



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología



Universidad Nacional Autónoma de México

**BALANCE DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN UNA
LAGUNA COSTERA TROPICAL (LAGUNA LARGA,
CAYO COCO, CUBA)**

T E S I S

que para obtener el grado académico de:

Doctor en Ciencias
(Química Acuática)

Presenta

M. C. ROBERTO GONZÁLEZ DE ZAYAS

Director de Tesis: DR. MARTÍN MERINO IBARRA.

Comité Tutorial: DR. FEDERICO PÁEZ OSUNA

DR. MARTÍN SOTO JIMÉNEZ

DRA. ANA CAROLINA RUIZ FERNÁNDEZ

DRA. HILDA LEÓN TEJERA

México, D. F., 2011.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

	PÁG
RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE TABLAS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	V
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACIÓN	2
3. OBJETIVOS	4
3.1. Objetivo general	4
3.2. Objetivos específicos	4
4. MATERIALES Y MÉTODOS	5
4.1. Zona de estudio.....	5
4.1.1. Clima	5
4.1.2. Geomorfología	5
4.1.3. Batimetría	5
4.1.4. Mareas y corrientes marinas	6
4.1.5. Vegetación acuática	6
4.1.6. Impactos humanos	6
4.2. Estrategia del muestreo hidrológico	8
4.3. Determinaciones analíticas	8
4.4. Balance de agua, sal y nutrientes	9
4.4.1. Evaluación de los aportes y salidas de agua a Laguna Larga	9
4.4.2. Cálculo del balance de agua, sal y nutrientes	11
4.4.2.1. Balance de agua y sal	11
4.4.2.2. Balance de N y P.....	12
4.4. Composición isotópica ($d^{13}C$ y $d^{15}N$) en <i>Thalassia testudinum</i> y <i>Penicillus dumetosus</i>	13
4.4.1. Frecuencia de muestreo y distribución de las estaciones	13
4.4.2. Determinación analítica de $d^{13}C$ y $d^{15}N$	14
4.5. Balance de N en la zona costera de Cayo Coco	15
5. RESULTADOS	16
5.1 Condiciones climáticas	16
5.1.1. Precipitaciones	16
5.1.2. Evaporación	17
5.2. Hidrología	19

5.2.1. <i>Temperatura</i>	19
5.2.2. <i>Salinidad</i>	22
5.2.3. <i>Oxígeno disuelto (OD)</i>	25
5.2.4. <i>Nitrógeno inorgánico disuelto (NID)</i>	27
5.2.5. <i>Amonio</i>	27
5.2.6. <i>Nitrito</i>	29
5.2.7. <i>Nitrato</i>	29
5.2.8. <i>Nitrógeno orgánico (Norg)</i>	31
5.2.9. <i>Nitrógeno total (Nt)</i>	33
5.2.10. <i>Fósforo reactivo soluble (PRS)</i>	35
5.2.11. <i>Fósforo orgánico (Porg)</i>	37
5.2.12. <i>Fósforo total (Pt)</i>	37
5.2.13. <i>Silicato reactivo soluble (SiRS)</i>	39
5.2.14. <i>Relación Nt:Pt</i>	41
5.2.15. <i>Relación SiRS:NID</i>	43
5.3. <i>Aportes de nitrógeno y fósforo a Laguna Larga</i>	46
5.3.1. <i>Por precipitaciones</i>	46
5.3.2. <i>Por escorrentías superficiales</i>	47
5.3.3. <i>Por agua subterránea</i>	48
5.3.4. <i>Por vertimiento de residuales líquidos</i>	49
5.4. <i>Balances de agua, sal y nutrientes (N y P)</i>	51
5.4.1. <i>Balance de agua, sal y tiempo de residencia</i>	51
5.4.1.1. <i>Volumen residual (V_R)</i>	51
5.4.1.2. <i>Volumen de mezcla (V_X)</i>	55
5.4.1.3. <i>Tiempo de residencia (t)</i>	56
5.4.2. <i>Balance de N y P</i>	61
5.4.2.1. <i>Balance de N (?N)</i>	61
5.4.2.1. <i>Balance de P (?P)</i>	61
5.5. <i>Composición isotópica ($d^{13}C$ y $d^{15}N$) en <i>Thalassia testudinum</i> y <i>Penicillus dumetosus</i></i>	65
5.5.1. <i>Thalassia testudinum ($d^{13}C$ y $d^{15}N$)</i>	65
5.5.2. <i>Penicillus dumetosus ($d^{13}C$ y $d^{15}N$)</i>	67
6. <i>DISCUSIÓN</i>	70
6.1. <i>Hidrología</i>	70
6.2. <i>Balance de agua, sal y tiempo de residencia</i>	76

6.3. Balance de N y P	79
6.4. Composición isotópica ($d^{15}N$) en <i>Thalassia testudinum</i> y <i>Penicillus dumetosus</i>	81
7. CONCLUSIONES	84
8. RECOMENDACIONES PARA LA CONSERVACIÓN Y EL MANEJO INTEGRADO DE LAGUNA LARGA	86
8.1. Reducción de los aportes de N y P Laguna Larga	86
8.1.1. Problemática	86
8.1.2. Objetivo	86
8.1.3. Acciones	86
8.1.4. Beneficios esperados	86
8.1.5. Plazo	86
8.2. Incremento del intercambio de agua	86
8.2.1. Problemática	86
8.2.2. Objetivo	86
8.2.3. Acciones	86
8.2.4. Beneficios esperados	90
8.2.5. Plazo	90
8.3. Reparación de infraestructura, valores estéticos y educación ambiental	90
8.3.1. Problemática	90
8.3.2. Objetivo	90
8.3.3. Acciones	90
8.3.4. Plazo	91
8.4. Mantenimiento	92
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

	Pág
Tabla 1. Concentraciones de algunos parámetros fisicoquímicos determinados en Laguna Larga para todo el período y cada año de estudio	20
Tabla 2. Coeficientes de correlación de todos los parámetros determinados en Laguna Larga entre 2007 y 2009. Los marcados en negrito, son los parámetros que tiene una correlación significativa (negativa o positiva) entre ellos para $p < 0.05$	30
Tabla 3. Proporciones SiRS:NID, NID:PRS y SiRS:PRS para cada sección de Laguna Larga para cada año de muestreo y para todo el período.....	44
Tabla 4. División de Laguna Larga por secciones, principales características de cada una.....	46
Tabla 5. Composición y flujos de agua, de N y P de las precipitaciones en Cayo Coco entre 2007 y 2009.....	47
Tabla 6. Composición y flujos de agua, N y P de las escorrentías superficiales a Laguna Larga entre 2007 y 2009.....	48
Tabla 7. Composición y flujos de agua, N y P del agua subterránea a Laguna Larga en 2007.....	49
Tabla 8. Composición y flujos de N y P de descargas de aguas residuales a Laguna Larga entre 2007 y 2009.....	50
Tabla 9. Volumen residual (V_R), volumen de mezcla (V_X) y tiempo de residencia (t) en las secciones de Laguna Larga durante 2007 – 2009. El signo negativo en V_R indica salida de agua y el signo positivo indica importación de agua.....	55
Tabla 10. Flujos de agua estimados (precipitaciones, aguas subterráneas, escorrentías, aguas residuales y evaporación) y volumen residual (V_R) en las tres secciones de Laguna Larga en el período 2007 - 2009.....	57
Tabla 11. Flujo residual (V_R), volumen de mezcla (V_X) y tiempo de residencia (t) obtenidos a partir de los balances de agua y sal en Laguna Larga durante 2007.....	58
Tabla 12. Flujo residual (V_R), volumen de mezcla (V_X) y tiempo de residencia (t) obtenidos a partir de los balances de agua y sal en Laguna Larga durante 2008	59
Tabla 13. Flujo residual (V_R), volumen de mezcla (V_X) y tiempo de residencia (t) obtenidos a partir de los balances de agua y sal en Laguna Larga durante 2009	60
Tabla 14. Flujos de N y P ($\text{mmol/m}^2/\text{d}$) en las tres secciones de Laguna Larga entre 2007 - 2009.....	56

Tabla 15. Flujos de N y P (en mmol/m ² /d) en Laguna Larga en 2007.....	63
Tabla 16. Flujos de N y P (en mmol/m ² /d) en Laguna Larga en 2008.....	63
Tabla 17. Flujos de N y P (en mmol/m ² /d) en Laguna Larga en 2009.....	64
Tabla 18. Composición isotópica de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ (‰) de <i>Thalassia testudinum</i> y <i>Penicillus dumetosus</i> en Laguna Larga y los pastos y arrecifes aledaños a la zona de estudio.....	65
Tabla 19. Concentración de PRS, NID, Pt y Nt registrados en algunos sistemas acuáticos tropicales.....	73
Tabla 20. Valores de tiempo de residencia (t), ?N y ?P en algunos sistemas tropicales y Laguna Larga	78
Tabla 21. Salidas medias anuales de fósforo y nitrógeno en Laguna Larga durante el período de estudio (2007 – 2009).....	81
Tabla 22. Composición isotópica de nitrógeno ($d^{15}N$, ‰) de <i>Thalassia testudinum</i> y <i>Penicillus dumetosus</i> en Cayo Coco, Cuba comparado con otros sitios en el Caribe y otras zonas, y de las fuentes comunes de N a la zona costera.....	83
Tabla 23. Balance estimado de N (g N/ha/año) y la contribución relativa de cada fuente a la zona costera de Cayo Coco.....	83

	Pág
Figura 1. Localización de Laguna Larga	7
Figura 2. Vista longitudinal de la batimetría de Laguna Larga	7
Figura 3. Estaciones del muestreo fisicoquímico en Laguna Larga y zona marina adyacente	8
Figura 4. Áreas de escorrentías superficiales y puntos de vertimientos de aguas residuales a Laguna Larga	11
Figura 5. Localización de las estaciones de muestreo de <i>Thalassia testudinum</i> y <i>Penicillus dumetosus</i> en Laguna Larga (LL), Playa Larga y de referencia (PCA y PRA)	11
Figura 6. Distribución de la precipitación anual en la estación meteorológica de Cayo Coco (1990 – 2009). Comparación con la media anual histórica (1990 – 2003)	16
Figura 7. Comportamiento del acumulado mensual de precipitación durante el trienio 2007 – 2009 y el promedio mensual histórico (1990 – 2003). Estación meteorológica de Cayo Coco	17
Figura 8. Comportamiento del acumulado mensual de evaporación durante el trienio 2007 – 2009. Estación meteorológica de Cayo Coco.....	18
Figura 9. Comportamiento temporal de la temperatura (por estaciones y promedio) en las aguas de Laguna Larga de 2007 – 2009. La línea negra continua es la división para cada año	19
Figura 10. Distribución espacial de temperatura (°C) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de temperatura.	21
Figura 11. Comportamiento temporal de la salinidad (por estaciones y promedio) en las aguas de Laguna Larga de 2007 – 2009. La línea negra continua es la división para cada año	22
Figura 12. Distribución espacial de salinidad (ups) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de salinidad	23
Figura 13. División de Laguna Larga en tres secciones, a partir de la distribución espacial de salinidad: sección interior (8 – 45.2 ups), sección central (25.4 – 64.8 ups) y sección exterior (29.2 – 39.5 ups).....	24
Figura 14. Comportamiento temporal del oxígeno disuelto (por estaciones y promedio) en las aguas de Laguna Larga de 2007 – 2009. La línea negra continua es la división para cada año.....	25

Figura 15. Distribución espacial de oxígeno disuelto (ml/L) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de OD	26
Figura 16. Fracción de cada nutriente disuelto (amonio, nitrato y nitrito) en el contenido de NID en las aguas de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Las líneas verticales representan la desviación estándar del DIN para cada año.....	27
Figura 17. Distribución espacial de amonio (μM) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de amonio	28
Figura 18. Fracciones de NID y Norg en el contenido de Nt en las aguas de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Las líneas verticales representan la desviación estándar del Nt cada año.....	31
Figura 19. Distribución espacial de Norg (μM) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de Norg	32
Figura 20. Distribución espacial de Nt (μM) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de Nt.....	34
Figura 21. Distribución espacial de PRS (μM) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de PRS	36
Figura 22. Fracciones de PRS y Porg en el contenido de Pt en las aguas de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Las líneas verticales representan la desviación estándar del Pt para cada año.....	37
Figura 23. Distribución espacial de Pt (μM) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de Pt.....	38
Figura 24. Distribución espacial de SiRS (μM) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de SiRS	40
Figura 25. Distribución espacial de la relación Nt:Pt en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de Nt:Pt	42
Figura 26. Relaciones SiRS:NID y NID:PRS en las aguas de Laguna Larga entre 2007 y 2009. Las líneas continuas representan las relaciones entre los nutrientes. Las proporciones en cada cuadrante representan el orden de limitación con los dos nutrientes limitantes en negritas. La escala de los ejes es logarítmica.....	43

Figura 27. Relaciones SiRS:NID y NID:PRS en las aguas de Laguna Larga para cada sección y año de muestreo. Las líneas continuas representan las relaciones entre los nutrientes. Las proporciones en cada cuadrante representan el orden de limitación con los dos nutrientes limitantes en negritas. La escala de los ejes es logarítmica.....	45
Figura 28. Valores de V_R para la sección interior de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Nótese que la escala de V_R es diferente para cada sección.....	52
Figura 29. Valores de V_R para la sección central de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Nótese que la escala de V_R es diferente para cada sección.....	53
Figura 30. Valores de V_R para la sección exterior (3) de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Nótese que la escala de V_R es diferente para cada sección.....	54
Figura 31. Distribución de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ (‰) en <i>Thalassia testudinum</i> para la zona de estudio en la temporada seca de 2007	66
Figura 32. Distribución de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ (‰) en <i>Thalassia testudinum</i> para la zona de estudio en la temporada lluviosa de 2007	67
Figura 33. Distribución de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ (‰) en <i>Penicillus dumetosus</i> para la zona de estudio en la temporada seca de 2007	68
Figura 34. Distribución de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ (‰) en <i>Penicillus dumetosus</i> para la zona de estudio en la temporada lluviosa de 2007.....	69
Figura 35. Sector de manglar a desbrozar en la zona central de Laguna Larga	87
Figura 36. Barreras a poner en la zona de dunas de Playa Larga para evitar el paso de la arena a Laguna Larga	88
Figura 37. Parte del pedraplén que es necesario eliminar para permitir un mejor flujo de agua entre la parte central e interior de Laguna Larga.....	89
Figura 38. Representación esquemática del sistema REALCO.....	90
Figura 39. Sector a limpiar debajo del puente de acceso a Playa Larga en la zona central de Laguna Larga	91

RESUMEN

La eutrofización es uno de los impactos más importantes y extendidos en las lagunas costeras, como es el caso de Laguna Larga, localizada en el Archipiélago Sabana – Camagüey. Desde los años 90 este ecosistema ha sido alterado por la construcción de infraestructura hotelera (más de 2400 habitaciones). Los impactos incluyen la destrucción del manglar, los rellenos y estrechamiento de canales y el vertimiento de residuales líquidos y sólidos.

En este trabajo se estudiaron la hidrología y los balances de N y P en Laguna Larga durante tres años consecutivos. Para ello se realizaron 18 muestreos entre 2007 y 2009, en los cuales se determinaron la temperatura, la salinidad, el oxígeno disuelto y las distintas fracciones de N y P en el agua de la laguna y de las principales fuentes que vierten hacia ella. Se calcularon los flujos biogeoquímicos de agua, sal, nitrógeno y fósforo utilizando las mediciones anteriores y la metodología propuesta por el Proyecto Interacciones Tierra – Océano en la Zona Costera (LOICZ, por sus siglas en inglés). Adicionalmente, se determinaron las proporciones isotópicas de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en muestras de la macroalga *Penicillus dumetosus* y el pasto *Thalassia testudinum* colectadas dentro de Laguna Larga y en la zona marina de Cayo Coco.

La salinidad de Laguna Larga fue de 35.0 ± 6.2 ups durante el período estudiado, con una variabilidad interanual que osciló entre 32.9 ± 5.6 ups en 2007 y 36.0 ± 6.9 ups en 2009. A partir de la distribución espacial de salinidad se identificó la conveniencia de dividir el sistema en tres secciones (interior, central y exterior) para el cálculo de los presupuestos de agua, sal y nutrientes. El oxígeno disuelto varió ampliamente durante todo el estudio en el rango de 0.1 a 13.0 ml/L. Los contenidos de nitrógeno (NID de 19.8 ± 46.4 μM , Norg de 142.0 ± 124.3 μM y Nt de 161.7 ± 132.0 μM) tuvieron niveles elevados comparados con otros sistemas eutroficados. El PRS y el Pt tuvieron niveles similares a sistemas eutroficados, 0.54 ± 1.27 μM y 5.2 ± 5.4 μM , respectivamente. Todos los nutrientes disueltos y totales, incluido el SiRS, presentaron un gradiente de concentración, incrementándose desde el exterior hacia el interior de la laguna.

Durante el período estudiado, Laguna Larga fue un exportador neto de agua ($236 \text{ m}^3/\text{d}$) y de N ($1.518 \text{ mmol/ m}^2/\text{d}$) y un sumidero neto de P ($0.135 \text{ mmol/ m}^2/\text{d}$). Además, el tiempo de residencia en la parte interior de Laguna Larga (123 días) fue alto comparado con otros sistemas más grandes y con circulación restringida. Todos los flujos estimados con el balance tuvieron alta variabilidad inter e intranual.

El análisis isotópico del N no permitió confirmar que el N exportado desde Laguna Larga hacia la zona marina adyacente sea la principal fuente de N para los productores primarios de la zona costera. Los bajos niveles de $\delta^{15}\text{N}$ determinados en *T. testudinum* ($+0.79\text{‰}$, rango de -1.83 a $+3.16\text{‰}$) y *P. dumetosus* ($+2.80$, rango de $+1.02$ a $+5.55$) estuvieron lejos de los altos contenidos de $\delta^{15}\text{N}$ determinados en aguas residuales ($+6\text{‰}$ a $+22\text{‰}$).

A pesar de su deterioro ecológico, Laguna Larga conserva todavía alguna resiliencia en la sección exterior, debido a un mejor intercambio. Es necesario implementar en tiempo breve medidas de conservación y manejo de la laguna, enfocadas a mejorar la dinámica interior de sus aguas y el intercambio con el mar adyacente, así como la reducción al mínimo de los aportes externos de N y P.

ABSTRACT

Eutrophication is one of the most important and widespread impacts on coastal lagoons such as Laguna Larga, located in the Sabana – Camagüey Archipelago. Since the 90's this ecosystem has been quite disturbed by the construction of hotel infrastructure (more than 2400 rooms). The impacts include the destruction of mangroves, landfills and narrowing of canals and the dumping of liquid and solid wastes.

In this work we studied the hydrology and budgets of N and P in Laguna Larga during three consecutive years. For this, was carried out 18 samplings between 2007 and 2009, which determined the temperature, salinity, dissolved oxygen and the different fractions of N and P in the water of the lagoon and the main sources that discharge into it. Biogeochemical fluxes were calculated from water, salt, nitrogen and phosphorus using the previous measurements and the methodology proposed by the project "Earth Interactions - Ocean in the Coastal Zone" (LOICZ). Additionally, the isotopic ratios of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ were determined for samples from seaweed *Penicillus dumetosus* and seagrass *Thalassia testudinum* collected within Laguna Larga and in the marine area of Cayo Coco.

Salinity of Laguna Larga was 35.0 ± 6.2 ups during the study period, with an interannual variability that ranged from 32.9 ± 5.6 in 2007 and 36.0 ± 6.9 ups in 2009. From the spatial distribution of salinity, we identified the desirability of dividing the system into three sections (inner, middle and outer) for the calculation of the budgets of water, salt and nutrients. Dissolved oxygen varied widely throughout the study in the range of 0.1 to 13.0 ml / L. The contents of nitrogen (19.8 ± 46.4 μM of NID, 142.0 ± 124.3 μM of Norg and 161.7 ± 132.0 μM of TN) had elevated levels compared to other eutrophied systems. The SRP and the TP had similar levels than others eutrophied systems, 0.54 ± 1.27 μM and 5.2 ± 5.4 μM , respectively. All total and dissolved nutrients, including SRSi, showed a concentration gradient, increasing from outside to inside the lagoon.

During the study period, Laguna Larga was a net exporter of water ($236 \text{ m}^3/\text{d}$) and N ($1.518 \text{ mmol}/\text{m}^2/\text{d}$) and a net sink for P ($0.135 \text{ mmol}/\text{m}^2/\text{d}$). In addition, the residence time in the inner part of Laguna Larga (123 days) was high compared to other larger systems with restricted circulation. All flows were estimated using the balance between and intrannual high variability.

Isotopic analysis of N does not show that the N exported from Laguna Larga to the marine area is the main source of N for primary producers in the coastal zone. Low levels of $\delta^{15}\text{N}$ determined in *T. testudinum* ($+0.79$ ‰, range -1.83 to $+3.16$ ‰) and *P. dumetosus* ($+2.80$, $+1.02$ to $+5.55$ ranges) were far from the high content of certain wastewater $\delta^{15}\text{N}$ ($+6$ ‰ to $+22$ ‰).

Despite its ecological deterioration, Laguna Larga still retains some resilience in the outer section, due to better water exchange. It is necessary for short time steps for conservation and management of the lagoon, aimed at improving the internal dynamics of the water and exchange with the adjacent sea, as well as minimizing external inputs of N and P.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de las actividades humanas en las zonas costeras ha significado un aumento importante de los contaminantes (materia orgánica, residuos industriales y domésticos, hidrocarburos y metales pesados) e impactos directos hacia los sistemas costeros, particularmente en aquellos semicerrados o de circulación restringida y/o con menor capacidad de carga (Correl *et al.*, 1992; Lapointe y Clark, 1992 y Lucena *et al.*, 2002). La acumulación de contaminantes primero degrada la calidad ambiental del ecosistema y luego agota la capacidad autodepuradora o de filtro que poseen la mayoría de dichos cuerpos de agua, convirtiéndose a su vez en emisores netos y peligrosos hacia la zona oceánica adyacente (Merino, 1987; Perigó *et al.*, 2000 y Smith *et al.*, 2003). Para enfrentar esta situación, se requiere de un conocimiento detallado de los múltiples procesos y mecanismos que operan en los ecosistemas costeros, particularmente en el caso de los tropicales, que han sido mucho menos estudiados que sus contrapartes de latitudes templadas (Heinle y Flemer, 1976; Stern *et al.*, 1986; De la Lanza – Espino y Rodríguez – Medina, 1993; Yurkovskis *et al.*, 1993; Herrera – Silveira y Comín, 1995; Gordon *et al.*, 1996; Jing Zhang *et al.*, 1997; Páez *et al.*, 1997; Tovilla – Hernández y De la Lanza – Espino, 2001 y Dale y Prego, 2003).

Uno de los impactos más importantes, debido a su ubicuidad y a su potencial de alteración de la estructura trófica de los ecosistemas costeros, es la eutrofización, derivada de las crecientes descargas de nitrógeno y fósforo – elementos que normalmente regulan el estado trófico- hacia los ríos, los mantos freáticos o directamente a los cuerpos costeros (Merino *et al.*, 1992; De la Lanza – Espino y Rodríguez – Medina, 1993; Yurkovskis *et al.*, 1993, Gordon *et al.*, 1996; Páez *et al.*, 1997; Tovilla – Hernández y De la Lanza – Espino, 2001; Camacho – Ibar *et al.*, 2003 y Dale y Prego, 2003). Esta situación determina la necesidad urgente de contar con el conocimiento detallado de los procesos y flujos en los que participan estos elementos y particularmente, con el resultado neto de dichos flujos, en términos de si los sistemas costeros exportan a su vez el nitrógeno y fósforo hacia la zona marina o, por el contrario, funcionan como sumideros de estos elementos (Gordon *et al.*, 1996).

Para estimar el flujo de nutrientes entre cuerpos de agua litorales y el océano se han utilizado diversos enfoques (Taft *et al.*, 1978; Officer, 1980; Wulff y Stiegebrandt, 1989; y Smith y Hollibaugh, 1997; Witek *et al.*, 2003 y Wösten *et al.*, 2003). Sin embargo, la complejidad de los procesos dinámicos (físicos, biogeoquímicos y biológicos) involucrados hace difícil lograr resultados comparables entre sí, por lo que los especialistas del programa LOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone) del IGBP y la UNEP hayan propuesto un enfoque basado en el balance de agua y sal que es aplicable a la mayoría de los cuerpos costeros y permite la intercomparación de resultados (Gordon *et al.*, 1996).

Adicionalmente, una vez estimada la exportación o importación de nitrógeno y fósforo desde los cuerpos de agua costeros y el mar adyacente (con condiciones oligotróficas) resulta de gran importancia la evaluación del destino de estos elementos (Snedaker, 1985), particularmente en las zonas tropicales, donde existen ecosistemas oligotróficos y muy sensibles a los efectos de los aportes de nutrientes, como son los arrecifes coralinos (Leichter *et al.*, 2003).

Ante la complejidad de realizar un seguimiento directo de estos flujos, las técnicas basadas en los isótopos estables del carbono y nitrógeno constituyen una alternativa de gran utilidad para estimarlos indirectamente. Los isótopos estables han sido utilizados para determinar la estructura trófica de comunidades acuáticas como lagunas costeras, lagos, esteros y estuarios (Land *et al.*, 1975; Fry *et al.*, 1982 y Schroeder, 1983), el flujo de nutrientes y materia orgánica hacia los seibadales y arrecifes coralinos (Heikoop *et al.*, 1998; Sammarco *et al.*, 1999; Umezawa *et al.*, 2002 y Leichter *et al.*, 2003), y la migración de especies marinas de importancia comercial (Killingley, 1980; Killingley y Lutcavage, 1983; Fry, 1984).

2. ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACIÓN

Cayo Coco es el segundo mayor cayo de Cuba (370 km²), localizado en el Archipiélago Sabana – Camagüey. Al Norte limita con el transitado Canal de las Bahamas y al Sur con las macrolagunas interiores de Los Perros y Jigüey. Desde principios de la década de los 90 del pasado siglo, Cayo Coco y Cayo Guillermo (situado al oeste de Cayo Coco) han tenido un desarrollo turístico acelerado (más de 3000 habitaciones y el tercer polo de Cuba) y el cual se ha asentado sobre estas playas y lagunas costeras. Además, Cayo Coco se localiza dentro del Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila, que es uno de los mayores humedales cubanos reconocidos por la Convención de la ONU sobre Humedales (RAMSAR).

Los diversos recursos biológicos marinos y costeros del Archipiélago Sabana – Camagüey, donde se encuentra localizado Cayo Coco constituyen una parte importante de capital natural del cual dispone Cuba y la región del Gran Caribe para un desarrollo sustentable. Se trata de áreas ecológicamente sensibles que contienen una gran diversidad de ecosistemas costeros interconectados, entre los que se incluyen los arrecifes coralinos, las praderas de pastos marinos, las lagunas costeras y las marismas. Debido a ello, la eutrofización de algunos de ellos puede afectar a los demás. La notable proliferación de algas en algunas zonas, la muerte masiva de *Acropora palmata*, y la aparición de diversas enfermedades (banda blanca, plaga blanca, viruela blanca y mancha oscura) son algunos de los mayores impactos que han tenido los arrecifes coralinos, aún cuando no reciban descargas directamente. En el caso de los pastos marinos, también se han observado impactos, e incluso la desaparición de amplias áreas, en algunos casos debidos a la salinización. Otros efectos incluyen la mortalidad masiva del erizo *Diadema antillarum* y el calentamiento de las aguas, que a su vez han afectado la biodiversidad (Proyecto GEF/PNUD, 1999).

Estas alteraciones están muy probablemente relacionadas con el crecimiento exponencial de la actividad turística marina y el asentamiento en las zonas más frágiles (playas, dunas costeras y lagunas litorales) de instalaciones hoteleras con la consecuente infraestructura de apoyo (plantas de tratamiento de residuales, instalaciones eléctricas y de suministro de agua potable y actividades extrahoteleras) (Proyecto GEF/PNUD, 1999).

A pesar de ello, no se tienen referencias de estudios sobre los balances del nitrógeno y del fósforo en sistemas costeros en Cuba y de la alteración de los procesos biogeoquímicos de estos elementos en los sistemas acuáticos costeros ni de sus consecuencias sobre los sistemas oligotróficos adyacentes, a saber: los pastos

marinos y arrecifes coralinos. Algunas lagunas costeras de Cuba sólo han sido evaluadas hidroquímicamente y se han utilizado algunos índices para evaluar la calidad de sus aguas para distintos usos (Montalvo y Hernández, 1987; Perigó y Bravo, 1988; Montalvo, 1989; González y Berdayes, 1990 y Montalvo, 1990).

Desde los primeros trabajos referidos a la potencialidad de la zona para el turismo (ACC/ICGC, 1990 y Cruz – Olivares *et al.*, 1993), se identificaron las “bondades” naturales (calidad de la playa, manglares y biodiversidad) de Laguna Larga (Figura 1). Debido a las dimensiones relativamente pequeñas de la laguna (aproximadamente 20 ha), esta región constituye un caso de gran interés para el estudio de las interacciones entre ecosistemas costeros, pues en ella convergen una laguna costera tropical con su bosque de manglar y hábitats de macroalgas y praderas de pastos marinos interaccionando con un arrecife coralino y medio marino adyacente. Además con un fuerte desarrollo urbano y turístico.

El aumento en las construcciones recientes en Cayo Coco, y específicamente en las márgenes de las lagunas Larga y Tiburón (e.g. se hicieron 2,300 habitaciones solamente entre 1993 y 2001), bajo una Ley de Medio Ambiente inexistente que exigiera un Estudio de Impacto Ambiental para las primeras obras, han conllevado múltiples afectaciones a estos sistemas. En imágenes fotográficas tomadas desde 1956 hasta 1993 se observaron claras afectaciones al manglar y un estrechamiento de los canales que comunican la parte central de la laguna con su sección interior y con el mar, debido al relleno y obras ejecutadas para la construcción del complejo hotelero Tryp Club. Posteriormente la construcción del complejo de hoteles El Senador con más de 1000 habitaciones (incluidas 46 cabañas y cuatro restaurantes) sobre el espejo de agua de Laguna Larga, contribuyó a reducir aun más la circulación de la laguna. La construcción de viales (mediante relleno) dentro del espejo de agua para hincar pilotes, interrumpió también el flujo natural entre en las secciones interior y exterior de la laguna, lo que permitió el crecimiento excesivo de manglar y el desecamiento de la sección central del sistema. Después de construida esta infraestructura, durante el desmonte de los viales con excavadora, se retiró también gran parte de los sedimentos naturales de la laguna, así como parte de la vegetación del fondo y se alteró nuevamente la batimetría.

La operación de esta amplia infraestructura hotelera construida sobre y alrededor de Laguna Larga ha implicado también un incremento de los flujos naturales de nitrógeno y fósforo hacia la laguna. Si bien oficialmente los drenajes se canalizan hacia plantas de tratamiento, existen numerosos vertimientos directos debido a la ruptura de tuberías y otras fallas en el funcionamiento del sistema de drenaje que corre a lo largo de las pasarelas flotantes, cuyo impacto se desconoce. El lavado de piscinas y áreas construidas, así como el arrastre pluvial sobre las áreas ajardinadas son otras fuentes adicionales de N y P derivadas de la operación hotelera en la laguna, que no han sido evaluadas y sobre las que no hay ningún control.

La importancia de los impactos derivados de todas estas alteraciones está indicada por la ocurrencia de cambios significativos en la laguna, como es el incremento de su salinidad desde 29 hasta 82. También se han observado elevados contenidos de materia orgánica (15 mg O₂/L medidos como DQO), la disminución del oxígeno a niveles de hipoxia (<1.6 ml/L), y concentraciones relativamente altas de fosfatos (1.3 µM) y de amonio (3.7 µM).

Hasta ahora, las investigaciones al respecto (ACC/ICGC, 1990) se han enfocado más a detectar los impactos y tratar de mitigarlos, pero sin profundizar en la dinámica del sistema. Sin embargo, para contar con herramientas sólidas para la gestión y el aprovechamiento sustentable de esta y otras lagunas de la región, se requiere evaluar en detalle los flujos de nitrógeno y fósforo, así como el destino de estos nutrientes, en particular su probable exportación hacia la zona costera y el efecto que esta pudiera tener en los ecosistemas aledaños de arrecifes coralinos y praderas de pastos marinos. Por ello, y tomando en cuenta todos estos antecedentes, el presente trabajo se plantea los siguientes objetivos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

- Determinar el balance de nitrógeno y fósforo de una laguna costera tropical antropizada (Laguna Larga, Cayo Coco, Cuba) y evaluar su influencia sobre las praderas de pastos marinos y los arrecifes coralinos aledaños.

3.2. Objetivos específicos

1. Estudiar las variaciones espacio - temporales de los principales parámetros hidrológicos y biogeoquímicos en Laguna Larga, en particular del nitrógeno y el fósforo durante tres ciclos anuales completos.
2. Determinar los balances de agua y de sal de la laguna durante los tres ciclos anuales siguiendo el método de LOICZ.
3. Determinar la importancia relativa de los principales aportes de nitrógeno y fósforo a Laguna larga, a saber: descargas de aguas residuales, escurrimiento superficial, aguas subterráneas y precipitaciones.
4. Cuantificar los flujos de los principales aportes de nitrógeno y fósforo a Laguna Larga. Cuantificar el intercambio de agua de Laguna Larga con la zona adyacente durante tres ciclos anuales.
6. Calcular los balances de nitrógeno y fósforo a través del modelo de LOICZ para los tres ciclos anuales.
7. Evaluar el grado de incorporación de nutrientes procedentes de Laguna Larga en los pastos marinos y arrecifes coralinos de la zona de estudio mediante la composición isotópica ($\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$) de macroalgas bentónicas y pastos marinos, asumiendo dos fuentes principales de nitrógeno y carbono (agua oceánica y aguas residuales).
8. Proponer acciones para la conservación y el manejo integrado de las lagunas costeras de Cayo Coco, que puedan ser aplicadas a otros cuerpos de agua de la región

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Zona de estudio

4.1.1. Clima

Laguna Larga se encuentra localizada en Cayo Coco, segundo islote más extenso (370 km²) del archipiélago Sabana – Camagüey (Figura 1). El clima de la región presenta una temperatura media anual de 26.0 °C; con mínimas en la temporada invernal (22.8°C de diciembre a marzo) y máxima en el verano (27.8 °C de junio a septiembre). El promedio anual de precipitación es de 1,129.2 mm, con más del 70 % en el período lluvioso (mayo – octubre) y poco más de 200 mm en el período poco lluvioso o seco (noviembre – abril). El viento predominante es del E - NE, con pocos días de calma; la incidencia de los llamados “nortes” es frecuente en el invierno debido al paso de frentes fríos (ACC/ICGC, 1990). La temporada de ciclones tropicales (del 1 de junio – 30 de noviembre) ha sido activa durante los últimos 15 años con el paso de tres huracanes: Lili (1996), Georges (1998) y Michelle (2001).

4.1.2. Geomorfología

Laguna Larga es una laguna litoral de intercambio limitado, situada entre los meridianos 78°21'23.98"y los 78°22'49.21" (Figura 1) cuya comunicación natural es a través de un angosto y estrecho canal (8 - 15 m de ancho), que la comunica con el mar por su sección más oriental (al oeste de Punta Colorada). El canal de comunicación se encuentra bien definido, a 250 m de la boca se bifurca y da lugar a otro canal; estos se dirigen a la parte interior de la laguna, donde se encuentra el sector más ancho del sistema. La comunicación entre este espejo de agua y la sección central es a través de otro canal totalmente cubierto de mangles. A partir del centro de la laguna, otra vez se comprime la comunicación con un canal que finaliza en la sección interior.

4.1.3 Batimetría

La batimetría de Laguna Larga es irregular (Figura 2) con zonas muy someras en la zona de canales (0.3 – 0.5 m) y sectores ligeramente menos someros en los espejos de agua situados en las secciones interior y exterior (debido al dragado superan en algunos sitios el metro de profundidad).

La laguna se caracteriza por poseer un fondo de sedimentos fangosos, con parches de material de construcción frente al CIEC y el Tryp Club Cayo Coco y acumulación de arena debajo del puente que da acceso a Playa Larga. Los niveles actuales de sedimentación en el canal, así como el desarrollo del manglar que ocupa casi el 60 % en la porción exterior, han ido disminuyendo la circulación de la laguna. A la par con la evolución de los procesos naturales que presuponen la eutrofización de la laguna, la antropización de su entorno y específicamente en su porción oeste, han agravado el deterioro ambiental de la misma. El relleno de un área bastante extensa de la laguna (25 %), la interrupción casi total del flujo e intercambio entre ambas partes, ha establecido condiciones hidrodinámicas que permiten analizar cada sección por separado como ecosistemas lagunares diferentes (Expósito – Díaz *et al.*, 2001).

4.1.4. Mareas y corrientes marinas

La marea en la región es semidiurna regular con dos pleamares y bajamares, con un tiempo de duración similar de alrededor de seis horas y con una amplitud relativamente pequeña. La variación del nivel medio del mar se caracteriza porque los máximos valores aparecen en los meses de verano y los mínimos en invierno con una diferencia máxima de los valores promedios de 30 cm. La amplitud máxima registrada es de 90 cm, mientras que el nivel máximo alcanzado fue de 125 cm, en septiembre de 1994. Las corrientes marinas dominantes en la zona de arrecifes tienen rumbos predominantes del Este durante el flujo y del Oeste durante el reflujo, con velocidades medias en el orden de 10 cm/seg; al aproximarse a la costa las componentes predominantes son del NW con promedios de 2 cm/seg (ACC/ICGC, 1990).

4.1.5. Vegetación acuática

El mangle rojo (*Rhizophora mangle*) ocupa el margen interno de la laguna llegando a colonizar determinadas partes del interior de la misma (principalmente al centro y este). La altura de esta formación vegetal oscila de 3 a 5 m, aunque hacia el canal de comunicación crecen colonias que pueden alcanzar los 10 m. La vegetación acuática es escasa en el canal de comunicación con parches de las fanerógamas *Halodule wrightii* y *Ruppia maritima*, mientras que *Thalassia testudinum*, solo se encuentra muy aisladamente. En la zona este, el fondo está densamente cubierto por *Halodule wrightii*, la cual alcanza grandes dimensiones y en menor proporción *Thalassia testudinum*, también de gran tamaño, ambas fuertemente epifitadas por cianofitas y por *Batophora oerstedii*, además se encuentran otras especies de macroalgas como *Penicillus dumetosus*. La fanerógama *Thalassia testudinum* y la macroalga *Penicillus dumetosus* son comunes no sólo en la zona exterior de Laguna Larga, sino que es posible encontrarlas en la zona de playa y arrecifes adyacente. En la sección interior predominan los parches de *Batophora oerstedii*, localizadas principalmente en los bordes (ACC/ICGC, 1990).

4.1.6. Impactos humanos

Desde 1991, con la construcción del Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros (CIEC) se inicia la transformación antrópica de Laguna Larga, que prosiguió con la construcción de cuatro hoteles de más de 400 habitaciones cada uno y asentados en ambas orillas (sur y norte) del sistema acuático (Figura 1). Durante la construcción del CIEC en 1991 se interrumpió parcialmente el flujo de agua entre las secciones central e interior debido a la construcción de un puente sobre el espejo de agua. Posteriormente en la construcción de los hoteles Blau y Tryp en 1993 y 1996, respectivamente, se rellenaron amplias zonas de ambas márgenes de la laguna en la sección interior. En este período, se dragó un amplio sector en el espejo de agua situado en el extremo occidental del sistema. Entre 1998 y 2001 se construyeron casi 1000 habitaciones en la sección exterior de Laguna Larga (Hotel el Senador) que incluyeron cabañas montadas sobre pilotes dentro del sistema. Este último proceso constructivo impactó notablemente la comunicación entre la sección exterior (más expuesta a las mareas) y la sección interior (cabeza de la laguna), ya que prácticamente se interrumpió el flujo de agua entre ellas.

La principal actividad económica lo constituye el turismo internacional (más de 50,000 turistas/año), enfocada a la explotación de Playa Larga (Figura 1). La ocurrencia de acciones como el desbroce de vegetación (fundamentalmente mangle), el relleno y compactación de suelo, el vertimiento de residuales líquidos y sólidos y la construcción de viales; todas vinculadas al desarrollo turístico, son las causas principales de los impactos que ha recibido Laguna Larga en los últimos 16 años.

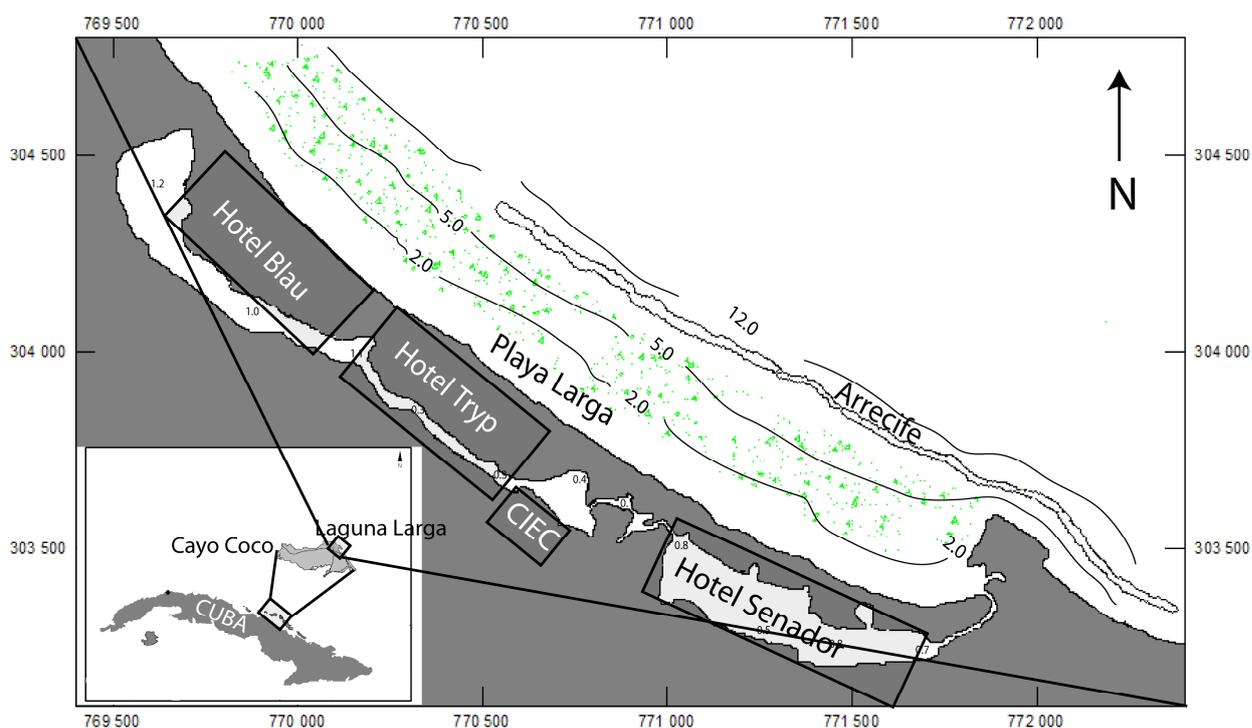


Figura 1. Localización de Laguna Larga.



Figura 2. Vista longitudinal de la batimetría de Laguna Larga.

4.2. Estrategia del muestreo hidrológico

Se realizaron 18 muestreos con una frecuencia bimensual entre 2007 y 2009 para asegurar una buena representatividad dadas las variaciones temporales que presentan las lagunas costeras. Se registraron parámetros hidrológicos (e.g. temperatura y la salinidad) *in situ* y se recolectaron muestras de agua en 14 estaciones (Figura 3). Doce estaciones estuvieron dentro de la Laguna Larga (cuatro estaciones en la sección interior, tres estaciones en la sección central y cinco en la sección exterior y el canal de comunicación) y dos estaciones en la zona marina adyacente (Playa Larga). Todas las muestras fueron tomadas superficialmente.

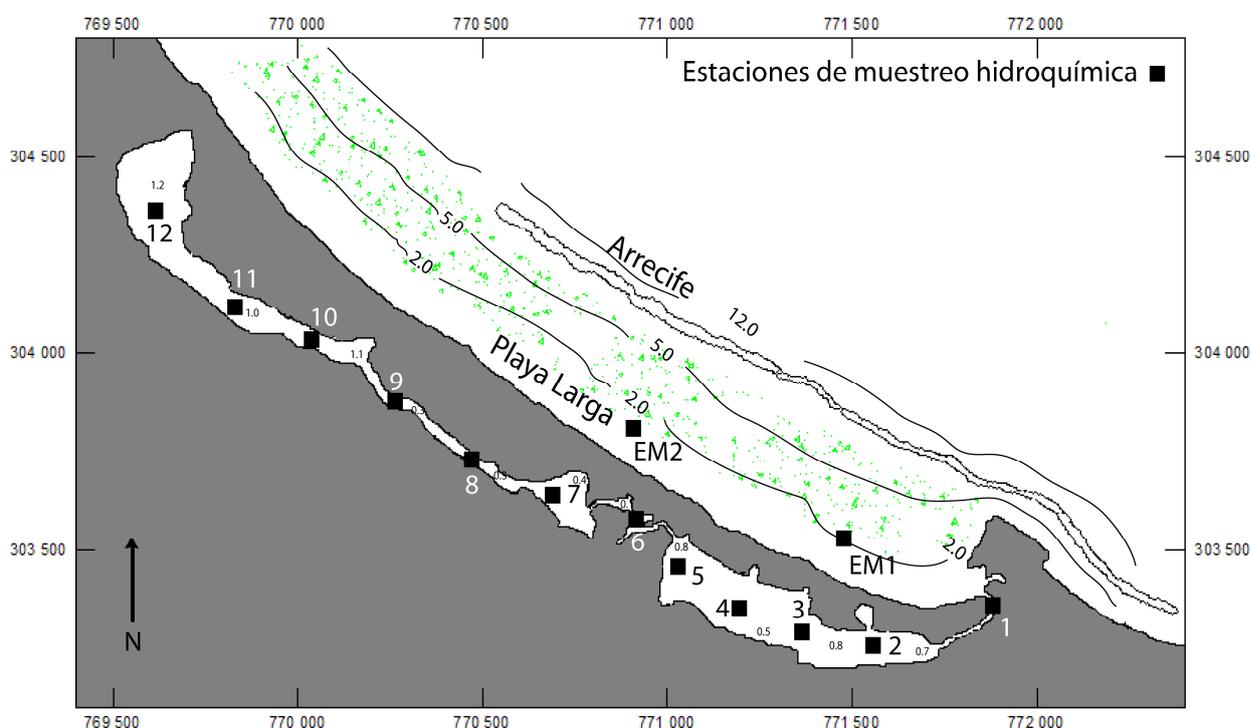


Figura 3. Estaciones del muestreo fisicoquímico en Laguna Larga y zona marina adyacente.

4.3. Determinaciones analíticas

La temperatura y la salinidad fueron determinadas *in situ* utilizando un salinómetro digital WLW (con precisión de 0.1 unidades para ambos parámetros), previamente calibrado en el laboratorio. En el campo se fijaron tres réplicas para oxígeno disuelto en cada estación, teniendo cuidado que no quedaran burbujas de aire dentro de los frascos Winkler. El oxígeno disuelto fue determinado en tres submuestras para cada muestra fijada en el campo a través del método de titulación de Winkler (Wright, 1983).

Las muestras para el análisis de nutrientes (NH_4^+ , NO_2^{-2} , NO_3^{-2} , PRS y SiRS) fueron filtradas a través de filtros de nitrocelulosa 0.45 y 0.22 μm (Millipore™ tipo HA) y fijadas con cloroformo. Los análisis fueron realizados con un analizador de flujo segmentado Skalar SanPlus usando los métodos estándares adaptados por Grasshoff *et al.* (1983) y circuitos sugeridos por Kirkwood (1994). La precisión de los análisis con este sistema fue: nitrato 0.1 μM , nitrito 0.02 μM , amonio 0.1 μM , fósforo reactivo soluble (PRS) 0.04 μM , y silicato reactivo soluble (SiRS) 0.1 μM . Las muestras para nitrógeno y fósforo totales fueron analizadas como NO_3^- y PRS después de oxidación a alta temperatura (120 °C) con persulfato de potasio (Valderrama, 1981). El nitrógeno orgánico (Norg) y el fósforo orgánico (Porg) fueron calculados por sustracción.

4.4. Balance de agua, sal y nutrientes

Para determinar los flujos de N y P se usó un balance de masas llamado: presupuesto estequiométricamente relacionado de agua – sal – nutrientes. Este modelo es la herramienta que el proyecto LOICZ (Land – Ocean Interactions in the Coastal Zone) ha aplicado para evaluar el rol de los sistemas costeros como fuentes o sumideros netos de N y P a escala global (Camacho – Ibar *et al.*, 2003). El modelo propuesto por LOICZ es un modelo robusto que puede ser aplicado en sistemas acuáticos donde las diferencias de salinidad con el mar adyacente y entre zonas del mismo sistema permitan calcular con bastante fidelidad los balances de agua y sal.

Además ante la ausencia de datos sobre aportes externos permite obtener, con base en estimaciones, buenos presupuestos de N y P (Gordon *et al.*, 1996). Adicionalmente, utilizar la metodología propuesta por LOICZ permitirá la comparación con los numerosos cuerpos de agua costeros que han sido estudiados utilizando esta metodología. En las secciones siguientes se utiliza la terminología utilizada por LOICZ (ver detalles en Gordon *et al.* (1996) y en la página web de la modelación de LOICZ, <http://data.ecology.su.se/MNODE>)

4.4.1. Evaluación de los aportes y salidas de agua a Laguna Larga

- **Volumen de precipitación (V_P):** Fue calculado multiplicando la lluvia de cada período de muestreo (m^3/d) por el área de cada sección. El volumen de lluvia utilizado fue el registrado por la estación meteorológica 339 (entre 2007 y 2009) situada a 50 m de Laguna Larga. Cuando fue posible recolectar un volumen adecuado de lluvia para el análisis, las muestras para nutrientes disueltos fueron filtradas a través de filtros de nitrocelulosa 0.45 y 0.22 μm (Millipore™ tipo HA) y fijadas con cloroformo. Todos los parámetros fueron determinados en el laboratorio de similar forma a los del muestreo hidrológico (ver sección 4.3).
- **Escorrentías superficiales (V_Q):** El volumen aportado por las ecorrentías fue calculado mensualmente tomando en consideración las áreas que pueden escurrir hacia Laguna Larga (Figura 4) y se utilizaron además los promedios mensuales de lluvia y de temperatura registrados por la estación meteorológica 339 de Cayo Coco. Las áreas fueron estimadas en función de que las zonas construidas (hoteles Blau, Tryp y Senador, así como el CIEC) recolectan las aguas pluviales y se envían a Laguna Larga. En las zonas con vegetación y que no están construidas al sur del sistema, el agua se acumula en desniveles del terreno debido a la deposición de materiales utilizados para el relleno de la

laguna o residuos de dragado. Muestras de agua de escorrentía fueron recolectadas en 2007 y 2008 inmediatamente después de la ocurrencia de precipitaciones. Las muestras para nutrientes disueltos fueron filtradas a través de filtros de nitrocelulosa 0.45 y 0.22 μm (Millipore™ tipo HA) y fijadas con cloroformo. Todos los parámetros fueron determinados en el laboratorio de similar forma a los del muestreo hidrológico (ver sección 4.3). El método de cálculo del volumen de escorrentías fue el propuesto por Schreiber (1904):

$$V_Q = 1000 A r[\exp(-e_0/r)]; e_0 = 1.0 * 10^9 \exp(4.62*10^3/T)$$

Donde: V_Q es la escorrentía mensual (m^3); T es la temperatura mensual ($^\circ\text{K}$); A es el área de captación (km^2) y r es la precipitación mensual (mm). Esta ecuación ha sido aplicada y validada principalmente en zonas tropicales.

- **Volumen de evaporación (V_E):** Al no existir datos de evaporación medidos en la zona, se calculó la evaporación a partir del método de Turc (MMA, 1998), que combina algunas variables meteorológicas como: máxima radiación posible según el mes y la latitud, insolación media mensual, valor mensual medio de la duración astronómica del día y la temperatura media mensual. Con la evaporación diaria calculada para cada período, ésta se multiplicó por el área de cada sección. Se calculó su valor mensual entre 2007 y 2009.
- **Aguas subterráneas (V_G):** En la zona de estudio no fue posible determinar aportes naturales de aguas subterráneas, sin embargo durante 2007 hubo un aporte aproximado de 168 m^3/d de agua subterránea debido a la extracción y bombeo de la misma hacia el sistema (Julio Pérez, Com. Pers). Durante el 2007 fueron recolectadas bimensualmente muestras de estos aportes. Las muestras para nutrientes disueltos fueron filtradas a través de filtros de nitrocelulosa 0.45 y 0.22 μm (Millipore™ tipo HA) y fijadas con cloroformo. Todos los parámetros fueron determinados en el laboratorio de similar forma a los del muestreo hidrológico (ver sección 4.3).
- **Descargas de aguas residuales (V_O):** Se realizaron seguimientos diarios de 24 horas (cada dos o cuatro horas) de los flujos de aguas residuales bajo dos condiciones: con baja (septiembre) y alta ocupación turística (febrero) durante 2007 y 2008. Los flujos de aguas residuales en 2009 fueron estimados a partir de los determinados en 2008. Durante todo el período 2007 – 2008 fueron colectadas muestras de aguas residuales y llevadas al laboratorio, en el 2009 fueron usadas las concentraciones de las muestras de 2008. Las muestras para nutrientes disueltos fueron filtradas a través de filtros de nitrocelulosa 0.45 y 0.22 μm (Millipore™ tipo HA) y fijadas con cloroformo. Todos los parámetros fueron determinados en el laboratorio de similar forma a los del muestreo hidrológico (ver sección 4.3). El estudio se realizó en los cinco puntos de vertimiento que han sido observados en los complejos hoteleros El Senador y Tryp Club Cayo Coco en Laguna Larga (Figura 4).
- Los flujos de salida de N y P utilizados, fueron estimados solamente en 2007 y extrapolados para 2008 y 2009 y fueron tomados de datos no publicados (Acevedo *et al.*, 2008 y Guimaraes y González de Zayas, 2010). La utilización de N y P por el fitoplancton fueron calculados usando la relación de Redfield (16:1) desde la Producción Primaria Neta (PPN) determinada por el método de las botellas claras y oscuras en las tres cajas de Laguna Larga. Para los pastos y

manglares se estimó la PPN y se calculó esta PPN a unidades de C, para posteriormente con el contenido C:N:P de cada grupo, calcular la cantidad de N y P utilizada (Koch y Snedaker, 1997 y Fourqurean *et al.*, 1992).

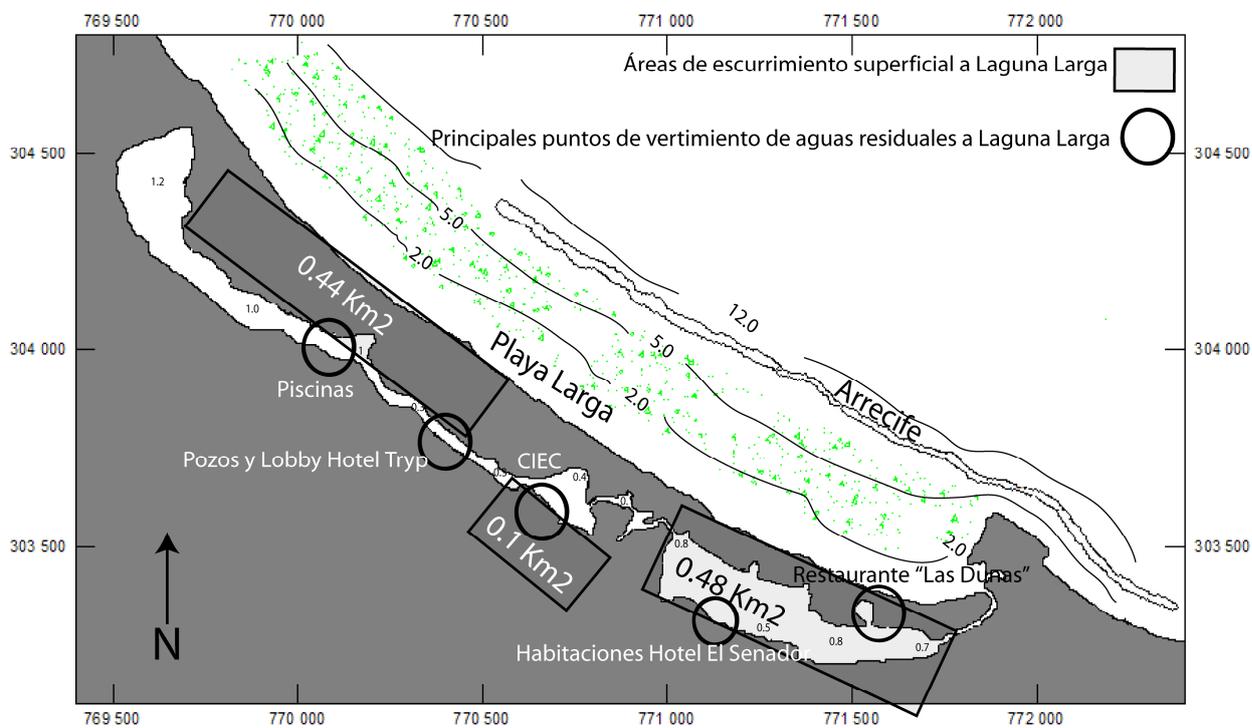


Figura 4. Áreas de escurrimientos superficiales y puntos de vertimientos de aguas residuales a Laguna Larga

4.4.2. Cálculo del balance de agua, sal y nutrientes

4.4.2.1. Balance de agua y sal

Para el cálculo del balance de agua, sal y nutrientes (N y P) en Laguna Larga, se utilizó la ecuación de conservación de la masa. Con base en la distribución de la salinidad en Laguna Larga durante el período de muestreo se decidió dividir en tres secciones.

Para utilizar estas ecuaciones se realizó un inventario de las principales entradas y salidas de agua al sistema (precipitación (V_P), evaporación (V_E), aguas subterráneas (V_G), aportes de descargas (V_O) y escurrimientos superficiales (V_Q). A partir de este inventario y asumiendo el estado estacionario ($\frac{dV}{dt} = 0$) en el sistema, se hizo un balance de agua y sal, con el cual se pudo estimar el volumen de mezcla.

Gordon *et al* (1996) planteó las siguientes ecuaciones (1 – 4) para el cálculo del balance de agua:

Primero:

Se calcula el Volumen Residual (V_R): Es el volumen de agua que es necesario exportar o importar para mantener el volumen constante. En estado estacionario el término de la izquierda se hace nulo y se calcula el V_R .

$$\frac{dV_s}{dt} = V_Q + V_P + V_G + V_O + V_E + V_R \quad [1]$$

Segundo:

Se calcula la Salinidad Residual (S_R): Es el promedio de la salinidad en la frontera entre cada sección.

$$S_R = \frac{(S_s + S_{oc})}{2} \quad [2]$$

Tercero:

Se calcula el Volumen de Mezcla (V_x): Es el volumen que intercambia el sistema con el sistema adyacente (otra sección o el mar) para mantener el balance de agua constante en un intervalo de tiempo.

$$\frac{dV_s S}{dt} = V_Q S_Q + V_P S_P + V_G S_G + V_E S_E + V_R S_R + V_x S_2 - V_x S_1 \quad [3]$$

A partir de los valores de V_R y V_x , que representan la cantidad de agua que intercambia el sistema, es posible estimar un tiempo de residencia, en relación con el volumen total del sistema (ecuación 4)

$$\tau = \frac{V_{sistema}}{V_x + |V_R|} \quad [4]$$

4.4.2.2. Balance de N y P

La ecuación general del balance de masa para N y P en cada sección es:

$$\frac{dV_s S}{dt} = \Delta Y + V_Q Y_Q + V_P Y_P + V_G Y_G + V_E Y_E + V_R Y_R + V_x Y_{oc} - V_x Y_s \quad [5]$$

Donde el término ΔY representa el flujo no conservativo del elemento Y. Y_1 representa la concentración del elemento en la sección de trabajo y Y_2 en la adyacente; Y_R es la concentración del elemento en el flujo residual.

4.4. Composición isotópica ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$) en *Thalassia testudinum* y *Penicillus dumetosus*

Esta herramienta se utilizó en la investigación para buscar evidencias sobre el origen y destino del nitrógeno, posiblemente exportado, desde la Laguna Larga a los pastos marinos y arrecifes coralinos del área marina adyacente. Las bondades de este método incluyen su utilidad como trazador químico, su versatilidad en cuanto a su aplicación en disciplinas y áreas de estudio diferentes (desde la hidrología subterránea y la ecología estuarina hasta la antropología), la relativa facilidad para el manejo de las muestras y, en particular, su empleo en estudios comunitarios de naturaleza trófica (Fry *et al.*, 1982).

4.4.1. Frecuencia de muestreo y distribución de las estaciones

La hipótesis de la investigación plantea que: “un sistema lagunar antropizado de Cayo Coco (Laguna Larga) exporta nutrientes hacia las praderas de pastos marinos y los arrecifes coralinos de la zona adyacente”. Por lo anterior, la estrategia de la caracterización isotópica se basó en la determinación de $\delta^{15}\text{N}$. Teniendo en cuenta que los aportes continentales son despreciables en la zona de estudio, se asumió que existen dos fuentes principales de nitrógeno, la aportada por las aguas marinas oligotróficas de la zona y el proveniente de las descargas de aguas residuales. Se utilizaron como indicadoras de la posible influencia de los residuales vertidos en Laguna Larga la composición isotópica de una especie de macroalga bentónica (*Penicillus dumetosus*) y una fanerógama (*Thalassia testudinum*), comunes en Laguna Larga y en la zona de pastos y de arrecifes coralinos en Playa Larga y Playa las Coloradas. Se tomaron como referencia un ecosistema de pastos marinos y uno de arrecifes coralinos que solo recibían influencia marina y se hizo el análisis sólo en la época lluviosa (playa Flamenco) (Figura 5). Las muestras se tomaron durante la temporada seca (febrero) y lluviosa (octubre) de 2007. Las muestras recolectas fueron llevadas al laboratorio, lavadas con agua destilada y HCL diluido y posteriormente molidas finamente, envasadas en contenedores de aluminio y enviadas al laboratorio.

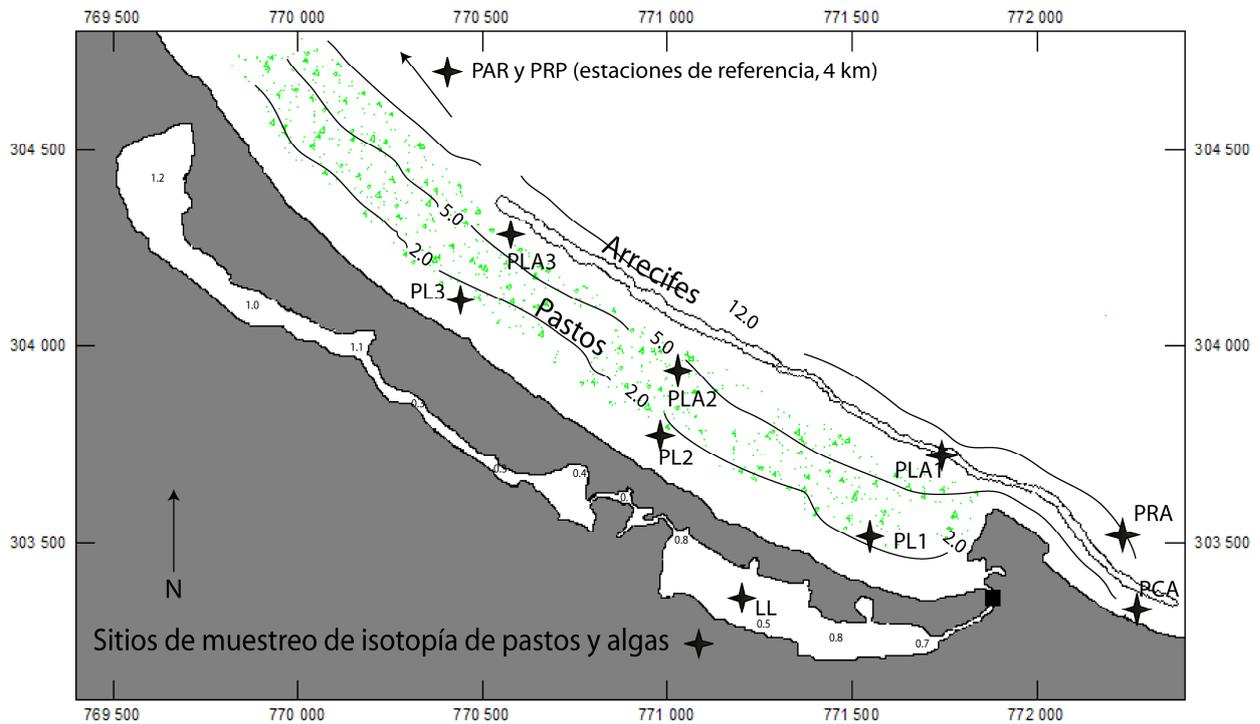


Figura 5. Localización de las estaciones de muestreo de *Thalassia testudinum* y *Penicillus dumetosus* en Laguna Larga (LL), Playa Larga y de referencia (PCA y PRA)

... **4.4.2. Determinación analítica de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$**

El análisis de la composición isotópica se basa en la combustión total de las muestras en un analizador elemental acoplado a un espectrómetro de masas que determina las relaciones isotópicas en los gases CO_2 y N_2 de un estándar de referencia y en la muestra. Sus valores se definen como la diferencia en partes por mil (‰) entre una muestra y un material de referencia estándar (Sigman *et al.*, 1997) en función de la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{estándar}}}{R_{\text{estándar}}} \times 1000 \quad [6]$$

Donde R es la proporción $[\text{N}^{15}/\text{N}^{14}]_{\text{muestra}} / [\text{N}^{15}/\text{N}^{14}]_{\text{estándar}}$ y $[\text{C}^{13}/\text{C}^{12}]_{\text{muestra}} / [\text{C}^{13}/\text{C}^{12}]_{\text{estándar}}$. Para el caso del N el estándar usado fue N_2 atmosférico y para C, un estándar secundario (celulosa) de relación conocida con el patrón internacional Pee Dee Belemnita.

La primera caracterización de las muestras tomadas en febrero de 2007 (temporada poco lluviosa) se realizó en el Laboratorio de Isótopos Ambientales de la Universidad de Waterloo en Canadá (con un espectrómetro de masa Finnegan Delta plus-EA ^{13}C , ^{15}N) y las muestras correspondientes a la temporada lluviosa de 2007

fueron analizadas en el Laboratorio de Isótopos de Davis de la Universidad de California (con un equipo Carlo Erba 1108 acoplado a un analizador elemental CE Instruments NC2500 en interface con espectrómetro de masa Thermo Finnegan Delta Plus XP). La precisión analítica de ambos métodos es de 0.2 ‰.

4.5. Balance de N en la zona costera de Cayo Coco

Para valorar la importancia del flujo de N aportado por Laguna Larga hacia la zona costera adyacente, además del análisis isotópico, se estimaron la magnitud de los principales flujos a esta zona. Los flujos terrestres de N (escorrentías, aguas subterráneas y aguas residuales) fueron sólo los calculados para 2007 (teniendo en cuenta que sólo en 2007 fue posible estimar el flujo aguas subterráneas) a partir del balance propuesto por el Proyecto Land–Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ), la fijación de N fue estimada a partir de la revisión detallada del tema que hace Howarth *et al.* (1988) y la depositación atmosférica de González – Zayas *et al.* (2011). Los flujos oceánicos de N hacia la zona costera se consideraron despreciables en este balance.

5. RESULTADOS

5.1 Condiciones climáticas

5.1.1. Precipitaciones

La media anual histórica de Cayo Coco es de 1129.2 mm (Figura 6), valor que corresponde al período 1990 – 2003, considerando que el 2004 constituye un año extremadamente atípico (año más seco, con menos de 600 mm). Los acumulados anuales de precipitación 2007, 2008 y 2009 tuvieron un déficit con relación a la media histórica. En 2007 se observó un déficit no significativo (-4.1 mm) y en 2008 y 2009 se tuvo solo el 61% de la media histórica.

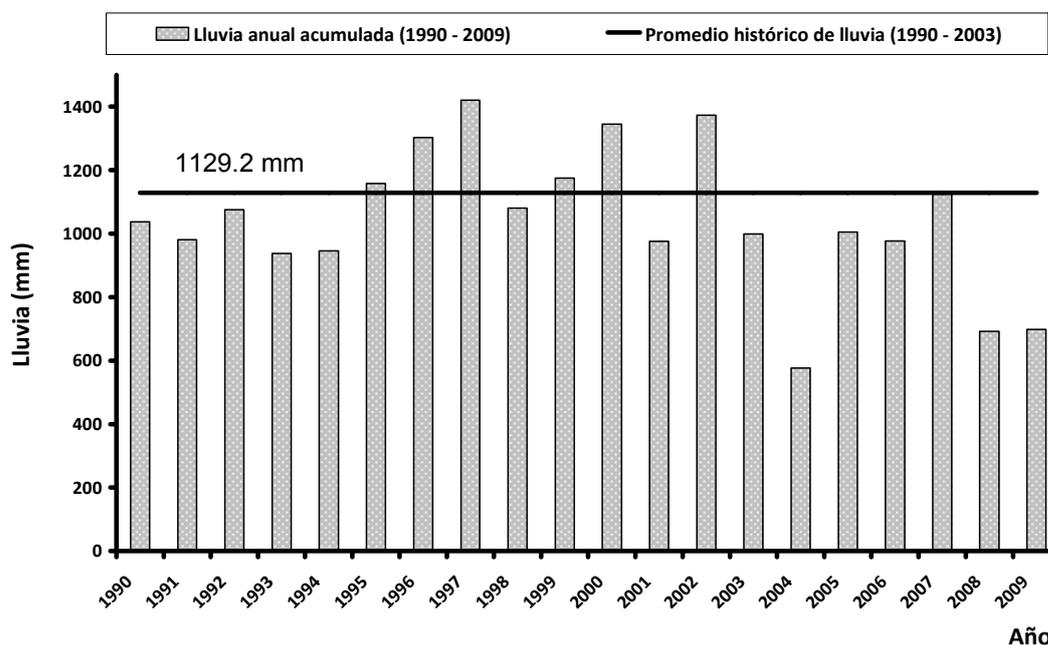


Figura 6. Distribución de la precipitación anual en la estación meteorológica de Cayo Coco (1990 – 2009). Comparación con la media anual histórica (1990 – 2003).

La distribución por meses del acumulado de precipitación para cada uno de los años analizados, así como la comparación de las respectivas curvas con las medias históricas mensuales (Figura 7), evidencia que el 2007 muestra una distribución anómala, con relativas características de homogeneidad a partir de abril, con un pico máximo en dicho mes, mientras que el año experimentó procesos lluviosos concentrados en los dos bimestres señalados con los máximos acumulados históricos (mayo-junio y septiembre-octubre); aunque el máximo absoluto estuvo concentrado en la primera mitad del año.

El 2008 muestra una distribución estacional atípica, reflejando valores medios inferiores a la media histórica, excepto marzo, mayo y agosto; junio y octubre, considerados incluso entre los meses de mayores acumulados de precipitación, aparecen en este caso con los déficits más elevados. El año 2009 muestra cuatro

meses (abril, mayo, julio y agosto) con valores superiores a las respectivas medias históricas, no ocurriendo lo mismo durante el resto del período anual.

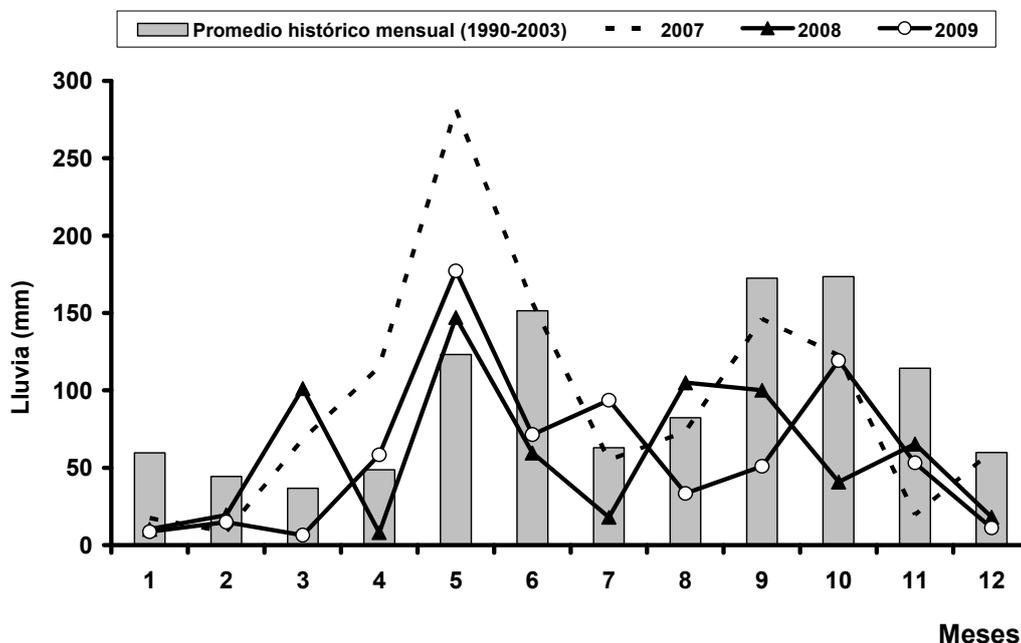


Figura 7. Comportamiento del acumulado mensual de precipitación durante el trienio 2007 – 2009 y el promedio mensual histórico (1990 – 2003). Estación meteorológica de Cayo Coco.

5.1.2. Evaporación

Al no existir datos de evaporación medidos en la zona, se calculó la evaporación a partir del método de Turc (MMA, 1998), que combina algunas variables meteorológicas como: máxima radiación posible según el mes y la latitud, insolación media mensual, valor mensual medio de la duración astronómica del día y la temperatura media mensual. No hay evaporación anual histórica calculada para Cayo Coco, por lo que nos referiremos sólo a la calculada para el período de estudio. La media anual para el período 2007 – 2009, fue de 1566 mm. Por años, el año con mayor evaporación fue 2009 con 1614 mm y el menor 2007 (1513.4 mm).

Por meses, la mayor evaporación se concentra entre los meses de abril y agosto con valores que superaron los 150 mm (Figura 8).

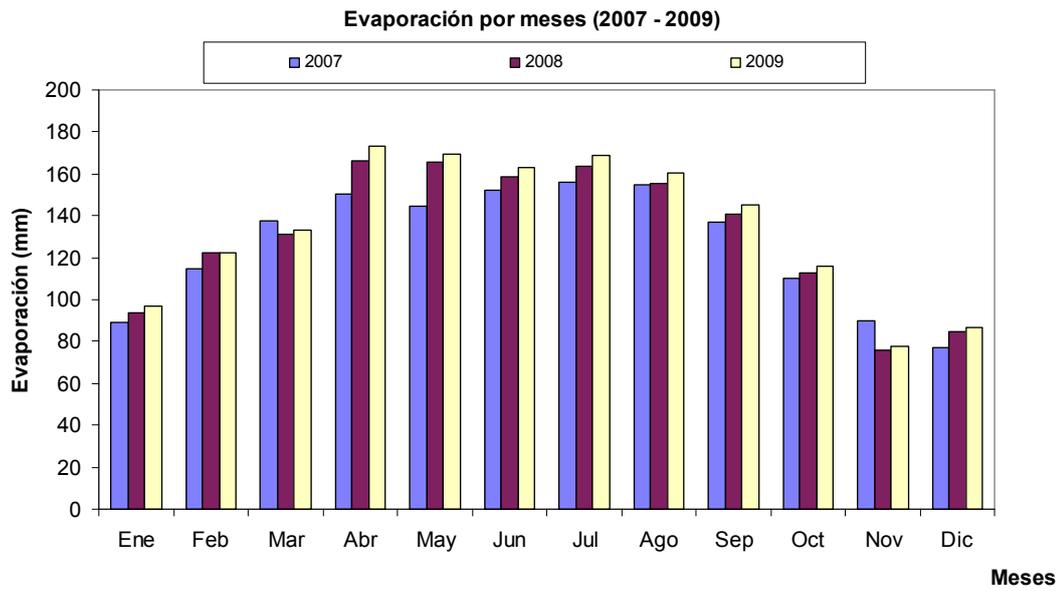


Figura 8. Comportamiento del acumulado mensual de evaporación durante el trienio 2007 – 2009. Estación meteorológica de Cayo Coco.

5.2. Hidrología

5.2.1. Temperatura

En el período de estudio la temperatura promedio fue de 27.4 ± 2.7 °C (21.6 – 34.0 °C) (Tabla 1). En 2009, la temperatura promedio fue de 27.7 ± 2.7 °C, más elevada que la de 2008 (27.2 ± 2.8 °C) y 0.4 °C más elevada que en 2007. Sin embargo, no hubo diferencias significativas entre el comportamiento de la temperatura entre 2007, 2008 y 2009. En los muestreos de la temporada invernal (noviembre – abril) la temperatura fue más baja que la determinada en los meses de la temporada cálida (mayo- octubre), siguiendo las épocas climáticas características de la zona (Figura 9).

La temperatura máxima (34.0°C) para la distribución espacial se registró en la campaña de septiembre de 2009, en la estación 10, caracterizada por ser una zona muy somera, que queda aislada del resto del sistema en esta época del año. La mínima temperatura (21.0 °C) fue también en una estación somera (6), y ocurrió en abril de 2008 (Figura 10).

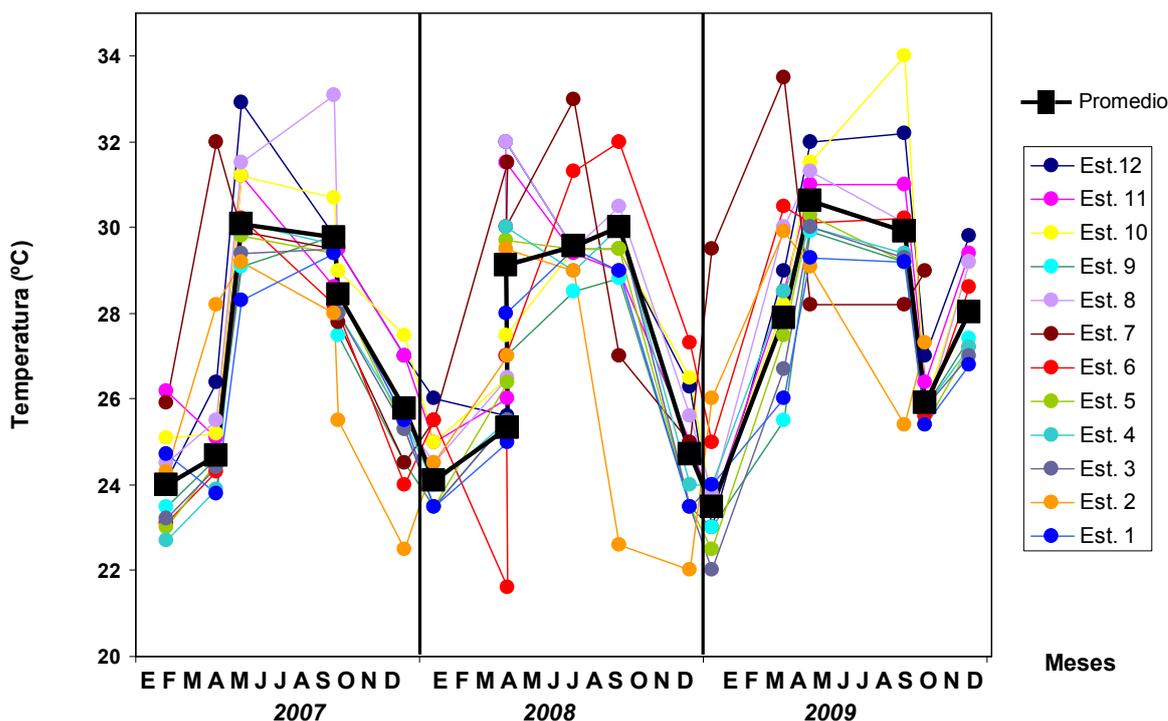


Figura 9. Comportamiento temporal de la temperatura (por estaciones y promedio) en las aguas de Laguna Larga de 2007 – 2009. La línea negra continua es la división para cada año de muestreo.

Tabla 1. Concentraciones de algunos parámetros fisicoquímicos determinados en Laguna Larga para todo el período y cada año de estudio

SITIO		TEMP. (°C)	SAL. (UPS)	OD (ML/L)	NID (µM)	NORG (µM)	NT (µM)	PRS (µM)	PORG (µM)	PT (µM)	SRS (µM)
Laguna Larga (2007 – 2009)	promedio	27.4	35.0	4.8	19.77	142.0	161.7	0.54	4.61	5.15	19.12
	Desv.Est.	2.7	6.2	2.8	43.31	124.3	132.0	1.27	4.52	5.42	67.6
	Rango	21.6 – 34.0	8.0 – 64.8	0.0 – 13.0	0.49 – 496.0	5.9 – 1046.2	17.7 – 1088.2	0.02 – 16.93	0.2 – 45.22	0.22 – 62.15	1.13 – 980.6
Laguna Larga (2007)	promedio	27.3	32.9	5.5	15.05	122.1	137.3	0.09	2.38	2.47	13.19
Laguna Larga (2008)	promedio	27.2	35.9	4.7	19.03	109.4	128.4	0.52	3.90	4.42	25.89
Laguna Larga (2009)	promedio	27.7	36.0	4.2	25.29	195.9	221.2	1.00	7.55	8.55	18.21

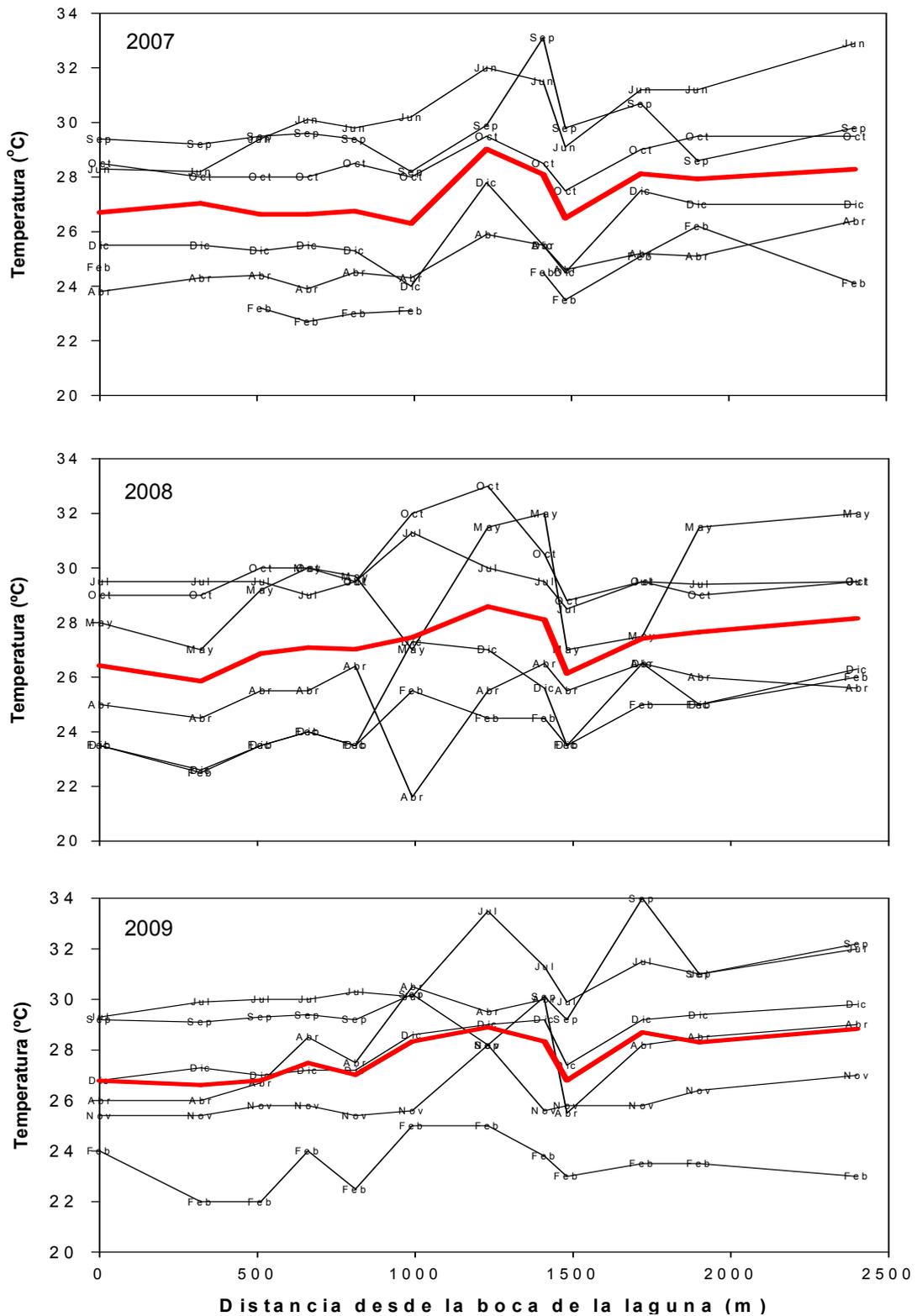


Figura 10. Distribución espacial de temperatura (°C) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de temperatura.

5.2.2. Salinidad

La salinidad promedio en el período estudiado fue de 35.0 ± 6.2 ups y osciló entre 8.0 y 64.8 ups (Tabla 1). La salinidad media en 2009 fue de 36.0 ± 6.9 ups, similar a la determinada en 2008 (35.9 ± 5.8) y más elevada que la de 2007 (32.9 ± 5.6 ups) (Figura 11). Al hacer un análisis de varianza, se encontraron diferencias significativas para la salinidad al comparar el 2007 con 2008 (ANOVA $F=33.48$, $p=0.00$) y 2009 ($F=8.23$, $p=0.00$); entre el 2008 y 2009 no se evidenciaron diferencias significativas.

Los mayores niveles de salinidad fueron en abril de 2007 y abril de 2009 en la estación 6 (59.3 y 64.8 ups, respectivamente) y los más bajos (desde 8.0 hasta 15.3 ups) en la estación 9 (ubicada debajo del lobby del Hotel Tryp). La distribución estacional de la salinidad no tuvo una tendencia estacional marcada y no se observó un patrón a largo plazo.

La salinidad tuvo una distribución espacial similar para todos los muestreos (Figura 12). La salinidad en la sección exterior, con mejor comunicación con el mar, fue similar a la del mar adyacente. Variaciones temporales en la sección central y salinidad menor a la marina (principalmente en 2007) fueron observadas en la sección interior (caracterizada por un menor intercambio con el mar). A partir de esta distribución fue posible agrupar tres secciones diferentes en Laguna Larga; la sección interior, la sección central y la sección exterior, más cercana al mar (Figura 13).

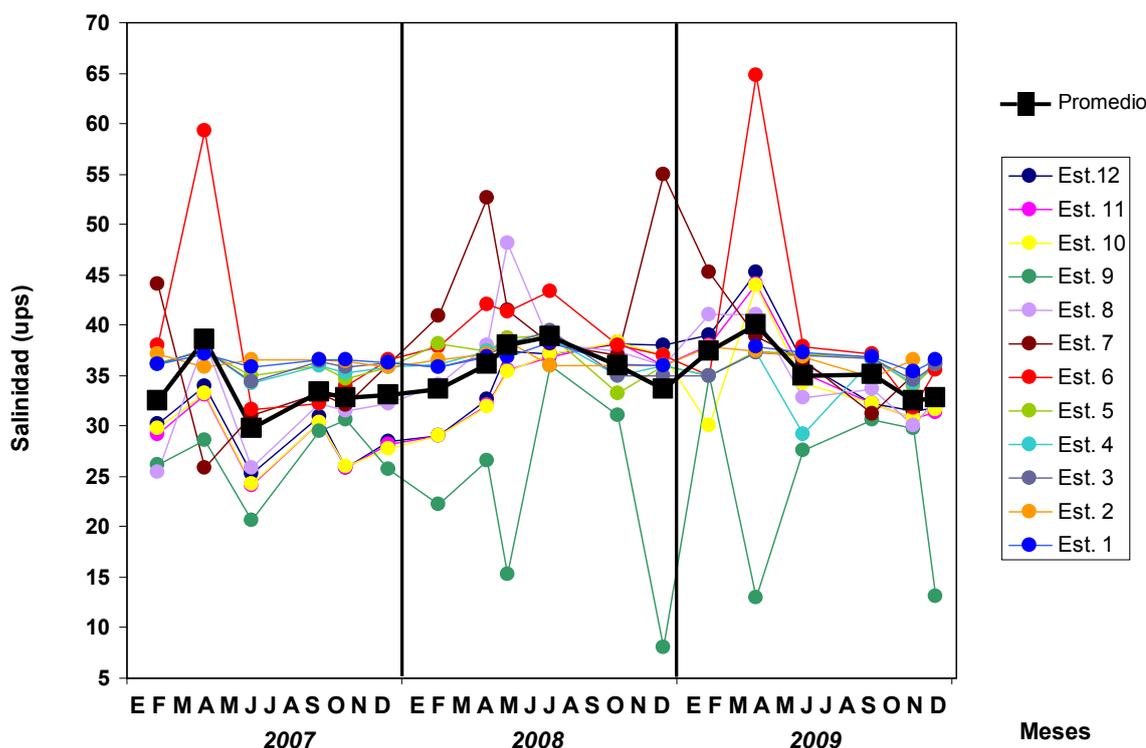


Figura 11. Comportamiento temporal de la salinidad (por estaciones y promedio) en las aguas de Laguna Larga de 2007 – 2009. La línea negra continua es la división para cada año.

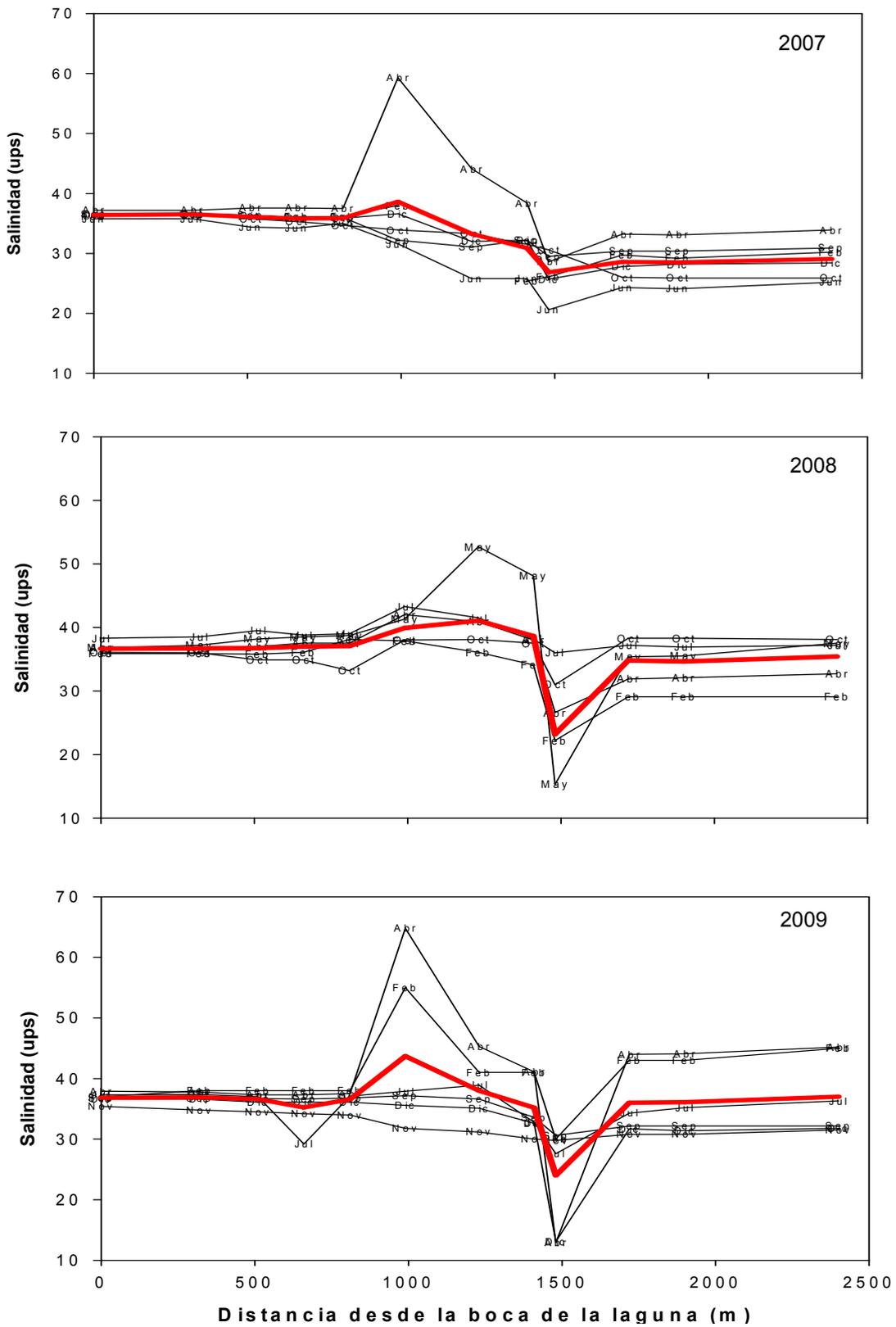


Figura 12. Distribución espacial de salinidad (ups) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de salinidad.

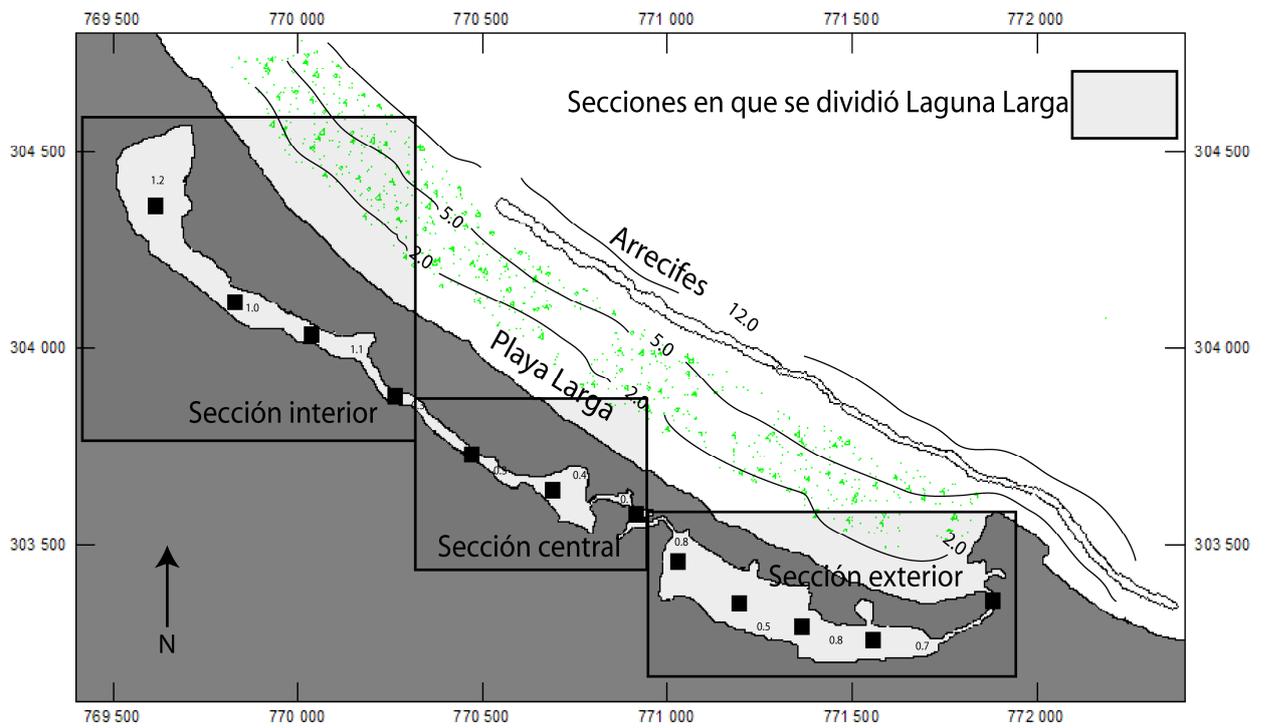


Figura 13. División de Laguna Larga en tres secciones, a partir de la distribución espacial de salinidad: sección interior (8 – 45.2 ups), sección central (25.4 – 64.8 ups) y sección exterior (29.2 – 39.5 ups).

5.2.3. Oxígeno disuelto (OD)

El comportamiento temporal del OD en los tres períodos de estudio (2007 – 2009) tuvo una alta variabilidad temporal. Para el período, el OD fue de 4.8 ± 2.8 ml/L (Tabla 1). En 2009, el OD promedio fue de 4.2 ± 2.6 ml/L, similar al determinado en 2008 y 1.3 ml/L inferior al de 2007 (5.5 ± 3.2 ml/L) con diferencias significativas entre 2007 y 2009 ($F=8.23$, $p=0.00$) (Figura 14).

Espacialmente, existieron niveles mínimos de oxígeno (anoxia incluida) en la estación 9, ubicada debajo del Hotel Tryp, que es el sitio donde se concentran los mayores volúmenes de vertimiento de aguas residuales (Figura 15).

En la sección interior del sistema, a pesar de su aislamiento, no se encontraron niveles nulos de oxígeno, principalmente porque durante el día, la producción primaria del fitoplancton del lugar contribuye a elevar la concentración de este gas en el agua. Además es el sector más ancho de Laguna Larga, donde los vientos prevaecientes del Este y Nordeste durante la mayor parte año provoca un mayor movimiento del agua.

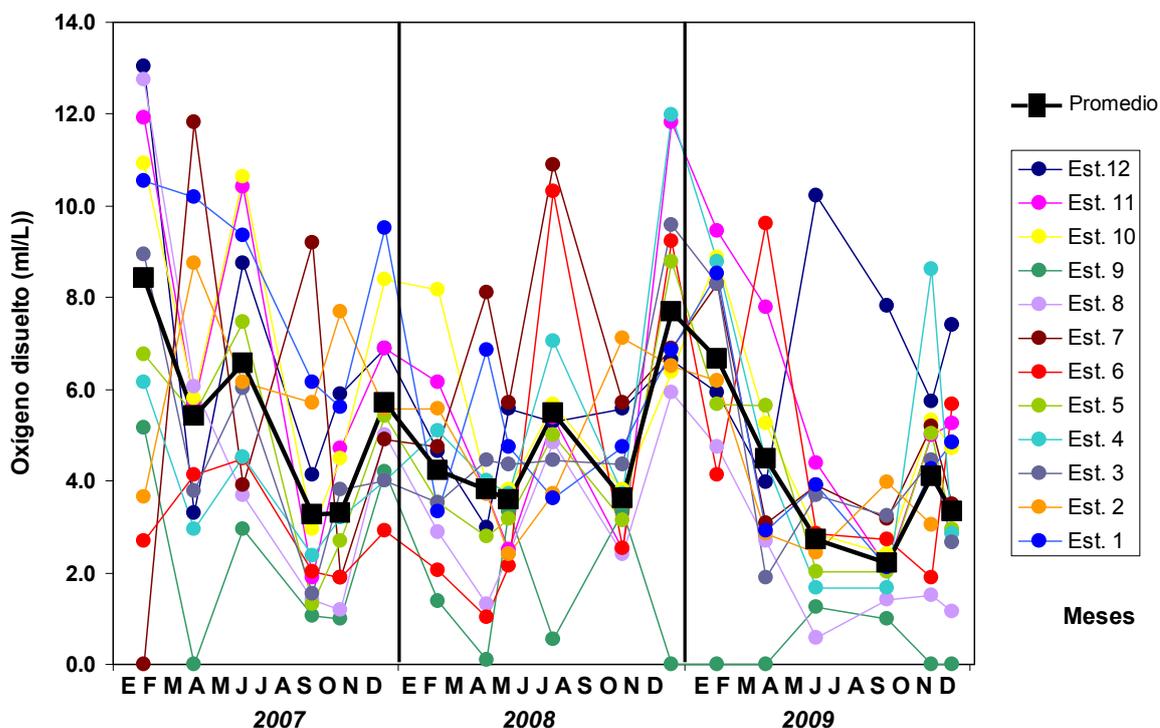


Figura 14. Comportamiento temporal del oxígeno disuelto (por estaciones y promedio) en las aguas de Laguna Larga de 2007 – 2009. La línea negra continua es la división para cada año.

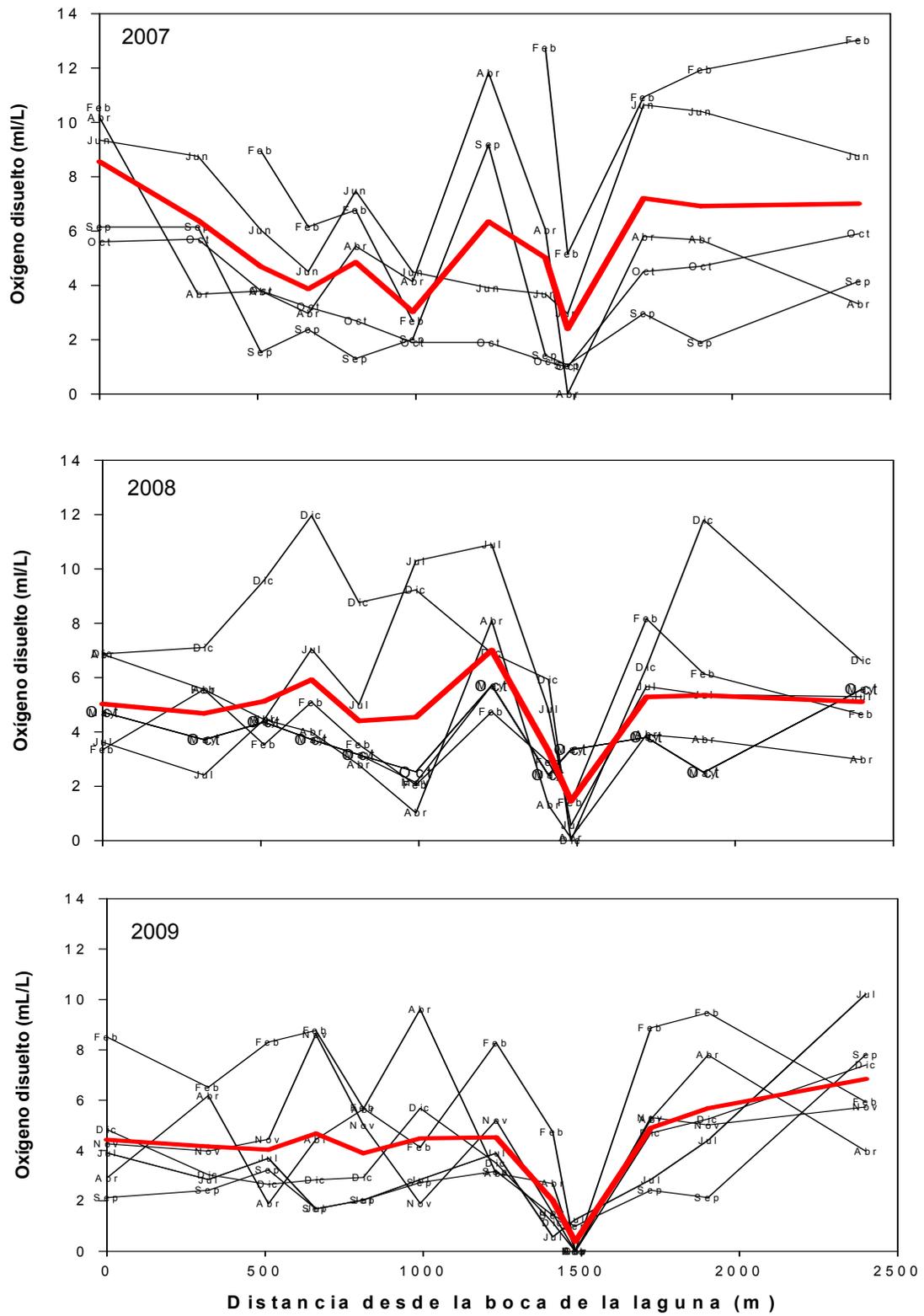


Figura 15. Distribución espacial de oxígeno disuelto (mL/L) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de OD.

5.2.4. Nitrógeno inorgánico disuelto (NID)

Durante el período de estudio, el nitrógeno inorgánico disuelto (NID) tuvo un contenido medio de $19.8 \pm 46.4 \mu\text{M}$ (Tabla 1). En 2009 se determinó el nivel medio más elevado ($25.3 \pm 59.3 \mu\text{M}$), siendo $15.0 \pm 26.2 \mu\text{M}$ el más bajo para 2007 (Figura 16).

Espacialmente, los mayores niveles estuvieron hacia la sección interior de Laguna Larga, debido a la existencia de fuentes puntuales de NID en la estación 9 (ubicada bajo el lobby del hotel Tryp). Estos máximos fueron varias veces superiores a las concentraciones determinadas en las restantes estaciones (llegaron hasta $496.0 \mu\text{M}$ en diciembre de 2009), lo que pone en evidencia que el vertimiento de aguas residuales siguió aportando nutrientes nitrogenados.

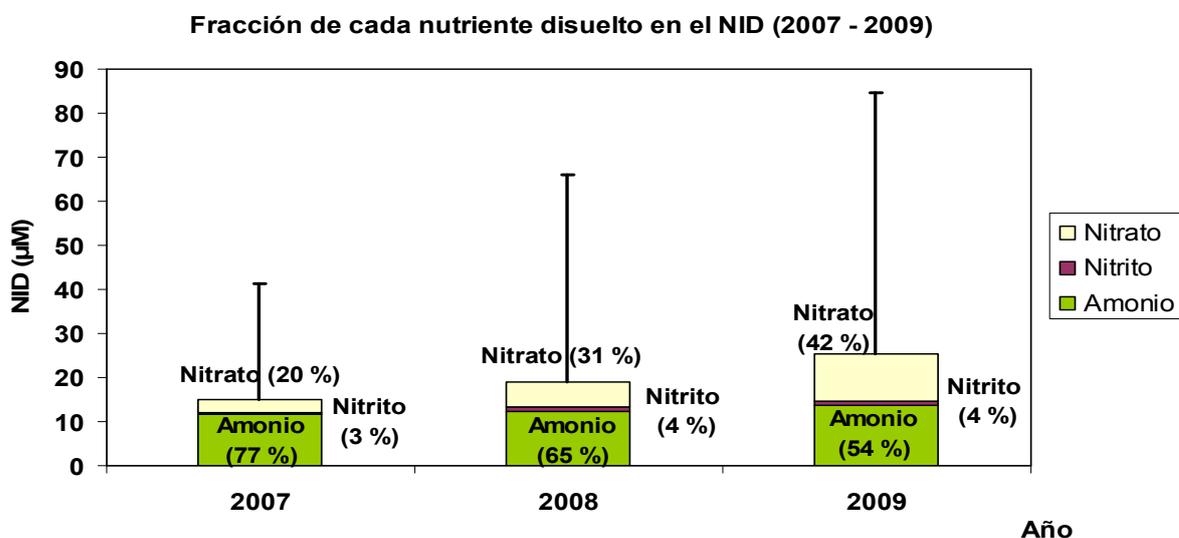


Figura 16. Fracción de cada nutriente disuelto (amonio, nitrato y nitrito) en el contenido de NID en las aguas de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Las líneas verticales representan la desviación estándar del DIN para cada año.

5.2.5. Amonio

El amonio (más del 50 % en todas las estaciones y todos los muestreos) fue la fracción nitrogenada que más contribuyó al NID (Figura 16). La concentración media anual de este parámetro estuvo entre 11.6 ± 24.3 y $13.6 \pm 51.5 \mu\text{M}$, incrementándose ligeramente desde 2007 hasta 2009. Sin embargo no hubo diferencias significativas al comparar este parámetro entre los tres períodos de muestreo.

Espacialmente, y al representar el amonio la mayor fracción en el NID, los máximos de amonio se concentraron hacia el interior de Laguna Larga (principalmente la estación 9) con niveles de hasta $439.0 \mu\text{M}$ en diciembre de 2009. El contenido de amonio de las aguas residuales vertidas puntualmente en la zona interior de Laguna Larga fue de $480.0 \mu\text{M}$, por lo que los máximos determinados en la región se deben principalmente a este factor (Figura 17).

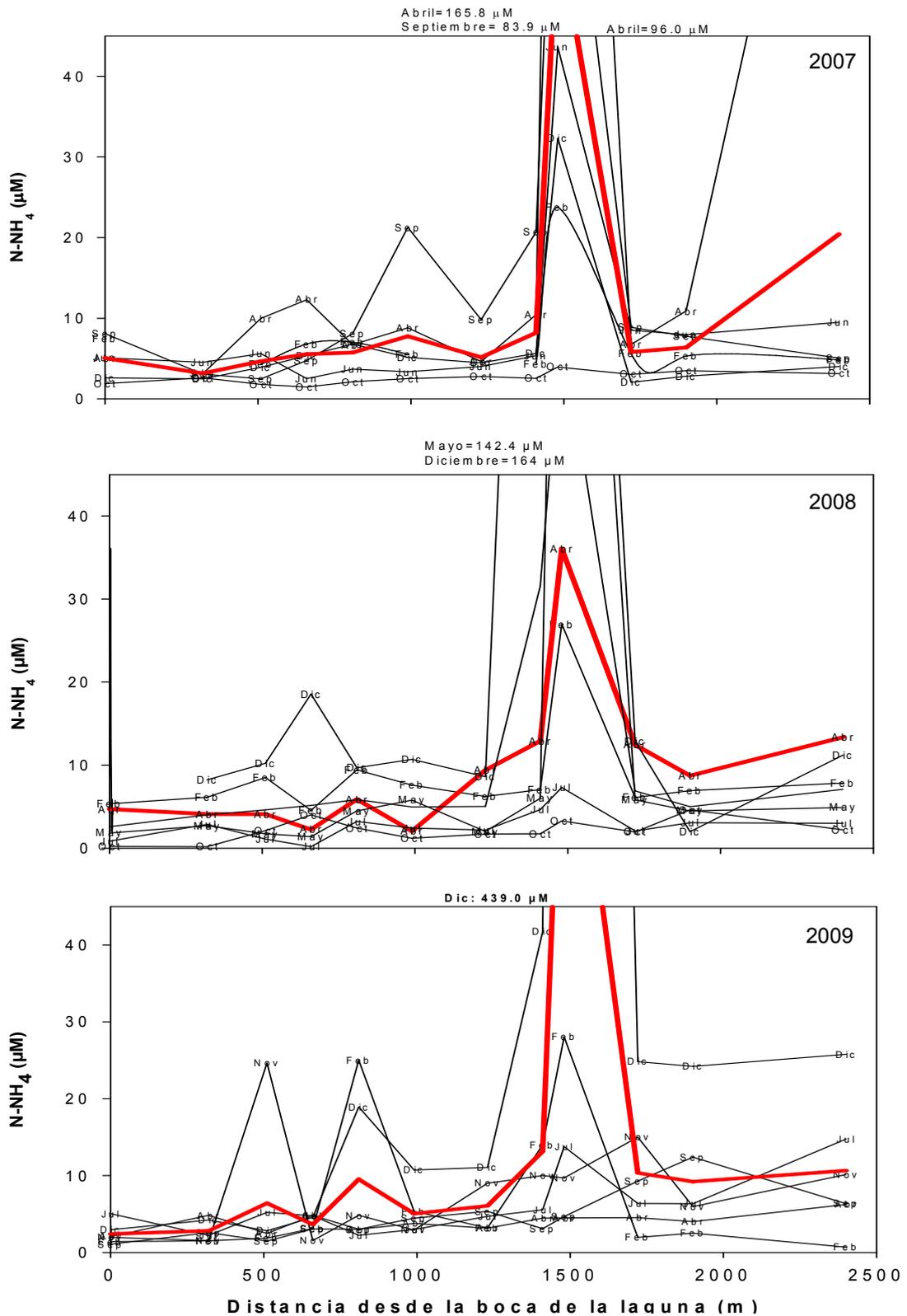


Figura 17. Distribución espacial de amonio (µM) en las aguas Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de amonio.

5.2.6. Nitrito

El nitrito, al ser un compuesto intermedio entre la forma más oxidada (nitrato) y reducida (amonio) del nitrógeno, tuvo una concentración promedio durante el muestreo de $0.80 \pm 1.88 \mu\text{M}$ ($0.05 - 22.42 \mu\text{M}$). Los niveles promedios fueron mucho más bajos ($0.49 - 1.08 \mu\text{M}$) que la de las restantes fracciones del NID. Sin embargo, tanto en la fracción de nitrito en el NID como en el contenido medio anual, en 2009 los niveles de nitrito (4% y $1.08 \pm 2.69 \mu\text{M}$) fueron superiores a los de 2007 y 2008. No se encontraron diferencias significativas para este parámetro en el análisis estadístico para la comparación anual en los tres períodos de muestreo.

Espacialmente, los mayores niveles se localizaron en la estación 9 (hasta $22.42 \mu\text{M}$). Esto se debió al vertimiento de aguas residuales, las cuales normalmente se encuentran más enriquecidas de este nutriente disuelto que las aguas naturales (hasta $35.08 \mu\text{M}$ en el agua residual vertida bajo el lobby del Hotel Tryp).

Los contenidos de nitrito de la sección exterior fueron diferentes a los determinados para la sección central ($F=4.98$, $p=0.03$) y la interior ($F=6.01$, $p=0.02$) sólo en 2008. Al igual que el amonio y el nitrato, el contenido de nitrito tuvo una relación estadística positiva con los restantes nutrientes (excepto el Norg) y negativa con la salinidad (Tabla 2).

5.2.7. Nitrato

Entre 2007 y 2009, el nitrato osciló entre 0.1 y $180.4 \mu\text{M}$ y tuvo promedio de $6.6 \pm 15.4 \mu\text{M}$. Aunque la fracción de nitrato (entre 20 y 42%) en el NID fue inferior a la de amonio, si se notó una tendencia a incrementarse desde 2007 hasta 2009 (de 2.9 ± 4.3 a $10.6 \pm 14.6 \mu\text{M}$). Niveles de hasta $180.4 \mu\text{M}$ (seis veces mayor que el máximo de 2007) fueron determinados en la estación 9 de la red de muestreo, coincidiendo con el mayor contenido de amonio. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas para este parámetro en el análisis estadístico ni para la comparación anual (2007 - 2009), ni para las épocas climáticas de ambos años. Si hubo diferencias significativas en el nitrato en la comparación de las varianzas entre 2007 y 2009 ($F=18.07$, $p=0.00$).

Espacialmente, salvo los extremos en las concentraciones de nitrato determinadas en la estación 9, la distribución de este parámetro en 2008 fue homogénea a lo largo de toda la laguna. Sólo se encontraron diferencias significativas al comparar las tres secciones en que las que está dividida Laguna Larga entre las secciones interior y exterior durante 2009 ($F=6.56$, $p=0.01$).

Tabla 2. Coeficientes de correlación de todos los parámetros determinados en Laguna Larga entre 2007 y 2009. Los marcados en negro, son los parámetros que tiene una correlación significativa (negativa o positiva) entre ellos para $p < 0.05$.

	Temperatura	Salinidad	Oxígeno	PRS	Porg	Pt	Amonio	Nitrito	Nitrato	Norg	Nt	SiRS
Temperatura	1.00											
Salinidad	-0.00	1.00										
Oxígeno	-0.22	0.14	1.00									
PRS	0.05	-0.19	-0.16	1.00								
Porg	0.07	-0.31	-0.25	0.64	1.00							
Pt	0.07	-0.30	-0.24	0.77	0.98	1.00						
Amonio	-0.08	-0.41	-0.19	0.76	0.55	0.63	1.00					
Nitrito	-0.02	-0.38	-0.16	0.74	0.60	0.68	0.77	1.00				
Nitrato	0.08	-0.29	-0.07	0.22	0.33	0.32	0.33	0.53	1.00			
Norg	0.18	-0.21	-0.05	0.07	0.27	0.24	-0.04	-0.00	0.11	1.00		
Nt	0.17	-0.33	-0.10	0.31	0.45	0.45	0.27	0.29	0.33	0.94	1.00	
SiRS	0.04	-0.29	-0.07	0.14	0.20	0.20	0.34	0.51	0.83	0.05	0.24	1.00

5.2.8. Nitrógeno orgánico (Norg)

Entre 2007 y 2009, el nitrógeno orgánico (Norg) constituyó la mayor fracción del nitrógeno total (Nt) en Laguna Larga con porcentaje de entre 23 y hasta casi 96 (promedio de 87 %) (Figura 18), por lo que reflejó que la parte orgánica acumuló casi todo el nitrógeno disponible en el sistema.

La concentración media de esta forma de nitrógeno fue de $142.0 \pm 124.3 \mu\text{M}$, con un incremento en sus niveles en 2009 de hasta $195.9 \pm 161.6 \mu\text{M}$, si se compara con el promedio de 2007 y 2008 que estuvo cerca de los $110.0 \mu\text{M}$ (Tabla 1). La comparación de las concentraciones de Norg a través de la ANOVA resultó en que 2009 fue significativamente diferente a 2007 ($F=10.84$, $p=0.00$) y a 2008 ($F=16.03$, $p=0.001$). Los contenidos máximos se determinaron en septiembre y abril de 2009, con $1,046 \mu\text{M}$ y $522.8 \mu\text{M}$, respectivamente.

La distribución espacial de este nutriente tuvo un gradiente decreciente desde el interior hasta el exterior de la laguna, similar para todos períodos de muestreo (Figura 19). Las tres secciones en que se ha dividido a Laguna Larga para su estudio mostraron diferencias significativas en su distribución durante el período de estudio (2007 – 2009) (sección interior – sección central, $F=46.85$, $p=0.00$; sección interior – sección exterior, $F=49.53$, $p=0.00$ y sección exterior – sección central, $F=5.34$, $p=0.02$). Esta fracción de nitrógeno tuvo una relación significativa con la salinidad ($r=-0.21$), con el Porg (0.27), el Pt (0.24) y el Nt ($r=0.94$) (Tabla 2).

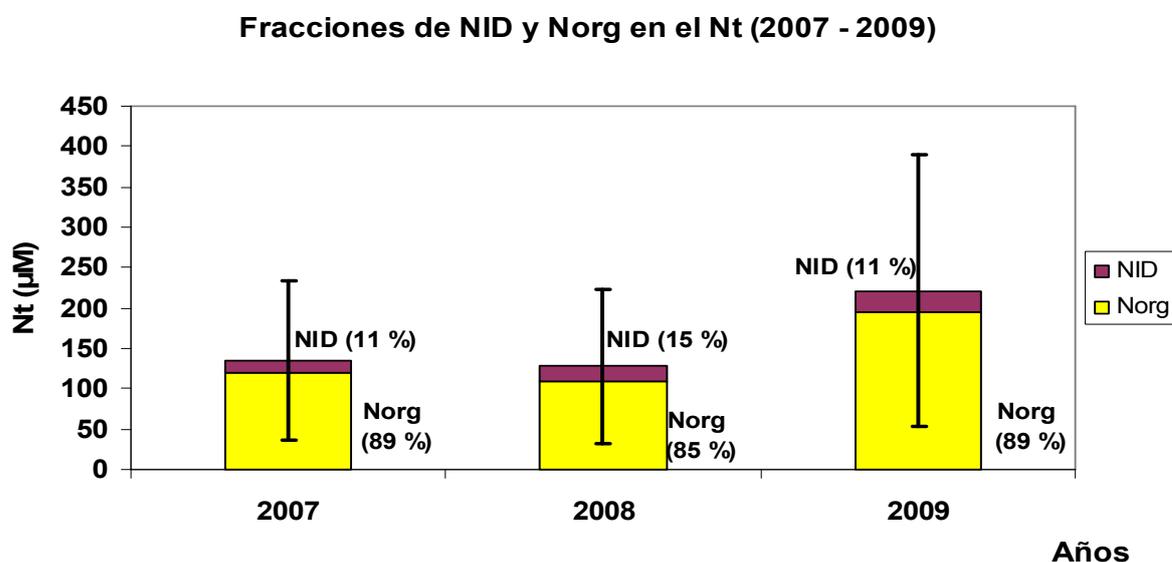


Figura 18. Fracciones de NID y Norg en el contenido de Nt en las aguas de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Las líneas verticales representan la desviación estándar del Nt para cada año.

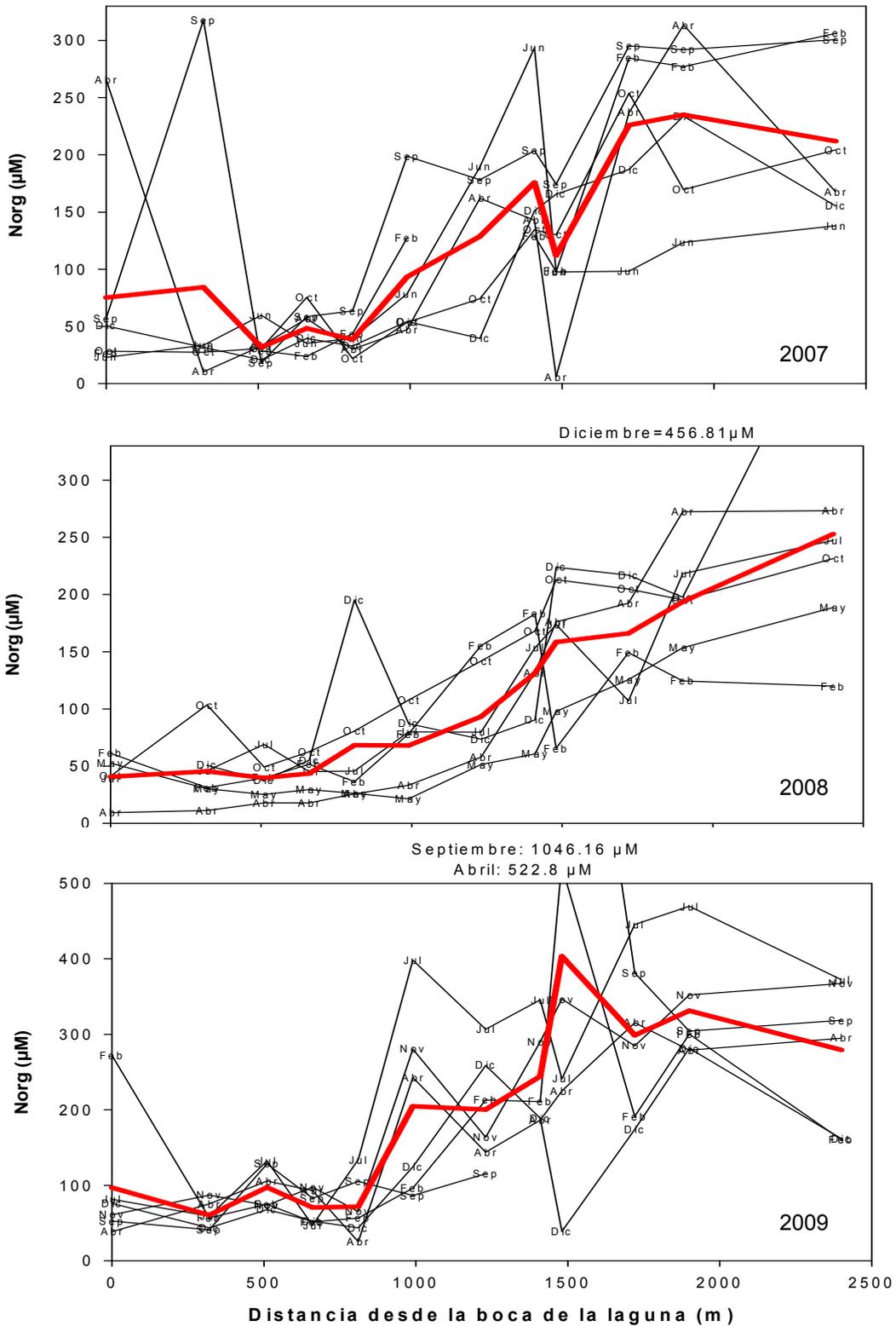


Figura 19. Distribución espacial de Norg (μM) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de Norg.

5.2.9. Nitrógeno total (Nt)

La concentración media de Nt en todo el estudio fue de $161.7 \pm 132.0 \mu\text{M}$ con un incremento de hasta $221.3 \mu\text{M}$ en 2009, similar a lo descrito para el Norg (Tabla 1). La dependencia del Nt del contenido de Norg determinó que este parámetro fuera significativamente diferente en 2009 de los determinados en 2007 ($F=13.06$, $p=0.00$) y 2008 ($F=17.12$, $p=0.00$). No se encontraron diferencias significativas para este parámetro en el análisis estadístico para la comparación anual entre 2007 y 2008.

De forma general, y al estar el nitrógeno total (Nt) determinado por el Norg ($r=0.94$), su distribución siguió un patrón similar al del Norg, con mayores niveles hacia el interior de Laguna Larga (hasta $1,088 \mu\text{M}$), incluyendo la estación 9, y disminuyendo su contenido hacia el extremo donde el intercambio con el medio marino es más eficiente (sección exterior) (Figura 20).

Las tres secciones en que se ha dividido a Laguna Larga para su estudio mostraron diferencias significativas en cuanto al contenido de Nt (sección interior – sección central, $F=55.87$, $p=0.00$; sección interior – sección exterior, $F=69.43$, $p=0.00$ y sección exterior – sección central, $F=9.36$, $p=0.00$).

Todas las fracciones de Nt (orgánicas e inorgánicas), tuvieron correlaciones significativas positivas entre ellas y también con el PRS y el SiRS y negativas con la salinidad por lo que el Nt en Laguna Larga se debió principalmente al aporte de agua dulce al sistema (Tabla 2).

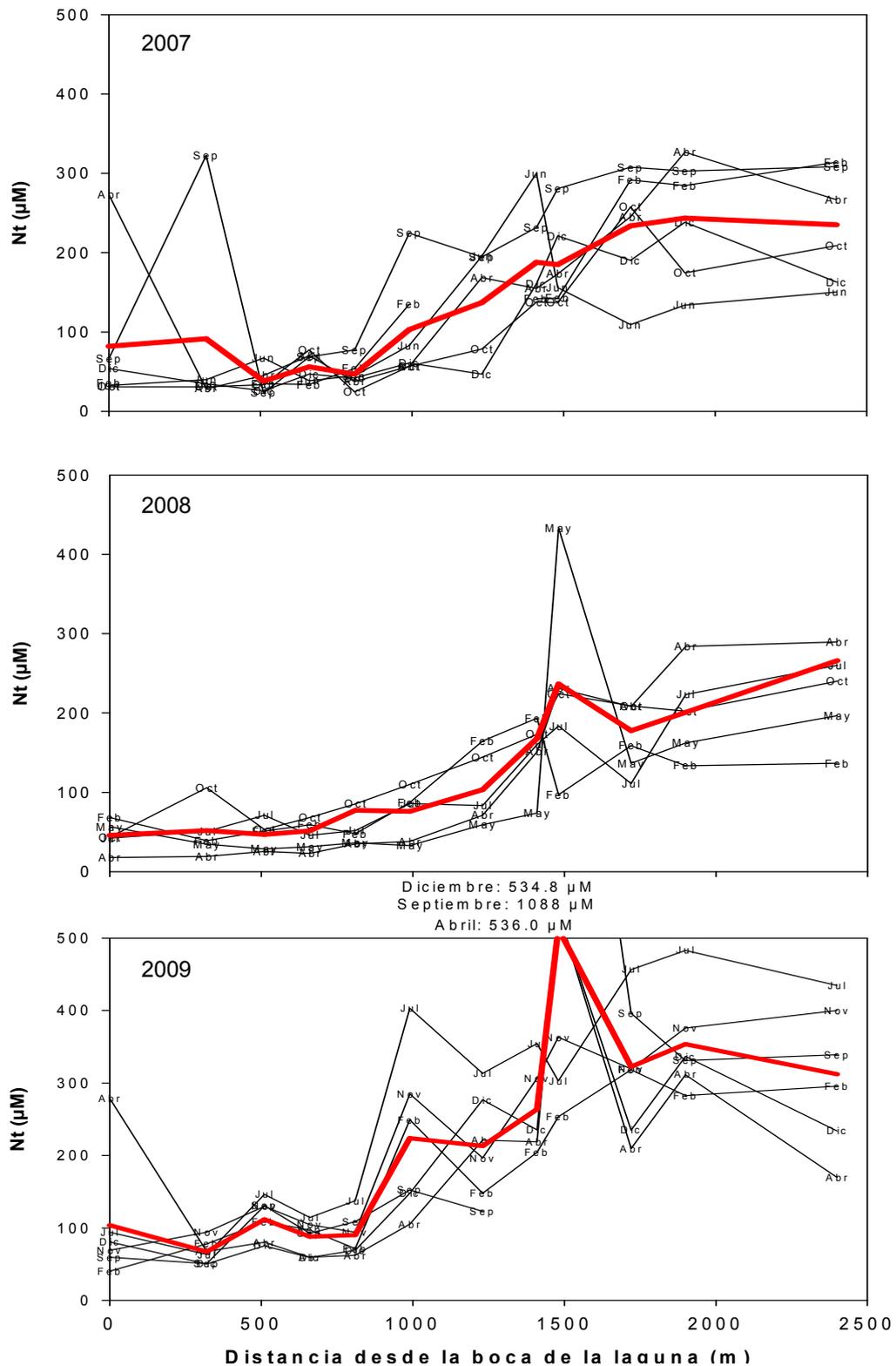


Figura 20. Distribución espacial de Nt (μM) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de Nt.

5.2.10. Fósforo reactivo soluble (PRS)

El PRS durante el estudio tuvo un nivel promedio de $0.54 \pm 1.27 \mu\text{M}$ y osciló entre 0.04 y $16.94 \mu\text{M}$ (Tabla 1). El fósforo reactivo soluble tuvo el contenido medio más elevado ($1.00 \pm 1.99 \mu\text{M}$) en 2009, siendo varias veces superior a los niveles determinados en 2007 ($0.09 \pm 0.10 \mu\text{M}$) y 2008 ($0.52 \pm 0.66 \mu\text{M}$). Existieron diferencias significativas en el comportamiento del PRS entre los períodos anuales de 2007 con 2008 ($F=91.61$, $p=0.00$) y 2009 ($F=14.44$, $p=0.00$). Temporalmente, diciembre de 2009 fue el mes con los niveles de PRS más elevados con $1.92 \mu\text{M}$.

Los niveles más significativos que se pueden observar en la Figura 21, fueron en la estación 9 (situada bajo el lobby del Hotel Tryp) en diciembre de 2008 y 2009 ($2.49 \mu\text{M}$ y $16.93 \mu\text{M}$, respectivamente). El continuo vertimiento de aguas residuales en la zona definitivamente fue la causa principal de este comportamiento.

Al hacer una comparación estadística por zonas, sólo hubo diferencias significativas entre las secciones interior y exterior en 2008 ($F=4.99$, $p=0.03$).

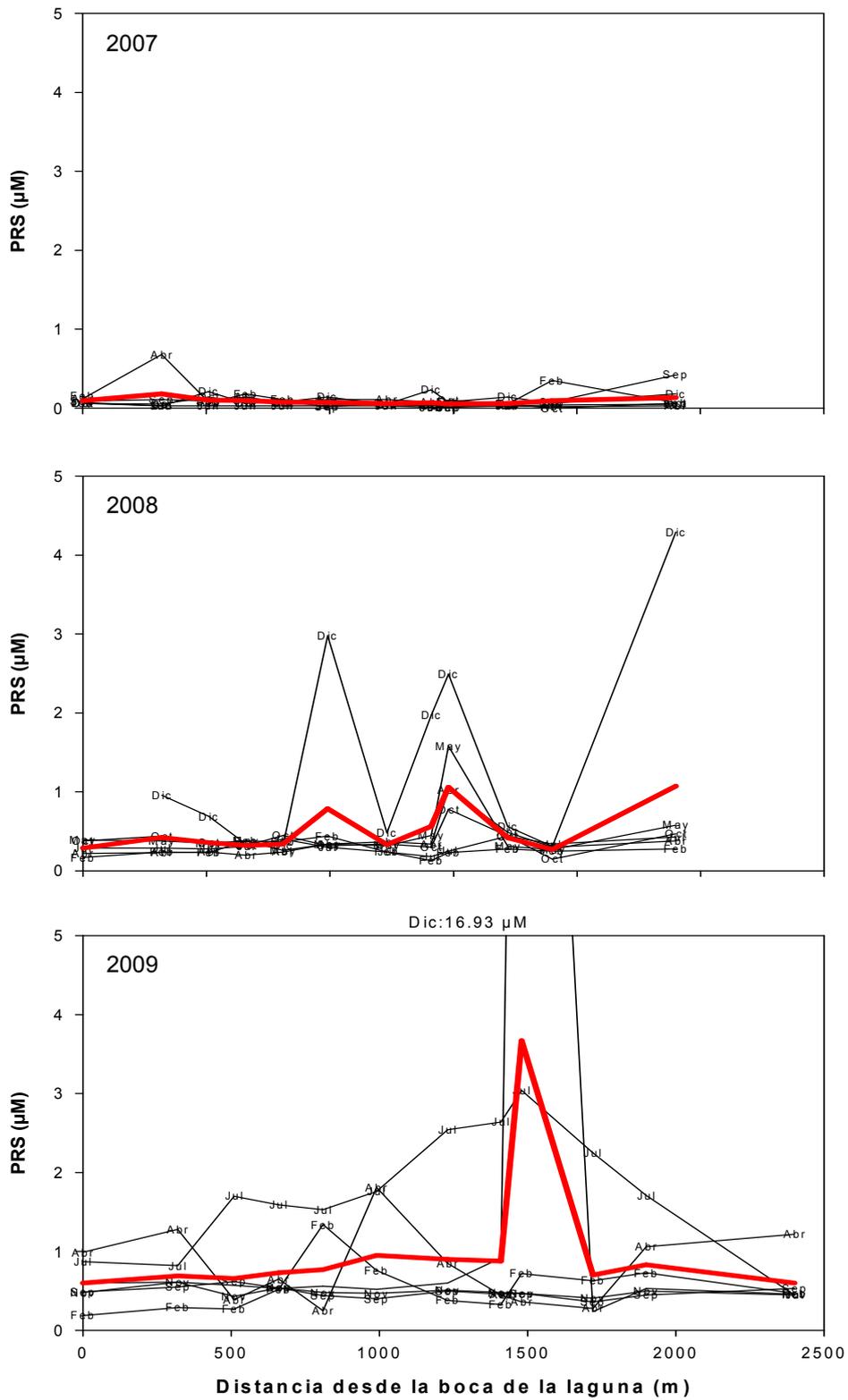


Figura 21. Distribución espacial de PRS (μM) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de PRS.

5.2.11. Fósforo orgánico (Porg)

El fósforo orgánico (Porg) constituyó casi el 90% del fósforo total (Pt) en 2008 y 2009 y fue hasta de 97% en 2007 en la mayoría de las estaciones y en todos los muestreos, lo que coincidió con lo determinado para el Norg (Figura 22).

La concentración media en todo el estudio fue de $4.6 \pm 4.5 \mu\text{M}$, aunque en 2009 el nivel promedio ($7.6 \pm 5.9 \mu\text{M}$) fue tres veces más elevado que en 2007 ($2.4 \pm 1.6 \mu\text{M}$) y casi el doble de lo determinado en 2008 ($3.9 \pm 3.1 \mu\text{M}$) (Tabla 1). Al comparar los contenidos de Porg entre los tres años de muestreo, se obtuvo que fue diferente entre 2007 y 2008 ($F=13.48$, $p=0.00$); entre 2007 y 2009 ($F=49.41$, $p=0.00$) y entre 2008 y 2009 ($F=21.12$, $p=0.00$).

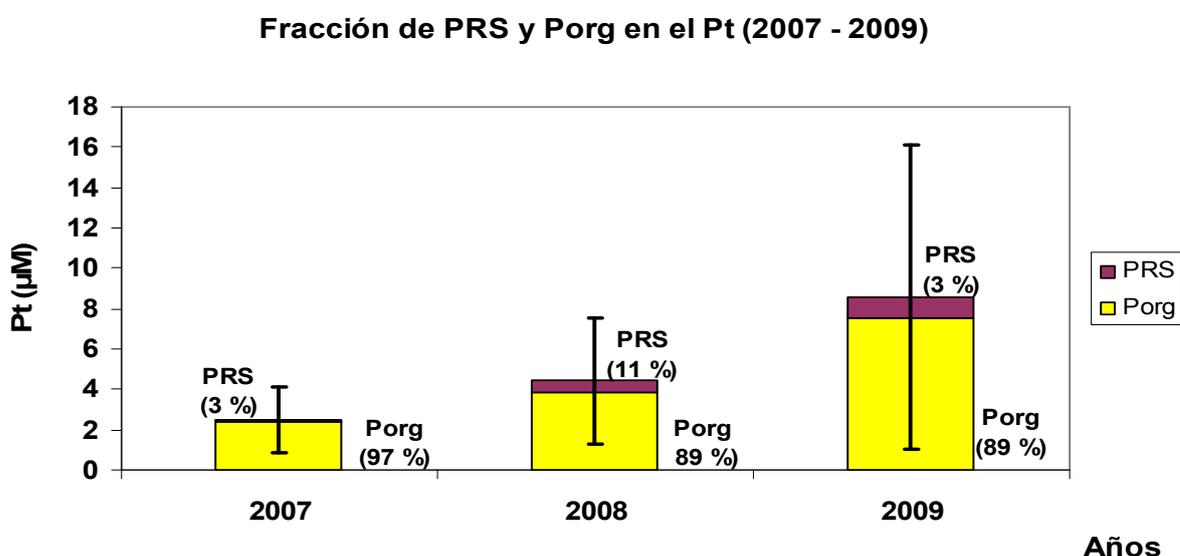


Figura 22. Fracciones de PRS y Porg en el contenido de Pt en las aguas de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Las líneas verticales representan la desviación estándar del Pt para cada año.

5.2.12. Fósforo total (Pt)

En el período estudiado, el Pt tuvo un nivel medio de 5.1 ± 5.4 , con una variabilidad interanual similar a la descrita para el Porg. Los contenidos promedio de Pt en 2007 fueron de $2.5 \pm 1.6 \mu\text{M}$; $4.4 \pm 3.1 \mu\text{M}$ en 2008 y $8.6 \pm 7.5 \mu\text{M}$ en 2009 (Tabla 1). Ambos parámetros (Pt y Porg), coincidieron en sus dinámicas en este período; con extremos en diferentes estaciones en varios de los muestreos (Figura 23), aunque con similares niveles en las tres secciones de Laguna Larga ($p < 0.05$). Sin embargo, si se pudo notar un ligero gradiente desde el interior hasta el exterior de la laguna, aunque débil comparado con el Nt. Debido a la correlación negativa de ambos nutrientes con la salinidad ($r = -0.31$ del Porg y $r = -0.30$ para el Pt) y la correlación positiva con el SiRS ($r = 0.20$ del Porg y $r = 0.20$ para el Pt) se pudo notar la influencia de aguas dulces con altos contenidos de P sobre el sistema (Tabla 2).

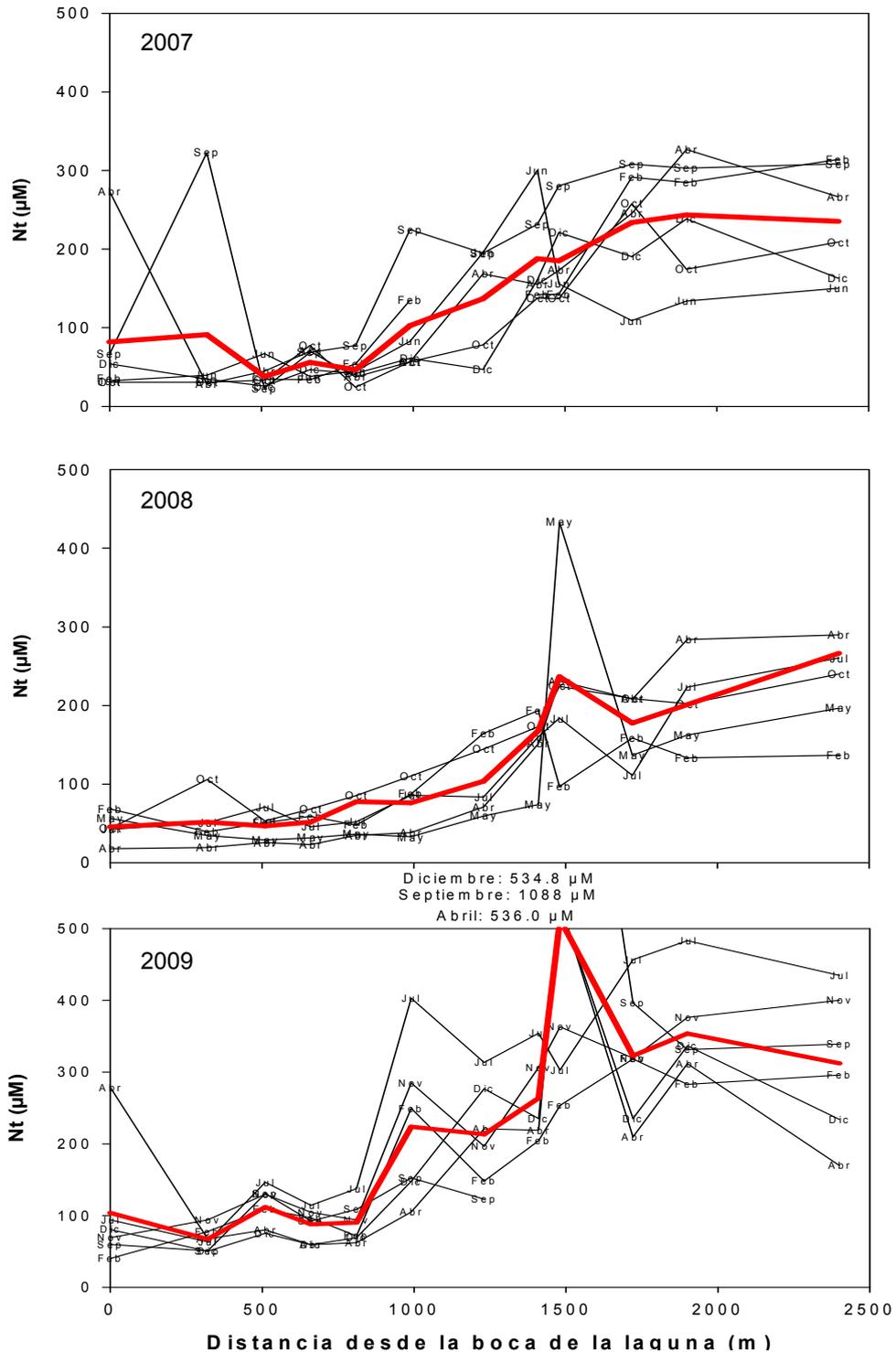


Figura 23. Distribución espacial de Pt (μM) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de Pt.

5.2.13. Silicato reactivo soluble (SiRS)

El SiRS en Laguna Larga tuvo un contenido medio de $19.6 \pm 82.3 \mu\text{M}$ durante el período de muestreo (2007 – 2009) con la concentración promedio anual más elevada de $25.9 \pm 115.5 \mu\text{M}$ en 2008 y la más baja de $13.2 \pm 11.4 \mu\text{M}$ en 2007 (Tabla 1). Por muestreo, el extremo máximo puntual determinado fue en mayo de 2008 con $980.6 \mu\text{M}$, sin embargo fue sólo en una estación (la 9). A pesar que la concentración de SiRS en 2008 (25.9 ± 115.5) fue casi el doble de lo determinado en Laguna Larga durante el 2007 ($13.2 \pm 11.4 \mu\text{M}$) y mayor a la concentración determinada en 2009 ($18.2 \pm 16.8 \mu\text{M}$), sólo se encontraron diferencias significativas entre la comparación estadística entre los datos de 2007 y 2009 ($F=4.29$, $p=0.03$).

Debido al vertimiento continuo de aguas residuales en la estación 9, la zona interior de la laguna tuvo niveles promedios elevados si se comparan con las secciones central y exterior, con máximos debajo del hotel Tryp de $980.6 \mu\text{M}$ en mayo de 2008 y de $80.7 \mu\text{M}$ en diciembre de 2009 (Figura 24). Debido a estos aportes de aguas dulces y servidas en el extremo interior y a las restricciones de la circulación hidrodinámica en esta zona del sistema, se encontraron diferencias significativas a través de un análisis de varianza entre las secciones central ($F=26.85$, $p=0.00$) y exterior ($F=4.00$, $p=0.04$) con la interior.

Como lo señalaron Smith *et al.* (1999) para otros cuerpos de aguas costeros tropicales, la distribución espacial de los silicatos en Laguna Larga, permite utilizarlo como trazador en la localización y seguimiento de fuentes de aguas subterráneas y de aguas dulces procedentes de fuentes tales como residuales y escorrentías superficiales.

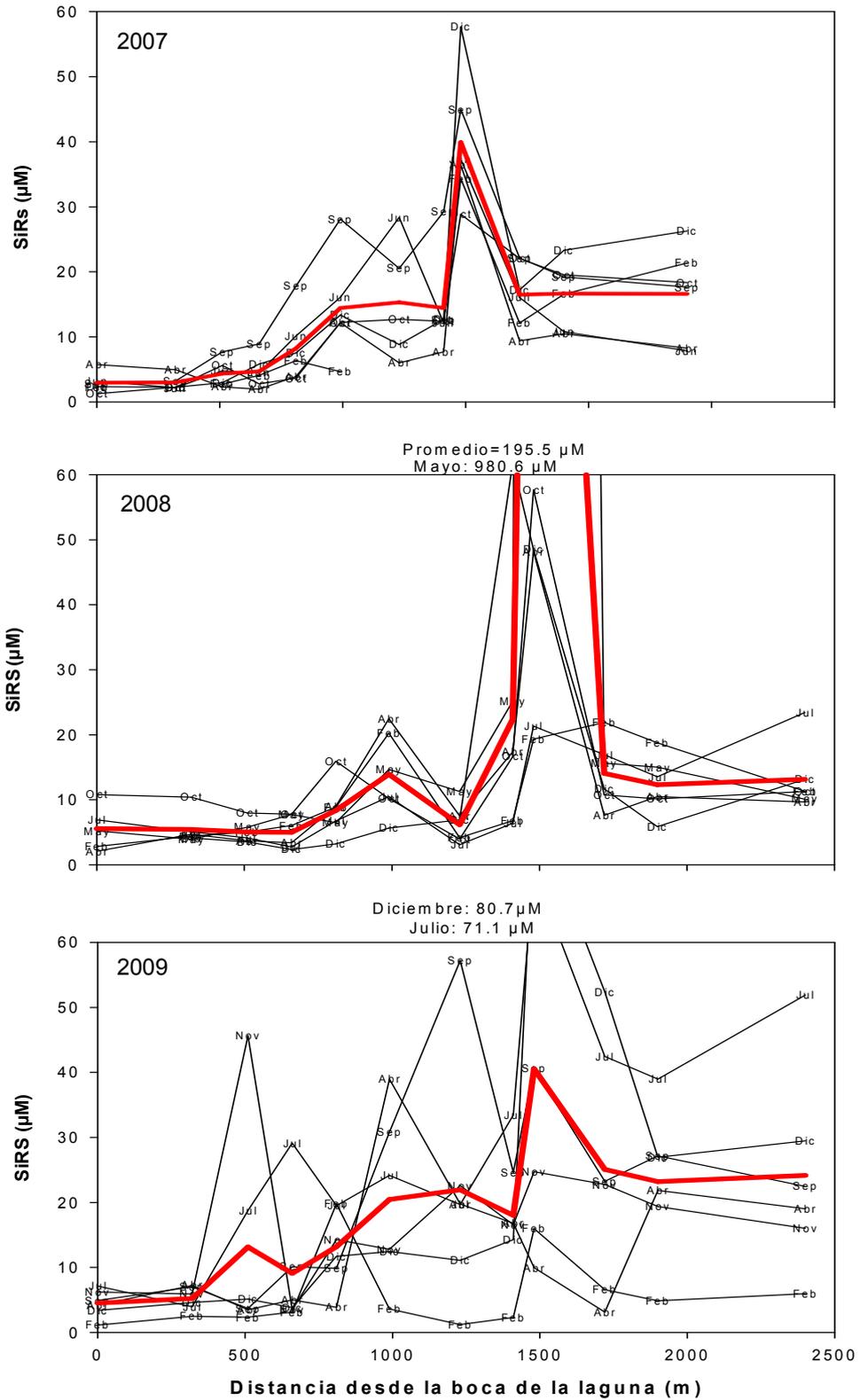


Figura 24. Distribución espacial de SiRS (μM) en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de SiRS.

5.2.14. Relación Nt:Pt

Un indicador básico utilizado en la caracterización y el conocimiento de los sistemas acuáticos lo ha constituido la relación propuesta por Redfield (1934) sobre las fracciones de C, N y P necesarias para la producción primaria del fitoplancton, con la cual, es posible tener argumentos sobre la limitación de algunos de estos compuestos en el medio marino y costero. Durante todo el estudio (2007 – 2009) y para la casi totalidad de las estaciones de muestreo, la relación Nt:Pt en Laguna Larga fue mayor a la de Redfield (16:1), por lo que el nutriente limitante en el sistema fue el P. Representado esta relación gráficamente en la Figura 25 se puede notar que sólo en 2008, la distribución espacial es bastante homogénea, sin extremos puntuales, aunque en la mayoría de las estaciones en todos los muestreos el índice supera al de Redfield. En 2007 y 2009, se determinaron extremos puntuales. Es posible observar que hacia la sección exterior de la laguna la relación Nt:Pt se acerca más a la proporción de 16:1.

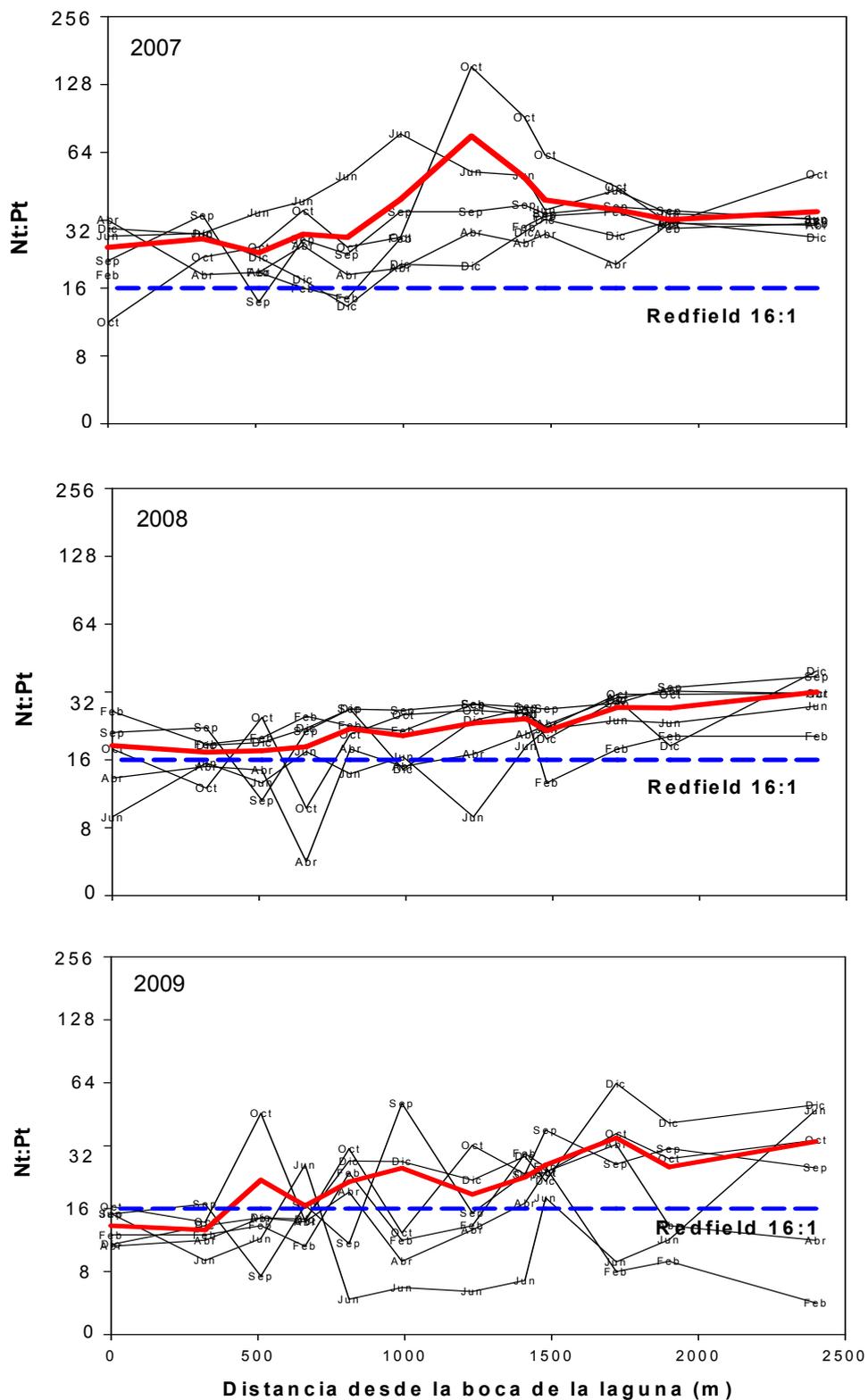


Figura 25. Distribución espacial de la relación Nt:Pt en las aguas de Laguna Larga durante 2007, 2008 y 2009. La línea roja es el promedio de Nt:Pt.

5.2.15. Relación SiRS:NID

La relación SiRS:NID tuvo un promedio de 1.84 ± 0.59 entre 2007 y 2009 en las aguas de Laguna Larga. El mayor valor de SiRS:NID fue en 2007 con 2.52 y decreció hasta 1.40 en 2009 (Figura 26). Este comportamiento coincidió con lo calculado para la relación NID:PRS que fue de 500.2 en 2007 y tuvo tendencia decreciente hasta 2009 con 34.8 (Figura 26). Este resultado sugirió que el nutriente limitante en Laguna Larga es el PRS, ya que tanto el NID como el SiRS estuvieron en proporciones necesarias para los productores primarios, ya que en el caso de la proporción NID:SiRS, está estuvo alrededor de la propuesta por Redfield (1934) que fue de 1:1 y en la proporción NID:PRS fue mayor que la propuesta por el mismo autor que fue de 16:1.

Al analizar las relaciones SiRS:NID y NID:PRS para cada sección en que se dividió el sistema, se determinó que para cada sección el sistema estuvo limitado sólo por el PRS, ya que hubo NID y SiRS en niveles adecuados para los productores primarios según lo propuesto por Redfield (1934) (Tabla 3). También fue posible observar un gradiente decreciente en las proporciones NID:SiRS y NID:PRS desde el interior de la laguna hasta el exterior, similar a lo determinado para los nutrientes disueltos y totales (Figura 27)

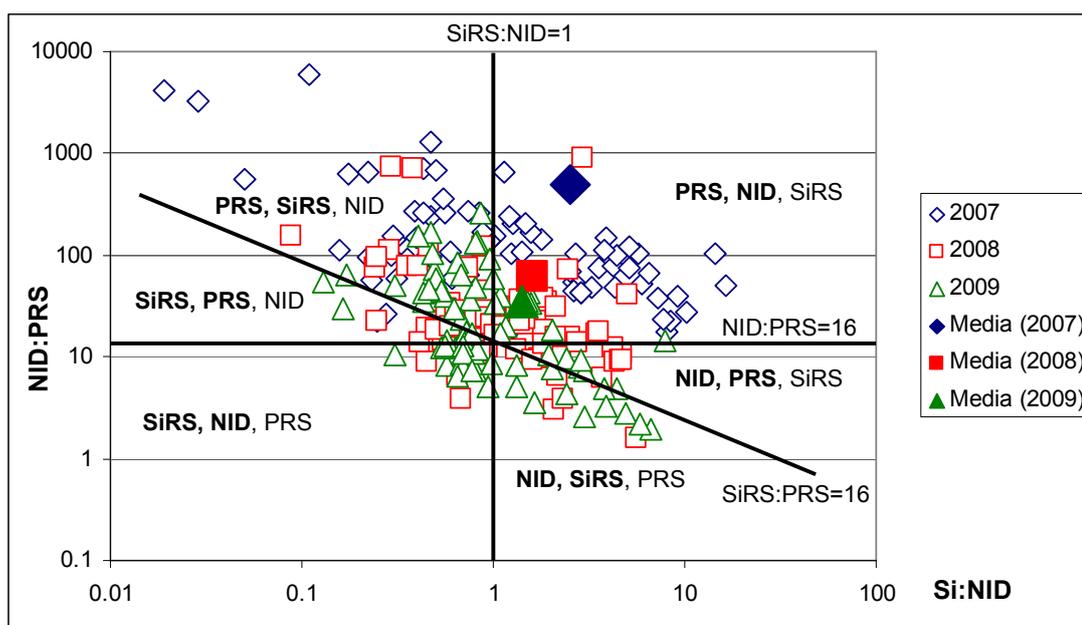


Figura 26. Relaciones SiRS:NID y NID:PRS en las aguas de Laguna Larga entre 2007 y 2009. Las líneas continuas representan las relaciones entre los nutrientes. Las proporciones en cada cuadrante representan el orden de limitación con los dos nutrientes limitantes en negritas. La escala de los ejes es logarítmica.

Tabla 3. Proporciones SiRS:NID, NID:PRS y SiRS:PRS para cada sección de Laguna Larga para cada año de muestreo y para todo el período.

Período	Secciones	Si:DIN	DIN:PRS	Si:PRS
2007	interior	2.18 ± 1.73	1171.2 ± 2507.1	648.7 ± 1091.5
	central	2.04 ± 1.38	260.6 ± 342.4	422.3 ± 433.3
	exterior	0.83 ± 0.56	93.3 ± 58.6	72.4 ± 72.0
2008	interior	1.69 ± 1.19	43.1 ± 45.1	67.3 ± 120.3
	central	1.57 ± 1.35	31.8 ± 23.1	34.3 ± 18.2
	exterior	1.51 ± 1.51	23.0 ± 17.3	18.1 ± 8.1
2009	interior	1.43 ± 1.41	56.7 ± 59.8	45.1 ± 45.9
	central	2.09 ± 2.09	31.2 ± 38.7	30.0 ± 28.3
	exterior	1.00 ± 1.04	19.5 ± 24.7	14.2 ± 18.4
2007 - 2009	interior	1.77 ± 1.47	423.7 ± 1523.6	253.7±685.9
	central	1.90 ± 1.64	102.0 ± 215.8	152.2±297.8
	exterior	1.12 ± 1.14	43.3 ± 49.5	33.3±48.6

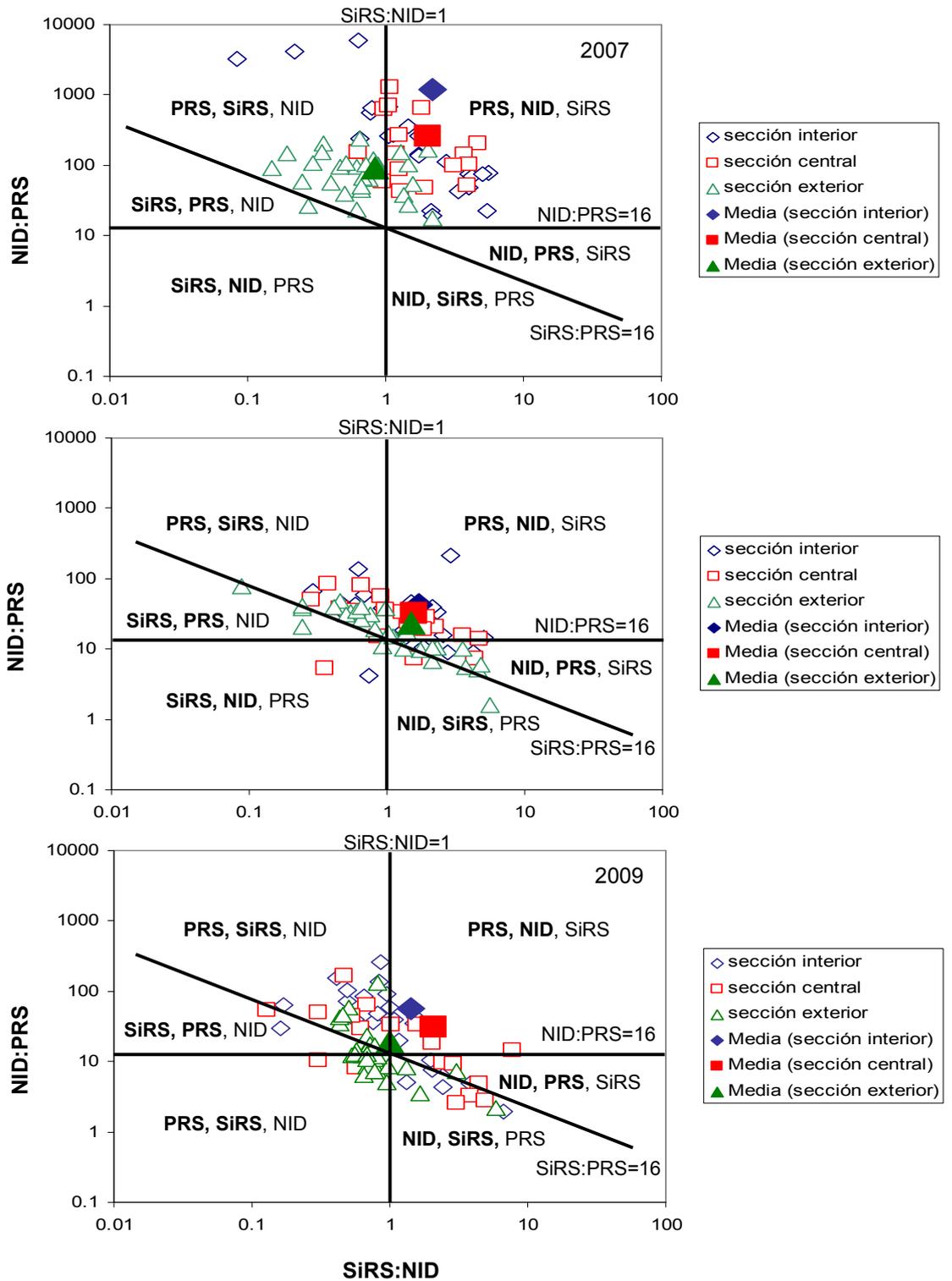


Figura 27. Relaciones SiRS:NID y NID:PRS en las aguas de Laguna Larga para cada sección y año de muestreo. Las líneas continuas representan las relaciones entre los nutrientes. Las proporciones en cada cuadrante representan el orden de limitación con los dos nutrientes limitantes en negritas. La escala de los ejes es logarítmica.

5.3. Aportes de nitrógeno y fósforo a Laguna Larga

5.3.1. Por precipitaciones

Los flujos de N y P aportados por las precipitaciones fueron calculados multiplicando la lluvia de cada período de muestreo (m^3/d) por el área de cada sección (Tabla 4). El volumen de lluvia utilizada fue el reportado por la estación meteorológica 339 (entre 2007 y 2009) situada a 50 m de Laguna Larga. La mayor cantidad de lluvia recolectada y analizada fue en 2007; en 2008 y 2009 las muestras analizadas fueron tres en ambos casos.

Tabla 4. División de Laguna Larga por secciones, principales características de cada una.

Secciones en Laguna Larga	Fronteras	Profundidad (m)	Área (m^2)	Volumen (m^3)	Área de escurrimiento (m^2)
interior	Comprende el extremo interior (9- 12).	0.82	82×10^3	67×10^3	440×10^3
central	Comprende la zona central de la laguna (6- 8).	0.48	29×10^3	14×10^3	100×10^3
exterior	Comprende todo el extremo exterior de la laguna incluyendo el canal de mareas (1 – 5).	0.49	99×10^3	49×10^3	480×10^3

En la Tabla 5 se muestran las concentraciones de N y P, los flujos de agua y de N y P aportados por las lluvias entre 2007 y 2009 para cada sección. El aporte promedio de agua, N y P a Laguna Larga fue de $502 m^3/d$, $21.9 molNt/d$ y $0.8 molPt/d$, respectivamente. El mayor flujo de agua debido a las precipitaciones en Laguna Larga fue en 2007 ($583 m^3/d$), debido a que el volumen de precipitaciones fue mayor que en 2008 y 2009. Sin embargo, los mayores aportes de N y P, fueron en 2009, debido a que la concentración de ambos nutrientes fue mayor para este año. La sección exterior concentró los mayores volúmenes de agua y flujos de N y P, ya que es la sección más grande del sistema ($99 \times 10^3 m^2$).

Tabla 5. Composición y flujos de agua, de N y P de las precipitaciones en Cayo Coco entre 2007 y 2009.

Año	Sección	PT (μM)	NT (μM)	Flujo de agua (m^3/d)	Flujo (molPt/d)	Flujo (molNt/d)
2007	interior	1.1	37.1	234	0.3	8.7
	central	1.1	37.1	80	0.1	3.0
	exterior	1.1	37.1	269	0.3	10.0
	Sistema	1.1	37.1	583	0.6	21.6
2008	interior	1.4	43.4	165	0.2	7.2
	central	1.4	43.4	58	0.1	2.5
	exterior	1.4	43.4	199	0.3	8.6
	Sistema	1.4	43.4	422	0.6	18.3
2009	interior	3.0	63.4	199	0.5	10.1
	central	3.0	63.4	71	0.2	3.6
	exterior	3.0	63.4	239	0.6	12.1
	Sistema	3.0	63.4	509	1.2	25.8
Promedio	interior	1.8 \pm 1.0	47.9 \pm 13.7	199 \pm 34	0.3 \pm 0.1	8.9 \pm 1.4
	central	1.8 \pm 1.0	47.9 \pm 13.7	68 \pm 11	0.1 \pm 0.0	3.1 \pm 0.5
	exterior	1.8 \pm 1.0	47.9 \pm 13.7	235 \pm 35	0.4 \pm 0.2	10.6 \pm 1.8
	Sistema	1.8\pm1.0	47.9\pm13.7	502\pm81	0.8\pm0.3	21.9\pm3.7

5.3.2. Por escorrentías superficiales

El volumen aportado por las escorrentías fue calculado mensualmente tomando en consideración las áreas que pueden escurrir hacia Laguna Larga y se utilizaron además los promedios mensuales de lluvia y de temperatura reportados por la estación meteorológica 339 de Cayo Coco.

Los aportes promedios de agua, N y P en el período de estudio fueron de 305 m^3/d , 112.6 molNt/d y 3.0 molPt/d . Las escorrentías superficiales tuvieron un comportamiento que dependió en gran medida de los acumulados mensuales y anuales de precipitación en el período estudiado (2007 – 2009), con el mayor flujo anual en 2007 (583 m^3/d) y el menor en 2008 (150 m^3/d) (Tabla 6). Es de destacar además que el cálculo de los flujos de escurrimiento superficial fueron estimados a partir de una ecuación (Scheriber, 1904) y también son dependientes de los valores medios de temperatura.

Tabla 6. Composición y flujos de agua, N y P de las escorrentías superficiales a Laguna Larga entre 2007 y 2009.

Año	Sección	PT (μM)	NT (μM)	Flujo de agua (m^3/d)	Flujo (molPt/d)	Flujo (molNt/d)
2007	interior	6.2	602.9	256	1.6	154.3
	central	12.3	127.7	57	0.7	7.3
	exterior	9.3	333.7	270	2.5	90.1
	Sistema	9.3	354.8	583	5.4	206.8
2008	interior	6.2	608.4	61	0.4	37.1
	central	15.3	160.0	19	0.3	3.0
	exterior	9.1	360.8	70	0.6	25.3
	Sistema	10.2	376.4	150	1.5	56.5
2009	interior	6.2	608.4	106	0.5	46.8
	central	15.3	160.0	23	0.4	3.7
	exterior	9.1	360.8	82	0.8	29.6
	Sistema	10.2	376.4	182	1.9	68.5
Promedio	interior	6.2 \pm 0	606.5 \pm 3.2	131 \pm 102	0.8 \pm 0.7	79.7 \pm 65.0
	central	14.3 \pm 1.7	149.2 \pm 18.6	33 \pm 21	0.5 \pm 0.2	4.9 \pm 2.3
	exterior	9.2 \pm 0.1	351.8 \pm 15.6	141 \pm 112	1.3 \pm 1.0	49.5 \pm 36.2
	Sistema	9.9\pm0.5	369.2\pm12.5	305\pm241	3.0\pm2.1	112.6\pm83.5

5.3.3. Por agua subterránea

Los aportes de agua subterránea, N y P a Laguna Larga sólo fueron en la sección interior, debido a que en el hotel Tryp se instalaron desde 2005 dos pozos de aguas subterráneas, uno funcionó hasta febrero de 2007 y el otro con un intervalo sin funcionar a comienzos de 2007, siguió funcionando hasta diciembre del mismo año. Estos pozos fueron cerrados completamente en 2008, por lo que no aportaron N y P a partir de esa fecha a Laguna Larga. La capacidad de bombeo de la bomba instalada en cada pozo era de 2 L/s por lo que cada uno de ellos aportó 172.8 m^3/d (Tabla 7). El flujo de agua fue de 168 m^3/d y los aportes de N y P de 18.2 molNt/d y 0.4 molPt/d .

Tabla 7. Composición y flujos de agua, N y P del agua subterránea a Laguna Larga en 2007.

Año	Sección	PT (μM)	NT (μM)	Flujo de agua (m^3/d)	Flujo (molPt/d)	Flujo (molNt/d)
2007	Interior	1.7	96.6	168	0.3	16.2
	Sistema	1.7	96.6	168	0.3	16.2
Promedio	Interior	1.7 \pm 0	96.6 \pm 0	56 \pm 0	0.1 \pm 0	5.4 \pm 0
	Sistema	1.7\pm0	96.6\pm0	56\pm0	0.1\pm0	5.4\pm0

5.3.4. Por vertimiento de residuales líquidos

El flujo promedio de agua residual a Laguna Larga en el período de estudio fue de 239 m^3/d . Como se observa en la Tabla 8 el mayor flujo fue en 2008 (hasta 335 m^3/d); en 2007 y 2009 las cantidades de agua aportadas fueron de 180 y 201 m^3/d . Es necesario destacar que en la sección interior hubo un incremento notable con respecto a lo descargado después de 2007, ya que el volumen diario pasó de 38 m^3 a 150 m^3 en 2008 y 143 m^3 en 2009.

En cuanto a los aportes de N y P al sistema, sobresalió lo ingresado en 2008 (23.3 molPt/d de P y 419.2 molNt/d de N) con respecto a 2007 y 2009, debido en lo fundamental a que fue el año con mayores volúmenes de entrada de aguas residuales al sistema. Los altos contenidos de N (más de 1000.0 μM) y P (hasta más de 40.0 μM) de fuentes tales como el sistema del drenaje del lobby del Hotel Tryp, la fosa séptica del CIEC y el restaurante "las Dunas" (sector exterior) fueron importantes en los flujos totales de ambos nutrientes para cada sección.

Tabla 8. Composición y flujos de N y P de descargas de aguas residuales a Laguna Larga entre 2007 y 2009.

Año	Sección	PT (μM)	NT (μM)	Flujo de agua (m^3/d)	Flujo (molPt/d)	Flujo (molNt/d)
2007	interior	47.4	1021.3	38	1.8	38.8
	central	68.9	2005.6	5	0.3	10.0
	exterior	47.7	832.5	137	6.5	114.0
	Sistema	54.7	1286.5	180	9.8	231.6
2008	interior	4.8	222.5	150	0.7	33.4
	central	68.9	2005.6	5	0.3	10.0
	exterior	135.2	1525.6	180	24.3	274.6
	Sistema	69.6	1251.2	335	23.3	419.2
2009	interior	4.8	222.5	143	0.7	31.8
	central	68.9	2005.6	16	1.1	32.1
	exterior	135.2	1525.6	42	5.7	64.1
	Sistema	69.6	1251.2	201	14.0	251.5
Promedio	interior	19.0 \pm 24.6	488.8 \pm 461.2	110 \pm 62	2.1 \pm 0.6	53.8 \pm 3.7
	central	68.9 \pm 0	2005.6 \pm 0	9 \pm 6	0.6 \pm 0.5	18.0 \pm 12.8
	exterior	106.0 \pm 50.5	1294.6 \pm 400.2	120 \pm 70	12.7 \pm 10.5	155.4 \pm 100.0
	Sistema	64.6\pm8.6	1263.0\pm20.4	239\pm84	15.4\pm6.9	301.8\pm103.0

5.4. Balances de agua, sal y nutrientes (N y P)

5.4.1. Balance de agua, sal y tiempo de residencia

5.4.1.1. Volumen residual (V_R)

El balance de agua en el período de estudio (2007 – 2009), mostró que las tres secciones exportaron agua hacia la sección adyacente y hacia el mar, con el mayor volumen en la sección exterior (236 m³/d); la sección central también exportó agua hacia la sección exterior pero en menor cuantía (144 m³/d) (Figuras 28 – 30) (Tablas 9 y 10). Los mayores volúmenes de exportación fueron para todas las secciones en 2007 (desde 378 m³/d en la sección interior hasta 703 m³/d en la sección exterior). En 2008, las secciones central y exterior tuvieron que importar agua del mar y de la sección adyacente, aunque en volúmenes muy pequeños (37 y 28 m³/d, respectivamente). Sin embargo, la sección interior se mantuvo exportando agua a razón de 13 m³/d.

Los resultados del balance de agua y sal por campaña de muestreo (Tablas 10 - 12), mostraron que la mayor parte del año la sección interior exportó agua hacia la sección central. La excepción fue en diciembre de 2008 cuando importó 20 m³/d. El mayor volumen de exportación de este sector fue de 1,161 m³/d en el muestreo de junio de 2007 y las menores exportaciones de agua en febrero, abril y noviembre de 2009, cuando no sobrepasó los 10 m³/d.

Las secciones central y exterior tuvieron un comportamiento heterogéneo durante todo el estudio (2007 – 2009) con períodos de importación y exportación de agua en los períodos intranuales. Ambas secciones exportaron agua durante 2007 (excepto la sección central en abril, importando 60 m³/d) con los mayores volúmenes en junio (1,375 y 2,587 m³/d, respectivamente).

La sección central sólo exportó agua en febrero de 2008 aunque con un volumen pequeño de 5 m³/d e importó agua la mayor parte del año (entre 1 y 80 m³/d). En 2009, la sección central aportó agua a la sección exterior en los últimos cuatro muestreos, con el mayor volumen exportado en el período que agrupó la mayor cantidad de precipitaciones (julio - septiembre) con 370 m³/d.

La sección exterior exportó e importó agua en todos los muestreos en 2008 y 2009, con las mayores cantidades de importación en mayo de 2008 (600 m³/d) y la mayor exportación en julio de 2009 con 382 m³/d. Fue mínima la dinámica exportación – importación en la mayoría de los muestreos en 2008 ya que excepto en mayo, en los demás períodos no se superaron los 60 m³/d.

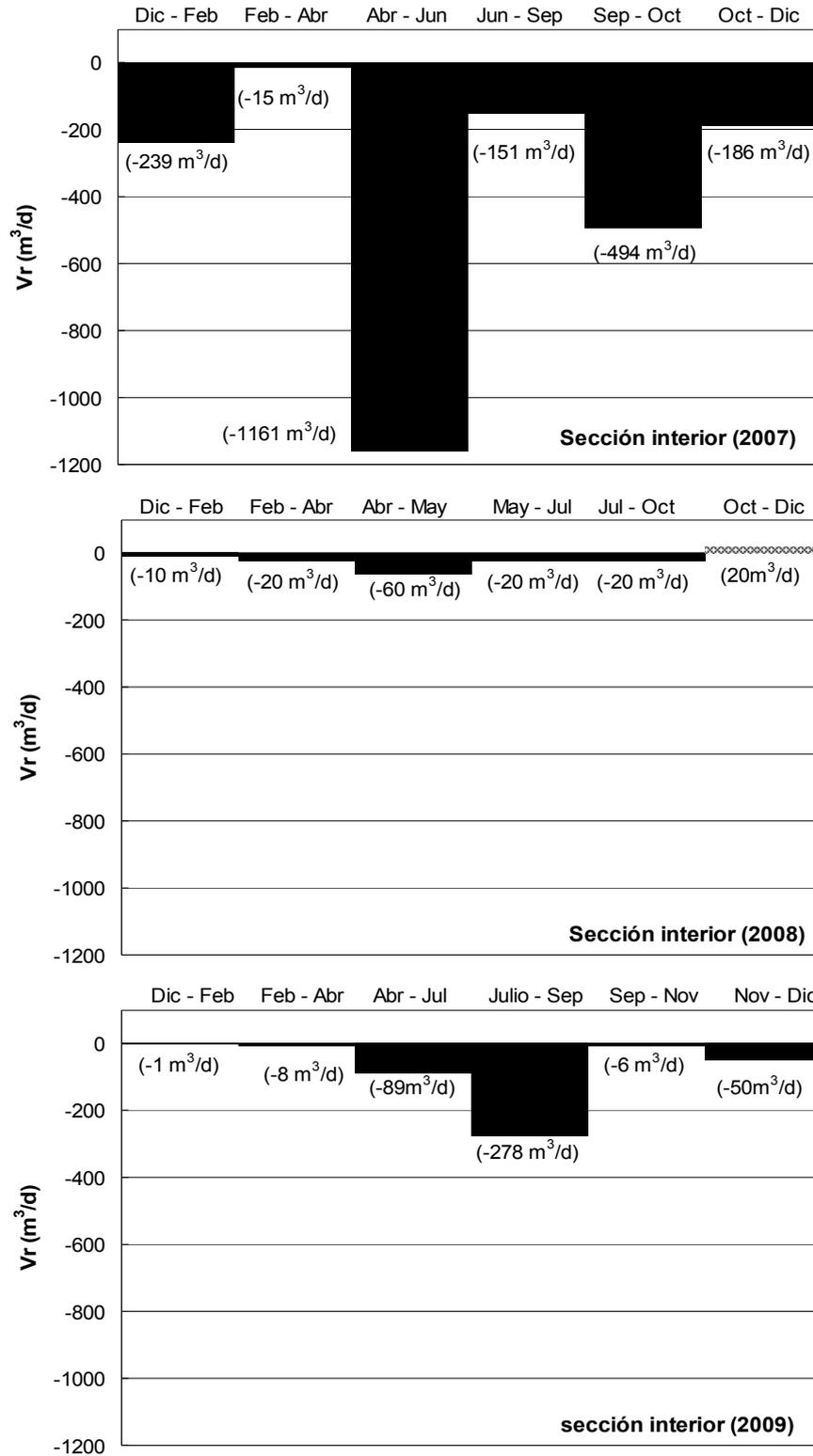


Figura 28. Valores de V_R para la sección interior de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Nótese que la escala de V_R es diferente para cada sección.

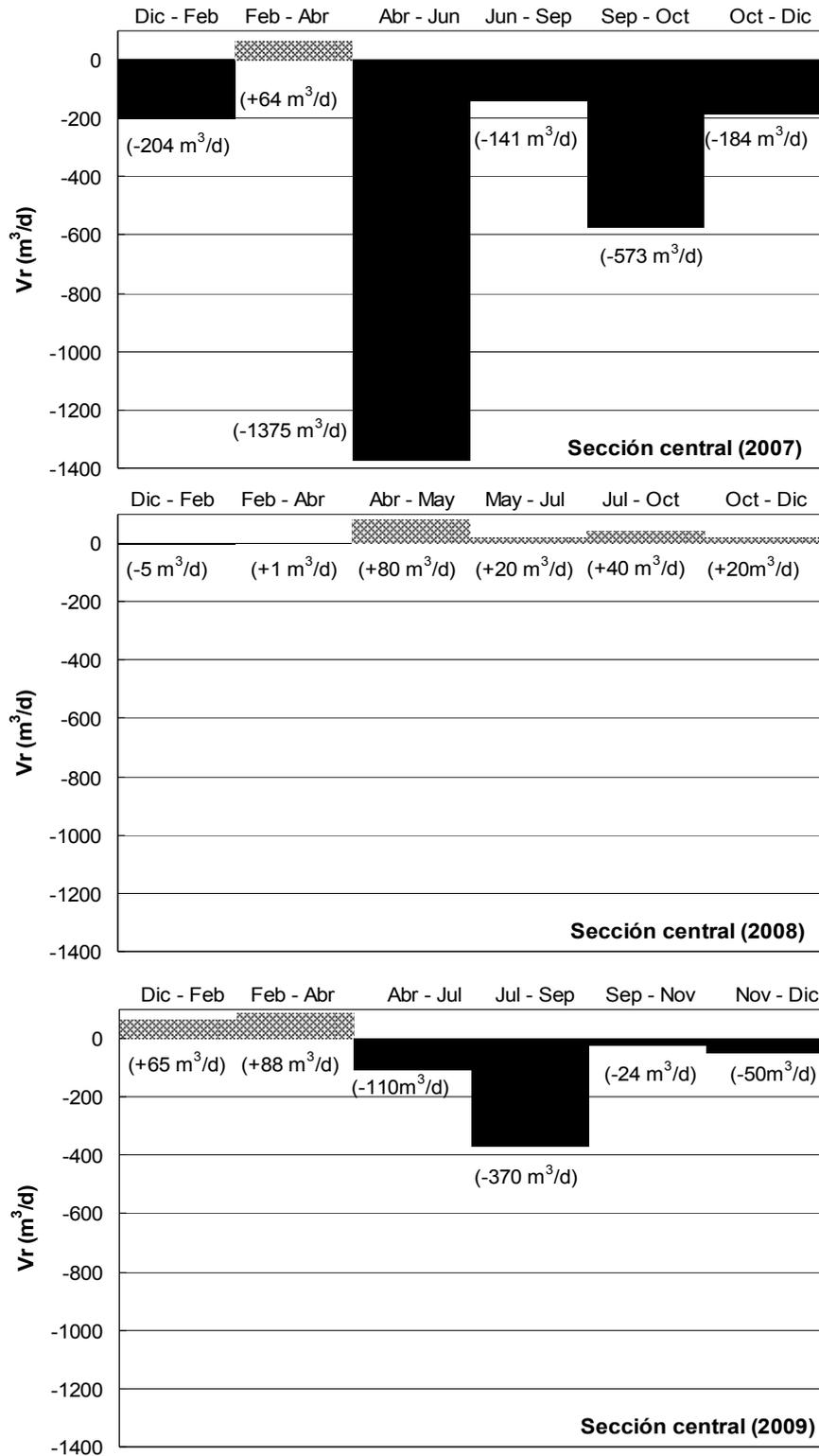


Figura 29. Valores de V_R para la sección central de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Nótese que la escala de V_R es diferente para cada sección.

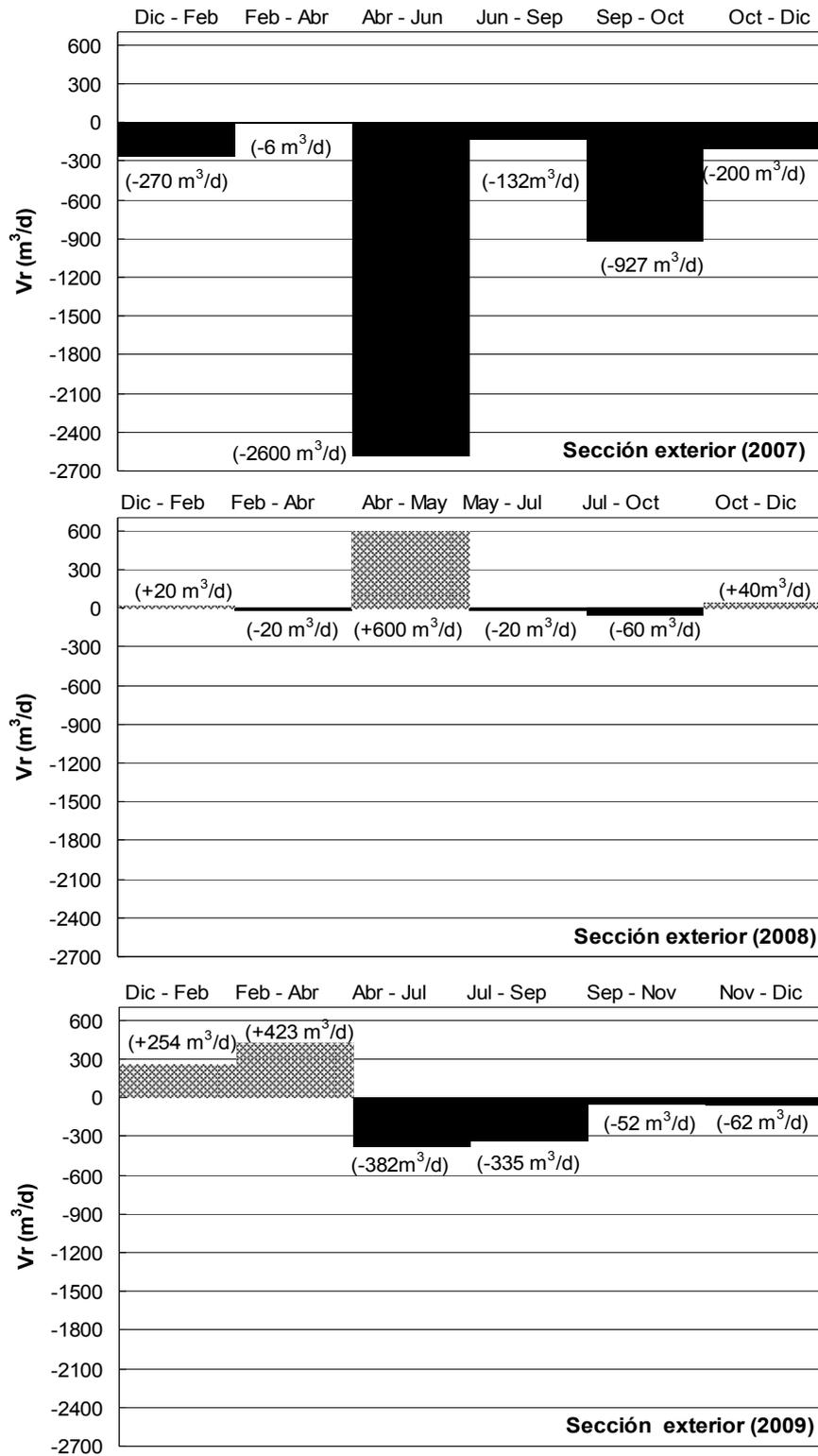


Figura 30. Valores de V_R para la sección exterior (3) de Laguna Larga en 2007, 2008 y 2009. Nótese que la escala de V_R es diferente para cada sección.

Tabla 9. Volumen residual (V_R), volumen de mezcla (V_X) y tiempo de residencia (τ) en las secciones de Laguna Larga durante 2007 – 2009. El signo negativo en V_R indica salida de agua y el signo positivo indica importación de agua.

Periodo	Sección	V_R (m ³ /d)	V_X (m ³ /d)	τ (días)
2007	interior	-378	1650	33
	central	-407	2010	4
	exterior	-703	51 800	1
2008	interior	-13	247	251
	central	+37	654	16
	exterior	+28	4620	9
2009	interior	-69	739	84
	central	-62	3962	3
	exterior	-33	44 474	1
Media 2007 – 2009	interior	-153±196	878±711	123±114
	central	-144±233	2208±1662	8±7
	exterior	-236±405	33 631±25 390	4±4

5.4.1.2. Volumen de mezcla (V_X)

El volumen de mezcla (V_X) expresa la magnitud del intercambio de agua entre una sección y la adyacente. La sección exterior (más cercana al mar) fue la que tuvo mejor intercambio durante el período estudiado (2007 – 2009) ya que superó más de 10 veces el volumen de mezcla de la sección central (2208 m³/d) y más de 30 veces el de la sección interior (878 m³/d). Por años, el V_X fue mayor en 2007 en todas las secciones con el mayor volumen en la sección exterior con 51 800 m³/d (Tabla 9).

En el balance intranual para cada sección, la sección exterior tuvo los mayores volúmenes de mezcla, principalmente durante 2007 (desde 5,100 hasta 148,300 m³/d). En los muestreos de febrero de 2007 y abril de 2008 (temporada poco lluviosa), la sección central tuvo el intercambio menor (4 y 20 m³/d, respectivamente) con respecto a las restantes secciones, debido a que esta zona queda casi seca y muy aislada en estos períodos (Tablas 11 – 13).

5.4.1.3. Tiempo de residencia (τ)

El tiempo de residencia de las aguas estimado para cada sección de Laguna Larga fue, entre 2007 y 2009, más largo en la sección interior (123 días) con respecto a las secciones central (8 días) y exterior (4 días) (Tabla 9). Comparando los años, en 2008 el tiempo de residencia fue mayor en todas las secciones con respecto a 2007 y 2009, llegando a ser hasta 251 días en la sección interior (la más aislada del sistema). El menor τ para cada sección fue en 2007, cuando incluso en la sección interior, fue de 33 días.

En el balance intranual, el τ llegó a ser hasta 1209 días en la sección interior de en abril de 2009. En la sección central el mayor tiempo de residencia se determinó en abril de 2008 y fue de 122 días; en el resto del período anual osciló entre 3 y 15 días.

La sección exterior, al ser la de mejor intercambio con el mar adyacente, tuvo tiempos de residencia más bajos que los determinados en las secciones interior y central, aunque más cercanos en magnitud a los de la sección central. El agua permaneció en la sección exterior entre 0.2 y 32 días para los períodos intranuales.

Tabla 10. Flujos de agua estimados (precipitaciones, aguas subterráneas, escorrentías, aguas residuales y evaporación) y volumen residual (V_R) en las tres secciones de Laguna Larga en el período 2007 – 2009.

Período	Sección	Precipitaciones (m^3/d)	Escorrentías (m^3/d)	Subterráneas (m^3/d)	Residuales (m^3/d)	Evaporación (m^3/d)	V_R (m^3/d)
2007	interior	234	256	168	38	-317	-378
	central	80	57	0	5	-113	-407
	exterior	269	270	0	137	-382	-703
	Sistema	583	583	168	180	-812	-1488
2008	interior	165	61	0	150	-364	-13
	central	58	19	0	5	-138	37
	exterior	199	70	0	180	-438	28
	Sistema	422	150	0	335	-940	52
2009	interior	199	106	0	143	-319	-69
	central	71	23	0	16	-114	-62
	exterior	239	82	0	42	-384	-33
	Sistema	509	211	0	201	-817	-164
Media 2007 – 2009	interior	199±34	131±102	56±0	110±62	-333±26	-153±196
	central	68±11	33±21	0	9±6	-121±14	-144±233
	exterior	235±35	141±112	0	120±70	-401±32	-236±405
	Sistema	502±81	305±241	56±0	239±84	-856±72	-533±833

Tabla 11. Flujo residual (V_R), volumen de mezcla (V_X) y tiempo de residencia (τ) obtenidos a partir de los balances de agua y sal en Laguna Larga durante 2007.

Sección	Flujo residual (V_R), volumen de mezcla (V_X) en m^3/d y tiempo de residencia (τ) en días, obtenidos a partir de los balances de agua y sal durante 2007																	
	Enero - Febrero (54 días)			Febrero - Abril (63 días)			Abril - Junio (69 días)			Junio - Septiembre (89 días)			Septiembre - Octubre (46 días)			Octubre - Diciembre (44 días)		
	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ
Interior ($67 \times 10^3 m^3$)	- 239	110	191	-15	60	892	- 1161	6200	9	- 151	600	89	- 494	1930	28	- 186	250	153
Central ($14 \times 10^3 m^3$)	- 204	4	46	+64	650	19	- 1375	5530	1	- 141	220	15	- 573	5540	2	- 184	890	11
Exterior ($49 \times 10^3 m^3$)	- 270	35880	1.4	-6	13700	3	- 2587	84340	0.5	- 132	5100	9	- 927	148300	0.3	- 200	77700	0.6

Tabla 12. Flujo residual (V_R), volumen de mezcla (V_X) y tiempo de residencia (τ) obtenidos a partir de los balances de agua y sal en Laguna Larga durante 2008.

Sección	Flujo residual (V_R), volumen de mezcla (V_X) en m^3/d y tiempo de residencia (τ) en días, obtenidos a partir de los balances de agua y sal durante 2008																	
	Diciembre - Febrero (68 días)			Febrero - Abril (63 días)			Abril - Mayo (28 días)			Mayo - Julio (57 días)			Julio - Octubre (89 días)			Octubre - Diciembre (60 días)		
	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ
Interior ($67 \times 10^3 m^3$)	-10	50	1187	-20	100	540	-60	150	303	-20	160	385	-20	460	140	+20	400	157
Central ($14 \times 10^3 m^3$)	-5	540	24	+1	20	122	+80	380	23	+20	290	31	+40	570	13	+20	510	15
Exterior ($49 \times 10^3 m^3$)	+20	4420	9	-20	1270	29	+600	12610	4	-20	5580	8	-60	2240	15	+40	7230	6

Tabla 13. Flujo residual (V_R), volumen de mezcla (V_X) y tiempo de residencia (τ) obtenidos a partir de los balances de agua y sal en Laguna Larga durante 2009.

Sección	Flujo residual (V_R), volumen de mezcla (V_X) en m^3/d y tiempo de residencia (τ) en días, obtenidos a partir de los balances de agua y sal durante 2009																	
	Diciembre - Febrero (64 días)			Febrero - Abril (67 días)			Abril - Julio (88 días)			Julio - Septiembre (54 días)			Septiembre - Noviembre (62 días)			Noviembre - Diciembre (30 días)		
	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ	V_R	V_X	τ
Interior ($67 \times 10^3 m^3$)	-1	65	1022	-8	47	1209	-89	983	63	-278	2350	25	-6	685	98	-50	210	259
Central ($14 \times 10^3 m^3$)	+65	805	16	+88	633	19	-110	6101	2	-370	14300	0.9	-24	227	16	-50	956	12
Exterior ($49 \times 10^3 m^3$)	+254	7285	6	+423	28182	2	-382	28627	1	-335	204000	0.2	-52	1293	32	-62	7630	6

5.4.2. Balance de N y P

El balance de nutrientes (N y P), fue calculado a partir del balance de agua y la concentración de ambos nutrientes para cada sección. La diferencia entre el total de aportes y el total de pérdidas es una indicación de fuente (aportes > pérdidas) o sumidero (aportes < pérdidas). El balance anual fue integrado de todos los balances por temporadas.

5.4.2.1. Balance de N (ΔN)

Laguna Larga fue una fuente neta de N en el período estudiado en las secciones central y exterior, ya que tuvo un ΔN positivo de 5.579 mmoles/m²/d y 1.518 mmoles/m²/d, respectivamente. La sección interior fue un sumidero neto de N con una tasa de 0.212 mmoles/m²/d (Tabla 14).

En el cálculo anual, la sección central en 2009 tuvo la mayor tasa con 10.75 mmoles/m²/d, seguida por las secciones central y exterior en 2007 con 6.180 mmoles/m²/d y 9.026 mmoles/m²/d, respectivamente. En 2008, todo el sistema fue un sumidero neto de N, con el mayor valor en la sección 3 (2.686 mmoles/m²/d).

Para los períodos intranuales sólo la sección exterior fue fuente neta de N para todos los muestreos de 2007 (con tasa de hasta 2.682 mmoles/m²/d), con eventos de fuente - sumidero para todas las secciones en los restantes muestreos del estudio (Tablas 15 – 17).

5.4.2.1. Balance de P (ΔP)

Laguna Larga fue un sumidero neto de P en todo el sistema para el período estudiado, ya que todos los valores de ΔP fueron negativos. La sección exterior fue el mayor sumidero de P con un valor de 0.135 mmoles/m²/d y la menor, la sección interior con 0.011 mmoles/m²/d. Anualmente, sólo la sección exterior en 2007 (0.112 mmoles/m²/d) y las secciones interior y central en 2009 (ambas con 0.003 mmoles/m²/d) fueron fuente neta de este nutriente. La sección exterior en 2009 fue el mayor sumidero de P con una tasa de 0.340 mmoles/m²/d (Tabla 14).

Por temporadas, fueron más frecuentes los eventos de sumidero de P que los de fuente, que casi siempre se dieron en la sección exterior (principalmente en 2007); aunque en 2009 la sección interior fue fuente neta de P en tres de los seis períodos de muestreo con tasa de hasta 0.035 mmoles/m²/d en diciembre (Tablas 15 – 17).

Tabla 14. Flujos de N y P (mmol/m²/d) en las tres secciones de Laguna Larga entre 2007 – 2009.

Período	Sección	ΔN (mmol/m²/d)	ΔP (mmol/m²/d)
2007	interior	-2.131	-0.023
	central	+6.180	-0.090
	exterior	+9.026	+0.112
2008	interior	-0.706	-0.015
	central	-0.193	-0.035
	exterior	-2.682	-0.179
2009	interior	+2.20	+0.003
	central	+10.75	+0.003
	exterior	-1.790	-0.340
Media 2007 – 2009	interior	-0.212±2.0	-0.011±0.01
	central	+5.579±5.4	-0.030±0.04
	exterior	+1.518±6.5	-0.135±0.22

Tabla 15. Flujos de N y P (en mmol/m²/d) en Laguna Larga en 2007.

Sección	Flujos de N y P (mmol/m ² /d) para cada período y sección en 2007											
	Enero - Febrero (54 días)		Febrero - Abril (63 días)		Abril - Junio (69 días)		Junio - Septiembre (89 días)		Septiembre - Octubre (46 días)		Octubre - Diciembre (44 días)	
	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP
Interior (67x10 ³ m ³)	+0.385	-0.003	-2.802	-0.125	-8.995	-0.003	-0.244	-0.005	+0.786	+0.005	-0.360	-0.003
Central (14x10 ³ m ³)	-1.781	-0.026	-0.229	-0.011	+36.47	-0.169	-1.952	-0.057	+0.997	-0.288	-0.513	-0.019
Exterior (49x10 ³ m ³)	+3.605	+0.502	+1.346	-0.071	+8.175	-0.740	+3.868	+0.026	+28.79	+0.739	+17.77	+0.752

Tabla 16. Flujos de N y P (en mmol/m²/d) en Laguna Larga en 2008.

Sección	Flujos de N y P (mmol/m ² /d) para cada período y sección en 2008											
	Diciembre - Febrero (68 días)		Febrero - Abril (63 días)		Abril - Mayo (28 días)		Mayo - Julio (57 días)		Julio - Octubre (89 días)		Octubre - Diciembre (60 días)	
	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP
Interior (67x10 ³ m ³)	-0.711	-0.011	-0.756	-0.017	-0.908	-0.022	-0.989	-0.013	-0.591	-0.008	-0.454	-0.024
Central (14x10 ³ m ³)	+1.064	-0.011	-0.387	-0.025	-1.503	-0.031	-0.611	-0.034	+0.357	-0.131	-1.223	+0.068
Exterior (49x10 ³ m ³)	-3.785	-0.352	-3.512	-0.248	+0.218	+0.358	-0.661	+0.015	-4.413	-0.286	-1.264	-0.188

Tabla 17. Flujos de N y P (en mmol/m²/d) en Laguna Larga en 2009.

Sección	Flujos de N y P (mmol/m ² /d) para cada período y sección en 2009											
	Diciembre - Febrero (64 días)		Febrero - Abril (67 días)		Abril - Julio (88 días)		Julio - Septiembre (54 días)		Septiembre - Noviembre (62 días)		Noviembre - Diciembre (30 días)	
	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP	ΔN	ΔP
Interior (67x10 ³ m ³)	+0.047	-0.001	+0.070	+0.002	+0.943	-0.010	+12.48	-0.018	+0.742	+0.028	+0.370	+0.035
Central (14x10 ³ m ³)	+2.747	+0.043	+0.809	-0.016	+47.75	-0.318	-10.20	+0.66	-1.132	-0.108	+3.774	-0.048
Exterior (49x10 ³ m ³)	-1.126	-0.092	+2.056	+0.179	-0.343	+0.261	-12.12	-2.75	-0.184	-0.048	-0.776	-0.097

5.5. Composición isotópica ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$) en *Thalassia testudinum* y *Penicillus dumetosus*

En la Tabla 18 se muestran la composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de cada organismo analizado y para cada muestreo y el promedio para ambos muestreos.

Tabla 18. Composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (‰) de *Thalassia testudinum* y *Penicillus dumetosus* en Laguna Larga y los pastos y arrecifes aledaños a la zona de estudio.

Estación/muestreo	<i>Thalassia testudinum</i>		<i>Penicillus dumetosus</i>	
	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)
PCP/seca	-6.62	2.25	-14.84	2.33
PCA/ seca	-7.36	3.02	-16.09	4.17
PLP1/ seca	-7.39	-0.12	-13.37	3.03
PLA1/ seca	-7.52	0.85	-15.59	3.02
PLP2/ seca	-5.61	0.9	-16.16	2.56
PLA2/ seca	-5.59	-1.8	-14.58	3.88
PLP3/ seca	-5.6	-1.83	-14.99	3.01
PLA3/ seca	-6.79	-0.29	-15.52	3.17
LL/ seca	-9.76	3.16	-19.81	5.55
PROMEDIO (seca)	-6.92±1.33	0.68±1.87	-15.66±1.77	3.41±0.98
PCP/lluvia	-8.32	0.86	-14.93	2.81
PCA/lluvia	-6.50	2.33	-16.30	3.52
PLP1/ lluvia	-8.76	-1.24	-11.33	1.02
PLA1/ lluvia	-6.32	-0.49	-13.73	2.19
PLP2/ lluvia	-6.71	1.49	-14.14	2.89
PLA2/ lluvia	-13.32	2.29	-15.82	1.23
PLP3/ lluvia	-6.5	2.33	-14.25	2.52
PLA3/ lluvia	-8.32	0.86	-15.15	1.40
LL/ lluvia	-7.98	1.57	-8.65	1.45
PRP/ lluvia	-10.20	-1.05	-19.59	3.27
PRA/ lluvia	-8.38	0.81	-16.10	3.10
PROMEDIO (lluvia)	-8.30±2.05	0.89±1.30	-14.54±2.81	2.31±0.89

5.5.1. *Thalassia testudinum* ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$)

El $\delta^{13}\text{C}$ promedio en la *Thalassia testudinum* tomando en cuenta los dos muestreos fue de -7.67 ± 1.86 ‰, oscilando entre -13.32 y -5.59 ‰.

El promedio más alto de $\delta^{13}\text{C}$ fue de -8.30 ± 2.05 ‰ (entre -13.32 y -6.5 ‰) en la temporada lluviosa) y el más bajo en el muestreo de la temporada seca con -6.92 ± 1.33 ‰ (entre -9.76 y -5.59 ‰) (Tabla 18). No se encontraron diferencias significativas a través de una ANOVA entre los niveles de $\delta^{13}\text{C}$ de las dos épocas.

El $\delta^{15}\text{N}$ promedio para los dos muestreos fue de 0.79 ± 1.54 ‰ (entre -1.83 y 3.16 ‰). En la temporada lluviosa el $\delta^{15}\text{N}$ tuvo un promedio ligeramente mayor (0.89 ± 1.30 ‰) que en la temporada seca (0.68 ± 1.87 ‰).

En las estaciones ubicadas frente a Laguna Larga los niveles de $\delta^{15}\text{N}$ oscilaron entre -1.83 y 2.33 ‰, siendo en la estación de referencia de los pastos (PRP) de -1.05 ‰ y en la estación de referencia de arrecifes (PAR) nivel fue de 0.81 ‰ en la temporada lluviosa (única vez que se tomaron muestras) (Figuras 31 y 32). En la temporada seca no se nota un patrón definido en la distribución de $\delta^{15}\text{N}$ frente a Laguna Larga (tanto en pastos como en arrecifes). En el muestreo de la temporada lluviosa fue posible notar un incremento en el $\delta^{15}\text{N}$ desde la estación más cercana a la boca de la laguna (PLP1) hasta la más alejada, en la zona de seibadales (PLP3). En las estaciones de la zona arrecifal, se incremento de la estación más cercana a la boca (PLA1) hasta la intermedia (PLA2), pero otra vez fue menor en la más alejada (PLA3). Es necesario señalar que en ambos muestreos, las muestras recolectadas en Playa Las Coloradas (al Este de Laguna Larga) el $\delta^{15}\text{N}$ en pastos y arrecifes tuvo niveles similares o mayores a los de la estaciones situadas frente a Playa Larga (entre 0.86 y 3.02 ‰).

El mayor contenido de $\delta^{15}\text{N}$ en esta fanerógama estuvo en las muestras recolectadas en Laguna Larga, con 3.16 ‰ en el primer muestreo. Sin embargo, en el segundo muestreo el nivel fue de 1.57 ‰, más bajo que los determinados fuera del sistema. No se encontraron diferencias significativas a través de una ANOVA entre los niveles de $\delta^{15}\text{N}$ de las dos épocas.

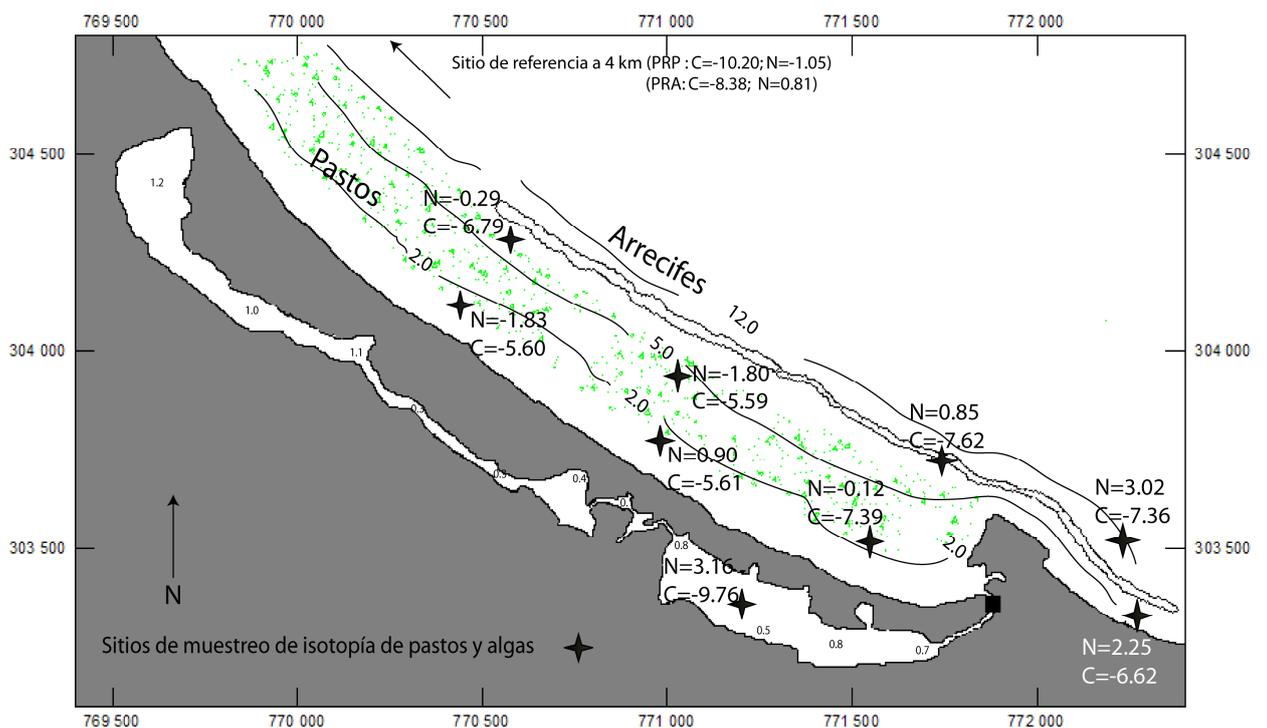


Figura 31. Distribución de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (‰) en *Thalassia testudinum* para la zona de estudio en la temporada seca de 2007.

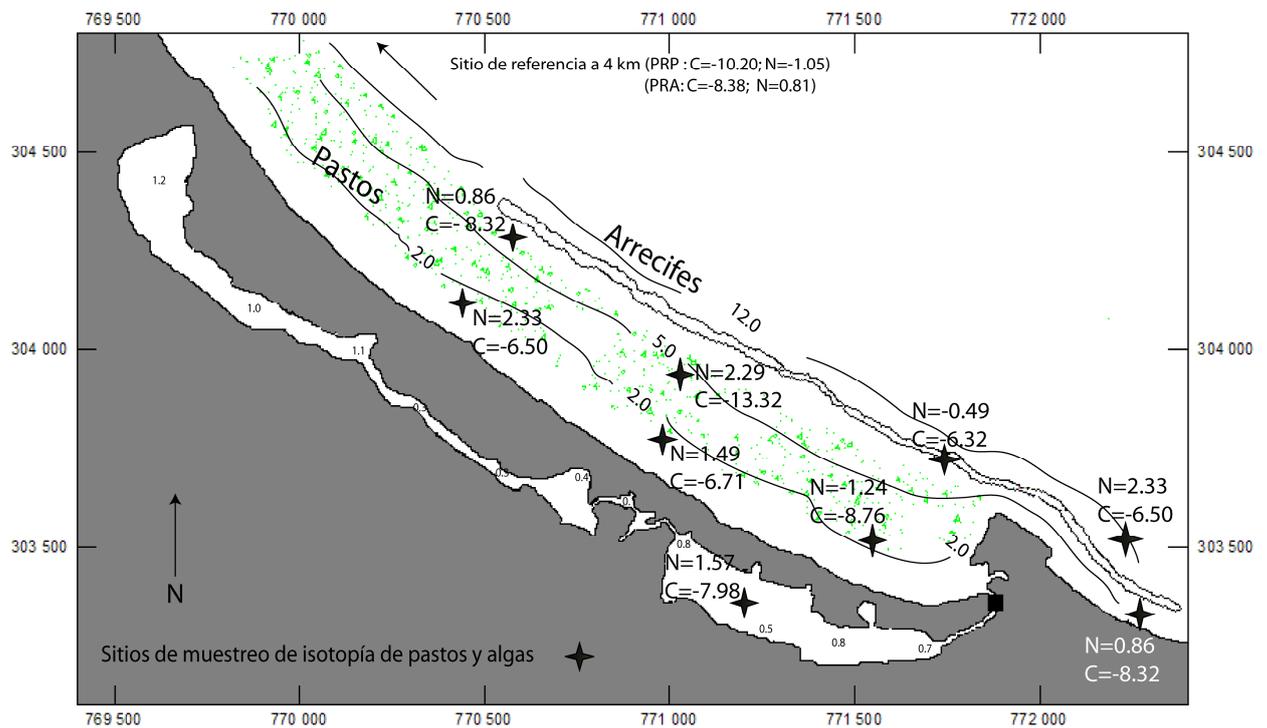


Figura 32. Distribución de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (‰) en *Thalassia testudinum* para la zona de estudio en la temporada lluviosa de 2007.

5.5.2. *Penicillus dumetosus* ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$)

El $\delta^{13}\text{C}$ en el período estudiado (temporadas seca y lluviosa de 2007) fue de $-15.04 \pm 2.41\text{‰}$, más negativo que lo determinado en la *Thalassia testudinum*. Similar a lo determinado para *Thalassia testudinum*, el $\delta^{13}\text{C}$ fue menos negativo en la temporada lluviosa ($-14.54 \pm 2.81\text{‰}$) que en la seca ($-15.66 \pm 1.77\text{‰}$) (Tabla 18). Sin embargo no hubo diferencias significativas entre los niveles de $\delta^{13}\text{C}$ en ambos muestreos ($p > 0.05$)

En febrero de 2007 (temporada seca o poco lluviosa) el valor más negativo (-19.81‰) fue en la estación situada dentro de Laguna Larga. En esta misma estación en octubre de 2007 se determinó el valor menos negativo (-8.38‰). Sólo fue posible notar un patrón consistente de $\delta^{13}\text{C}$ de *Penicillus dumetosus* en la temporada lluviosa cuando se fue haciendo más negativo desde la boca de Laguna Larga hasta la estación más alejada (PLP3) (Figuras 33 y 34).

Para todas las estaciones y en ambos muestreos, el $\delta^{15}\text{N}$ promedio fue más elevado para esta macroalga ($2.80 \pm 1.07\text{‰}$) que para la fanerógama escogida.

Contrario a lo determinado para la *Thalassia*, el $\delta^{15}\text{N}$ fue más elevado en la temporada seca ($3.41 \pm 0.98\text{‰}$) que en la lluviosa ($2.31 \pm 0.89\text{‰}$) (Tabla 18).

No fue posible observar un patrón en la composición isotópica para las estaciones situadas frente al canal de intercambio de Laguna Larga con el mar, siendo

similar el comportamiento espacial tanto en seca como en lluvias (Figuras 33 y 34). No se encontraron diferencias significativas a través de una ANOVA entre los niveles de $\delta^{15}\text{N}$ de las dos épocas ($p < 0.05$).

Al igual que lo registrado para la fanerógama, al Este de Laguna Larga (Playa Las Coloradas) los niveles de $\delta^{15}\text{N}$, fueron similares e incluso superiores a los determinados frente a Laguna Larga (entre 2.33 y 4.17 ‰).

Dentro del sistema, se determinó el mayor nivel de $\delta^{15}\text{N}$ de todo el estudio (5.55 ‰ en la temporada seca). Sin embargo, en la temporada lluviosa, el $\delta^{15}\text{N}$ fue de 1.57 ‰, menor a los determinado frente a la laguna y en Playa Las Coloradas.

Los niveles de referencia determinados para cada organismo vegetal en Playa Flamenco fueron comparables e incluso mayores que los de las estaciones cercanas al sistema (3.27 ‰ en el seibadal y 3.10 ‰ en la zona arrecifal).

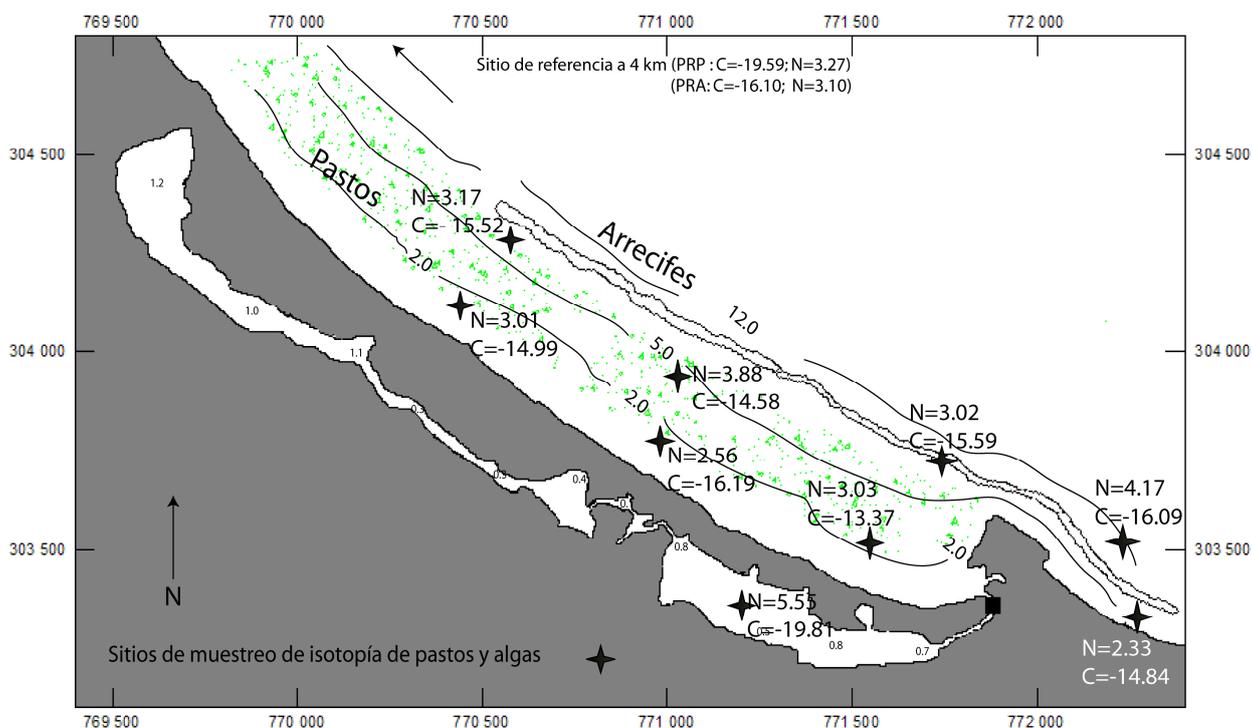


Figura 33. Distribución de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (‰) en *Penicillus dumetosus* para la zona de estudio en la temporada seca de 2007.

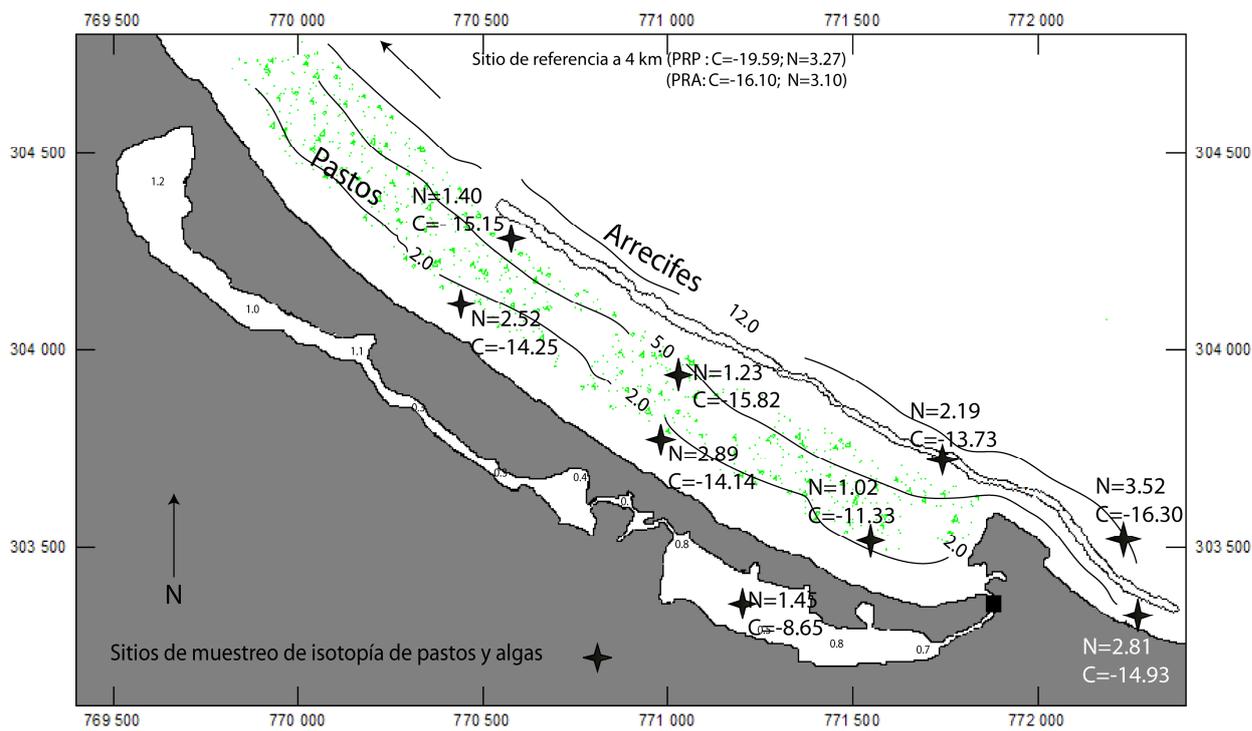


Figura 34. Distribución de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (‰) en *Penicillus dumetosus* para la zona de estudio en la temporada lluviosa de 2007.

6. DISCUSIÓN

6.1. Hidrología

Laguna Larga es una laguna costera tropical con intercambio limitado con el mar a través de un estrecho canal. Su batimetría varía espacialmente y principalmente en dos sitios (sección central y bajo el lobby del hotel Tryp) donde la circulación ha sido prácticamente cerrada, debido tanto a causas naturales como antropogénicas. La reducción en la circulación, principalmente en la sección central, ha provocado alteraciones en la hidrología y distribución de algunos de los parámetros fisicoquímicos determinados, como por ejemplo la salinidad.

La distribución temporal de temperatura siguió un patrón estacional, con los mayores valores en la época de verano que coincidieron con la temporada lluviosa (mayo – octubre) y los menores, en el invierno (noviembre – abril). Aunque, en sitios someros o con poca influencia del mar y aportes de aguas residuales (estaciones 6 a 10), se determinaron extremos de temperatura (hasta 34°C en la estación 10, en septiembre de 2009).

La salinidad tiene importantes implicaciones en el manejo de los ecosistemas costeros, ya que es indicador de la importancia relativa que tienen las fuentes de agua en cada laguna y los riesgos a los que se puede enfrentar (Herrera – Silveira, 2006).

Los sistemas acuáticos con circulación restringida y escaso intercambio con el mar y donde la evaporación supera la precipitación, presentan un gradiente de salinidad desde las zonas con menor influencia del mar hacia boca del sistema, el cual se reduce o se invierte en épocas de precipitaciones (Smith *et al.*, 1997; Hung y Hung, 2003; Camacho – Ibar *et al.*, 2003; Chagas y Suzuki, 2005 y Tapia - González *et al.*, 2008). Contrario a esto la salinidad en Laguna Larga no presentó salinidad mayor a la marina en la sección interior (más aislada), ya que esta distribución estuvo determinada por los aportes de agua dulce (precipitación, escorrentías superficiales y agua subterránea y de residuales líquidos) (Tabla 10), que llegaron hacer como promedio de 608 m³/d en el período de estudio (2007 – 2009), con el mayor volumen de 696 m³/d en 2007.

Sin embargo, se observaron picos máximos de salinidad en la sección central del sistema (estación 6) en abril de 2007 (59.3 ups) y abril del 2009 (64.8 ups), debido a que esta zona permanece totalmente aislada al término de la época de escasas lluvias y además recibe sólo 110 m³/d de agua dulce (por precipitaciones, escorrentías, y residuales líquidos) como promedio durante todo el año (Tabla 10). En la sección exterior, y a pesar de que el aporte de agua dulce fue como promedio de 496 m³/d durante el período, la salinidad fue similar a la del mar adyacente (entre 36.0 y 38.0 ups), debido principalmente al mejor intercambio a través del canal de comunicación (Tabla 9).

Esta variabilidad en la distribución de la salinidad, condicionada por diferentes factores, como el aporte de agua dulce, escasa circulación dentro del sistema y poca comunicación con el mar también ha sido observada para sistema tropicales similares, como las lagunas de Nichupté y Dzilam en México, por Merino *et al.* (1990) y Medina-Gómez y Herrera – Silveira (2002), quienes encontraron variaciones de salinidad desde condiciones

oligohalinas (< 5 ups) hasta hiperhalinas (> 40 ups) en las zonas más internas debido a las condiciones de aislamiento y aporte de agua dulce, mientras que en la conexión con el mar no hubo oscilaciones importantes de este parámetro.

La salinidad, en el período de estudio (2007 – 2009), fue el parámetro que ayudó a demostrar cuan limitado es el intercambio de Laguna Larga con el mar adyacente y por tanto a dividir el sistema en tres secciones. Al observar la distribución de la salinidad (Figuras 11 y 12) se concluye que la sección exterior presentó una salinidad homogénea (espacial y temporalmente) y similar a la del mar adyacente (36.0 – 38.0 ups); la sección central (adonde ya la influencia del mar exterior es escasa) tuvo variaciones temporales importantes y la sección interior, donde prácticamente no llega el agua marina, la salinidad dependió en gran medida de los aportes externos de agua dulce. Autores como Merino *et al.*, (1990), De la Lanza – Espino *et al.* (1998); Reghunath *et al.* (2002) y Hernández – Romero *et al.* (2004) han sugerido la división en secciones de lagunas costeras de acuerdo a la distribución de la salinidad. El OD fue variable temporalmente, pero también estuvo condicionado por la morfología, la circulación y los impactos antropogénicos sobre Laguna Larga. El vertimiento de residuales líquidos hacia la sección interior provocó eventos de hipoxia y anoxia, fundamentalmente en la estación 9. Por otra parte, en zonas someras o mayor influencia de los vientos predominantes en la región, se determinaron altos contenidos de OD (> 10.0 ml/L). Hernández – Romero *et al.* (2004) también han registrado hipoxia y anoxia en un sistema lagunar del Pacífico de Guatemala con niveles por debajo de 1 ml/L, debido al vertimiento puntual de residuales líquidos.

Los niveles de nutrientes inorgánicos disueltos determinados en este estudio (19.8±46.4 µM de NID y 0.54±1.27 µM de PRS) y de nutrientes totales (161.7±132.0 µM de Nt y 5.1±5.4 µM de Pt) durante el período de estudio (2007 – 2009) fueron similares, e incluso superiores, a los encontrados por otros autores para sistemas altamente impactados por la actividad humana (agrícolas e industriales) (Farjalla, 1998; Hung and Kuo, 2002; Hung y Hung, 2003; Chagas y Suzuki, 2005; Álvarez – Góngora y Herrera – Silveira, 2006 y Herrera – Silveira, 2006) (Tabla 19). Estos estudios registraron niveles de NID de entre 1.60 y 22.5 µM y de PRS de entre 0.01 y 4.30 µM.

El agua subterránea, con concentraciones de NID de 161.2 µM y de 0.31 µM de PRS, que fue bombeada hacia a la sección interior durante 2007, fue también un factor importante en la distribución de los nutrientes en Laguna Larga. En algunas lagunas del litoral del Golfo de México (Celestun, Dzilam, Chelem, Bojorquez y Nichupté), Herrera – Silveira (2006) encontró niveles de NID de hasta 20.45 µM y de PRS de 0.66 µM (similares a los de Laguna Larga) e incluyó el aporte de aguas subterráneas como uno de los factores fundamentales en los síntomas de eutrofización de estos sistemas. Elevadas concentraciones de nitrato (268.6 µM) y picos de PRS de hasta 14.2 µM en la zona costera del Caribe Mexicano (Puerto Morelos) fueron atribuidos por Hernández – Terrones *et al.* (2011) a la entrada de aguas subterráneas contaminadas (ricas en nutrientes y coliformes) desde tierra firme.

Todos los nutrientes (incluido el SiRS) mostraron un gradiente decreciente de concentración desde la sección interior (con escaso intercambio) hasta la boca del sistema (sección exterior), debido principalmente a las limitaciones en la renovación del agua y al continuo vertimiento de aguas residuales en todo el sistema. Aunque en la sección exterior de Laguna Larga, el aporte de agua dulce también fue alto (496 m³/día como promedio); el continuo intercambio con el mar adyacente contribuye a la dilución

y/o salida de estos nutrientes por el canal de intercambio. Otras lagunas costeras, como San Quintín, Óbidos, Celestun, Los Mártires, Florida Bay e Indian River Bay presentaron una distribución similar, con gradientes de concentración de nutrientes debido a semejantes causas que las descritas para Laguna Larga (Camacho – Ibar *et al.*, 2003; Pérez – Castañeda y Defeo, 2003; Philips *et al.*, 2004 y Carvalho *et al.*, 2006).

Influido por el gradiente decreciente de nutrientes desde el interior hacia el exterior del sistema, las proporciones SiRS:NID y NID:PRS también tuvieron un patrón similar. Este comportamiento, además del mayor confinamiento en la zona interior de la laguna y el vertimiento de residuales líquidos y aguas subterráneas (en 2007) pudo estar influenciado porque el mayor consumo de SiRS está concentrado en la zona exterior, debido a que las principales especies fitoplanctónicas son diatomeas bentónicas (que utilizan SiRS), mientras en la zona con mayor valor de la relación SiRS:NID (zona interior) las especies que predominan son cianobacterias (no usan SiRS). A similar conclusión llegaron Flores – Montes *et al.* (2002) en un estuario brasileño.

La distribución de nutrientes, tanto disueltos como totales, en Laguna Larga, estuvo condicionada por la escasa circulación hidrodinámica dentro de la laguna, la morfología (estrecha y alargada), los impactos humanos (dragado, relleno, desbroce, etc.) y el aporte de residuales líquidos (con concentraciones de NID de hasta 436.4 μM y 8053 μM de Nt). La mayoría de estos factores son consecuencia, directa o indirectamente, del desarrollo turístico de la región. En varios sistemas lagunares como Mar Menor (España), Ría Formosa (Portugal), Araruama (Brasil), Celestun (México) y la zona costera de la Península de Yucatán, el desarrollo turístico ha traído como consecuencia condiciones hidroquímicas similares dentro de estos cuerpos de agua, con niveles altos de nutrientes hacia las zona más impactadas por el desarrollo turístico y que en algunas, como Laguna Larga, coinciden con las secciones más internas y aisladas (Pérez – Castañeda y Defeo, 2003; Medina- Gómez y Herrera – Silveira, 2003; Souza *et al.*, 2003 y García – Pintado *et al.*, 2007).

A partir de los resultados de este estudio, en particular la anoxia e hipoxia en algunos sitios de Laguna Larga y los contenidos de nutrientes disueltos y totales (Tabla 19), se puede concluir que Laguna Larga es un sistema impactado y con un alto grado de eutrofización. La laguna tuvo un gradiente decreciente de eutrofización desde la sección interior a la sección exterior, debido al intercambio restringido y las limitaciones de circulación del agua y a las entradas alóctonas de NID y PRS a sus aguas.

La zona marina adyacente a Laguna Larga tuvo condiciones fisicoquímicas mejores que las determinadas en Laguna Larga (Tabla 19) ya que sus contenidos de NID (3.9 μM), Nt (19.4 μM), PRS (0.18 μM) y Pt (0.9 μM) fueron inferiores que los determinados en Laguna Larga. No hubo variaciones significativas temporales en las concentraciones de estos parámetros en la zona marina. Otros autores que han trabajado en zonas con similares características encontraron niveles similares (NID de 15.6 μM y Pt de 1.0 μM) (CIEC, 1998; Smith, 1984; Litter *et al.*, 2006 y Lin *et al.*, 2006).

Tabla 19. Concentración de PRS, NID, Pt y Nt registrados en algunos sistemas acuáticos tropicales.

Sitio	PRS (μM)	NID (μM)	NID:PRS	Pt (μM)	Nt (μM)	N:P	Estado	Referencia
Barrera de Belice	0.03±0.02	0.4±0.03	15	-	-	-	No contaminado	Litter <i>et al.</i> (2006)
Shark Bay; Australia	0.05	0.5	10	-	-	-	No contaminado	Smith (1984)
Costa de Taiwán	0.08±0.03	2.9±1.2	37			-	No impactada	Hung y Hung (2003)
Christmas Island	0.10	0.9	9	-	-	-	No contaminado	Smith (1984)
Canton Atoll, China	0.20	0.7	3.5	-	-	-	No contaminado	Smith (1984)
Dzilam	0.73±0.05	15.2±3.5	21	-	-	-	Con tendencia a la eutrofización	Álvarez – Góngora y Herrera - Silveira 2006
Puerto Progreso	0.49±0.05	8.1±2.6	16	-	-	-	Con tendencia a la eutrofización	Álvarez – Góngora y Herrera - Silveira (2006)
Sisal	0.66±0.1	20.4±6.7	31	-	-	-	Con tendencia a la eutrofización	Álvarez – Góngora y Herrera - Silveira (2006)
Laguna de Celestun	0.56±0.1	9.8±.15	18	-	-	-	Con tendencia a la eutrofización	Álvarez – Góngora y Herrera - Silveira (2006)
Laguna de Bojorquez	0.14±0.06	19.4±4.5	138	-	-		Eutrofizada	Van Tussenbroek <i>et al.</i> (1996)

Tabla 19. Relación de concentración de PRS, NID, Pt y Nt registrados en algunos sistemas acuáticos tropicales. (Continuación).

Bahía de Tapong, Taiwán	4.30	13.4	3	6.90	37.70	5	Eutrofizada	Hung y Hung (2003)
Laguna de Chiku, Taiwán	3.00	15.4	5	3.70	32.80	9	Eutrofizada	Hung y Kuo (2002)
Discovery Bay, Jamaica	0.17±0.06	12.2±3.7	72	-	-		Eutrofizada	Lapointe (1997)
Kaneohe Bay, Hawái	0.08±0.04	0.4±0.2	5	-	-		Impactada	Stimson <i>et al.</i> (2001)
Bahía de la Florida, USA	0.15±0.04	1.2±0.25	8	-	-		Impactada	Lapointe (1997)
GBR, laguna arrecifal, Australia	0.08	3.8	48	-	-		Impactada	Hatcher y Hatcher (1981)
Laguna lodada; Brasil	0.04	1.6	40	2.2	33	40	Eutrofizada	Farjalla (1998)
Laguna Carapebus, Brasil	0.01	3.9	390	2.1	49	23	Eutrofizada	Farjalla (1998)
Laguna Acu, Brasil	0.54	7.9	15	1.5	53	35	Eutrofizada	Chagas y Suzuki (2005)
Laguna de Nichupté	0.06±0.02	15.5±2.1	258	-	-		Eutrofizada	Van Tussenbroek <i>et al.</i> (1996)

Tabla 19. Relación de concentración de PRS, NID, Pt y Nt registrados en algunos sistemas acuáticos tropicales (Continuación)

Laguna Larga, Cuba (2007)	0.09±0.10	15.0±26.2	167	2.5±1.6	137.3±98.6	55	Eutroficada	Este estudio
Laguna Larga, Cuba (2008)	0.52±0.6	19.0±46.82	36	4.4±3.1	128.4±95.5	29	Eutroficada	Este estudio
Laguna Larga, Cuba (2009)	1.00±1.99	25.3±59.3	25	8.6±7.5	221.2±168.4	26	Eutroficada	Este estudio
Laguna Larga, Cuba (2007 - 2009)	0.54±1.27	19.8±43.31	36	5.2±5.4	161.7±132.0	31	Eutroficada	Este estudio
Océano adyacente (2007 – 2009)	0.13±0.3	3.9±2.3	30	0.9±1.0	19.4±10.4	21	No impactado	Este estudio

6.2. Balance de agua, sal y tiempo de residencia

En el período estudiado (2007 – 2009), Laguna Larga fue un exportador de agua hacia el mar adyacente con un volumen medio exportado de $236 \text{ m}^3/\text{d}$, un promedio de intercambio por mezcla de $33 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ y un tiempo de residencia que varió desde 123 en la sección interior hasta 4 días para la sección exterior. Este comportamiento exportador de agua de Laguna Larga hacia el mar adyacente fue similar al de otros sistemas tropicales estudiados con la metodología de LOICZ. Medina – Gómez y Herrera – Silveira (2002), y Valdés (1999a) encontraron exportación de agua en dos lagunas costeras del Golfo de México de hasta $409 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ (similares a los de Laguna si tenemos en cuenta que el área de cada sistema es 1000 m^2 mayor que el área de Laguna Larga). Merino (1999) también encontró la exportación de agua desde Laguna Nichupté con un flujo de $79 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$, y un volumen de mezcla de $800 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$.

Los volúmenes de mezcla, en los sistemas estudiados por otros autores fueron mayores que el volumen intercambiado por Laguna Larga entre 2007 y 2009 (la mayoría de estos sistemas superan en área y volumen a Laguna Larga). La Laguna de Celestun intercambió $2,199 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ (Medina – Gómez y Herrera – Silveira (2002); La Restinga en Venezuela $744 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ (Troccoli – Ghinaglia *et al.*, 1999) y Lobos en el Pacífico Mexicano hasta $19,323 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ (Valenzuela – Siu *et al.*, 2007).

Los cambios significativos (en magnitud y/o en sentido) observados en el volumen residual (Figuras 28 – 30), el volumen de mezcla y el tiempo de residencia en cada sección del sistema en los períodos intranuales y anuales entre 2007 y 2009, se debieron esencialmente a las variaciones climáticas (que afectan a precipitación escorrentías y evaporación) y los aportes de aguas subterráneas y residuales. En 2007, la laguna exportó un volumen medio de $703 \text{ m}^3/\text{d}$, sin embargo en 2008, aunque la entrada de residuales líquidos fue de $335 \text{ m}^3/\text{d}$ (mayor que en 2007) el sistema importó hasta $28 \text{ m}^3/\text{d}$. En 2009, el sistema también exportó agua ($33 \text{ m}^3/\text{d}$), pero un volumen pequeño comparado con 2007. Sin embargo, la sección interior (donde se situaba el aporte de aguas subterráneas) exportó agua en todos los períodos debido a que el volumen perdido por el cierre de los pozos de agua subterránea fue compensado con el incremento en el aporte de aguas residuales, que se fueron desde $38 \text{ m}^3/\text{d}$ en 2007, hasta $150 \text{ m}^3/\text{d}$ en 2008 y $143 \text{ m}^3/\text{d}$ en 2009.

Para el caso del volumen de mezcla, se apreció una disminución del intercambio, en 2008 comparado con 2007 y 2009; lo que combinado con la disminución en la magnitud de los volúmenes residuales, provocó un incremento en el tiempo de residencia de cada sección, que fue más notable en la sección interior, que en ocasiones sobrepasó los 1000 días (en períodos intranuales). El cambio en el tiempo de residencia de las aguas en la sección interior de 33 días en 2007 a 251 días en 2008 y 84 días en 2009, es uno de los resultados más importantes obtenidos en esta investigación, ya que la combinación de este incremento con el de los aportes de aguas residuales en el mismo período constituyeron la causa principal de la degradación ambiental de este sector de Laguna Larga.

El tiempo de residencia medio de la laguna durante todo el período de estudio (2007 – 2009) fue disminuyendo desde la sección interior (más aislada, 123 días) a la sección central (8 días) a la sección exterior (mejor intercambio, 4 días) (Tabla 20). Similar comportamiento tuvieron varios sistemas lagunares del Golfo de México, a saber: Chelem, Celestun, Ría Lagartos y Carmen – Machona, en las cuales el tiempo de residencia fue siempre mayor en las zonas interiores del sistema y se redujo

considerablemente en la zona de intercambio con el mar. En Chelem, las zonas interiores tuvieron 13 y 55 días de tiempo de residencia, mientras que la sección mejor comunicada tuvo sólo 4 días (Valdés, 1999a). En Ría Lagartos por ejemplo, desde la zona exterior hasta la interior, el tiempo de residencia se incremento desde 0.3 días hasta 47 días (Valdés, 1999b). En la laguna Carmen – Machona, la diferencia entre las zonas exterior e interior del sistema fue de 14 y 62 respectivamente (Valdés, 1999c). Landim de Souza *et al.* (2000) observaron que la parte más aislada de la Laguna de Munduau presentaba un tiempo de residencia de 61 días, mientras que la mejor comunicada con el mar se reducía a 7 días (Tabla 20).

Otros sistemas similares en posición geográfica a Laguna Larga, pero evaluados sin división en secciones, tuvieron tiempo de residencia similar a los de Laguna Larga, como Nichupté (109 días), La Restinga (84 días) y Mecoacán (33 días) (Merino, 1999, Troccoli – Ghinaglia *et al.*, 1999 y Valdés, 1999d). Todos estos sistemas son de dimensiones muy superiores (área 1000 veces mayor) que Laguna Larga y aportes de agua de diferentes orígenes, y sin embargo todos los casos con tiempos de residencia elevados se tuvieron también evidencias de eutrofización (Medina –Gómez y Herrera – Silveira, 2003 y Landim de Souza *et al.*, 2000).

La bahía de Tapong (Taiwán) y la laguna de Muthupet (India), al ser sistemas estuarinos, con grandes aportes de aguas dulces por ríos y excelente comunicación con el mar, tuvieron tiempos de residencia menores comparados con los de Laguna Larga, 7 días el primero y 1.4 días el segundo (Hung y Hung, 2003 y Gupta *et al.*, 2006). Sin embargo, para la bahía de Tapong, Hung y Hung (2003) determinaron también cierto grado de eutrofización hacia sus zonas interiores.

El cierre total del aporte de aguas subterráneas (de 168 m³/d), la disminución en las precipitaciones (entre 22 y 39 % menores en 2008 y 2009 que en 2007), la mayor evaporación (> 5 % en 2009) y las variaciones en los aportes de aguas residuales fueron las causas fundamentales de la variabilidad de los parámetros que permiten evaluar el intercambio de agua (V_R , V_X y τ). Es de destacar también que los períodos intranuales no fueron los mismos para los tres años estudiados, por lo que el balance integrado para cada año dependió también de las variaciones en los aportes determinadas en cada período. Además, para el caso de V_X , su variabilidad (principalmente en la sección exterior) pudo deberse a que mientras menores sean las diferencias de salinidad entre dos secciones, menos robusto será el balance de LOICZ (Webster *et al.*, 2000)

Uno de los factores que afectan la dinámica de intercambio entre Laguna Larga y el mar adyacente (en la sección exterior) es la posición de la boca de la laguna. La boca del sistema en estudio está situada en una zona protegida de la acción de los vientos predominantes (del Este) por lo que con la entrada de frentes fríos, el oleaje del Norte pudiera contribuir a un mejor intercambio entre los dos sistemas. Camacho – Ibar *et al.* (2003) determinaron diferencias estacionales en el intercambio de agua en la Bahía de San Quintín debido a la estacionalidad de los vientos predominantes y a la posición de la boca del sistema. Ellos calcularon un tiempo de residencia de 45 días para la zona más aislada de San Quintín y un mejor intercambio para la sección más cercana al mar (< 2 días). Los mismos autores concluyeron que este aislamiento de la sección más interna era un factor a tener en cuenta para el desarrollo turístico de las zonas aledañas a los sitios más aislados. Sin embargo, al analizar los tiempos de residencia por períodos (Tabla 11 – 13) encontramos que el tiempo de residencia es más elevado,

precisamente en la época invernal, cuando los vientos predominantes son del norte. Podría ser también coincidente que es la temporada invernal, la época menos lluviosa, por lo que casi toda el agua que entra por el canal de comunicación se queda dentro del sistema para conservar el volumen y resarcir la pérdida de agua.

Tabla 20. Valores de tiempo de residencia (τ), ΔN y ΔP en algunos sistemas tropicales y Laguna Larga.

Sitio	País	Área (m ²)	Sección	τ (días)	ΔN (mmol/m ² /d)	ΔP (mmol/m ² /d)	Referencia
Laguna Larga	Cuba	82x10 ³	interior	123	-0.212	-0.011	Este estudio
		29x10 ³	medio	8	+5.579	-0.030	
		99x10 ³	exterior	4	+1.518	-0.135	
Laguna de Chelem	México	0.4x10 ⁶	interior	13	-5.58	-0.19	Valdés (1999a)
		48x10 ⁶	exterior	4	-0.07	-0.0004	
		10x10 ⁶	interior	55	-0.03	-0.003	
Laguna de Celestun	México	11x10 ⁶	interior	14	-3.139	+0.110	Medina – Gómez y Herrera – Silveira (2002)
		8x10 ⁶	exterior	4	-2.317	+0.098	
		9x10 ⁶	interior	12	-1.875	+0.221	
Ría Lagartos	México	16x10 ⁶	exterior	0.3	-2.94	-0.03	Valdés (1999b)
		41x10 ⁶	medio	3	+0.02	+0.003	
		28x10 ⁶	medio	43	-0.15	-0.001	
		13x10 ⁶	interior	47	+0.01	+0.002	
Laguna de Carmen – Machona	México	76x10 ⁶	interior	62	-0.07	-0.11	Valdés (1999c)
		91x10 ⁶	exterior	14	+0.06	+0.361	
Laguna de Mecoacán	México	50x10 ⁶		33	-0.11	-0.05	Valdés (1999d)
Laguna Nichupté	México	50x10 ⁶		109	-0.02	+0.001	Merino (1999)
Laguna de Munduau	Brasil	43x10 ⁶	interior	61	-1.39	-0.162	Landim de Souza <i>et al.</i> (2000)
		24x10 ⁶	exterior	7	-5.04	-0.40	
Laguna La Restinga	Venezuela	26x10 ⁶		84	-0.003	-0.02	Troccoli – Ghinaglia <i>et al.</i> (1999)
Bahía de Tapong	Taiwán	5x10 ⁶		7	+1.8	-0.11	Hung y Hung (2003)
Laguna de Muthupet	India	13x10 ⁶		1.4	+6.2	+0.03	Gupta <i>et al.</i> (2006)

6.3. Balance de N y P

En el período de estudio, Laguna Larga fue una fuente neta de N en las secciones central (5.579 mmol/m²/d) y exterior (1.518 mmol/m²/d) y un sumidero neto del mismo nutriente en la sección interior (0.212 mmol/m²/d). En el caso del P, el sistema fue un sumidero neto con tasas de entre 0.011 y 0.135 mmol/m²/d (Tabla 20). Esta variabilidad puede estar relacionada con lo determinado en el balance de agua para el V_R , V_x y τ y por tanto, de las variaciones inherentes a la estacionalidad durante el período y los aportes externos de ambos nutrientes. Hubo un comportamiento heterogéneo en las entradas de N y P procedentes de fuentes externas (precipitaciones, escorrentías superficiales, y aguas subterráneas y aguas residuales) entre 2007 y 2009 a Laguna Larga (Tabla 20). En 2007, a pesar de que las salidas de N y P (por producción primaria) para cada sección fueron más elevadas que las entradas (desde 2 hasta 162 veces) (Tabla 21), el sistema fue fuente neta de N y P (9.02 mmol/m²/d de N y 0.11 mmol/m²/d de P). En 2008 en todas las secciones, el sistema fue sumidero neto de N y P (2.68 mmol/m²/d de N y 0.18 mmol/m²/d de P). En 2009, el sistema fue fuente neta N y P a razón de 1.79 y 0.34 mmol/m²/d, respectivamente.

Esta variabilidad en la dinámica sumidero – fuente en el caso del N y el P, ha sido encontrada también por Hung y Hung (2003), quienes registraron para una laguna costera tropical que no había un patrón claro de los flujos estacionales de N y P, aunque en el balance anual integrado el sistema fue una fuente de N (1.79 mmol/m²/d, similar a lo determinado para Laguna Larga) y un sumidero neto de P (0.11 mmol/m²/d, también similar al de Laguna Larga). Este comportamiento se debió, según los autores, a la variabilidad estacional de las entradas terrestres, la remoción biológica y el intercambio mareal. Valenzuela – Siu *et al.* (2007) concluyó que la variabilidad estacional observada en la Laguna de Lobos (México), la cual fue fuente neta de P en el verano (0.004 mmol/m²/d), pero sumidero de N en la misma época (-0.15 mmol/m²/d) y sumidero de ambos nutrientes (0.06 mmol/m²/d de P y 1.34 mmol/m²/d) en el invierno, se debió a las variaciones en los aportes de aguas residuales agrícolas.

Otros autores han registrado variabilidad estacional y espacial así como niveles similares en los flujos de N y P (al igual a lo determinado en este estudio) en otros sistemas costeros; sin embargo estos casos no permiten la comparación con Laguna Larga porque sólo fueron tomados en cuenta los aportes por evaporación y precipitación (Merino, 1999 y Troccoli – Ghinaglia *et al.*, 1999). Algunos como Valdés (1999a y b) y Medina – Gómez y Herrera – Silveira (2002) si utilizan el aporte de aguas subterráneas, que fue determinante en la exportación de agua (y quizás de N) de Laguna Larga hacia el mar adyacente (sobretudo en 2007). Valdés (1999c y d) usaron en el balance, además de las precipitación y la evaporación, lo aportado por las escorrentías superficiales, pero sus flujos de N y P fueron consistentes en su comportamiento, ya que la laguna de Carmen - Machona fue una fuente neta de N (0.06 mmol/m²/d) y de P (0.361 mmol/m²/d), mientras que la laguna de Mecoacán fue un sumidero neto de ambos nutrientes (Tabla 20).

Algunos autores (Camacho – Ibar *et al.*, 2003 y Hernández – Ayón *et al.*, 2004) han registrado “exportación” e “importación” de nutrientes cuando los sistemas estudiados fueron fuente neta o sumidero neto de este nutriente. Si analizamos el caso de Laguna Larga desde esa perspectiva entonces en el balance integrado desde 2007 – 2009, la sección exterior “exportó” hacia el mar adyacente al menos una parte de los 1.518 mmol/m²/d determinados. Este dato es importante en el contexto de conocer la influencia de Laguna Larga sobre los pastos y arrecifes aledaños a la laguna. En particular, la sección exterior es la que se comunica con el mar adyacente, por lo que si analizamos que en 2007 fue determinado un tiempo de residencia de un día, con una exportación de 703 m³/d y flujos de N (9.026 mmol/m²/d) y P (0.112 mmol/m²/d) procedente de las fuentes externas, entonces podemos hablar de la posible salida hacia el mar adyacente de al menos una fracción de estos flujos. Esta fracción pudo ser “exportada” a pesar de que la salida de ambos nutrientes por producción primaria fue muy superior a los aportes que hubo (Tabla 21). Sin embargo, con un tiempo de residencia corto como el que caracterizó a la sección exterior en 2007, parte del N y P pudo haber sido exportado a través del canal de comunicación hacia el mar adyacente, principalmente en los “eventos” de lavado. Es conocido que los nutrientes son rápidamente usados por los productores primarios, absorbidos en el sedimentos o removidos del sistema por otra vía, como la exportación al sistema adyacente (Burkholder *et al.*, 2006). Es de destacar que este flujo de N (9.026 mmol/m²/d), determinado en Laguna Larga en 2007, fue superior al flujo reportado (hasta 6.2 mmol/m²/d) para sistemas como la Laguna de Muthupet (India) con aportes de agua dulce importantes, provenientes de ríos y de aguas residuales (más de 4x10⁶ m³/d).

En contraste con la posible “exportación” de N y P, ocurrida en 2007; el incremento del tiempo de residencia al doble en 2009 y hasta 15 veces en 2008, contribuyó a la permanencia de los nutrientes más tiempo dentro del sistema, por lo que pudieron ser utilizados por los productores primarios (fitoplancton, pastos y manglar) y consumidos completamente en el sistema en ambos años, principalmente en la sección exterior (Tabla 21).

En la sección interior, donde el agua permaneció entre 33 y 251 días y a pesar de que exportó agua durante todo el período de estudio, ambos nutrientes (N y P) fueron consumidos completamente en 2007 y 2008, requiriendo subsidios de la sección adyacente (sección central). Este elemento es importante en el contexto de que con un tiempo de residencia menor en la sección interior y manteniéndose los aportes de N y P de aguas residuales, el paso de estos nutrientes de una sección a otra y la posible “salida” hacia el mar adyacente (a través del canal de comunicación) podrían contribuir a la degradación de los ecosistemas aledaños (pastos y arrecifes).

Tabla 21. Salidas medias anuales de fósforo y nitrógeno en Laguna Larga durante el período de estudio (2007 – 2009).

	Salidas de N y P			
		Sección 1	Sección 2	Sección 3
Fitoplancton	P(mol/d)	-17.7	-6.3	-3.6
	N (mol/d)	-627.7	-222.0	-128.1
Pastos	P(mol/d)			-18.1
	N (mol/d)			-964.4
Manglar	P(mol/d)	-10.10	-16.6	-28.3
	N (mol/d)	-536.8	-2283.4	-3888.0
Total	P(mol/d)	-27.8±5.3	-22.9±7.3	-50.0±12.4
	N (mol/d)	-1164.5±64.2	-2505.4±1457	-4980±1474

6.4. Composición isotópica ($\delta^{15}\text{N}$) en *Thalassia testudinum* y *Penicillus dumetosus*

Al analizar el $\delta^{15}\text{N}$, tanto en *Thalassia testudinum* como en *Penicillus dumetosus* se puede concluir que el N procedente de aguas residuales (y que pudo ser exportado a razón de 1.518 mmol/m²/d en el período de estudio y específicamente en 2007 con una tasa de 9.016 mmol/m²/d) no es la principal fuente de N a los ecosistemas marinos (pastos y arrecifes) aledaños a Laguna Larga. Los bajos niveles de $\delta^{15}\text{N}$ observados en *Thalassia testudinum* y *Penicillus dumetosus* estuvieron lejanos de aquellos registrados por Sherwood *et al.* (2010) para aguas residuales (+6‰ a +22‰). Los niveles de $\delta^{15}\text{N}$ en *Thalassia testudinum* (media de 0.68 ‰ en seca y 0.89 ‰ en lluvia, rango de -1.83‰ a +3.16 ‰) contrasta claramente con lo determinado por Carrouthers *et al.* (2005) en las costas del Caribe Mexicano, donde los aportes de N debido a las aguas subterráneas y residuales son importantes (Hernández – Terrones *et al.* (2011). Según Carrouthers *et al.* (2005), esta fanerógama (*T.testudinum*) que crece en la laguna de Nichupté (eutroficada) y donde la entrada de nutrientes es importante (Merino *et al.* 1990), presenta niveles de $\delta^{15}\text{N}$ mucho más elevados (+9.06‰), que los de la zona aledaña a Laguna Larga, los cuales están dentro del rango reportado para el N de residuales líquidos (Tabla 22).

Algo similar ocurrió con los niveles de $\delta^{15}\text{N}$ en *Penicillus dumetosus* (promedio en seca de +3.41 ‰ y en lluvia de +2.31 ‰, rango de +1.02 a +5.55 ‰) ya que algunos autores también determinaron niveles bajos de $\delta^{15}\text{N}$ en zonas semejantes a las de este estudio. Kieckbusch *et al.* (2004), determinaron señales de $\delta^{15}\text{N}$ entre +0.9‰ en las Bahamas y +1.7 ‰ en la Florida, los cuales son ligeramente inferiores a los de Playa Larga. Mutchler *et al.* (2007), encontraron +4.0‰ en el $\delta^{15}\text{N}$ de esta macroalga en una zona costera al sur de México, pero descartaron relacionar sus resultados con la posible influencia de aguas residuales o aportes antrópicos de otra naturaleza.

Dillon *et al.* (2007), no descartaron la influencia de la descarga de aguas tratadas en una zona urbana de los cayos de la Florida, USA, en la composición isotópica de $\delta^{15}\text{N}$ en *Penicillus dumetosus* y que estuvo en un intervalo de entre +3.1 y +5.32 ‰. Sin embargo, las estaciones donde se recolectaron estas muestras fueron las más alejadas de las descargas urbanas.

Con estos resultados, podemos sugerir que la deposición atmosférica de N podría ser la principal fuente de N en el área de estudio, ya que los niveles de $\delta^{15}\text{N}$ están en el rango reportado por Sherwood *et al.* (2010) para la deposición atmosférica (-12‰ a $+4\text{‰}$). Además estos resultados fueron también consistentes con los niveles de $\delta^{15}\text{N}$ determinados en estudios previos de la región, los que sugieren que la deposición atmosférica de N es la principal fuente de N en áreas costeras de Bahamas (Kieckbusch *et al.*, 2004), Florida (Sherwood *et al.*, 2010) y Bermudas (Hastings *et al.* 2003). Sin embargo, como los rangos de $\delta^{15}\text{N}$ de la deposición atmosférica (-12‰ a $+4\text{‰}$) y de fijación de N_2 (-3‰ a 0‰) se sobrelapan; otros datos (composición isotópica del agua de lluvia) son necesarios para proporción exacta entre estas dos fuentes.

Para soportar los resultados de la isotopía, utilizamos la estimación de la magnitud de los flujos principales de N a la zona costera de Cayo Coco (Tabla 23), la cual indica que las escorrentías, las aguas subterráneas y las aguas residuales tienen menor importancia en el balance de N y las fuentes atmosféricas como la deposición y la fijación pueden constituir casi el 90 % del total de N que entra a esta región.

Espacialmente, no hubo patrones consistentes en la distribución de los contenidos de $\delta^{15}\text{N}$, en ninguna de las dos especies analizadas. La rápida dilución por el mar de los posibles aportes de N procedentes de Laguna Larga (Herrera – Silveira *et al.*, 2002), así como la entrada de N en pulsos de corta duración pueden ser factores que hayan contribuido a la distribución de $\delta^{15}\text{N}$ (Mutchler *et al.*, 2007). Es de destacar en este sentido que en las estaciones escogidas (Playa Flamenco y Playa Las Coloradas) fuera de la zona marina adyacente a Laguna Larga, los niveles de $\delta^{15}\text{N}$ en *Thalassia testudinum* y *Penicillus dumetosus* no fueron significativamente diferentes a los de Playa Larga, lo que sugiere que la zona, a pesar del desarrollo hotelero, mantiene condiciones similares a otras zonas dentro de la región, con menores niveles de impactos.

Tabla 22. Composición isotópica de nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$, ‰) de *Thalassia testudinum* y *Penicillus dumetosus* en Cayo Coco, Cuba comparado con otros sitios en el Caribe y otras zonas, y de las fuentes comunes de N a la zona costera.

Fuente	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)		Referencia
	Media	Rango	
<i>Thalassia testudinum</i>			
Cayo Coco, Cuba	+0.79	-1.83 a +3.16	Este estudio
Bahamas	-0.2		Kieckbusch et al. (2004)
Biscaine Bay, Florida	+1.4		Kieckbusch et al. (2004)
Arrecife de Puerto Morelos, Caribe Mexicano	+1.69		Carrouters et al. (2005)
Akumal y Xaak, Caribe Mexicano	+6.5	+6 a +7	Mutchler et al. (2007)
Laguna de Nichupté, Caribe Mexicano	+9.06		Carrouters et al. (2005)
<i>Penicillus dumetosus</i>			
Cayo Coco, Cuba	+2.80	+1.02 a +5.55	Este estudio
Bahamas	+0.9		Kieckbusch et al. (2004)
Biscaine Bay, Florida	+1.7		Kieckbusch et al. (2004)
Akumal, Caribe Mexicano	+4		Mutchler et al. (2007)
Fuentes de N			
Deposición Atmosférica (lluvia)		-12.0 a +4.0	Sherwood et al. (2010)
Fijación de N		-3.0 a 0	
Aguas residuales		+6.0 a +22.0	

Tabla 23. Balance estimado de N (g N/ha/año) y la contribución relativa de cada fuente a la zona costera de Cayo Coco.

Fuente de N	Flujo de N (g N /ha/año)	Contribución relativa (%)
Escorrentías	411	8–10
Aguas subterráneas	0.25	<0.05
Aguas residuales	3.59	<0.1
Fijación de N ₂	370–1,000	9–22
Deposición atmosférica	3,230	70–80
Total	4,020–4,065	100

7. CONCLUSIONES

- La distribución temporal de la temperatura en Laguna Larga siguió un patrón estacional, con los mayores valores (entre 29.0 y 31.0 °C como promedio) en meses característicos del verano (junio, julio y octubre) y los menores (entre 23.0 y 25.0 °C como promedio) en enero y febrero (característicos del invierno). En sitios someros o con poca influencia del mar exterior y aportes de aguas residuales (estaciones de la 6 a la 10), se observaron variaciones marcadas de temperatura (desde 21.6 hasta 34 °C).
- La salinidad media de Laguna Larga durante el período de estudio fue de 35.0 ± 6.2 ups y osciló entre 8.0 y 64.8 ups. En el período interanual, el promedio de salinidad fue incrementándose desde 2007 con 32.9 ± 5.6 ups, a 35.9 ± 5.8 ups en 2008 y 36.0 ± 6.9 ups en 2009. Por tanto, la clasificación de Laguna Larga en cuanto a su salinidad en el período estudiado es de un sistema con agua de mar polihalina, llegando a ser mesohalina en 2007.
- La distribución espacial de salinidad dentro de Laguna Larga permitió dividir en sistema en tres secciones para el cálculo de los presupuestos de agua, sal y nutrientes. En todo el período, la sección interior tuvo una salinidad de 30.9 ± 6.7 ups, la sección central de 37.7 ± 7.6 ups y la sección exterior y de mejor influencia del mar adyacente, 36.8 ± 0.8 ups.
- El oxígeno disuelto fue variable durante todo el estudio, con una concentración promedio de 4.8 ± 2.8 ml/L (entre 0.1 y 13.0 ml/L). Se observaron anoxia e hipoxia en la estación 9 durante varios muestreos, mientras que en las zonas someras o con mayor influencia de los vientos predominantes en la región, se determinaron altos contenidos de OD (> 10.0 ml/L). Anualmente, los mayores contenidos fueron en 2007 (5.5 ± 3.2 ml/L) disminuyendo hasta 4.2 ± 2.6 ml/L en 2009 y diferencias estadísticamente significativas de 2007 con 2008 y 2009.
- Los niveles de NID, Norg y Nt fueron considerablemente elevados (19.8 ± 46.4 μ M, 142.0 ± 124.3 μ M y 161.7 ± 132.0 μ M, respectivamente). En las tres formas de nitrógeno, sus niveles se incrementaron desde 2007 hasta 2009 y mostraron un gradiente de concentración decreciente desde el interior de la laguna (con escaso intercambio), hasta el exterior del sistema.
- El PRS tuvo un contenido medio durante el período de 0.54 ± 1.27 μ M y osciló entre 0.04 y 16.93 μ M. Al igual que las formas disueltas y totales de nitrógeno se incrementó considerablemente desde 2007 hasta 2009 (desde 0.09 – 1.00 μ M), con niveles similares a otros cuerpos de agua eutrofizados o con tendencia a la eutrofización. Este comportamiento pudo deberse a los aportes de aguas residuales con alta carga en nutrientes (entre 0.39 y 111.96 μ M de PRS), principalmente hacia la zona interior del sistema.
- El Pt tuvo un nivel medio de 5.2 ± 5.4 μ M entre 2007 y 2009, con una variabilidad interanual similar a la del Porg. Los contenidos promedios de Pt en 2007 fueron de 2.5 ± 1.6 μ M; 4.4 ± 3.1 μ M en 2008 y 8.6 ± 7.5 μ M en 2009. En ambos nutrientes, hubo un gradiente de concentración decreciente desde el interior de la laguna, hasta la boca.

- El SiRS tuvo una concentración media de $19.6 \pm 82.3 \mu\text{M}$ durante el período de muestreo (2007 – 2009) con la concentración promedio anual más elevada de $25.9 \pm 115.5 \mu\text{M}$ en 2008 y la más baja de $13.2 \pm 11.4 \mu\text{M}$ en 2007. Similar a la distribución del N y el P, el SiRS tuvo un gradiente de concentración decreciente desde la cabeza hasta la boca de la laguna, con niveles puntuales que reflejaron la magnitud de los aportes de aguas residuales (hasta $980.6 \mu\text{M}$ en la estación 9).
- Laguna Larga fue un sistema exportador neto de agua hacia el mar adyacente entre 2007 y 2009 con un volumen medio de $236 \text{ m}^3/\text{d}$, debido a que los aportes de agua dulce superaron las pérdidas de agua por evaporación en el sistema durante el período estudiado. Sin embargo, hubo una gran variabilidad interanual en este comportamiento ya que pasó de exportar el mayor volumen en 2007 ($703 \text{ m}^3/\text{d}$) a importar un volumen de $28 \text{ m}^3/\text{d}$ en 2008 y otra vez a exportar en 2009 ($33 \text{ m}^3/\text{d}$), aunque un volumen pequeño comparado con el del 2007.
- El volumen de intercambio de agua de Laguna Larga con el mar adyacente debido a la mezcla fue como promedio de $33,631 \text{ m}^3/\text{d}$, con el mayor intercambio en 2007 ($51,800 \text{ m}^3/\text{d}$); sin embargo este volumen pudo ser determinado de forma conservadora, por las estimaciones realizadas para algunos aportes y la poca diferencia de salinidad entre la sección exterior de Laguna Larga y el mar adyacente.
- Laguna Larga tuvo en su sección interior, un tiempo de residencia elevado (123 días) si lo comparamos con otros sistemas tropicales de la región. Los tiempos de residencia en la sección central (8 días) y exterior (4 días) fueron considerablemente menores, indicando mejores condiciones de intercambio con el mar y un menor confinamiento del agua en esta parte del sistema. Los tiempos de residencia mostraron una alta variabilidad en los períodos inter e intranuales debido a las considerables variaciones de los aportes de agua dulce procedente principalmente de las precipitaciones, escorrentías y subterráneas.
- El análisis isotópico de N sugirió que el N exportado desde Laguna Larga hacia la zona marina adyacente no es la principal fuente de N para los productores primarios de la zona costera. Los bajos niveles de $\delta^{15}\text{N}$ determinados en *T. testudinum* ($+0.79\text{‰}$, rango de -1.83 a $+3.16\text{‰}$) y *P. dumetosus* ($+2.80$, rango de $+1.02$ a $+5.55$) estuvieron lejos de los altos contenidos de $\delta^{15}\text{N}$ determinados en aguas residuales ($+6\text{‰}$ a $+22\text{‰}$, Sherwood *et al.*, 2010) y contrastan claramente con los niveles de $\delta^{15}\text{N}$ reportados para algunas áreas del Caribe Mexicano.
- Laguna Larga es un sistema ecológicamente deteriorado, con prácticamente todas sus condiciones naturales perdidas, aunque con todavía alguna resiliencia en la zona exterior (debido a un mejor intercambio). La laguna requiere medidas de conservación y manejo, enfocadas a mejorar la dinámica interior de sus aguas y el intercambio con el mar adyacente, así como la reducción al mínimo de los aportes externos de N y P que deben ser implementadas de inmediato.

8. RECOMENDACIONES PARA LA CONSERVACIÓN Y EL MANEJO INTEGRADO DE LAGUNA LARGA

8.1. Reducción de los aportes de N y P hacia Laguna Larga

8.1.1. Problemática: El vertimiento de residuales líquidos hacia Laguna Larga ha sido un problema recurrente desde el comienzo de la explotación turística en la zona. Los principales puntos de aportes están situados bajo el Lobby del Hotel Tryp, la fosa séptica del CIEC y las habitaciones y restaurantes del Hotel El Senador.

8.1.2. Objetivo: Reducir al mínimo el volumen de aguas residuales (enriquecidas con N y P) que se vierten a Laguna Larga.

8.1.3. Acciones:

- Reparar los sistemas de transporte de aguas residuales en los hoteles Tryp y Senador.
- Reparar los registros de limpieza en los sistemas de evacuación de aguas residuales en restaurantes de los hoteles Tryp y Senador.
- Reparar y dar mantenimiento al sistema de infiltración de efluente de la fosa séptica del CIEC.

8.1.4. Beneficios esperados: Reducir los aportes de N y P a Laguna Larga y por tanto ir recuperando paulatinamente el estado trófico del sistema que hoy se encuentra muy deteriorado, principalmente en la parte interior.

8.1.5. Plazo: 1 año.

8.2. Incremento del intercambio de agua

8.2.1. Problemática: el intercambio de agua entre Laguna Larga y el mar adyacente se ha visto reducido considerablemente desde 1991, cuando comenzó la construcción del CIEC, lo que siguió la construcción de cuatro hoteles. Durante estos años, el relleno, compactación y desbroce sobre la laguna y sus márgenes redujo considerablemente hasta quedar prácticamente incomunicadas sus secciones interior y exterior.

8.2.2. Objetivo: Mejorar en intercambio entre Laguna Larga y el mar adyacente y entre las tres secciones dentro de la laguna.

8.2.3. Acciones:

- **Desbroce de un sector del manglar al este y al oeste del puente de acceso a Playa Larga:**

Se desbrozaría un sector del manglar al este del puente de acceso a Playa Larga en un área aproximada de 700 m² (10 m de ancho por 70 m de largo), siguiendo por reconocimiento visual el trazado de la antigua comunicación que existía en el lugar antes de la colonización del manglar (Figura 35).

Al oeste del puente, en la zona de manglar por donde se comunica el canal principal con el espejo de agua frente al CIEC habría que desbrozar aproximadamente 3 m de ancho por 10 m de largo, para que se permita la comunicación entre ambos sectores.



Figura 35. Sector de manglar a desbrozar en la zona central de Laguna Larga.

- **Acciones para la recuperación de la duna y la disminución del aporte de arena a los sedimentos de Laguna Larga**

Se crearía una barrera de protección en los bordes a ambos lados del puente de acceso para evitar la incorporación de arena hacia la laguna y por tanto el azolvamiento de la zona. La barrera se podría construir de pequeños troncos de madera resistente a la acción de las condiciones de salinidad y humedad del lugar (Figura 36).



Figura 36. Barreras a poner en la zona de dunas de Playa Larga para evitar el paso de la arena a Laguna Larga.

▪ **Retiro de los restos del pedraplén del antiguo puente del CIEC.**

Se retirará todo el resto del material de relleno del antiguo puente del CIEC (3m x 50m), esta actividad deberá realizarse en pleamar y preferiblemente sin utilizar maquinaria pesada que habría que introducir en la laguna, sobre todo porque la zona es de difícil acceso (Figura 37).



Figura 37. Parte del pedraplén que es necesario eliminar para permitir un mejor flujo de agua entre la parte central e interior de Laguna Larga.

- **Construcción de un sistema de renovación de agua en lagunas costeras (REALCO)**

La estrategia propuesta para renovar el agua de Laguna Larga que se encuentra en franco proceso de eutrofización y reducir significativamente su tiempo de residencia, consiste en la configuración y construcción de un sistema RENovador del Agua de Lagunas Costeras (REALCO) en Laguna Larga (Figura 38). Este sistema ha sido desarrollado y patentado por el ICML – UNAM específicamente para renovar el agua en lagunas costeras tropicales, y tiene la capacidad de renovar del orden de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ($86\,400 \text{ m}^3/\text{d}$) del agua contaminada de la laguna con agua de mar limpia. EL sistema se debe configurar de acuerdo a las condiciones de oleaje de la zona, así como al a la topografía y batimetría de la zona donde resulte más conveniente instalarlo, lo cual también es fundamental para su efectivo funcionamiento. La renovación constante de las aguas de Laguna Larga repercutirá significativamente en las condiciones ambientales del sistema y traería beneficios económicos y ambientales en el contexto de Cayo Coco y el país.

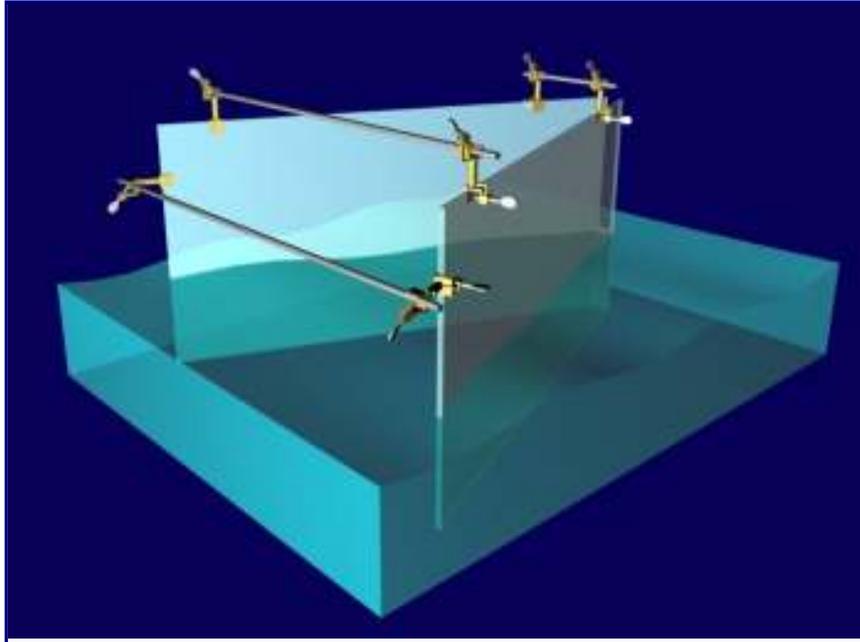


Figura 38. Representación esquemática del sistema REALCO.

8.2.4. Beneficios esperados: Con el mejoramiento del intercambio de agua entre Laguna Larga y el mar adyacente y entre las tres secciones del sistema, se lograría la limpieza paulatina de Laguna Larga, tomando en cuenta que se aportaría agua marina (con baja concentración de nutrientes) y se reduciría el tiempo de residencia de las aguas dentro de la Laguna y por tanto de los posibles contaminantes.

8.2.5. Plazo: 2 años.

8.3. Reparación de infraestructura, valores estéticos y educación ambiental

8.3.1. Problemática: Debido al paso de los años, mucha de la infraestructura construida para facilitar el paso de vehículos y personas a través de Laguna Larga a Playa Larga, se ha deteriorado. Además, el crecimiento excesivo de *Ruppia maritima* (pasto) en la sección exterior de Laguna Larga, el espejo de agua se deteriora visualmente.

8.3.2. Objetivo: Mejorar los valores estéticos de Laguna Larga.

8.3.3. Acciones:

- **Reacondicionamiento y restauración del puente de acceso a Playa Larga**

Reparación de los laterales del puente, debido al estado pésimo de las jardineras y bancos que pueden caerse en cualquier momento (Figura 39). Esta medida también incluye la siembra en dichas jardineras de especies propias de la cayería que puedan ser agradables estéticamente. Debe ser reinstaurado el

sistema de acceso por una puerta (segura y estéticamente agradable) para que sólo el tractor que limpia las playas y otro de servicio transporte de carga que eventualmente acceda a la playa.



Figura 39. Sector a limpiar debajo del puente de acceso a Playa Larga en la zona central de Laguna Larga.

- **Poda de la vegetación acuática**

Cuando el crecimiento sea excesivo (cuidando de que no se desprendan sus raíces) de para evitar la retención del material que está suspendido en la laguna y se desplaza en dependencia del sentido de las corrientes de la laguna. Este material se puede recolectar en los lugares próximos a las pasarelas para mejorar la visual de las zonas más frecuentadas por los turistas.

- **Programa de capacitación ambiental**

Trabajar y elevar la capacitación ambiental de las camareras y personal de restaurantes que atienden las cabañas y restaurantes que da la laguna para que conozcan su papel en la conservación de la laguna.

- **Incrementar el número de cestos de basura en las pasarelas del Hotel El Senado**

En los alrededores de la laguna se deben poner más cestos ya que los que hay actualmente están muy distantes unos de otros y eso contribuye a que boten la basura para la laguna.

8.3.4. Plazo: 1 año.

8.4. Mantenimiento

Algunas de estas acciones estarían encaminadas a mantener abiertos los canales de comunicación entre las tres secciones de Laguna Larga.

- Poda de manglares
- Dragado de canales
- Siembra de vegetación autóctona en las márgenes de la laguna.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACC – ICGC (Academia de Ciencias de Cuba e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía). 1990. *Estudio de los grupos insulares y zonas litorales del Archipiélago Cubano con fines turísticos. 1990. Cayos Sabinal, Guajaba y Romano*. Editorial Científico-Técnica, Ciudad de La Habana, 160 p.
- Acevedo – Rodríguez, C., R. Gómez – Fernández & R. González – De Zayas. 2008. Productividad primaria de manglar en Laguna Larga, Cayo Coco. Informe Científico – Técnico. 9 pp. CIEC (Inédito).
- Álvarez – Góngora, C, J. A Herrera – Silveira. 2006. Variations in fitoplankton community related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. *Marine Pollution Bulletin*, 52: 48 – 60.
- Burkholder, J. M., D. A. Dickey, C. A. Kinder, R. A. Reed, M. A. Mallin, M. R. McIver, L. B. Cahoon, G. Melia, C. Brownie, J. Smith, N. Deamer, J. Springer, H. B. Glasgow & D. Toms. 2006. Comprehensive trend analysis of nutrients and related variables in a large eutrophic estuary: A decadal study of anthropogenic and climatic influences. *Limnology and Oceanography*, 51 (1, part 2): 463 – 487.
- Camacho – Ibar V., J. D. Carriquiry & S. Smith. 2003. Non – conservative P and N fluxes and Net Ecosystem Production in San Quintín Bay, México. *Estuaries*, 26(5): 1220 – 1237.
- Carrouthers, T. J. B., B. I. van Tussenbroek & W. C. Dennison. 2005. Influence of submarine springs and wastewater on nutrient dynamics of Caribbean seagrass meadows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64: 191- 199.
- Carvalho, S., M. B. Gaspar, A. Moura, C. Vale, P. Antunes & O. Gil. 2006. The use of the marine biotic index AMBI in the assessment of the ecological status of the Óbidos lagoon (Portugal). *Marine Pollution Bulletin*, 52 : 1414–1424.
- Chagas, G. G. & M. S. Suzuki. 2005. Seasonal hydrochemical variation in a tropical coastal lagoon (Acu lagoon, Brazil). *Brazilian Journal of Biology*, 65 (4): 597 – 607.
- CIEC (Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros). 1998. Estudio de Impacto Ambiental en el entorno de Laguna Larga para la construcción del Hotel Laguna Azul. EIA. 110 pp (Inédito).
- Correl, D. L., T. E. Jordan & D. E. Weller. 1992. Nutrient flux in a landscape: Effects of coastal land use and terrestrial community mosaic on nutrient transport to coastal waters. *Estuaries*, 15:431 – 442.
- Cruz – Olivares, E., O. De la Paz – Conde & D. González – Alfonso. 1993. Establecimiento de la línea límite de construcción en zonas costeras de los cayos Coco, Guillermo y Paredón Grande. 10 pp. (Inédito)
- Dale, A. W. & R. Prego. 2003. Tidal and seasonal nutrient dynamics and budget of the Chupa Estuary, White Sea (Russia). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 56: 377 – 389.

- De la Lanza – Espino, G. & M. A. Rodríguez – Medina. 1993. Nutrient exchange between subtropical lagoons and the marine environment. *Estuaries*, 16(2): 273 – 279.
- De la Lanza – Espino, G., J. Alcocer – Durán, J. L. Moreno – Ruiz & S. Hernández – Pulido. 2008. Análisis químico-biológico para determinar el estatus trófico de la laguna de Tres Palos, Guerrero, México. *Hidrobiológica*, 18: 21 – 30.
- Dillon, K. S., J. P. Chanton & L. K. Smith. 2007. Nitrogen sources and sinks in a wastewater impacted saline aquifer beneath the Florida Keys, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73: 148 – 164.
- Expósito – Díaz, G., J. Hernández – Albornos y W. Gálvez – González. 2001. Sondeo batimétrico de Laguna Larga (Cayo Coco). Inédito. Centro de Estudios Ambientales de Villa Clara. 11 pp.
- Farjalla, V. F. 1998. Nutrientes limitantes ao crescimento do Bacterioplâncton nas lagoas de Carapebus, Comprida, Cabiúnas e Iodada, pp. 147-158. In: Esteves, F. A. (ed.), 1998, *Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)*. NUPEM, Macaé, 442 p.
- Flores – Montes, M., S. De Macêdo & Maria Luise Koenig. 2002. N:Si:P Atomic Ratio in the Santa Cruz Channel, Itamaracá – PE (Northeast Brazil): a Nyctemeral Variation. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 45 (2): 115 – 124.
- Fourqurean, J. W., J. C. Zieman & George V. N. Powell. 1992. Phosphorus limitation of primary production in Florida Bay: Evidence from C: N: P ratios of the dominant seagrass *Thalassia testudinum*. *Limnology and Oceanography*, 37(1): 162 – 171.
- Fry, B., R. Lutes, M. Northam, P. L. Parker & J. Ogden. 1982. A $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ comparison of food webs in Caribbean seagrass meadows and coral reefs. *Aquatic Botany*, 14: 389 – 398.
- Fry, B. & E. B. Sherr. 1984. $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicator of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. *Contribution in Marine Science*, 27: 13 – 47.
- García – Pintado, J., M. Martínez – Mena, G. G. Barberá, J. Albaladejo & V. M. Castillo. 2007. Anthropogenic nutrient sources and loads from a Mediterranean catchment into a coastal lagoon: Mar Menor, Spain. *Science of the Total Environment*, 373: 220 – 239.
- Gordon, D. C. Jr., P. R. Boudreau, K. H. Mann, J. E. Ong, W. L. Silvert, S. V. Smith, G. Wattayakorn, F. Wulff & T. Yanagi. 1996. LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. LOICZ Reports & Studies No. 5. Second Edition, 96 pp. LOICZ, Texel, The Netherlands.
- González, R. B. & J. Berdayes. 1990. Metabolismo y factores ambientales en la laguna costera El Ciego, Tunas de Zaza, Costa sur, Cuba. II Congreso de Ciencias del Mar. Resúmenes. junio, 1990. La Habana.
- González – De Zayas, R., M. Merino – Ibarra, F. Matos – Pupo & M. F. Soto – Jiménez. 2011. Atmospheric Deposition of Nitrogen to a Caribbean Coastal Zone (Cayo Coco, Cuba): Temporal Trends and Relative Importance as a Nitrogen Source. *Water, Air and Soil Pollution*. DOI 10.1007/s11270-011-0930-6.

- Grasshof, K., M. Ehrhardt & K. Kremling. 1983. *Methods of seawater analysis*. Verlag CEIME. II Edición.
- Guimarais – Bermejo, M. & R. González – Zayas. 2010. Productividad primaria en Laguna Larga. Informe Científico – Técnico. 10 pp. CIEC. (Inédito).
- Gupta, G. V. M., M. V. Usha Natesan, V. G. Ramana Murthy, Sravan Kumar, Viswanathan M. S. Bhat, Ajay Kumar Ray & B. R. Subramanian. 2006. Nutrient budgets for Muthupet lagoon, southeastern India. *Current Science*, 90 (7): 967 – 972.
- Hastings, M. G., M. Sigman, & F. Lipschultz. 2003. Isotopic evidence for source changes of nitrate in rain at Bermuda. *Journal of Geophysical Research*, 108(D24), 4790.
- Hatcher, A. I. & B. G. Hatcher. 1981. Seasonal and spatial variation in dissolved inorganic nitrogen in One Tree Reef lagoon. In E. D. Gomez *et al.*(eds.), Proceedings of the 4th International Coral Reef Symposium 1: 419 – 424. Marine Sciences Center, University of Philippines, Quezon City, Philippines.
- Heikoop, J. M., J. J. Dunn, M. J. Risk, I. M. Sandeman, H. P. Schwarcz & N. Waltho. 1998. Relationship between light and the $\delta^{15}\text{N}$ of coral tissue: Examples from Jamaica and Zanzibar. *Limnology and Oceanography*, 43: 909 – 920.
- Heinle, D. R. & D. A. Flemer. 1976. Flows of material between poorly flooded tidal marshes and an estuary. *Marine Biology*, 35: 359 – 373.
- Hernández – Ayón, J. M., M. S. Galindo – Bect, V. Camacho – Ibar, Z. García – Esquivel, M. A., González – Gómez & F. Ley – Lou. 2004. Dinámica de los nutrientes en el brazo oeste de Bahía San Quintín, B. C., México, durante y después de “El Niño” 97 – 98. *Ciencias Marinas*. No. Esp. Bahía San Quintín, 30 (1A): 129 – 142.
- Hernández – Romero, A. H., C. Tovilla – Hernández, E. A. Malo & R. Bello – Mendoza. 2004. Water quality and presence of pesticides in a tropical coastal wetland in southern Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 48: 1130 – 1141.
- Hernández – Terrones, L., M. Rebolledo – Vieyra, M. Merino – Ibarra, M. Soto, A. Le – Cossec & E. Monroy – Ríos. 2011. Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems. *Water, Air, Soil Pollution*, 218: 517 – 528
- Herrera – Silveira, J. A. & F. A. Comin. 1995. Nutrient fluxes in a tropical coastal lagoon. *Ophelia*, 42: 127 – 146.
- Herrera – Silveira, J. A., I. Medina – Gomez & R. Colli. 2002. Trophic status based on nutrient concentration scales and primary producers community of tropical coastal lagoons influenced by groundwater discharges. *Hydrobiologia*, 475/476: 91 – 98.
- Herrera – Silveira, J. A. 2006. Lagunas Costeras de Yucatán (SE, México). *Ecotrópicos* 19: 94-108.
- Howarth, R. W. Marino, R. Lane, J., & J. J. Cole. 1988. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine marine ecosystems. 1. Rates and importance. *Limnology and Oceanography*, 33(4, part 2): 669 – 687.

- Hung, L. L. & F. Kuo. 2002. Temporal variability of carbon and nutrients budgets from a tropical lagoon in Chiku, southwestern Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54: 887 – 900.
- Hung, L. L. & P. J. Hung. 2003. Carbon and nutrients dynamics in a hypertrophic lagoon in southwestern Taiwan. *Journal of Marine Systems*, 42: 97 – 114.
- Jing Zhang, Zhi Gang Yu, Su Mei Liu, Hui Xu & Min Guang Liu. 1997. Dynamics of Nutrient Elements in Three Estuaries of North China: The Luanhe, Shuangtaizihe, and Yalujiang. *Estuaries*, 20 (1): 110 – 123.
- Kieckbusch, D. K., M. S. Koch, J. E. Serafy & W. T. Anderson. 2004. Trophic linkages among primary producers and consumers in fringing mangroves of subtropical lagoons. *Bulletin of Marine Science*, 74(2): 271 – 285.
- Killingley, J. S. 1980. Migrations of California gray whale tracked by oxygen – 18 variations in their epizoic barnacles. *Science*, 207: 759 – 760.
- Killingley, J. S. & M. Lutcavage. 1983. Loggerhead turtle movements reconstructed from ^{18}O y ^{13}C profiles from commensal barnacle shells. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 16: 345 – 249.
- Kirkwood, D. S. 1994. Kirkwood, Sanplus segmented flow analyzer and its applications, *Seawater analysis. Skalar*. 51 pp.
- Koch, M. S. & S. C. Snedaker. 1997. Influencing *Rhizophora mangle* L. seedling development in Everglades carbonate soils. *Aquatic Botany*, 59: 87 – 98.
- Land, L. S., J. C. Lang & B. N. Smith. 1975. Preliminary observations on the carbon isotopic composition of some coral reef tissues and symbiotic zooxanthellae. *Limnology and Oceanography*, 20: 283 – 287.
- Landim de Souza, W. F., E. C. Machado & B. Knoppers. 2000. Water, salt and nutrients budgets for Mundau/Manguaba system. <http://nest.su.se/mnode/South%20America/Mundau/Mundaubud.htm>.
- Lapointe, B. E. & M. W. Clark. 1992. Nutrient inputs from he watershed and coastal eutrophication in the Florida Keys. *Estuaries*, 15: 465 – 476.
- Lapointe, B. E. 1997. Nutrient thresholds for bottom-up control of macroalgal blooms on coral reefs in Jamaica and southeast Florida. *Limnology and Oceanography*, 42: 1119 – 1131.
- Leichter, J. H., L. Stewart, & S. L. Miller. 2003. Episodic nutrient transport to Florida coral reefs. *Limnology and Oceanography* 48: 1394 – 1407.
- Lin, Hsing–Juh, Xiao–Xun Dai, Kwang–Tsao Shao, Huei–Meei, Su Wen–Tseng, Lo, Hwey–Lian Hsieh, Lee–Shing Fang & Jia–Jang Hung. 2006. Trophic structure and functioning in a eutrophic and poorly flushed lagoon in southwestern Taiwan. *Marine Environmental Research*, 62: 61 – 82.
- Littler, M. M., D. S. Littler & B. L. Brooks. 2006. Harmful algae on tropical coral reefs: Bottom-up eutrophication and top-down herbivory. *Harmful Algae*, 5: 565 – 585.
- Lucena, J. R., J. Hurtado & F. Comín. 2002. Nutrients related to the hydrologic regime in the coastal lagoons of Viladecans (NE Spain). *Hydrobiologia*, 475/476: 413 – 422

- Medina – Gómez, I. & J. Herrera – Silveira. 2002. Water, salt and nutrients budgets for Celestun Lagoon, Yucatan. <http://nest.su.se/mnode/mexicanlagoons/celestun/celestun2/celestunbud2.html>.
- Merino, M. 1987. The Coastal Zone of México. *Coastal Management*, 15: 27 - 42.
- Merino, M., A. González, E. Reyes, M. E. Gallegos & S. Czitrom, 1992. Eutrophication in the lagoons of Cancún, México. *Science of the Total Environment, Supp.*: 861 - 870.
- Merino, M. 1999. Water, salt and nutrients budgets for Nichupté Lagoonal System. Pp. 36 - 40. En Smith, S. V., J. I. Marshall Crossland and C. J. Crossland (eds.): Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II), LOICZ Reports & Studies No. 13, Texel, The Netherlands.
- Ministerio de Medio Ambiente de España (1998) 3ra Edición. Guía para la elaboración de estudios del medio físico. 810 pp.
- Montalvo, J. F. & A. Hernández. 1987. Experimentos sobre cuantificación de carbón orgánico en sedimentos marinos. *Rev. de Inv. Pes.*, 12(2):15 - 20.
- Montalvo, J. F. 1989. Factores de calidad ambiental en dos lagunas costeras, Laguna Grande y La Capitana. Evento "X Aniv. de la Est. de Inv. Acuícolas de Manzanillo". Resúmenes. junio, 1989. Manzanillo, Granma.
- Montalvo, J. F. 1990. Variación y distribución de factores hidroquímicos en Laguna Grande, Sancti Spíritus, Cuba. II Congreso de Ciencias del Mar. Resúmenes. Junio, 1990. La Habana.
- Mutchler, Y., K. H. Dunton, A. Townsend – Small, S. Fredriksen & M. K. Rasser. 2007. Isotopic and elemental indicators of nutrient sources and status of coastal habitats in the Caribbean Sea, Yucatan Peninsula, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74: 449 - 457.
- Officer, C. B. 1980. Box model revisited, p. 65 -114. En P. K. Hamilton and K. B. Macdonald (eds.), *Estuarine and Wetland Processes*. Plenum, New York.
- Phlips, E. J., N., Love, S., Badylak, P., Hansen, J. Lockwood, C. V., John, & Richard Gleeson. 2004. A Comparison of Water Quality and Hydrodynamic Characteristics of the Guana Tolomato Matanzas National Estuarine Research Reserve and the Indian River Lagoon of Florida. *Journal of Coastal Research*, 45: 93 - 109.
- Páez – Ozuna, F.; S. R. Guerrero – Galván, A. C. Ruiz – Fernández & R. Espinosa – Angulo, 1997. Fluxes and mass balances of nutrients in a semi-intensive shrimp farm in north-western México. *Marine Pollution Bulletin*, 34(5): 290 - 297.
- Pereira, P., H. de Pablo, C. Vale, V. Franco & M. Nogueira. 2009. Spatial and seasonal variation of water quality in an impacted coastal lagoon (Óbidos Lagoon, Portugal). *Environ Monit Assess*, 153: 281 - 292
- Pérez – Castañeda, R. & O. Defeo. 2003. Influence of the estuarine zonation on exploited shrimp populations: a feature for management and conservation. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 83: 781 - 784.

- Perigó, E. & A. Bravo. 1988. Factores hidroquímicos de calidad ambiental en Laguna Grande. II Congreso Internacional de Hidrología. Resúmenes. febrero, 1988. La Habana.
- Perigó E., J. Montalvo, M. Martínez & R. Pérez. 2000. Evaluación de la calidad ambiental del Golfo de Batabanó. Reporte de Investigación. Archivo Científico. Instituto de Oceanología, diciembre del 2000.
- Proyecto GEF/PNUD. CUB/98/G32. 1999. Acciones Prioritarias para Consolidar la Protección de la Biodiversidad en el Ecosistema Sabana – Camagüey. 110 pp.
- Redfield A. C. 1934. On the proportions of organic derivations in sea water and their relation to the composition of plankton. In *James Johnstone Memorial Volume*. (ed. R.J. Daniel). University Press of Liverpool, pp. 177 – 192.
- Reghunath, R., T. R. Sreedhara & B. R. Raghavan. 2002. The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, India. *Water Research*, 36: 2437 – 2442.
- Sammarco, P. W., M. J. Risk, H. P. Schwarcz, & J. M. Heikoop. 1999. Cross-continental shelf trends in coral $\delta^{15}\text{N}$ on the Great Barrier Reef: Further consideration of the reef nutrient paradox. *Marine Ecology Progress*, 180: 131 – 138.
- Schroeder, G. L. 1983. Stable isotope ratios as naturally occurring tracers in the aquaculture food web. *Aquaculture*, 30: 203 – 210.
- Schreiber, P. 1904 Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. *Meteorologische Zeitschrift*, 21: 441 – 452.
- Sigman, D. M., M. A. Altabet, R. H. Michener, D. C. McCorkle, B. Fry, & R. M. Holmes. 1997. Natural abundance-level measurement of the Nitrogen isotopic composition of oceanic nitrate: an adaptation of the ammonia diffusion method. *Mar. Chem.* 57: 227 – 242.
- Sherwood, O., A., Brian, M. Lapointe, E., J., Risk & R. E., Jamieson. 2010. Nitrogen isotopic records of terrestrial pollution encoded in Floridian and Bahamian gorgonian corals. *Environmental Science & Technology*, 44(3): 874 – 880.
- Smith, S. V. 1984. Phosphorus versus nitrogen limitation in the marine environment. *Limnology and Oceanography*, 29(6): 1149 – 1160.
- Smith, S. V. & J. T. Hollibaugh. 1997. Annual cycle and interannual variability of ecosystem metabolism in a temperate climate embayment. *Ecological Monographs*, 67: 509 – 533.
- Smith, S. V., V. Camacho – Ibar, J. Herrera-Silveira, D. Valdés, L. David, M. Merino & R.W. Buddemeier. 1999. Quantifying Groundwater Flow Using Water Budgets and Multiple Conservative Tracers. Pp. 96 – 105, En Smith, S. V., J. I. Marshall Crossland and C. J. Crossland (eds.): Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II), LOICZ Reports & Studies No. 13, Texel, The Netherlands.
- Smith, S. V. 2003. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems: A global problem. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 10: 126 – 139.

- Snedaker, Samuel & Ch. D. Getter. 1985. *Pautas para el manejo de los recursos costeros*. National Park Service. USA. 286 p.
- Souza, M. F. L., B. Kjerfve, B. Knoppers, W. F. Landim de Souza & R. N. Damasceno. 2003. Nutrient budgets and trophic state in a hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57: 843 – 858
- Stern, M., J. W. Day & K. G. Teague. 1986. Seasonality of materials transport through a coastal freshwater marsh: riverine versus tidal forcing. *Estuaries*. 9(4A): 301 – 308.
- Stimson J., S.T. Larned & E. Conklin. 2001. Effects of herbivory, nutrient levels and introduced algae on the distribution and abundance of the invasive macroalga *Dicyosphaeria cavernosa* in Kaneohe Bay, *Hawaii Coral Reefs*, 19: 343 – 357.
- Taft, J.L., A. J. Elliott & W. R. Taylor. 1978. Box model analysis of Chesapeake Bay ammonium and nitrate fluxes. p. 115 – 130. En M. L. Wiley (ed.), *Estuarine Interactions*. Academic, New York.
- Tapia – González, F. U., J. A., Herrera – Silveira & M. L. Aguirre-Macedo. 2008. Water quality variability and eutrophic trends in karstic tropical coastal lagoons of the Yucatán Peninsula. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76: 418 – 430.
- Tovilla – Hernández, C & G. de la Lanza – Espino. 2001. Balance hidrológico y de nutrientes en un humedal costero del Pacífico Sur de México. *Hidrobiológica*, 11(2): 133 – 140.
- Trocchi – Ghinaglia, L., J. A. Herrera – Silveira & J. Salazar – López. 1999. Water, salt and nutrients budgets for La Restinga lagoon, Venezuela. Pp. 79 – 83. En Smith, S. V., J. I. Marshall Crossland and C. J. Crossland (eds.): Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II), LOICZ Reports & Studies No. 13, Texel, The Netherlands.
- Umezawa, Y., T. Miyahima, M. Yamamuro, H. Kayanne & I. Koike. 2002. Fine scale mapping of land derived nitrogen in coral reefs by $\delta^{15}\text{N}$ in macroalgae, *Limnology and Oceanography*, 47: pp. 1405 – 1416.
- Valderrama, J. C. 1981. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters: *Marine Chemistry*, v. 21, p. 109 – 122.
- Valdés, D. 1999a. Water, salt and nutrients budgets for Chelem Lagoon, Yucatan. Pp. 26 – 30. En: Smith, S. V., J. I. Marshall Crossland and C. J. Crossland (eds.): Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II), LOICZ Reports & Studies No. 13, Texel, The Netherlands.
- Valdés, D. 1999b. Water, salt and nutrients budgets for Ría Lagartos Lagoon, Yucatan. Pp. 31 – 35. En: Smith, S. V., J. I. Marshall Crossland and C. J. Crossland (eds.): Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II), LOICZ Reports & Studies No. 13, Texel, The Netherlands.

- Valdés, D. 1999c. Water, salt and nutrients budgets for Carmen - Machona Lagoon, Tabasco. Pp. 31 – 35. En: Smith, S. V., J. I. Marshall Crossland and C. J. Crossland (eds.): Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II), LOICZ Reports & Studies No. 13, Texel, The Netherlands.
- Valdés, D. 1999d. Water, salt and nutrients budgets for Mecoacan Lagoon, Tabasco. Pp. 31 – 35. En: Smith, S. V., J. I. Marshall Crossland and C. J. Crossland (eds.): Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II), LOICZ Reports & Studies No. 13, Texel, The Netherlands.
- Valenzuela – Siu M., J. A., Arreola – Lizárraga, S., Sánchez – Carrillo & G., Padilla–Arredondo. 2007. Flujos de nutrientes y metabolismo neto de la laguna costera Lobos, México. *Hidrobiológica*, 17(3): 193 – 208.
- Van Tussenbroek B. I., K. Hermus & T. Tahey. 1996. Biomass and Growth of the Turtle Grass *Thalassia testudinum* (Banks ex König) in a Shallow Tropical Lagoon System, in Relation to Tourist Development. *Caribbean Journal of Science*, 32 (4): 357 – 364.
- Webster, I., J. Parslow, & S. V. Smith. 2000. Implications of spatial and temporal variation for biogeochemical budgets of estuaries. *Estuaries*, 23: 341 – 350.
- Witek, Z., C. Humborg, O. Savchuk, A. Grelowski & E. Lysiak – Pastuszak. 2003. Nitrogen and phosphorus budgets of the Gulf of Gdansk (Baltic Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57: 239 – 248.
- Wösten, J. H. M., P. de Willigen, N. H. Tri, T. V. Lien & S. V. Smith. 2003. Nutrient dynamics in mangrove areas of the Red River Estuary in Vietnam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57 (1-2): 65 – 72.
- Wright, R. C. 1983. A modified field version of the Winkler determination of dissolved oxygen for testing remote sources of water. *New Phytol.* 95: 37 – 40
- Wulff, F. & A. Stigebrandt. 1989. A time – dependent budget model for nutrients in the Baltic Sea. *Global Biogeochemical Cycles*, 3: 63 – 78.
- Yurkovskis, A., F. Wulff, L. Rham, A. Andruzaitis & M. Rodríguez – Medina. 1993. A nutrient budget of the Gulf of Riga, Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 37: 113 – 127.