



# **Evaluación del potencial del sistema Renovador del Agua de Lagunas Costeras (REALCO) para la rehabilitación de Laguna Larga, Cuba**

## **TESIS**

que para optar por el grado académico de:

**Maestro en Ciencias (Química Acuática)**

## **Presenta**

Ing. Adán Zúñiga Ríos

## **Director de tesis:**

Dr. Martín Merino Ibarra

INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA, UNAM

## **COMITÉ TUTOR:**

Dr. Rodolfo Silva Casarín  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA, UNAM

Dr. Ismael Mariño Tapia  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS AVANZADOS, UNIDAD MÉRIDA

Dra. Leticia Rosales Hoz  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA, UNAM

MÉXICO, D. F. ABRIL de 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta tesis no hubiese sido posible sin la cooperación de cada una de las personas e instituciones que a continuación citaré, muchas de las cuales fueron pilares fundamentales desde el inicio del trabajo.

Al CONACYT, al proyecto PAPIIT “Aplicación de la tecnología de renovación del agua de lagunas costeras (REALCO)...” y a la DGAPA-UNAM por su apoyo económico.

Al Dr. Martín Merino, asesor principal de la tesis, quien con su experiencia realizó importantes aportes al trabajo, por su apoyo incondicional más allá de las fronteras del instituto y por ser un gran amigo.

A los doctores Rodolfo Silva, Miguel Ángel Alatorre, Ismael Mariño y a la Dra. Leticia Rosales, miembros del comité de tutores, por ayudarme a enrumbar la dirección de la tesis, por sus sabios señalamientos, paciencia y confianza que ayudaron a hacer de este trabajo un resultado mejor.

Al Dr. Celso Pazos, quien sembró la semilla de aplicar a este posgrado, se esforzó, apoyó y no se rindió aun cuando parecía imposible por los trámites burocráticos y migratorios a vencer.

A Raúl por asumir gran parte del trabajo que dejé con mi salida y ser más que amigo un hermano en las buenas y las malas.

A Heberto por su gran apoyo, honestidad, por cuidar de mis bienes como si fueran suyos, como solo lo hacen los hermanos más cercanos.

A Felo por lograr conducir el proyecto del REALCO por el camino correcto a pesar de tantos y tantos obstáculos.

A quienes desde la dirección del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba me apoyaron a realizar este sueño.

A la dirección del posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, encabezados por la Dra. Gloria Vilaclara, por todo su apoyo y por tener siempre sus puertas abiertas. Gracias Diana, Chantal, Lupita y Gaby.

A los que trabajaron desde siempre en los difíciles muestreos de campo para obtener la información base de estos resultados, entre los que se destacaron Yandy, Roberto y el equipo de técnicos del CIEC.

A Jorgito, que fue vital por su ayuda en la terminación de los trabajos y pendientes necesarios de mi entrega para poder venir hasta México.

A mis compañeros de laboratorio del CIEC quienes con mi ausencia se han visto recargados de trabajo.

A los participantes de los seminarios de LOICZ del laboratorio de biogeoquímica acuática del ICML por ayudarme a poner en perspectiva y contexto el funcionamiento metodológico del modelo.

A todos los amigos y compañeros de trabajo que de un modo u otro han respaldado este esfuerzo.

A mi madre y hermanas quienes siempre me impusieron grandes metas y me exhortaron a cumplirlas.

A mis dos niños Flavia Sofía y Adrián por su eterno cariño indestructible y por ser el motor principal de mis deseos de avanzar en la vida.

Un agradecimiento muy especial para mi esposa por su apoyo incondicional a lo largo de todo este trayecto, por exhortarme a no rendirme, por ayudarme en las revisiones del documento, por sus consejos y por estar a mi lado aun cuando el mal humor me agobió por el trabajo.

*"...La gratitud, como ciertas flores, no se da en la altura y mejor reverdece en la tierra buena de los humildes."*

*José Martí*

## RESUMEN

Laguna Larga, es un sistema costero tropical eutrofizado de Cayo Coco, localizado al norte y centro de Cuba, destacado por el uso turístico intensivo de su entorno y por sus valores ecológicos, en el cual se pretende rehabilitar las funciones ecológicas y recreativas a partir de la construcción del sistema Renovador del Agua de Lagunas utilizando la energía limpia y renovable del oleaje (REALCO). El sistema, patentado por Alatorre-Mendieta *et al.* (1989), prevé disminuir el tiempo de retención del agua dentro de lagunas afectadas, a través de la incorporación de agua de mar con características oceánicas, utilizando un dispositivo de concentración del oleaje, en el cual las olas son amplificadas hasta rebasar un franco bordo, desde donde el agua capturada se incorpora por gravedad al sistema lagunar.

Este trabajo pretende comprobar la efectividad del REALCO en el incremento de la tasa de renovación de agua y con ello la reducción de la eutrofización, usando como herramienta principal el modelo LOICZ (Interacciones Tierra-Océano en la Zona Costera), proyecto del Programa Internacional Geósfera-Biósfera, que aspira detectar a escala regional los cambios que afectan a la zona costera y las consecuencias sobre los ciclos biogeoquímicos globales. Por otra parte, procura determinar en la entrada del sistema lagunar el flujo estacional y anual que será entregado por REALCO, de acuerdo con los parámetros de diseño ingeniero preconcebidos. Igualmente, se propone estimar las tasas de renovación estacional del agua en la laguna, a partir de los flujos estacionales aportados por el REALCO y evaluar los efectos del REALCO sobre las concentraciones de nutrientes y la condición trófica de los distintos sectores de la laguna.

La ejecución del modelo LOICZ se realizó usando como referencia al año 2008, en el que fueron medidos los volúmenes de precipitación, escorrentía, aguas subterráneas, aguas residuales, así como las entradas de nitrógeno y fósforo. Los caudales generados por el REALCO fueron estimados a partir del oleaje medido *in situ*. La efectividad esperada, fue determinada mediante la comparación de los balances hidráulicos, los tiempos de intercambio de agua y biogeoquímicos (N y P) en los escenarios sin y con REALCO. Para realizar la modelación complementaria del proceso de dilución de las concentraciones de fósforo en el agua de la laguna, a partir de la incorporación del REALCO, se diseñó una ecuación con la que se calcularon las concentraciones finales, considerando la masa nueva proveniente de los flujos oceánicos del REALCO entre el volumen total de la laguna y se estimó como ocurrirá la difusión desde el sedimento considerando la Ley de Fick.

Se predijo que el oleaje de la zona, a pesar de ser bajo, es suficiente para producir caudales relativamente constantes durante todos los períodos del año a través del amplificador del REALCO, y que los flujos variaron entre 9,760 y 18,920 m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup> para los

períodos considerados, concluyendo que dichos valores serían suficientes para gobernar el intercambio de agua de Laguna Larga con el océano. Se determinó que una vez operando el REALCO, el flujo residual estaría continuamente dirigido hacia el océano y con valores que superan, las condiciones originales en un promedio de  $14,398.3 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$  de agua, a las condiciones naturales de 2008 cuando los flujos tenían sentido variable. Se obtuvo que con el REALCO en operación, el Tiempo de Intercambio de agua disminuiría pasando de un promedio 40.3 días en condiciones naturales, a 5.1 días.

Se estimó que con la puesta en marcha del REALCO se incrementaría significativamente la exportación ya existente de fósforo en  $-115.2 \text{ mol P d}^{-1}$  y de nitrógeno en  $-1,508.1 \text{ mol N d}^{-1}$  hacia el océano, pasando de ser un sumidero neto a ser una fuente neta de ambos elementos. El balance metabólico neto aparente, invirtió su condición pasando a un predominio de la respiración sobre la producción (de  $2,128.4$  a  $-6,493.7 \text{ mol C d}^{-1}$ ) con la incorporación del amplificador de oleaje. Se detectó que no se esperan efectos de gran magnitud en el balance aparente neto de fijación-desnitrificación, solamente un ligero incremento en el dominio de la desnitrificación sobre la fijación para el escenario con REALCO.

El error de la aplicación del modelo no se consideró significativamente mayor al de otros modelos LOICZ, a pesar de que con los flujos del REALCO se esperaba que no se cumplieran algunos de los supuestos de este modelo, en particular el de estado estacionario. Con el funcionamiento del REALCO se alcanzarían concentraciones de fósforo similares a las del océano adyacente en un plazo promedio de 64 días y en el período de menores aportes de agua (abril-mayo) se alcanzarían en un lapso del orden de 3 meses. Se concluyó que la puesta en funcionamiento del REALCO pudiera modificar la eutrofización con relativa rapidez, respaldando que constituye una solución efectiva para la rehabilitación de Laguna Larga.

# ÍNDICE

<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>17</b>
1.1. Antecedentes	18
1.1.1. Laguna Larga	18
1.1.2. Sistema REALCO	20
1.1.3. Modelos de LOICZ	22
1.2. Justificación e importancia	23
1.3. Objetivo general	24
1.4. Objetivos específicos	24
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>25</b>
2.1. Ubicación geográfica y caracterización morfo-estructural del entorno de Laguna Larga Cayo Coco. Cuba	25
2.2. Estrategia de investigación	26
2.3. Muestreo y trabajo de laboratorio	27
2.4. Topografía y batimetría	28
2.5. Viento	29
2.6. Régimen de marea	29
2.7. Régimen de oleaje	29
2.8. Sobreelevación del nivel del mar	30
2.9. Cálculo de caudales entregados por el REALCO	31
2.10. Balance de masa	33
2.11. Balance hidráulico	34
2.12. Balance de sal	35
2.13. Tiempo de intercambio de agua	36
2.14. Enfoque del modelo biogeoquímico	36
2.15. Parámetros de entrada al modelo (aportes y salidas de agua)	37
2.16. Cálculo de la dilución del fósforo en el sistema	38
2.17. Difusión del flujo de fósforo a través de la interfase sedimentos-agua	38

<b>3. RESULTADOS</b>	39
3.1. Topografía y batimetría	39
3.2. Régimen de viento	41
3.3. Régimen de marea	42
3.4. Sobreelevación del nivel del mar	45
3.5. Régimen de oleaje	48
3.6. Caudales del REALCO por períodos de tiempo	65
3.7. Efectividad del REALCO por períodos de tiempo	67
3.7.1. Balance de agua para los escenarios sin y con REALCO	67
3.7.2. Tiempo de Intercambio de agua para los escenarios sin y con REALCO	71
3.7.3. Balance de Fósforo y Metabolismo Neto para los escenarios sin y con REALCO	74
3.7.4. Balance de Nitrógeno para los escenarios sin y con REALCO	80
3.7.5. Modelación complementaria	84
3.7.5.1 Efecto de dilución	84
3.7.5.2 Estimación de la difusión desde el sedimento	89
<b>4. DISCUSIÓN</b>	95
<b>5. CONCLUSIONES</b>	107
<b>6. LITERATURA CITADA</b>	110



## ÍNDICE DE TABLAS

## PÁGINA

Tabla 1. Correspondencia asumida entre los datos tomados por González-De Zayas <i>et al.</i> (2013) para el año 2008 y los datos de oleaje medidos durante el período 11/7/2011 - 16/6/2012.	31
Tabla 2. Sobreelevación del nivel del mar por efecto de los vientos.	44
Tabla 3. Cálculo de oleaje de ruptura según modelo de Dally <i>et al.</i> (1985).	45
Tabla 4. Sobreelevación del oleaje para los rumbos con influencia directa sobre la playa, para las profundidades de ruptura de la ola calculadas.	46
Tabla 5. Estadística descriptiva de la altura del oleaje correspondiente al período 01/01/2012 - 29/02/2012. Correspondencia asumida con el período 1 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	49
Tabla 6. Estadística descriptiva de la altura de la ola correspondiente al período 01/03/2012-30/04/2012. Correspondencia asumida con el período 2 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	50
Tabla 7. Estadística descriptiva de la altura de la ola correspondiente al período 01/05/2012-31/05/2012. Correspondencia asumida con el período 3 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	52
Tabla 8. Estadística descriptiva de la altura de la ola correspondiente al período 01/06/2011 - 31/07/2011. Correspondencia asumida con el período 4 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	53
Tabla 9. Estadística descriptiva de la altura de la ola correspondiente al período 01/08/2011-31/10/2011. Correspondencia asumida con el período 5 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	55
Tabla 10. Estadística descriptiva de la altura de la ola correspondiente al período 01/11/2011-31/12/2011. Correspondencia asumida con el período 6 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	56

Tabla 11. Estadística descriptiva del período de las olas correspondiente al intervalo 01/01/2012 - 29/02/2012. Correspondencia asumida con el período 1 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	57
Tabla 12. Estadística descriptiva del período de las olas correspondiente al intervalo 01/03/2012-30/04/2012. Correspondencia asumida con el período 2 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	59
Tabla 13. Estadística descriptiva del período de las olas correspondiente al intervalo 01/05/2012-31/05/2012. Correspondencia asumida con el período 3 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	60
Tabla 14. Estadística descriptiva del período de las olas correspondiente al intervalo 01/06/2011 - 31/07/2011. Correspondencia asumida con el período 4 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	61
Tabla 15. Estadística descriptiva del período de las olas correspondiente al intervalo 01/08/2011-31/10/2011. Correspondencia asumida con el período 5 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	62
Tabla 16. Estadística descriptiva del período de la ola correspondiente al intervalo 01/11/2011-31/12/2011. Correspondencia asumida con el período 6 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	63
Tabla 17. Principales estadígrafos de los caudales calculados.	65
Tabla 18. Caudales calculados para los períodos de 2011-2012 correspondientes a los intervalos trabajados por González-De Zayas <i>et al.</i> (2013) para el año 2008.	66
Tabla 19. Variaciones esperadas del Volumen residual ( $V_r$ ) por sectores y períodos a partir de los caudales aportados por el REALCO.	69
Tabla 20. Comportamiento del Tiempo de Intercambio de agua por sectores en el escenario sin REALCO.	71

Tabla 21. Tiempo de Intercambio de agua por períodos en Laguna Larga considerando los escenarios sin y con REALCO.	73
Tabla 22. Flujos de fósforo y metabolismo ecosistémico aparente en Laguna Larga obtenidos del modelo LOICZ bajo el escenario 1 (sin REALCO). Los flujos negativos indican salida del sistema. Pexp/imp corresponde al flujo neto de exportación (-) o importación (+) entre la laguna y el mar.	74
Tabla 23. Flujos de fósforo y metabolismo ecosistémico aparente en Laguna Larga obtenidos del modelo LOICZ bajo el escenario 2 (CON REALCO). Los flujos negativos indican salida del sistema. Pexp/imp corresponde al flujo neto de exportación (-) o importación (+) entre la laguna y el mar.	77
Tabla 24. Flujos de nitrógeno y balance neto aparente de fijación de nitrógeno – desnitrificación en Laguna Larga obtenidos del modelo LOICZ bajo el escenario 1 (SIN REALCO). Los flujos negativos indican salida del sistema. Nexp/imp corresponde al flujo neto de exportación (-) o importación (+) entre la laguna y el mar.	80
Tabla 25. Flujos de nitrógeno y balance neto aparente de fijación de nitrógeno – desnitrificación en Laguna Larga obtenidos del modelo LOICZ bajo el escenario 2 (CON REALCO). Los flujos negativos indican salida del sistema. Nexp/imp corresponde al flujo neto de exportación (-) o importación (+) entre la laguna y el mar.	81
Tabla 26. Tiempos estimados en que la Laguna Larga alcanzaría concentraciones en su interior similares a las oceánicas, considerando la modelación de los procesos de dilución y de difusión desde los sedimentos que se prevén asociados a la operación del REALCO.	93

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>PÁGINA</b>
Figura 1. Ubicación del área de estudio.	24
Figura 2. Estaciones de muestreo y períodos medidos.	26
Figura 3. Configuración de la estructura del REALCO usada para los cálculos de caudal.	31
Figura 4. Balance hidráulico (modelo LOICZ)	33
Figura 5. Balance de sal (modelo LOICZ).	34
Figura 6. Esquema del Balance de N y P representado por el elemento (Y), tomando en consideración que el aporte o salida interna neta dentro del sistema ( $\Delta Y$ ) conserva Y.	35
Figura 7. Mapa topobatimétrico del entorno de Laguna Larga.	38
Figura 8. Plano de drenaje del entorno de Laguna Larga.	39
Figura 9. Perfil batimétrico de Laguna Larga.	40
Figura 10. Porcentaje de ocurrencia del viento para 16 rumbos (8 años). Las direcciones con trama representan el viento habitual.	40
Figura 11. Distribución por meses de la velocidad media del viento en Cayo Coco. Período: 1992-2008. Estación Meteorológica CIEC.	41
Figura 12. Evolución de las oscilaciones del mar durante 24 horas.	42
Figura 13. Evolución de las oscilaciones del mar (ago/2011 - ago/2012). Los datos para la confección de la gráfica fueron obtenidos del software XTide 32 Versión 4.7, usando como referencia la estación mareográfica de la Entrada de la Bahía de Nuevitas, provincia de Camagüey, Cuba.	43

Figura 14. Evolución de las oscilaciones del mar medidas <i>in situ</i> en el período 11/7/2011 - 16/6/2012.	43
Figura 15. Altura de la ola (m) en régimen extremo para los rumbos con incidencia en la línea de costa.	45
Figura 16. Distribución de la altura de las olas medidas <i>in situ</i> en el período 11/07/2011 - 16/06/2012. Mediciones registradas con sensor Aanderaa WTR 9 cada 30 minutos.	47
Figura 17. Porcentaje de ocurrencia de la altura de las olas en el período 11/07/2011 - 16/06/2012.	48
Figura. 18 Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/01/2012 - 29/02/2012. Correspondencia asumida con el período 1 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	49
Figura 19. Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/03/2012 - 30/04/2012. Correspondencia asumida con el período 2 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	50
Figura 20. Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/05/2012 - 31/05/2012. Correspondencia asumida con el período 3 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	51
Figura 21. Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/06/2011 - 31/07/2011. Correspondencia asumida con el período 4 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	53
Figura 22. Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/08/2011 - 31/10/2011. Correspondencia asumida con el período 5 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	54
Figura 23. Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/11/2011 - 31/12/2011. Correspondencia asumida con el período 6 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	55

Figura 24. Distribución del período de las olas medidas in situ en el período 11/7/2011 - 16/6/2012. Mediciones registradas con sensor Aanderaa WTR 9 cada 30 minutos.	56
Figura. 25. Distribución de frecuencia del período de las olas en el intervalo 01/01/2012 - 29/02/2012. Correspondencia asumida con el período 1 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	57
Figura 26. Distribución de frecuencia del período de las olas en el intervalo 01/03/2012 - 30/04/2012. Correspondencia asumida con el período 2 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	58
Figura. 27 Distribución de frecuencia del período de las olas en el período 01/05/2012 - 31/05/2012. Correspondencia asumida con el período 3 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	59
Figura 28. Distribución de frecuencia del período de las en el intervalo 01/06/2011 - 31/07/2011. Correspondencia asumida con el período 4 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	60
Figura 29. Distribución de frecuencia del período de las olas en el intervalo 01/08/2011 - 31/10/2011. Correspondencia asumida con el período 5 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	62
Figura 30. Distribución de frecuencia del período de las olas en el intervalo 01/11/2011 - 31/12/2011. Correspondencia asumida con el período 6 de González-De Zayas <i>et al.</i> (2013).	63
Figura 31. Distribución de los caudales calculados sobre el franco bordo del REALCO para todo el intervalo de medición (11/07/2011 - 16/06/2012).	64
Figura 32. Relación entre los caudales calculados sobre el franco bordo del REALCO y las alturas de olas para todo el intervalo de medición (11/07/2011 - 16/06/2012).	65

Figura 33. Balance de agua para toda Laguna Larga sin flujo de entrada del REALCO (escenario 1).	67
Figura 34. Balance de agua para toda la Laguna con flujo de entrada del REALCO (escenario 2).	68
Figura 35. Comparación del Volumen residual ( $V_r$ ) para los escenarios sin y con REALCO en toda la laguna en su conjunto por períodos	69
Figura 36. Balance de sal para toda la Laguna sin flujo de entrada del REALCO.	70
Figura 37. Balances de sal y agua por períodos para toda la Laguna con flujo de entrada del REALCO. Se indica el tiempo de Intercambio (Exchange Time).	71
Figura 38. Comparación del Tiempo de Intercambio entre los escenarios con y sin REALCO por sectores y períodos.	72
Figura 39. Comparación del Tiempo de intercambio (TI) por períodos en toda la laguna en su conjunto para los escenarios sin y con REALCO.	72
Figura 40. Balance del fósforo ( $\text{mol P d}^{-1}$ ) para toda la Laguna sin flujo de entrada del REALCO (escenario 1).	74
Figura 41. Balance del fósforo para toda la Laguna con flujo de entrada del REALCO (escenario 2).	76
Figura 42. Comparación del Balance de Fósforo ( $\Delta P$ ) para los escenarios sin y con REALCO en toda la laguna en su conjunto por períodos.	77
Figura 43. Cambios en los niveles de exportación de fósforo entre los escenarios sin y con REALCO en toda la laguna en su conjunto por períodos.	78
Figura 44. Comparación del Metabolismo Neto para los escenarios sin y con REALCO en toda la laguna en su conjunto por períodos.	79

Figura 45. Balance del Nitrógeno para toda la Laguna sin flujo de entrada del REALCO (escenario 1).	80
Figura 46. Balance del Nitrógeno para toda la Laguna con flujo de entrada del REALCO (escenario 2).	82
Figura 47. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Dic-Feb.	85
Figura 48. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Feb-Abr.	85
Figura 49. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Abr-May.	86
Figura 50. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período May-Jul.	86
Figura 51. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Jul-Oct.	87
Figura 52. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Oct-Dic.	87
Figura 53. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución considerando los períodos de manera anidada a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Dic-Feb.	88



Figura 54. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Dic-Feb.	90
Figura 55. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Feb-Abr.	90
Figura 56. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Abr-May.	91
Figura 57. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período May-Jul.	91
Figura 58. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Jul-Oct.	92
Figura 59. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Oct-Dic.	92

## 1. INTRODUCCIÓN

Las lagunas costeras ocupan el 13 % de la línea costera mundial (Balik *et al.* 2008), lo cual les confiere un peso importante entre el resto de los ecosistemas costeros. Son proveedoras de valores recreacionales, estéticos y para la investigación. Constituyen hábitat de numerosos organismos que forman parte de la cadena trófica, que sirve de base a la alimentación humana. Reciclan los nutrientes y contribuyen a la regulación del balance hídrico de las zonas costeras. No sólo favorecen a los seres humanos que viven en su proximidad, sino también a los que viven a grandes distancias. Las lagunas costeras, junto con los estuarios, proporcionan más servicios y beneficios sociales que el resto de los sistemas acuáticos (Elliott y Whitfield, 2012).

Las lagunas costeras constituyen en la actualidad uno de los sistemas naturales que más presión del desarrollo humano reciben. La ubicación directa de nuevos espacios urbanos y turísticos, la construcción de camarónicas, la pesca excesiva y la recepción de contaminantes químicos provenientes de la agricultura, son algunas de las principales acciones que alteran los procesos que mantienen el equilibrio ecológico de estos sistemas.

El problema se agrava por su baja profundidad y por el intercambio limitado con el mar adyacente, motivo por el cual las lagunas costeras se consideran particularmente vulnerables a la eutrofización (Lloret y Marín, 2011). Este fenómeno, además de afectar al propio funcionamiento del sistema natural, se revierte contra el desarrollo humano, provocando afectaciones operacionales y en el peor de los casos pérdidas económicas o enfermedades.

La compleja situación de las lagunas costeras conduce a reflexionar sobre la necesidad de intervenir de manera proactiva en la búsqueda de soluciones a los serios problemas que hoy están tomando lugar en muchos de los sistemas acuáticos alrededor del mundo. Una solución práctica fue propuesta por Alatorre *et al.* (1989), quienes obtuvieron una patente para el uso del sistema Renovador del Agua de Lagunas utilizando la energía limpia y renovable del oleaje (REALCO). Este sistema prevé disminuir el tiempo de retención del agua dentro de las lagunas afectadas, a partir de la incorporación de agua

de mar con características oceánicas, utilizando un dispositivo de concentración del oleaje, en el cual las olas son amplificadas hasta rebasar un franco bordo desde donde el agua capturada se incorpora por gravedad al sistema lagunar.

La primera aplicación práctica de este sistema será en Laguna Larga, sistema costero tropical eutrofizado de Cayo Coco, destino turístico localizado en el Archipiélago Sabana Camagüey, norte de Cuba. Esta acción constructiva, además de tener como objetivo principal rehabilitar las funciones ecológicas y recreativas de Laguna Larga, servirá de base experimental para los ajustes del diseño estructural del sistema.

El grado de eficiencia de un dispositivo de este tipo dependerá en gran medida de la relación entre los diferentes parámetros que caracterizan el régimen hidrodinámico de determinado sitio (dirección, altura y espectro del oleaje, nivel del mar, profundidad y pendiente del fondo), con los parámetros de diseño estructural del dispositivo captador del oleaje (orientación, amplitud en la base y franco bordo, pendiente de las rampas y las paredes, altura del franco bordo y rugosidad de las paredes).

Este proyecto de tesis está dirigido a evaluar el potencial de uso del sistema REALCO en función de la disminución del tiempo de residencia del agua en Laguna Larga, Cayo Coco, Cuba, con vistas a solucionar los problemas de eutrofización existentes.

## **1.1. Antecedentes**

### **1.1.1. Laguna Larga**

Laguna Larga es un cuerpo de agua alargado y estrecho con una longitud total, en su eje principal, de 2.90 km y un área total de 0.22 km<sup>2</sup>. Posee una única salida de intercambio permanente con el mar, conformada por un estrecho canal de mareas localizado en su extremo oriental.

La evolución de este cuerpo de agua tropical ha estado relacionada con la combinación de factores naturales (azolvamiento y crecimiento más acentuado de *Rizophora mangle* en la salida hacia el mar del manglar) y antropogénicos, acelerados por el desarrollo del turismo durante las últimas dos décadas, (dragados, rellenos, cierres temporales y

vertimiento de residuales orgánicos), que han traído como consecuencia una disminución paulatina de los niveles intercambio de agua, que se hace más crítica hacia el extremo occidental de la laguna.

Las diferencias de intercambio y la morfología propia del sistema han generado que el cuerpo de agua se encuentre subdividido en tres sectores bien marcados con diferente comportamiento desde el punto de vista hidrodinámico, nombrados como: este, central y oeste (Guimaraes y González-De Zayas, 2009).

Los cambios hidrodinámicos y ecológicos que ha sufrido Laguna Larga la han conducido a estar identificada como uno de los problemas ambientales principales de su entorno. Cuatro de los principales hoteles de Cayo Coco, se encuentran en relación directa con dicho cuerpo de agua, desde el punto de vista ambiental y de concepto arquitectónico. Estas entidades turísticas, están recibiendo constantemente reclamaciones de los usuarios, por la degradación ambiental y paisajística dentro de las propias instalaciones, así como por la pestilencia presente en momentos críticos de intercambio de agua.

De acuerdo con González-De Zayas *et al.* (2013) entre los años 2007-2008 existieron diferencias marcadas en el comportamiento del intercambio entre los sectores oriental y occidental de Laguna Larga, siendo mayor en ambos casos en la sección exterior (oriental) y más bajo en la sección más interna (occidental). Sin embargo, el año 2008 contó con los menores valores de intercambio y en consecuencia con los mayores valores de tiempo de intercambio en todos los sectores. Los autores atribuyeron estas diferencias a las reducciones en las precipitaciones y a la disminución del bombeo de aguas subterráneas hacia la laguna.

Esta situación ha conllevado a que su sección occidental se encuentre dominada por fitoplancton, mientras que las macrófitas sólo predominen en su sección exterior (Guimaraes y González-De Zayas, 2011), como evidencia directa de un proceso de eutrofización que está tomando lugar. Según los autores, como resultado de las actividades antropogénicas en la zona, sobre todo relacionadas con la descarga de

aguas residuales directamente a la laguna, la cual constituye, de acuerdo con González-De Zayas (2012), la entrada de nutrientes más importante hacia Laguna Larga.

### **1.1.2. Sistema REALCO**

No son muchos los dispositivos, sobre los cuales existan referencias, dirigidos a la rehabilitación de lagunas costeras utilizando la energía del oleaje. Los más conocidos son el Sistema de Bombeo por Energía de Oleaje (SIBEO), desarrollado por Czitrom *et al.* (1993), que basa su funcionamiento en la presión inducida por el oleaje en la boca de un tubo resonante que provoca un flujo oscilatorio, derramando agua en una cámara de compresión con el paso de cada ola. El agua derramada se acumula en la cámara y luego desciende por gravedad al cuerpo de agua receptor. El principio de funcionamiento del SIBEO, concebido a partir de tubos, conlleva a que no sea útil para los propósitos de este trabajo.

El otro dispositivo es el sistema Renovador del Agua de Lagunas utilizando la energía limpia y renovable del oleaje (REALCO) desarrollado y patentado por Alatorre *et al.* (1989), el cual constituye el propósito principal de este proyecto de tesis. Basa su funcionamiento en una estructura de concentración y amplificación del oleaje, que consigue aumentar su energía potencial, cinética o ambas, provocando el desbordamiento (overtopping) intencionado, sobre un franco bordo desde donde el agua fresca se incorpora por gravedad al sistema lagunar.

Otros dispositivos captadores de oleaje por desbordamiento (overtopping) han sido desarrollados pero con la finalidad de generar energía eléctrica, sin embargo, el análisis de sus diseños estructurales y los modelos hidrodinámicos empleados para su desarrollo servirán de apoyo al objetivo de este trabajo. Existen aproximadamente 200 dispositivos para aprovechar la energía de las olas en diversas etapas de desarrollo y prueba. De ellos, aproximadamente la mitad de una docena se han ampliado y probado en el mar con al menos algunos de los datos de los ensayos publicados (Hayward J. *et al.* 2012).

De los sistemas convertidores de la energía del oleaje, principalmente tres basan su funcionamiento en mecanismos de rebase similares al REALCO, de ellos uno es flotante, denominado el Wave Dragon, desarrollado por una compañía danesa de igual nombre, mencionado por Sørensen H. C. *et al.* (2003), Tedd y Kofoed (2006), WD (2007) y Tedd (2007); otro es apoyado al fondo, el WavePlane, desarrollado por WavePlane International A/S, también de Dinamarca, cuya eficiencia fue probada por Barfoed *et al.* (2002) y el otro instalado en tierra: el Seawave Slot Generator (SSG), que fue desarrollado por WAVEenergy (Stavanger, Noruega), (Vicinanza *et al.* 2012), similar a la variante del REALCO que está siendo construida en Laguna Larga, Cayo Coco, Cuba.

Las mediciones realizadas a través del prototipo del Wave Dragon permitieron establecer un modelo de flujo de desbordamiento de acuerdo con Tedd (2007), basándose en la comparación de los datos reales de desbordamiento medidos, con los datos teóricos de (Kofoed, 2002), quien presenta el único resultado para una estructura de cresta baja, a partir de la evaluación del desbordamiento de un modelo de dos dimensiones a escala de laboratorio.

Los estudios relacionados con el SSG demuestran que existe gran variabilidad de factores geométricos del diseño con influencia en la eficiencia hidráulica del dispositivo, debido al alto número de posibles combinaciones e iteraciones entre esos parámetros. Se encontró que la difusión direccional y el ángulo de ataque de las olas en la estructura disminuyen el desbordamiento en el dispositivo, lo que significa para el caso de baja relación de anchura a profundidad del 40% al 32 % y 35 % respectivamente (Vicinanza *et al.*, 2012).

Estos autores encontraron también que la presencia de la marea también afecta la eficacia del sistema. Sin embargo, demuestran que es posible limitar este efecto teniendo en cuenta variación de las mareas en el diseño de la estructura. Otro hallazgo de utilidad de este estudio, para los análisis de eficiencia del REALCO, fue que este tipo de estructura posee un coeficiente de reflexión,  $K$  elevado, que nunca es inferior a 40 % y que puede aumentar hasta un 90 %.

Varios estudios sobre la distribución del desbordamiento, para estructuras con franco bordos altos fueron resumidos por Van der Meer y Janssen (1994), donde se presentan las fórmulas básicas para la distribución.

### **1.1.3. Modelos de LOICZ**

LOICZ (Interacciones Tierra-Océano en la Zona Costera) <http://www.loicz.org/> es un proyecto creado en 1993 que, en el marco del Programa Internacional Geósfera-Biósfera, pretende detectar a escala regional los cambios que afectan a la zona costera y las consecuencias sobre los ciclos biogeoquímicos globales. Este proyecto ayuda de manera importante a aumentar las bases científicas que permiten ejercer el manejo efectivo sobre las zonas costeras del planeta (Gordon *et al.*, 1996; Dennis, Swaney *et al.*, 2011).

De manera relativamente sencilla LOICZ propone un modelo biogeoquímico que permite estimar los balances de los elementos Carbono, Nitrógeno y Fósforo en la zona costera, lo cual requiere de la recopilación estandarizada de información de los niveles local y regional, permitiendo la comparación entre sistemas acuáticos a escala global. Es un modelo sencillo que requiere de poca información, es práctico y de fácil implementación pues está soportado sobre planillas de MSEXCEL.

El modelo considera los siguientes aspectos:

1. El flujo costero biogeoquímico de elementos primordiales como el Carbono, el Nitrógeno y el fósforo.
2. Los flujos pueden verse afectados como consecuencia de variaciones ambientales.

## 1.2. Justificación e importancia

Construir en Laguna Larga una variante del sistema REALCO, patentado por Alatorre *et al.* (1989), pudiera contribuir de manera significativa a la rehabilitación de este pequeño pero importante cuerpo de agua, si se considera que en su entorno se localizan cuatro de los principales hoteles del destino turístico Jardines del Rey, Cuba, insertado dentro del sitio RAMSAR Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila, espacio geográfico con elevados valores ecológicos. Por otra parte Laguna Larga es sitio de arribo de aves migratorias que provienen de América del Norte durante el invierno y en la misma se reportó una nueva especie de alga epífita para Cuba (Guimaraes *et al.*, 2009).

Para el diseño original del REALCO, se creó un modelo analítico basado en un oleaje monocromático con incidencia normal en la entrada del amplificador, que pronosticaba los valores de desbordamiento y de amplificación de la ola. Los resultados del modelo fueron comparados con los datos de laboratorio, mostrando alta coincidencia (Alatorre *et al.* 2003). Sin embargo, a la hora de efectuar su construcción en un sitio real, resulta imprescindible modelar cuál será la efectividad del uso del mismo, considerando que cada sitio en particular posee condiciones físico geográficas diferentes.

Con el propósito de adecuar el sistema para su implementación práctica en el entorno de Laguna Larga, resulta indispensable conocer cuál será la efectividad en la generación de caudales esperados por el REALCO, ante las características propias del oleaje del sitio y cuál será la repercusión en la disminución forzada del tiempo de intercambio del agua, así como para la condición trófica de la laguna.



## **Objetivo general**

Determinar la efectividad del REALCO en el incremento de la tasa de renovación de agua y con ello la reducción de la eutrofización de un sistema lagunar costero: Laguna Larga, Cayo Coco, Cuba.

### **1.3. Objetivos específicos:**

1. Determinar en la entrada del sistema lagunar el flujo estacional y anual que será entregado por REALCO, de acuerdo con los parámetros de diseño preconcebidos.
2. Estimar a través del uso del modelo LOICZ las tasas de renovación estacional del agua en la laguna, a partir de los flujos estacionales aportados por el REALCO.
3. Evaluar los efectos del REALCO sobre las concentraciones de nutrientes y la condición trófica de las distintas partes de la laguna.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Ubicación geográfica y caracterización morfo-estructural del entorno de Laguna Larga Cayo Coco. Cuba

Laguna Larga se localiza en la costa norte y central de Cayo Coco, islote perteneciente al Archipiélago Sabana-Camagüey, norte de Cuba, específicamente entre los meridianos  $78^{\circ}21'18''$  y  $78^{\circ}22'47''$ . Por el Norte limita con Playa Larga, colindante con el Canal Viejo de las Bahamas; por el Este con la Unidad turística las Coloradas; por Oeste con Punta Rasa y por el Sur con el desarrollo hotelero perteneciente a la Unidad turística Palma Real. Laguna larga es de configuración alargada y estrecha con un área total de  $0.22 \text{ km}^2$ , subdivide desde el punto de vista morfológico en tres sectores, diferenciados por su forma y tipo de intercambio entre ellos. Posee una única salida de intercambio con el mar en su extremo oriental constituida por un canal de mareas de aproximadamente 6 m de ancho en su sección más estrecha (Fig. 1).

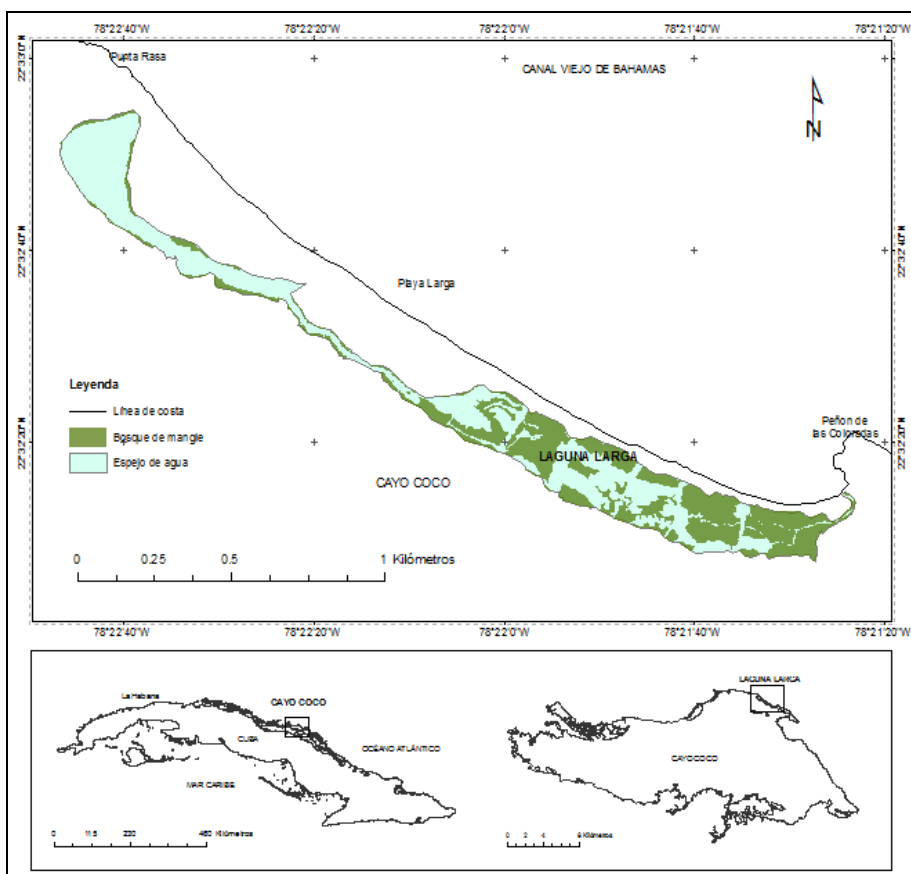


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

El entorno de Laguna Larga se encuentra ubicado en un área acumulativa de depósitos contemporáneos del Holoceno, conformados en su parte más al norte por sedimentos arenosos de origen biogénico que poseen un espesor que alcanza más de 4 m, mientras que dentro de la laguna, los depósitos son palustres.

Los sedimentos arenosos de la duna y la playa se encuentran dispuestos en forma de barra y, de conjunto con los sedimentos palustres, sobreyacen de manera discordante a las rocas de la formación Jaimanitas, conformadas principalmente por carbonatos del Pleistoceno medio-superior (calcarenitas y biocalcarenitas), que afloran precisamente en el sitio seleccionado para la construcción del Sistema REALCO (Punta Rasa).

En la zona existen evidencias de movimientos tectónicos de edad superior a las rocas de la formación Jaimanitas, que se ubican a 1 km aproximadamente al sur de la línea de costa, con una dirección NW-SE; sin embargo, no se han realizado estudios en el sitio que hagan evidente la presencia de algún tipo de falla geológica, no obstante, se puede afirmar que de forma general la región no constituye una zona de riesgo sísmico.

## **2.2. Estrategia de investigación**

Con vistas a hacer más comprensibles los resultados del trabajo se crearon dos escenarios de modelación a través de LOICZ: el primero relacionado con el *statu quo* de la laguna en el año 2008, y el segundo con las modificaciones que debe sufrir la laguna ante la incorporación de flujos de agua, con características oceánicas, captados por el sistema REALCO. Para hacer efectivo este proceso se siguieron los pasos descritos a continuación:

### **1. Validación del uso del modelo biogeoquímico a través de LOICZ:**

- Ejecución del modelo usando los parámetros correspondientes al año 2008 colectados por González-De Zayas *et al.* (2013), a fin de asegurar el correcto funcionamiento del mismo.
- Revisión y mejoramiento de las entradas de parámetros físico-químicos requeridas por el modelo LOICZ.

2. Estimación de los caudales generados por el REALCO de acuerdo con los parámetros de diseño preconcebidos:
  - Determinación de los parámetros estadísticos de la altura y período del oleaje medido *in situ*.
  - Cálculo de los caudales y selección de valores representativos en correspondencia con las subdivisiones temporales preestablecidas para las entradas al modelo LOICZ.
3. Predicción de los cambios que sufrirá el sistema por períodos de tiempo, a partir de la incorporación del REALCO (determinación de la efectividad).
  - Cálculo de los balances estacionales de agua, sal y biogeoquímicos (N y P) sobre la base de la entrada al sistema de flujos de agua con parámetros oceánicos estimados para la implementación del REALCO.

### 2.3. Muestreo y trabajo de laboratorio

Para la validación del uso del modelo LOICZ se utilizaron los resultados obtenidos por González-De Zayas *et al.* (2013), realizados bimensualmente durante el año 2008, en 12 estaciones de trabajo a modo de hacer comparables los resultados a partir del uso del REALCO (Fig. 2).

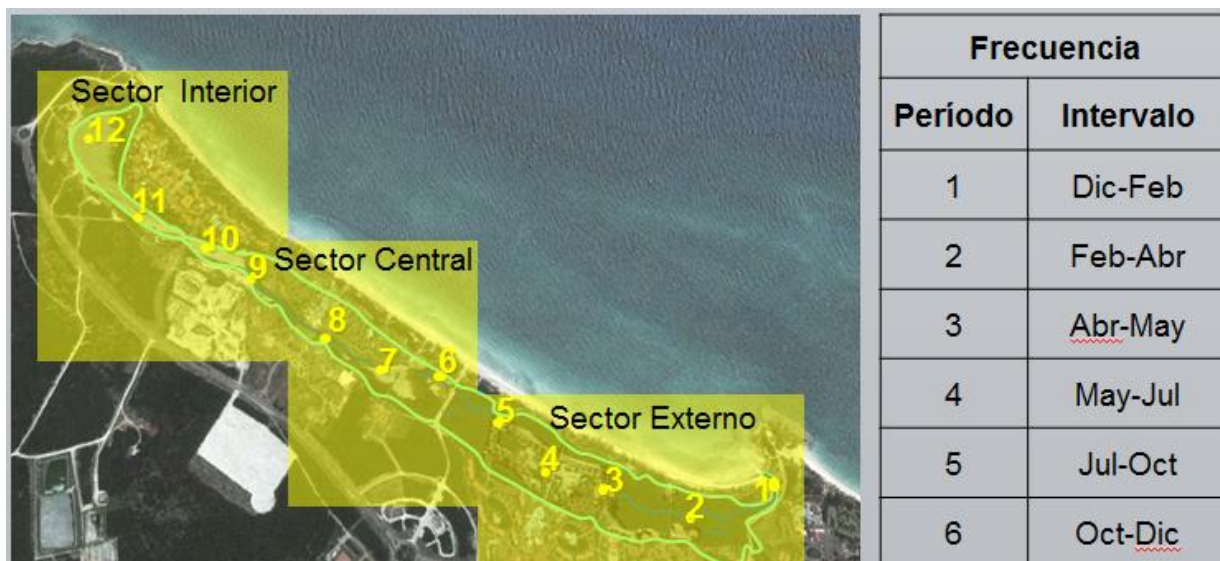


Figura 2. Estaciones de muestreo y períodos medidos.

Los valores de la temperatura y la salinidad se determinaron *in situ* con un salinómetro digital de WLW (precisión de 0.1 para ambos parámetros), calibrado previamente en el laboratorio.

La determinación del oxígeno disuelto (OD), nitrógeno total (TN) y fósforo total (PT) fue realizada en el laboratorio. Para el análisis de la OD se tomaron tres réplicas en cada sitio de muestreo, teniendo especial cuidado de evitar la generación de burbujas hasta la fijación de la muestra. Las muestras de agua para nutrientes disueltos se filtraron a través de un filtro de 0.22 micras (Millipore™ HA), se fijaron con cloroformo y se congelaron en botellas de polietileno hasta su análisis. No se filtraron muestras para TN y TP. El OD se determinó por el método de titulación Winkler en tres submuestras para cada muestra fijada en el campo.

Los nutrientes disueltos se analizaron mediante un autoanalizador de flujo Skalar San Plus segmentado, utilizando los métodos estándar adaptados por Grasshoff *et al.* (1983) y los circuitos sugeridos por Kirkwood (1994). La precisión del análisis con este sistema fue: 0.1 M de nitrato, nitrito 0.02 M, amoníaco 0.1 M y fósforo reactivo soluble (SRP) 0.04 M, TN y TP fueron analizados como nitrato y SRP después de la oxidación de persulfato de alta temperatura según de Valderrama (1981). Orgánica N y P se calcularon como la diferencia entre las fracciones totales y nutrientes.

#### **2.4. Topografía y batimetría**

Para la obtención de la batimetría correspondiente a la parte del área de trabajo se realizó un levantamiento batimétrico escala de 1: 500 solicitado durante el 2012 a la Empresa de Estudios Marinos (Geocuba). Para el interior de la laguna se utilizaron los datos del levantamiento 1: 2 500, realizado durante el 2008, por el Centro de Estudios ambientales de Villa Clara, Cuba. Todos los datos fueron posteriormente procesados de conjunto con la topografía del área con Surfer v. 11.0 y ArcGis 9.3 para obtener el mapa topobatimétrico del área.

## 2.5. Viento

La velocidad y dirección del viento fueron tomadas de los registros de la estación meteorológica 339 perteneciente a la Red Cubana, localizada *in situ* (50 m de la laguna) para el período 1992-2008.

Para la clasificación de los frentes fríos se empleó la metodología aplicada por el Centro Nacional de Pronósticos del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET).

- Débiles: vientos con velocidades inferiores a los 35 km/h.
- Moderados: vientos con velocidades que oscilan entre 36 y 55 km/h.
- Fuertes: cuando los vientos alcanzan velocidades superiores a los 55 km/h.

## 2.6. Régimen de marea

Los datos históricos de nivel del mar fueron obtenidos de un mareógrafo instalado por la Empresa Estudios Marinos (Geocuba), en el puerto de Casasa, localizado a 4 km al sudoeste del extremo oriental de Laguna Larga. Además se realizó un análisis de las gráficas generadas por el programa Xtide 32 para el intervalo ago/2011 – ago/2012. Por otra parte fue posible contar con mediciones relativas al nivel del mar entre el mes de agosto de 2011 y agosto 2012, por un sensor de presión Hobo U-Series Data Loggers, instalado en el área de trabajo, específicamente en la base de la estación CIEC/WTR9.

## 2.7. Régimen de oleaje

La altura del oleaje fue obtenida de los registros de la estación CIEC/WTR9, localizada en la coordenada (769508,585; 307825,161) con sensores WTR 9 Aanderaa, ubicado a una profundidad 3.40 m, desde el 11 de julio de 2011 hasta el 16 de junio de 2012. Para los registros de los datos se utilizó la mayor precisión permitida por el sensor (mediciones cada 30 minutos).

La estación CIEC/WTR9, está conformada por sensores de presión que sólo miden los parámetros relacionados con el nivel del mar, la altura de la ola y su período, por lo

cual no es posible obtener registros direccionales del oleaje. Por tal motivo, para el cálculo del oleaje de ruptura se seleccionaron los rumbos del viento, que inciden directamente sobre la franja costera en la que se prevé la instalación del sistema REALCO, calculados a partir de las velocidades desde 5 km/h hasta vientos con fuerza de huracán.

Para determinar el comportamiento de la altura y el período del oleaje, se realizó una distribución de la frecuencia acumulada para ambos parámetros y se calcularon los siguientes estadígrafos:

- Media.
- Error Típico.
- Mediana
- Moda.
- Desviación Estándar.
- Varianza.
- Valor mínimo.
- Valor máximo.

## 2.8. Sobreelevación del nivel del mar

La sobreelevación del nivel del mar por influencia meteorológica se estimó por la sumatoria de las diferentes componentes que provocan sobreelevación, Viento ( $S_v$ ), oleaje ( $S_o$ ), marea ( $S_A$ ) y presión atmosférica ( $S_p$ ). La sobreelevación total ( $S_t$ ) =  $S_v + S_o + S_p + S_A$ .

El efecto del viento ( $S_v$ , *windsetup*) se obtuvo de la siguiente ecuación.

$$S_v = 5.96 \times 10^{-2} \frac{C_d \cdot V^2 \cdot F}{D}$$

Donde:

- $C_d$  coeficiente de resistencia  $C_d = 0.001 (0.63 + 0.066 V)$ .  
 $V$  velocidad del viento (m/s).  
 $F$  fetch (km).  
 $D$  profundidad media sobre el fetch (m).

El efecto del Oleaje ( $S_o$ , *wave setup*) se obtuvo de la siguiente ecuación.

$$S_o = 0.19 \left[ 1 - 2.82 \left( \frac{Hr}{gT^2} \right)^{1/2} \right] Hr$$

Donde:

$Hr$  altura de la ola en rotura (m). Calculado según modelo de Dally et al. (1985).

$T$  período del oleaje (s).

$g$  aceleración de la gravedad (m).

EL efecto de la presión atmosférica ( $S_p$ ) se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$S_p = \Delta Pa \times 10^{-2}$$

Donde:

$S_p$  sobreelevación por presión atmosférica (m)

$\Delta Pa$  variación de la presión atmosférica (m)

Siendo:

$$\Delta Pa = P_{med} - P_{mín}$$

Donde:

$P_{med}$  Presión atmosférica media para la zona (1015 mb).

$P_{mín}$  Presión mínima registrada para la zona (985 mb).

El efecto de la marea ( $SA$ ) se obtuvo asumiendo el valor medio de amplitudes máximas promedio registrado para la zona.

## 2.9. Cálculo de caudales entregados por el REALCO

Los valores de caudales fueron calculados para la siguiente configuración de la estructura del REALCO:  $h_o=0.8$  m (profundidad al pie de la estructura);  $b_o=6.0$  m (ancho del amplificador en su base);  $b=3.0$  m (ancho del amplificador en el francobordo) y  $F=0.4$ m (altura del francobordo). (Fig. 3).



$$C = \frac{2b_f\eta}{T} \left[ \frac{g}{h_0} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \eta \left[ \frac{\left( t_1 + \frac{T}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t_1\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T}t_1\right) \right)}{2} \right] - \frac{TF}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t_1\right) \right]$$

Donde la superficie libre se calculó como:

$$\eta = A_i \frac{J_1(2\varepsilon(lX)^{1/2})}{J_1(2\varepsilon l/\pi)} \left[ \left( \frac{l}{X} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cos(\omega t + \varepsilon)$$

$T$  Período de ola.

$g$  Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

$l$  Longitud total desde la boca hasta la unión virtual de las paredes laterales.

$X$  Distancia real en línea recta desde la boca hasta el francobordo.

$J_1$  Función de Bessel.

$\varepsilon$  Fase

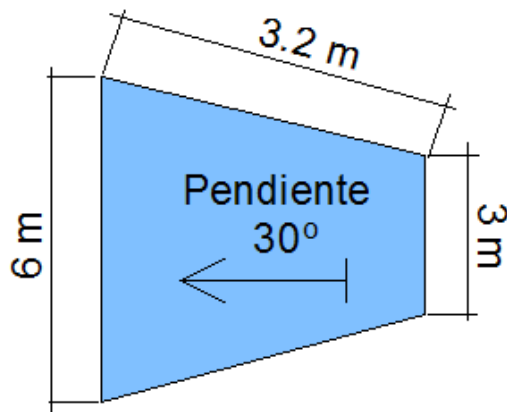


Figura 3. Configuración de la estructura del REALCO usada para los cálculos de caudal.

Para el cálculo de los caudales por períodos, se hicieron corresponder los períodos muestreados por González-De Zayas *et al.* (2013) para el año 2008 y los datos de oleaje medidos *in situ* durante el período 11/7/2011 - 16/6/2012 (Tabla 1).

Tabla 1. Correspondencia asumida entre los datos tomados por González-De Zayas *et al.* (2013) para el año 2008 y los datos de oleaje medidos durante el período 11/7/2011 - 16/6/2012.

Datos para balance LOICZ González-De Zayas <i>et al.</i> (2013)		Correspondencia asumida con oleaje medido <i>in situ</i>		Total de días	No. datos
Período	Intervalo	Inicio	Fin		
1	Dic-Feb	01/01/2012	02/29/2012	68.00	2819
2	Feb-Abr	01/03/2012	30/04/2012	63.00	641
3	Abr-May	01/05/2012	31/05/2012	28.00	1082
4	May-Jul	01/06/2011	31/07/2011	57.00	982
5	Jul-Oct	01/08/2011	31/10/2011	89.00	4303
6	Oct-Dic	01/11/2011	31/12/2011	60.00	2866

Posteriormente se eliminaron las combinaciones de altura y período de olas para las cuales el modelo de cálculo de caudal produjo valores menores a  $0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Para mayor confiabilidad de los resultados y con vistas a eliminar otros datos que pudieran resultar aberrantes, los cálculos de caudal se limitaron al 98% de las alturas de las olas de mayor frecuencia acumulada (menores que 1.6 m), correspondientes a 13,220 datos de un universo de 13,428 datos.

De acuerdo con la distribución de los caudales medidos a lo largo del año se tomaron los valores promedios de Q en cada período para los cálculos balance de agua, según LOICZ en correspondencia con el escenario 2 (con caudales del REALCO).

## 2.10. Balance de masa

La evaluación del metabolismo neto del sistema se realizó mediante la utilización del modelo numérico de balance de masa (Gordon *et al.* 1996). La conservación de la masa es el principio fundamental. El resultado es un modelo que estequiométricamente enlaza el balance agua-sal-nutrientes y proporciona información sobre el balance hidráulico-salino del sistema, los flujos de nitrógeno-fósforo y su relación estequiométrica para llegar a conocer el metabolismo neto del sistema.

## 2.11. Balance hidráulico

Establece el balance entre todas las entradas y salidas de agua al sistema costero. Debe haber un volumen de entrada o salida para compensar las pérdidas o ganancias de agua del sistema (Fig. 4). Si se asume que el cambio del volumen de agua en el sistema con el tiempo es constante  $dv/dt = 0$ , entonces el volumen de agua puede ser estimado por la diferencia entre las entradas y salidas. Esto se conoce como volumen residual o flujo residual:

(Vr):  $dv/dt = Vq + Vp + Vg + Vo + Ve + Vr$ , si  $dv/dt = 0$ , entonces

$$Vr = -Vq - Vp - Vg - Vo - Ve,$$

donde:

Vq es el aporte por ríos,

Vp es la precipitación pluvial,

Vg aguas subterráneas,

Vo efluentes de las instalaciones del entorno

Ve las pérdidas por evaporación.

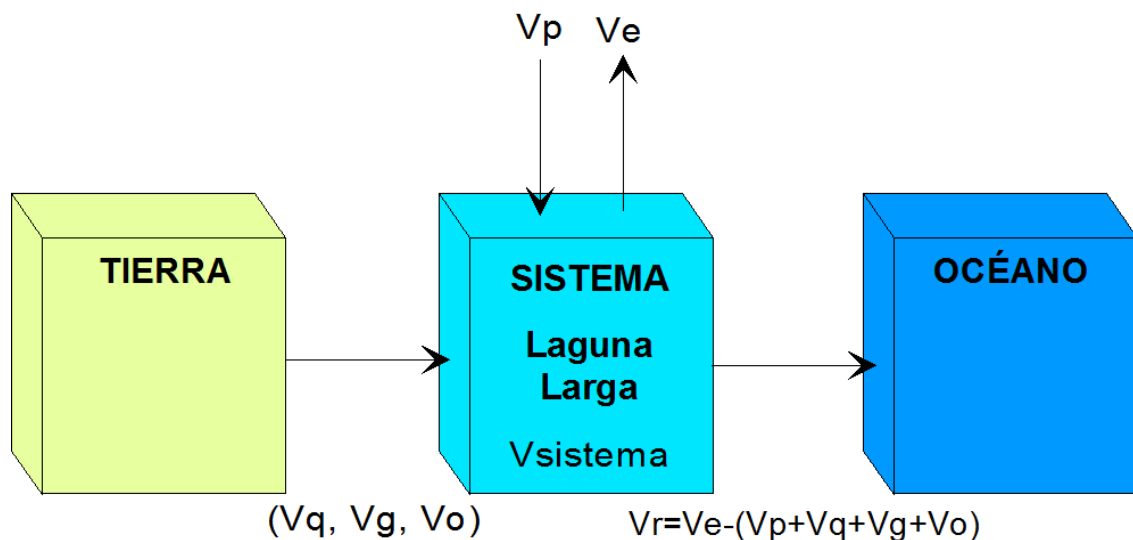


Figura 4. Balance hidráulico (modelo LOICZ)

## 2.12. Balance de sal

Se parte de que la sal se conserva en el sistema ( $dVS/dt = 0$ ). La salinidad residual sería entonces el promedio de la salinidad de la laguna y de la playa adyacente ( $S_r = (S_{\text{Sist.}} + S_{\text{Sist. ady.}}) / 2$ ), la cual al ser multiplicada por volumen residual ( $S_r \cdot V_r$ ) resulta en el volumen de agua que debería compartirse con la playa adyacente para alcanzar el equilibrio salino del sistema (volumen de mezcla:  $V_x$ ). Sin embargo, en adición al flujo residual existen flujos a través de la frontera entre el sistema y el sistema adyacente debido a mareas, corrientes y vientos, este volumen se calcula a través del gradiente de salinidad que existe entre los sistemas de la manera siguiente: Los aportes externos con distintas salinidades  $V_o S_o + V_p S_p + V_q S_q + V_g S_g + V_e S_e + V_r S_r$  se mezclan en el sistema, de manera que  $dVS/dt = V_o S_o + V_p S_p + V_q S_q + V_g S_g + V_e S_e + V_r S_r + V_{\text{entrada}} S_{\text{sist. ady.}} + V_{\text{salida}} S_{\text{sist.}}$ , donde  $V_{\text{entrada}}$  es el volumen de agua que entra al sistema y  $V_{\text{salida}}$  el volumen que sale del sistema, de tal manera que  $V_{\text{entrada}} + V_{\text{salida}} = V_x$ . Despejando  $V_x$  la ecuación se arregla de la manera siguiente  $V_x = (-V_o S_o - V_p S_p - V_q S_q - V_g S_g - V_e S_e - V_r S_r) / (S_{\text{sist. ady.}} - S_{\text{sist.}})$  (Fig. 5).

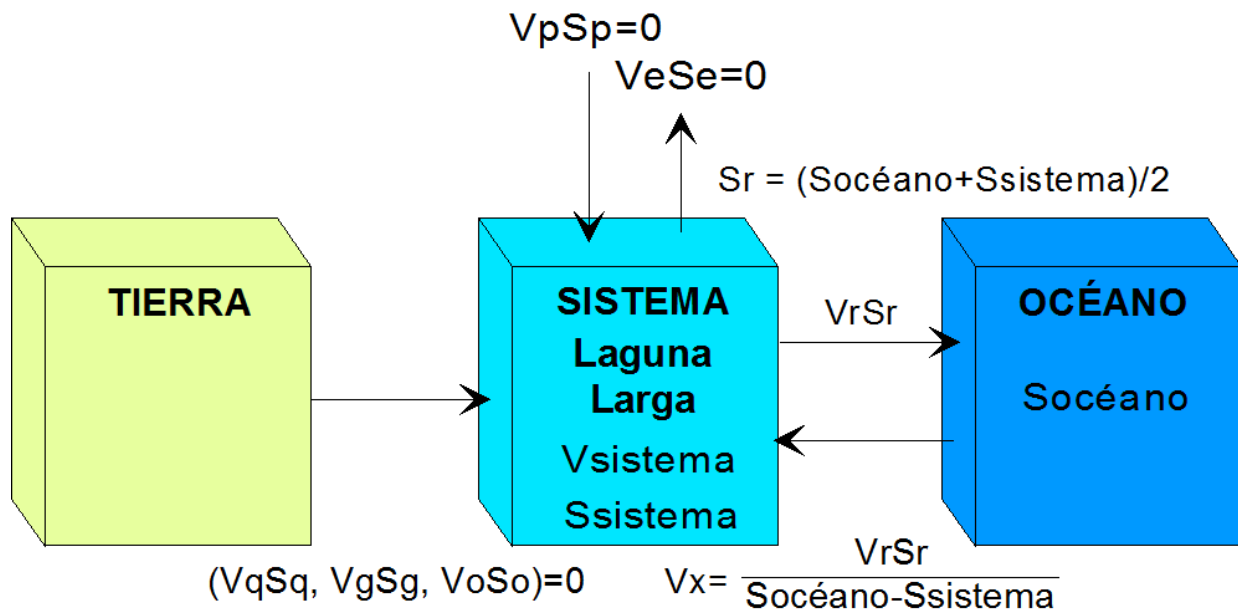


Figura 5. Balance de sal (modelo LOICZ).

### 2.13. Tiempo de intercambio de agua

Finalmente el tiempo de intercambio de agua en el sistema es:  $TI = V_{sist.}/(V_x+V_r)$ , donde  $V_{sist.}$ : Volumen total del sistema.

### 2.14. Enfoque del modelo biogeoquímico

Los flujos biogeoquímicos de N y P en la laguna se evaluaron a través del modelo LOICZ, un modelo de caja de estado estable que enlaza estequiométricamente el balance de agua, sal, y los nutrientes (Gordon *et al.* 1996), (Fig. 6). Detalles de la modelización y la derivación del balance de carbono se encuentran en sitio web LOICZ (<http://www.loicz.org/>) y en Smith y Hollibaugh (1997). Para aplicar el modelo LOICZ, Laguna Larga se dividió en tres secciones relativamente aisladas (Fig. 2), como se evidencia por la morfología y la distribución de la salinidad.

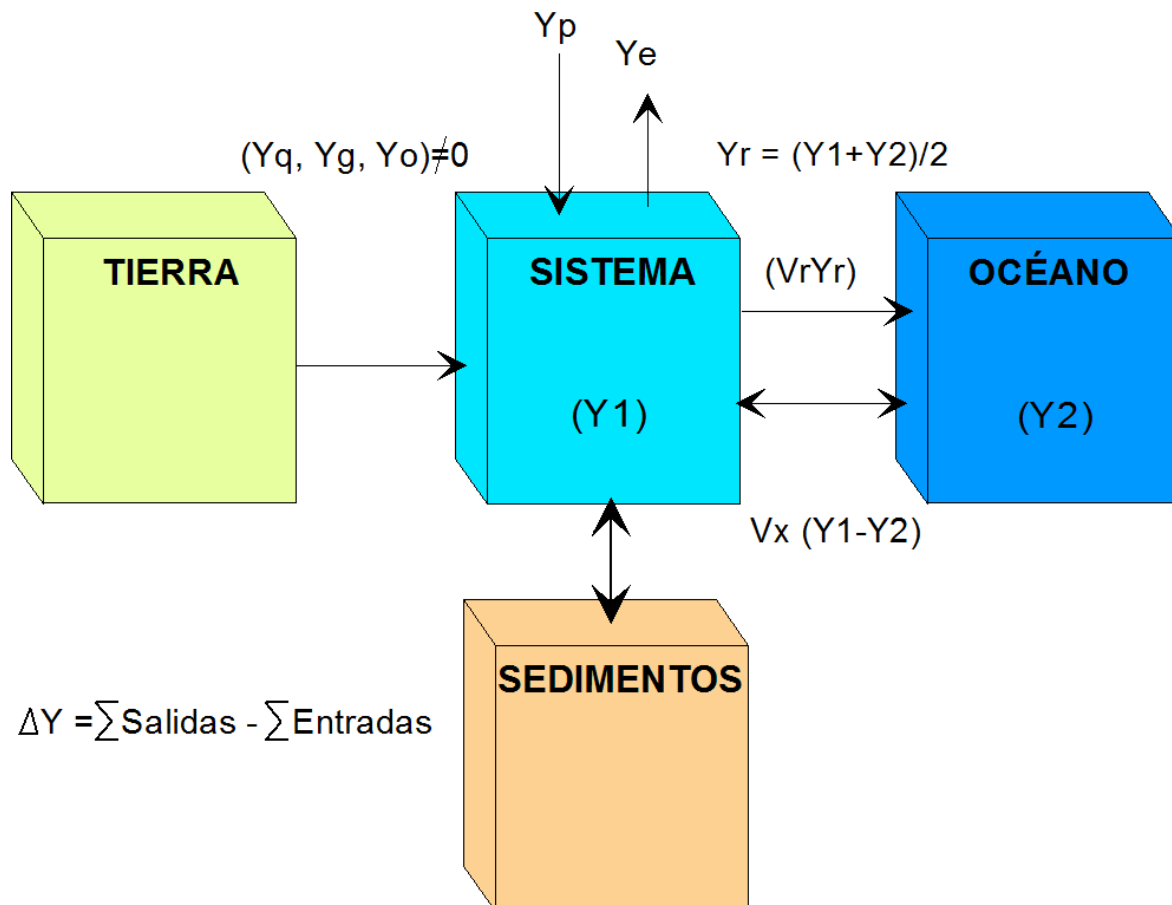


Figura 6. Esquema del Balance de N y P representado por el elemento (Y), tomando en consideración que el aporte o salida interna neta dentro del sistema ( $\Delta Y$ ) conserva Y.

Para el metabolismo neto (Producción - Respiración) los cálculos se basan en estequiometría simple, suponiendo una razón del coeficiente de Redfield C:N:P (106:16:1), resultando en: Metabolismo Neto =  $-106 \times \Delta\text{DIP}$ , mientras que la Fijación de Nitrógeno – denitrificación como  $n_{\text{fix-denit}} = \Delta\text{DIN}_{\text{obs}} - 16 \times \Delta\text{DIP}$ .

## 2.15. Parámetros de entrada al modelo (aportes y salidas de agua)

**Volumen de precipitación:** fue calculado multiplicando la precipitación de cada período entre muestreos ( $\text{m}^3\text{d}^{-1}$ ) por el área de cada sección. Los datos de lluvia utilizados fueron medidos en la estación meteorológica 339 de la Red Cubana de Estaciones Meteorológicas localizada en Cayo Coco, a 50 m de Laguna Larga.

**Volumen de escorrentía:** se calculó siguiendo Schreiber (1904), tomando en consideración las áreas que drenan hacia la laguna y los promedios mensuales de precipitación y temperatura reportados por la estación meteorológica 339.

**Volumen de evaporación:** se calculó multiplicando la evaporación por cada área de la sección. La evaporación se calculó utilizando el método de Turc (Xu y Singh 2000), que combina la máxima radiación posible por mes y latitud, la insolación promedio mensual y media mensual temperatura.

**Volumen de aguas subterráneas:** esta entrada fue utilizada para los flujos de entrada que aporta el REALCO, pero usando los parámetros de agua oceánica correspondientes al momento de las mediciones.

**Volumen de aguas residuales:** fue evaluado por la medición directa de los flujos de aguas residuales en los cinco puntos de descarga hacia la laguna detectados en los hoteles Senador y Tryp. El monitoreo se realizó de 2 - 4 horas durante 24 h en las condiciones de baja turística (septiembre) y alta ocupación (febrero).

**Entradas de N y P:** se calcularon multiplicando TN y TP por el volumen de agua de cada fuente para cada período entre muestreos. Las muestras de agua para el análisis

de TN, TP, y los nutrientes se obtuvieron de cada una de las fuentes de agua cada dos meses o cuando fue posible.

## 2.16. Cálculo de la dilución del fósforo en el sistema

Para el cálculo de la dilución del fósforo, una vez que se presentan los flujos del REALCO con valores de concentración de fósforo oceánico, se consideró la siguiente ecuación:

$$[P_{fin}] = \frac{\overbrace{([P_{ini}] \times (V_{lag} - Q))}^{\text{Masa que quedó}} + \overbrace{([P_{oce}] \times Q)}^{\text{Masa nueva}}}{\underbrace{V_{lag}}_{\text{Vol. de agua vieja}}}$$

Donde:

- [P<sub>fin</sub>] Concentración final de fósforo en la laguna
- [P<sub>ini</sub>] Concentración inicial de fósforo en la laguna
- [P<sub>oce</sub>] Concentración de fósforo en el océano
- V<sub>lag</sub> Volumen total de la laguna
- Q Caudal aportado por el REALCO

## 2.17. Difusión del flujo de fósforo a través de la interfase sedimentos-agua

Para la estimación de la difusión de fósforo se utilizó el basamento teórico de la primera ley de Fick (Xiangju Cheng *et.al.* 2014), considerando una capa límite de sedimentos de 1 cm espesor.

$$F = \varphi_0 D_s \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0}$$

Donde:  $F$  Flujo de difusión

$\varphi_0$  Porosidad en la superficie del sedimento = 0.37 (sedimento limo-arenoso)

$D_s$  Coeficiente de difusión molecular = 0.00006048 (m<sup>2</sup>d<sup>-1</sup>)

$Z$  Profundidad = 0.01 m

$C$  Concentración de fósforo

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Topografía y batimetría

El levantamiento batimétrico de la zona marina adyacente a Laguna Larga mostró un fondo regular conformado principalmente por arena biogénica que se dispone en los primeros 100 m paralelos a la línea de costa. Bordea el pasto marino de *Thalassia testudinum* en un límite superior que como promedio se encontró a 2.40 m de profundidad. Posteriormente, apareció un fondo rocoso regular que se extiende hasta la profundidad máxima alcanzada por el levantamiento (12 m), aproximadamente a 600 m de la línea de costa. En el área marina contigua a Punta Rasa, sitio destinado para la construcción del REALCO, oeste de Laguna Larga, la pendiente marina resultó ligeramente más inclinada alcanzando la profundidad de 12 m a 300 m de la línea de costa (Fig. 7).

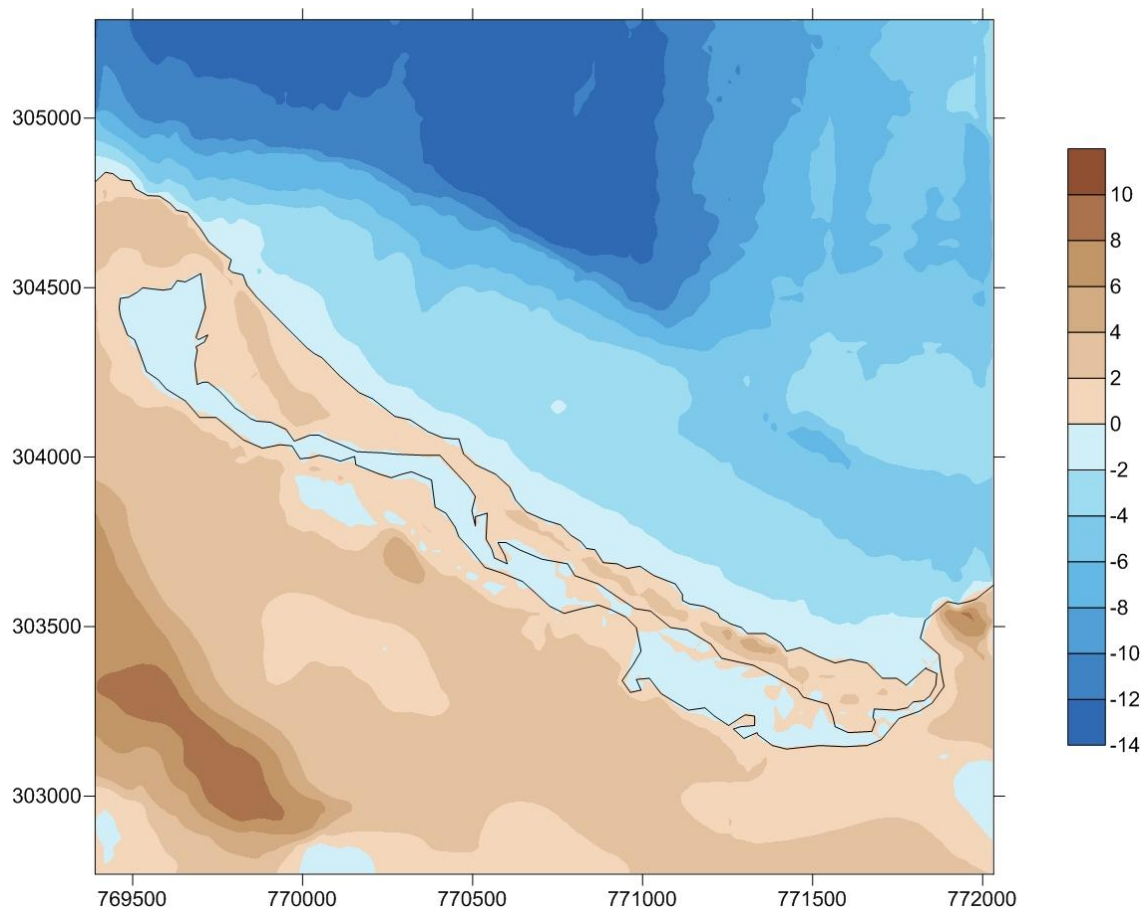


Figura 7. Mapa topobatimétrico del entorno de Laguna Larga.



La topografía del entorno de Laguna Larga quedó conformada por un relieve bajo con alturas que no superaron los 10 m, que generan una red de drenaje superficial baja con pendientes máximas de 9.5 grados, localizadas al sudoeste de la laguna (Fig. 8).

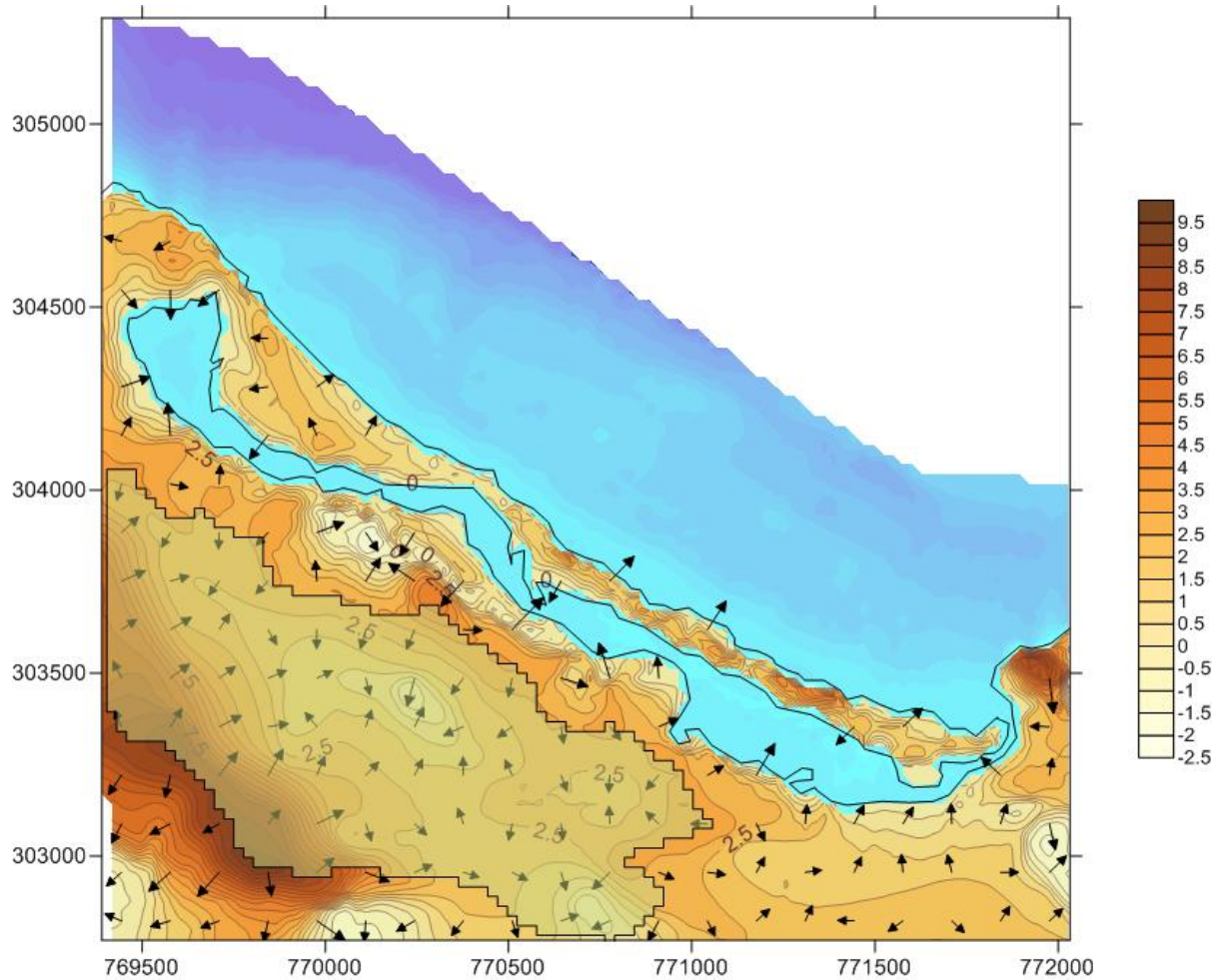


Figura 8. Plano de drenaje del entorno de Laguna Larga.

Dentro de la laguna la batimetría mostró que las profundidades máximas se alcanzan en el sector más occidental (interno) con valores de hasta 1.3 m. El sector central de la laguna conforma la zona más baja del sistema con profundidades máximas de 0.4 m, mientras que la parte oriental posee profundidades de hasta 1 m (Fig. 9).

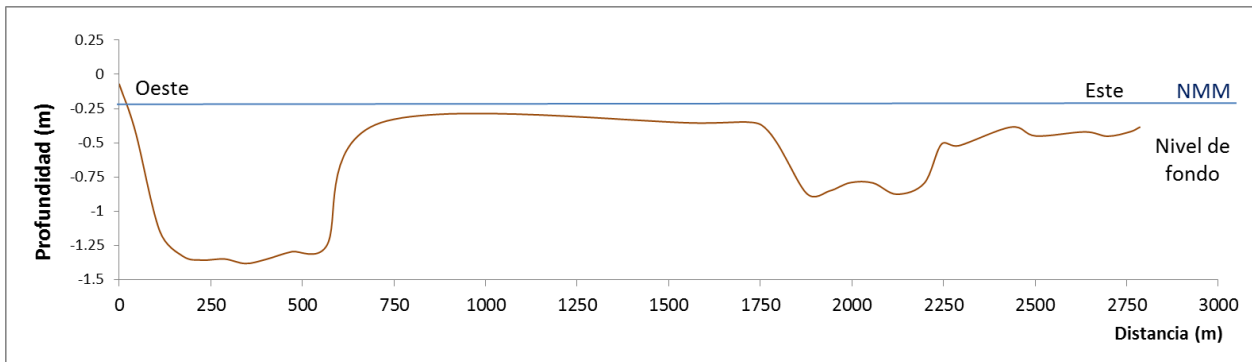


Figura 9. Perfil batimétrico de Laguna Larga.

### 3.2. Régimen de viento

El porcentaje de ocurrencia de los vientos para 16 rumbos mostró que las direcciones predominantes de los vientos fueron el Este (32.5%), Estenordeste (15 %), Estesudeste (10.5 %) y el Nordeste (8 %), sumando entre esas direcciones el 56 % de la incidencia anual (Fig. 10).

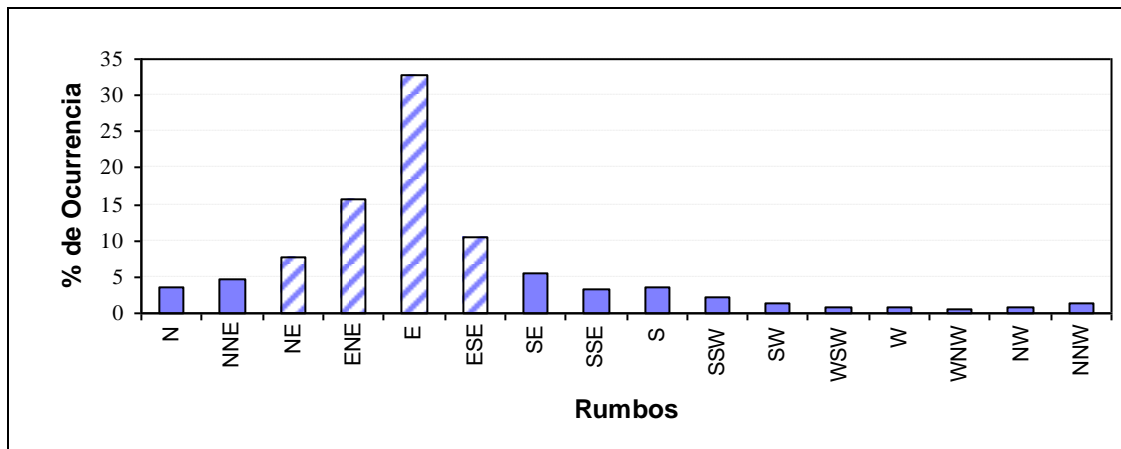


Figura 10. Porcentaje de ocurrencia del viento para 16 rumbos (2000-2008). Las direcciones con trama representan el viento habitual.

La distribución de las velocidades medias del viento mostró que las máximas registradas se alcanzan durante los meses invernales (noviembre a marzo) con valores máximos de 13.8 km/h, mientras que los valores mínimos de la velocidad media se obtuvieron para los meses de junio a agosto. (Fig. 11).



Figura 11. Distribución anual de la velocidad media del viento en Cayo Coco. Período: 1992-2008. Estación Meteorológica CIEC.

### 3.3. Régimen de marea

Las observaciones realizadas mostraron una relación entre las ondas principales diurnas  $O1 + k1$  y la onda principal lunar  $M2$ , que permitió clasificarla como marea de tipo sinódica, consistente con una marea semidiurna regular, según Dubanin (1960), con dos pleamares y dos bajamares diarias (Fig.12); con variaciones de amplitud en un período de 15 días.

Los mayores valores ocurrieron durante el período de sicigia (luna nueva – luna llena), originando amplitudes máximas promedio de 74 cm, mientras que los menores ocurrieron durante los períodos de cuadratura (cuartos crecientes y menguantes), con amplitudes mínimas de 38 cm. La amplitud media de la marea para la zona fue de 56 cm y la máxima extrema entre el valor máximo y mínimo observado fue de 87 cm. El vaciante promedio tuvo una duración de 6h 06m, mientras que el llenante fue de 6h 19m.

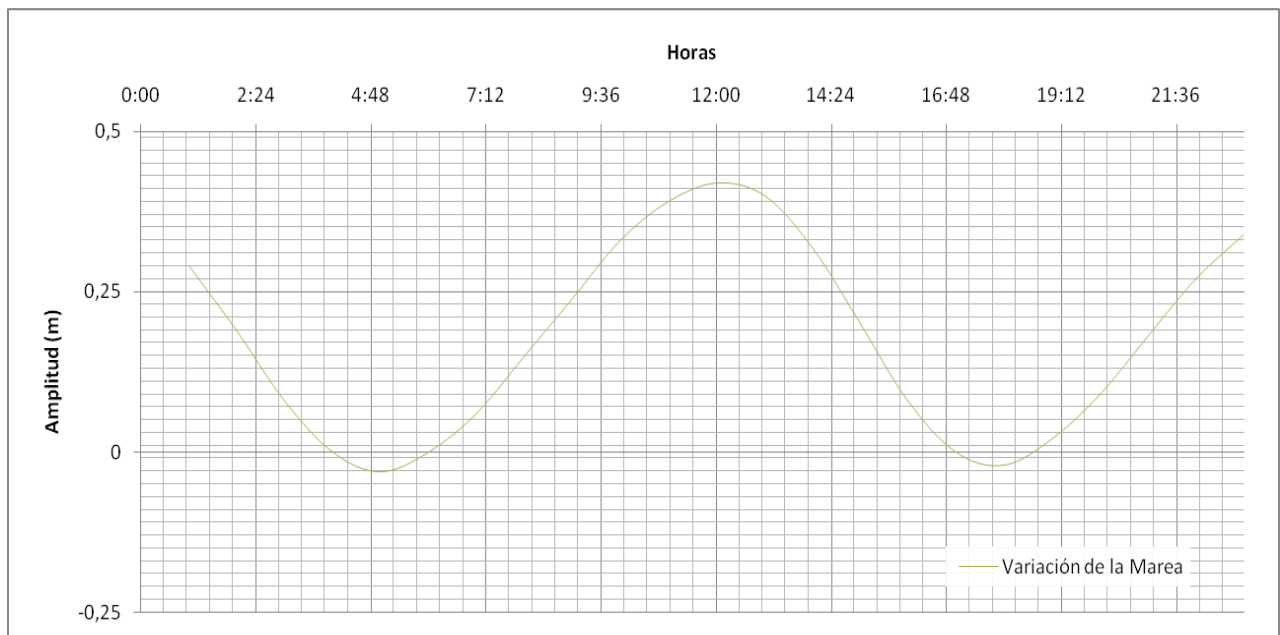


Figura 12. Evolución teórica de las oscilaciones del mar durante 24 horas.

A partir de los datos históricos recopilados, se pudo observar que a lo largo de todo el borde exterior central de la plataforma del Archipiélago Sabana Camagüey, fundamentalmente en el área comprendida entre el canal de San Nicolás y el Canal Viejo de las Bahamas, el carácter de las mareas fue semidiurno regular, lo que coincide con los patrones obtenidos en el lugar.

Las amplitudes máximas medias, para un año de intervalo (ago/2011 – ago/2012), fueron del orden de los 0.51 m, como se aprecia en un gráfico elaborado a partir de los datos obtenidos del software Xtide 32 (Fig. 13).

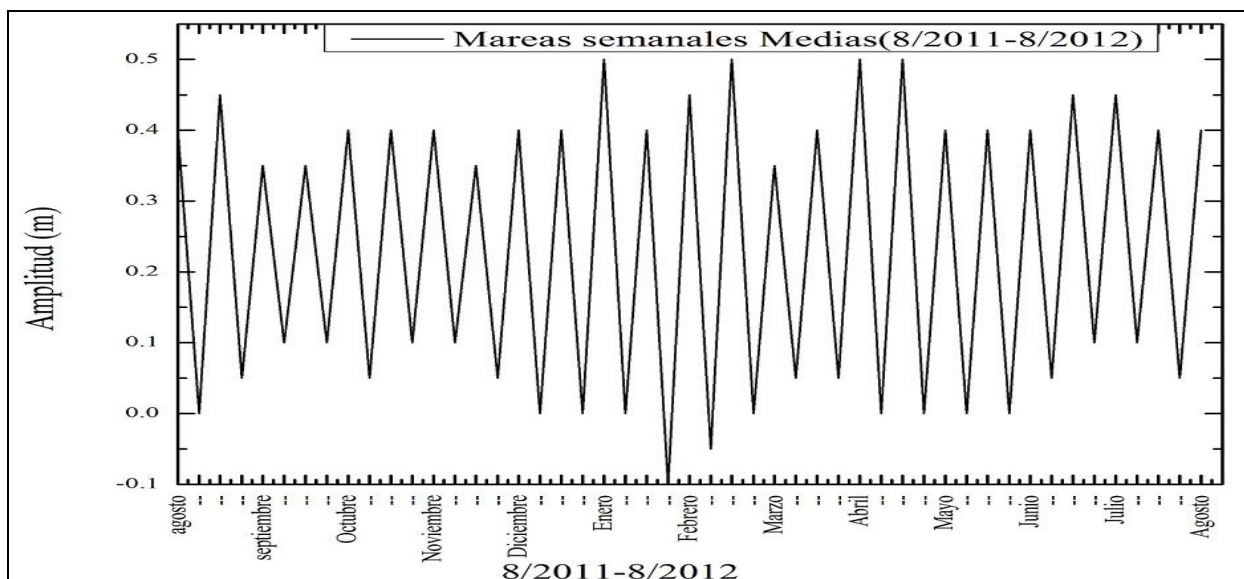


Figura 13. Evolución de las oscilaciones del mar (ago/2011 - ago/2012). Los datos para la confección de la gráfica fueron obtenidos del software XTide 32 Versión 4.7, usando como referencia la estación mareográfica de la Entrada de la Bahía de Nuevitas, provincia de Camagüey, Cuba.

Además de la información histórica, se contó con mediciones relativas al nivel del mar entre el mes de agosto de 2011 y agosto 2012, obtenidas mediante un sensor de presión Hobo U-Series Data Loggers, instalado por el CIEC al norte de Cayo Coco. La variación máxima anual medida durante este período fue de 1.0 m (Fig. 14).

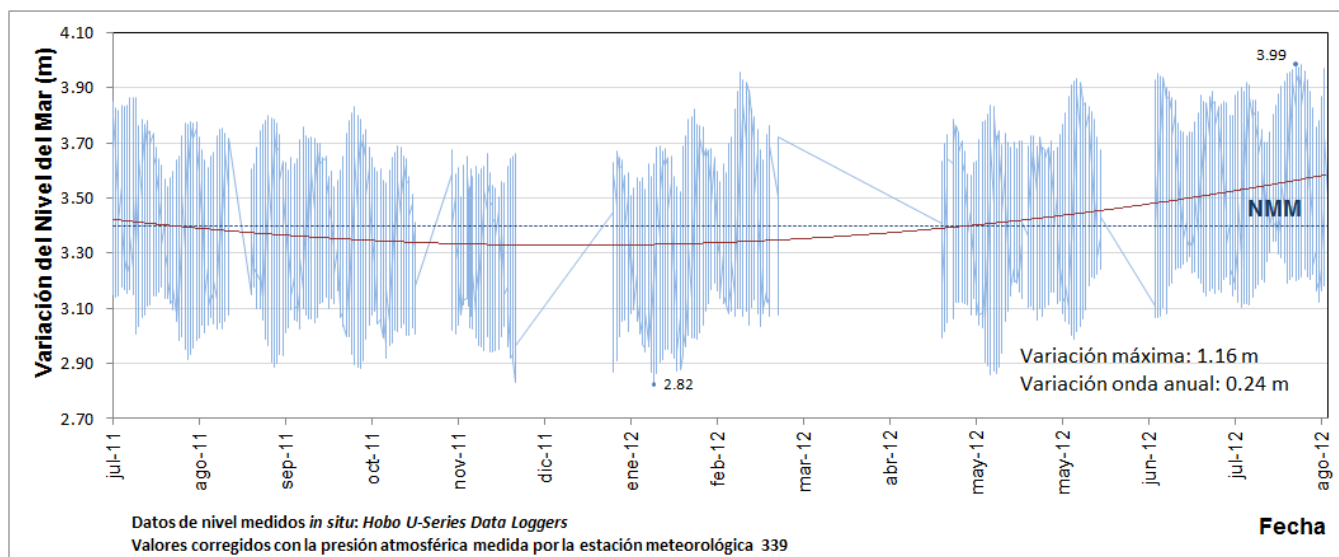


Figura 14. Evolución de las oscilaciones del mar medidas *in situ* en el período 11/7/2011 – 31/8/2012.

### 3.4. Sobreelevación del nivel del mar

La sobreelevación del nivel del mar por influencia meteorológica en el área de estudio, se calculó como la sumatoria de las diferentes componentes que la provocan, viento ( $S_v$ ), oleaje ( $S_o$ ), marea ( $SA$ ) y presión atmosférica ( $S_p$ ), que a continuación se detallan:

*Efecto del viento* ( $S_v$ , “windsetup”) (Tabla 2).

$$S_v = 5.96 \times 10^{-2} \frac{C_d \cdot V^2 \cdot F}{D}$$

Donde:

- $C_d$  coeficiente de resistencia  $C_d = 0.001 (0.63 + 0.066 V)$ .
- $V$  velocidad del viento (m/s).
- $F$  fetch (km).
- $D$  profundidad media sobre el fetch (m).

Tabla 2. Sobreelevación del nivel del mar por efecto de los vientos.

Rumbos	$V$ (m/s)	$C_d$	Wind setup (m)
N	4.67	0.000938	0.001
NNE	4.50	0.000927	0.001
NE	4.28	0.00091233	0.0005
ENE	4.72	0.00094167	0.001
E	4.73	0.00094367	0.001
NNW	4.36	0.00091783	0.001
NW	3.64	0.00087017	0.00009

*Efecto del Oleaje* ( $S_o$ , wave setup), (Tabla 3).

$$S_o = 0.19 \left[ 1 - 2.82 \left( \frac{Hr}{gT^2} \right)^{1/2} \right] Hr$$

Donde:

- $Hr$  altura de la ola en rotura (m).
- $T$  período del oleaje (s).
- $g$  aceleración de la gravedad (m).

La altura de ruptura de la ola en el área de estudio (entorno exterior de Laguna Larga) fue baja, condicionada por la baja pendiente de la plataforma en el sitio, la dirección y velocidad del régimen habitual de viento y el corto fetch, lo cual produce un régimen hidrodinámico moderado (Tabla 3 y Fig. 15).

Tabla 3. Cálculo de oleaje de ruptura según modelo de Dally *et al.* (1985).

Rumbos	Fetch	Índice de ruptura	Profundidad / altura de la ola			
			2 m	1.5 m	1 m	0.5 m
N	2,2	0,62	1,25	0,94	0,62	0,31
NNE	1,8	0,62	0,78	0,58	0,39	0,19
NE	1,9	0,62	0,49	0,37	0,24	0,12
ENE	3,5	0,63	0,31	0,11	0,15	0,08
E	3,5	0,63	0,31	0,11	0,15	0,08
NW	2,15	0,63	0,12	0,07	0,1	0,05
NNW	0,5	0,61	0,19	0,04	0,06	0,03

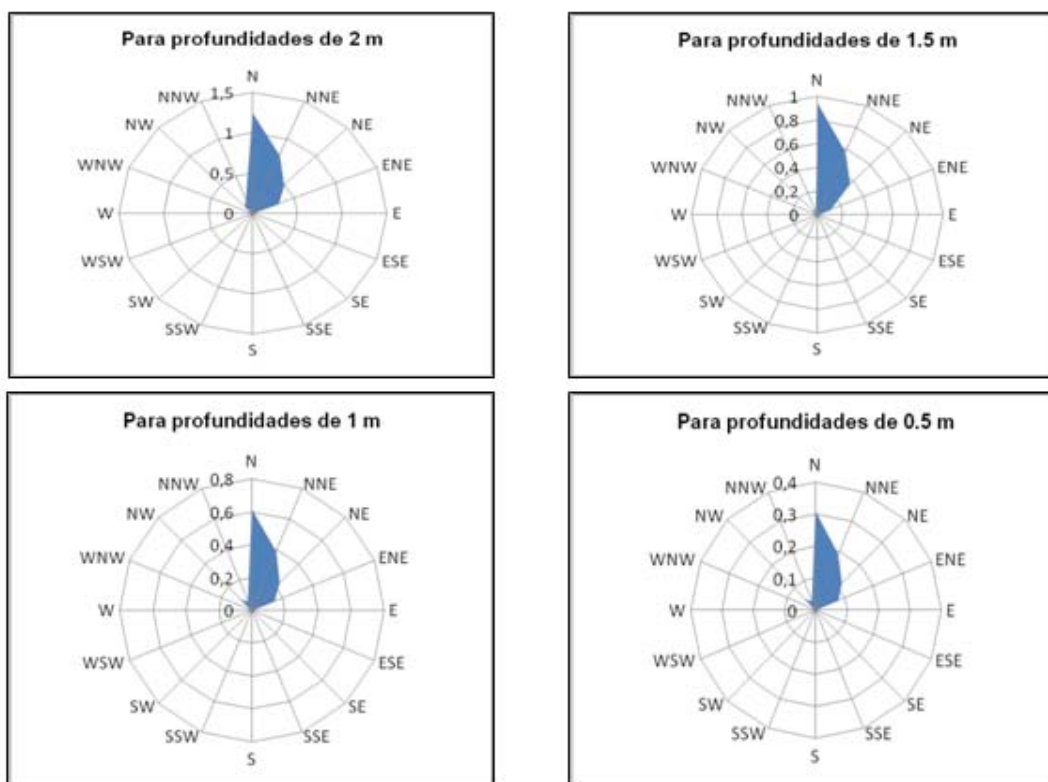


Figura 15. Altura de la ola (m) en régimen extremo para los rumbos con incidencia en la línea de costa.

Tabla 4. Sobreelevación del oleaje para los rumbos con influencia directa sobre la playa, para las profundidades de ruptura de la ola calculadas.

Rumbos	<i>Wave setup</i>			
	2 m	1.5 m	1 m	0.5 m
N	0.19	0.14	0.10	0.05
NNE	0.12	0.09	0.06	0.03
NE	0.08	0.06	0.04	0.02
ENE	0.05	0.02	0.03	0.01
E	0.05	0.02	0.03	0.01
NNW	0.03	0.01	0.02	0.01
NW	0.02	0.01	0.01	0.01

*Efecto de la presión atmosférica (Sp)*

$$Sp = \Delta Pa \times 10^{-2}$$

Donde:

*Sp* sobreelevación por presión atmosférica (m)  
*ΔPa* variación de la presión atmosférica (m)

Siendo:

$$\Delta Pa = P_{med} - P_{mín}$$

Donde:

*Pmed* Presión atmosférica media para la zona (1015 mb).  
*Pmín* Presión mínima registrada para la zona (985 mb).

$$Sp = 0.30 \text{ m} \times 10^{-2}$$

$$Sp = 0.0030 \text{ m}$$

*Efecto de la marea (SA)*

Para el caso de la marea se asumió el valor medio de las amplitudes máximas promedio registradas para la zona *SA* = 0.37 m.

De esta manera la sobreelevación del mar para la zona, pudiera alcanzar para una ola de ruptura de 1.5 m y los rumbos de los vientos N, NNE, ENE y NNW, un valor máximo (*St*):



$$St = SV + So + Sp + SA$$

$$St = 0.01 + 0.14 + 0.0030 + 0.37$$

$$St = 0.523 \text{ m}$$

### 3.5. Régimen de oleaje

La altura significativa de la ola fue de 0.540 m con un período de 3.020 s (representado por la moda). A lo largo del año medido sólo se registraron dos picos en las alturas de las olas que sobrepasaron los 2 m, que ocurrieron en los meses de noviembre de 2011 y enero de 2012 (Fig. 16).

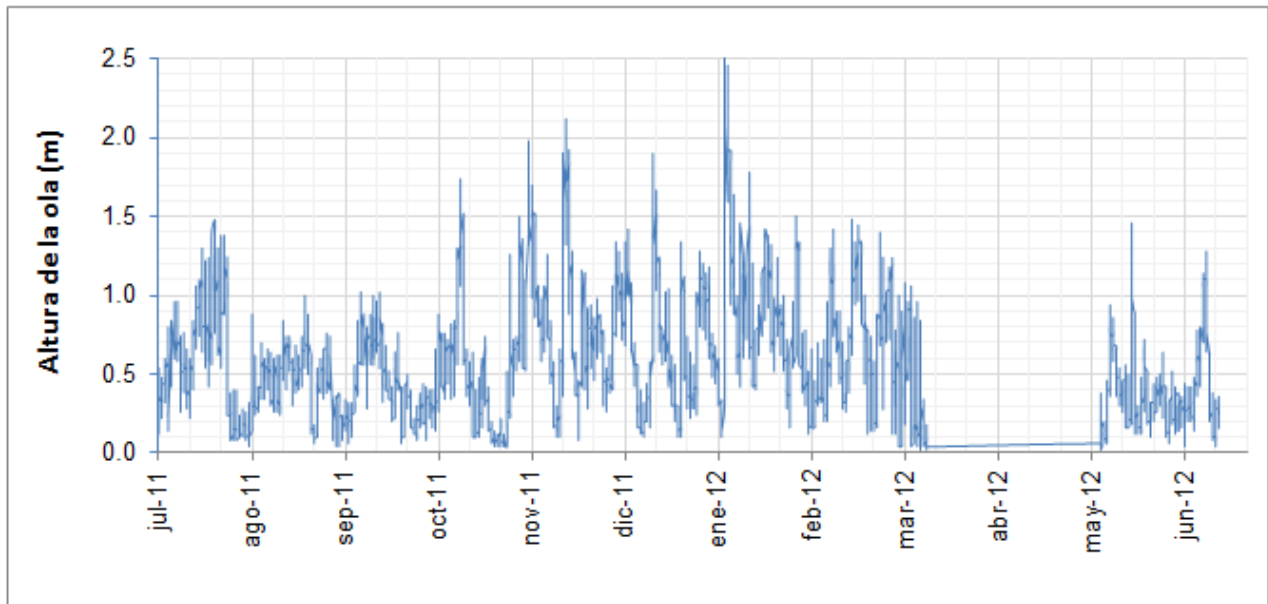


Figura 16. Distribución de la altura de las olas medidas in situ en el período 11/07/2011 - 16/06/2012. Mediciones registradas con sensor Aanderaa WTR 9 cada 30 minutos.

La distribución de las alturas de las olas a lo largo de todo el intervalo de tiempo medido mostró que el 98% de las alturas acumuladas ocurrió entre 0.2 y 1.6 m con un predominio de las olas con alturas entre 0.4 m (21.7%) y 0.6 m (22.2%) (Fig. 17).

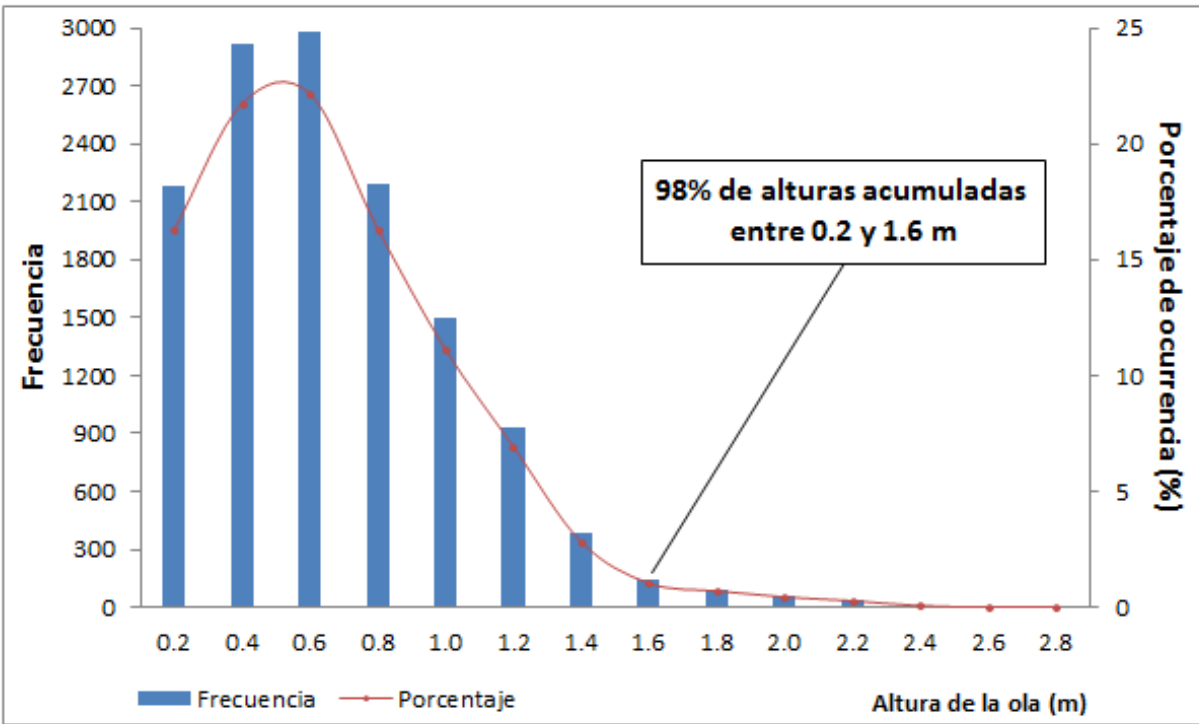


Figura 17. Porcentaje de ocurrencia de la altura de las olas en el período 11/07/2011 - 16/06/2012.

Los resultados de la estadística descriptiva del oleaje se asumieron como correspondientes a cada uno de los seis períodos de 2008 para los cuales se cuenta con datos de nutrientes en Laguna Larga y sus inmediaciones. Para el período 1 (representado por los datos de 01/01/2012 - 29/02/2012), la distribución de las alturas del oleaje medidas *in situ* mostró que oleaje fue relativamente bajo, a pesar de ser el momento del año en que mayores alturas fueron registradas. Más de un 80 % se distribuye entre las alturas de olas de 0.50 m, 0.75 m y 1 m. Por otra parte, las alturas medidas que sobrepasaron los 1.5 m no alcanzaron a acumular el 10 % de los datos medidos (Fig. 18). El valor medio de la altura del oleaje obtenido para el período 1 fue de 0.77 m (Tabla 5).

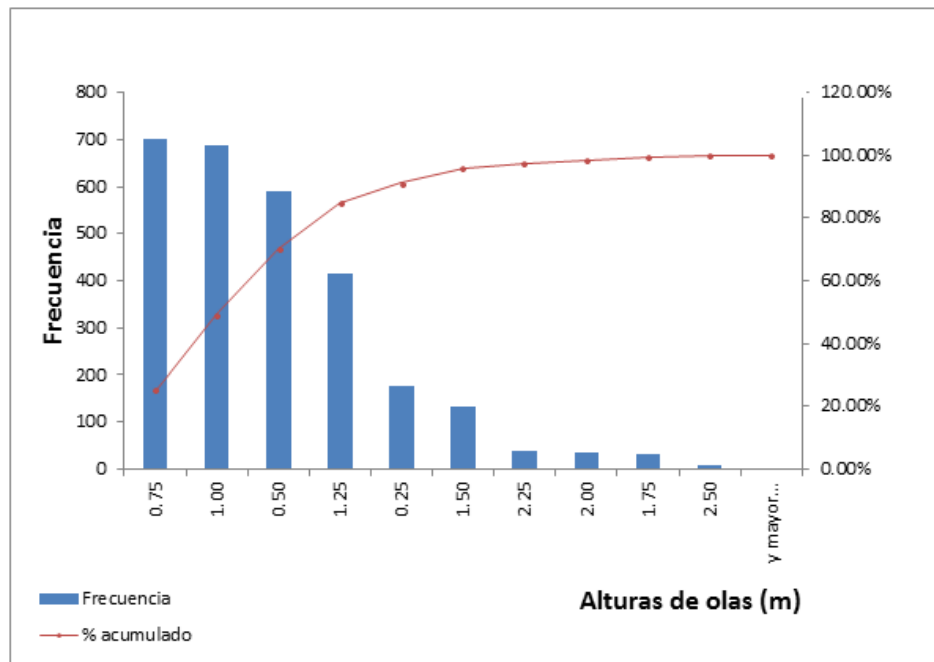


Figura. 18 Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/01/2012 - 29/02/2012. Correspondencia asumida con el período 1 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Tabla 5. Estadística descriptiva de la altura del oleaje correspondiente al período 01/01/2012 - 29/02/2012. Correspondencia asumida con el período 1 de González-De Zayas *et al.* (2013).

<i>Alturas de olas (m)</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>	<i>Estadística descriptiva</i>	
0.25	175	6.21%	Media	<b>0.772</b>
0.50	589	27.10%	Error típico	0.007
0.75	701	51.97%	Mediana	<b>0.740</b>
1.00	688	76.37%	Moda	<b>0.540</b>
1.25	416	91.13%	Desviación estándar	0.392
1.50	134	95.89%	Varianza de la muestra	0.154
1.75	32	97.02%	Mínimo	<b>0.100</b>
2.00	36	98.30%	Máximo	<b>2.660</b>
2.25	38	99.65%	Cuenta	2819
2.50	8	99.93%	Nivel de confianza (95.0%)	0.014
y mayor...	2	100.00%		

En el período 01/03/2012-30/04/2012 la distribución del oleaje medido *in situ* muestra alturas que no rebasan en ningún caso los 1.24 m, siendo los valores de 0.25 m y

1.0 m los más representativos con más del 60 % de total acumulado para el período (Fig. 19). Para este período el valor medio de la altura de la ola fue de 0.50 m (Tabla 6).

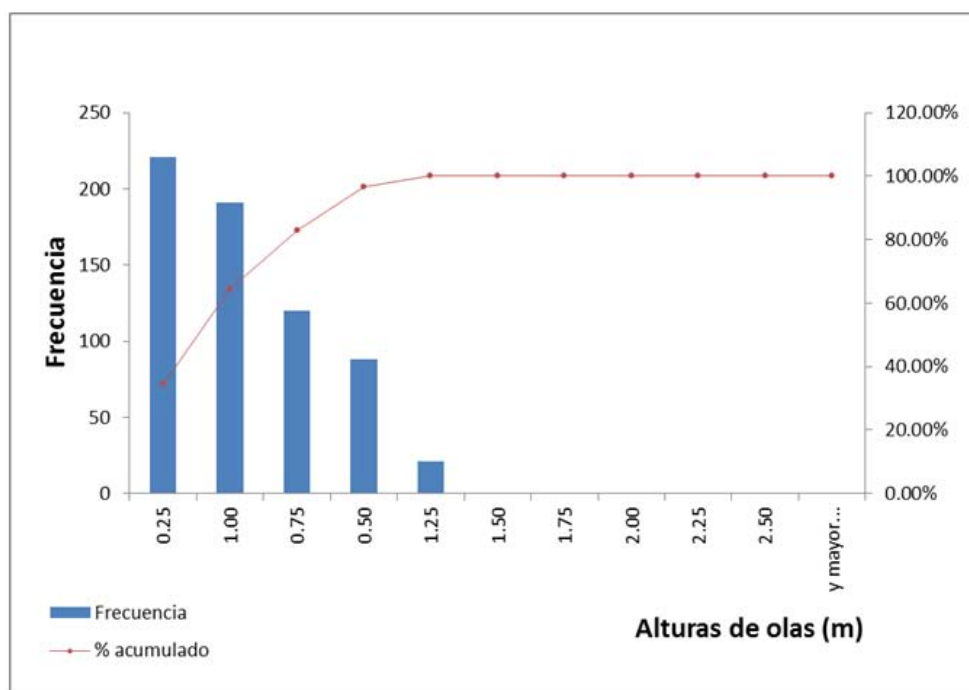


Figura 19. Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/03/2012-30/04/2012. Correspondencia asumida con el período 2 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Tabla 6. Estadística descriptiva de la altura de la ola correspondiente al período 01/03/2012-30/04/2012. Correspondencia asumida con el período 2 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Alturas de olas (m)	Frecuencia	% acumulado	Estadística descriptiva	
0.25	221	34.48%	Media	<b>0.503</b>
0.50	88	48.21%	Error típico	0.013
0.75	120	66.93%	Mediana	<b>0.540</b>
1.00	191	96.72%	Moda	<b>0.060</b>
1.25	21	100.00%	Desviación estándar	0.337
1.50	0	100.00%	Varianza de la muestra	0.114
1.75	0	100.00%	Mínimo	<b>0.020</b>
2.00	0	100.00%	Máximo	<b>1.240</b>
2.25	0	100.00%	Cuenta	641
2.50	0	100.00%	Nivel de confianza(95.0%)	0.026
y mayor...	0	100.00%		

El período 01/05/2012-31/05/2012 mostró un oleaje con alturas aún más bajas que en el período anterior, llegándose a alcanzar más del 80% entre los valores 0.25 m y 0.50 m (Fig. 20). El valor medio de la altura de la ola en el período 01/05/2012-31/05/2012 fue de 0.34 m (Tabla 7).

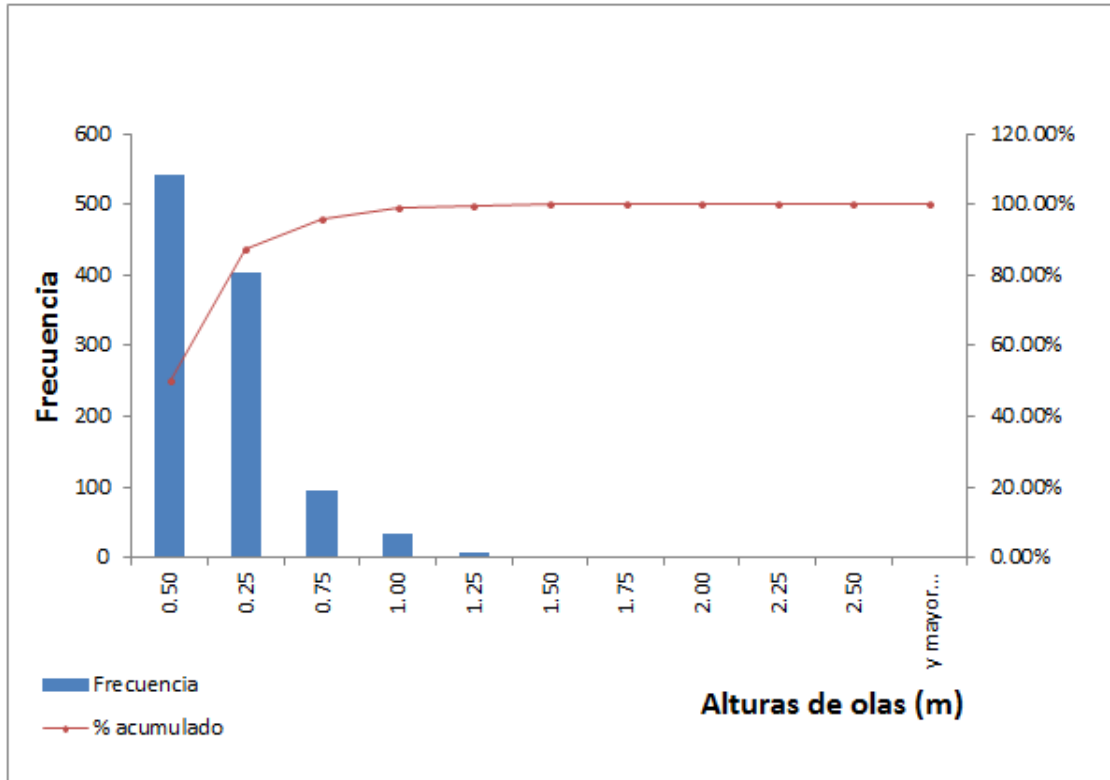


Figura 20. Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/05/2012-31/05/2012. Correspondencia asumida con el período 3 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Tabla 7. Estadística descriptiva de la altura de la ola correspondiente al período 01/05/2012-31/05/2012. Correspondencia asumida con el período 3 de González-De Zayas *et al.* (2013).

<i>Alturas de olas (m)</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>	<i>Estadística descriptiva</i>	
0.25	403	37.25%	Media	<b>0.339</b>
0.50	543	87.43%	Error típico	0.005
0.75	95	96.21%	Mediana	<b>0.320</b>
1.00	33	99.26%	Moda	<b>0.420</b>
1.25	7	99.91%	Desviación estándar	0.187
1.50	1	100.00%	Varianza de la muestra	0.035
1.75	0	100.00%	Mínimo	<b>0.020</b>
2.00	0	100.00%	Máximo	<b>1.460</b>
2.25	0	100.00%	Cuenta	1082
2.50	0	100.00%	Nivel de confianza(95.0%)	0.011
y mayor...	0	100.00%		

En el período 01/06/2011 - 31/07/2011 la distribución de las alturas del oleaje medidas *in situ* mostró que el oleaje aun cuando sigue siendo bajo en relación con el período anterior, aumentó ligeramente. Más del 80 % de los datos registrados cayeron en los rangos de olas de 0.50 m, 0.75 m y 1 m, similar a lo que ocurre en el período 01/01/2012 - 29/02/2012. No se registraron valores de altura de olas superiores a 1.5 m (Fig. 21).

La tabla 8 muestra que el valor medio de la altura de la ola en el período fue de 0.68 m, con un valor de la mediana coincidente y la moda muy cercana a la media de 0.74 m

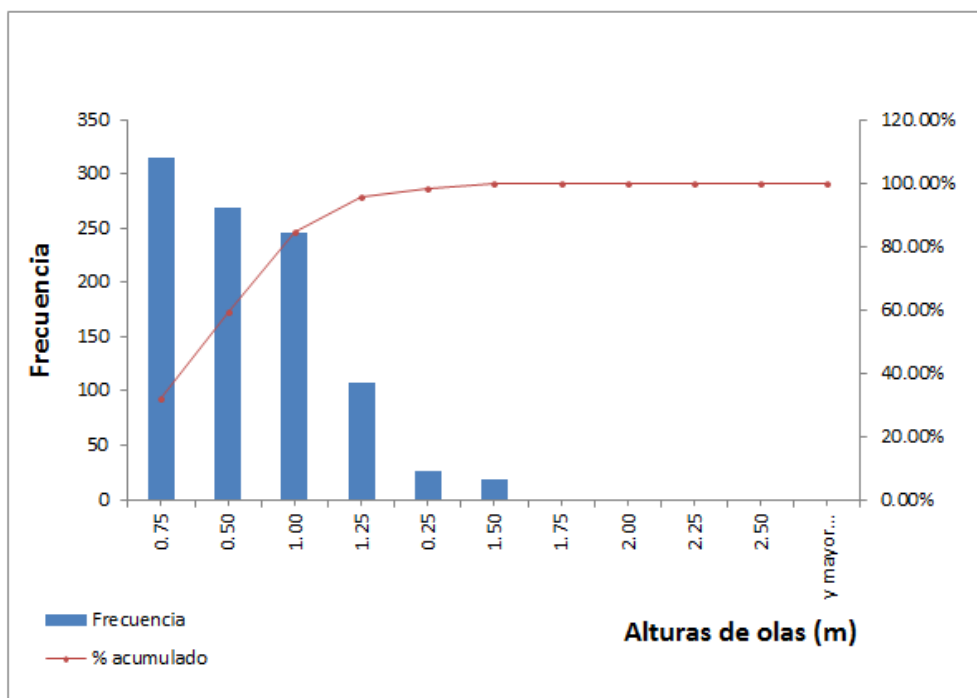


Figura 21. Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/06/2011 - 31/07/2011. Correspondencia asumida con el período 4 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Tabla 8. Estadística descriptiva de la altura de la ola correspondiente al período 01/06/2011 - 31/07/2011. Correspondencia asumida con el período 4 de González-De Zayas *et al.* (2013).

<i>Alturas de olas (m)</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>	<i>Estadística descriptiva</i>	
0.25	26	2.65%	Media	<b>0.677</b>
0.50	269	30.07%	Error típico	0.008
0.75	315	62.18%	Mediana	<b>0.680</b>
1.00	246	87.26%	Moda	<b>0.740</b>
1.25	107	98.17%	Desviación estándar	0.266
1.50	18	100.00%	Varianza de la muestra	0.071
1.75	0	100.00%	Mínimo	<b>0.120</b>
2.00	0	100.00%	Máximo	<b>1.480</b>
2.25	0	100.00%	Cuenta	982
2.50	0	100.00%	Nivel de confianza (95.0%)	0.016
y mayor...	0	100.00%		

Para el intervalo correspondiente al período 01/08/2011-31/10/2011 las alturas del oleaje medidas *in situ* bajó nuevamente con relación al período anterior, haciendo que más del 90% de los datos pertenezcan a los rangos de 0.25 m, 0.50 m, 0.75 m (Fig. 22). El valor medio de la altura de la ola en el período 01/08/2011-31/10/2011 fue de 0.42 m (Tabla 9).

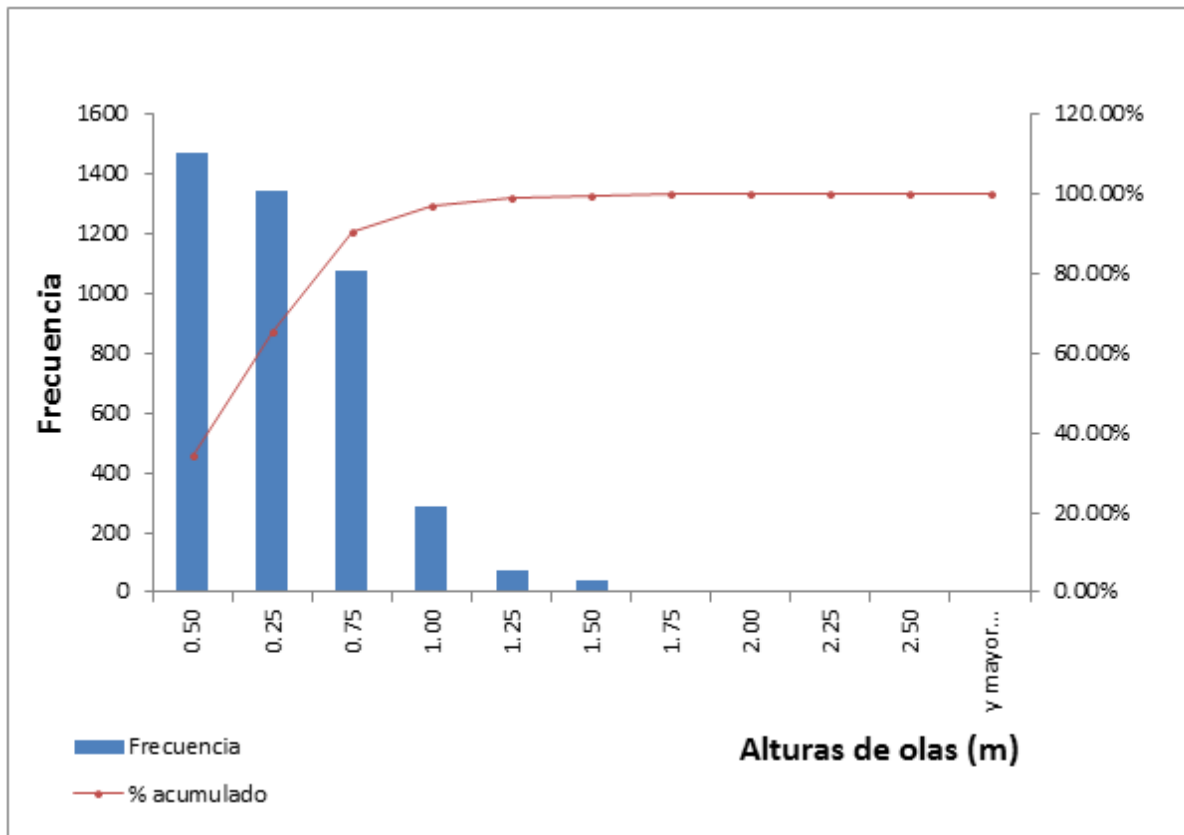


Figura 22. Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/08/2011-31/10/2011. Correspondencia asumida con el período 5 de González-De Zayas *et al.* (2013).



Tabla 9. Estadística descriptiva de la altura de la ola correspondiente al período 01/08/2011-31/10/2011. Correspondencia asumida con el período 5 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Alturas de olas (m)	Frecuencia	% acumulado	Estadística descriptiva	
0.25	1344	31.23%	Media	<b>0.419</b>
0.50	1473	65.47%	Error típico	0.004
0.75	1077	90.50%	Mediana	<b>0.400</b>
1.00	288	97.19%	Moda	<b>0.100</b>
1.25	76	98.95%	Desviación estándar	0.263
1.50	37	99.81%	Varianza de la muestra	0.069
1.75	8	100.00%	Mínimo	<b>0.040</b>
2.00	0	100.00%	Máximo	<b>1.740</b>
2.25	0	100.00%	Cuenta	4303
2.50	0	100.00%	Nivel de confianza(95.0%)	0.008
y mayor...	0	100.00%		

El período 01/11/2011-31/12/2011 mostró que las alturas del oleaje se distribuyeron entre más rangos de frecuencia que en los períodos anteriores, llegando a alcanzar olas que sobrepasaron los 0.75 m y 2.0 m en más de un 10% (Fig. 23). El valor medio de la altura de la ola en el período 01/11/2011-31/12/2011 fue de 0.74 m (Tabla 10).

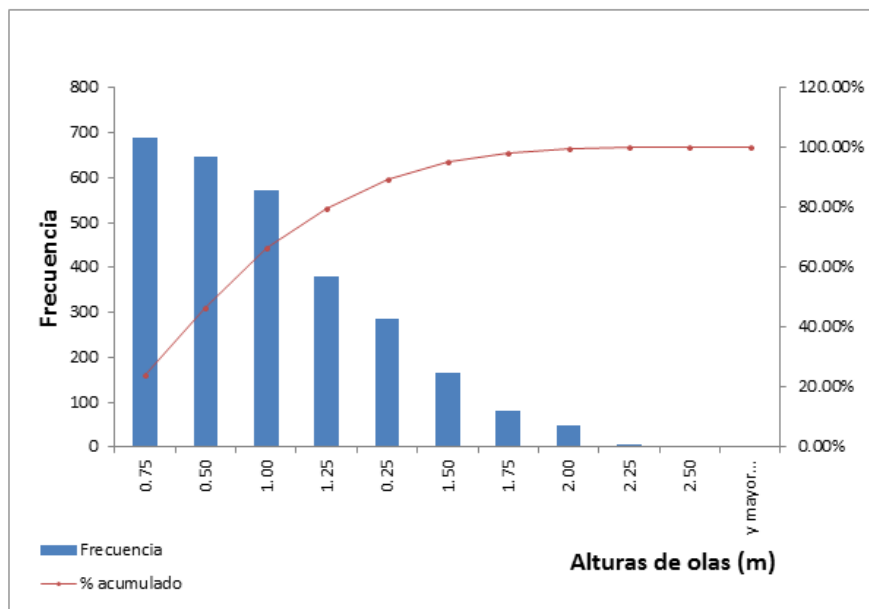


Figura 23. Distribución de frecuencia de altura del oleaje en el período 01/11/2011-31/12/2011. Correspondencia asumida con el período 6 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Tabla 10. Estadística descriptiva de la altura de la ola correspondiente al período 01/11/2011-31/12/2011. Correspondencia asumida con el período 6 de González-De Zayas *et al.* (2013).

<i>Alturas de olas (m)</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>	<i>Estadística descriptiva</i>	
0.25	284	9.91%	Media	<b>0.735</b>
0.50	647	32.48%	Error típico	0.007
0.75	688	56.49%	Mediana	<b>0.680</b>
1.00	570	76.38%	Moda	<b>0.540</b>
1.25	379	89.60%	Desviación estándar	0.398
1.50	164	95.32%	Varianza de la muestra	0.158
1.75	81	98.15%	Mínimo	<b>0.080</b>
2.00	48	99.83%	Máximo	<b>2.120</b>
2.25	5	100.00%	Cuenta	2866
2.50	0	100.00%	Nivel de confianza (95.0%)	0.015
y mayor...	0	100.00%		

Los datos registrados del período (T) de la ola durante el año medido mostraron que el período promedio anual fue de 3.00 s, con un valor mínimo de 2.2 s y uno máximo de 6.7 s. Los meses con mayores valores de T fueron octubre y marzo y el mes de menor valor fue junio (Fig. 24).

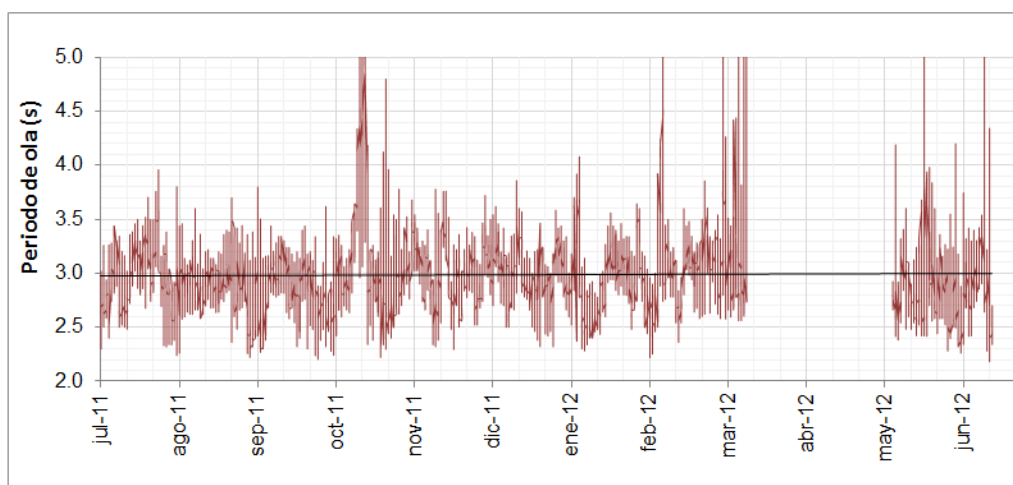


Figura 24. Distribución del período de las olas medidas in situ en el período 11/7/2011 - 16/6/2012. Mediciones registradas con sensor Aanderaa WTR 9 cada 30 minutos.

Para el intervalo 01/01/2012 - 29/02/2012 la distribución del período de ola medido mostró que los valores más frecuentes (más del 75%) se correspondieron con los

rangos de 3.00 s y 3.25 s (Fig. 25). Para el intervalo 01/01/2012 - 29/02/2012 el período medio de la ola fue de 2.99 s (Tabla 11).

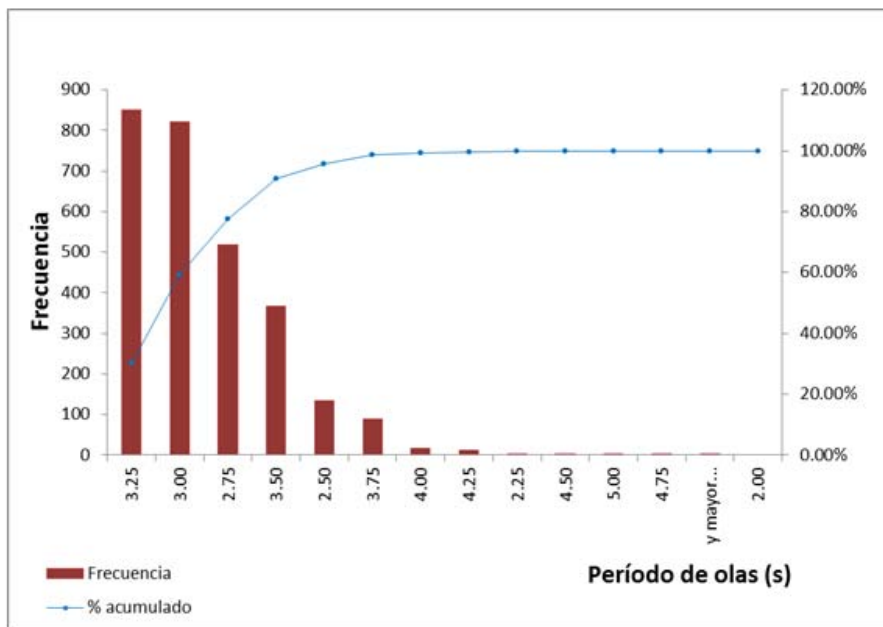


Figura. 25. Distribución de frecuencia del período de las olas en el intervalo 01/01/2012 - 29/02/2012. Correspondencia asumida con el período 1 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Tabla 11. Estadística descriptiva del período de las olas correspondiente al intervalo 01/01/2012 - 29/02/2012. Correspondencia asumida con el período 1 de González-De Zayas *et al.* (2013).

<i>Período de las olas (m)</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>	<i>Estadística descriptiva</i>	
2.00	0	0.00%	Media	<b>2.988</b>
2.25	3	0.11%	Error típico	0.005
2.50	135	4.90%	Mediana	<b>3.000</b>
2.75	519	23.31%	Moda	<b>3.100</b>
3.00	821	52.43%	Desviación estándar	0.310
3.25	850	82.58%	Varianza de la muestra	0.096
3.50	367	95.60%	Mínimo	<b>2.220</b>
3.75	89	98.76%	Máximo	<b>5.160</b>
4.00	17	99.36%	Cuenta	2819
4.25	12	99.79%	Nivel de confianza(95.0%)	0.011
4.50	2	99.86%		
4.75	1	99.89%		
5.00	2	99.96%		
y mayor...	1	100.00%		

Para el intervalo 01/03/2012-30/04/2012 la distribución del período de ola medido *in situ* mostró gran similitud con el período 1, con valores frecuentes (más del 75 %) correspondiente con los rangos de 3.00 y 3.25 s (Fig. 26). Para el intervalo 01/03/2012-30/04/2012 el valor medio del período de ola fue de 3.17 s. (Tabla 12). Sin embargo este es el intervalo de tiempo en el cual se registró el valor máximo del período de la ola medido (6.58 m).

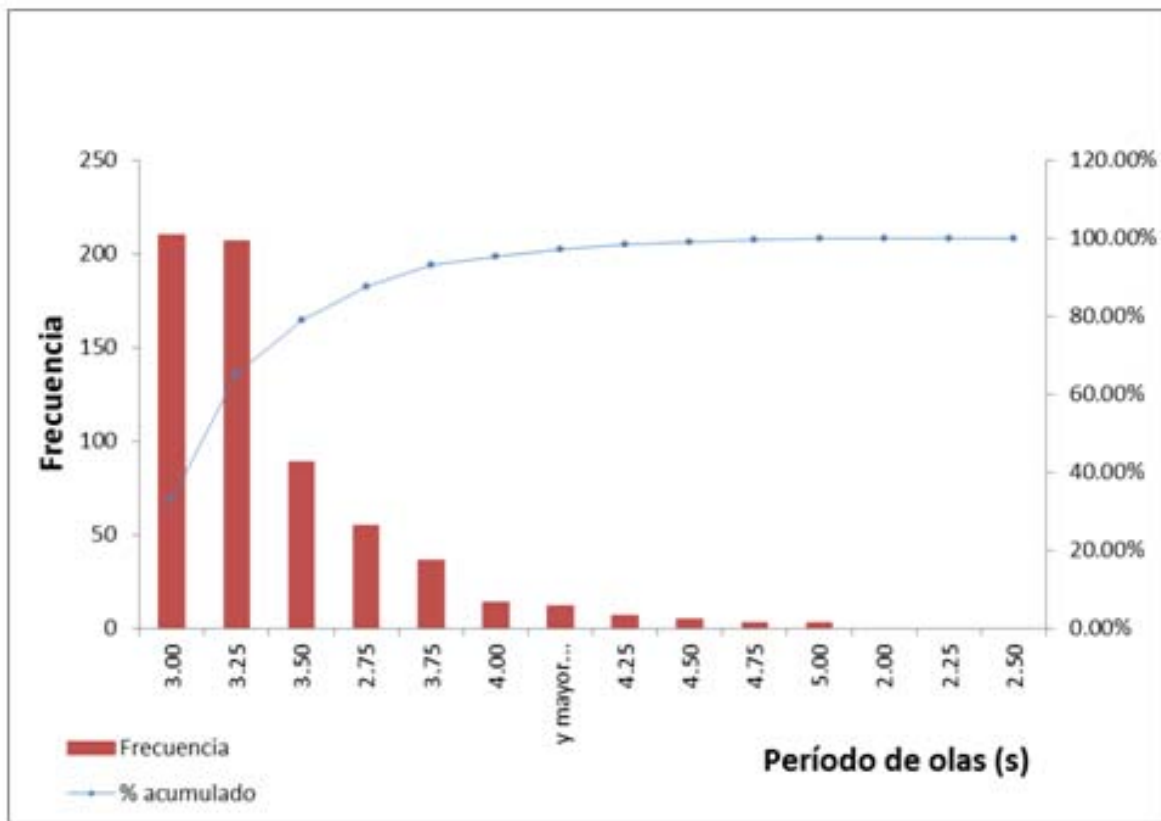


Figura 26. Distribución de frecuencia del período de las olas en el intervalo 01/03/2012-30/04/2012. Correspondencia asumida con el período 2 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Tabla 12. Estadística descriptiva del período de las olas correspondiente al intervalo 01/03/2012-30/04/2012. Correspondencia asumida con el período 2 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Período de las olas (m)	Frecuencia	% acumulado	Estadística descriptiva	
2.00	0	0.00%	Media	<b>3.170</b>
2.25	0	0.00%	Error típico	0.019
2.50	0	0.00%	Mediana	<b>3.080</b>
2.75	55	8.58%	Moda	<b>3.100</b>
3.00	210	41.34%	Desviación estándar	0.495
3.25	207	73.63%	Varianza de la muestra	0.245
3.50	89	87.52%	Mínimo	<b>2.560</b>
3.75	36	93.14%	Máximo	<b>6.580</b>
4.00	14	95.32%	Cuenta	642
4.25	7	96.41%	Nivel de confianza(95.0%)	0.038
4.50	5	97.19%		
4.75	3	97.66%		
5.00	3	98.13%		
y mayor...	12	100.00%		

Para el intervalo 01/05/2012-31/05/2012 la distribución del período de ola medido fue estable con un gran predominio de los valores de período de ola alrededor de 3.00 s (Fig. 27). Para el intervalo 01/05/2012-31/05/2012 el valor medio del período de ola fue de 2.94 s (Tabla 13).

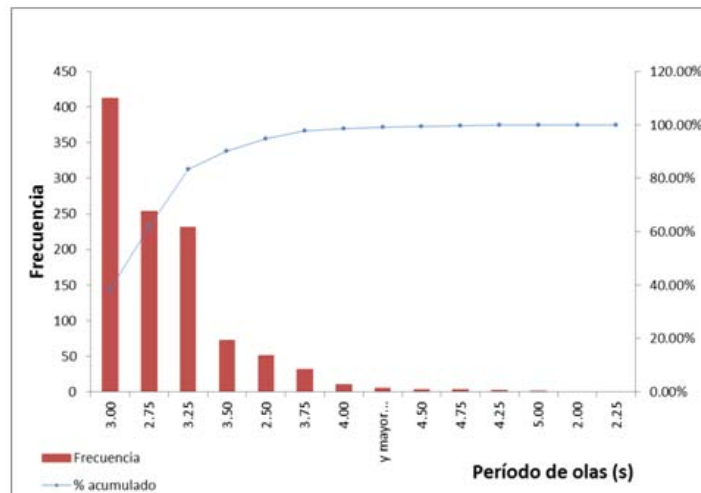


Figura. 27 Distribución de frecuencia del período de las olas en el período 01/05/2012-31/05/2012. Correspondencia asumida con el período 3 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Tabla 13. Estadística descriptiva del período de las olas correspondiente al intervalo 01/05/2012-31/05/2012. Correspondencia asumida con el período 3 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Período de las olas (m)	Frecuencia	% acumulado	Estadística descriptiva	
2.00	0	0.00%	Media	<b>2.943</b>
2.25	0	0.00%	Error típico	0.011
2.50	51	4.74%	Mediana	<b>2.880</b>
2.75	254	28.35%	Moda	<b>2.860</b>
3.00	412	66.64%	Desviación estándar	0.370
3.25	231	88.10%	Varianza de la muestra	0.137
3.50	72	94.80%	Mínimo	<b>2.280</b>
3.75	32	97.77%	Máximo	<b>6.440</b>
4.00	10	98.70%	Cuenta	1076
4.25	2	98.88%	Nivel de confianza(95.0%)	0.022
4.50	3	99.16%		
4.75	3	99.44%		
5.00	1	99.54%		
y mayor...	5	100.00%		

Para el intervalo 01/06/2011 - 31/07/2011 la distribución del período de ola medido *in situ* fue estable y similar a los intervalos analizados anteriormente, con un gran predominio de los valores de período de ola alrededor de 3.25 s (Fig. 28). Para el intervalo 01/06/2011 - 31/07/2011 el valor del período medio de ola fue de 3.02 s (Tabla 14).

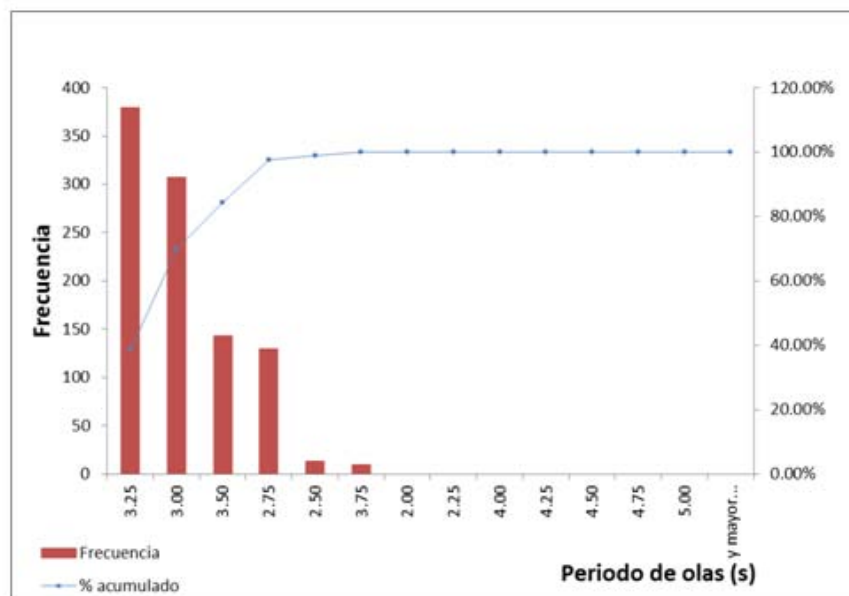


Figura 28. Distribución de frecuencia del período de las en el intervalo 01/06/2011 - 31/07/2011. Correspondencia asumida con el período 4 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Tabla 14. Estadística descriptiva del período de las olas correspondiente al intervalo 01/06/2011 - 31/07/2011. Correspondencia asumida con el período 4 de González-De Zayas *et al.* (2013).

<i>Período de las olas (m)</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>	<i>Estadística descriptiva</i>	
2.00	0	0.00%	Media	<b>3.018</b>
2.25	0	0.00%	Error típico	0.007
2.50	13	1.32%	Mediana	<b>3.040</b>
2.75	130	14.56%	Moda	<b>3.140</b>
3.00	307	45.82%	Desviación estándar	0.233
3.25	379	84.42%	Varianza de la muestra	0.054
3.50	143	98.98%	Mínimo	<b>2.300</b>
3.75	10	100.00%	Máximo	<b>3.700</b>
4.00	0	100.00%	Cuenta	982
4.25	0	100.00%	Nivel de confianza(95.0%)	0.015
4.50	0	100.00%		
4.75	0	100.00%		
5.00	0	100.00%		
y mayor...	0	100.00%		

Para el intervalo 01/08/2011-31/10/2011 la distribución del período de ola medido *in situ* se mantuvo estable con valores oscilantes predominantes entre 2.75 s y 3.25 s (Fig. 29). Para el intervalo 01/08/2011-31/10/2011 el valor del período medio de ola fue de 2.95 s (Tabla 15).

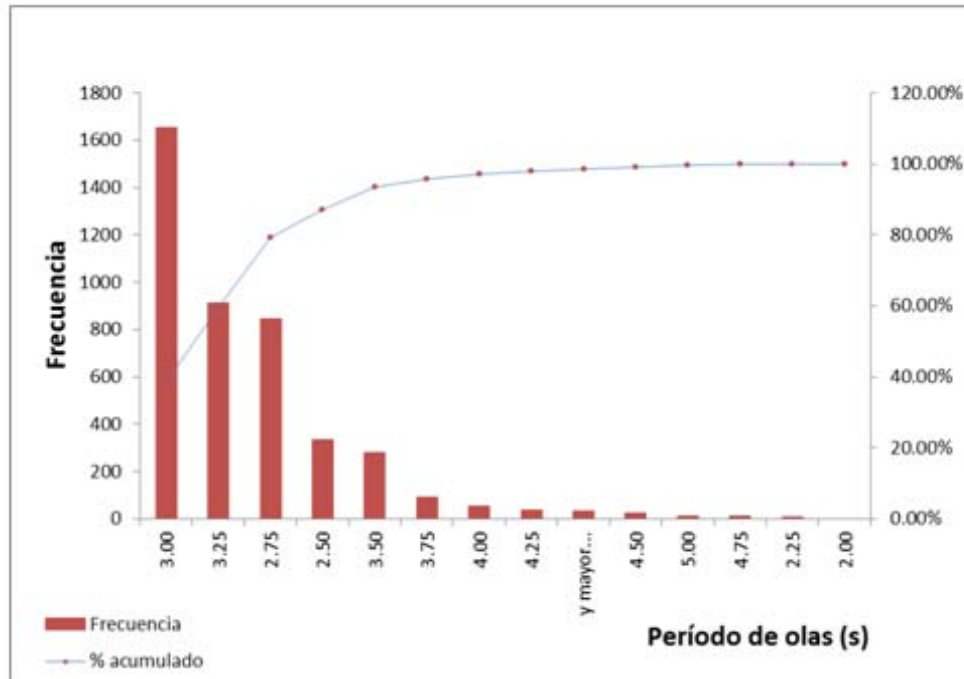


Figura 29. Distribución de frecuencia del período de las olas en el intervalo 01/08/2011-31/10/2011. Correspondencia asumida con el período 5 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Tabla 15. Estadística descriptiva del período de las olas correspondiente al intervalo 01/08/2011-31/10/2011. Correspondencia asumida con el período 5 de González-De Zayas *et al.* (2013).

<i>Período de las olas (m)</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>	<i>Estadística descriptiva</i>	
2.00	0	0.00%	Media	<b>2.955</b>
2.25	8	0.19%	Error típico	0.006
2.50	335	7.97%	Mediana	<b>2.900</b>
2.75	847	27.66%	Moda	<b>2.880</b>
3.00	1655	66.12%	Desviación estándar	0.422
3.25	912	87.31%	Varianza de la muestra	0.178
3.50	281	93.84%	Mínimo	<b>2.200</b>
3.75	94	96.03%	Máximo	<b>6.820</b>
4.00	53	97.26%	Cuenta	4303
4.25	36	98.09%	Nivel de confianza(95.0%)	0.013
4.50	24	98.65%		
4.75	11	98.91%		
5.00	14	99.23%		
y mayor...	33	100.00%		



Para el intervalo 01/11/2011-31/12/2011 la distribución del período de ola medido *in situ* mostró una dominancia de T de 2.75 s, 3.00 s y 3.25 s se mantuvo estable con valores oscilantes predominantes entre 2.75 s y 3.25 s (Fig. 30). Para el intervalo 01/11/2011-31/12/2011 el valor del período medio de ola fue de 2.99 s (Tabla 16).

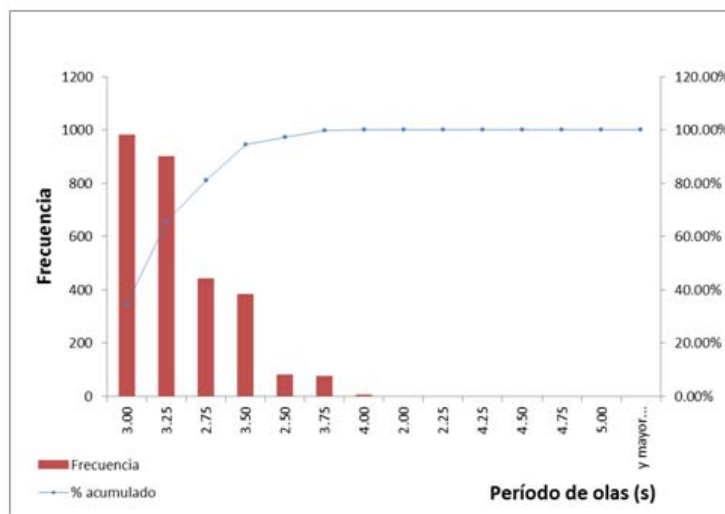


Figura 30. Distribución de frecuencia del período de las olas en el intervalo 01/11/2011-31/12/2011. Correspondencia asumida con el período 6 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Tabla 16. Estadística descriptiva del período de la ola correspondiente al intervalo 01/11/2011-31/12/2011. Correspondencia asumida con el período 6 de González-De Zayas *et al.* (2013).

Período de las olas (m)	Frecuencia	% acumulado	Estadística descriptiva	
2.00	0	0.00%	Media	<b>2.994</b>
2.25	0	0.00%	Error típico	0.004
2.50	81	2.83%	Mediana	<b>3.000</b>
2.75	441	18.21%	Moda	<b>3.020</b>
3.00	982	52.48%	Desviación estándar	0.262
3.25	899	83.85%	Varianza de la muestra	0.069
3.50	382	97.17%	Mínimo	<b>2.300</b>
3.75	76	99.83%	Máximo	<b>3.860</b>
4.00	5	100.00%	Cuenta	2866
4.25	0	100.00%	Nivel de confianza(95.0%)	0.010
4.50	0	100.00%		
4.75	0	100.00%		
5.00	0	100.00%		
y mayor...	0	100.00%		

### 3.6. Caudales del REALCO por períodos de tiempo

El cálculo del caudal ( $Q$ ) capturado al pasar sobre el franco bordo del amplificador del REALCO para cada ola medida durante todo el intervalo de medición (341 días) generó valores que fluctuaron entre  $0.000$  y  $1.495 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , un valor promedio de  $0.161 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y una moda de  $0.212 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (Fig. 31). El 95% de los datos fueron menores a  $0.600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y un 56% menor a  $0.100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

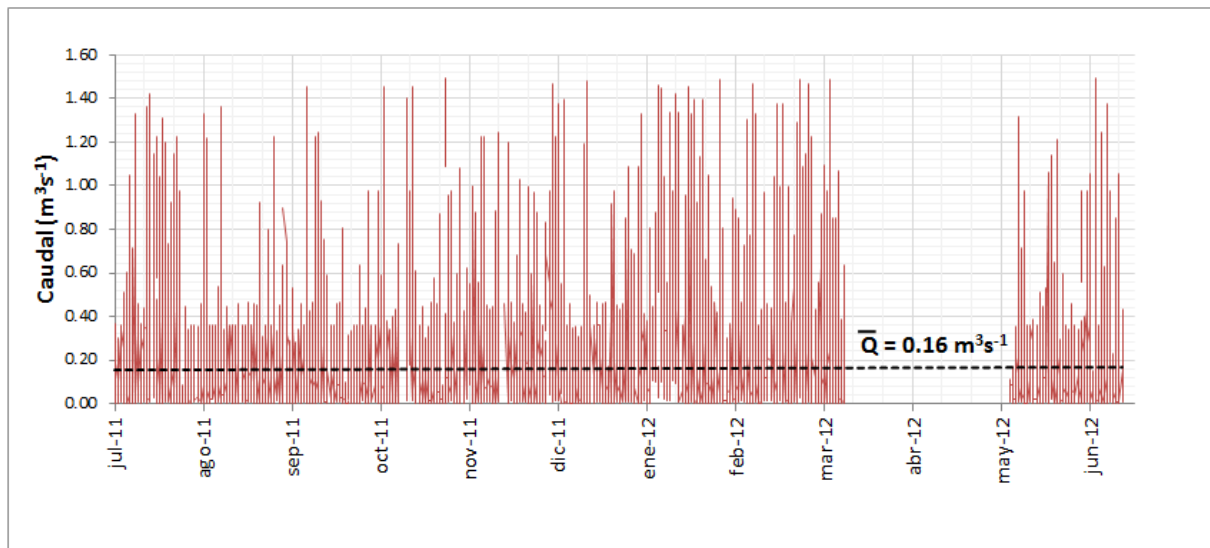


Figura 31. Distribución de los caudales calculados sobre el franco bordo del REALCO para todo el intervalo de medición (11/07/2011- 16/06/2012).

Al relacionar los resultados de  $Q$  con las alturas de olas que lo generaron durante cada período, se observó que el período 1 (Dic-Feb) mostró el mayor valor medio de caudal ( $0.219 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), mientras que los valores más bajos se registraron para los meses de abril a mayo (período 3,  $0.113 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), intervalo de tiempo que también contó con la menor variabilidad en los resultados de  $Q$ . (Fig. 32) y (Tabla 17). El resto de los períodos de tiempo (Feb-Abr, May-Jul, Jul-Oct y Oct-Dic) tuvieron valores medios de caudal entre  $0.133$  y  $0.191 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (Tabla 17).

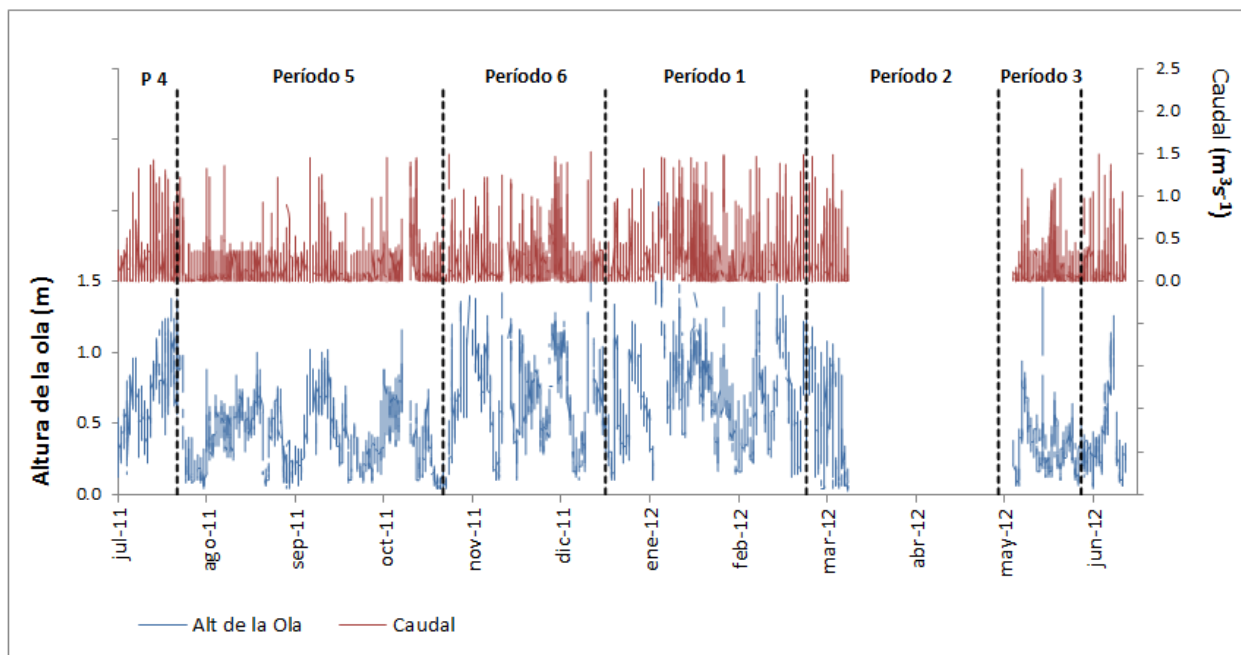


Figura 32. Relación entre los caudales calculados sobre el franco bordo del REALCO y las alturas de olas para todo el intervalo de medición (11/07/2011- 16/06/2012).

Tabla 17. Principales estadígrafos de los caudales calculados.

Estadígrafos	Períodos					
	Dic-Feb	Feb-Abr	Abr-May	May-Jul	Jul-Oct	Oct-Dic
Media	<b>0.219</b>	<b>0.175</b>	<b>0.113</b>	<b>0.191</b>	<b>0.133</b>	<b>0.169</b>
Error típico	0.006	0.011	0.005	0.008	0.003	0.004
Mediana	0.112	0.076	0.070	0.096	0.079	0.091
Moda	0.202	0.101	0.085	0.183	0.057	0.052
Desviación estándar	0.270	0.256	0.161	0.244	0.175	0.214
Varianza de la muestra	0.073	0.066	0.026	0.059	0.030	0.046
Curtosis	4.978	5.967	17.552	6.181	14.695	8.999
Coefficiente de asimetría	2.132	2.376	3.588	2.339	3.161	2.627
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	1.490	1.490	1.320	1.422	1.457	1.490
Cuenta	2164	541	947	838	3468	2287
Nivel de confianza(95.0%)	0.011	0.022	0.010	0.017	0.006	0.009

Los valores promedios de caudales de cada período que fueron usados para los cálculos del balance de agua a través del modelo LOICZ en correspondencia con el escenario 2 (con caudales del REALCO), se reflejan en la tabla 17.

Tabla 18. Caudales calculados para los períodos de 2011-2012 correspondientes a los intervalos trabajados por González-De Zayas *et al.* (2013) para el año 2008.

Datos para balance LOICZ González-De Zayas <i>et al.</i> (2013)		Correspondencia asumida con oleaje medido <i>in situ</i>		Total de días	Caudal ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	Caudal (LOICZ) ( $10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ )
Período	Intervalo	Inicio	Fin			
1	Dic-Feb	01/01/2012	02/29/2012	68.00	0.219	18.92
2	Feb-Abr	01/03/2012	30/04/2012	63.00	0.175	15.12
3	Abr-May	01/05/2012	31/05/2012	28.00	0.113	9.76
4	May-Jul	01/06/2011	31/07/2011	57.00	0.191	16.50
5	Jul-Oct	01/08/2011	31/10/2011	89.00	0.133	11.49
6	Oct-Dic	01/11/2011	31/12/2011	60.00	0.169	14.60

### 3.7. Efectividad del REALCO por períodos de tiempo

#### 3.7.1. Balance de agua para los escenarios sin y con REALCO

De acuerdo con los resultados del modelo LOIZC, el balance de agua de Laguna Larga (todos los sectores en su conjunto), sin considerar los flujos del REALCO (escenario 1), mostró que el flujo residual se movió en dirección hacia el mar durante los períodos 1 (Dic-Feb), 2 (Feb-Abr), 4 (May-Jul) y 5 (Jul-Oct), con el valor mínimo de  $V_r = 15 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  durante el período 2 y el máximo de  $V_r = 62 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  durante el período 5. Los flujos residuales en dirección neta hacia la laguna ocurrieron durante los períodos 3 (Abr-May) y 6 (Oct-Dic), con valores de  $V_r$  de  $61 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  y  $41 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  respectivamente (Fig. 33). El flujo neto resultante del año analizado para toda la laguna fue hacia la importación con  $V_r = 87.9 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ .

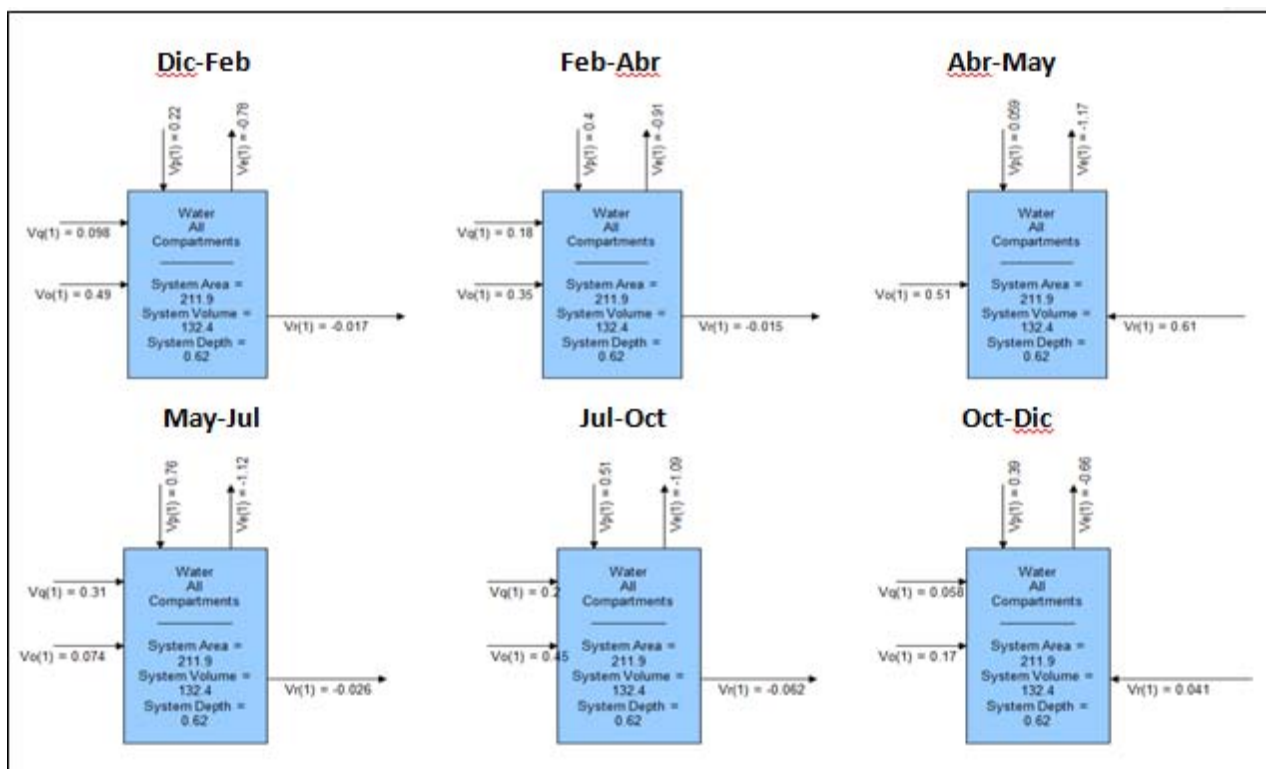


Figura 33. Balance de agua para toda Laguna Larga sin flujo de entrada del REALCO (escenario 1).

Los resultados por sectores mostraron variabilidad tanto en la dirección como en la magnitud de los flujos residuales internos de la laguna en el escenario 1. El sector interior estuvo exportando agua al sector adyacente durante todos los períodos del año a excepción del período Oct-Dic, por lo cual el  $V_r$  promedio anual resultó en dirección saliente con valor de  $V_r = 17 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ . El sector central mostró un comportamiento contrario en la dirección de  $V_r$ , pues estuvo importando agua de los sectores aledaños durante los períodos comprendidos de Feb-Abr y Jul-Oct, aportando sólo en el período Dic-Feb, haciendo que recibiera como promedio anual  $39.8 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ . El sector externo presentó mayor variabilidad del parámetro  $V_r$ , durante los períodos Dic-Feb y Feb-Abr, así como May-Jul y Jul-Oct cuando estuvo aportando agua, mientras que los períodos Abr-May y Oct-Dic estuvieron recibiendo.

El escenario 2 (balance de agua considerando los flujos aportados por el REALCO) mostró que durante todo el año cada sector y la laguna en su conjunto fueron exportadores de agua, con valores promedios de  $V_r$  de  $14,416.2 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ,  $14,358.6 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$

y  $14,310.4 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$  para los sectores interior, central y externo, respectivamente. No existió en el escenario con REALCO ningún período en que alguno de los sectores de la laguna fuese receptor de agua, contrario a lo ocurrido en el escenario 1, cuando el 44% del año se estuvo recibiendo agua, con un peso predominante del sector central, que solo funcionó como exportador de agua durante el período Dic-Feb (Fig. 34 y Tabla 17).

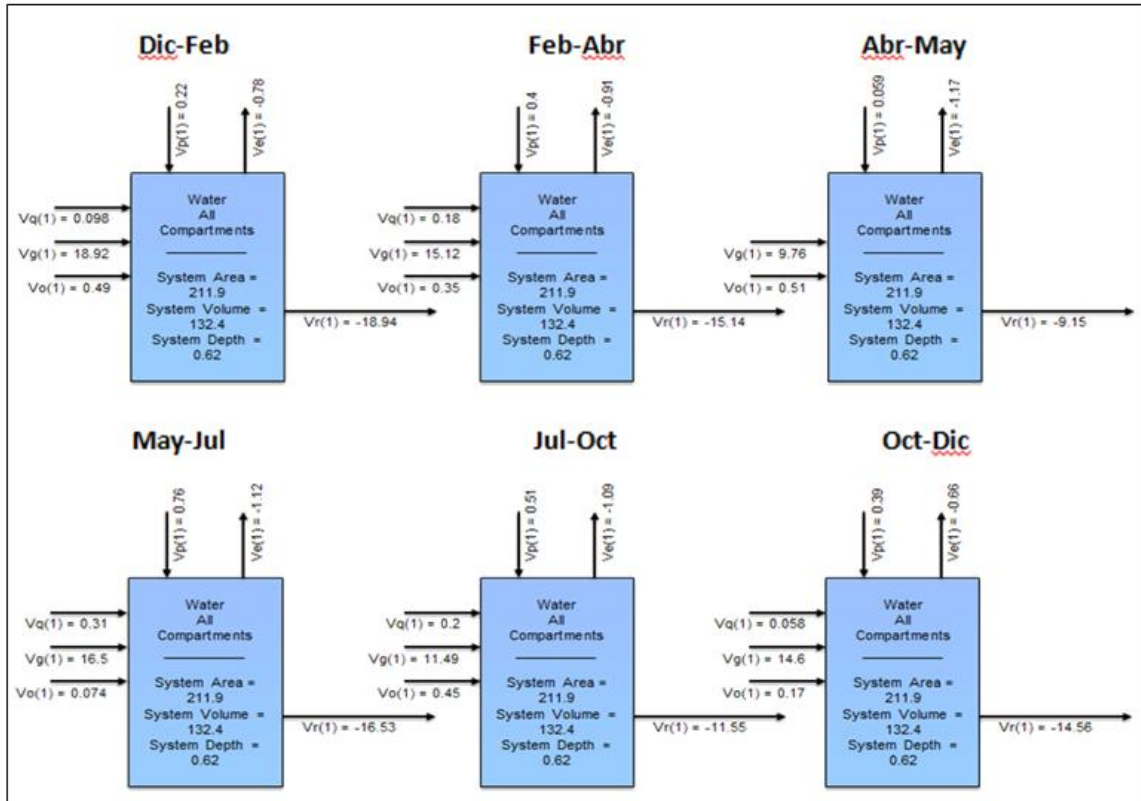


Figura 34. Balance de agua para toda la Laguna con flujo de entrada del REALCO (escenario 2).

Tabla 19. Variaciones esperadas del Volumen residual (Vr) por sectores y períodos a partir de los caudales aportados por el REALCO.

Período	Intervalo	Vr sin REALCO ( $m^3 d^{-1}$ )			Vr con REALCO ( $m^3 d^{-1}$ )		
		Interior	Central	Externo	Interior	Central	Externo
Season 1	Dec-Feb	↑ -10.0	↑ -5.0	↑ -17.0	↑ -18930.0	↑ -18925.0	↑ -18937.0
Season 2	Feb-Abr	↑ -21.0	↓ 26.0	↑ -15.0	↑ -15141.0	↑ -15094.0	↑ -15135.0
Season 3	Abr-May	↑ -66.0	↓ 85.0	↓ 607.0	↑ -9826.0	↑ -9675.0	↑ -9153.0
Season 4	May-Jul	↑ -17.0	↓ 18.5	↑ -26.5	↑ -16517.0	↑ -16481.5	↑ -16526.5
Season 5	Jul-Oct	↑ -18.0	↓ 79.0	↑ -62.0	↑ -11508.0	↑ -11411.0	↑ -11552.0
Season 6	Oct-Dec	↓ 25.0	↓ 35.0	↓ 41.0	↑ -14575.0	↑ -14565.0	↑ -14559.0
<b>Promedio</b>		↑ -17.8	↓ 39.8	↓ 87.9	↑ -14416.2	↑ -14358.6	↑ -14310.4

**Nota:** el color verde de las flechas indica que la dirección del flujo ocurrió de la laguna hacia el mar, el color rojo indica que ocurrió en la dirección contraria.

El aporte de agua realizado al sistema por el REALCO, de acuerdo con los resultados del modelo LOIZC, determina, en primer lugar, que la laguna exporte agua hacia el mar durante todo el año, como lo indica el signo negativo, que de acuerdo con los criterios de LOIZC representa salida de agua del sistema. En términos de su magnitud, este flujo representa un cambio de varios órdenes de magnitud en el volumen residual (Vr) de la laguna para todos los períodos del año analizado (Fig. 35).

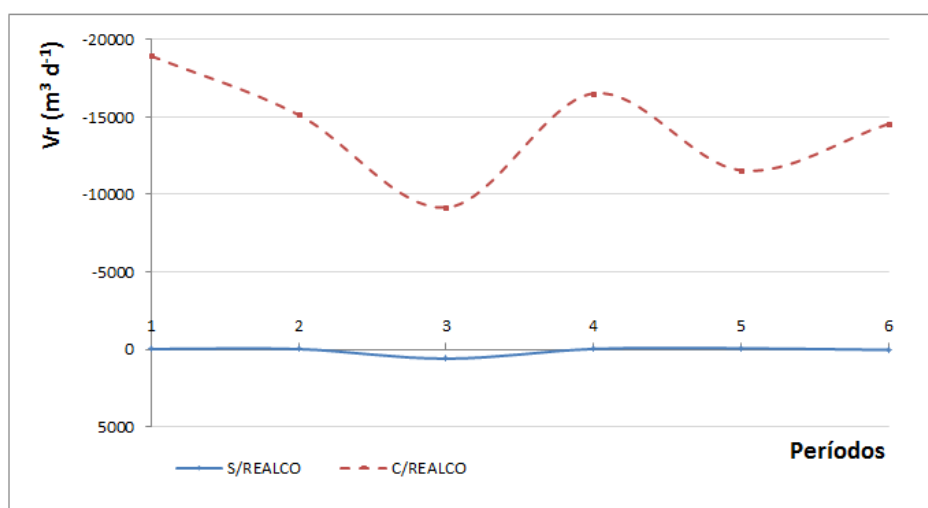


Figura 35. Comparación del Volumen residual (Vr) para los escenarios sin y con REALCO en toda la laguna en su conjunto por períodos.

### 3.7.2. Tiempo de Intercambio de agua para los escenarios sin y con REALCO.

De acuerdo con los resultados del balance de sal realizado a través del modelo LOIZC para el escenario 1 (sin REALCO), se observó que los Tiempos de Intercambio (TI) de agua fueron elevados a lo largo de todos los períodos del año analizado, tomando en cuenta a toda la laguna en su conjunto. El TI menor se alcanzó durante el período Abr-May (TI = 10 días) y el mayor durante el período Feb-Abr (TI = 103 días) (Fig. 36). El valor promedio anual de este parámetro para el escenario sin REALCO fue de 40.3 días.

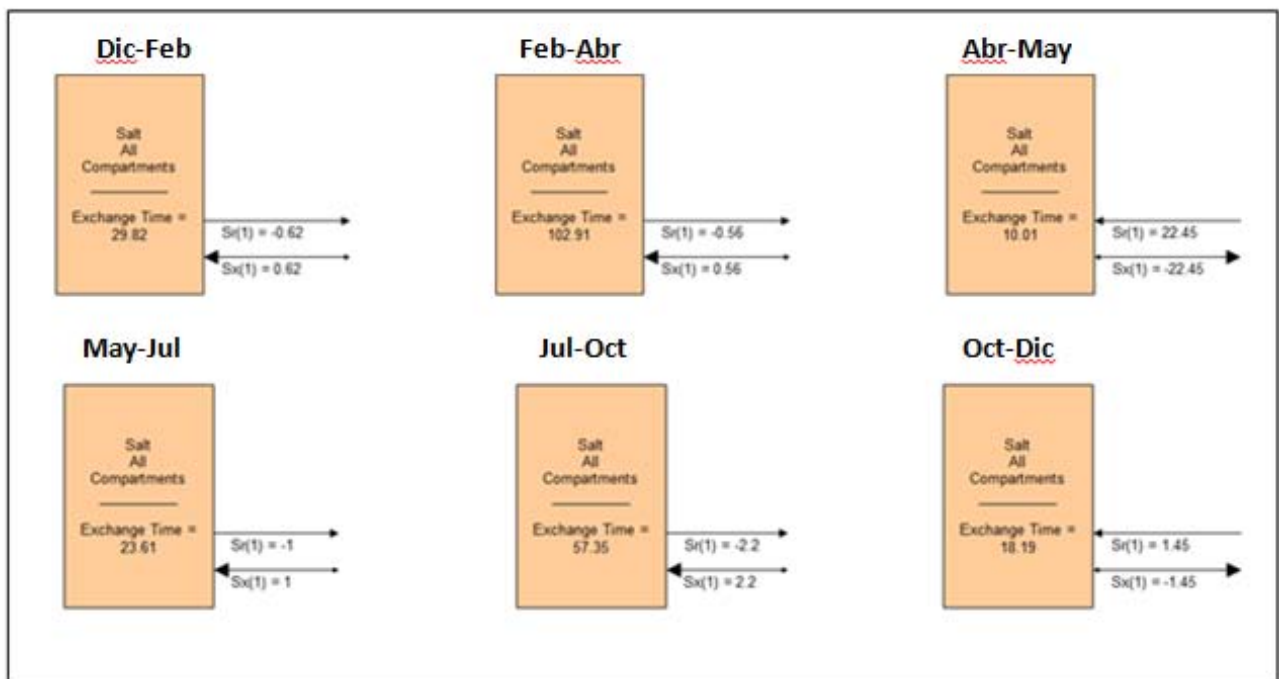


Figura 36. Balance de sal para toda la Laguna sin flujo de entrada del REALCO.

Los resultados del TI por sectores y por períodos mostraron que sin el REALCO, el sector interior de la laguna, el más alejado del mar, tuvo los mayores valores llegando a alcanzar 1,187.9 días para el período 1 (Dic-Feb) y 451.9 como promedio anual en ese compartimento. Los sectores central y externo presentaron TI menores con oscilaciones entre 9.4 y 36.7 días para el sector central, así como 3.7 y 29.2 días para el sector externo. Los promedios anuales del parámetro TI para este escenario en los sectores central y externo fueron de 22 y 12.1 días respectivamente (Tabla 20), ilustrando el aumento del intercambio con el mar hacia la parte externa de la laguna.



Tabla 20. Comportamiento del Tiempo de Intercambio de agua por sectores en el escenario sin REALCO.

Período	Intervalo	Interior	Central	Externo
1	Dec-Feb	1187.9	24.8	10.0
2	Feb-Abr	540.5	27.1	29.2
3	Abr-May	303.8	23.9	3.7
4	May-Jul	385.4	36.7	8.5
5	Jul-Oct	135.7	9.4	14.9
6	Oct-Dec	157.7	10.3	6.0
<b>Promedio</b>		<b>451.9</b>	<b>22.0</b>	<b>12.1</b>

El escenario con la incorporación al modelo de los flujos calculados para el REALCO mostró valores menores del TI para todos los sectores y períodos (Figs. 37 y 38).

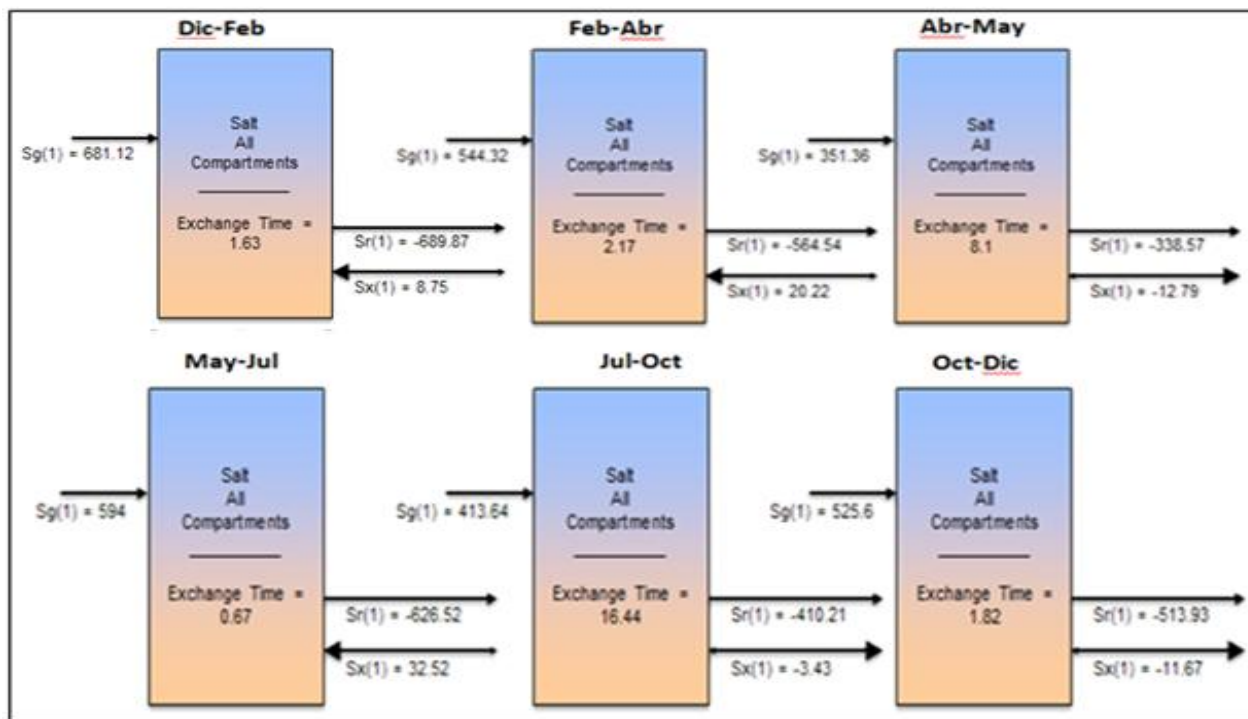


Figura 37. Balances de sal y agua por períodos para toda la Laguna con flujo de entrada del REALCO. Se indica el tiempo de Intercambio (Exchange Time).

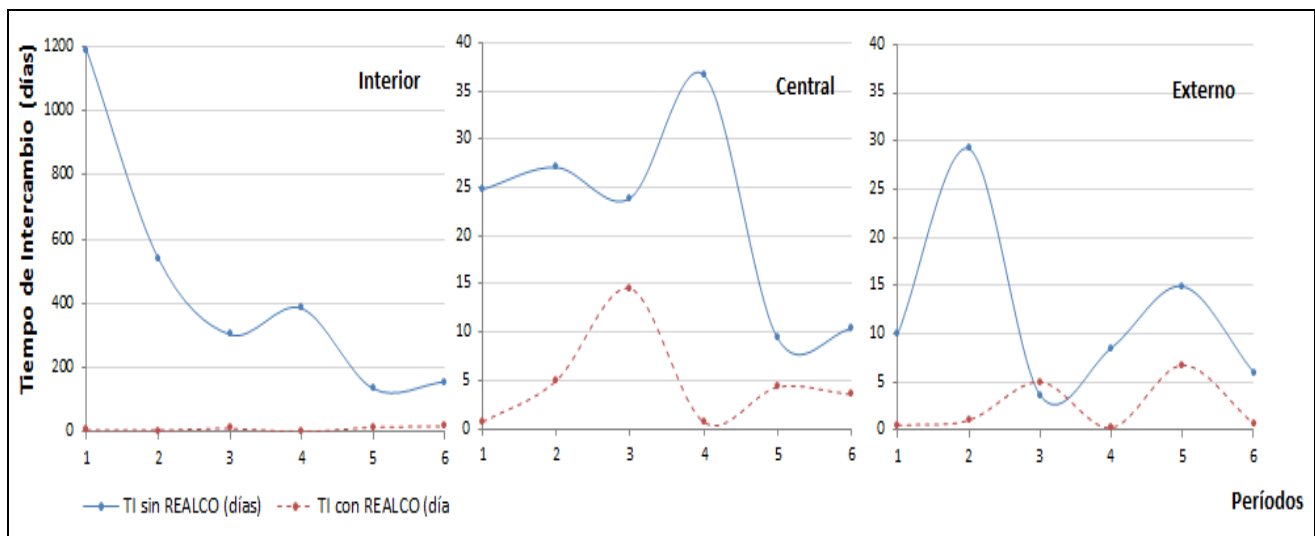


Figura 38. Comparación del Tiempo de Intercambio entre los escenarios con y sin REALCO por sectores y períodos.

Al comparar el comportamiento del TI para la laguna en todo su conjunto se observó que el valor promedio se redujo de 40.3 días en el escenario sin REALCO a 5.1 días en el escenario con REALCO (Fig. 39).

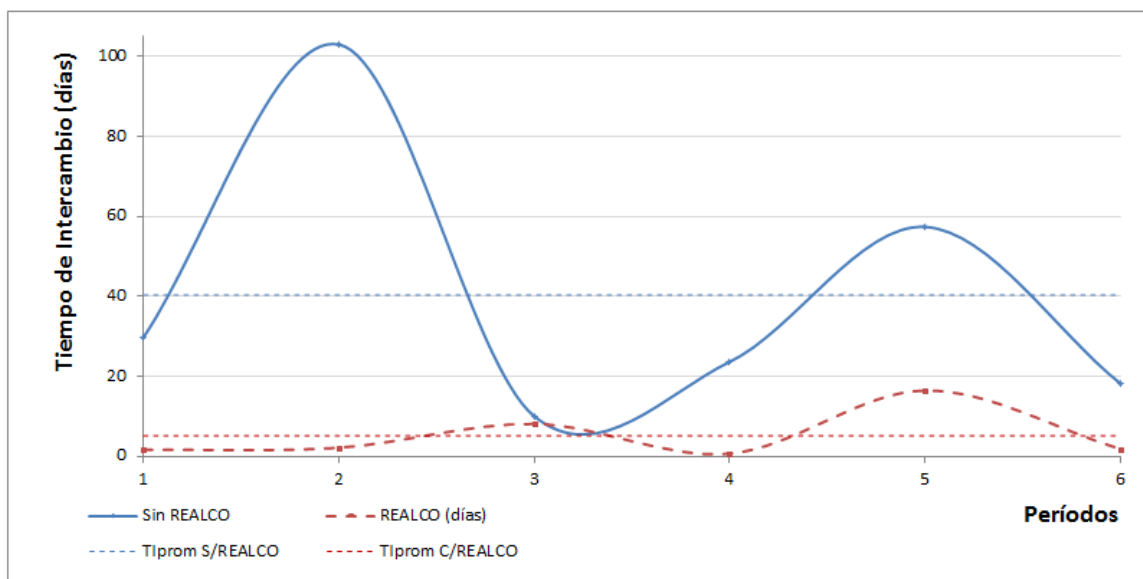


Figura 39. Comparación del Tiempo de intercambio (TI) por períodos en toda la laguna en su conjunto para los escenarios sin y con REALCO.

Según los resultados del modelo, la reducción más significativa del TI ocurrió en el período 2 (Feb-Abr) al pasar de 102.9 días en el escenario 1 a 2.2 días en el escenario con REALCO. El cambio de menor magnitud del parámetro TI ocurrió durante 3 (Abr-May) con una diferencia de 1.9 días (Tabla. 21).

Tabla 21. Tiempo de Intercambio de agua por períodos en Laguna Larga considerando los escenarios sin y con REALCO.

Período	Intervalo	Tiempo de Intercambio (días)		Diferencia (días)	Caudal REALCO (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )
		Sin REALCO	REALCO (días)		
1	Dec-Feb	29.8	1.6	28.2	18,921.6
2	Feb-Abr	102.9	2.2	100.7	15,120.0
3	Abr-May	10.0	8.1	1.9	9,763.2
4	May-Jul	23.6	0.7	22.9	16,502.4
5	Jul-Oct	57.4	16.4	40.9	11,491.2
6	Oct-Dec	18.2	1.8	16.4	14,601.6
<b>Promedio</b>		<b>40.3</b>	<b>5.1</b>	<b>35.2</b>	<b>14,400.0</b>

### 3.7.3. Balance de Fósforo y Metabolismo Neto para los escenarios sin y con REALCO

El balance del fósforo representado por  $\Delta P$ , realizado mediante el modelo de LOIZC, considerando todos los sectores de Laguna Larga en su conjunto para el escenario 1 (sin REALCO), resultó negativo para todos los períodos del año a excepción del período Abr-May. Los períodos en que la laguna se comportó como un sumidero de fósforo (Dic-Feb, Feb-Abr, May-Jul, Jul-Oct y Oct-Dic), mostraron valores que oscilaron entre  $-0.62 \text{ mol d}^{-1}$  en el período May-Jul y  $-36.24 \text{ mol d}^{-1}$  en el período Dic-Feb. Durante el período de Abr-May la laguna se comportó como una fuente de fósforo con un valor de  $\Delta P = 32.84 \text{ mol d}^{-1}$  (Tabla 22, Fig. 40).

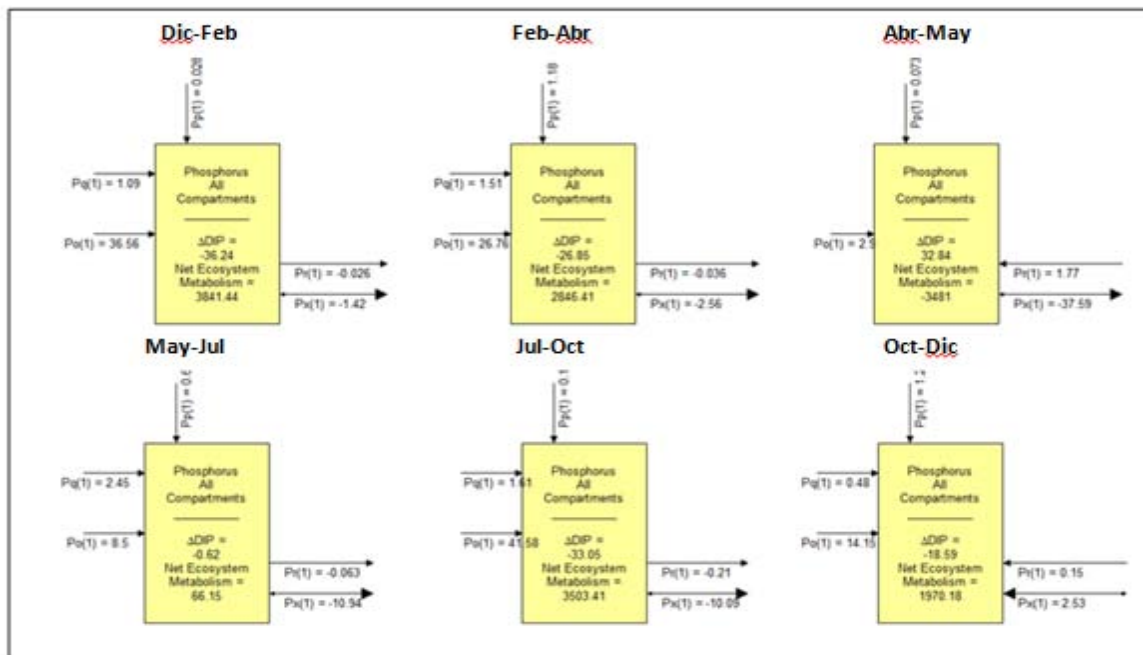


Figura 40. Balance del fósforo ( $\text{mol P d}^{-1}$ ) para toda la Laguna sin flujo de entrada del REALCO (escenario 1).

Integrando estos valores sobre el período anual, la laguna se comportó como un sumidero de fósforo, presumiblemente acumulando fósforo en sus sedimentos y como biomasa bentónica a una tasa media de  $-20.1 \text{ mol P d}^{-1}$  y acumulando  $-7,328.9 \text{ mol P}$  anualmente.

Tabla 22. Flujos de fósforo y metabolismo ecosistémico aparente en Laguna Larga obtenidos del modelo LOICZ bajo el escenario 1 (sin REALCO). Los flujos negativos indican salida del sistema.  $P_{\text{exp/imp}}$  corresponde al flujo neto de exportación (-) o importación (+) entre la laguna y el mar.

Período	Intervalo	Duración (días)	Intercambio de P con el mar ( $\text{mol P d}^{-1}$ )			$\Delta P$ ( $\text{mol P d}^{-1}$ )	P-R ( $\text{mol C d}^{-1}$ )
			Pr	Px	$P_{\text{exp/imp}} (Pr+Px)$		
1	Dec-Feb	68	-0.026	-1.42	-1.45	-36.24	3,841.44
2	Feb-Abr	63	-0.036	-2.56	-2.60	-26.85	2,846.41
3	Abr-May	28	1.770	-37.59	-35.82	32.84	-3,481.00
4	May-Jul	57	-0.063	-10.94	-11.00	-0.62	66.15
5	Jul-Oct	89	-0.210	-10.09	-10.30	-33.05	3,503.41
6	Oct-Dec	60	0.150	2.53	2.68	-18.59	1,970.18
<b>Media ponderada</b>		<b>60.8</b>	<b>0.088</b>	<b>-7.343</b>	<b>-7.255</b>	<b>-20.079</b>	<b>2,128.381</b>
<b>Integración anual (año<sup>-1</sup>)</b>		<b>365</b>	<b>32.243</b>	<b>-2,680.2</b>	<b>-2,647.9</b>	<b>-7,328.9</b>	<b>776,858.9</b>

En contraste, el modelo del balance de fósforo de la laguna en su conjunto considerando los flujos aportados por el REALCO (escenario 2) mostró que la laguna dejaría de funcionar como un sumidero permanente de este elemento, para operar principalmente como fuente del mismo (períodos de Feb-Abr, Abr-May, May-Oct y Oct-Dic, ver Figs. 41 y 42), con lo cual dejaría de acumularlo e iniciaría un proceso de depuración (Tabla 23). En promedio, la laguna proveería  $61.3 \text{ mol d}^{-1}$  de fósforo, y sobre una base anual se estarían depurando 22,357 mol de P de la misma, principalmente de sus sedimentos.

A pesar de acumular esta cantidad de fósforo, de acuerdo al modelo de LOICZ Laguna Larga adicionalmente también exportó durante casi todo el tiempo parte del fósforo que recibió en 2008. Solamente durante el período 6 (oct-dic) el intercambio neto con el mar fue en dirección a la laguna (Tabla 22), mientras que aún en el periodo de menores lluvias (3, abr-may) el flujo neto fue hacia el mar, impulsado por el flujo por mezcla. En promedio, la exportación de la laguna hacia el mar fue de  $-7.255 \text{ mol P d}^{-1}$  de fósforo y anualizó  $-2,647.9 \text{ mol de P}$  durante 2008. Estos flujos indican que en las condiciones naturales de 2008, lo que la laguna capturaba de P en sus sedimentos o biomasa era aproximadamente el triple de lo que exportaba hacia al mar.

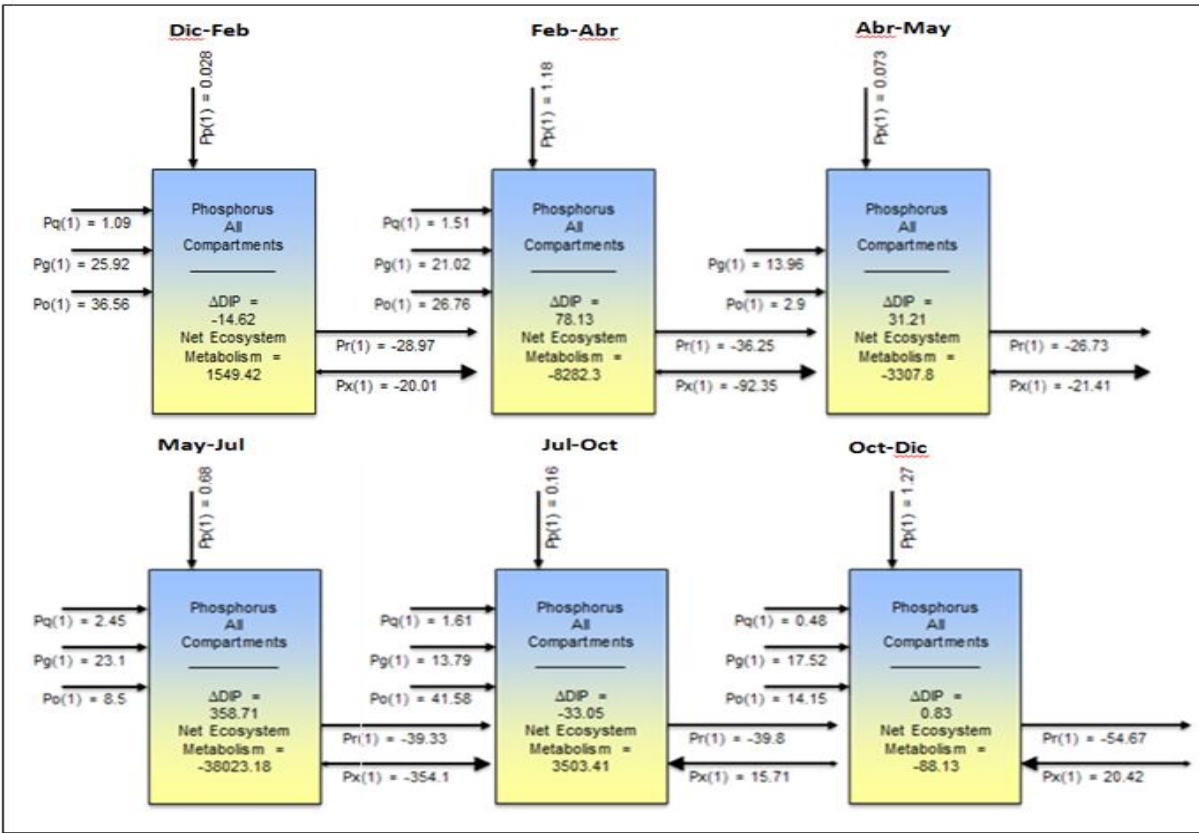


Figura 41. Balance del fósforo para toda la Laguna con flujo de entrada del REALCO (escenario 2).

Consecuentemente con lo anterior, el modelo predice que Laguna Larga, con el REALCO operando (bajo las condiciones de oleaje de 2011-2012), exportaría permanentemente fósforo hacia el mar (Tabla 23), y en cantidades considerablemente más elevadas que en sus períodos de exportación bajo condiciones naturales, alcanzando una media de  $-108 \text{ mol P d}^{-1}$  y un total anualizado de 39,405 mol de P. Estos valores indican que con el REALCO la laguna estaría exportando del orden de 15 veces más fósforo que bajo condiciones naturales, y que no solamente se estaría trasladando hacia el mar el fósforo de la columna de agua, sino que también se estaría eliminando el acumulado en la laguna, principalmente en los sedimentos y biomasa. (Fig. 43).

Tabla 23. Flujos de fósforo y metabolismo ecosistémico aparente en Laguna Larga obtenidos del modelo LOICZ bajo el escenario 2 (CON REALCO). Los flujos negativos indican salida del sistema.  $P_{exp/imp}$  corresponde al flujo neto de exportación (-) o importación (+) entre la laguna y el mar.

Período	Intervalo	Duración (días)	Intercambio de P con el mar ( $\text{mol P d}^{-1}$ )			$\Delta P$ ( $\text{mol P d}^{-1}$ )	P-R ( $\text{mol C d}^{-1}$ )
			Pr	Px	$P_{exp/imp}(Pr+Px)$		
1	Dec-Feb	68	-28.970	-20.010	-48.98	-14.62	1,549.42
2	Feb-Abr	63	-36.250	-92.350	-128.60	78.13	-8,282.30
3	Abr-May	28	-26.730	-21.410	-48.14	31.21	-3,307.80
4	May-Jul	57	-39.330	-354.100	-393.43	358.71	-38,023.18
5	Jul-Oct	89	-39.800	15.710	-24.09	-33.05	3,503.41
6	Oct-Dec	60	-54.670	20.420	-34.25	0.83	-88.132
<b>Media ponderada</b>		<b>60.8</b>	<b>-38.538</b>	<b>-69.421</b>	<b>-107.959</b>	<b>61.25</b>	<b>-6,492.73</b>
<b>Integración anual (<math>\text{año}^{-1}</math>)</b>		<b>365</b>	<b>-14,066.360</b>	<b>-25,338.520</b>	<b>-39,404.880</b>	<b>22,357.057</b>	<b>-236,984,8.001</b>

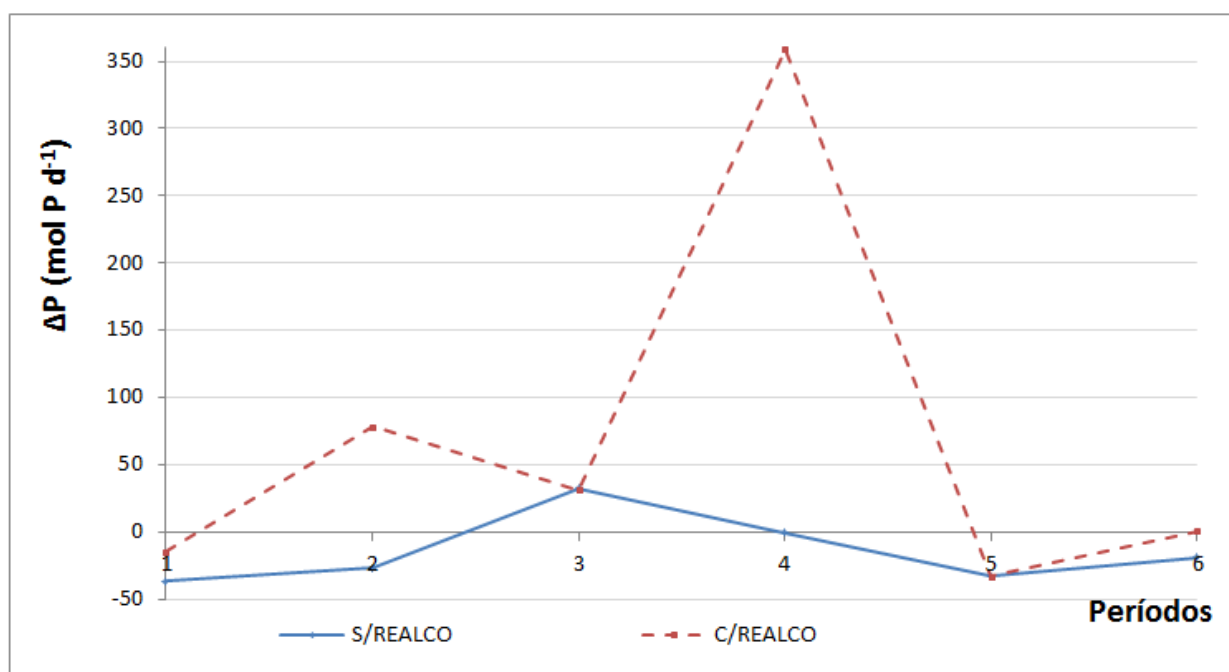


Figura 42. Comparación del Balance de Fósforo ( $\Delta P$ ) para los escenarios sin y con REALCO en toda la laguna en su conjunto por periodos.

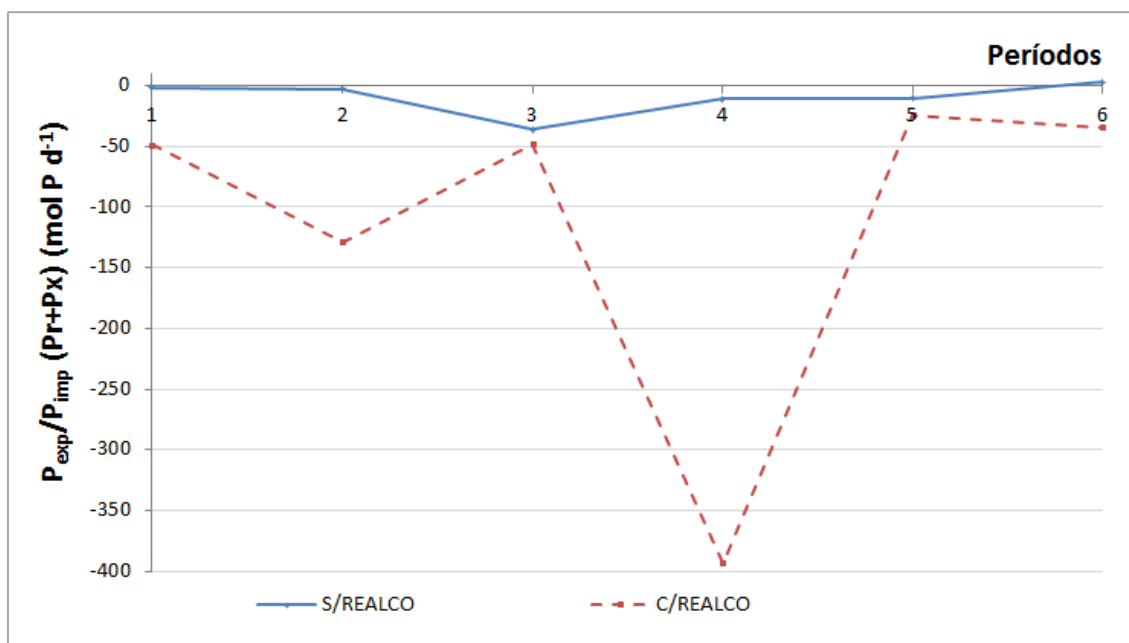


Figura 43. Cambios en los niveles de exportación de fósforo entre los escenarios sin y con REALCO en toda la laguna en su conjunto por períodos.

El metabolismo neto aparente del ecosistema de acuerdo con el modelo empleado para el escenario 1, mostró valores de (P-R) positivos durante todo el año a excepción del período Abr-May (Fig. 40), consistentes con el funcionamiento de Laguna Larga como un sumidero de fósforo y carbono, en el que la producción excedente a la respiración se captura principalmente como materia orgánica sedimentada y crecimiento de la biomasa vegetal, a una tasa media de 2,128 mol C d<sup>-1</sup> (Tabla 22). Sobre una base anual, estos valores implican 776,859 moles de carbono capturado en la laguna durante 2008. En contraste, en el escenario 2, con los aportes del REALCO, mostró valores negativos de P-R durante la mayoría de los períodos (Feb-Abr, Abr-May, May-Jul y Oct-Dic, Fig. 42), y solamente en los períodos de Dic-Feb y Jul-Oct se comportó de manera contraria, aunque la magnitud de sus valores fueron menores que los períodos correspondientes del escenario 1. (Fig. 44). Estos resultados implican una respiración neta promedio de -6493 mol C d<sup>-1</sup> y un balance anual neto de -2,369,848 mol C respirados en Laguna Larga (Tabla 23), que ilustran el efecto de renovación de su agua, que permite la oxidación de la materia orgánica acumulada en la laguna durante largo tiempo.



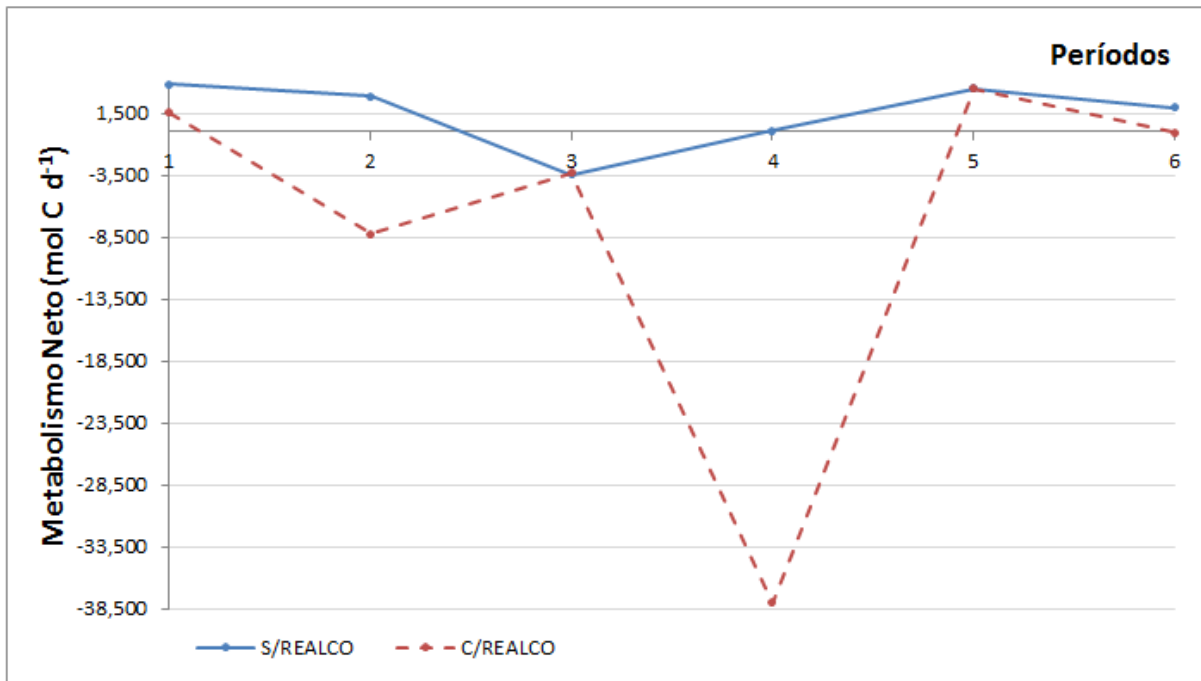


Figura 44. Comparación del Metabolismo Neto para los escenarios sin y con REALCO en toda la laguna en su conjunto por períodos.

#### 3.7.4. Balance de Nitrógeno para los escenarios sin y con REALCO

Para el Escenario 1, sin REALCO y tomando en cuenta todos los sectores en su conjunto el modelo LOICZ mostró que durante todos los períodos del año Laguna Larga funcionó como un sumidero de nitrógeno, con un mínimo registrado para el período Abr-May de  $\Delta\text{DIN} = -98.1 \text{ mol N d}^{-1}$  y un máximo de  $\Delta\text{DIN} = -477.3 \text{ mol N d}^{-1}$  para el período Jul-Oct. (Fig. 45). En promedio, la laguna capturó  $-330.9 \text{ mol N d}^{-1}$  y anualizó un total de 120,765 moles de nitrógeno capturados durante 2008 (Tabla 24).

Bajo condiciones naturales, Laguna Larga exportó nitrógeno hacia el mar, con valores que oscilaron entre  $-8.3$  y  $124.0 \text{ mol N d}^{-1}$ , con un promedio de  $\text{mol } -69.8 \text{ N d}^{-1}$  y un total anual de 25,473 mol N exportados durante el año 2008. Estas cantidades corresponden aproximadamente a una quinta parte de lo que capturó hacia sus sedimentos y biomasa.

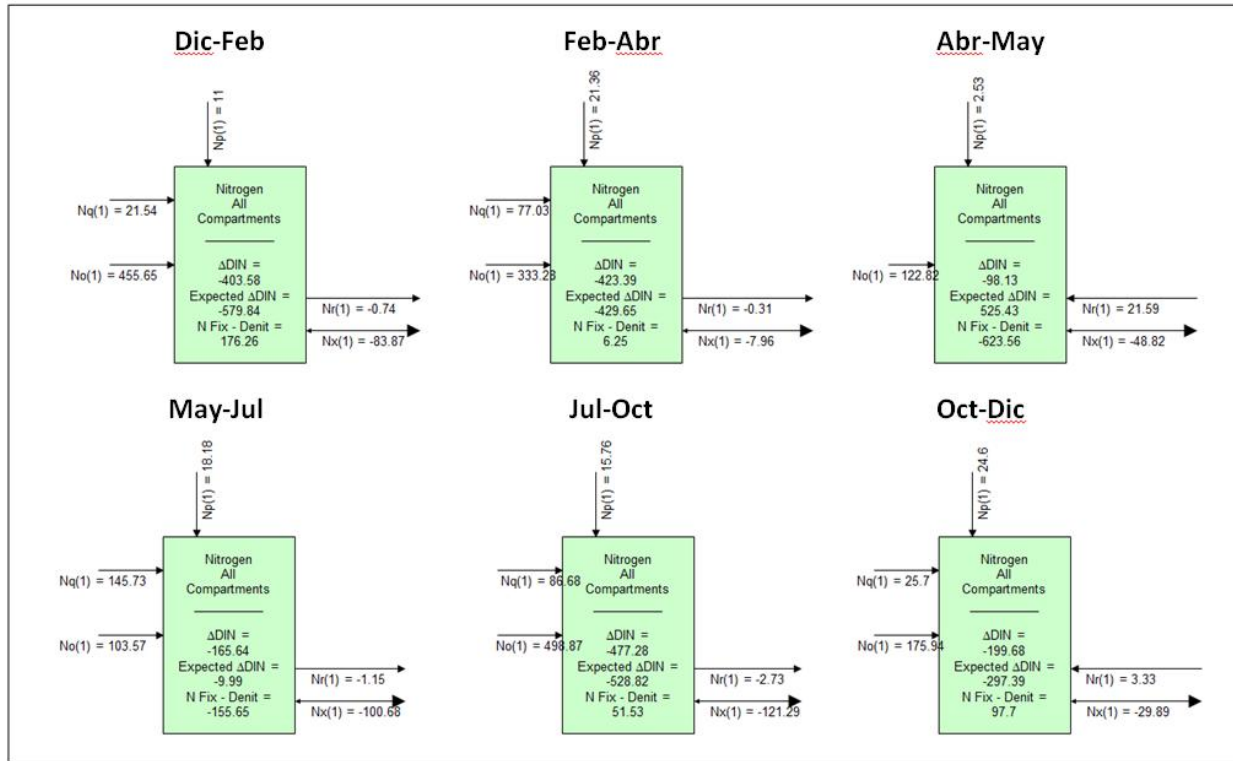


Figura 45. Balance del Nitrógeno para toda la Laguna sin flujo de entrada del REALCO (escenario 1).

Tabla 24. Flujos de nitrógeno y balance neto aparente de fijación de nitrógeno – desnitrificación en Laguna Larga obtenidos del modelo LOICZ bajo el escenario 1 (SIN REALCO). Los flujos negativos indican salida del sistema.  $N_{exp/imp}$  corresponde al flujo neto de exportación (-) o importación (+) entre la laguna y el mar.

Período	Intervalo	Duración (días)	Intercambio de N con el mar ( $\text{mol N d}^{-1}$ )			$\Delta DIN$ ( $\text{mol N d}^{-1}$ )	Nfix-Denit ( $\text{mol N d}^{-1}$ )
			Nr	Nx	$N_{exp}/N_{imp}$ (Pr+Px)		
1	Dec-Feb	68	-0.7	-83.9	-84.6	-403.6	176.3
2	Feb-Abr	63	-0.3	-8.0	-8.3	-423.4	6.3
3	Abr-May	28	21.6	-48.8	-27.2	-98.1	-623.6
4	May-Jul	57	-1.2	-100.7	-101.8	-165.6	-155.7
5	Jul-Oct	89	-2.7	-121.3	-124.0	-477.3	51.5
6	Oct-Dec	60	3.3	-29.9	-26.6	-199.7	97.7
<b>Media ponderada</b>		<b>60.8</b>	<b>1.2</b>	<b>-71.0</b>	<b>-69.8</b>	<b>-330.9</b>	<b>-9.6</b>
<b>Integración anual (año<sup>-1</sup>)</b>		<b>365</b>	<b>426.0</b>	<b>-25,898.6</b>	<b>-25,472.6</b>	<b>-120,766.7</b>	<b>-3,504.9</b>

Una vez considerado el flujo de nitrógeno asociado estequiométricamente al fósforo, el balance neto aparente de fijación – denitrificación de nitrógeno (Nfix-denit) en el escenario 1 favoreció la fijación de nitrógeno durante cuatro de los períodos (Dic-Feb, Feb-Abr, Jul-Oct y Oct-Dic), con valores de 176.26, 6.25, 51.53 y 97.7 mol N d<sup>-1</sup> respectivamente y favoreció la denitrificación durante los períodos Abr-May y May-Jul con valores de -623.56 y -155.65 mol N d<sup>-1</sup> respectivamente. (Fig. 45). En el resultado medio, la laguna se comportó como un sistema ligeramente desnitrificador neto de nitrógeno, con una media de -9.6 mol N d<sup>-1</sup> y un total anual de -3,503.6 moles de N desnitrificados (Tabla 24).

Con la incorporación del REALCO al modelo (escenario 2) el modelo LOICZ del balance de nitrógeno pronosticó que la laguna mantendría un comportamiento de sumidero solamente durante los períodos Feb-Abr, Abr-May y Jul-Oct, tomando en consideración todos los sectores de conjunto. El resto de los períodos la laguna pasaría a ser una fuente de nitrógeno, en contraste con el escenario sin flujos del REALCO. (Fig. 46). En promedio, su comportamiento con el efecto del REALCO sería de fuente neta de nitrógeno, aportando una media de 669.1 mol N d<sup>-1</sup> y un total anual de 244,204 moles de nitrógeno (Tabla 25).

Tabla 25. Flujos de nitrógeno y balance neto aparente de fijación de nitrógeno – desnitrificación en Laguna Larga obtenidos del modelo LOICZ bajo el escenario 2 (CON REALCO). Los flujos negativos indican salida del sistema. N<sub>exp/imp</sub> corresponde al flujo neto de exportación (-) o importación (+) entre la laguna y el mar.

Período	Intervalo	Duración (días)	Intercambio de N con el mar (mol N d <sup>-1</sup> )			ΔDIN (mol N d <sup>-1</sup> )	Nfix-Denit (mol N d <sup>-1</sup> )
			Nr	Nx	N <sub>exp</sub> /N <sub>imp</sub> (Pr+Px)		
1	Dec-Feb	68	-824.7	-1,185.7	-2,010.4	877.6	1,111.5
2	Feb-Abr	63	-315.3	-287.6	-602.9	-96.4	-1,346.6
3	Abr-May	28	-325.5	-27.8	-353.3	-100.2	-599.5
4	May-Jul	57	-714.9	-3,259.2	-3,974.1	3,141.7	-2,597.7
5	Jul-Oct	89	-509.4	188.9	-320.5	-477.3	51.5
6	Oct-Dec	60	-1,181.8	-240.9	-1,422.8	946.9	933.6
<b>Media ponderada</b>		<b>60.8</b>	<b>-663.2</b>	<b>-775.2</b>	<b>-1,438.3</b>	<b>669.1</b>	<b>-311.0</b>
<b>Integración anual (año<sup>-1</sup>)</b>		<b>365</b>	<b>-242,053.6</b>	<b>-282,942.3</b>	<b>-524,995.9</b>	<b>244,209.2</b>	<b>-113,509.2</b>

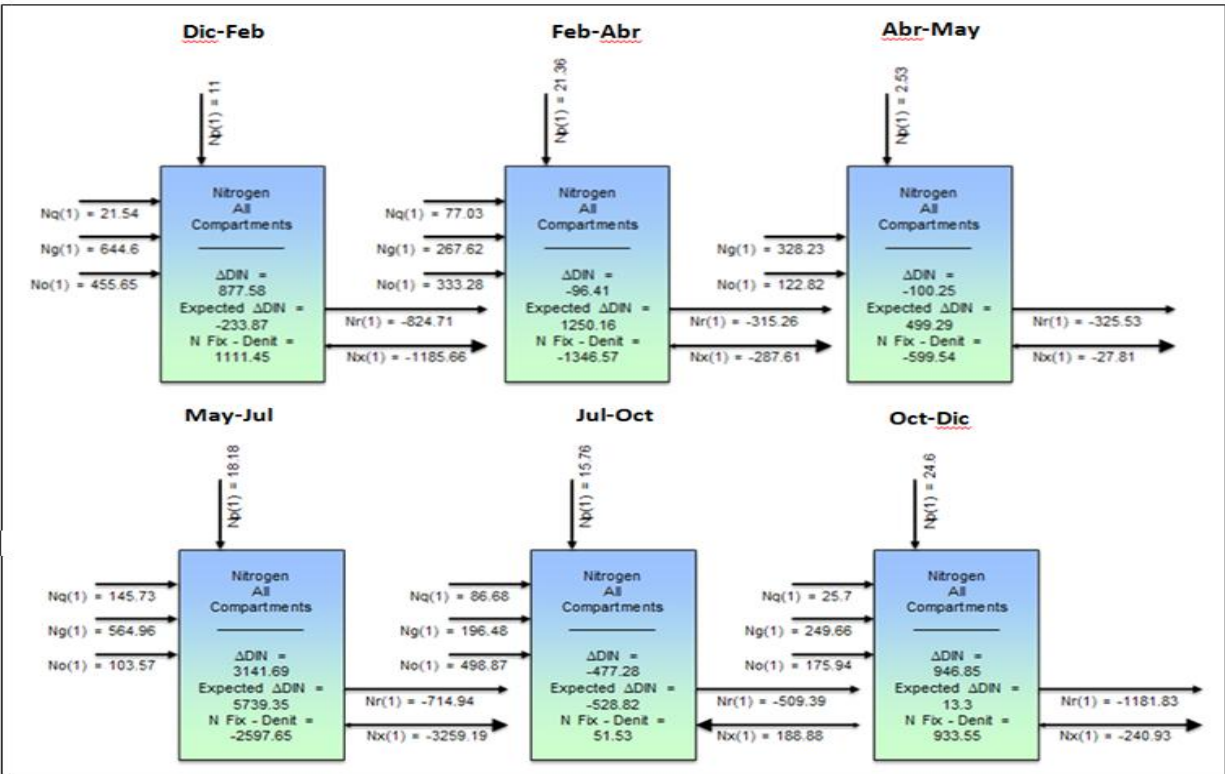


Figura 46. Balance del Nitrógeno para toda la Laguna con flujo de entrada del REALCO (escenario 2).

Asociado a este comportamiento como fuente, su carácter de exportadora de nitrógeno hacia el mar se intensificaría al igual que sucedió en el caso del fósforo. En promedio la laguna con el REALCO operando estaría exportando una media de  $-1,428.0 \text{ mol N d}^{-1}$  y un total anual de  $-524,996$  moles de N. Estos flujos equivaldrían en este caso aproximadamente al doble de lo que la laguna aportaría como fuente de nitrógeno.

En el escenario 2, con el efecto renovador de agua del REALCO, el Modelo LOICZ predijo que el balance neto aparente de fijación – denitrificación de nitrógeno (Nfix-denit) continuaría oscilando hacia uno y otro lado entre estaciones, pero el resultado sería una intensificación neta hacia la desnitrificación, con una media ponderada de  $-311.6 \text{ mol N d}^{-1}$  y un total anual de  $-113,509$  moles de N desnitrificados (Tabla 25). Estos valores implican un incremento de más de 30 veces de lo predicho sin el REALCO.

### **3.7.5. Modelación complementaria**

Los modelos de LOICZ son muy poderosos para tener estimaciones de los tiempos de residencia y de los principales procesos biogeoquímicos con base en datos hidrológicos y de nutrientes básicos, pero también tienen limitaciones importantes, asociadas a los numerosos supuestos que involucran (Gordon *et al.*, 1996; Swaney *et al.*, 2011; Smith *et al.*, 2010).

Uno de estos supuestos esenciales es que el sistema se encuentra aproximadamente en estado estacionario, lo cual es indispensable asumir para resolver los balances de masa de manera sencilla y obtener las inferencias deseadas. Sin embargo, la enorme magnitud relativa del flujo de agua pronosticado para REALCO con respecto a los otros flujos, lleva implícito que dicho estado estacionario seguramente no se cumplirá bajo el escenario 2, en que el REALCO esté operando. Por ello, las predicciones en este escenario, aunque pueden dar una orientación general del sentido en que son de esperar los cambios, también tienen las limitaciones implícitas en que este supuesto no se cumple en este caso, y conviene tomarlo en cuenta.

En particular, en el caso de los balances de fósforo y nitrógeno, la aproximación realizada con el modelo LOICZ es limitada, pues el gran flujo de agua provisto por el REALCO seguramente generará cambios importantes en las concentraciones dentro del sistema (de echo ese es uno de los objetivos principales del REALCO), que son parte fundamental del balance de masa de los mismos. Por ello, y para proponer la ruta que podría acercarnos a modelos más completos del efecto del REALCO, se hicieron algunas modelaciones sencillas complementarias al modelo LOICZ que a continuación se presentan.

#### **3.7.5.1 Efecto de dilución**

De entre los aspectos no considerados en los modelos de LOICZ, el efecto más inmediato y de mayor efecto de la introducción de grandes volúmenes de agua de mar por el REALCO a Laguna Larga será presumiblemente la dilución del agua de la

misma. En el caso de los nutrientes, este efecto implicará la reducción significativa de las concentraciones de nitrógeno y fósforo, dado que éstas son considerablemente menores en el agua de la zona costera que en la de la laguna.

Por ello, se realizó un ejercicio para modelar y pronosticar dicha dilución, aplicándolo en particular al caso del fósforo, de la siguiente manera:

$$[P_{fin}] = \frac{\overbrace{([P_{ini}] \times (V_{lag} - Q))}^{\text{Masa que quedó}} + \overbrace{([P_{oce}] \times Q)}^{\text{Masa nueva}}}{\underbrace{V_{lag}}_{\text{Vol. de agua vieja}}}$$

**Donde:**

- [P<sub>fin</sub>] Concentración final de fósforo en la laguna
- [P<sub>ini</sub>] Concentración inicial de fósforo en la laguna
- [P<sub>oce</sub>] Concentración de fósforo en el océano
- V<sub>lag</sub> Volumen total de la laguna
- Q Caudal aportado por el REALCO

Este cálculo se realizó tomando en cuenta el flujo previsto para cada período en intervalos diarios, y se grafica en las figuras 47 a la 52 la evolución temporal de la concentración de fósforo en el interior de la laguna, comparándola con el rango de las concentraciones oceánicas observadas *in situ* durante 2008. Los resultados obtenidos para las concentraciones de fósforo final de la laguna, considerando que el flujo de agua que aporta el REALCO se reinició con cada período, mostraron que el sistema lagunar tardaría en igualar las concentraciones oceánicas medidas *in situ* durante el año (rango de 1.20 - 1.43 mmol m<sup>-3</sup>) solamente 25 días en el período de Dic-feb, 34 en Feb-Abr, 88 para Abr-May, 33 días May-Jul, 30 en Jul-Oct y 31 días durante Oct-Dic. (Figs. 47 a la 52).

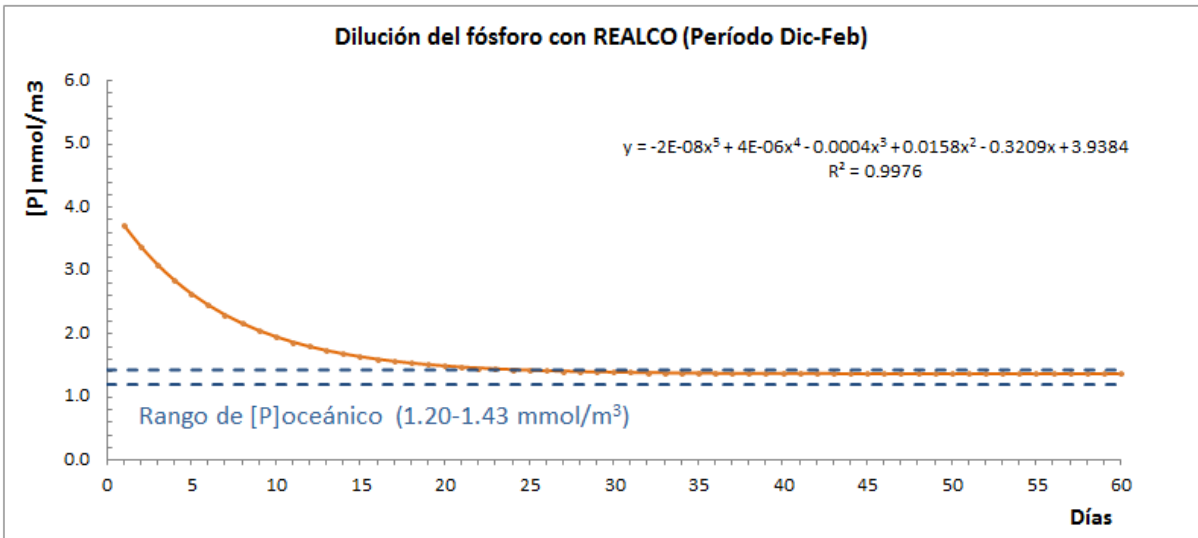


Figura 47. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Dic-Feb.

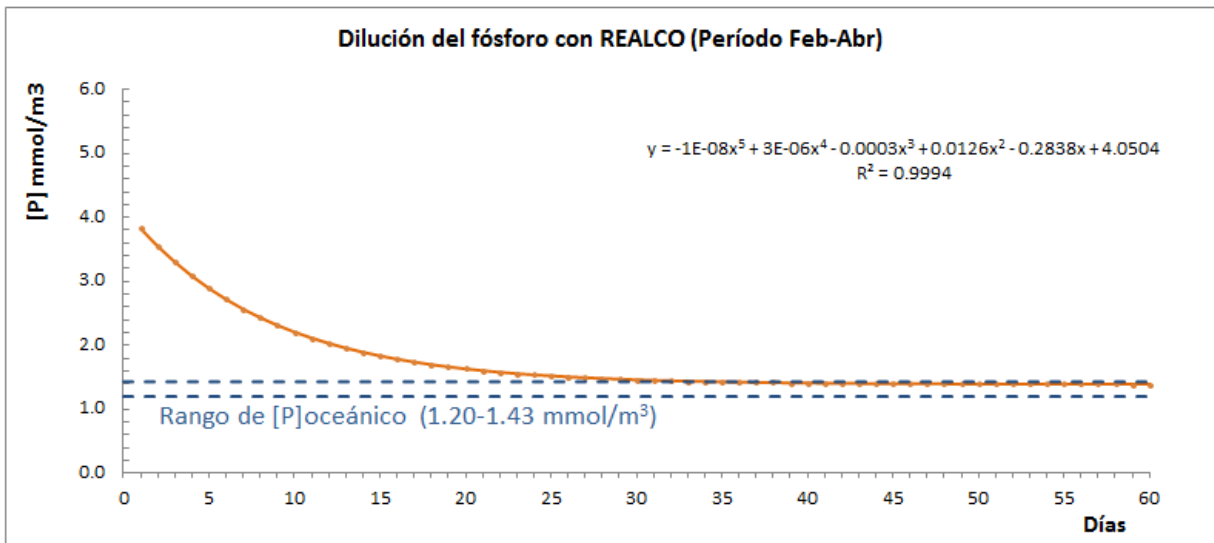


Figura 48. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Feb-Abr.

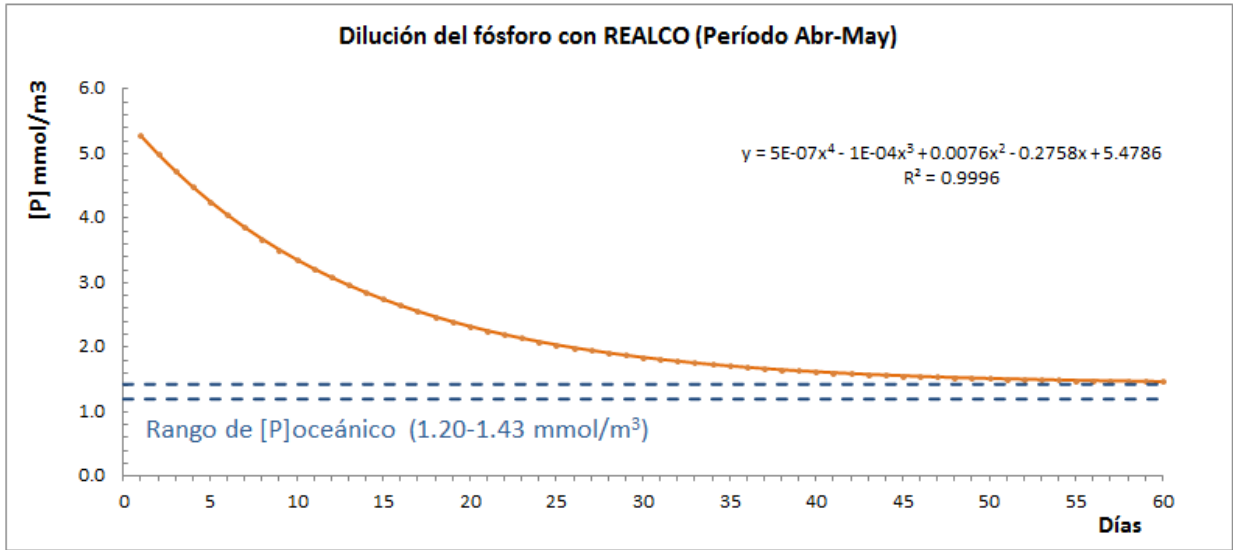


Figura 49. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Abr-May.

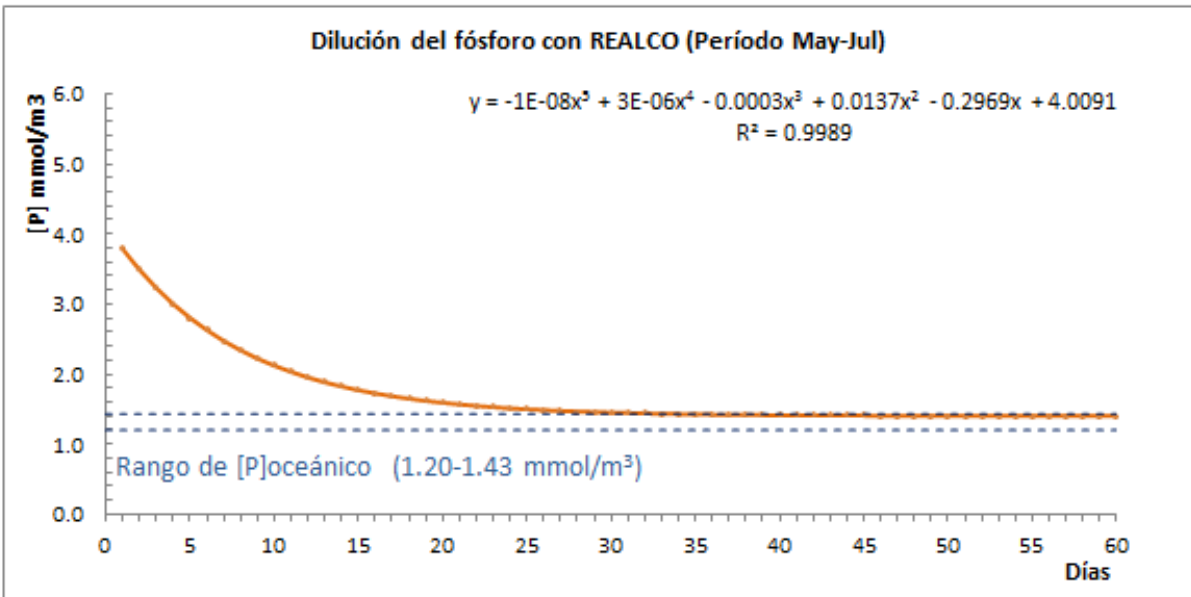


Figura 50. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período May-Jul.



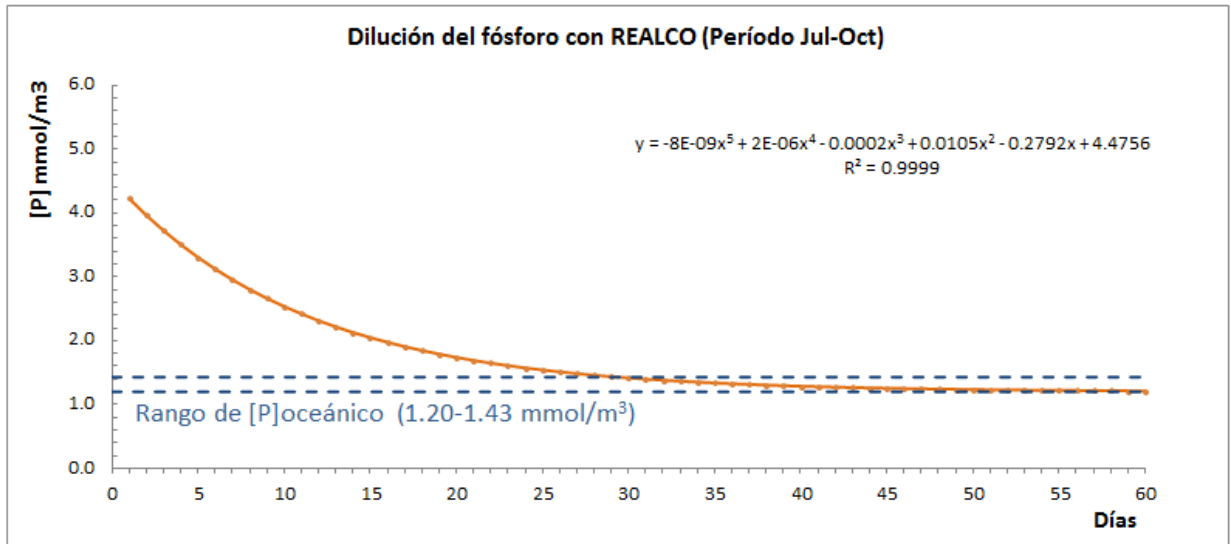


Figura 51. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Jul-Oct.

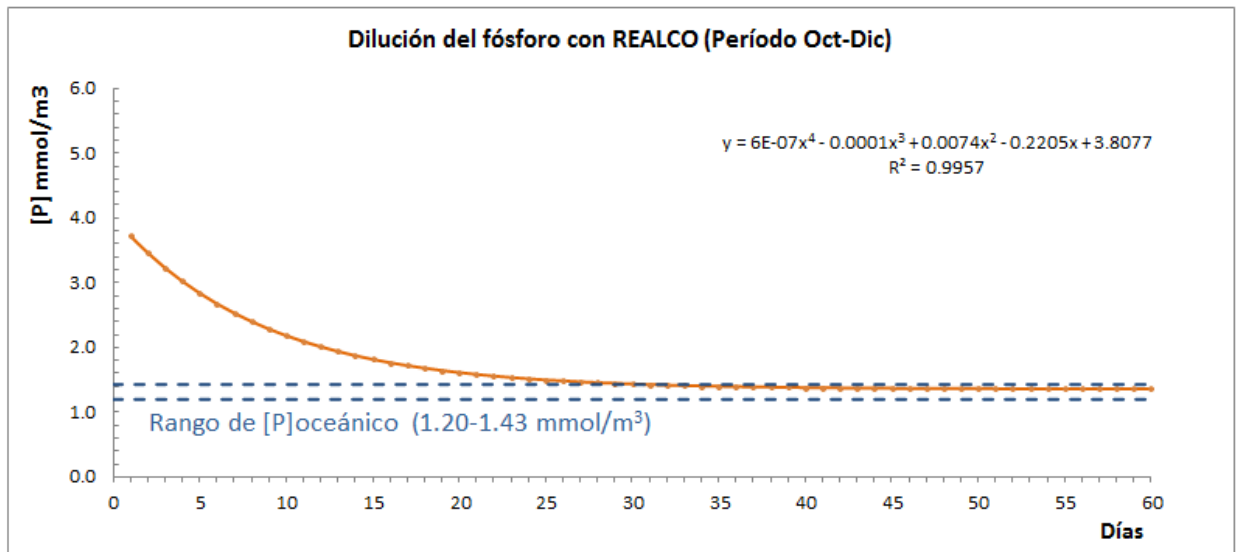


Figura 52. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Oct-Dic.

Asimismo, se realizó un pronóstico de la evolución temporal de la concentración de fósforo en la laguna sin suponer el reinicio del bombeo de agua del REALCO en cada período, sino en forma anidada, partiendo en cada caso de la concentración final del período anterior, e iniciando el funcionamiento del REALCO en el período Dic-Feb (Fig.

53). En este pronóstico, se observó que se alcanzaría el rango de concentraciones de fósforo oceánico a los 30 días del inicio del flujo, y que los valores se mantuvieron dentro de este rango, aun cuando los aportes de residuales a la laguna presentaron concentraciones superiores a la oceánica.

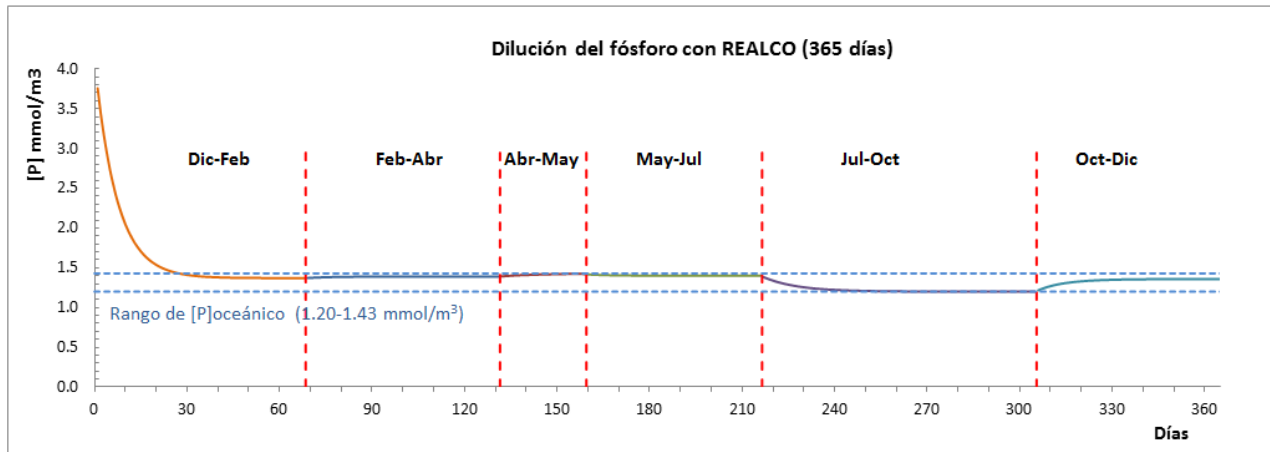


Figura 53. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga debido a la dilución considerando los períodos de manera anidada a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Dic-Feb.

De manera general, estos resultados muestran que si bien en la escala de uno o dos días el efecto de dilución no implicaría un alejamiento significativo del estado estacionario (y por tanto las predicciones de los modelos LOICZ tendrían cierta validez a esta escala), en la escala de decenas de días esta condición ya no se cumpliría, y una modelación más robusta requeriría de la consideración de los cambios de concentración por dilución, así como de otros procesos que presumiblemente se derivarían de las nuevas concentraciones.

### 3.7.5.2 Estimación de la difusión desde el sedimento

En la medida que los flujos de agua aportados por el REALCO diluyen las concentraciones en el agua de la laguna, se perdería la condición de equilibrio entre la columna de agua y el agua intersticial del sedimento implícita en el estado estacionario asumido por el modelo de LOICZ, y la dilución podría a su vez provocar un incremento

en la difusión desde los sedimentos hacia la columna de agua para recuperar el equilibrio con la nueva concentración de la masa de agua lagunar, que podría compensar parcialmente dicha dilución.

Para modelar de manera sencilla este efecto para el caso del fósforo, se utilizó la primera Ley de Fick aplicada a la difusión desde los sedimentos según Cheng *et al.* (2014). Asimismo, y dado que no se cuenta con información detallada sobre las condiciones particulares de la columna sedimentaria en Laguna Larga (González-De Zayas *et al.*, 2013), se incorporaron algunas suposiciones sencillas sobre los parámetros implicados en el cálculo, incluyendo que el sedimento tuviera, inicialmente, concentraciones de fósforo similares a las del agua de la laguna, y que la capa superficial del sedimento, en la que el flujo por difusión iría reduciendo la concentración en el mismo, sería de un espesor de aproximadamente un centímetro.

Los resultados del efecto combinado de la dilución y de la difusión de fósforo desde los sedimentos inducida se muestran en las figuras 54 a 59, donde se grafica la evolución temporal de la concentración de fósforo resultante en el agua de la laguna. Como se aprecia en las figuras, en las que se compara con la evolución de la concentración solamente considerando la dilución, el efecto de la difusión desde los sedimentos redujo el ritmo de disminución de la concentración y alargó los tiempos en que se alcanzaron valores similares a los oceánicos. Los tiempos correspondientes a ambas modelaciones se resumen en la Tabla 26.

En el período Dic-feb, de acuerdo con el modelo que incluye la dilución y la difusión, el agua de la laguna requirió 53 días para alcanzar las concentraciones oceánicas enmarcadas en el rango de 1.20 a 1.43 mmol m<sup>-3</sup>, mientras que para el resto de los períodos se necesitaron 62, 100, 63, 49 y 55 días para los períodos Feb-Abr, Abr-May, May-Jul, Jul-Oct y Oct-Dic respectivamente, aumentando los tiempos para alcanzar concentraciones oceánicas en la laguna, para cada uno de los períodos respectivos en 28, 28, 12, 30, 19 y 24 días. (Figs. 54 a la 59).

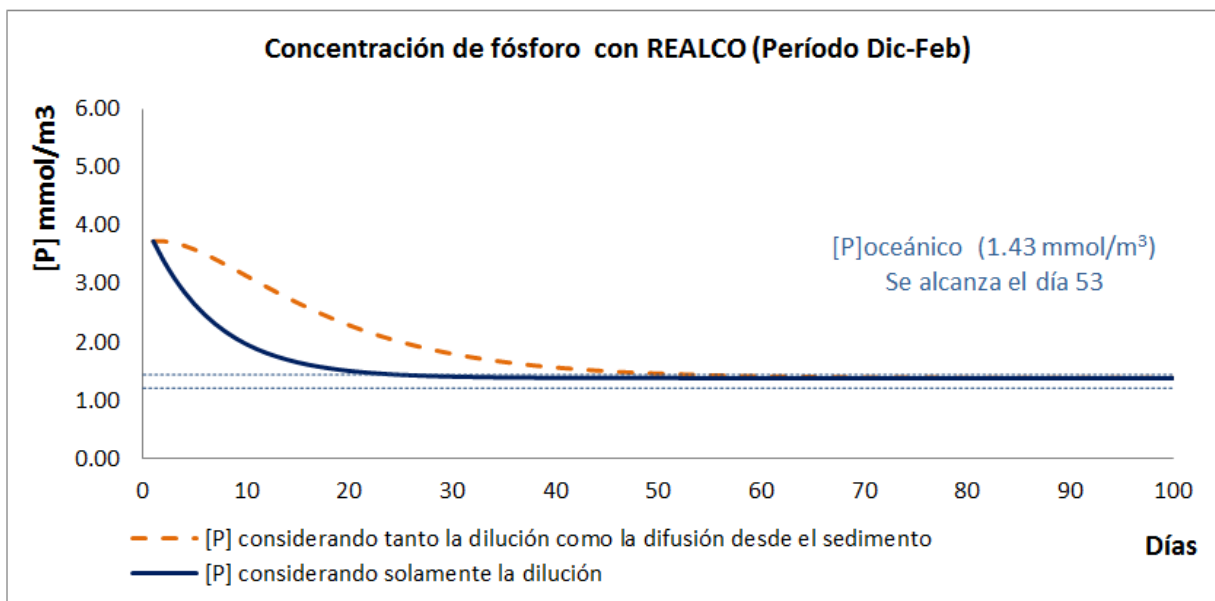


Figura 54. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Dic-Feb.

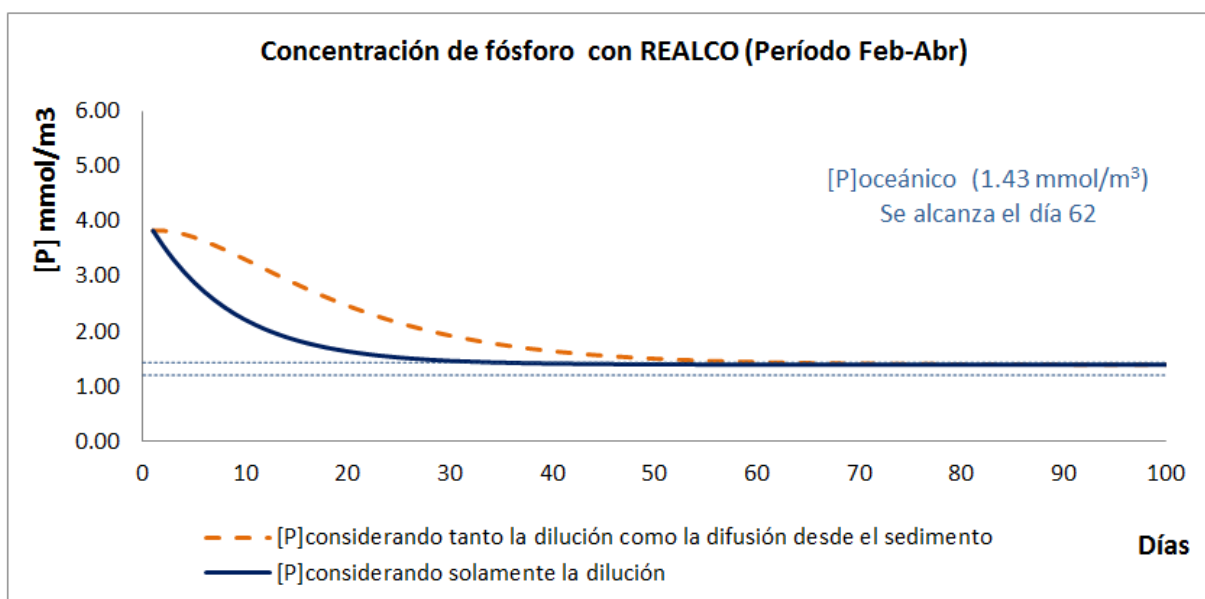


Figura 55. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Feb-Abr.

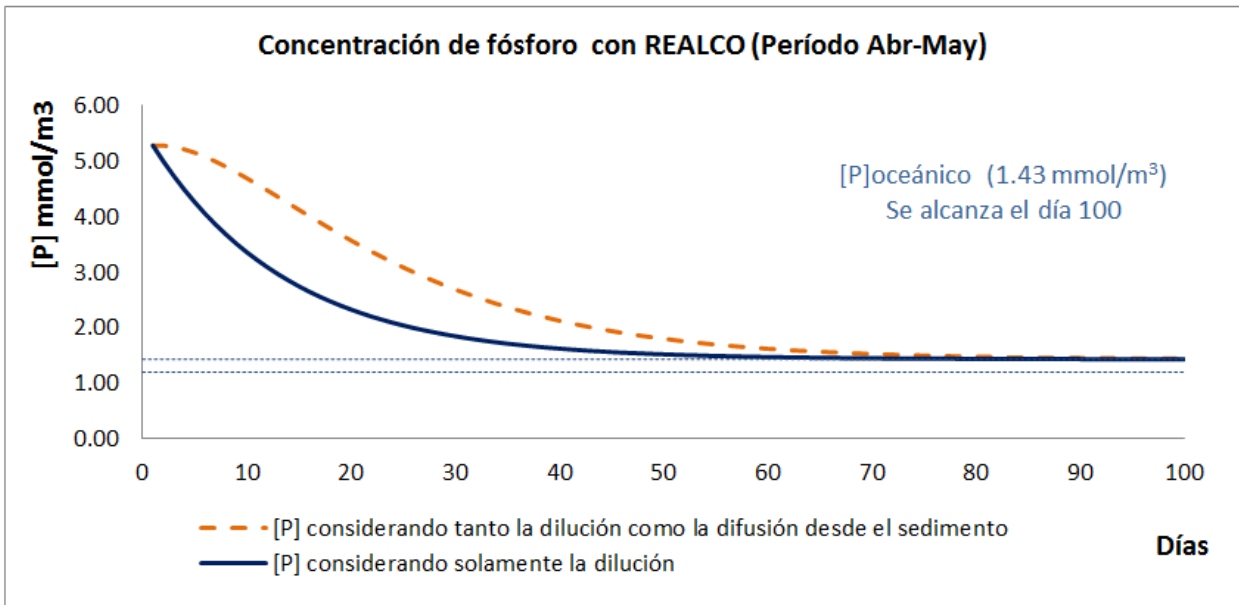


Figura 56. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Abr-May.

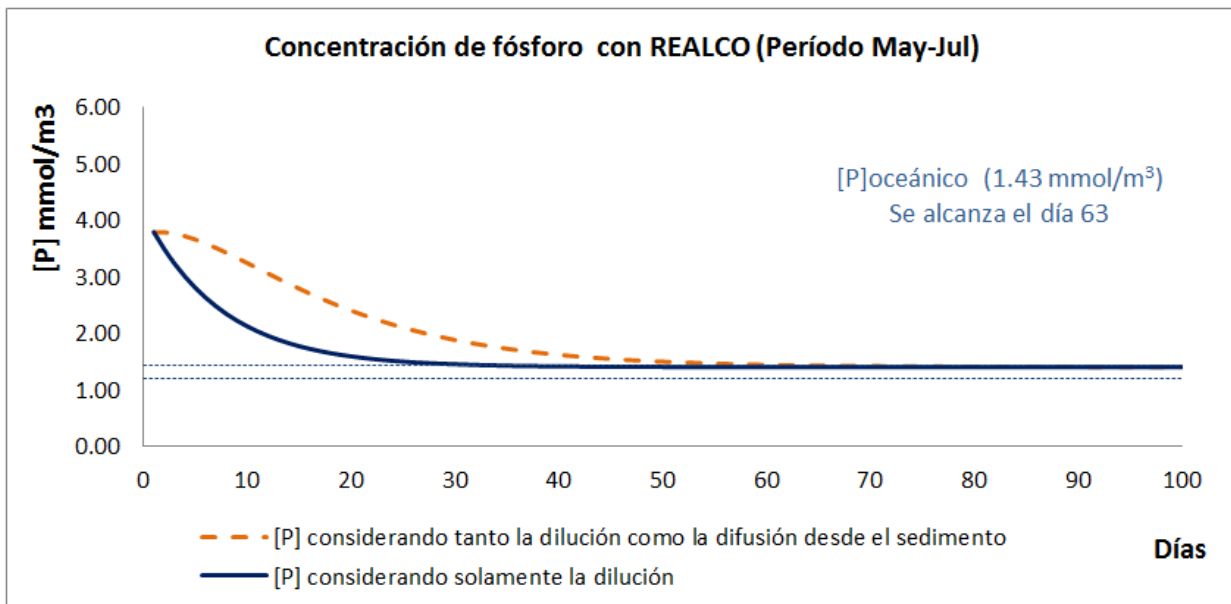


Figura 57. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período May-Jul.

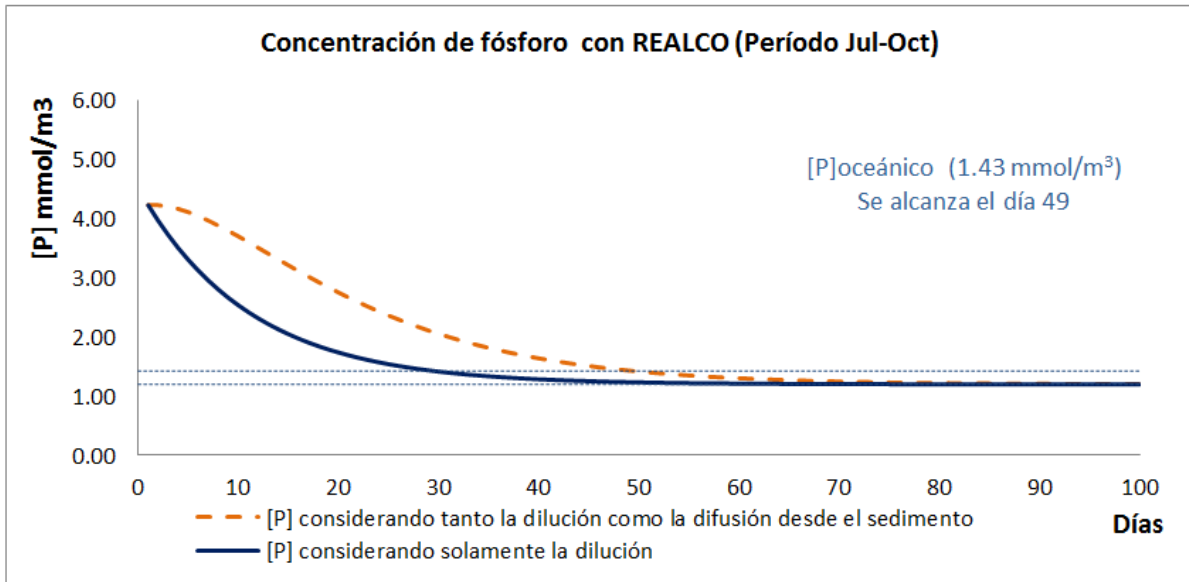


Figura 58. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Jul-Oct.

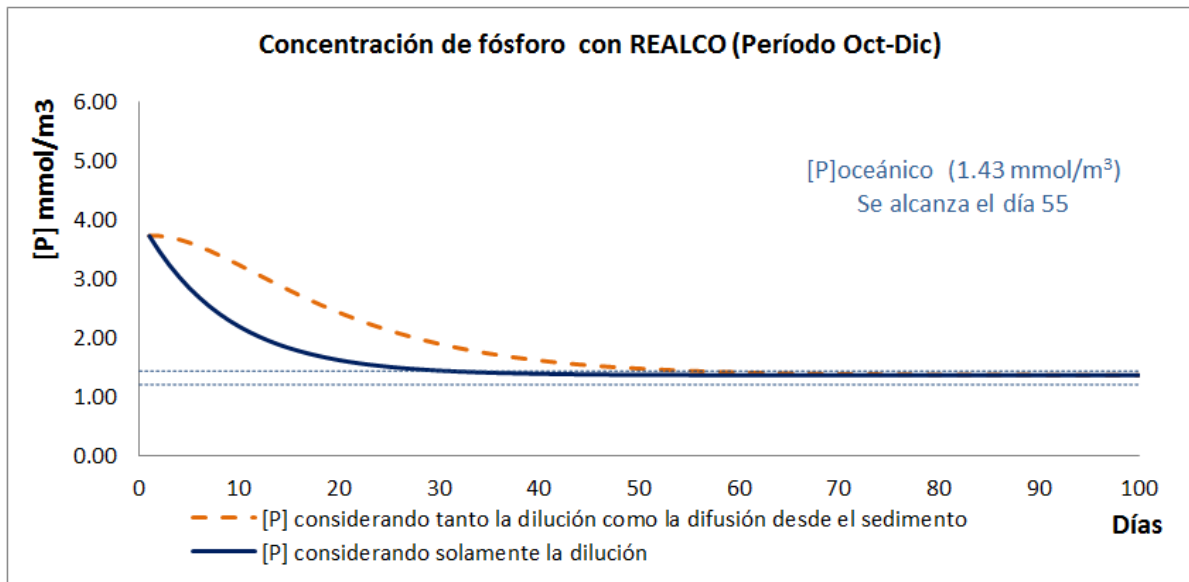


Figura 59. Evolución de las concentraciones de fósforo en Laguna larga considerando la dilución y el flujo de difusión desde el sedimento de la laguna, a partir de la puesta en marcha del sistema REALCO en el período Oct-Dic.

Tabla 26. Tiempos estimados en que la Laguna Larga alcanzaría concentraciones en su interior similares a las oceánicas, considerando la modelación de los procesos de dilución y de difusión desde los sedimentos que se prevén asociados a la operación del REALCO.

Período	Intervalo	Caudal REALCO (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	Dilución esperada [P] (días)	
			Sin considerar flujo desde el sedimento	Considerando difusión desde el sedimento (Fick)
1	Dec-Feb	18,921.6	25	53
2	Feb-Abr	15,120.0	34	62
3	Abr-May	9,763.2	88	100
4	May-Jul	16,502.4	33	63
5	Jul-Oct	11,491.2	30	49
6	Oct-Dec	14,601.6	31	55
<b>Promedio</b>		<b>14,400.0</b>	<b>40.2</b>	<b>63.7</b>

De manera general, estas modelaciones complementarias muestran que el efecto del REALCO sobre los procesos biogeoquímicos sería menor de lo pronosticado por el modelo LOICZ, dado que las concentraciones de nutrientes se reducirían en períodos de decenas de días hasta los niveles marinos, que son considerablemente menores que los que hay en la laguna en condiciones naturales, sin el REALCO. Esta reducción implicaría, al menos menores tasas de exportación que las previstas con LOICZ en el escenario 2, dado que la exportación depende directamente de las concentraciones, además de los flujos de agua en la boca de la laguna.

Asimismo, el modelado de la difusión inducida por la dilución muestra que el efecto neto resultante sería menor, al reducirse las concentraciones más lentamente que lo pronosticado solamente con la dilución, amortiguando la difusión este efecto. Así, los tiempos para llegar a concentraciones tan bajas como las oceánicas casi se duplican, llegando a rebasar los tres meses en los períodos de bombeo más bajo del REALCO, lo cual ya estaría aproximando más la situación al supuesto del modelo LOICZ de estado estacionario en la escala de cada uno de los cálculos por período.

## 4. DISCUSIÓN

Las características morfológicas de Laguna Larga, la distribución de sus profundidades, su forma alargada y estrecha, probablemente determinan que esta pueda ser clasificada como restringida o ahogada (“choked” en inglés) según la clasificación de Kjerfve y Magill (1989), como consideran asimismo González-De Zayas (2012) y González-De Zayas y Merino-Ibarra (2013). Adicionalmente, la distribución de los manglares, las construcciones hoteleras sobre la misma, así como las acciones de dragado y relleno de sectores son factores adicionales que pueden condicionar su limitado intercambio de agua con el mar adyacente, puesto en evidencia por los modelos de LOICZ. El dragado realizado a principio de los noventa en el sector interior, sitio más alejado de la salida hacia el mar, puede haber conducido a aumentar aún más el tiempo de residencia del agua dentro del sistema al aumentar su volumen en la parte más interior, sobre todo si se toma en consideración que el sector central es menos profundo que los adyacentes. En cualquier caso, su condición de bajo intercambio, aunado a su condición de eutrofización, justifican plenamente la evaluación de alternativas para incrementar su intercambio de agua, como es la opción del REALCO (Alatorre-Mendieta *et al.*, 2003; González-De Zayas y Merino-Ibarra, 2013)

Entre los factores que pueden afectar la eficiencia del REALCO en una localidad dada, los vientos están entre los más importantes, por su efecto sobre el oleaje y el nivel del agua. En el caso de Laguna Larga, la actividad de los vientos se encuentra regulada por la ubicación de Cayo Coco en el borde norte de la plataforma insular de Cuba, y la acción directa de los vientos alisios, con direcciones predominantes que van de NE a ESE. Los sistemas frontales y el paso de huracanes por la región son las principales causas de modificación del régimen habitual del oleaje, siendo los primeros los más importantes durante el período invernal, con direcciones predominantes del NNW al NNE, aun cuando las velocidades puedan ser inferiores a las generadas por un proceso ciclónico. Sin embargo, al no conformar parte de las direcciones predominantes durante el año, su efecto sobre la distribución anual del oleaje no posee el peso que debía esperarse, haciendo que la zona se encuentre entre las de más baja



energía y altura de la ola alrededor de Cuba, corroborado por las mediciones realizadas en este trabajo y por Jaen *et al.* (2011).

Del total de los sistemas frontales o frentes fríos clasificados como “fuertes” que arriban al occidente de Cuba, solo avanzan manteniendo esa categoría hasta alcanzar el entorno de Laguna Larga la mitad de ellos, mientras que de los “moderados” llegan aproximadamente la cuarta parte (27.6 %). El 100 % de los frentes fríos “débiles” que arriban a Cuba, se mantienen así al alcanzar Laguna Larga, mientras que los de categorías más fuertes sufren transformaciones que merman su fuerza, y con ello la intensidad de los vientos, al pasar por el occidente del país (Matos y Zúñiga, 2013), reforzando el hecho de que el oleaje en la zona de interés sea de los más bajos de Cuba.

Las amplitudes medias máximas de la marea medidas (48.52 cm máximo) resultaron superiores a las obtenidas por Hernández y Marzo (2009), para la estación mareográfica permanente más cercana a Laguna Larga, conocida como La Isabela (36.78 cm máximo), localizada a 175 km hacia el oeste. Mientras que los valores máximos del año medido se registraron durante los meses de julio y agosto, lo cual resulta anómalo, pues es de esperar que ocurra durante los meses de septiembre a noviembre, sin embargo una situación similar fue detectada, durante los años 1997 - 1998, precisamente para la estación La Isabela por Hernández y Marzo (2009), quienes mencionan que la mayor amplitud y variabilidad mensual en sectores de la costa norte cubana debe estar relacionada con una mayor variabilidad de las corrientes marinas en la zona oceánica adyacente.

La sobreelevación total del nivel del mar obtenida (0.523 m), aunque es un factor de menor importancia considerando la baja probabilidad de ocurrencia, podría constituir un elemento que afectará la eficiencia de funcionamiento del REALCO durante escenarios críticos en que todos los elementos que inciden en la sobreelevación se encuentren en un punto máximo, ya que la altura de diseño del franco bordo (0.40 m) es inferior al valor de sobreelevación total calculado. La sobreelevación del nivel del mar pudiera ganar mayor importancia para el funcionamiento del sistema REALCO durante la

presencia de evento ENOS, pues de acuerdo con Hernández-González (2011) en ese momento ocurren, alrededor de Cuba, fuertes anomalías de la variabilidad mensual del nivel del mar.

La distribución de las alturas del oleaje medidas *in situ* en el período 11/7/2011 - 16/6/2012 muestran un oleaje de baja altura durante todo el año analizado, si se toma en consideración que las alturas medidas que sobrepasan los 1.6 m sólo ocurren solamente en momentos específicos entre los meses de noviembre a enero y que sólo acumulan el 2% de todos los valores medidos. La confiabilidad en estos cálculos de altura y períodos de olas realizados se ve respaldada por su coincidencia con los obtenidos por Rodríguez-Cueto (2015) para el mismo intervalo de tiempo.

El período de la ola (T) muestra una distribución homogénea a lo largo del año, con valores que oscilan alrededor de 3 s en algunos momentos, que en muy pocas ocasiones alcanzan a sobrepasar los 5 s y que no son siempre coincidentes con los mayores valores de alturas de olas registrados a lo largo del año de medición.

Los caudales sobre el francobordo del amplificador del REALCO, de acuerdo con las estimaciones realizadas a partir del oleaje medido *in situ*, muestran que los flujos aportados por el amplificador de oleaje fluctúan en el rango de 9,760 a 18,920 m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>. Estos valores son considerablemente menores a los estimados por Rodríguez-Cueto (2015) quien obtuvo valores entre 1,382,000 y 2,160,000 m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>, estos últimos obtenidos a partir de valores medios de altura de la ola de 0.607 y máximos de 2.976 m, para una disposición de las paredes del amplificador similar a las de este trabajo. Sin embargo, es más probable que los resultados de Rodríguez-Cueto (2015) constituyan una sobrestimación con respecto a los obtenidos en este trabajo, dado que son coherentes con los estimados por Alatorre-Mendieta *et al.* (2003), quienes obtuvieron valores teóricos de 43,200 m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup> pero con un oleaje de mayor altura (1 m) y un dispositivo REALCO de mayores dimensiones y que se preveía que bombeaba del orden de 5 veces más que en la configuración aquí evaluada.

En cuanto al intercambio de agua natural de Laguna Larga, de acuerdo con los resultados del modelo LOICZ para el escenario 1 (sin REALCO), el período Abr-May fue el más crítico del año. Esta situación puede haberse producido a causa de la escasez de precipitaciones en ese intervalo ( $V_p = 59 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ), en contraste con un aumento marcado de la evaporación ( $V_e = 1170 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ), lo que implicó que el flujo residual fuera de importación de agua de mar hacia la laguna, sobre todo considerando que los valores históricos de marea en ese período son relativamente bajos. Una situación similar ocurrió con el período Oct-Dic pero en menor magnitud. Estos dos períodos de importación de agua, conllevaron a que el flujo residual anual en Laguna Larga, sin el aporte del REALCO, fuese hacia la importación de agua durante el año analizado de 2008.

La modelación de LOICZ para el escenario 2 respaldó la efectividad del REALCO para renovar el agua de Laguna Larga, generando importantes cambios en la dirección y la magnitud de los flujos de agua. La gran magnitud de los caudales obtenidos para el REALCO por períodos determina que al aplicarlos al balance de agua de Laguna Larga se generen flujos residuales hacia el océano que serían en promedio de  $-14,310.4 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ , los cuales contrastan contra el promedio de solamente  $+87.9 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$  obtenido con el mismo modelo para el escenario sin REALCO, que implica un flujo neto en la dirección inversa (del océano hacia la laguna, Tabla 19).

A su vez, el gran volumen de agua aportado por el REALCO tendría asimismo implicaciones muy positivas en la disminución de los tiempos de intercambio de Laguna Larga. Para el escenario 2, el tiempo de intercambio en Laguna Larga se reduciría en aproximadamente un orden de magnitud, disminuyendo en promedio en un 98, 78 y 80 % para los sectores Interior, Central y Externo respectivamente, en comparación con el escenario sin REALCO, mientras que para toda la laguna en su conjunto la reducción sería del 87 %, al pasar de un promedio de 40.3 días a solamente 5.1 días. Más aún, durante la mayor parte del tiempo, cuando el REALCO bombea gastos mayores al promedio anual ( $14,400 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ), el Tiempo de Intercambio en Laguna Larga con REALCO sería aún menor, de entre menos de 1 y 2 días (Tabla 21). Estos Tiempos de Intercambio, del orden de unos cuantos días, son similares a los de

cuerpos de agua bien comunicados, como estuarios y bahías (Dupra *et al.*, 2001; Smith *et al.*, 2010), lo que implica que el REALCO lograría no solamente que Laguna Larga dejara de ser una laguna “ahogada” o “choked” durante la mayor parte del tiempo, sino que tuviera un tiempo de residencia tan bajo como el de una bahía, lo que le daría una mucho mayor capacidad de carga (González *et al.*, 1992).

La excepción a este comportamiento se daría solamente durante los períodos en que el REALCO tuviese un bombeo bajo, menor a los  $10,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  (Tabla 21), como se predijo para el período Abr-May con los datos recabados entre el 9 y el 31 de mayo 2012, cuando el promedio de la altura del oleaje fue menor a los 34 cm (Tabla 7). Considerando la distribución de la altura de las olas en todo el período de registro del oleaje (11/7/2011 - 16/6/2012), este oleaje se presentó solamente en menos del 20% de los registros, por lo que esta posibilidad solamente se esperaría en una minoría de ocasiones.

Adicionalmente, también debe considerarse que la reducción de solamente el 19% del tiempo de residencia para el período Abr-May para toda la laguna, se debe también a que el tiempo de residencia para ese mismo período es el más bajo (10.0 días) de todos los períodos en la predicción sin el REALCO (Tabla 21), lo que indica que durante dicho período de 2008 el intercambio de agua natural de Laguna Larga era relativamente alto, por lo que el efecto del REALCO aparece como menor en la comparación durante dicho período, sin realmente serlo. Esta posibilidad se respalda por que el Tiempo de Intercambio predicho para el mismo período con el REALCO fue de solamente 8.1 días, cercano a la media anual de 5.1 días y menor al tiempo estimado para el periodo Jul-Oct de 16.4 días (Tabla 21).

Aunado a lo anterior, debe considerarse también que la predicción del modelo de LOICZ, para el sector externo de la laguna durante este período produjo mayores valores del Tiempo de Intercambio en el escenario con REALCO que sin REALCO (Figura 18, Tabla 20), a pesar del gran incremento de flujo que representa el mismo, lo cual denota una incongruencia entre las predicciones del modelo LOICZ, que podría estar relacionada con la reducida diferencia entre las salinidades de la laguna y el mar

adyacente durante esta época, lo cual es una de las debilidades conocidas de los modelos LOICZ (Dupra et al., 2001; Sheldon y Alber, 2006; Smith et al., 2010; Swayne et al., 2011).

Para evaluar la magnitud y dirección de los flujos netos de los elementos no conservativos entre Laguna Larga y el mar adyacente, son fundamentales los flujos de agua residuales y de mezcla, que el modelo LOICZ permite obtener a través de los balances de agua y de sal. Combinándolos con los principales aportes de nitrógeno y fósforo en el balance de estos dos elementos nutrientes, se pueden estimar los flujos de intercambio con el mar, así como si la laguna funciona como fuente o sumidero neto de dichos elementos (Swayne et al., 2011). Los principales aportes del fósforo y el nitrógeno recibidos por Laguna Larga provienen del escurrimiento superficial y de los residuales que se descargan a la laguna desde las tuberías de los hoteles del sitio (González de Zayas et al., 2013).

Puede asumirse que los considerables aportes de estas fuentes, sumados a los del agua de lluvia y las aguas subterráneas hayan sido determinantes en que Laguna Larga fuese un exportador neto hacia el mar de ambos elementos no conservativos durante 2008 como predijo el modelo LOICZ. Esta condición exportadora parece ser dominante en las condiciones actuales de Laguna Larga, pues solamente en un período (6, Oct-Dic) y para uno sólo de los dos elementos (fósforo) se observó un flujo neto de importación, y el valor fue relativamente bajo y cercano a cero (Tablas 22 y 23). En cualquier caso, en la Laguna Larga sin el REALCO operando, esta condición exportadora se debe principalmente al Intercambio por mezcla ( $V_x$ ) y a la existencia de concentraciones mayores dentro de la laguna que en el mar.

En términos de los balances netos de fósforo y nitrógeno, el modelo LOICZ para el escenario 1 mostró que, sin el REALCO, el sistema opera generalmente como un sumidero de ambos nutrientes, pues solamente en un período (Abr-May, Tabla 22) funcionó como fuente neta de fósforo. Así, el sistema aparentemente retiene una parte importante de los aportes que recibe, que representa aproximadamente tres cuartas partes del fósforo que recibe y aproximadamente cinco sextas partes del nitrógeno.

Esta retención, ocurre previsiblemente de dos formas principales, una de ellas en la deposición de materia orgánica y fitoplancton hacia los sedimentos, donde eventualmente va siendo cubierta y retenida, así como en la absorción y captura por parte de la biomasa vegetal de la laguna y su área de influencia, principalmente especies de mangle, pastos marinos y otras macrófitas. Los valores obtenidos parecen razonables si se comparan con los resultados reportados por Flores-Verdugo *et al.* (1997), Botello-Ruvalcaba y Valdés-Holguin (1997), Padilla-Arredondo *et al.* (2000) y Valenzuela (2007) en otras lagunas costeras tropicales.

La predicción del modelo LOICZ para el escenario 2 con flujos de entrada del REALCO, indicó, como era de esperarse, un incremento importante en la exportación hacia el océano tanto de fósforo como de nitrógeno, debido al drástico incremento de los flujos residuales ( $V_r$ ) de agua hacia esa dirección causado por el bombeo del REALCO. De cumplirse los supuestos del modelo LOICZ en este escenario, se prevé que este incremento sería de gran magnitud, incrementándose la exportación en un orden de magnitud, aproximadamente 15 veces el flujo de exportación de fósforo y en más de 20 veces la del nitrógeno.

En términos de su funcionamiento como sumidero o fuente, al modelar Laguna Larga con la incorporación de flujos del REALCO, se predicen importantes variaciones entre períodos, alternando el comportamiento de sumidero con el de fuente, pero en promedio el sistema dejaría de funcionar como sumidero para ser en promedio una fuente neta de nitrógeno y fósforo (Tablas 23 y 25). Este cambio en el comportamiento es consistente con el gran incremento de la exportación impulsado por el REALCO, lo cual reduciría la cantidad disponible para ser capturada por el sistema, al grado de revertir el flujo hacia el funcionamiento como fuente. Este tipo de cambio de Laguna Larga en función de la intensidad del intercambio del agua fue previsto también por Gonzalez de Zayas (2013) al comparar su funcionamiento en años con diferentes aportes netos de agua dulce, por lo que este resultado es consistente también con observaciones previas.

De manera similar, la modelación LOICZ predijo que la incorporación del REALCO implicaría importantes cambios en los principales procesos biogeoquímicos de la laguna. En cuanto a la condición trófica de la laguna, los resultados del modelo LOICZ indican para el escenario 1 una mayor producción primaria en relación a la respiración a lo largo del año analizado, con excepción del período Abr-May cuando la relación de P-R es menor que cero. Con los aportes del REALCO, Laguna Larga muestra un Metabolismo Neto heterótrofo de la laguna durante los períodos Feb-Abr, Abr-May, May-Jul y Oct-Dic, mientras que durante los períodos de Dic-Feb y Jul-Oct se comporta como autótrofo, aunque la magnitud de sus valores es menor que la de los períodos correspondientes en el escenario sin REALCO. En promedio, el metabolismo neto aparente de Laguna Larga en su conjunto, que bajo las condiciones naturales de 2008 era principalmente autotrófico, con una dominancia de la fotosíntesis sobre la respiración ecosistémica, al entrar en operación el REALCO se invertiría hacia un metabolismo neto aparente heterotrófico, en el cual la respiración ecosistémica sería mayor a la fotosíntesis. Esto implica que en el sistema se estaría oxidando materia orgánica y es consistente con un incremento en la exportación de los nutrientes remineralizados en dicha oxidación neta.

En cuanto al balance neto aparente de fijación-desnitrificación, el modelo mostró que, Laguna Larga, tanto sin el REALCO como con el mismo, presentaría alternancias entre la dominancia de la fijación o de la desnitrificación, al contar con valores de (nfix-denit) positivos para los dos primeros y los dos últimos períodos del año en el escenario 1, situación parecida a lo que ocurrió con el escenario 2, aunque en este caso se exceptúa el período Feb- Abr, cuando los valores mostraron liberación neta de N vía desnitrificación. Las magnitudes de la relación (nfix-denit) se hacen superiores a partir de la incorporación al sistema de los flujos del REALCO, por lo que en promedio el sistema pasaría de una condición cercana al balance entre ambos procesos a una de dominancia de la desnitrificación, de acuerdo a la modelación LOICZ con inclusión del flujo calculado para el REALCO.

En conjunto, todos estos resultados sobre los procesos biogeoquímicos son consistentes con una condición de incremento del intercambio de agua y el

consecuente “lavado” del sistema en términos de la materia orgánica y los nutrientes acumulados, los cuales difícilmente podrían haberse cuantificado como se ha hecho aquí, de manera sencilla, sin la aplicación de la modelación de LOICZ. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, también debe tomarse en cuenta que los supuestos de estos modelos, específicamente el de estado estacionario, no se cumplen estrictamente, en particular en el escenario 2, dada la gran magnitud de los flujos de agua proporcionados por el REALCO en relación con los flujos naturales de la laguna.

Atendiendo a esta limitación, se modelaron de manera complementaria los principales procesos que podrían afectar el estado estacionario a través de modificar las concentraciones de nutrientes en la laguna. En primer lugar la dilución derivada del gran ingreso de agua de mar oceánica “limpia” con menores concentraciones de N y P que producirá en REALCO, y la difusión desde los sedimentos que se induciría como resultado de la disminución de las concentraciones en el agua. Es importante considerar aquí que el primer proceso induciría un efecto en sentido inverso por parte del segundo, que compensaría parcialmente la disminución resultante neta de las concentraciones, por lo que deben considerarse juntos, como se presentó en la sección 3.7.5.2.

En este sentido, es importante notar que cuando se considera el efecto combinado de ambos procesos, la disminución de la concentración es considerablemente más lenta (particularmente en los primeros días a partir del inicio de operación del REALCO) que cuando se considera solamente la dilución. Por ejemplo, como puede apreciarse en las figuras 54 a 59, la disminución en los primeros considerando solamente la dilución es aproximadamente del 50% en los primeros 10 días, mientras que al incluir también la difusión inducida es del orden de solamente el 10% para el mismo lapso de tiempo. Así, se aprecia que el grado de incumplimiento del supuesto de estado estacionario sería considerablemente menor (en magnitud y duración) que lo que se pensaría a partir solamente de la magnitud de los flujos del REALCO relativa a la del resto de flujos de agua y a su efecto evidente, la dilución.



En este sentido, conviene considerar también las diversas fuentes de error que puede haber en los modelos de LOICZ en función tanto de los supuestos como de la calidad y representatividad de los datos disponibles y el modelo resultante. Por ejemplo, Webster *et al.* (2000) han resaltado que el error puede ser significativo cuando los datos no disponibles no resuelven la variabilidad espacial y temporal del sistema. Esta situación es común en la mayoría de los modelos LOICZ de estuarios y lagunas, donde la información disponible solo permite hacer un modelo de una sola caja espacial y frecuentemente de una o dos temporadas estacionalmente (Swaney *et al.*, 2011). En estos casos, la inadecuada representatividad temporal puede implicar errores de hasta un 30%, mientras que la no incorporación de la variabilidad espacial puede derivar en errores de hasta el 100% (Webster *et al.*, 2000). En contraste con esta situación, el modelo aquí desarrollado cuenta con datos suficientes para incluir la variabilidad temporal mediante seis muestreos y la espacial con la inclusión de tres cajas o compartimentos interconectados.

Adicionalmente, otra de las críticas que ha recibido la modelación LOICZ es que el supuesto de estado estacionario, rara vez se cumple en el caso de las lagunas costeras (Swaney *et al.*, 2011), así que este supuesto probablemente tampoco se cumple en la mayoría de los modelos desarrollados, que aun así se consideran útiles por su simpleza y su capacidad de producir estimaciones de los principales flujos y procesos biogeoquímicos (Smith *et al.*, 2010; Swayne *et al.*, 2011). Así, tomando en consideración el que el incumplimiento del estado estacionario sea común, y la magnitud de los errores por no inclusión de la variabilidad espacial y temporal en muchos casos, podría valorarse que el error involucrado aquí en el escenario 2, con la inclusión del REALCO sería de una magnitud similar o menor al de otros modelos LOICZ, en particular a la luz de lo esclarecido con las modelaciones complementarias de dilución y difusión desde los sedimentos.

Otro aspecto de esta modelación adicional, es que permite tener una idea de la escala de tiempo en que el REALCO tendría efectos importantes en la eutrofización de Laguna Larga y en su biogeoquímica en general. Una interrogante particular es en cuanto tiempo se abatirían las concentraciones de nutrientes a niveles no eutróficos, como

serían los del océano adyacente, que es transparente y conocidamente oligotrófico. En este sentido, resalta la relativa rapidez con que esto ocurriría de acuerdo a las estimaciones de la modelación complementaria (Tabla 26). De acuerdo a estas, aun considerando la entrada por difusión inducida al bajar la concentración por la dilución, el sistema alcanzaría valores similares a los del océano en solamente 2 meses en promedio (63.7 días, Tabla 26), y aún en el caso del período 3 que se considera la situación de bajo bombeo relativo por la escasa modificación del tiempo de residencia y el menor bombeo pronosticado, el tiempo necesario apenas rebasaría los 3 meses (100 días, Tabla 26).

Estos pronósticos indican una gran efectividad del REALCO para modificar rápidamente las concentraciones de nutrientes, una de las condiciones e indicadores más claros de eutrofización. Aunque estas estimaciones seguramente también tienen un margen de error considerable, pues implican una gran simplificación de los procesos, consideran solamente uno de los nutrientes y solamente la disponibilidad del mismo desde el primer centímetro de los sedimentos, representan al menos una aproximación al orden de magnitud de dicho tiempo, lo cual resulta de gran utilidad para evaluar la conveniencia de la aplicación del REALCO así como para formar expectativas guiadas sobre este aspecto crucial.

Adicionalmente, la estabilización de las concentraciones a partir de su aproximación a las oceánicas, y más aún su permanencia de largo plazo cuando se modelan de manera anidada (Figura 53) indican el efecto de lavado sobre los sedimentos (al menos el primer centímetro que es de mayor interacción con la columna de agua), así como la posible amortización de otros mecanismos de retroalimentación negativa y, en general, el forzamiento continuo del sistema hacia una condición más oligotrófica, que es lo que se desea para resolver los problemas actuales de la laguna y de su aprovechamiento turístico.

En su conjunto, las estimaciones de la magnitud y regularidad relativa de los caudales que se prevé el REALCO bombearía bajo las condiciones de oleaje y nivel del mar frente a Laguna Larga aquí estudiadas, junto con las estimaciones de la modelación

LOICZ y modelación biogeoquímica complementaria, así como las consideraciones discutidas al respecto, configuran un panorama que indica que el REALCO puede ser una alternativa de gran eficacia para renovar el agua de Laguna Larga y para mejorar su actual condición de eutrofización.

## CONCLUSIONES

1. La altura del oleaje en la zona elegida para la construcción del sistema REALCO es relativamente baja durante todo el año, con valor medio de 0.57 m, pero aun así, haciendo una integración día a día, se predijo que sería suficiente para producir caudales relativamente constantes a través del amplificador del REALCO.
2. Los caudales aportados por el REALCO, configurado de acuerdo con los parámetros de diseño elegidos para el amplificador, variaron entre 9,760 y 18,920  $\text{m}^3\text{d}^{-1}$  para los períodos considerados y fueron en promedio de 14,400  $\text{m}^3\text{d}^{-1}$ . Estos valores son más que suficientes para gobernar el intercambio de agua de Laguna Larga con el océano.
3. En particular, mientras que en las condiciones naturales de 2008 los flujos residuales de agua en Laguna Larga tenían sentido variable, una vez operando el REALCO dicho residual estaría continuamente dirigido hacia el océano y con valores que superan las condiciones originales promedio en 14,398.3  $\text{m}^3\text{d}^{-1}$ .
4. Con el REALCO en operación, el Tiempo de Intercambio de agua en Laguna Larga, evaluado mediante los balances de sal y de agua, disminuiría de manera notoria, tanto por sectores y por períodos como para el conjunto del sistema, pasando de un promedio 40.3 días en condiciones naturales, a uno de solamente 5.1 días con el REALCO en operación.
5. En términos de los flujos de fósforo y de nitrógeno, se predice que la operación del REALCO en Laguna Larga incrementaría significativamente la exportación ya existente de ambos nutrientes hacia el océano adyacente.
6. Como resultado de este incremento en la exportación, Laguna Larga pasaría de su funcionamiento actual como un sumidero neto de nitrógeno y fósforo a ser una fuente neta de ambos elementos con el REALCO en operación.

7. La operación del REALCO implicaría asimismo que el sistema invirtiera su balance metabólico neto aparente de la condición de dominio de la producción a el dominio de la respiración al operar el sistema, lo que implicaría la oxidación de materia orgánica acumulada en el sistema.
8. La aplicación del modelo LOICZ no predice un efecto de gran magnitud en el balance aparente neto de fijación-desnitrificación, solamente un ligero incremento en el dominio de la desnitrificación sobre la fijación.
9. Debe tenerse presente que la inclusión de los flujos del REALCO en el modelo LOICZ implica que no se cumplirán algunos de los supuestos de este modelo, en particular el de estado estacionario, por lo que las predicciones del modelo en el escenario 2 deben tomarse con precaución. Sin embargo, el error involucrado en el modelo aquí presentado no se considera significativamente mayor al de otros modelos LOICZ, debido a su relativamente alta inclusión de la variabilidad espacial y temporal del sistema.
10. La modelación complementaria realizada para evaluar los impactos del REALCO por dilución y desorción de los sedimentos permitió estimar que, en el corto plazo (10 días) las concentraciones de nutrientes en el sistema solamente se modificarían en el orden del 10%, respaldando que el supuesto de estado estacionario no se incumple de manera importante.
11. Asimismo, se predice que con la operación del REALCO se alcanzarían en Laguna Larga concentraciones de nutrientes similares a las del océano adyacente en un plazo promedio en solamente 64 días, y que aún durante las condiciones en que se registró el menor bombeo se alcanzarían en un lapso del orden de 3 meses.
12. Estos pronósticos, así como el de que dichas concentraciones se mantendrían en valores cercanos a los oceánicos mientras dure el bombeo son indicativas de

que el REALCO podría modificar la eutrofización de Laguna Larga con una relativa rapidez.

13. En su conjunto, los resultados de este trabajo respaldan que el sistema REALCO constituye una solución efectiva para la rehabilitación de Laguna Larga.

## LITERATURA CITADA

- Alatorre-Mendieta M., Merino-Ibarra M., Ruiz-Rentería, F. y Silva-Casarín R. (1989). Renovador ecológico del agua de lagunas costeras. Registro de patente, Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.
- Alatorre-Mendieta M., Silva-Casarín R., Ruiz-Rentería F. y Merino-Ibarra M. (2003). A flushing system to clean up coastal lagoons. *Coastal Structures*. 902–910.
- Balik S., Ilhan A. y Topkara E.T. (2008). Economic fish and fisheries at Homa Lagoon. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 8:61-63.
- Barfoed M., Klee A. y Skaarup E. (2002). The WavePlane. Tests performed at DHI the 27.th, 28.th, 29.th August and 14.th October 2001.
- Botello-Ruvalcaba M. y Valdez-Holguín E. (1997). Estero la Cruz, Sonora. In: Smith, S. V., Ibarra-Obando, P. R. Boudreau y V. F. Camacho-Ibar (Eds.). Comparison of carbon, nitrogen and phosphorus fluxes in mexican coastal lagoons, LOICZ Reports and Studies No. 10, LOICZ, texel, the Netherlands. 84 pp.
- Czitrom S., Merino-Ibarra M., Ruiz F. y Alatorre M.A. (1993). Bombeo de Agua Mediante Ductos Resonantes. Premio "León Bialik" a la Innovación Tecnológica, Fam. Bialik y Centro Para la Innovación Tecnológica, UNAM.
- Dally W.R., Dean R.G. y Dalrymple R.A. (1985). A model for breaker decay on beaches, in Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers, New York, vol. 1, pp. 82-98.
- Dubanin A.I. (1960). Las Mareas en el Mar. Ediciones Hidrometeorológicas, Leningrado, URSS.
- Dupra V., Smith S.V. y Marshall J.I. (2001). Estuarine Systems of Sub-Saharan Africa: Carbon, nitrogen and phosphorus fluxes. LOICZ Reports and Studies No. 18. LOICZ Core Project Netherlands Institute for Sea Research.
- Elliott M., Whitfield A.K. (2012). Challenging paradigms in estuarine ecology and management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 94:306-314.

- Flores-Verdugo F. J. y de la Lanza-Espino G. (1997). Bahía de Altata - Ensenada del Pabellón, Sinaloa. In: S.V. Smith, S. Ibarra-Obando, P. R. Boudreau y V. F. Camacho-Ibar (Eds.). Comparison of carbon, nitrogen and phosphorus fluxes in mexican coastal lagoons, LOICZ Reports and Studies No. 10, ii + 84 pp. LOICZ, texel, the Netherlands.
- González A., Merino-Ibarra M., y Czitrom S. (1992). Laguna Bojórquez, Cancún: Un sistema de características marinas controlado por la atmósfera. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. 18 p.
- González-De Zayas R. (2012). Balance de Nitrógeno y Fósforo en una laguna costera tropical (Laguna Larga Cayo Coco, Cuba). Tesis de doctorado. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. México.
- González-De Zayas R., Merino-Ibarra M., Soto-Jiménez M.F. y Castillo-Sandoval F.S. (2013). Biogeochemical responses to nutrient inputs in a Cuban coastal lagoon: runoff, anthropogenic, and groundwater sources. Environmental Monitoring and Assessment. Springer.
- Gordon D.C. jr., Boudreau P.R., Mann K.H., Ong J.E., Silvert W.I., Smith S.V., Wattayakorn G., Wulff F. y Yanagi T. (1996). LOICZ biogeochemical Modelling Guidelines. LOICZ Reports and Studies No. 5. LOICZ Core Project Netherlands Institute for Sea Research.
- Grasshoff K., Kremling K. y Ehrhardt M. (1983). Methods of seawater analysis. Weinheim: Verlag Chemie.
- Guimaraes M., Cabrera R. y Suárez A.M. (2009). Adición a las Clorophytas de Cuba. Revista de Investigaciones Marinas. 30(2):163-166.
- Guimaraes M. y González-De Zayas R. (2009). Aspectos ecológicos de *Ruppia maritima* (Ruppiales) en Laguna Larga, Cayo Coco, Cuba. Mesoamericana 13(3): 40-50.
- Guimaraes M. y González-De Zayas Z. R. (2011). Productividad primaria en Laguna Larga, Cayo Coco, Cuba. Revista Ciencias Marinas y Costeras. 3:31–41.



- Hayward J., Behrens S., McGarry S. y Osman P. (2012). Economic modelling of the potential of wave energy. *Renewable Energy*. 48:238-250.
- Hernández G.M. y Marzo L.O. (2009). Variabilidad estacional del nivel del mar en el Archipiélago cubano. Serie Oceanológica No. 6. Instituto de Oceanología. La Habana Cuba.
- Hernández-González M. (2011). Variabilidad y pronóstico de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en el Archipiélago Cubano. Tesis de doctorado. Instituto de Meteorología de Cuba, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.
- Jaen C.M., Ferrer H.A. y Alzada E. A. (2011). Las olas de Cuba. Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética. (CIER 2011).
- Kirkwood D. S. (1994). SanPlus segmented flow analyzer and its applications seawater analysis. Amsterdam: Skalar.
- Kjerfve B. y Magill K. E. (1989). Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology* 88 : 187-199.
- Kofoed J.P. (2002). Wave Overtopping of Marine Structures – Utilization of Wave Energy, PhD thesis, Aalborg University.
- Lloret J. y Marín. (2011). The contribution of benthic macrofauna to the nutrient filter in coastal lagoons. *Marine Pollution Bulletin* 62:2732–2740.
- Matos P.F y Zúñiga R.A. (2013). Comportamiento de variables hidrometeorológicas en Jardines del Rey, Cuba. Estudio de Riesgo Rehabilitación de las playas El paso, Flamenco, Larga y las Coloradas del Destino turístico Jardines del Rey. Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros.

- Padilla-Arredondo G., Arreola-Lizárraga J. A. y Lechuga-Devéze C. (2000). Las Guásimas coastal lagoon, Sonora, México. In: V. F. Camacho-Ibar, V. Dupra, J. I. Marshall-Crossland, F. Wulff, S. V. Smith & C. J. Crossland (Eds.). Estuarine Systems of the Latin American Region (Regional Workshop V) and estuarine systems of the Arctic Region: carbon, Nitrogen and phosphorus fluxes. LOICZ Reports and Studies No. 23, 96 p.
- Rodríguez-Cueto Y. (2015). Tesis de maestría: Influencia potencial de las olas y la marea sobre la eficiencia del REALCO Caso de estudio Punta Raza, Cayo Coco, Cuba. Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM, México.
- Schreiber P. (1904). Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. Meteorologische Zeitschrift. 21: 441–452.
- Sheldon J.E., Alber M. (2006). The calculation of estuarine turnover times using freshwater fraction and tidal prism models: a critical evaluation. Estuaries Coasts 29:133–146.
- Smith S.V. y Hollibaugh J. T. (1997). Annual cycle and interannual variability of ecosystem metabolism in a temperate climate embayment. Ecological Monographs, 67:509–533.
- Smith S.V., Swaney D.P., Talaue-McManus L. (2010). Carbon–nitrogen–phosphorus fluxes in the coastal zone: the LOICZ approach to global assessment. In: Liu, K.-K., Atkinson, L., Quiñones, R., Talaue-McManus, L. (Eds.), Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins. A Global Synthesis. Series: Global Change – the IGBP Series. Springer, Berlin, Heidelberg, vol. XXVIII, ch. 14, pp. 575–586.
- Sørensen H. C., Friis-Madsen E.; Panhauser W., Duce D., Nedkvintne J., Frigaard P.B., Kofoed J.P., Knapp W., Riemann S., Holmøen E., Raulund A., Praest J., Hansen L. K., Christensen L., Nhrind T., Bree T., McCullen P. (2003). Development of the Wave Dragon from scale 1:50 to prototype, Proceedings of the 5th European Wave Energy Conference, Cork, Ireland.

- Swaney D.P. y Giordani G. (2007). Proceedings of the LOICZ Workshop on Biogeochemical budget methodology and applications Providence, Rhode Island November 9-10, 2007. LOICZ Reports and Studies No. 37.
- Swaney D.P., Smith, S.V., Wulff F. (2011). The LOICZ Biogeochemical Modeling Protocol and its Application to Estuarine Ecosystems. Chapter 9.08. Elsevier.
- Tedd J. (2007). Testing, Analysis and Control of Wave Dragon, Wave Energy Converter: PhD Thesis defended in public at Aalborg University (101207). Aalborg: Aalborg University. Department of Civil Engineering.(DCE Thesis; No. 9).
- Tedd J. y Kofoed J. P. (2006). Data Obtained from Prototype Wave Dragon in NissumBredning: October 2004 – January 2005. Hydraulics and Coastal Engineering Laboratory, Aalborg University.
- Valderrama J. C. (1981). The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Marine Chemistry*, 10, 109–122.
- Valenzuela-S.M., Arreola-Lizárraga J.A., Sánchez-Carrillo S. y Padilla-Arredondo G. (2007). Flujos de nutrientes y metabolismo neto de la laguna costera Lobos, México. *Hidrobiológica*, 17 (3): 193-202.
- Van der Meer J.W. y Janssen J.P.F.M. (1994). Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes. In: Kobayashi N and DemirbilekZ, (eds) *Wave Forces on inclined and vertical wall structures*, pp 1-27, ASCE. Also Delft hydraulics, Publ. No 487
- Vicinanza D., Margheritini L., Kofoed J. y Buccino M. (2012). The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments. *Energy Rev.* 2012, 5, 193-226.
- WD (2007). Wave Dragon Pre-Commercial Wave Energy Device - Environmental Statement. Wave Dragon Wales Ltd. Available from <http://www.wavedragon.co.uk>
- Webster I.T., Parslow J.S. y Smith S.V. 2000. Implications of spatial and temporal variation for biogeochemical budgets of estuaries. *Estuaries* 23, 341–350.

Xiangju C., Yingxue Z., Zhenren G. y Liangsheng Z. ( 2014). Diffusion of Nitrogen and Phosphorus Across the Sediment-Water Interface and In Seawater at Aquaculture Areas of Daya Bay, China. *Int J Environ Res Public Health*. Volume 11(2).