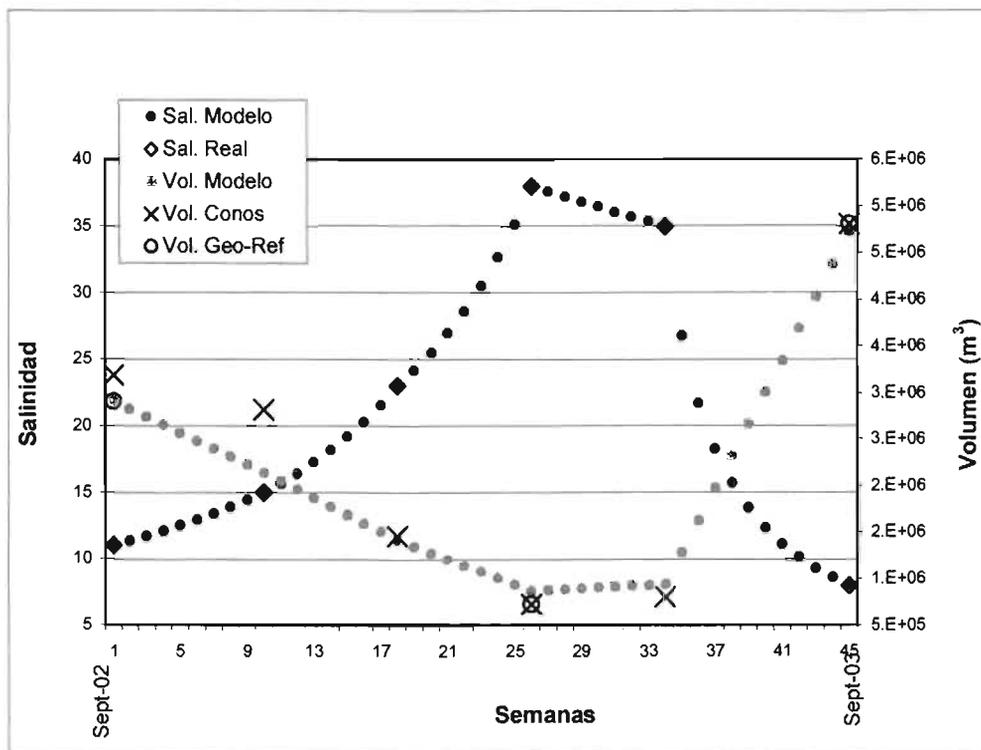


Figura 18. Calibración del modelo de volumen (m³) y salinidad.

El cálculo del volumen por medio del modelo es altamente coincidente con el calculado para cada período por el método de los conos, que como se señaló, es esencialmente el mismo en los volúmenes extremos de la laguna calculados por la georreferenciación de sus márgenes (Tabla 8). Las diferencias en los momentos intermedios seguramente se deben a que el método de conos supone una pendiente regular de la topografía de la zona de inundación de la laguna.

Tabla 8. Volumen estacional de la laguna Lagartero, calculado por el modelo y por el método de los conos' ($r=0.90$).

| MUESTREO | MODELO* | CONOS |
|---------------|-----------|-----------|
| Septiembre-02 | 2,905,986 | 3,187,164 |
| Diciembre-02 | 2,141,761 | 2,819,748 |
| Febrero-03 | 1,413,436 | 1,454,257 |
| Abril-03 | 868,632 | 730,690 |
| Junio-03 | 943,144 | 804,032 |
| Agosto-03 | 4,721,934 | 4,809,313 |

* La variación semanal del volumen y la salinidad de la laguna Lagartero se presenta en el Anexo II.

Ambos métodos consideran aproximaciones importantes en la medición del volumen de la laguna Lagartero, dado que el modelo parte de una estimación del volumen antes discutida y de una salinidad puntual, considerada como promedio de toda la laguna; el 'método de los conos' por su parte, supone una forma cónica de las márgenes de la laguna Lagartero.

Los datos que alimentaron al modelo son el producto de un año de observaciones, por lo que no se considera la variación interanual real que experimentan los ecosistemas litorales, como respuesta a los cambios climáticos regionales, como lo refiere Contreras *et al.* (1996) en varios ambientes costeros. Los cambios en el régimen hidrológico de la laguna Lagartero pueden tener una influencia antrópica considerable, debido a las aperturas artificiales de las bocas de la laguna (Comunidad de Pescadores de Cacalotepec, Comunicación Personal).

Se estudió la relación entre los resultados del cálculo de volumen por el método de los conos y por el modelo, por medio del coeficiente de correlación no-paramétrico por rangos de Spearman, resultando un coeficiente de correlación de $r = 0.90$, que significa una correlación altamente significativa (Spiegel, 1961). La elevada coincidencia entre ambos métodos propuestos para el cálculo del volumen, demuestra la validez del modelo de volumen y la salinidad de la laguna Lagartero durante el año de estudio.

6.4 Nitrógeno y fósforo totales en agua

La concentración de nitrógeno total (Nt) en la laguna Lagartero se mantuvo en niveles elevados (18.3-171.4 μM), comparados con varias lagunas costeras mexicanas, influenciadas por drenajes agrícolas con el empleo de fertilizantes, el manejo acuícola o como cuerpos receptores de residuales domésticos e industriales (Tabla 9).

Tabla 9. Nitrógeno total en lagunas costeras del Pacífico mexicano

| LAGUNA | Nt (μM) | FUENTE |
|---|-------------------------|--|
| Topolobampo-Ohuira, Sin. ⁽¹⁾ | 35.50 | <i>Garay-Morán, 2002</i> |
| Navachiste-San Ignacio, Sin. ⁽¹⁾ | 35.50 | <i>Garay-Morán, 2002</i> |
| Santa María-La Reforma, Sin. ⁽¹⁾ | 35.71 | <i>Garay-Morán, 2002</i> |
| Ceuta, Sin. ⁽¹⁾ | 70.89 | <i>Garay-Morán, 2002</i> |
| Chautengo, Gro. ⁽²⁾ | 10.18 | <i>Contreras, 1991</i> |
| Mitla, Gro. ⁽²⁾ | 5.95 | <i>Contreras, 1991</i> |
| San Marcos, Gro. ⁽²⁾ | 10.90 | <i>Contreras, 1991</i> |
| Nuxco, Gro. ⁽²⁾ | 3.30 | <i>Contreras, 1991</i> |
| Chacagua, Oax. ⁽³⁾ | 3.10 | <i>Ecoplaneación Consultores, 1998</i> |
| Pastoría, Oax. ⁽³⁾ | 2.00 | <i>Ecoplaneación Consultores, 1998</i> |
| Manialtepec, Oax. ⁽³⁾ | 3.87 | <i>Ecoplaneación Consultores, 1998</i> |
| Superior e Inferior, Oax. ⁽²⁾ | 6.69 | <i>Contreras, 1991</i> |
| Mar Muerto, Oax. ⁽²⁾ | 6.65 | <i>Contreras, 1991</i> |
| La Joya-Buena Vista, Chis. ⁽²⁾ | 9.15 | <i>Contreras, 1991</i> |
| Lagartero, Oax. ⁽⁴⁾ | 78.96 \pm 52 | <i>Este estudio</i> |

⁽¹⁾ *Garay-Morán, 2002*

⁽²⁾ *Contreras, 1991*

⁽³⁾ *Ecoplaneación Consultores, 1998*

⁽⁴⁾ *Este estudio*

Durante el estudio se registró una tendencia al ascenso en la concentración de Nt en la laguna, desde septiembre de 2002 hasta septiembre de 2003 (Figura 19), indicando la importancia relativa de los aportes de nutrientes vía escurrimientos y fluvial, como lo ha referido Contreras *et al.* (1997) en otros sistemas costeros de México; dicha tendencia se vio afectada por un máximo intermedio de 121.4 μM en abril. Alonso-Rodríguez y Páez-Osuna (2003) observaron una variación similar en granjas camaronícolas del NW de México durante la época de estiaje, debido fundamentalmente a los aportes antropogénicos. Sin embargo, varios estudios señalan que en la zona costera la variación anual del nutriente está más supeditada a los aportes terrígenos estacionales, en adición a los aportes internos de los sistemas, como los sedimentos y la vegetación circundante, cuyos aportes también son máximos durante el período lluvioso (Arenas-Fuentes y de la Lanza-Espino, 1990;

Valdés-Lozano (1995); de la Lanza y Flores, 1998; Tovilla-Hernández y de la Lanza-Espino, 2001).

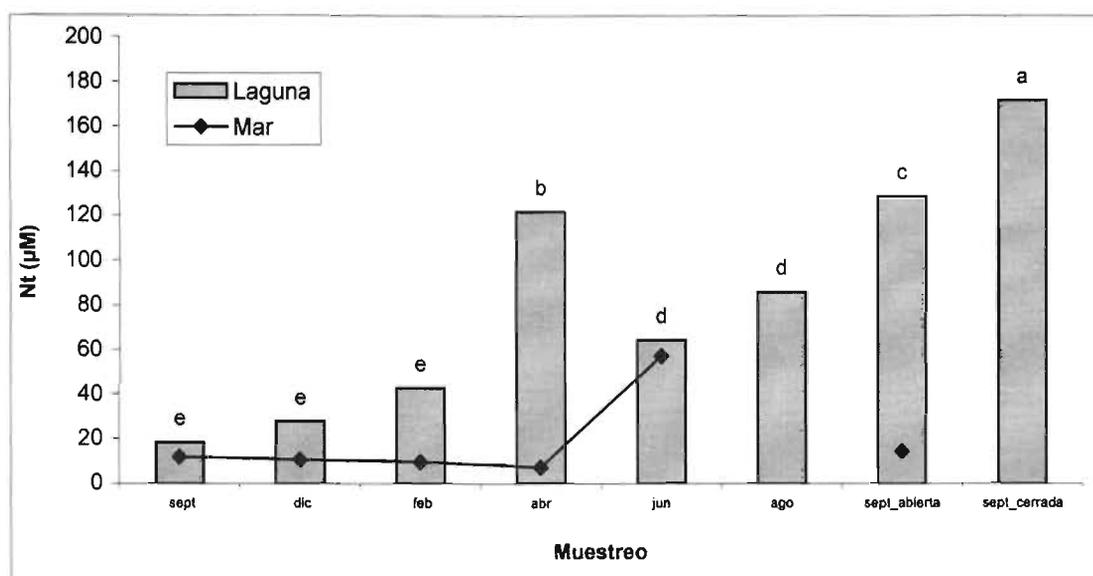


Figura 19. Concentración de nitrógeno total en la laguna Lagartero y mar adyacente. Los rútlulos corresponden al resultado de la prueba SNK.

En abril se registró el volumen mínimo de la laguna Lagartero; a partir de ese mes la laguna recibió agua por vía subterránea como ya se ha discutido, por lo que el máximo de Nt posiblemente este asociado a la dilución por el agua subterránea de los nutrientes nitrogenados acumulados en la laguna durante el estiaje entre abril y junio. Lo anterior sugiere que los procesos biogeoquímicos internos del sistema son más determinantes en la concentración de Nt, así como en su balance, que las aportaciones del agua subterránea o los aportes antropogénicos, como se discutirá más adelante.

Existen diversos criterios que definen el estado trófico de las aguas costeras (Karydis *et al.*, 1983; Ignatiades *et al.*, 1992; Smith *et al.*, 1999). Kiddon *et al.* (2003) utilizando el límite de 1 mgNt/L, establecido por el Programa de Monitoreo de la Eutrofización en Estuarios de la NOAA, encontraron entre el 11 y 100% del área en varios sistemas estuarinos de Estados Unidos enriquecida en nitrógeno. En la laguna Lagartero, esta concentración fue rebasada a partir de abril y alcanzó a poco más del doble en septiembre (2.4 mg/L), cuando se cerró la boca-barra de la laguna, limitándose la posibilidad de exportación de Nt hacia el mar adyacente.

Según Smith *et al.* (1999), a partir de la concentración de Nt, la laguna Lagartero se pudiera catalogar como hipertrófica durante la mayor parte del año, en especial a partir del mes de febrero (Tabla 10)

Tabla 10. Estado trófico de las aguas costeras según su contenido de nitrógeno y fósforo (Smith *et al.*, 1999)

| ESTADO TRÓFICO | NITRÓGENO TOTAL (mg/L) | FÓSFORO TOTAL (mg/L) |
|----------------|------------------------|----------------------|
| Oligotrófico | <0.26 | <0.01 |
| Mesotrófico | 0.26-0.35 | 0.01-0.03 |
| Eutrófico | 0.35-0.40 | 0.03-0.04 |
| Hipertrófico | >0.40 | >0.04 |

En las aguas del afluente del río Cacalotepec la concentración de Nt igualmente aumentó en el transcurso del año. Galope-Bacaltos *et al.* (1999) asocian una situación similar a la variación estacional del nitrógeno en el estuario del río Sta Rita, Filipinas, así como a la influencia de actividades agrícolas y domésticas en la correspondiente cuenca de drenaje.

Al comparar las concentraciones de Nt del río Cacalotepec con las reportadas en otros ríos del Estado de Oaxaca, la vertiente del Pacífico mexicano y del mundo (Tabla 11), se observa que presenta niveles entre tres y cuatro veces menores que la concentración registrada en los ríos Verde y Manialtepec, que son los más cercanos dentro del Estado de Oaxaca y guarda aproximadamente la misma proporción con otros ríos, por ejemplo del Estado de Sinaloa y de Europa (Justic' *et al.*, 1995; Guerrero-Galván, 1997; Ecoplaneación Consultores, 1998).

Sin embargo, los niveles de Nt encontrados en el río Cacalotepec fueron 10 veces superiores a los ríos no contaminados, similares a los reportados en otros ríos del Estado de Oaxaca como el San Francisco y Chacalapa, en cuyas cuencas de drenaje también existen pequeños asentamientos humanos y actividad agrícola (Ecoplaneación Consultores, 1998; INEGI, 2000).

En el mar adyacente a la laguna Lagartero la concentración de Nt tuvo poca variabilidad, registrándose un promedio inferior al resto de las localidades muestreadas (18.5 μM). Este promedio, notablemente influenciado por un aparente registro anómalo de Nt en junio, es proporcional a la concentración reportada en las zonas costeras influenciadas por afloramientos de aguas profundas, como en las inmediaciones de las bahías de San Quintín y Magdalena (17 μM Nt promedio en ambas); o a la concentración registrada en otras zonas bajo los efectos de residuales industriales y mayor desarrollo de la red fluvial, como el mar adyacente a la Bahía de Guaymas, donde de la Lanza (1994) reportó 20 μM aproximadamente.

Tabla 11. Cuadro comparativo de la concentración de nitrógeno total en algunos ríos.

| Río | Nt PROMEDIO (µM) | FUENTE |
|----------------------|------------------|---|
| Verde, Oax. | 470 | <i>Ecoplaneación Consultores (1998)</i> |
| Manialtepec, Oax. | 320 | <i>Ecoplaneación Consultores (1998)</i> |
| San Francisco, Oax. | 95 | <i>Ecoplaneación Consultores (1998)</i> |
| Chacalapa, Oax. | 83 | <i>Ecoplaneación Consultores (1998)</i> |
| Culiacán, Sin. | 330* | <i>Guerrero-Galván (1997)</i> |
| Morlaix, Francia | 466* | <i>Wafar et al. (1989)</i> |
| Rhin, Alemania | 357* | <i>Weijden y Middelburg (1989)</i> |
| Po, Italia | 171 | <i>Justic' et al. (1995)</i> |
| Mississippi, EUA | 114 | <i>Justic' et al. (1995)</i> |
| Ríos no contaminados | 8.3* | <i>Meybeck (1982)</i> |
| Cacalotepec | 80±48 | <i>Este estudio</i> |

*Nitrógeno Total Inorgánico

Respecto al fósforo total, en la laguna Lagartero se registró un aumento de la concentración a partir de diciembre (Figura 20). Dicha tendencia fue semejante en las aguas del río Cacalotepec.

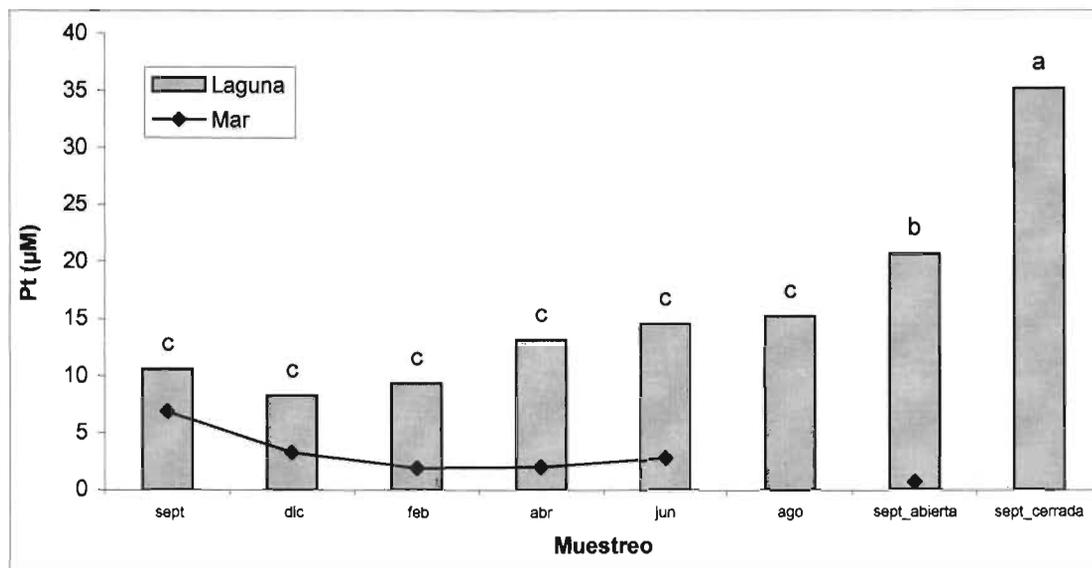


Figura 20. Concentración de fósforo total en la laguna Lagartero y mar adyacente. Los rótulos corresponden al resultado de la prueba SNK.

Las concentraciones en el cuerpo lagunar (entre 8.2 y 35.2 µM), resultaron superiores a las reportadas por otros estudios para algunas lagunas de la vertiente del Pacífico Mexicano (Tabla 12). Kiddon *et al.* (2003) establecieron un límite de 3 µM de Pt para clasificar las aguas costeras como enriquecidas en fósforo, con peligro de eutrofización; el límite establecido por Smith *et al.* (1999) es incluso más bajo (1.3 µM), ambos ampliamente rebasados en la laguna Lagartero, por lo que también por las concentraciones de Pt se puede catalogar la laguna Lagartero como hipertrófica.

Estas elevadas concentraciones de fósforo total, son equiparables con las encontradas en lagunas del Golfo de México (Sontecomapan, del Ostión, Alvarado y Tlaliscoyan), que se

encuentran fuertemente influenciadas por actividades antrópicas y presentan importantes aportes desde los sedimentos (de la Lanza, 1994).

Tabla 12. Fósforo total en lagunas costeras del Pacífico mexicano

| LAGUNA/BAHÍA | Pt (μM) | FUENTE |
|------------------------------|-------------------------|--|
| Topolobampo-Ohuira, Sin. | 3.10 | <i>Garay-Morán, 2002</i> |
| Navachiste-San Ignacio, Sin. | 2.09 | <i>Garay-Morán, 2002</i> |
| Santa María-La Reforma, Sin. | 2.69 | <i>Garay-Morán, 2002</i> |
| Ceuta, Sin. | 5.38 | <i>Garay-Morán, 2002</i> |
| Chautengo, Gro. | 1.98 | <i>Contreras, 1991</i> |
| Mitla, Gro. | 1.84 | <i>Contreras, 1991</i> |
| San Marcos, Gro. | 5.75 | <i>Contreras, 1991</i> |
| Nuxco, Gro. | 2.00 | <i>Contreras, 1991</i> |
| Chacagua, Oax. | 3.87 | <i>Ecoplaneación Consultores, 1998</i> |
| Pastoría, Oax. | 1.47 | <i>Ecoplaneación Consultores, 1998</i> |
| Manialtepec, Oax. | 1.33 | <i>Ecoplaneación Consultores, 1998</i> |
| Superior e Inferior, Oax. | 6.80 | <i>Contreras, 1991</i> |
| Mar Muerto, Oax. | 8.05 | <i>Contreras, 1991</i> |
| La Joya-Buena Vista, Chis. | 10.78 | <i>Contreras, 1991</i> |
| Lagartero | 18.67 \pm 13 | <i>Este estudio</i> |

A diferencia del nitrógeno total, los contenidos de fósforo total en el río Cacalotepec superan ampliamente las concentraciones reportadas en varios ríos del mundo (Tabla 13). Ello puede obedecer a causas naturales, como la edafología de la cuenca de drenaje, o al empleo de fertilizantes en la agricultura en la cuenca de drenaje, como lo reportó Guerrero-Galván (1997) en el río Culiacán, Sinaloa.

Tabla 13. Cuadro comparativo de la concentración de fósforo en algunos ríos.

| RÍO | FÓSFORO PROMEDIO (μM) | FUENTE |
|------------------------------|--|---|
| Verde, Oax | 11 | <i>Ecoplaneación Consultores (1998)</i> |
| San Francisco, Oax | 8.5 | <i>Ecoplaneación Consultores (1998)</i> |
| Culiacán, Oax. | 47 | <i>Guerrero-Galván (1997)</i> |
| Rhin, Alemania | 21.25 | <i>Weijden y Middelburg (1989)</i> |
| Cree, Canadá | 0.20 | <i>Sholkovitz (1976)</i> |
| Glen Burn, Irlanda del Norte | 0.52 | <i>Sholkovitz (1976)</i> |
| Luce, Gran Bretaña | 0.34 | <i>Sholkovitz (1976)</i> |
| Po, Italia | 4.6 | <i>Justic' et al (1995)</i> |
| Mississippi, EUA | 7.7 | <i>Justic' et al (1995)</i> |
| Cacalotepec | 12.5 \pm 7 | <i>Este estudio</i> |

En el mar adyacente a la laguna Lagartero la concentración de fósforo total presentó poca variabilidad, registrándose, al igual que en el nitrógeno, un promedio inferior al resto de las localidades muestreadas (2.9 μM). Este promedio, es característico del litoral del Pacífico mexicano (Contreras, 1991; de la Lanza-Espino *et al.*, 2004).

6.5 Aportes de nitrógeno y fósforo del río Cacalotepec

El río Cacalotepec no es una corriente perenne, disminuye sensiblemente su gasto durante el estiaje, siendo nulo a nivel superficial (Ecoplaneación Consultores, 1998). Su aporte superficial de agua dulce que comenzó a finales de julio de 2003 (Comunidad de Pescadores de Cacalotepec, Comunicación Personal), se pudo registrar en septiembre y diciembre del 2002, así como en agosto y septiembre del 2003 (Tabla 14). La velocidad del agua se mantuvo constante, sin embargo, el gasto del río varió significativamente, por lo que la sección ocupada por el agua en las esclusas fue diferente en cada uno de los muestreos. Junto con la concentración del nutriente en el río, la diferencia en el flujo influyó en el mayor aporte del mismo durante los muestreos finales (Tabla 15).

Tabla 14. Flujo de agua del río Cacalotepec hacia la laguna Lagartero.

| MUESTREO | VEL. CORRENTÓMETRO (m/s) | SECCIÓN TRANSVERSAL (m ²) | FLUJO (m ³ /s) |
|---------------|-----------------------------|--|------------------------------|
| Septiembre-02 | 1.89 | 2.65 | 5.01 |
| Diciembre-02 | 1.89 | 1.33 | 2.50 |
| Agosto-03 | 1.89 | 5.33 | 10.02 |
| Septiembre-03 | 1.89 | 4.51 | 8.52 |

Tabla 15. Aportes de nitrógeno y fósforo por el río Cacalotepec.

| MUESTREO | FLUJO (m ³ /s) | CONCENTRACIÓN (μM) | APORTES A LA LAGUNA (10 ³ mol/día) |
|------------------|------------------------------|-----------------------|---|
| Nitrógeno | | | |
| Septiembre-02 | 5.01 | 17.94 | 7.8 |
| Diciembre-02 | 2.50 | 42.21 | 9.1 |
| Agosto-03 | 10.02 | 157.14 | 116.0 |
| Septiembre-03 | 8.52 | 157.14 | 68.0 |
| Fósforo | | | |
| Septiembre-02 | 5.01 | 10.71 | 10.3 |
| Diciembre-02 | 2.50 | 6.18 | 3.0 |
| Agosto-03 | 8.52 | 24.52 | 40.0 |
| Septiembre-03 | 5.01 | 24.52 | 23.5 |

El principal uso de los ríos del Estado de Oaxaca (Arena, Verde, Grande, Manialtepec, Chila, San Francisco, Chacalapa y el río Cacalotepec), es la irrigación de tierras agrícolas y la alimentación de agua dulce a las lagunas costeras (Ecoplaneación Consultores, 1998). En su recorrido acarrear materiales de diversa naturaleza hacia las lagunas costeras (vegetal, animal, arcillas, etc.), que están en dependencia de las respectivas cuencas de captación y el régimen de precipitación que los forma, como ha sido señalado por de la Lanza y Arenas (1986) para otras lagunas.

6.6 Balances de nitrógeno y fósforo en la laguna Lagartero

6.6.1 Balances de agua y sales

El flujo residual de agua (F_r) fue negativo en ambos meses de septiembre de 2002 y 2003, lo cual indica que es un flujo que sale de la laguna. La diferencia entre ambos meses radica en el mayor tiempo de apertura de la barra, producto de un mayor aporte de agua dulce durante septiembre de 2003 (Tabla 16). En consecuencia, el tiempo de residencia hidráulico (τ_{AD}) fue ligeramente inferior durante ese mes.

Tabla 16. Balance de agua y tiempo de residencia hidráulico en la laguna Lagartero.

| MES | $\frac{dV_{Lag}}{dt}$ ($10^3 \text{ m}^3/\text{día}$) | F_q ($\text{m}^3/\text{día}$) | F_r ($10^3 \text{ m}^3/\text{día}$) | τ_{AD} (días) |
|----------|--|--------------------------------------|--|-----------------------|
| Sep-02 | -194 | 432,864 | -676 | 5.7 |
| Sep-03 | -92 | 736,128 | -878 | 4.4 |
| Promedio | -143 | 584,896 | -777 | 5.1 |

Según la estimación del tiempo de residencia hidráulico utilizando el flujo de agua residual en la laguna, en promedio, cinco días sería un tiempo suficiente para que se produzca un recambio del agua dulce en la laguna Lagartero. Ello contrasta con una situación diferente durante los meses secos y de menor aporte de aguas continentales, cuando la laguna se cierra se produce la acumulación de nutrientes durante todo un ciclo anual. Aquí radica una de las principales ventajas en la aplicación del SIBEO como se verá más adelante.

El proceso que afecta directamente el balance de sales en la laguna es el intercambio con el mar adyacente. La diferencia entre los flujos de mezcla calculados para ambos meses (Tabla 17) se debió por una parte al mayor flujo residual calculado durante septiembre de 2003, dado el mayor gasto del río Cacalotepec; por otra parte, dicha diferencia también se debe a que el muestreo de septiembre de 2002 se realizó únicamente durante el reflujos de marea, por lo que la diferencia de salinidades entre el mar y la laguna fue máxima ($S_{Mar} - S_{Lag} = 18$), lo cual disminuye el valor de F_x . Por la misma razón, para el recambio del agua de la laguna, la contribución de las mareas resultó prácticamente igual que el aporte de agua dulce en septiembre de 2002, lo cual no es real, ya que en cada fase de flujo de marea puede ingresar a la laguna aproximadamente el 80% de su volumen total como se señaló anteriormente.

Tabla 17. Balance de sales, tiempo de residencia por mareas y total en la laguna Lagartero.

| MES | F_x ($10^3 \text{ m}^3/\text{día}$) | τ_{Mar} (días) | τ_T (días) |
|----------|--|------------------------|--------------------|
| Sep-02 | 687 | 5.6 | 2.8 |
| Sep-03 | 1037 | 3.7 | 2.0 |
| Promedio | 682 | 4.7 | 2.4 |

En promedio, el tiempo de residencia por mareas fue prácticamente la mitad del tiempo de residencia hidráulico para todo el año (tablas 16 y 17). Sumando las contribuciones de V_r y V_x , en promedio, el tiempo de residencia total del sistema durante las aperturas de la boca-barra fue de 2.4 días (Figura 21). Para las condiciones ambientales de la laguna, sería conveniente que los periodos de apertura de la boca-barra sean más prolongados y frecuentes de lo que ha venido aconteciendo en los últimos años (Latournerie *et al.*, 1995; Staines y Rodríguez, 2000).

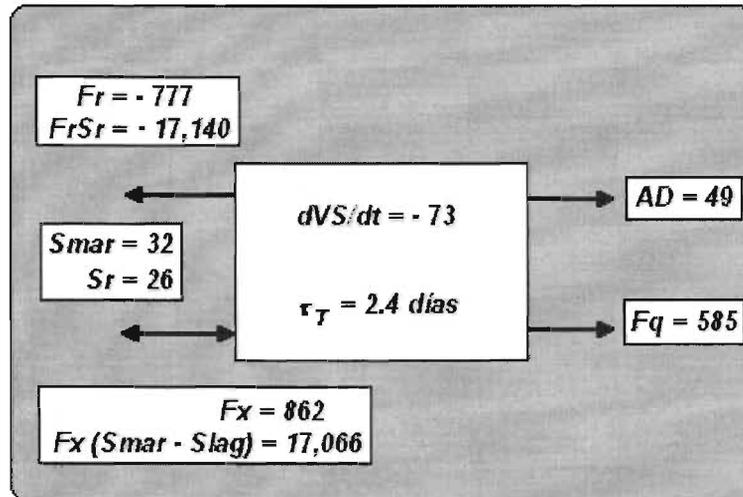


Figura 21. Balance de agua y sales en la laguna Lagartero. El volumen de la laguna está en 10^6 m^3 ; los flujos de agua en $\text{m}^3/\text{día}$ y los flujos de sales en $10^3/\text{día}$

6.6.2 Balance de nutrientes

A partir de los resultados obtenidos por el modelo de LOICZ, tanto en septiembre de 2002 como en septiembre de 2003, los valores positivos de ΔDIN y ΔDIP indican que la laguna Lagartero exportó nitrógeno y fósforo hacia el mar adyacente (Tabla 18).

Sin embargo, durante el último muestreo ΔDIN fue el doble que en septiembre de 2002. Unido a la diferencia en F_r , anteriormente señalada, la superioridad de ΔDIN en septiembre de 2003 puede ser atribuida al notable incremento de los aportes de N del río Cacalotepec y en consecuencia de la concentración de N en la laguna (Tabla 17), provocados por las fuertes lluvias ocasionadas por la tormenta tropical ‘Carlos’ (SNA, 2004).

Tabla 18. Balance de nitrógeno y fósforo en la laguna Lagartero.

| MUESTREO | DIN (mmol/m ³) | $F_x(DIN_{mar} - DIN_{lag})$ (10 ³ mol/día) | ΔDIN (10 ³ mol/día) | DIP (mmol/m ³) | $F_x(DIP_{mar} - DIP_{lag})$ (10 ³ mol/día) | ΔDIP (10 ³ mol/día) |
|----------|---------------------------------|---|---|---------------------------------|---|---|
| Sep-02 | 14.66 | 40 | +39 | 6.35 | 2 | +5 |
| Sep-03 | 102.86 | 95 | +67 | 12.38 | 12 | +8 |

La diferencia ΔDIP entre ambos meses fue aproximadamente igual que en ΔDIN . No obstante, no se corresponde con un marcado desnivel de concentraciones de P entre ambos meses, como se aprecia en la tabla 18; se debió fundamentalmente al menor intercambio de P con el mar adyacente en septiembre de 2002, dado que la concentración máxima del nutriente en el mar ($P_t = 6.85 \mu M$) se registró durante ese mes, cuando se muestreó durante el reflujó de marea, como ya se señaló, y el agua saliente de la laguna estaba mezclada en toda la porción marina inmediata a la boca-barra. Contrariamente, el mínimo de P_t en el mar adyacente se obtuvo precisamente en septiembre de 2003 ($P_t = 0.65 \mu M$), cuando también fue máximo en la alguna ($P_t = 20.64 \mu M$), por lo que la diferencia en el término de mezcla de la ecuación 24 ($F_x (\Delta DIP_{oc} - \Delta DIP_{Lag})$), definió en gran medida la diferencia observada en el balance de fósforo entre ambos meses.

En promedio, la laguna lagartero presentó balances de $\Delta DIN = +53$ y $\Delta DIP = +7 \times 10^3$ mol/día respectivamente (Figura 22).

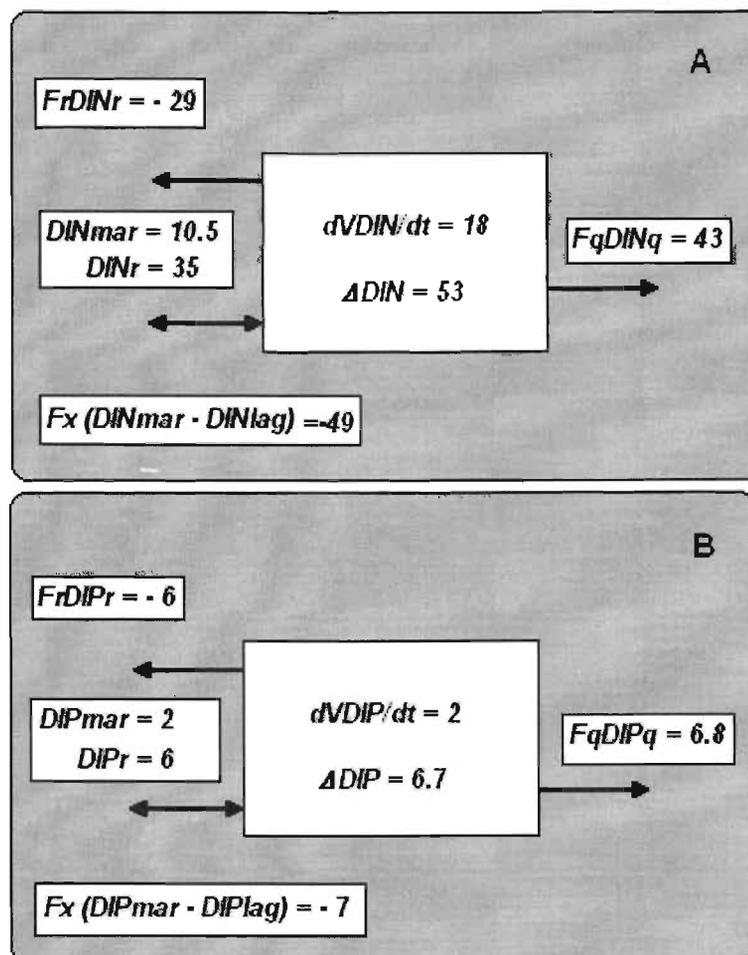


Figura 22. Balance de nitrógeno (A) y fósforo (B) en la laguna Lagartero. Las concentraciones están en $mmol/m^3$ y los balances en 10^3 mol/día

La aplicación de la metodología LOICZ para determinar la dinámica de exportación-importación de nutrientes, en la mayoría de los cuerpos de agua costeros del Pacífico mexicano, ha generado resultados similares al obtenido en este estudio para la laguna Lagartero; existe un predominio de la exportación (ΔN , $\Delta P > 0$). El carácter exportador máximo de N y P se ha registrado en lagunas costeras del estado de Sinaloa, con una fuerte influencia de la industria pesquera y una red fluvial más desarrollada (Garay-Morán, 2000), que en el resto de las localidades estudiadas hasta el momento. Ejemplo de ello lo constituyen los sistemas lagunares Topolobampo-Ohuira, Ceuta y Urias, con mayores ΔN y Ensenada del Pabellón-Altata, Ceuta y Urias con los máximos ΔP (Tabla 19).

En las lagunas costeras con comunicación perenne con el océano, donde las pérdidas de agua por evaporación son compensadas por el flujo de la marea, el ingreso neto de agua aporta cantidades significativas de nitrógeno y fósforo, orgánicos e inorgánicos (Arenas, 1979; Camacho-Ibar *et al.*, 2003). Por el contrario, en la laguna Lagartero, las aperturas de la boca-barra constituyen una vía importante de exportación de los nutrientes acumulados durante aproximadamente un ciclo anual, proveniente del río Cacalotepec y otras fuentes internas como los sedimentos lacustres y la vegetación circundante.

Este intercambio con el mar adyacente durante las aperturas, sin embargo, debe tomarse como aproximaciones a *grosso modo*, debido a que durante el período de reflujo de marea pueden haber egresos de naturaleza distinta de la que se incorpora a la laguna durante el flujo. En esta última fase pueden ingresar a la laguna comunidades planctónicas marinas y algunos constituyentes del necton; los mejor adaptados crecen y se reproducen, el resto muere y enriquece con material orgánico al medio. Otros organismos son depredados por la fauna nativa y enriquecen el material orgánico lagunar (de la Lanza y Arenas, 1986).

Tabla 19. Cuadro comparativo del balance de N y P en lagunas del Pacífico mexicano.

| CUERPO DE AGUA | ÁREA (10 ⁶ m ²) | ΔN (mmol/m ² día) | ΔP (mmol/m ² día) | <i>FijN-Denit</i> (mmol/m ² día) | <i>MNE</i> (mmol/m ² día) | FUENTE |
|---|--|--------------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|--|
| Topolobampo-Ohuira, Sin. | 149 | +16.2 | +1.6 | -9.3 | -168.7 | Garay-Morán, 2000 |
| Navachiste-San Ignacio, Sin. | 267 | -0.5 | -0.02 | -0.2 | +1.7 | " |
| Santa María-La Reforma, Sin. | 492 | -0.9 | -0.06 | +0.05 | +6.3 | " |
| Ensenada del Pabellón-Altata, Sin. | 360 | -0.30 | +2.4 | -38.2 | -251.3 | " |
| Ceuta, Sin. | 71.4 | +87.6 | +7.3 | -28.7 | -770.2 | " |
| Urias, Sin. | 12 | +25.8 | +10.4 | -140.5 | -1102.1 | " |
| Huizache-Caimanero, Sin. | 171 | +0.1 | +0.1 | -0.8 | -5.8 | " |
| Teacapan-Agua Brava-Marismas Nacionales, Sin. | 1600 | -0.8 | -0.3 | +3.9 | +30.9 | De la Lanza-Espino <i>et al.</i> , 1998 |
| Estero Punta Banda, B. C. | 10.3 | +0.04 | +1.5 | -2.4 | -16.0 | Pumian-Tapia <i>et al.</i> , 1997 |
| Estero Punta Banda, B. C. | 10.3 | +0.8 | +0.2 | -3.5 | -18.0 | Hernández-Ayón <i>et al.</i> , 2002 |
| Ensenada de La Paz, B. C. Sur | 45 | +0.1 | -0.05 | +0.75 | +4.5 | Lechuga-Devéze, 1990 |
| Bahía Concepción, B. C. Sur | 282 | +0.04 | +0.01 | -0.1 | -1.0 | Lechuga-Devéze, 1998 |
| Estero La Cruz, Sonora | 23 | +0.06 | +0.02 | -0.2 | -1.8 | Botello-Ruvalcaba y Valdez-Holguín, 1999 |
| Chanuto-Panzacola, Chis. | 180 | +0.4 | 0 | +0.4 | ---- | Contreras-Espinosa e Ibarra-Obando, 1990 |
| Carretas-Pereyra, Chis. | 35 | +0.2 | +0.2 | -3.4 | -24.2 | Contreras-Espinosa, 1997 |
| PROMEDIO | 247 | +8.6 | +1.5 | -14.8 | -165.4 | ---- |
| Lagartero | 2.4 | +22 | +2.8 | -22.5 | -295.5 | Este estudio |

6.6.3 Cálculos estequiométricos

Las estimaciones del metabolismo neto del ecosistema (MNE), a partir de la desviación del comportamiento no-conservativo del fósforo ($-106 * \Delta P$), sugirió que durante el periodo de estudio la laguna Lagartero potencialmente se comportó como un sistema heterótrofo neto ($p - r = -709 \times 10^6$ mmol/día ó -295 mmol/m² día). Esto implica que en la laguna predominó la respiración sobre la producción primaria bruta en el periodo estudiado.

La desviación del flujo biogeoquímico de nitrógeno inorgánico disuelto con base en lo “esperado”, según el flujo de fósforo inorgánico disuelto y la proporción Redfield igualmente resultó negativa ($\Delta DIN - 16 * \Delta DIP = -54 \times 10^6$ mmol/día ó -22 mmol/m² día), por lo que la desnitrificación fue superior que la fijación de nitrógeno molecular. Esta condición se asocia a un determinado exceso de N (Gordon *et al.*, 1996), lo cual en la laguna Lagartero se justifica por los aportes del nutriente durante el mes de septiembre de 2003, como ya ha sido discutido.

En el Pacífico mexicano (Tabla 19), igualmente existe un predominio de la desnitrificación, en los cuerpos de agua estudiados por medio de la metodología LOICZ. Solo se ha constatado la fijación de nitrógeno en aquellos cuerpos de agua donde se importan considerables cantidades de P, como en el sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales, en Sinaloa y Nayarit (de la Lanza *et al.*, 1998); en menor proporción en la Ensenada de La Paz, Baja California Sur (Lechuga-Devéze, 1990), así como en el sistema lagunar Chanuto-Panzacola, en Chiapas (Contreras-Espinosa e Ibarra-Obando, 1990).

Comparativamente, los cálculos realizados en la laguna Lagartero de ΔP , **fijación de nitrógeno – desnitrificación** y **MNE**, están próximos al promedio de los cuerpos de agua costeros de la vertiente del Pacífico mexicano. No se incluyen flujos de N y P que pudieran ser importantes para las estimaciones realizadas, como $F_e Y_e$, $F_p Y_p$ (de la Lanza, 1994; Páez-Osuna, 2001); $F_g Y_g$ (Hernández-Ayón *et al.*, 2002) y $F_o Y_o$ (Valdés-Lozano, 1995; Bowen y Valiela, 2001).

Respecto a los aportes de las aguas subterráneas, cabe señalar que en la laguna se reportó un máximo de Nt en abril de 2003 y valores estadísticamente similares de Pt entre abril y junio de 2003. Entre estos últimos meses, sin embargo, se registró un aumento del volumen de la laguna, que al no haber comenzado las lluvias, ni verificarse el aporte superficial del río Cacalotepec, debe ser atribuido a los aportes subterráneos. Por lo anterior, se puede considerar que $F_g Y_g$ fue relativamente pequeño en comparación con los aportes del río Cacalotepec.

En la comunidad de Cacalotepec, como ya se ha mencionado, habitan solo alrededor de 650 personas, que utilizan fosas sépticas (Rodríguez y Ziga, 1999). Dadas las condiciones de permeabilidad de la planicie costera, los aportes antropogénicos se verterían a la laguna igualmente por vía subterránea, cuyo efecto en los aportes de N y P es posible despreciar.

Adicionalmente, si se utilizara un aporte de 20 molP/persona/año (Poumian-Tapia *et al.*, 1997), la cantidad de personas necesarias para igualar el ΔDIP observado sería de 54,000, aproximadamente 80 veces la población total de la comunidad. Por lo tanto, las elevadas concentraciones de N y P observadas, no deben ser atribuidas a un impacto antropogénico directo.

Debido a la poca profundidad promedio (90 cm) y elevada proporción superficie volumen (0.7 m^{-1}), la resuspensión de sedimentos debe ser factor primordial en el aporte de N y P hacia la columna de agua (Nixon *et al.*, 1976; Oviatt *et al.*, 1981; Nowicki *et al.*, 1999). De igual forma la presencia de abundante vegetación halófila en toda la zona de inundación de la laguna, como *Rhizophora mangle*, *Avicenia germinans*, *Sauceda*, *Cressa* y *Salicornia*, posiblemente contribuya no solo a los niveles de N y P observados, sino al aumento de sus concentraciones de forma progresiva, a medida que va transcurriendo el ciclo anual y aumentando el área de inundación de la laguna, como lo han reportado Arenas (1979) y de la Lanza (1991b) en otros cuerpos de agua del Pacífico mexicano.

Además se considera válida la aplicación del modelo propuesto por LOICZ, debido al reducido tamaño y profundidad de la laguna Lagartero, que es aproximadamente 20 veces más pequeña que el resto de los cuerpos de agua estudiados en México (LOICZ-IGBP, 2004), lo cual minimiza los efectos de la variación espacial de los flujos de N y P. La posible variación espacial en los flujos de agua, sales y nutrientes ha sido identificada por Webster *et al.* (2000) como una limitación de este modelo cuando se aplica de forma simple en una caja.

6.7 Efecto del SIBEO en los Balances de Volumen y Salinidad

El volumen de la laguna Lagartero determina en última instancia la frecuencia y extensión de las aperturas de la boca-barra de arena, condición primordial en la dinámica biogeoquímica y características de los aportes de nitrógeno y fósforo hacia la laguna, como se ha visto en las secciones anteriores.

Manteniendo el AD estimado para reproducir las salinidades observadas, así como partiendo de la salinidad medida y el volumen calculado por el método de los conos, correspondientes a cada fase de la marea en que se pudiera cerrar la boca-barra de arena (20 y $4,184,801 \text{ m}^3$ en el flujo de marea; 11 y $3,463,907 \text{ m}^3$ en el reflujos respectivamente), se recalcularon el volumen y la salinidad de la laguna, introduciendo un flujo del SIBEO de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ con dos frecuencias diferentes, así como, simulando el cierre de la boca-barra en las dos fases de la marea. El modelaje se extendió por dos años, con el objetivo de verificar los efectos en ambas variables en el siguiente ciclo anual.

Los resultados numéricos de los diferentes escenarios aparecen en el Anexo III de este trabajo.

6.7.1 Escenario I. Bombeo discontinuo, cierre de la boca-barra en flujo de marea

Si la boca-barra se cierra durante el flujo de marea, con el bombeo discontinuo (Figura 23), en función del volumen de agua que se inyectaría a la laguna, se inducirían cinco aperturas anuales más de la boca-barra, de una semana cada una, lo cual repercutiría positivamente en la comunicación con el mar adyacente (Czitrom, 2000).

Sin embargo, quedando un número mayor de kilogramos de sales atrapados en la laguna, la salinidad, por un lado, pudiera ser superior a la observada durante el estudio durante abril (38); por otra parte, ni durante el período de máximo aporte de agua dulce (junio-septiembre), se registrarían salinidades inferiores a 18, lo cual pudiera representar un estrés por salinidades altas para los organismos que habitan la laguna (Osuna *et al.*, 1999).

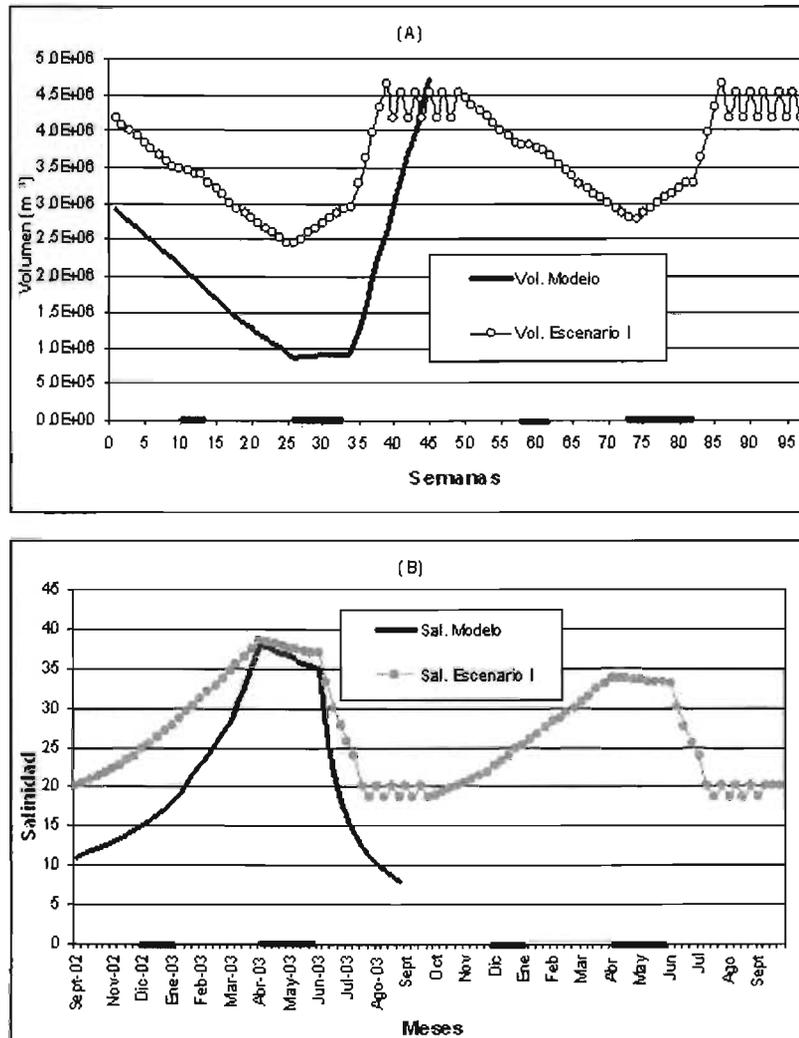


Figura 23. Variación del volumen (A) y salinidad (B) de la laguna Lagartero en el escenario I (cierre de la boca-barra durante el flujo de marea). Los segmentos gruesos indican los períodos de bombeo.

6.7.2 Escenario II. Bombeo continuo, cierre de la boca-barra en flujo de marea

El bombeo constante de agua de mar, considerando que la boca-barra siempre se cierre en el flujo de marea, permite mantener el volumen por encima de los tres millones de metros cúbicos (Figura 24), que condicionan a la laguna para siete semanas de aperturas de la boca-barra en cada período lluvioso, en caso de mantenerse el mismo balance de agua dulce estimado.

No obstante, se mantiene una situación similar al escenario I en cuanto a las salinidades mínimas. Además, la salinidad máxima coincide con la observada durante el estudio (alrededor de 38). En la laguna Lagartero ha disminuido notablemente la productividad pesquera en los últimos cinco años, lo cual ha sido atribuido por la Comunidad de Pescadores de Cacalotepec a la reducción de las aperturas de la boca-barra, pero quizá guarde relación también con una salinización paulatina de la laguna, debido a los cierres durante el flujo de marea.

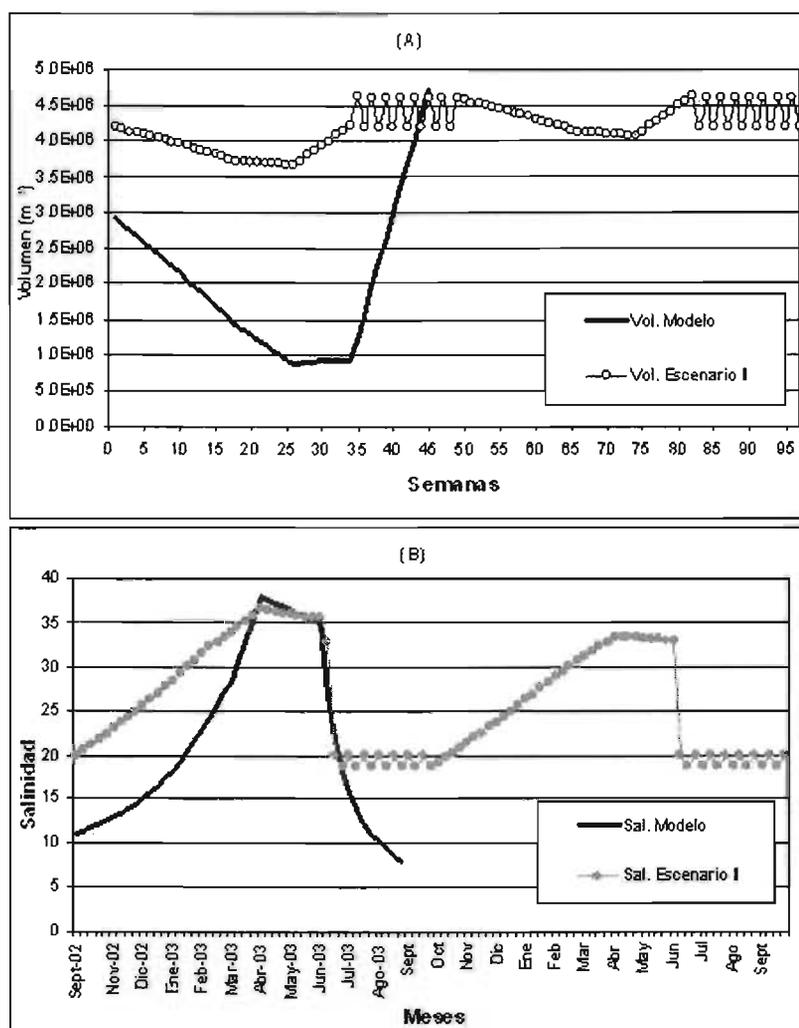


Figura 24. Variación del volumen (A) y salinidad (B) de la laguna Lagartero en el escenario II (cierre de la boca-barra durante el flujo de marea y bombeo continuo).

6.7.3 Escenario III. Bombeo discontinuo, cierre de la boca-barra en reflujos de marea

Si se bombea agua de mar solo en los períodos de máxima concentración de postlarvas en el mar adyacente, pero la barra se cerrara durante el reflujos, solo se induciría una apertura adicional de la boca-barra al año, por tanto, el efecto sobre el volumen de la laguna sería el mínimo (Figura 25). El impacto sobre la salinidad durante el primer año de bombeo sería prácticamente nulo, sin embargo, hacia el segundo año, el ligero aumento en volumen impide que ni siquiera durante la temporada más seca se alcancen salinidades por encima de 28. El análisis de este escenario permite visualizar como pudiera ser igualmente contraproducente para la laguna, el hecho de que la boca-barra solo se cierre continuamente durante el reflujos de marea, ya que las salinidades bajas igualmente pudiera afectar a las especies que completan su ciclo de vida en el interior de la laguna, con requerimientos salinos más elevados (Dall *et al.*, 1990).

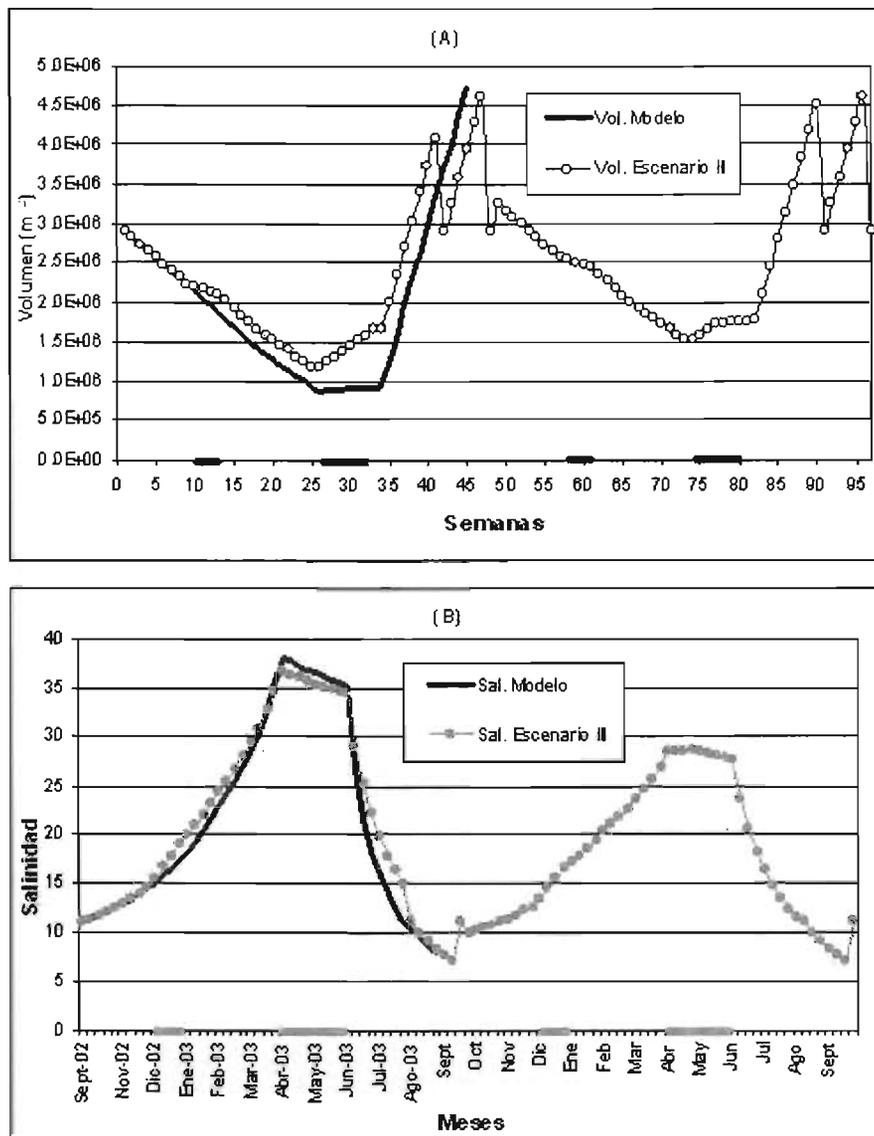


Figura 25. Variación del volumen (A) y salinidad (B) de la laguna Lagartero en el escenario III (cierre de la boca-barra durante el reflujos de marea). Los segmentos gruesos indican los períodos de bombeo.

6.7.4 Escenario IV. Bombeo continuo, cierre de la boca-barra en reflujos de marea

Por medio de este escenario, se producirían tres aperturas de la boca-barra al año, de una semana durante los meses de en julio, agosto y septiembre (Figura 26), lo cual promovería un intercambio con el mar adyacente mayor al observado en los últimos años en la laguna. Además, se mantendrían las salinidades dentro del intervalo históricamente conocido en la laguna Lagartero (9.5-35), que es favorable para el cultivo del camarón (Gámez y de la Lanza, 1992). El efecto más notable del SIBEO a lo largo del año es sobre el volumen, lo cual permite atenuar los niveles extremos de salinidad que se han registrado recientemente en la laguna.

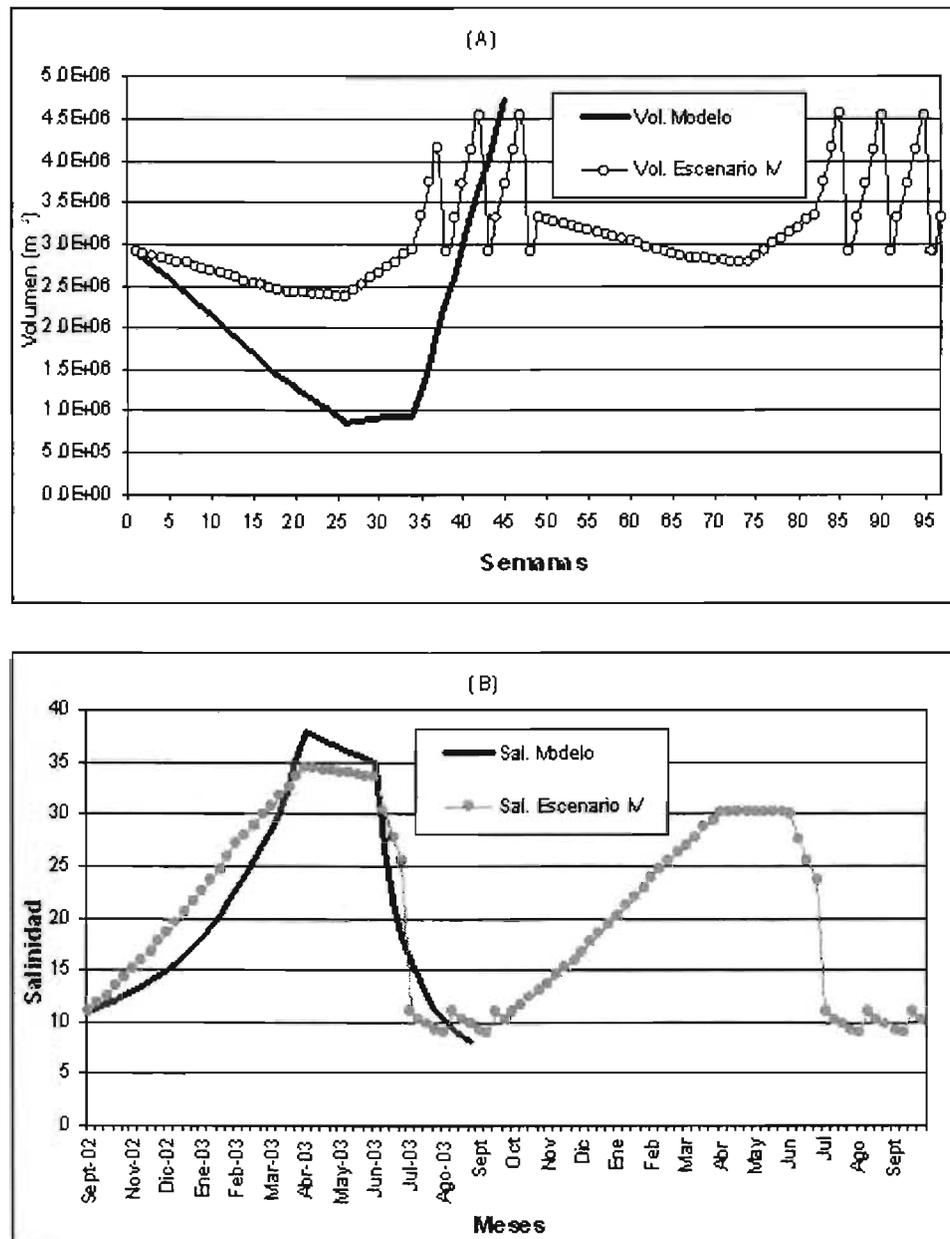


Figura 26. Variación del volumen (A) y salinidad (B) de la laguna Lagartero en el escenario IV (cierre de la boca-barra durante el reflujos de marea y bombeo continuo).

Del análisis de los cuatro escenarios se deduce que la condición del cierre de la boca-barra determinaría el tipo de bombeo en un eventual plan de manejo. El bombeo de agua a través del SIBEO, si bien no impacta negativamente a la laguna desde el punto de vista del volumen y la salinidad, la pudiera acondicionar de forma diferente a partir del número de kilogramos de sales atrapados cuando se cierra la boca-barra.

Por lo anterior, el bombeo de agua por medio del SIBEO pudiera realizarse durante todo el año. No obstante, se debería observar bajo que condiciones se produce el cierre de la boca-barra; en caso de ser durante el flujo de marea, previo al bombeo, se debería sifonear agua con el SIBEO en sentido contrario, hasta que el producto de la salinidad promedio en la laguna por su volumen (masa de sales), sea aproximadamente igual a 29×10^6 Kg, o bien, asociado a la altura de la columna de agua, cuando esta se encuentre un metro por encima de la base del manglar.

Según los cálculos realizados, cuando la laguna se cierra durante el flujo de marea, el volumen de la laguna es $4,184,801 \text{ m}^3$; en reflujos es de $3,463,907 \text{ m}^3$, por lo que el volumen de agua a sifonear sería aproximadamente $720,894 \text{ m}^3$.

6.8 Efecto del SIBEO en el Balance de Nitrógeno y Fósforo

A partir del análisis realizado para el efecto del SIBEO sobre el volumen y la salinidad de la laguna Lagartero en la sección anterior, se deduce que el escenario de bombeo más conveniente es el continuo durante todo el año. Por tanto, para verificar el efecto del SIBEO sobre el balance de nitrógeno y fósforo, se recalcularon los flujos de agua residual, el flujo de mezcla y los presupuestos de N y P, utilizando la variación en el volumen y la salinidad de la laguna correspondiente al ‘escenario 4’ del modelo (bombeo continuo y cierre de la boca-barra en el reflujos de marea), e introduciendo en el cálculo el bombeo de agua de mar con el SIBEO (Tabla 20).

Tabla 20. Balance de agua (F_r^s) y tiempo de residencia hidráulico (τ_{AD}^s) en la laguna Lagartero con el empleo del SIBEO.

| MES | V_{Lag} (10^6 m^3) | V_{Lag}^s (10^6 m^3) | F_r ($10^3 \text{ m}^3/\text{día}$) | F_r^s ($10^3 \text{ m}^3/\text{día}$) | τ_{AD} (días) | τ_{AD}^s (días) |
|------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|--|-----------------------|-------------------------|
| Julio | 2.8 | 3.5 | ---- | -768 | ---- | 5.0 |
| Agosto | 3.3 | 3.3 | ---- | -1201 | ---- | 3.2 |
| Septiembre | 2.8 | 3.7 | -777 | -1071 | 5.1 | 3.6 |

Se aprecia que el bombeo de agua de mar durante un año, debido al aumento de 1.5 veces del volumen de la laguna, hace aumentar en igual proporción el flujo de agua residual. En consecuencia, el tiempo de residencia hidráulico disminuiría notablemente en la laguna. Sin

embargo, el aumento del volumen también condiciona a la laguna para un mayor número de aperturas de la boca-barra, comenzando desde el mes de julio como ya se discutió, lo cual permitiría que el intercambio de aguas en la laguna sea principalmente por las mareas y disminuya ligeramente el tiempo de residencia total (Tabla 21).

Tabla 21. Balance de sales (F_x^s), tiempo de residencia por mareas (τ_{Mar}^s) y total (τ_T^s) en la laguna Lagartero con el empleo del SIBEO.

| MES | F_x (10^3 m ³ /día) | F_x^s (10^3 m ³ /día) | τ_{Mar} (días) | τ_{Mar}^s (días) | τ_T (días) | τ_T^s (días) |
|------------|--|--|------------------------|--------------------------|--------------------|----------------------|
| Julio | ---- | 625 | ---- | 6.2 | ---- | 2.8 |
| Agosto | ---- | 1070 | ---- | 3.6 | ---- | 1.7 |
| Septiembre | 862 | 946 | 4.7 | 4.1 | 2.4 | 1.9 |

Según los cálculos, a pesar del ligero aumento del intercambio de agua con el mar adyacente y la disminución del tiempo de residencia total, la influencia del SIBEO en el balance de sales es limitada. Ello se debe a que el flujo de la bomba es prácticamente despreciable si se compara con el intercambio por mareas. Por la misma razón, el efecto del SIBEO sobre los presupuestos de N y P también fue reducido, aunque en el mes de septiembre, tanto ΔDIN como ΔDIP fueron ligeramente superiores (Tabla 22). La entrada de ambos nutrientes vía el SIBEO fue aproximadamente 10,000 veces menor que el aporte promedio del río Cacalotepec anteriormente calculado (8.5 molNt/día y 1.3 molPt/día).

Tabla 22. Balance de nitrógeno y fósforo en la laguna Lagartero con el empleo del SIBEO

| MUESTREO | ΔDIN (10^3 mol/día) | ΔDIN^s (10^3 mol/día) | ΔDIN^s (10^3 mol/día) | ΔDIP^s (10^3 mol/día) |
|------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Julio | ---- | +28 | ---- | +5.8 |
| Agosto | ---- | +32 | ---- | +4.2 |
| Septiembre | +53.0 | +85 | +6.7 | +9.3 |

Nuevamente el efecto fundamental del SIBEO radica en posibilitar dos aperturas más de la boca-barra y con ello la exportación hacia el mar adyacente de N y P que otra forma quedarían retenidos en la laguna durante todo el ciclo anual. El hecho de que bajo el bombeo continuo el tiempo de residencia total del agua sean solo dos días, garantizaría un recambio total del agua en al menos tres ocasiones en cada una de las aperturas de la boca-barra, que como se determinó anteriormente, durarían una semana cada una.

Si bien no fue objetivo de este estudio el establecer un balance de masas por el manejo acuícola de la laguna Lagartero, se reconoce que las cantidades de nitrógeno y fósforo que se introducirían por la “siembra de postlarvas de camarón” a través del SIBEO, son igualmente despreciables en comparación con los aportes internos y del río Cacalotepec. Los egresos de ambos nutrientes vía la cosecha (formación de biomasa del crustáceo), en cambio, son de particular importancia en varios estanques, ubicados al NO de México, dedicados al cultivo extensivo del camarón (Páez-Osuna, 2001).

Considerando una cosecha mínima de 2,520 Kg de peso seco de camarón (Penié *et al.*, 2004), con una proporción de 11 % de nitrógeno y 1.2 % de fósforo (Páez-Osuna, 2001), se extraerían de la laguna Lagartero 19.8×10^3 mol N/día y 0.9×10^3 mol P/día. Para ambos nutrientes estas cantidades representan aproximadamente la tercera parte del ΔDIN y una menor proporción del ΔDIP , estimados ambos para septiembre de 2003.

En consecuencia, un eventual plan de manejo acuícola de la laguna Lagartero con el SIBEO deberá incluir dicho flujo, por su importancia dentro del balance de nutrientes (Dall *et al.*, 1990; Páez-Osuna, 2001).

Por otra parte, con el bombeo de agua de mar más diluida en nutrientes, existe la posibilidad de un efecto de dilución de las concentraciones de los nutrientes en la laguna. El volumen de agua que inyectaría el SIBEO durante un año, $3,153,600 \text{ m}^3$, representa el 80% del volumen máximo posible en la laguna Lagartero, por lo que el proceso de dilución-mezcla de los nutrientes debe ser significativo y presumiblemente de carácter conservativo, en función de las elevadas concentraciones de nutrientes observadas (Balls, 1997).

Considerando las concentraciones medias de nitrógeno y fósforo en el mar adyacente y en la laguna, se estima que la dilución pudiera resultar de prácticamente el 50% (Tabla 23). Sin embargo, el proceso de dilución y mezcla de las aguas del mar y la laguna estaría influenciado por los procesos biológicos y la resuspensión de los sedimentos, debido a la escasa profundidad de este cuerpo de agua. Esta característica de la laguna condicionaría una inmediata respuesta incluso a los factores meteorológicos, lo cual influye sobre los procesos biogeoquímicos (Santschi *et al.*, 1990; Guerrero-Galván, 1997).

Tabla 23. Dilución conservativa de las concentraciones de nitrógeno y fósforo por el bombeo de agua de mar.

| | MAR | LAGUNA | POSIBLE DILUCIÓN |
|-----------------------------|-------|--------|------------------|
| NITRÓGENO (μM) | 10,65 | 82,53 | 46,59 |
| FÓSFORO (μM) | 2,91 | 20,64 | 11,78 |

Finalmente, el bombeo de agua del mar adyacente implica un beneficio adicional, ante la posibilidad de ventilar las aguas de la laguna con agua más oxigenada del mar adyacente

(Tabla 24). El bombeo, en cambio, igualmente abre la posibilidad de acarrear especies de fitoplancton nocivas, que pudieran provocar mareas rojas, dadas las elevadas concentraciones del fósforo total en la laguna (FAO-SEMARNAT, 1998; Juárez, 2003), por lo que un eventual plan de manejo debería considerar el monitoreo de las características del agua de mar a bombear.

Tabla 24. Concentración de OD en la laguna Lagartero y mar adyacente (% vs.)

| | Sep-02 | Dic-02 | Feb-03 | Abr-03 | Jun-03 | Sep-03 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| OD (Laguna) | ND | 84.7 | 44.3 | 103.5 | 106.5 | 59.7 |
| OD (Mar) | 100.5 | 109.5 | 105.1 | 101.8 | 111.4 | 99.7 |

VII. CONCLUSIONES

1. La variación estacional del volumen y la salinidad en la laguna Lagartero guardan una estrecha relación. Al permanecer la boca-barra de la laguna cerrada la mayor parte del año, en ambos parámetros dominan las entradas y salidas de agua dulce, debido al balance precipitación/evaporación y los escurrimientos terrestres.
2. El modelo de volumen y salinidad elaborado en este estudio es sencillo y reproduce acertadamente el balance hidrológico, el volumen calculado por diferentes métodos y la salinidad observada durante el año de estudio. Permitió analizar diferentes escenarios de manejo, tanto del volumen como la salinidad de la laguna Lagartero, por lo que es una herramienta útil para futuros trabajos relacionados con el SIBEO, en cuerpos de agua de comunicación restringida con el mar adyacente.
3. A partir de los resultados del modelo, se deduce que la fase de marea en que se cierra la boca-barra, define en buena medida el ciclo anual de salinidad. La sucesión de los cierres en el mismo estado de la marea pudiera significar un impacto natural para la laguna, ya que durante cada fase de flujo de marea se introduce por la boca aproximadamente la tercera parte del volumen total de la laguna; durante los meses más secos dicha entrada de agua marina promovería el aumento a salinidades superiores a 40. El caso contrario, cierres sucesivos durante la fase de reflujos de marea, representaría un continuo “lavado” de la laguna Lagartero con una disminución progresiva de la salinidad.
4. Tanto el nitrógeno total ($79 \pm 52 \mu\text{M}$) como el fósforo total ($19 \pm 13 \mu\text{M}$), mantuvieron niveles elevados en la laguna Lagartero, comparados con otras lagunas de México impactadas antrópicamente. Las concentraciones de ambos nutrientes indican que en la laguna durante la mayor parte del año predomina el estado hipertrófico. Sin embargo, la variación estacional de nitrógeno y fósforo en la laguna sugiere que sus aportes por vía subterránea o de la población asentada en sus inmediaciones no son considerables. Los niveles observados no son atribuidos a impactos antropogénicos, sino posiblemente a fuentes internas, como los sedimentos lacustres y la vegetación circundante.
5. El tiempo de residencia del agua en la laguna fue de 2.4 días aproximadamente, con un mayor intercambio por mareas durante los cortos períodos del año en que se encuentra abierta la boca-barra de arena. Durante estos períodos la laguna Lagartero exportó nitrógeno y fósforo de forma neta, con balances promedios de $\Delta\text{DIN} = +53 \times 10^3 \text{ mol/día}$ y $\Delta\text{DIP} = +6.7 \times 10^3 \text{ mol/día}$. En la laguna potencialmente predominaron la desnitrificación y características heterotróficas.
6. El bombeo de agua marina a través del SIBEO influye positivamente en el volumen y salinidad de la laguna Lagartero, al predisponerla para un número mayor de aperturas de su boca-barra. Con las aperturas se favorece la comunicación con el mar adyacente, el

recambio más frecuente del agua y se evitan salinidades extremas en el interior de la laguna.

7. El bombeo continuo es la forma más conveniente de empleo del SIBEO en la laguna Lagartero, siempre que la boca-barra se cierre durante la fase de reflujos de marea. Si la boca-barra se cerrara durante la fase de flujo de marea, se recomienda sifonear agua con la misma bomba, para disminuir la masa de sales en el interior de la laguna hasta 29×10^6 Kg; asociado a la altura de la columna de agua, el sifoneo se realizaría hasta que esta disminuya un metro por encima de la base del manglar. Con este procedimiento el bombeo de agua marina durante un año puede mantener la salinidad de la laguna entre los límites óptimos para el cultivo de camarón (9.5-35).

8. El aporte de nitrógeno y fósforo a través del SIBEO es pequeño y su influencia en el balance de ambos nutrientes reducida. El manejo pesquero de la laguna por medio del SIBEO, en cambio, pudiera inducir la retirada de cantidades considerables de nitrógeno y fósforo, a partir de la pesca de los organismos incorporados a la laguna por el bombeo.

9. Con los resultados obtenidos, se aprecia la conveniencia de emplear el SIBEO como herramienta de manejo costero en la laguna Lagartero; la estabilización de las salinidades y el volumen a niveles convenientes, ventilación de las aguas, así como la dilución de las elevadas concentraciones de nitrógeno y fósforo en la laguna, constituirían efectos positivos a esperarse con el bombeo de agua marina con el SIBEO. El bombeo, no obstante, debería realizarse bajo la observancia de las características del agua, no solo en la laguna, sino en el mar adyacente, ya que las concentraciones de nutrientes, sobre todo del fósforo, son elevadas con tendencia a la hipereutroficación.

VIII. LITERATURA CITADA

Accornero, A; P. Picon, F. Bovee, B. Charriere, y R. Buscail, 2003. Organic carbon budget at the sediment-water interface on the Gulf of Lions continental margin. *Cont. Shelf Res.*, 23 (1), p. 79-92.

Alonso-Rodríguez, R. y F. Páez-Osuna, 2003. La presencia del fitoplancton en los estanques de cultivo de camarón: Composición, abundancia y distribución. En: *Camaronicultura y Medio Ambiente*, Ed. Federico Páez-Osuna. p. 137-158.

Álvarez A. D. y Gaitán M., J. 1994. Geología de las lagunas costeras y el litoral mexicano.. En: De la Lanza E., G y Cacéres M., C. (eds). *Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano*. Universidad Autónoma de Baja California Sur, p. 14-74.

Administración Portuaria Integral (API), 2000. El Puerto de Ensenada y su entorno de Mercado. Administración Portuaria Integral de Ensenada, S. A. de C. V. <http://www.puertoensenada.com.mx>.

Arenas, F. V., 1979. Balance anual de carbono orgánico, fósforo y nitrógeno en el Sistema lagunar Huizache-Caimanero, Sin., México. Tesis Doctoral, UNAM, 114p.

Arenas-Fuentes, V. y G. de la Lanza-Espino, 1990. El metabolismo como determinante de intercambio de nutrientes en sedimentos ricos en materia orgánica en una laguna costera. *Ciencias Marinas*, 16 (3), p. 45-62.

Balls, P. W., 1997. Nutrient behaviour in two contrasting Scottish estuaries in Forth and Tay. *Oceanol. Acta*, 15 (3), p. 261-277.

Bird, E., 1976. Geomorphology of estuarine lagoon systems. *Aus. Mar. Sci. Bull.*, 55, p. 2.

Botello-Ruvalcaba M. y E. Valdez-Holguín, 1999. Estero La Cruz, Sonora: N/P Budget. <http://data.ecology.su.se/MNODE/mexicanlagoons/elcbud.htm>

Bowen J. L. y I. Valiela, 2001. Ecological effect of urbanization of coastal watersheds: historical increases in nitrogen loads and eutrophication of Waquoit bay estuaries. *Can. Jour. of Fish. & Aq. Sci.*, 58, p. 1498-1500.

Camacho-Ibar, V. F.; J. D. Carriquiry y S. V. Smith, 1999. Bahía de San Quintín, B. C.: N/P Budget within compartments in a coastal lagoon. <http://data.ecology.su.se/mnode/mexicanlagoons/bsq.htm>.

Camacho-Ibar, V., 2000. Flujos de C, N y P en la zona costera. Introducción al Modelo de Balances Biogeoquímicos de LOICZ. Presentación de Power Point adjunta a LOICZ Biogeochemical Budgeting Procedures and Examples, 24p <http://data.ecology.su.se/mnode/Methods/powerpoint/ppts.htm>

Camacho-Ibar, V.; J. D. Carriquiry y S. Smith, 2003. Non-conservative P and N fluxes and net ecosystem production in San Quintín Bay, Mexico. *Estuaries*. 26 (5), p. 1220-1237.

CNA-CONACYT, 2004. Convocatoria de Proyectos de Investigación y/o Desarrollo 04/01. Demandas Específicas del Sector. 13 p.

Contreras, F., 1991. Hidrología y Nutrientes en lagunas costeras. En *Físico-química y biología de las lagunas costeras mexicanas*. M. G. Figueroa, C. Álvarez, A. Esquivel M. E. Ponce eds. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. p. 16-24.

- Contreras-Espinosa, F., 1997. Carretas-Pereyra, Chiapas: N/P Budget. <http://data.ecology.su.se/MNODE/mexicanlagoons/cpbbbud.htm>
- Contreras-Espinosa F. y S. Ibarra-Obando, 1994. Chanuto-Panzacola, Chiapas: N/P Budget. <http://data.ecology.su.se/mnode/mexicanlagoons/cpbud.htm>
- Contreras, F.; O. Castañeda, R. Torres y F. Gutiérrez, 1996. Nutrientes en 39 lagunas costeras mexicanas. *Rev. de Biol. Trop.*, 44(2), p. 417-425.
- Contreras F.; L. Castañeda y A. Torres, 1997. Hidrología, nutrientes y productividad primaria en las lagunas costeras del Estado de Oaxaca, México. *Hidrobiológica*, 7, p. 9-17.
- Czitrom, S. P. R., 2000. Implementación de un Sistema de Bombeo por la Energía del Oleaje para el Manejo de Pesquerías. Informe Ejecutivo. UNAM/North American Fund for Environmental Cooperation.
- Czitrom, S. P. R., 2002. Sintonizador para sistemas de energía de oleaje que operan por resonancia. Titular Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. Patente Mexicana No. 210329, otorgada en junio, 2002.
- Czitrom, S. P. R., M. Merino, F. Ruiz y M. A. Alatorre, 1993. Premio León Bialik a la Innovación Tecnológica (CIT, UNAM), por el proyecto "Bombeo de Agua Mediante Ductos Resonantes".
- Czitrom, S.P.R., E. Prado, R. Godoy, R. Rodriguez and R. Peralta-Fabi, 1996. Sea-Water Pumping by Resonance. Second European Wave Power Conference, Lisbon, November 8-10, 1995.
- Dall W.; G. J. Hill, P. C. Rothlisberg and D. J. Sharples, 1990. *Advances in Marine Biology. The biology of the penaeidae*. Vol. 27 Academic Press. 489 p.
- Denis, L y C. Grenz, 2003. Spatial variability in oxygen and nutrient fluxes at the sediment-water interface on the continental shelf in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Oceanol. Acta*, 26 (4), p. 373-389.
- De la Lanza, G., 1991a. Importancia ecológica de los ciclos biogeoquímicos en los sistemas lagunares costeros. En: *Físico-Química y biología de las lagunas costeras mexicanas*. Figueroa-Torres, M. G., C. Alvarez-Silva, A. Esquivel-Herrera y M. E. Ponce-Marquez. Series: Grandes Temas de Hidrología I. UAM-Iztalapalapa, México, p. 7-15.
- De la Lanza, G., 1991b. Ecología de los sistemas acuícola. Bases ecológicas para el desarrollo de la acuicultura. AGT Editor, S. A. p. 28-52.
- De la Lanza, G., 1994. Química de las lagunas costeras y el litoral mexicano. En: De la Lanza E., G. & Cáceres M., C. 1994. *Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano*. Universidad Autónoma de Baja California sur. p. 127-198.
- De la Lanza, G., 2004. Informe parcial sobre la fisico-química y calidad del agua del río Papagayo, Gro. CFE Proyecto hidroelectrico La Parota, 67 p.
- De la Lanza, G. y V. Arenas, 1986. Disponibilidad de nutrimentos a partir de materia orgánica en un sistema lagunar. *Ciencia*. 37, 247-254.
- De la Lanza-Espino, G; F. J. Flores-Verdugo y F. Wulff, 1998. Teacapan-Agua Brava-Marismas Nacionales, Sinaloa and Nayarit: N/P Budget. <http://data.ecology.su.se/MNODE/mexicanlagoons/tabbud.htm>

- De la Lanza, G. y F. Flores, 1998. Nutrient fluxes in sediment (NH_4^+ and PO_4^{3-}) in N.W. coastal lagoon Mexico associated with an agro industrial basin. *Water, Air and Soil Poll.*, 107: 105-120.
- De la Lanza, G. y S. Hernández, 1999. Informe final de fisicoquímica de la laguna Lagartero, Oax. En: Implementation of a Wave Driven Sea Water Pump (SIBEO) to Manage Fisheries and for Coastal Management in Rural Communities. (S. Czitrom, coord.). UNAM/North American Fund for Environmental Cooperation.
- De la Lanza-Espino, G.; I. Penié-Rodríguez y S. Hernández-Pulido, 2004. Variación espaciotemporal del fósforo y el efecto de las corrientes locales en su distribución en la Bahía de Petacalco, Guerrero, México.
- Ecoplaneación Consultores, 1998. Estudios especializados de acuicultura y de ordenamiento ecológico en el Estado de Oaxaca. Secretaría de Pesca, Subsecretaría de Fomento y Desarrollo Pesquero. Contrato No. DGA-EP-43-93. p II-4 - II-35.
- FAO-SEMARNAP, 1995. Estudio piloto para un plan de desarrollo acuícola en el Sistema lagunar Teacapán-Agua Brava. Proyecto UTF/MEX/035 "Modernización del Sector Pesquero. Estudios para el Mejoramiento Productivo de Areas lagunares Costeras. FAO, SEMARNAP, Subsecretaría de Pesca. 161 p.
- FAO-SEMARNAP, 1998. Guía metodológica para el diagnóstico ambiental de campo de granjas camaronícolas: Hacia una Acuicultura Sustentable. Proyecto TCP/MEX/4555 "Camaronicultura para el Sector Social en los Estados de Nayarit y Sinaloa". 44 p.
- Galope-Bacaltos, D. G.; M. L. San Diego-McGlone, G. S. Jacinto y C. L. Villanoy, 1999. Nutrient Behavior and Productivity in a River System Affected by Fishpond Effluents. *Mar. Poll. Bull.*, 39 (1-12), p. 193-199.
- Gámez, S. y G. de la Lanza, 1992. Análisis del estado de la camaronicultura en México hasta el año 1991. México, ISBN 24966-92, primera edición, 1992.
- Garay-Morán, R., 2002. Presupuesto global de la carga de nutrientes que reciben los sistemas lagunares costeros de Sinaloa, como herramienta para la gestión ambiental costera. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
- Godoy, R., 1999. Sintonización de un sistema de bombeo por resonancia con el oleaje. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM.
- Gordon, D. C. Jr., P. R. Boudreau, K. H. Mann, J.-E. Ong, W. L. Silvert, S. V. Smith, G. Wattayakorn, F. Wulff y T. Yanagi. 1996. LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. LOICZ Reports & Studies No. 5. Second Edition, vi +96 pp. LOICZ, Texel, The Netherlands.
- Guerrero-Galván, S. R., 1993. Estudio de la calidad del agua en una granja camaronícola semi-intensiva: flujo de materiales y nutrimentos. Producción de oxígeno por fotosíntesis y consumo por respiración. Tesis de Maestría. Colegio de Ciencias y Humanidades. Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado, UNAM. Mazatlán, Sinaloa. 161p.
- Guerrero-Galván, S. R., 1997. Estudio biogeoquímico de los procesos de mezclado estuarino en una laguna costera subtropical de México. Tesis de Doctorado. Colegio de

- Ciencias y Humanidades. Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado, UNAM. Mazatlán, Sinaloa. 106p.
- Hernández-Ayón, J. M.; V. F. Camacho-Ibar y M. S. Galindo-Bect, 2002. Estero de Punta Banda, Baja California, México (a revision): N/P Budget. <http://data.ecology.su.se/MNODE/mexicanlagoons/PuntaBanda/epb2/epbbud2.htm>
- Ignatiades, L.; M. Karydis y P. Vounatsou, 1992. A possible method for evaluating oligotrophy and eutrophication based on nutrient concentration scales. *Mar. Poll. Bull.*, 24 (5), p. 238-243.
- INEGI, 1996. Anuario estadístico del Estado de Oaxaca. Edición 1996. INEGI-Gobierno del Estado de Oaxaca. 714 p.
- INEGI, 2000. Inventario nacional de recursos naturales. Cubierta Vegetal. Escala 1:250 000. Puerto Escondido. D14-3.
- Isaaks, E. y M. Srivastava, 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press. New York, 561 p.
- Juárez N., 2003. Implementación del sistema de imágenes satelitales para la predicción de mareas rojas, en el suroeste de México. Proyecto Interno del Instituto Nacional de la Pesca, Dirección General de Investigación y Desarrollo Tecnológico Pesquero. 38p.
- Justic', D.; N. N. Rabalais, E. Turner, Q. Dortch, 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Est., Coast. and Shelf Sci.*, 40, p. 339-356.
- Karydis; L. Ignatiades y N. Moschopoulou, 1983. An index associated with nutrient eutrophication in the marine environment. *Est., Coast. and Shelf Sci.*, 16, p. 339-344.
- Kiddon, J. A.; J. F. Paul, H. W. Buffum, Ch. S. Strobel, S. S. Hale, D. Cobb y B. S. Brown, 2003. Ecological condition of US Mid-Atlantic estuaries, 1997-1998. *Mar. Poll. Bull.*, 46, 1224-1244.
- Latournerie, J. R.; F. Calderón, S. Abundes, J. Pacheco y O. Zárate, 1995. Aspectos preliminares de las características físico-químicas de dos lagunas costeras del litoral oaxaqueño. *Res. XIII Congr. Nal. de Zool.* 161p.
- Lechuga-Devéze, C. H., 1990. Ensenada de La Paz, Baja California Sur: N/P Budget. <http://data.ecology.su.se/MNODE/mexicanlagoons/elpbud.htm>
- Lechuga-Devéze, C. H., 1998. Bahía Concepción, Baja California Sur: N/P Budget. <http://data.ecology.su.se/MNODE/mexicanlagoons/bcbud.htm>.
- Li, M. S., 1997. Nutrient dynamic of a fustian mangrove forest in Shenzhen, South China. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences.* 45, p. 463-472.
- LOICZ-IGBP, 2004. LOICZ-Biogeochemical Modelling Node. Clickable maps of budgets worldwide. <http://data.ecology.su.se/MNODE/wmap.htm>.
- Merino, M., y F. Ruiz, 1987. Research advances on the Nichupté Lagoon System, leading to its management. En: *Proceedings of the first Australia-Mexico meeting on Marine Sciences.* Ed. E. Chávez, Mérida, Yucatán, México.

- Meybeck, M., 1982. Carbon, nitrogen and phosphorous transport by world rivers. *Amer. Jour. of Sci.* 282, p. 401-450.
- Nixon, S. W.; C. A. Oviatt y S. S. Hale, 1976. Nitrogen regeneration and metabolism of coastal marine bottom communities. En: Anderson J. M. y A. Mc Fayden eds. *The role of terrestrial and aquatic organism in decomposition processes*. Blackwell Scient. Pub., p. 269-283.
- Nowicki, B. L.; E. Quintana, D. Van Keuren y J. Portnoy, 1999. The role of sediment denitrification in reducing groundwater-derived nitrate inputs to Nauset Marsh Estuary, Cape Cod, Massachusetts. *Estuaries*. 22 (2A), p. 245-259.
- Osuna, V., I. Penié y E. Márquez, 1999. Subproyecto de biología pesquera. En: *Implementation of a Wave Driven Sea Water Pump (SIBEO) to Manage Fisheries and for Coastal Management in Rural Communities*. (S. Czitrom, coord.). UNAM/North American Fund for Environmental Cooperation.
- Oviatt, C. A.; C. D. Hunt, G. A. Vargo y K. W. Kopchynski, 1981. Simulation of a store event in marine microcosms. *Jour. of Mar. Res.*, 39 (4), p. 605-626.
- Páez-Osuna, F., 2001. Flujos y balance de nutrientes en estanques camaronícolas. En *Camaronicultura y Medio Ambiente*, Ed. Federico Páez-Osuna. p. 177-192.
- Páez-Osuna, F.; S.R. Guerrero-Galván, A.C. Ruíz-Fernández & R. Espinoza-Angulo, 1997. Fluxes ad mass balances of nutrients in a semi-intensive shrimp farm in north-western México. *Mar. Poll. Bull.*, 34 (5): 290-297.
- Penié, I.; S. P. R. Czitrom, G. de la Lanza y V. Osuna-Salazar, 2004. Aqua-culture management in a coastal lagoon using a wave-driven seawater pump. En Prensa.
- Pennifold, M. y J. Davis, 2001. Macrofauna and nutrient cycling in the Swan River Estuary, western Australia: experimental results. *Hydrol. Process*, 15 (13), p. 2537-2553.
- Poumian-Tapia, M.; S. Ibarra-Obando, y V. F. Camacho-Ibar, 1997. Arid Pacific and Gulf of California Coasts: Estero de Punta Banda, Baja California. Pag. 4-8 en Smith, S.V., Marshall Crossland, J.I. and Crossland, C.J. (eds): *Comparison of carbon, nitrogen and phosphorus fluxes in Mexican coastal lagoons*. LOICZ Reports and Studies No. 10, LOICZ, Texel, Holanda.
- Quiñónez F. y S. Guzmán, 1986. Técnicas de investigación de recursos de agua. Determinación del Caudal y técnicas de muestreo de agua superficial. United State Geological Survey. WRIR, 85-89.
- Reckhow, K. H. y S. C. Chapra, 1999. Modeling excessive nutrient loading in the environment. *Environmental Pollution*. 100, p. 197-207.
- Reid, A., M. Varela y G. Lara, 1999. Subproyecto de Vida cotidiana, gestión y educación ambiental. Participación comunitaria y talleres ambientales. En: *Implementation of a Wave Driven Sea Water Pump (SIBEO) to Manage Fisheries and for Coastal Management in Rural Communities*. (S. Czitrom, coord.). UNAM/North American Fund for Environmental Cooperation.
- Rodríguez, N. y F. Ziga, 1999. Subproyecto de Organizaciones socio-económicas. Población y relaciones sociales de la región costera. En: *Implementation of a Wave Driven*

Sea Water Pump (SIBEO) to Manage Fisheries and for Coastal Management in Rural Communities. (S. Czitrom, coord.). UNAM/North American Fund for Environmental Cooperation.

Sanay, R.; A. Monreal y D. Salas de León, 1998. Circulación por marea en el Sistema lagunar Chacahua-Pastoría, Oaxaca. Res. XI Congr. Nal. de Oceanog. UABC. Ensenada, B. C.

San Diego-Mc Glone, M. L.; S. V. Smith y V. F. Nicolas, 2000. Stoichiometric interpretations of C:N:P ratios in organic waste materials. *Marine Pollution Bulletin*. 40 (4), p. 325-330.

Sholkovitz, E. R., 1976. Flocculation of dissolved organic and inorganic matter during the mixing river water and sea water. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 40, p. 831-845.

Smith, S. V. y J. T. Hollibaugh, 1997. Tomales Bay, California, USA: N/P Budget. <http://data.ecology.su.se/MNODE/North%20America/TOMALES.HTM>

Smith, V. H.; G. D. Tilman y J. C. Nekola, 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on fresh, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*. 100, p. 179-196.

SMN, 2004. Servicio Meteorológico Nacional. <http://www/smn.cna.gob.mx/>. Enero, 2004

Spiegel, M. R. 1961. Teoría y problemas de estadística. Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 358 p.

Staines, U. F. y E. C. Rodríguez, 2000. Transporte litoral y cambios morfo-batimétricos de dos sistemas lagunares en Oaxaca. Res. XII Congr. Nal. De Oceanog. 22 al 26 de mayo, Huatulco, Oax., México.

Stern, K. M.; J. W. Day Jr. y K. G. Teague, 1986. Seasonality of materials transport through a coastal freshwater marsh: Riverine vs. tidal forcing. *Estuaries*, 9 (4A), p. 301-308.

Strickland, J. D. H., y T. R. Parsons, 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. Bull. 167. Fish. Res. Board, Canada, Ottawa, 310 p.

Sudermann, J. y G. Radach, 1997. Fluxes and budgets of contaminants in the German Bight. *Mar. Poll. Bull.* 34 (6): 395-397.

Tovilla-Hernández, C. y G. de la Lanza-Espino, 2001. Balance hidrológico de un humedal costero del Pacífico sur de México. *Hidrobiológica*, 11 (2), p. 133-140.

UNESCO, 1973. International Oceanographic Tables. National Institute of Oceanography of Great Britain. Inglaterra, Francia, 2, 148p.

Valdés-Lozano, D. S., 1995. Procesos que regulan el nitrógeno inorgánico y variaciones estacionales en la laguna de Chelem, Yucatán. Tesis de Doctorado. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

Wafar, M. V. M.; P. Corre y J. L. Birrien, 1989. Transport of carbon, nitrogen and phosphorous in a Brittany River, France. *Est. Coast. and Shelf Sci.*, 29 (5), p 489-500.

Wang, D.; Z. Chen, C. Qian, y S. Xu, 2002. Effect of salinity on NH_4^+ exchange behavior at the sediment-water interface in east Chongming tidal flat. *Mar. Environ. Sci.*, 21(3), p. 5-9.

Webster, I. T.; J. S. Parslow y S. V. Smith, 2000. Implications of spatial and temporal variation for biogeochemical budgets of estuaries. *Estuaries*, 23 (3), p. 241- 350.

Wei, H.; L. Chunchu y L. Yaping, 2001. Progress of research on dynamical geomorphology in barrier-lagoon coast. *Journal of oceanography in Taiwan Strait/Taiwan Haixia*. Xiamen, 20 (4), p. 565-572.

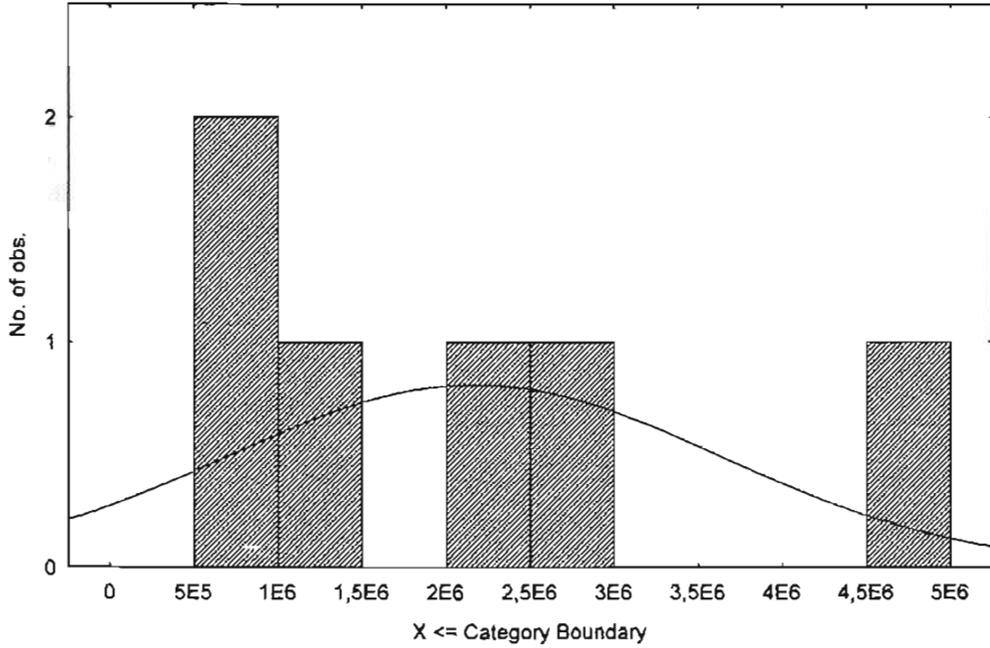
Weijden, V. D. H. y J. Middelburg, 1989. Hydrogeochemistry of the river Rhin: long term and seasonal variability, elemental budgets, base levels and pollution. *Water Res.* 23 (10), p. 1247-1266.

Yamamuro, M., 2000. Chemical tracers of sediment organic matter origins in two coastal lagoons. *Journal of Marine Systems*, 26, p. 127-134.

IX. ANEXOS

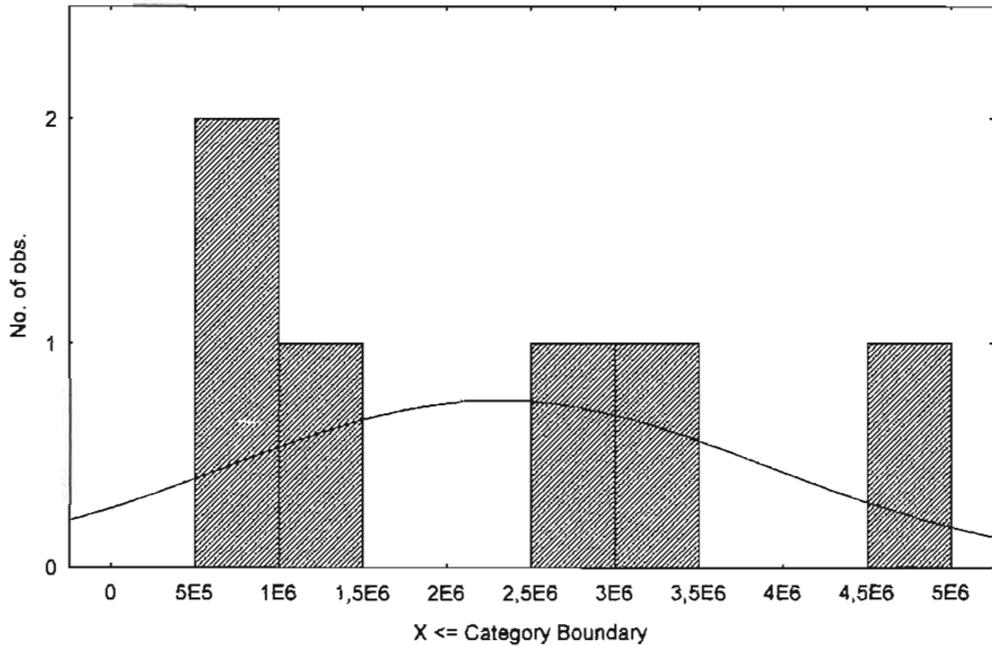
Anexo 1 Histogramas de frecuencia

Histograma: Modelos
 K-S d=,19544, p> .20; Lilliefors p> .20
 — Expected Normal

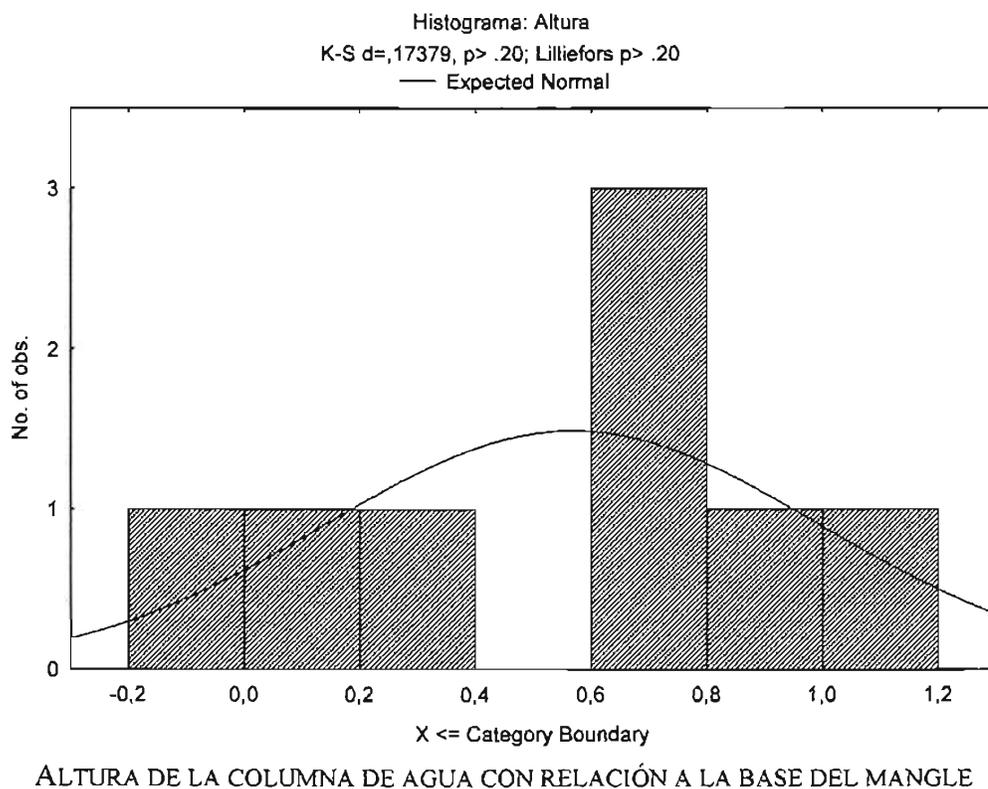
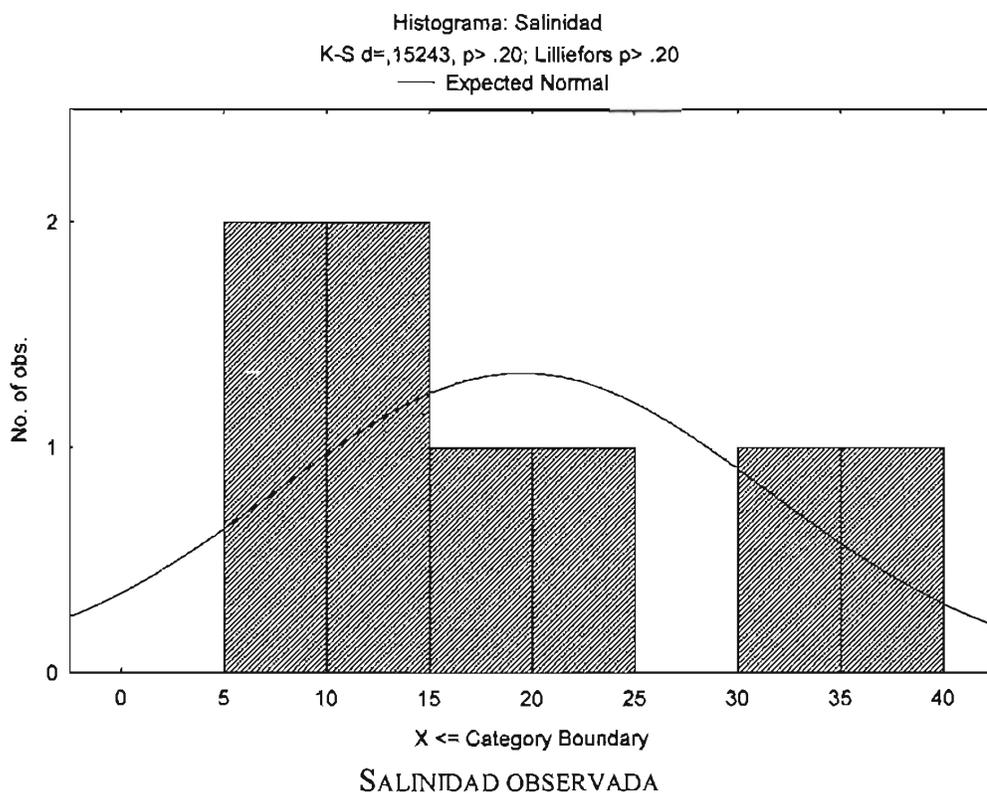


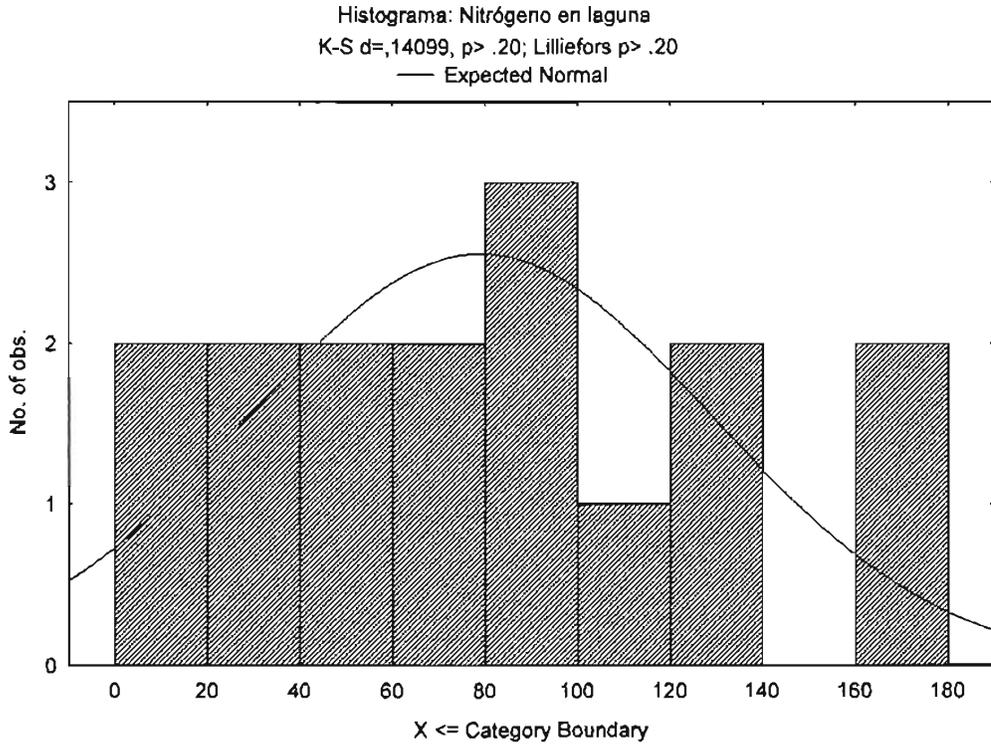
VOLUMEN DETERMINADO POR EL MODELO

Histograma: Conos
 K-S d=,20186, p> .20; Lilliefors p> .20
 — Expected Normal

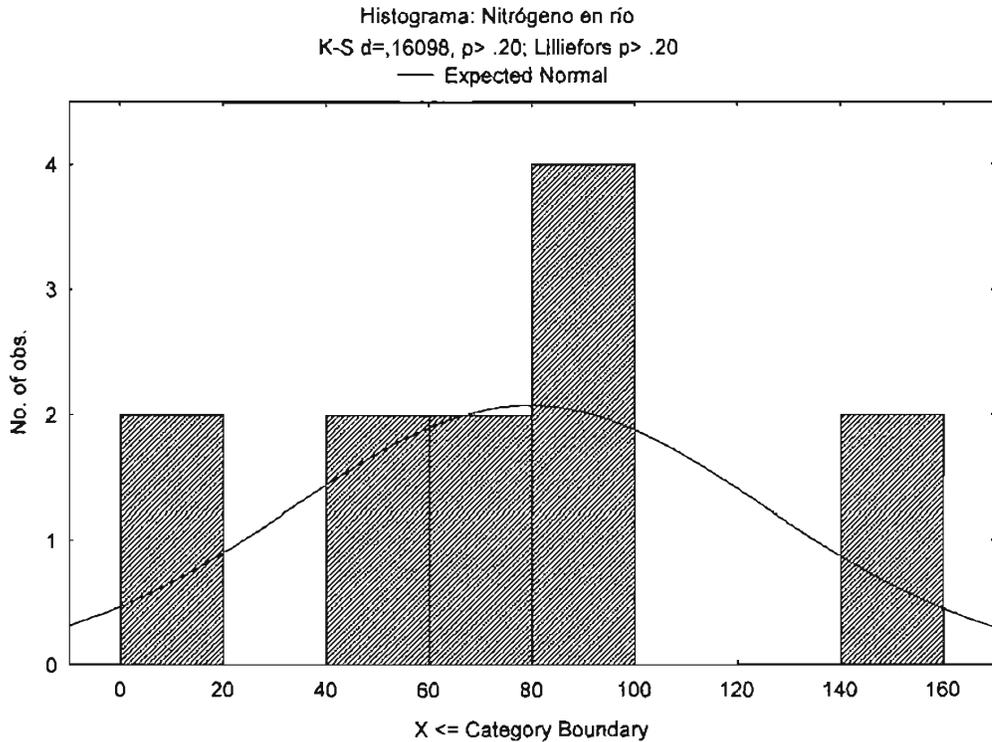


VOLUMEN DETERMINADO POR EL MÉTODO DE LOS CONOS





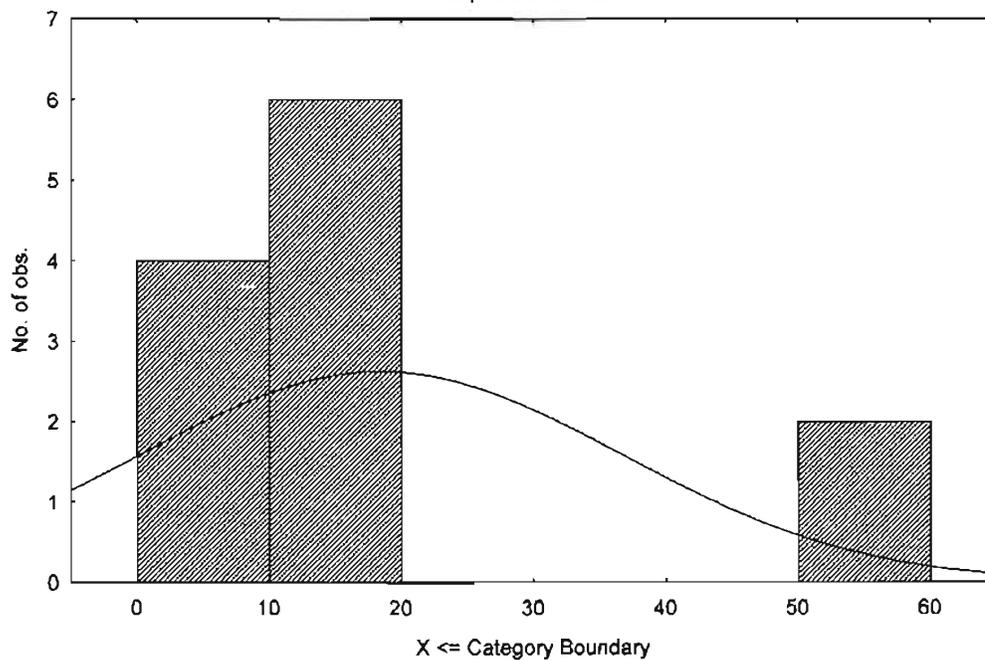
NITRÓGENO TOTAL EN LA LAGUNA LAGARTERO



NITRÓGENO TOTAL EN EL RÍO CACALOTEPEC

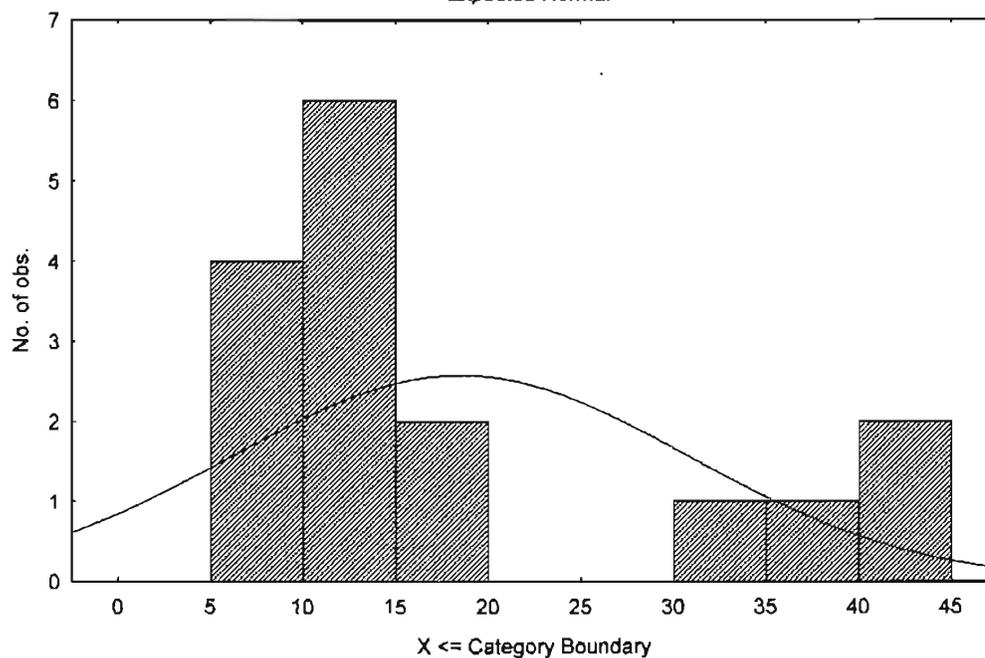
ESTA TESIS NO SALE
 DE LA BIBLIOTECA

Histograma: Nitrógeno en mar
 K-S d=,42459, p<,05 ; Lilliefors p<,01
 — Expected Normal



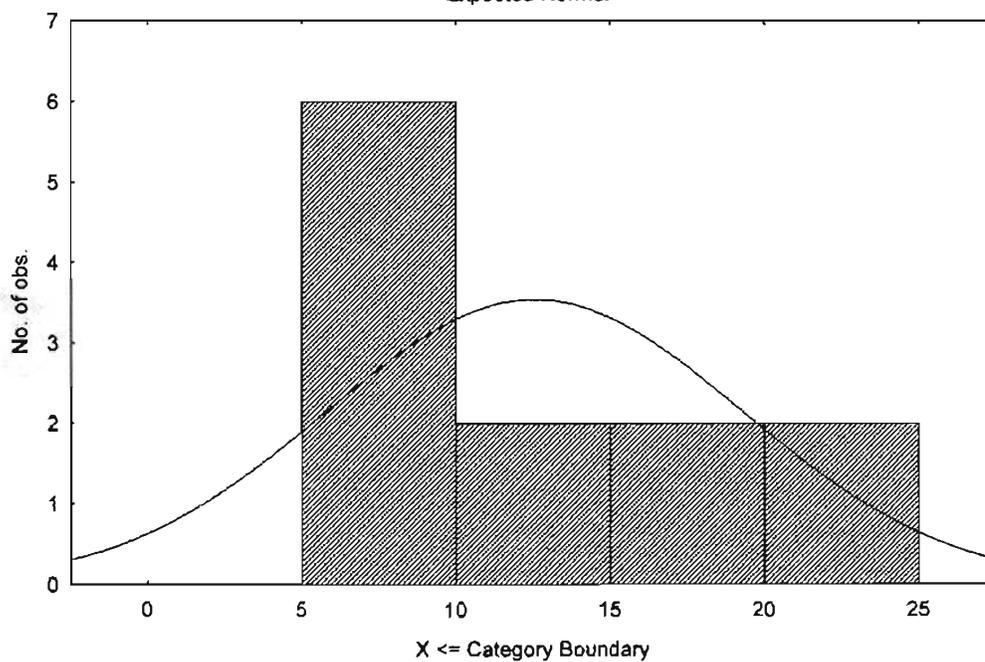
NITRÓGENO TOTAL EN EL MAR

Histograma: Fósforo en laguna
 K-S d=,35571, p<,05 ; Lilliefors p<,01
 — Expected Normal



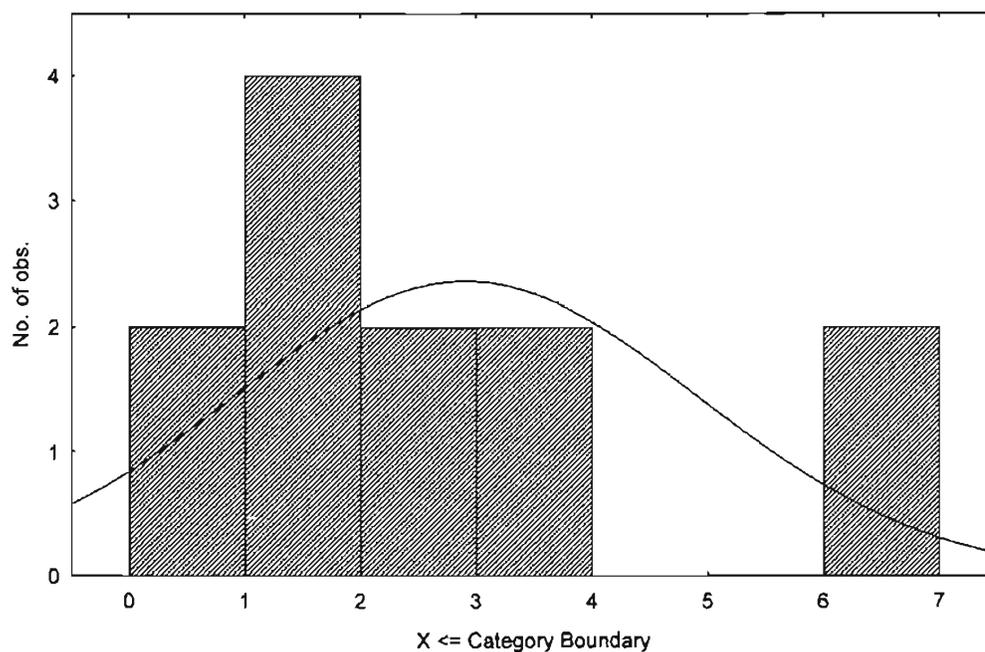
FÓSFORO TOTAL EN LA LAGUNA LAGARTERO

Histograma: Fósforo en río
 K-S d=,27324, p> .20; Lilliefors p<,05
 — Expected Normal



FÓSFORO TOTAL EN EL RÍO CACALOTEPEC

Histograma: Fósforo en Mar
 K-S d=,26221, p> .20; Lilliefors p<,05
 — Expected Normal



FÓSFORO TOTAL EN EL MAR

Anexo 2 Datos de volumen y salinidad en la calibración del modelo. La fila sombreada representa la de apertura de la boca-barra de arena.

| AD (m ³ /s) | Vol. Modelo (m ³) | Sal. Modelo | Sal. Real | Fecha | Semanas |
|---------------------------|----------------------------------|-------------|-----------|---------|---------|
| 0.0000 | 2,905,986 | 11.0000 | 11 | Sept-02 | 1 |
| -0.1404 | 2,821,072 | 11.3361 | | | 2 |
| -0.1404 | 2,736,158 | 11.6935 | | | 3 |
| -0.1404 | 2,651,244 | 12.0740 | | | 4 |
| -0.1404 | 2,566,330 | 12.4802 | | | 5 |
| -0.1404 | 2,481,416 | 12.9147 | | Nov-02 | 6 |
| -0.1404 | 2,396,502 | 13.3805 | | | 7 |
| -0.1404 | 2,311,588 | 13.8811 | | | 8 |
| -0.1404 | 2,226,674 | 14.4207 | | | 9 |
| -0.1404 | 2,141,761 | 15.0039 | 15 | Dic-02 | 10 |
| -0.1505 | 2,050,720 | 15.6850 | | | 11 |
| -0.1505 | 1,959,679 | 16.4309 | | | 12 |
| -0.1505 | 1,868,639 | 17.2512 | | | 13 |
| -0.1505 | 1,777,598 | 18.1578 | | Ene-03 | 14 |
| -0.1505 | 1,686,558 | 19.1649 | | | 15 |
| -0.1505 | 1,595,517 | 20.2902 | | | 16 |
| -0.1505 | 1,504,477 | 21.5560 | | | 17 |
| -0.1505 | 1,413,436 | 22.9901 | 23 | Feb-03 | 18 |
| -0.1126 | 1,345,336 | 24.1838 | | | 19 |
| -0.1126 | 1,277,235 | 25.5083 | | | 20 |
| -0.1126 | 1,209,135 | 26.9862 | | | 21 |
| -0.1126 | 1,141,034 | 28.6458 | | Mar-03 | 22 |
| -0.1126 | 1,072,934 | 30.5229 | | | 23 |
| -0.1126 | 1,004,833 | 32.6633 | | | 24 |
| -0.1126 | 936,733 | 35.1263 | | | 25 |
| -0.1126 | 868,632 | 37.9911 | 38 | Abr-03 | 26 |
| 0.0154 | 877,946 | 37.5902 | | | 27 |
| 0.0154 | 887,260 | 37.1976 | | | 28 |
| 0.0154 | 896,574 | 36.8132 | | | 29 |
| 0.0154 | 905,888 | 36.4366 | | May-03 | 30 |
| 0.0154 | 915,202 | 36.0677 | | | 31 |
| 0.0154 | 924,516 | 35.7062 | | | 32 |
| 0.0154 | 933,830 | 35.3518 | | | 33 |
| 0.0154 | 943,144 | 35.0044 | 35 | Jun-03 | 34 |
| 0.5680 | 1,286,670 | 26.8022 | | | 35 |
| 0.5680 | 1,630,197 | 21.7097 | | | 36 |
| 0.5680 | 1,973,723 | 18.2417 | | | 37 |
| 0.5680 | 2,317,249 | 15.7283 | | Jul-03 | 38 |
| 0.5680 | 2,660,776 | 13.8233 | | | 39 |
| 0.5680 | 3,004,302 | 12.3297 | | | 40 |
| 0.5680 | 3,347,829 | 11.1273 | | | 41 |
| 0.5680 | 3,691,355 | 10.1384 | | Ago-03 | 42 |
| 0.5680 | 4,034,881 | 9.3110 | | | 43 |
| 0.5680 | 4,378,408 | 8.6084 | | | 44 |
| 0.5680 | 4,721,934 | 8.0043 | 8 | | 45 |

Anexo 3 Volumen y salinidad en los escenarios de bombeo con el SIBEO. Las filas sombreadas representan aperturas de la boca-barra de arena.

Escenario I

| S _{Mar} | AD | Bombeo | Vol. salida | Vol. Modelo | Sal. Modelo | Sal. Real | Fecha | Semanas |
|------------------|---------|--------|-------------|-------------|-------------|-----------|---------|---------|
| 32 | 0.0000 | 0 | 0 | 4,184,801 | 20.0000 | 11 | Sept-02 | 1 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 4,099,887 | 20.4185 | | | 2 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 4,014,973 | 20.8550 | | | 3 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 3,930,059 | 21.3105 | | | 4 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 3,845,145 | 21.7863 | | | 5 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 3,760,232 | 22.2839 | | Nov-02 | 6 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 3,675,318 | 22.8047 | | | 7 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 3,590,404 | 23.3505 | | | 8 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 3,505,490 | 23.9230 | | | 9 |
| 32 | -0.1404 | 0.1 | 0 | 3,481,056 | 24.6580 | 15 | Dic-02 | 10 |
| 32 | -0.1505 | 0.1 | 0 | 3,450,495 | 25.4497 | | | 11 |
| 32 | -0.1505 | 0.1 | 0 | 3,419,935 | 26.2555 | | | 12 |
| 32 | -0.1505 | 0.1 | 0 | 3,389,374 | 27.0758 | | | 13 |
| 32 | -0.1505 | 0 | 0 | 3,298,334 | 27.8336 | | Ene-03 | 14 |
| 32 | -0.1505 | 0 | 0 | 3,207,293 | 28.6350 | | | 15 |
| 32 | -0.1505 | 0 | 0 | 3,116,253 | 29.4839 | | | 16 |
| 32 | -0.1505 | 0 | 0 | 3,025,212 | 30.3847 | | | 17 |
| 33 | -0.1505 | 0 | 0 | 2,934,172 | 31.3422 | 23 | Feb-03 | 18 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 2,866,071 | 32.0958 | | | 19 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 2,797,971 | 32.8866 | | | 20 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 2,729,870 | 33.7173 | | | 21 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 2,661,770 | 34.5911 | | Mar-03 | 22 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 2,593,669 | 35.5114 | | | 23 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 2,525,569 | 36.4819 | | | 24 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 2,457,468 | 37.5071 | | | 25 |
| 34 | -0.1126 | 0.1 | 0 | 2,449,848 | 38.4754 | 38 | Abr-03 | 26 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 2,519,642 | 38.2265 | | | 27 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 2,589,436 | 37.9911 | | | 28 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 2,659,229 | 37.7679 | | | 29 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 2,729,023 | 37.5561 | | May-03 | 30 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 2,798,817 | 37.3548 | | | 31 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 2,868,611 | 37.1633 | | | 32 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 2,938,405 | 36.9808 | | | 33 |
| 34 | 0.0154 | 0 | 0 | 2,947,719 | 36.8641 | 35 | Jun-03 | 34 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 3,291,245 | 33.2104 | | | 35 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 3,634,772 | 30.2154 | | | 36 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 3,978,298 | 27.7158 | | | 37 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,321,825 | 25.5980 | | Jul-03 | 38 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,665,351 | 23.7809 | | | 39 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 1.36256 | 4,184,801 | 20.0000 | | | 40 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,528,327 | 18.5389 | | | 41 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 1.136 | 4,184,801 | 20.0000 | | Ago-03 | 42 |

| | | | | | | | | |
|----|---------|-----|-------|-----------|---------|----|------|----|
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,528,327 | 18.5389 | | | 43 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 1.136 | 4,184,801 | 20.0000 | | | 44 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,528,327 | 18.5389 | 8 | | 45 |
| 32 | 0.5680 | 0 | 1.136 | 4,184,801 | 20.0000 | | Sept | 46 |
| 32 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,528,327 | 18.5389 | | | 47 |
| 32 | 0.5680 | 0 | 1.136 | 4,184,801 | 20.0000 | | | 48 |
| 32 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,528,327 | 18.5389 | | | 49 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 4,443,413 | 18.8966 | | Oct | 50 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 4,358,500 | 19.2683 | | | 51 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 4,273,586 | 19.6550 | | | 52 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 4,188,672 | 20.0575 | | | 53 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 4,103,758 | 20.4769 | | Nov | 54 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 4,018,844 | 20.9141 | | | 55 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 3,933,930 | 21.3705 | | | 56 |
| 32 | -0.1404 | 0 | 0 | 3,849,016 | 21.8472 | | | 57 |
| 32 | -0.1404 | 0.1 | 0 | 3,824,582 | 22.5024 | | Dic | 58 |
| 32 | -0.1505 | 0.1 | 0 | 3,794,022 | 23.2045 | | | 59 |
| 32 | -0.1505 | 0.1 | 0 | 3,763,461 | 23.9179 | | | 60 |
| 32 | -0.1505 | 0.1 | 0 | 3,732,900 | 24.6430 | | | 61 |
| 32 | -0.1505 | 0 | 0 | 3,641,860 | 25.2668 | | Ene | 62 |
| 32 | -0.1505 | 0 | 0 | 3,550,819 | 25.9230 | | | 63 |
| 32 | -0.1505 | 0 | 0 | 3,459,779 | 26.6142 | | | 64 |
| 32 | -0.1505 | 0 | 0 | 3,368,738 | 27.3432 | | | 65 |
| 33 | -0.1505 | 0 | 0 | 3,277,698 | 28.1134 | | Feb | 66 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 3,209,597 | 28.7162 | | | 67 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 3,141,497 | 29.3455 | | | 68 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 3,073,396 | 30.0030 | | | 69 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 3,005,296 | 30.6907 | | Mar | 70 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 2,937,195 | 31.4106 | | | 71 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 2,869,095 | 32.1650 | | | 72 |
| 33 | -0.1126 | 0 | 0 | 2,800,994 | 32.9566 | | | 73 |
| 34 | -0.1126 | 0.1 | 0 | 2,793,374 | 33.7931 | | Abr | 74 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 2,863,168 | 33.6877 | | | 75 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 2,932,962 | 33.5873 | | | 76 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 3,002,756 | 33.4916 | | | 77 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 3,072,550 | 33.4002 | | May | 78 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 3,142,344 | 33.3129 | | | 79 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 3,212,137 | 33.2293 | | | 80 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 3,281,931 | 33.1493 | | | 81 |
| 34 | 0.0154 | 0 | 0 | 3,291,245 | 33.0556 | | Jun | 82 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 3,634,772 | 30.0746 | | | 83 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 3,978,298 | 27.5866 | | | 84 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,321,824 | 25.4787 | | | 85 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,665,351 | 23.6701 | | Jul | 86 |
| 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 |

| | | | | | | | | |
|----|--------|---|-------|-----------|---------|--|------|----|
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,528,327 | 18.5389 | | Ago | 90 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 1.136 | 4,184,801 | 20.0000 | | | 91 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,528,327 | 18.5389 | | | 92 |
| 34 | 0.5680 | 0 | 1.136 | 4,184,801 | 20.0000 | | | 93 |
| 32 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,528,327 | 18.5389 | | Sept | 94 |
| 32 | 0.5680 | 0 | 1.136 | 4,184,801 | 20.0000 | | | 95 |
| 32 | 0.5680 | 0 | 0 | 4,528,327 | 20.0000 | | | 96 |
| 32 | 0.5680 | 0 | 1.136 | 4,184,801 | 20.0000 | | | 97 |

Escenario II

| S _{MAR} | AD | Bombeo | Vol. salida | Vol. Modelo | Sal. Modelo | Sal. Real | Fecha | Semanas |
|------------------|--------|--------|-------------|-------------|-------------|-----------|---------|---------|
| 32 | 0 | 0.1 | 0 | 4,184,801 | 20 | 11 | Sept-02 | 1 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,160,367 | 20.59122 | | | 2 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,135,933 | 21.189327 | | | 3 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,111,499 | 21.79445 | | | 4 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,087,065 | 22.40672 | | | 5 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,062,632 | 23.026273 | | Nov-02 | 6 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,038,198 | 23.653245 | | | 7 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,013,764 | 24.287778 | | | 8 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 3,989,330 | 24.930014 | | | 9 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 3,964,896 | 25.580102 | 15 | Dic-02 | 10 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 3,934,335 | 26.280122 | | | 11 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 3,903,775 | 26.991068 | | | 12 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 3,873,214 | 27.713203 | | | 13 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 3,842,654 | 28.446799 | | Ene-03 | 14 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 3,812,093 | 29.192136 | | | 15 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 3,781,533 | 29.949503 | | | 16 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 3,750,972 | 30.719199 | | | 17 |
| 33 | -0.151 | 0.1 | 0 | 3,720,412 | 31.518207 | 23 | Feb-03 | 18 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 3,712,791 | 32.126246 | | | 19 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 3,705,171 | 32.736712 | | | 20 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 3,697,550 | 33.349621 | | | 21 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 3,689,930 | 33.964992 | | Mar-03 | 22 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 3,682,309 | 34.582842 | | | 23 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 3,674,689 | 35.203189 | | | 24 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 3,667,068 | 35.826051 | | | 25 |
| 34 | -0.113 | 0.1 | 0 | 3,659,448 | 36.468265 | 38 | Abr-03 | 26 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 3,729,242 | 36.33739 | | | 27 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 3,799,036 | 36.211311 | | | 28 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 3,868,829 | 36.089771 | | | 29 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 3,938,623 | 35.972528 | | May-03 | 30 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,008,417 | 35.859359 | | | 31 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,078,211 | 35.750055 | | | 32 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,148,005 | 35.644422 | | | 33 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,217,799 | 35.542277 | 35 | Jun-03 | 34 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,621,805 | 32.977574 | | | 35 |

| | | | | | | | | |
|----|--------|-----|--------|-----------|-----------|---|--------|----|
| 34 | 0.568 | 0.1 | 1.3906 | 4,184,801 | 20 | | | 36 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.729436 | | | 37 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | Jul-03 | 38 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.729436 | | | 39 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | | 40 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.729436 | | | 41 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | Ago-03 | 42 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.729436 | | | 43 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | | 44 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.729436 | 8 | | 45 |
| 32 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | Sept | 46 |
| 32 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.704767 | | | 47 |
| 32 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | | 48 |
| 32 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.704767 | | | 49 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,564,373 | 19.236324 | | Oct | 50 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,539,940 | 19.773514 | | | 51 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,515,506 | 20.316434 | | | 52 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,491,072 | 20.865182 | | | 53 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,466,638 | 21.419858 | | Nov | 54 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,442,204 | 21.980564 | | | 55 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,417,770 | 22.547406 | | | 56 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,393,336 | 23.120489 | | | 57 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 4,368,902 | 23.699922 | | Dic | 58 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 4,338,342 | 24.320975 | | | 59 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 4,307,781 | 24.950802 | | | 60 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 4,277,220 | 25.589596 | | | 61 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 4,246,660 | 26.237552 | | Ene | 62 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 4,216,099 | 26.894875 | | | 63 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 4,185,539 | 27.561774 | | | 64 |
| 32 | -0.151 | 0.1 | 0 | 4,154,978 | 28.238461 | | | 65 |
| 33 | -0.151 | 0.1 | 0 | 4,124,418 | 28.940184 | | Feb | 66 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 4,116,797 | 29.483597 | | | 67 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 4,109,177 | 30.02896 | | | 68 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 4,101,556 | 30.576286 | | | 69 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 4,093,936 | 31.125588 | | Mar | 70 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 4,086,315 | 31.67688 | | | 71 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 4,078,695 | 32.230173 | | | 72 |
| 33 | -0.113 | 0.1 | 0 | 4,071,074 | 32.785482 | | | 73 |
| 34 | -0.113 | 0.1 | 0 | 4,063,454 | 33.35796 | | Abr | 74 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,133,248 | 33.29225 | | | 75 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,203,042 | 33.228719 | | | 76 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,272,836 | 33.167262 | | | 77 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,342,630 | 33.107777 | | May | 78 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,412,424 | 33.050171 | | | 79 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,482,217 | 32.994357 | | | 80 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,552,011 | 32.940253 | | | 81 |
| 34 | 0.0154 | 0.1 | 0 | 4,621,805 | 32.887781 | | Jun | 82 |

| | | | | | | | | |
|----|-------|-----|--------|-----------|-----------|--|------|----|
| 34 | 0.568 | 0.1 | 1.3906 | 4,184,801 | 20 | | | 83 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.729436 | | | 84 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | | 85 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.729436 | | Jul | 86 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | | 87 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.729436 | | | 88 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | | 89 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.729436 | | Ago | 90 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | | 91 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.729436 | | | 92 |
| 34 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | | 93 |
| 32 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.704767 | | Sept | 94 |
| 32 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | | 95 |
| 32 | 0.568 | 0.1 | 0 | 4,588,807 | 18.704767 | | | 96 |
| 32 | 0.568 | 0.1 | 1.336 | 4,184,801 | 20 | | | 97 |

Escenario III

| S _{Mar} | AD | Bombeo | Vol. salida | Vol. Modelo | Sal. Modelo | Sal. Real | Fecha | Semanas |
|------------------|-------|--------|-------------|-------------|-------------|-----------|--------|---------|
| 32 | 0 | 0 | 0 | 2,905,986 | 11.00000 | 11 | Sep-02 | 1 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,821,072 | 11.33613 | | | 2 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,736,158 | 11.69345 | | | 3 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,651,244 | 12.07403 | | | 4 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,566,330 | 12.48022 | | | 5 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,481,416 | 12.91468 | | Nov-02 | 6 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,396,502 | 13.38048 | | | 7 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,311,588 | 13.88114 | | | 8 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,226,674 | 14.42072 | | | 9 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 2,202,241 | 15.49786 | 15 | Dic-02 | 10 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,171,680 | 16.6478 | | | 11 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,141,119 | 17.82936 | | | 12 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,110,559 | 19.04411 | | | 13 |
| 32 | -0.15 | 0 | 0 | 2,019,518 | 19.92227 | | Ene-03 | 14 |
| 32 | -0.15 | 0 | 0 | 1,928,478 | 20.88532 | | | 15 |
| 32 | -0.15 | 0 | 0 | 1,837,437 | 21.94621 | | | 16 |
| 32 | -0.15 | 0 | 0 | 1,746,397 | 23.12062 | | | 17 |
| 33 | -0.15 | 0 | 0 | 1,655,356 | 24.42781 | 23 | Feb-03 | 18 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,587,256 | 25.49868 | | | 19 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,519,155 | 26.66774 | | | 20 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,451,055 | 27.94914 | | | 21 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,382,954 | 29.35988 | | Mar-03 | 22 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,314,854 | 30.92059 | | | 23 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,246,753 | 32.65652 | | | 24 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,178,653 | 34.59893 | | | 25 |
| 34 | -0.11 | 0.1 | 0 | 1,171,032 | 36.63789 | 38 | Abr-03 | 26 |
| 34 | 0.015 | 0.1 | 0 | 1,240,826 | 36.23652 | | | 27 |

| | | | | | | | | |
|----|-------|-----|---------|-----------|----------|----|--------|----|
| 34 | 0.015 | 0.1 | 0 | 1,310,620 | 35.87759 | | | 28 |
| 34 | 0.015 | 0.1 | 0 | 1,380,414 | 35.55471 | | | 29 |
| 34 | 0.015 | 0.1 | 0 | 1,450,208 | 35.26273 | | May-03 | 30 |
| 34 | 0.015 | 0.1 | 0 | 1,520,002 | 34.99742 | | | 31 |
| 34 | 0.015 | 0.1 | 0 | 1,589,796 | 34.75528 | | | 32 |
| 34 | 0.015 | 0.1 | 0 | 1,659,590 | 34.53341 | | | 33 |
| 34 | 0.015 | 0 | 0 | 1,668,904 | 34.34122 | 35 | Jun-03 | 34 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 2,012,430 | 28.95214 | | | 35 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 2,355,957 | 25.02393 | | | 36 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 2,699,483 | 22.03376 | | | 37 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 3,043,009 | 19.68163 | | Jul-03 | 38 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 3,386,536 | 17.78307 | | | 39 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 3,730,062 | 16.21846 | | | 40 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 4,073,589 | 14.90684 | | | 41 |
| 34 | 0.568 | 0 | 2.49856 | 2,905,986 | 11 | | Ago-03 | 42 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 3,249,512 | 9.896478 | | | 43 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 3,593,039 | 8.994112 | | | 44 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 3,936,565 | 8.242507 | 8 | | 45 |
| 32 | 0.568 | 0 | 0 | 4,280,092 | 7.606804 | | Sept | 46 |
| 32 | 0.568 | 0 | 0 | 4,623,618 | 7.062118 | | | 47 |
| 32 | 0.568 | 0 | 3.408 | 2,905,986 | 11 | | | 48 |
| 32 | 0.568 | 0 | 0 | 3,249,512 | 9.896478 | | | 49 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 3,164,598 | 10.16562 | | Oct | 50 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 3,079,685 | 10.44981 | | | 51 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,994,771 | 10.75034 | | | 52 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,909,857 | 11.06868 | | | 53 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,824,943 | 11.40644 | | Nov | 54 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,740,029 | 11.76546 | | | 55 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,655,115 | 12.14781 | | | 56 |
| 32 | -0.14 | 0 | 0 | 2,570,201 | 12.55586 | | | 57 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 2,545,767 | 13.46822 | | Dic | 58 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,515,207 | 14.43441 | | | 59 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,484,646 | 15.42328 | | | 60 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,454,085 | 16.43582 | | | 61 |
| 32 | -0.15 | 0 | 0 | 2,363,045 | 17.08139 | | Ene | 62 |
| 32 | -0.15 | 0 | 0 | 2,272,004 | 17.77975 | | | 63 |
| 32 | -0.15 | 0 | 0 | 2,180,964 | 18.53765 | | | 64 |
| 32 | -0.15 | 0 | 0 | 2,089,923 | 19.36302 | | | 65 |
| 33 | -0.15 | 0 | 0 | 1,998,883 | 20.26532 | | Feb | 66 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,930,782 | 20.99285 | | | 67 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,862,682 | 21.77456 | | | 68 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,794,581 | 22.61674 | | | 69 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,726,481 | 23.52668 | | Mar | 70 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,658,380 | 24.5129 | | | 71 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,590,280 | 25.58541 | | | 72 |
| 33 | -0.11 | 0 | 0 | 1,522,179 | 26.75606 | | | 73 |
| 34 | -0.11 | 0.1 | 0 | 1,514,559 | 28.29079 | | Abr | 74 |

| | | | | | | | | |
|----|-------|-----|---------|-----------|----------|--|------|----|
| 34 | 0.015 | 0.1 | 0 | 1,584,353 | 28.34246 | | | 75 |
| 34 | 0.015 | 0.1 | 0 | 1,654,147 | 28.38977 | | | 76 |
| 34 | 0.015 | 0.1 | 0 | 1,723,941 | 28.43324 | | | 77 |
| 34 | 0.015 | 0 | 0 | 1,733,255 | 28.28086 | | May | 78 |
| 34 | 0.015 | 0 | 0 | 1,742,569 | 28.13011 | | | 79 |
| 34 | 0.015 | 0 | 0 | 1,751,882 | 27.98095 | | | 80 |
| 34 | 0.015 | 0 | 0 | 1,761,196 | 27.83337 | | | 81 |
| 34 | 0.015 | 0 | 0 | 1,770,510 | 27.68733 | | Jun | 82 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 2,114,037 | 23.53473 | | | 83 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 2,457,563 | 20.46454 | | | 84 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 2,801,089 | 18.10256 | | | 85 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 3,144,616 | 16.22918 | | Jul | 86 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 3,488,142 | 14.70705 | | | 87 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 3,831,669 | 13.44587 | | | 88 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 4,175,195 | 12.38386 | | | 89 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 4,518,721 | 11.4773 | | Ago | 90 |
| 34 | 0.568 | 0 | 3.23456 | 2,905,986 | 11 | | | 91 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 3,249,512 | 9.896478 | | | 92 |
| 34 | 0.568 | 0 | 0 | 3,593,039 | 8.994112 | | | 93 |
| 32 | 0.568 | 0 | 0 | 3,936,565 | 8.242507 | | Sept | 94 |
| 32 | 0.568 | 0 | 0 | 4,280,092 | 7.606804 | | | 95 |
| 32 | 0.568 | 0 | 0 | 4,623,618 | 7.062118 | | | 96 |
| 32 | 0.568 | 0 | 3.408 | 2,905,986 | 11 | | | 97 |

Escenario IV

| SMar | AD | Bombeo | Vol. salida | Vol. Modelo | Sal. Modelo | Sal. Real | Fecha | Semanas |
|------|-------|--------|-------------|-------------|-------------|-----------|---------|---------|
| 32 | 0 | 0.1 | 0 | 2,905,986 | 11 | 11 | Sept-02 | 1 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 2,881,552 | 11.79213 | | | 2 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 2,857,118 | 12.59662 | | | 3 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 2,832,684 | 13.41392 | | | 4 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 2,808,250 | 14.2445 | | | 5 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 2,783,816 | 15.08882 | | Nov-02 | 6 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 2,759,382 | 15.94734 | | | 7 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 2,734,948 | 16.82052 | | | 8 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 2,710,514 | 17.70883 | | | 9 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 2,686,081 | 18.61274 | 15 | Dic-02 | 10 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,655,520 | 19.58005 | | | 11 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,624,959 | 20.56948 | | | 12 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,594,399 | 21.58188 | | | 13 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,563,838 | 22.61811 | | Ene-03 | 14 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,533,278 | 23.67907 | | | 15 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,502,717 | 24.76572 | | | 16 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,472,157 | 25.87903 | | | 17 |
| 33 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,441,596 | 27.04592 | 23 | Feb-03 | 18 |

| | | | | | | | | |
|----|-------|-----|--------|-----------|----------|----|--------|----|
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,433,976 | 27.96589 | | | 19 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,426,355 | 28.89127 | | | 20 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,418,735 | 29.82214 | | | 21 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,411,114 | 30.75856 | | Mar-03 | 22 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,403,494 | 31.70061 | | | 23 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,395,873 | 32.64837 | | | 24 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,388,253 | 33.60189 | | | 25 |
| 34 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,380,632 | 34.5874 | 38 | Abr-03 | 26 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 2,450,426 | 34.44174 | | | 27 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 2,520,220 | 34.30413 | | | 28 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 2,590,014 | 34.17392 | | | 29 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 2,659,808 | 34.05052 | | May-03 | 30 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 2,729,602 | 33.93341 | | | 31 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 2,799,396 | 33.82213 | | | 32 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 2,869,190 | 33.71626 | | | 33 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 2,938,984 | 33.6154 | 35 | Jun-03 | 34 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,342,990 | 30.33891 | | | 35 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,746,997 | 27.73509 | | | 36 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 4,151,003 | 25.61638 | | | 37 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 2.7266 | 2,905,986 | 11 | | Jul-03 | 38 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,309,992 | 10.30177 | | | 39 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,713,999 | 9.750135 | | | 40 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 4,118,005 | 9.303478 | | | 41 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 4,522,012 | 8.934536 | | Ago-03 | 42 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 3.34 | 2,905,986 | 11 | | | 43 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,309,992 | 10.30177 | | | 44 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,713,999 | 9.750135 | 8 | | 45 |
| 32 | 0.57 | 0.1 | 0 | 4,118,005 | 9.275493 | | Sept | 46 |
| 32 | 0.57 | 0.1 | 0 | 4,522,012 | 8.883319 | | | 47 |
| 32 | 0.57 | 0.1 | 3.34 | 2,905,986 | 11 | | | 48 |
| 32 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,309,992 | 10.2676 | | | 49 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 3,285,558 | 10.95504 | | Oct | 50 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 3,261,125 | 11.65185 | | | 51 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 3,236,691 | 12.35835 | | | 52 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 3,212,257 | 13.07484 | | | 53 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 3,187,823 | 13.80165 | | Nov | 54 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 3,163,389 | 14.53908 | | | 55 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 3,138,955 | 15.28744 | | | 56 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 3,114,521 | 16.04704 | | | 57 |
| 32 | -0.14 | 0.1 | 0 | 3,090,087 | 16.8182 | | Dic | 58 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 3,059,527 | 17.63811 | | | 59 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 3,028,966 | 18.47424 | | | 60 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,998,405 | 19.32709 | | | 61 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,967,845 | 20.19724 | | Ene | 62 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,937,284 | 21.08524 | | | 63 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,906,724 | 21.99169 | | | 64 |
| 32 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,876,163 | 22.9172 | | | 65 |

| | | | | | | | | |
|----|-------|-----|--------|-----------|----------|--|------|----|
| 33 | -0.15 | 0.1 | 0 | 2,845,603 | 23.88456 | | Feb | 66 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,837,982 | 24.66441 | | | 67 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,830,362 | 25.44817 | | | 68 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,822,741 | 26.23587 | | | 69 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,815,121 | 27.02758 | | Mar | 70 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,807,500 | 27.82332 | | | 71 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,799,880 | 28.62316 | | | 72 |
| 33 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,792,259 | 29.42714 | | | 73 |
| 34 | -0.11 | 0.1 | 0 | 2,784,639 | 30.25762 | | Abr | 74 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 2,854,433 | 30.23819 | | | 75 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 2,924,227 | 30.21969 | | | 76 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 2,994,021 | 30.20205 | | | 77 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 3,063,815 | 30.18521 | | May | 78 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 3,133,609 | 30.16913 | | | 79 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 3,203,402 | 30.15374 | | | 80 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 3,273,196 | 30.13901 | | | 81 |
| 34 | 0.02 | 0.1 | 0 | 3,342,990 | 30.12489 | | Jun | 82 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,746,997 | 27.54298 | | | 83 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 4,151,003 | 25.44212 | | | 84 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 4,555,009 | 23.69952 | | | 85 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 3.3946 | 2,905,986 | 11 | | Jul | 86 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,309,992 | 10.30177 | | | 87 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,713,999 | 9.750135 | | | 88 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 4,118,005 | 9.303478 | | | 89 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 4,522,012 | 8.934536 | | Ago | 90 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 3.34 | 2,905,986 | 11 | | | 91 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,309,992 | 10.30177 | | | 92 |
| 34 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,713,999 | 9.750135 | | | 93 |
| 32 | 0.57 | 0.1 | 0 | 4,118,005 | 9.275493 | | Sept | 94 |
| 32 | 0.57 | 0.1 | 0 | 4,522,012 | 8.883319 | | | 95 |
| 32 | 0.57 | 0.1 | 3.34 | 2,905,986 | 11 | | | 96 |
| 32 | 0.57 | 0.1 | 0 | 3,309,992 | 10.2676 | | | 97 |