

**DISTRIBUCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN AGUA,  
SEDIMENTO Y PRODUCTORES PRIMARIOS EN DOS LAGUNAS  
COSTERAS CON DIFERENTE GRADO DE ANTROPIZACIÓN Y  
CONEXIÓN CON EL OCÉANO**

Trabajo de pasantía de grado

Alexis Rodríguez Yaniero

Licenciatura en Ciencias Biológicas – Profundización Ecología  
Sección Limnología – Facultad de Ciencias – Universidad de la República

Orientadores

Daniel Conde, Lorena Rodríguez Gallego y Sylvia Bonilla

2015

## ÍNDICE

Índice.....	2
1. Resumen.....	3
2. Introducción .....	4
2.1. Marco teórico .....	4
2.2. Antecedentes locales.....	6
3. Justificación .....	11
4. Hipótesis y Onjetivos .....	11
4.1. Hipótesis .....	11
4.2. Objetivos.....	12
5. Metodología .....	12
5.1. Área de estudio.....	12
5.2. Estrategia de investigación.....	13
5.3. Métodos .....	14
6. Resultados.....	18
6.1. Variables fisicoquímicas .....	18
6.2. Concentración total de nutrientes .....	19
6.3. Contenido de nutrientes en agua y sedimento .....	21
6.4. Contenido de nutrientes en productores primarios.....	22
6.5. Distribución relativa de nutrientes en agua y sedimento .....	25
6.6. Distribución relativa de nutrientes en productores primarios.....	26
6.7. Índices de estado trófico .....	29
7. Discusión .....	30
7.1. Contenido total de nutrientes.....	30
7.2. Contenido de nutrientes en agua y sedimento .....	31
7.3 Distribución de nutrientes en productores primarios.....	32
7.4. Estado trófico .....	33
7.5. Conclusiones .....	35
8. Bibliografía .....	37
Anexo 1.....	40
Agradecimientos .....	41

## 1. RESUMEN

Las lagunas costeras se caracterizan por ser ecosistemas someros que se conectan episódicamente con el mar. Debido a la diversidad de variables que actúan en conjunto se consideran ecosistemas complejos, donde interactúan factores físicos, químicos, morfológicos, ecológicos y humanos. Para este estudio fueron seleccionadas las lagunas del Diario y de Rocha, en la costa de Uruguay. Los eventos de floraciones de cianobacterias, proliferaciones de macrofitas, y el aumento de los valores máximos de nutrientes registrados en dichas lagunas indican que estos ecosistemas cursan un proceso de eutrofización. Desde el 2005 se ha registrado un cambio significativo en el uso del suelo de las cuencas de las lagunas costeras uruguayas, desde usos más extensivos como la ganadería en campo natural hacia usos más intensivos como la agricultura, la forestación y la urbanización. Esto explicaría el cambio observado en algunos indicadores de calidad del agua como la concentración de nutrientes y de productores primarios. El aumento en el aporte de nutrientes ha contribuido con el proceso de eutrofización de estas lagunas, causando un impacto negativo en su calidad del agua. El objetivo de este estudio fue evaluar y comparar el destino final de los nutrientes Nitrógeno y Fósforo en el fitoplancton, el fitobentos, las macrofitas, el agua y el sedimento, entre ambas lagunas. Se registró que las macrofitas y el sedimento fueron los compartimentos con mayor contenido de nutrientes en ambos ecosistemas. También se aplicaron índices de estado trófico para comparar el estado de cada laguna, resultando que el estado mesotrófico fue el predominante en ambas lagunas. Este trabajo apoya y resalta la importancia de considerar a estos compartimentos en la determinación y el manejo del estado trófico de estos ecosistemas acuáticos someros.

## **2. INTRODUCCIÓN**

### **2.1. Marco teórico**

#### **Lagunas costeras**

Las lagunas costeras son ecosistemas someros altamente dinámicos y productivos (Barnes 1980; Abreu et al. 1994) que cubren el 14% de la zona costera del planeta (Mitsch & Gosselink 2000). Existen distintos tipos de lagunas costeras, que a grandes rasgos se pueden diferenciar por su grado de conexión con el océano. El mismo puede ser permanente, intermitente o nulo. Por lo general se encuentran separadas del océano por una barra arenosa que se abre una o más veces al año, permitiendo la descarga de agua dulce al océano y el ingreso de agua marina (Kjerfve 1994), determinando así la dinámica característica de estos sistemas. Los mismos se encuentran regidos por la variabilidad y magnitud de las fuerzas físicas dominantes, como la confluencia de masas de agua provenientes del continente y del océano, la polimixis, la resuspensión y la penetración de la luz solar hasta el sedimento. Dichas fuerzas provocan importantes cambios en diferentes escalas espacio-temporales en sus características hidrológicas, abióticas y biológicas (Day et al. 1989; Constanza et al. 1993; Kjerfve 1994; Bonilla et al. 2006).

Las lagunas costeras y su zona de inundación se encuentran entre los ecosistemas más biodiversos y productivos del mundo (Knoppers 1994). Además, brindan importantes servicios ecosistémicos como pesquerías, control hidrológico, generación y mantenimiento de suelos, atenuación de la contaminación de las cuencas, control de especies invasoras, etc. (Rodríguez-Gallego 2010). Es importante destacar que por ser sistemas generalmente someros y con un alto tiempo de residencia, las lagunas costeras son especialmente sensibles a impactos antrópicos (Kjerfve 1994), ya que se encuentran ubicados al final de las cuencas de drenaje. Entre los impactos humanos que degradan la calidad ambiental de estos sistemas se destacan procesos de eutrofización, contaminación en general y urbanizaciones en su entorno (Estevez et al. 2008). Debido a su particular funcionamiento hidrológico, su extensión y calidad ambiental, las lagunas costeras son sitios relevantes a nivel mundial para la conservación y el estudio de procesos naturales y de impacto antrópico (Aubriot et al. 2005).

## **Productores primarios y eutrofización**

Las comunidades de autótrofos presentes en lagunas costeras son fitoplancton, fitobentos, perifiton y las macrofitas. Estas comunidades pueden clasificarse con respecto a sus hábitats característicos. Siendo el fitoplancton el grupo de microalgas que se encuentra en suspensión en la columna de agua, el fitobentos son aquellas microalgas asociadas al fondo (generalmente sedimento), el perifiton son aquellas micro y macroalgas asociadas a sustrato, y las macrofitas son todas las formas macroscópicas de vegetales asociadas al agua. Comúnmente, la producción primaria puede estar dominada por el fitoplancton, el fitobentos (micro y macroalgas), por las macrofitas, o por alguna combinación de estas tres comunidades (Knoppers 1994). Los requerimientos abióticos de esas comunidades son diferentes, a la vez que existen interacciones entre las mismas, ya que compiten por luz, nutrientes y carbono inorgánico (Sand-Jensen & Borum, 1991).

La eutrofización es un proceso de adición de nutrientes que causa un aumento en la producción de los sistemas acuáticos (Margalef 1983). Constituye una de las causas de contaminación más importantes a nivel mundial de sistemas acuáticos, ya que altera el funcionamiento natural y los servicios ecosistémicos que los ecosistemas proveen (Carpenter 2005; Conley et al. 2009). Uno de los efectos más relevantes de la eutrofización en estuarios y lagunas costeras es que promueve una sucesión de productores primarios (Rodríguez-Gallego 2005) que puede dar lugar a eventos de floración de algas potencialmente tóxicas. Por ejemplo se han reportado casos de floraciones de cianobacterias en Laguna de Rocha (Conde et al. 2009).

La dominancia relativa de cada grupo de productor primario está determinada por el nivel de nutrientes, ya que el enriquecimiento de nutrientes puede promover una sucesión de productores primarios, donde por ejemplo las plantas Charofitas son remplazadas primero por angiospermas (Sheffer 1998), luego las angiospermas son remplazadas por macroalgas no Charoficeas, y finalmente el fitoplancton domina el ecosistema (Mc Glathery 2001; Rabalais 2002).

Los cambios que produce ese proceso de sucesión de productores primarios alteran el funcionamiento ecológico del ecosistema, modificando las tramas tróficas y por tanto comprometiendo la actividad pesquera (McGlathery 2001). Si bien se considera al proceso de eutrofización antrópica como reversible y existen diferentes tecnologías para mitigar dicho impacto, la recuperación puede tomar mucho tiempo, en el orden de hasta cien décadas (Perrow et al. 1995).

## **Disponibilidad de Nutrientes**

La disponibilidad de nutrientes, en particular de nitrógeno y fósforo, juega un rol muy importante en el funcionamiento de las comunidades de productores primarios en todo tipo de ecosistema acuático (Schindler 1977).

El crecimiento de los productores primarios está condicionado en parte por la relación atómica entre el nitrógeno y el fósforo disponibles en el sistema. Existe una relación atómica óptima entre los nutrientes (C, N y P) para la producción de biomasa (Redfield 1934). Según Redfield (1934) para el plancton en sistemas marinos la relación atómica óptima para la producción de biomasa es de 106C:16N:1P. De existir una limitación por nutrientes para el crecimiento de los productores primarios, en los ambientes límnicos generalmente es debido al fósforo (P) y en los marinos debido al nitrógeno (N) (Howart et al. 2006). No obstante, investigadores de la Facultad de Ciencias han demostrado que en Laguna de Rocha el N es el elemento potencialmente limitante para la comunidad de microalgas, y que éstas además se encontrarían co-limitadas por P (Bonilla 2002; Britos et al. 2002; Aubriot et al. 2004 y 2005; Bonilla et al. 2006). Además de las variables ecosistémicas que influyen en el crecimiento de las comunidades de productores primarios, existen diferencias en los requerimientos abióticos de esas comunidades (Sand-Jensen & Borum, 1991). La relación estequiométrica del fitoplancton cumple el cociente de Redfield, aunque en general existen numerosos desvíos a este cociente, mientras que para plantas acuáticas existe un mayor requerimiento de N donde por ejemplo para plantas marinas existe una relación estequiométrica atómica media de 550C:30N: 1P (Atkinson et al. 1983).

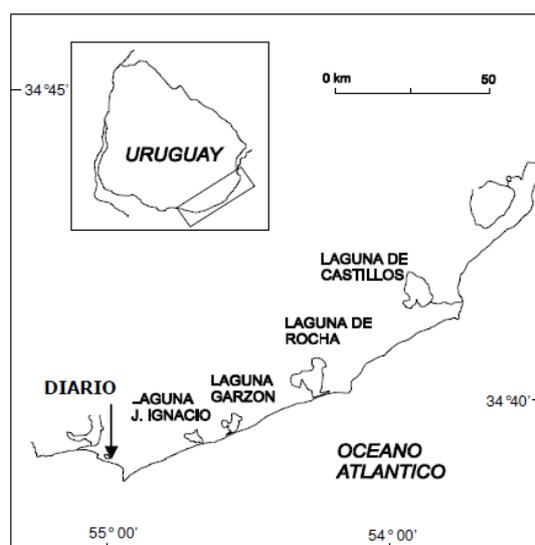
Para sistemas estuarinos y lagunas costeras existe una alta variabilidad espacial de zonas, debido a la mezcla de agua de origen continental y marino, por lo tanto es esperable que la limitación del crecimiento algal por nutrientes esté asociada al régimen hidrológico predominante (Twomey & Thompson 2001; Aubriot et al. 2005).

### **2.2. Antecedentes locales**

Sobre la costa atlántica de Uruguay existe una serie de lagunas costeras (Figura 1) de las que las lagunas de José Ignacio, Garzón, Rocha y Castillos se conectan periódicamente con el océano Atlántico a través de la apertura de un canal en una barra arenosa. A excepción de laguna del Diario la cual perdió su conexión natural con el océano, siendo esta remplazada por un tubo de desagüe que descarga permanente hacia el océano, al

construirse la ruta interbalneria en la década del 50. Se describen en la tabla 2 algunas de las características físicas y sociales de las lagunas del Diario y de Rocha.

Con respecto al grado de antropización, las lagunas del Diario y José Ignacio presentan como característica un entorno inmediato más urbanizado que las restantes lagunas. Laguna de Rocha recibe vertidos urbanos de la ciudad de Rocha y presenta actividades agropecuarias en su cuenca, tanto ganaderas como de cultivos intensivos (Rodríguez-Gallego 2010).



**Figura 1.** Mapa esquemático de la costa atlántica uruguaya. Se indica la ubicación de algunas lagunas costeras, de las cuales Diario (34°S, 54°W) y Rocha (34° 37'S, 54° 15'W) fueron seleccionadas para el presente estudio (tomado de Conde et al. 2003).

**Tabla 1.** Descripción física y social de las lagunas de Rocha y el Diario. Tomado y modificado de Conde et al. (2003).

<b>Características</b>	<b>Diario</b>	<b>Rocha</b>
Superficie de la laguna (ha)	53	7304
Superficie de la cuenca (ha)	2485	121433
Distancia desde el punto central de la laguna al océano (km)	0.95	7.57
Conexión con el océano	Obstruida	Directa
Profundidad media (m)	1.6	0.6
Número de habitantes en la cuenca (censo 2004)	1454	26735
Principales actividades productivas	Turismo, uso residencial	Pesquerías, turismo, ganadería, agricultura

Referente a la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento algal en Laguna de Rocha, existe evidencia de que pueden producirse cambios en la limitación del crecimiento de dicha comunidad por el aporte de nutrientes de las actividades antrópicas que ocurren en las cuencas lacunares. Un ejemplo de lo mencionado anteriormente lo constituye Laguna de

Rocha, donde Aubriot et al. (2005) mostraron un aumento en la concentración de compuestos de P y N en las últimas dos décadas, lo que produjo la consecuente disminución en casi un orden de magnitud de la relación atómica N/P total, llegando hasta valores menores a 10. Los autores proponen que una de las principales causas de este incremento de fósforo puede deberse al aumento de las áreas de cultivos intensivos, la forestación en la cuenca (observado a partir de 1997) y un aumento de la extensión del cultivo de praderas artificiales (Rodríguez-Gallego 2010).

**Tabla 2.** Cambios en el uso de suelo desde 1974 a 2005 en las cuencas en Laguna del Diario y Laguna de Rocha. Se indica la superficie de cada uso de suelo en ha y entre paréntesis el porcentaje de suelo utilizado respecto de la superficie de la cuenca (tomado de Rodríguez-Gallego 2010).

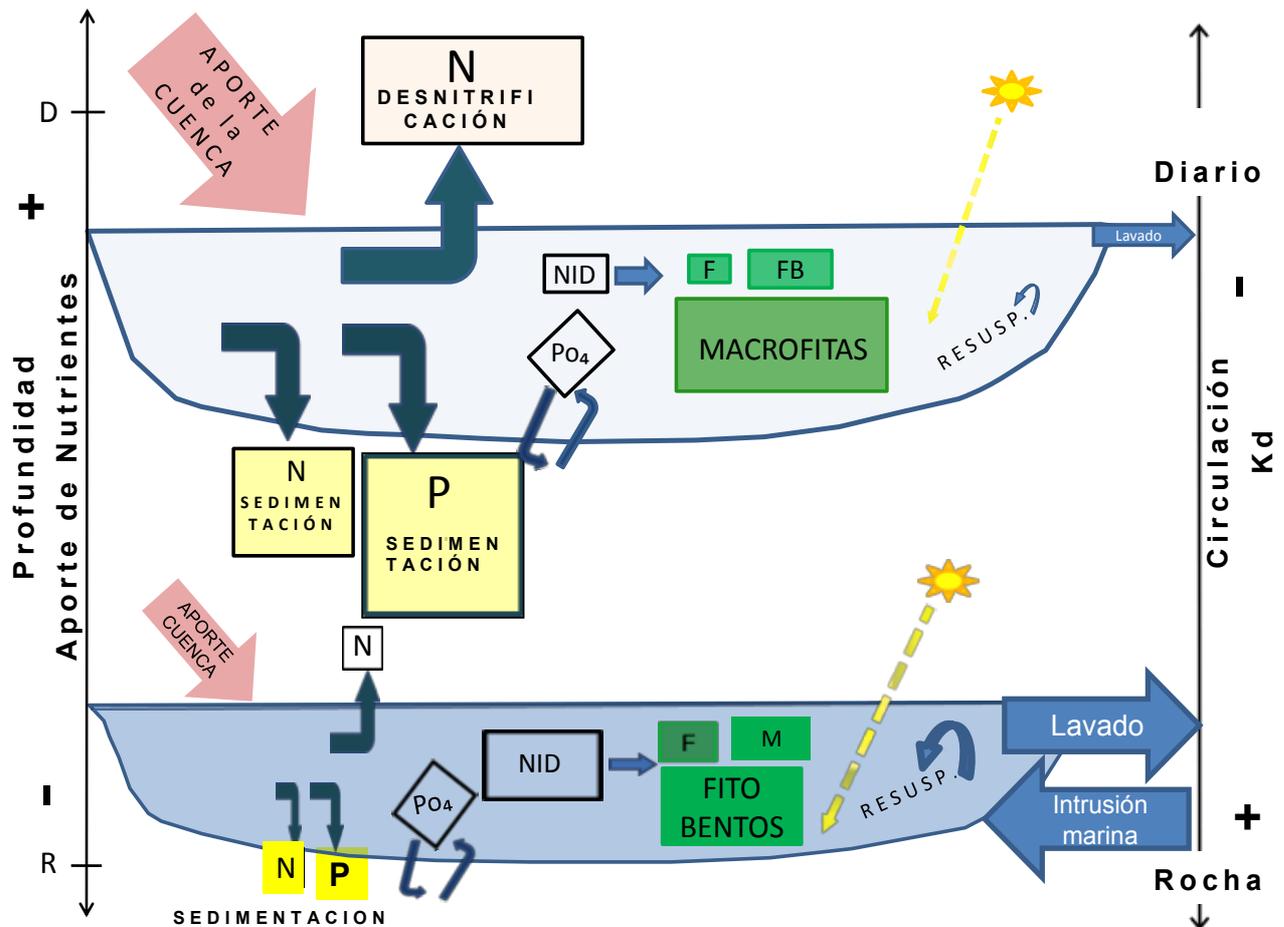
Laguna	Año	Agricultura	Forestación	Bosques naturales	Humedales	Dunas	Praderas	Zonas urbanas
L. del Diario	1974	103 ( 4.1)	318( 12.8)	2( 0.1)	122 ( 4.9)	86 ( 3.4)	1758 ( 70.8)	16 ( 0.6)
	1997	125( 5.0)	833( 33.5)	1( 0.1)	129 ( 5.2)	26 ( 1.0)	956 ( 38.5)	342 ( 13.8)
	2005	105( 4.2)	639( 25.7)	1( 0.1)	161 ( 6.5)	26 ( 1.0)	1154 ( 46.4)	345 ( 13.9)
L. de Rocha	1974	6486 ( 5.3)	15 ( 0.0)	6219 (5.1)	2326 ( 1.9)	362 ( 0.3)	96191 ( 79.2)	835 ( 0.7)
	1997	7462 ( 6.2)	273 ( 0.2)	5387 (5.4)	2461 ( 2.0)	326 ( 0.3)	96846 ( 79.8)	1176 ( 1.0)
	2005	10922 ( 9.0)	8578 ( 7.1)	6308 (5.2)	2906 ( 2.4)	272 ( 0.2)	83912 ( 69.0)	1176( 1.0)

La población en la cuenca de la laguna de Rocha no se ha incrementado significativamente desde 1984 a 2004. Contrariamente, en Laguna del Diario el incremento de la población fue elevado en la década del 1995 a 2005 (Tabla 2). Estos cambios implicaron en general un aumento moderado de la carga de nutrientes exportada hacia la laguna de Rocha entre 1996 y 2005, a diferencia de Laguna del Diario donde el aumento fue significativo. La carga de nutrientes por unidad de superficie fue máxima en Laguna del Diario, seguida de la Laguna de Rocha, las dos cuencas más pobladas de las lagunas costeras. Los usos del suelo que exportaron mayor cantidad de nutrientes fueron la ganadería extensiva y la ocupación humana debido a sus elevados coeficientes de exportación (Rodríguez-Gallego 2010).

Las lagunas costeras se encuentran legalmente protegidas debido a los atributos naturales que presentan, como alta diversidad de fauna y flora, son zonas de relevancia para aves migratorias, proveen importantes refugios y zonas de cría de especies endémicas y de interés comercial, donde además se registran especies con problemas de conservación. La normativa ambiental que protege a estos sistemas establece que Laguna de Rocha, (decreto 260/77) está comprendida dentro de Áreas Naturales Protegidas, reconocidas por el gobierno e instituciones internacionales, como la Reserva de Biosfera “Bañados del Este” (MaB-UNESCO en 1977). Desde el 2010 Laguna de Rocha (en categoría “Paisaje protegido”) ha sido incluida en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP; Ley 17.234

de 2000). Mientras que Laguna del Diario ha sido declarada como reserva departamental, clasificada como zona protegida según la resolución IMMA 182/98 No. 184/98 (Art 1).

En el esquema que se observa en la figura 2 se posicionan teóricamente las lagunas del Diario y Rocha, sobre ejes que poseen las variables ecosistémicas consideradas para este estudio, explicadas a continuación. En la sección superior se ubica Laguna del Diario, donde se registra un alto impacto antrópico causado por cambios significativos en el uso de suelo, presentando un gran aporte de nutrientes (N y P) desde la cuenca debido a la urbanización. Con respecto a sus características físicas es un ecosistema más profundo que la Laguna de Rocha, con alta transparencia (bajo coeficiente de extinción de la luz,  $K_d$ ), baja resuspensión debido a su profundidad y alta cobertura de plantas sumergidas. Está además aislado del océano, y solo descarga agua al mar pero sin recibir intrusión marina. Estas características físicas y morfológicas influyen en el destino final de los nutrientes. En este ecosistema ocurriría una gran exportación de fósforo hacia el sedimento y también de nitrógeno, por lo que es de esperar una baja disponibilidad de nutrientes disueltos en el agua. Asociado a este régimen en la dinámica de nutrientes, se encuentra la comunidad de productores primarios, donde las macrofitas son el grupo de mayor proliferación. Las condiciones en esta laguna, como la estabilidad en la columna de agua, alta penetración de la luz, baja cantidad de nutrientes disponibles en el agua, y alta cantidad de nutrientes en especial de fósforo en el sedimento, benefician el desarrollo de esta comunidad.



**Figura 2.** Esquema teórico que compara los principales procesos que afectan la producción primaria en las lagunas del Diario (D) y Rocha (R) con respecto a algunas de sus características físicas y el aporte de nutrientes desde la cuenca. En los ejes verticales, se indican cantidad relativa de Nitrógeno y Fósforo (N, P), profundidad (z), constante de atenuación de la luz ( $K_d$ ) y circulación de agua (eje derecho). El tamaño de los casilleros y flechas indica la importancia relativa de cada componente. Las flechas indican las entradas y salidas al sistema de los nutrientes N y P. La comunidad de productores primarios está representada por M: macrofitas, F: fitoplancton y FB: fitobentos. Nótese la diferencia de tamaño en cada caso. También se indican en el esquema procesos como la resuspensión (Resusp.), desnitrificación y sedimentación. El NID representa el nitrógeno inorgánico disuelto y el  $PO_4$  el fósforo reactivo soluble.

En la sección inferior del esquema se observa la ubicación teórica de Laguna de Rocha, que representa un ecosistema con conexión intermitente y frecuente con el océano, presentando intrusión marina. Posee un menor aporte de nutrientes desde la cuenca por unidad de superficie en relación a Laguna del Diario, esto es causado en parte por su moderado grado de antropización, y también debido a procesos de atenuación en la carga de nutrientes gracias a la presencia de humedales fluviales. La Laguna de Rocha es un ecosistema somero, con alta turbidez asociada a fenómenos diarios de resuspensión, aunque por su escasa profundidad presenta una alta penetración de la luz, la que llega hasta el sedimento. Con respecto a los productores primarios, el fitobentos es el grupo que aporta la mayor biomasa al sistema (Conde et al. 1999), sin considerar a las macrofitas. En general, en Laguna de Rocha, la biomasa fitoplanctónica total es inferior a lo esperado de

acuerdo a los valores de PT, por lo que otros factores serían limitantes de su desarrollo (Bonilla et al. 2006), como la relativa alta turbidez y la elevada variabilidad de la salinidad (Cabrera et al. 2013).

### **3. JUSTIFICACIÓN**

Desde 2005 comenzó un cambio significativo en el uso del suelo de las cuencas de las lagunas costeras, desde usos más extensivos como la ganadería en campo natural hacia usos más intensivos como la agricultura y la urbanización. Esto explicaría el cambio observado en algunos indicadores de calidad del agua como la concentración de nutrientes y de productores primarios (Rodríguez-Gallego 2010). En este sentido, la evaluación de la carga externa de nutrientes y el destino final de los mismos en los cuerpos de agua es fundamental para inferir qué procesos pueden estar ocurriendo y qué efectos tienen en los procesos ecológicos de las lagunas costeras. No existen estudios específicos previos sobre el destino final de los nutrientes, por lo tanto el presente estudio contribuye a entender mejor el funcionamiento de las lagunas costeras. La evaluación de la compartimentalización de macronutrientes como N y P en los productores primarios, agua y sedimento, brinda información sobre dónde se acumulan dichos nutrientes en el ecosistema y permite inferir los procesos que pueden estar determinando el destino de los nutrientes y los impactos en la calidad del agua.

### **4. HIPOTESIS Y OBJETIVOS**

#### **4.1. Hipótesis**

En las lagunas del Diario y de Rocha se ha producido un incremento en el aporte de nutrientes, causado por el cambio en el uso de suelo, generando un alto aporte de N y P a las mismas (Rodríguez-Gallego 2010). El aumento en el aporte de nutrientes ha contribuido con el proceso de eutrofización de estas lagunas, causando un impacto negativo en su calidad del agua (Conde et al. 1998; Aubriot et al. 2005; Rodríguez-Gallego 2010).

Las comunidades de productores primarios bentónicas, si bien se encuentran sometidas a una alta turbidez, debido a la escasa profundidad de la columna de agua, pueden beneficiarse de los nutrientes del sedimento y la luz que llega al fondo, a la vez que está menos sujeta a la alta variabilidad de concentración de nutrientes de la columna de agua en relación al fitoplancton.

Por todo lo anterior, la **hipótesis** planteada es: que la comunidad de productores primarios asociados al sedimento como macrofitas y fitobentos concentren la mayor biomasa y contenido de nutrientes totales por unidad de superficie.

En este contexto se plantearon las siguientes predicciones:

1. Ambas lagunas tienen mayor proporción de nutrientes en el sedimento que en el agua, pero el contenido de nutrientes es menor en la Laguna de Rocha que en la Laguna del Diario para ambos compartimentos.
2. En la Laguna del Diario los nutrientes se encuentran mayoritariamente en las macrofitas en comparación con las otras comunidades, mientras que en la Laguna de Rocha los nutrientes se encuentran mayormente contenidos en el fitobentos.

## **4.2. Objetivos**

### **Objetivo general**

Comparar el contenido de los nutrientes N y P por unidad de superficie entre el agua, el sedimento y las comunidades de productores primarios en dos lagunas costeras de Uruguay, en relación al aporte de nutrientes desde su cuenca.

### **Objetivos específicos**

1. Evaluar y comparar la distribución relativa final de los nutrientes N y P entre productores primarios (macrofitas, fitoplancton y fitobentos) y los compartimentos agua y sedimento en cada laguna.
2. Determinar en qué etapa del proceso de eutrofización se encuentran ambas lagunas utilizando índices de estado trófico.

## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1. Área de estudio**

Las lagunas costeras seleccionadas para este estudio fueron Laguna del Diario y Laguna de Rocha (Figura 1). La primera se ubica en la costa de Maldonado y está inserta en una

matriz que actualmente es predominantemente urbana, con un fuerte uso estacional y turístico. Laguna del Diario presenta un alto aporte de nutrientes desde su cuenca, es un sistema profundo (1.6 m), tiene aguas transparentes (bajo Kd), baja resuspensión y la comunidad de macrofitas está muy desarrollada, presentando una amplia cobertura en toda la laguna (Kruk et al. 2006 y 2009). Laguna de Rocha, se ubica en la costa del Departamento de Rocha, está inserta en un medio predominantemente natural y rural, donde predomina la ganadería extensiva y la agricultura, y también sostiene las pesquerías más grandes realizadas en sistemas límnicos (Fabiano et al. 1998) Recibe el agua residual, con un tratamiento insuficiente, de la capital departamental con unos 26.000 hab (INE 2014).

Esta laguna presenta menor aporte de nutrientes desde la cuenca en relación al tamaño de su cuenca, respecto a la Laguna del Diario. Es un sistema más somero (0.6 m) de aguas turbias (alto Kd) debido a una alta resuspensión de sedimentos, donde el fitobentos es la comunidad microalgal con mayor aporte de biomasa al ecosistema (Conde et al. 1999). La conexión entre la laguna y el océano se da de forma directa por medio de la apertura episódica de una barra arenosa móvil. El patrón de apertura y cierre de la barra puede darse de forma natural o artificial, dependiendo de los factores influyentes, ya que los mismos pueden ser naturales y o presiones antrópicas.

Existe una amplia disponibilidad de datos para ambas lagunas aportada por investigadores locales, en particular para Laguna de Rocha (por ejemplo Sommaruga & Conde 1990, Bonilla 1998, Conde et al. 1999, 2000 y 2003, Bonilla et al. 2005, Aubriot et al. 2004 y 2005, Conde et al. 2010 y Rodríguez-Gallego 2010 entre otros), lo que nos permite cumplir con los objetivos planteados.

## **5.2. Estrategia de investigación**

En una primera etapa se elaboró una matriz de datos para ambos ecosistemas basados en información disponible en la Sección Limnología, tanto de datos publicados (Bonilla et al. 2005, 2006, Conde et al. 1999, Aubriot et al. 2005, Rodríguez-Gallego (2010) y no publicados (datos históricos de nutrientes y variables físico-químicas). Los 6 muestreos en los que se basa este estudio fueron realizados en las siguientes fechas; 1°) 09/02/2005, 2°) 02/05/2005, 3°) 02/08/2005, 4°) 26/11/2005, 5°) 09/02/2006 y 6°) 20/06/06.

Las variables de entrada para armar la matriz fueron profundidad (m) del agua en cada muestreo, superficie de cada laguna (km<sup>2</sup>), biovolumen de fitoplancton total como indicador

de biomasa ( $\mu\text{m}^3 \text{ ml}^{-1}$ ), concentración de la clorofila-a de microfitobentos como indicador indirecto de biomasa (cloa  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ), biomasa de macrofitas ( $\text{gPSm}^2$ ), carga anual de nutrientes exportada a la laguna por cada uso del suelo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), y las variables fisicoquímicas conductividad ( $\text{mScm}^{-1}$ ), coeficiente de atenuación de la luz ( $\text{m}^{-1}$ ), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), oxígeno disuelto ( $\text{mg l}^{-1}$ ), porcentaje de materia orgánica en el sedimento, concentración de N y P totales en agua ( $\mu\text{g l}^{-1}$ ) y sedimento ( $\mu\text{g PS}^{-1}$ ), precipitación previa cinco días previos al muestreo (mm) y tamaño de grano del sedimento (mm).

Los datos de concentración de nutrientes en macrofitas y fitoplancton fueron transformados para expresarlos en términos de contenido de nutrientes (N y P), en los diferentes compartimentos analizados. Luego se comparó la distribución de N y P en los siguientes compartimentos: agua, sedimento y las comunidades de fitoplancton, fitobentos y macrofitas.

Luego se analizaron estadísticamente las diferencias significativas del contenido de N y P entre cada compartimento.

En una etapa posterior se relacionó estadísticamente la distribución final de los nutrientes en cada compartimento con las variables ecosistémicas tomadas en cuenta para este estudio: conductividad, constante de atenuación de la luz, temperatura, profundidad del agua, usos del suelo y aportes de nutrientes desde la cuenca.

En la etapa final del estudio se realizó una integración de la información con el fin de obtener una visión global del problema, para poder conocer el estado trófico actual de cada laguna y evaluar las causas de ello.

### **5.3. Métodos**

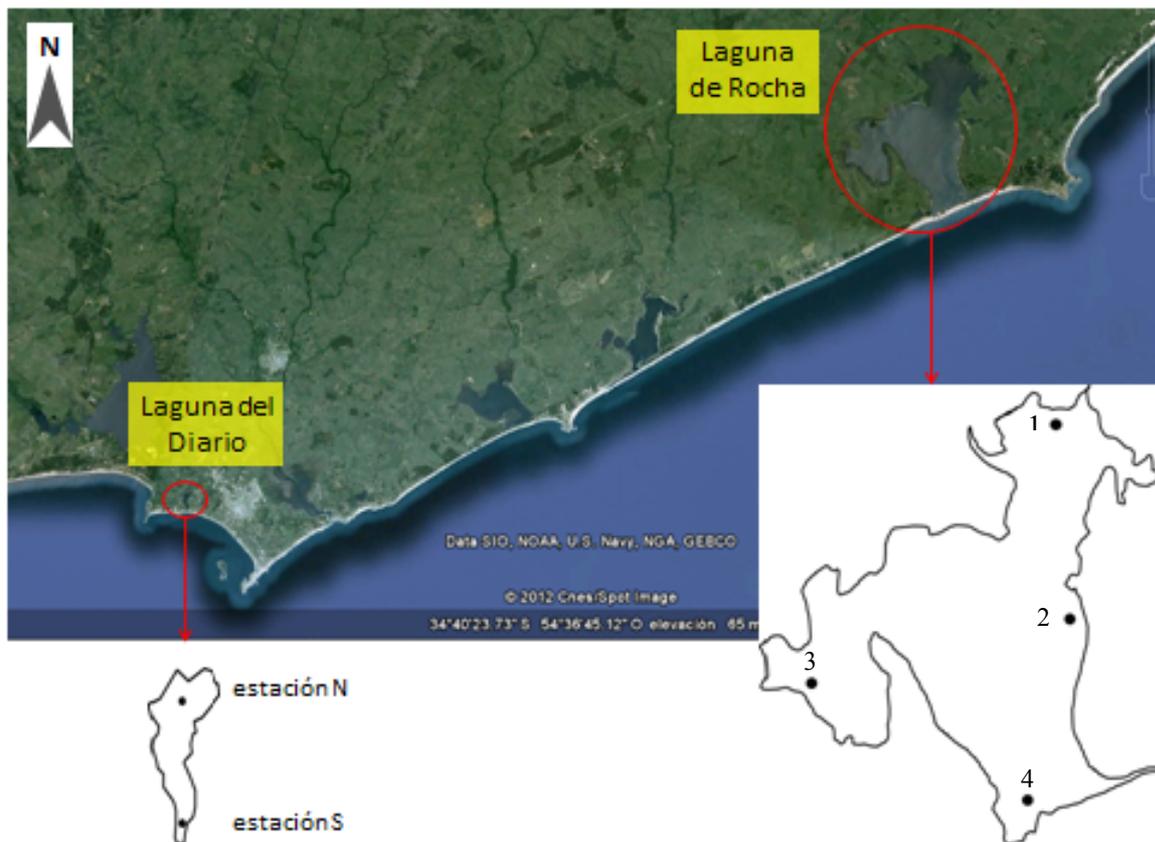
#### **Base de datos**

El aporte anual de N y P totales desde cada cuenca a las lagunas se obtuvo de Rodríguez-Gallego (2010). Esta autora estimó el aporte a través de la determinación de la superficie de cada uso del suelo (obtenido mediante análisis de imágenes satelitales) y coeficientes de exportación de N y P específicos para cada uso obtenidos de bibliografía. La estimación de la biomasa de los productores primarios fue obtenida de Rodríguez-Gallego (2010) y Vidal (2010). Los datos utilizados corresponden a muestreos realizados durante primavera y verano del 2005, y otoño del 2006, con seis eventos de muestreo en cada laguna (en el

marco de diversos proyectos o tesis de posgrado). Todas las muestras fueron tomadas por triplicado en los puntos de muestro que se indican en la figura 3. La biomasa de macrofitas acuáticas sumergidas se obtuvo mediante draga Eckman y fue expresada en peso seco por unidad de superficie. El fitoplancton fue colectado en los mismos sitios de muestreo que las macrofitas mediante botella muestreadora por debajo de la superficie. La biomasa fue determinada a través de la estimación del biovolumen, posteriormente a una completa identificación taxonómica (Vidal 2010). La abundancia de microfitobentos fue estimada usando técnica de extracción de clorofila *a* con acetona al 90% (Lorenzen 1967) en los mismos sitios de muestreo que las comunidades anteriormente mencionadas. El detalle del muestreo y las técnicas empleadas se puede ver en Rodríguez-Gallego (2010) y en Vidal (2010).

Para la Laguna de Rocha se seleccionaron cuatro estaciones de muestreo (Fig. 3) correspondientes a dos zonas límnicas, una zona media y otra zona de mayor influencia oceánica. Estos datos se agruparon, promediando los valores de las variables analizadas para las estaciones 1 y 2 (que conformaron la zona Norte) y las estaciones 3 y 4 (la zona Sur). En la Laguna del Diario se tomaron muestras en dos zonas, zona Norte y zona Sur (Fig. 3).

También se registraron las siguientes variables abióticas con equipos de campo estándar (datos obtenidos de Rodríguez-Gallego 2010): profundidad, pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad ( $K$ , como un indicador de la salinidad) y PAR (radiación fotosintéticamente, para el cálculo del coeficiente de atenuación la luz,  $K_{dPAR}$ ).



**Figura 3.** Imagen satelital donde se muestra la ubicación de las lagunas en estudio (señaladas con círculos rojos), e imagen esquemática donde se indican las estaciones de muestreo (señaladas con puntos negros) en las respectivas lagunas, (para Laguna de Rocha se numeraron las estaciones 1-4).

### Transformación de datos

Con el fin de comparar en términos relativos porcentuales la distribución de los nutrientes N y P en los distintos compartimientos bióticos y abióticos, se realizó una conversión de datos para expresarlo en las mismas unidades ( $\text{g m}^{-2}$ ).

La transformación de los datos constó de tres pasos sucesivos;

1. Transformación de Biomasa; se expresó la biomasa de macrofitas, fitoplancton y fitobentos en gramos de peso seco de cada nutriente (N y P) por unidad de superficie ( $\mu\text{g m}^{-2}$ ) (macrofitas y fitobentos) o  $\text{m}^3$  (fitoplancton).
2. Transformación dimensional; para el cálculo de los nutrientes en la columna de agua (fitoplancton) se realizó una conversión de  $\text{m}^3$  a  $\text{m}^2$ , multiplicando la concentración ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) por la profundidad media de la columna de agua (m), quedando así expresado como  $\mu\text{g m}^{-2}$ .
3. Transformación porcentual; se expresaron todos los datos de nutrientes por compartimento en términos porcentuales (tomando la suma de nutrientes totales

expresada por m<sup>2</sup> como el 100%), a fin de poder comparar entre cada uno, en cada laguna y entre éstas.

Una vez transformados los datos, se procedió a la comparación de los mismos, lo que permitió conocer en qué compartimento se concentra cada nutriente, evidenciando su distribución relativa en cada ecosistema.

Se estimó para cada laguna la concentración total de N y P en la columna de agua y sedimentos superficiales, para esto se sumó el contenido de N y P de cada comunidad y el contenido de N y P en la columna del agua y los sedimentos superficiales. La suma total se expresó en ambos casos en  $\mu\text{g m}^{-2}$ . Esta información se utilizó como indicador indirecto, para comparar la etapa del proceso de eutrofización de ambos sistemas, y se relacionó a las variables analizadas de la cuenca y del agua, arriba mencionadas.

Para asignar el contenido de N y P a los productores primarios, se utilizaron fórmulas de la literatura (Montanges et al. 1994; Klausmeier et al. 2004, Vymazal 1995) que asumen una relación de Redfield por grupo taxonómico o para la biomasa total de los organismos. En el caso del fitoplancton se hizo la conversión desde el biovolumen, mientras que para el fitobentos se asumió una contribución fija estándar de la clorofila *a*, a la biomasa total (Reynolds 1984) para luego calcular el contenido de N y P. Para calcular el contenido de N y P en las macrofitas, se multiplicó la masa en gPS m<sup>2</sup> por un factor de conversión específico para cada grupo de plantas tomado de Vymazal (1995). Para el cálculo de la superficie de cobertura de macrofitas acuáticas en Laguna de Rocha se determinó la zona con vegetación sumergida considerando todos los muestreos de vegetación sumergida realizados hasta el momento. Posteriormente se digitalizó manualmente esta zona en un sistema de información geográfica (SIG) y se calculó su superficie. Esto se realizó para la zona norte y sur de cada laguna por separado.

### **Tratamiento de datos**

Los datos de contenido de nutrientes totales (N y P) de cada comunidad y de agua y sedimento fueron transformados y expresados en porcentaje. Al igual que los datos de variables fisicoquímicas, los mismos se describieron según valores promedio, desvíos estándar, máximos y mínimos para resumir la información obtenida en el tiempo y en el espacio en cada laguna.

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa STATISTICA 7.0, para la predicción 1 se utilizó estadística paramétrica, ANOVA de 2 vías. La homeocedasticidad de la varianza fue chequeada mediante la prueba de Bartlett Cochran y la normalidad con la prueba de Kolmogorov Smirnov. Para el caso de la predicción 2 se utilizó estadística no paramétrica, la prueba de Wilcoxon para muestras pareadas, ya que para dicha hipótesis los datos no cumplieron con la condición de distribución normal y homeocedasticidad de varianza.

### **Índices de estado trófico**

Se calcularon los índices de estado trófico de Carlson (Trophic state index, TSI) y Salas & Martino, para cada laguna. Los criterios de clasificación de cada índice son los siguientes: Índice de Carlson,  $TSI < 30$ : Oligotrófico,  $30 < TSI < 60$ : Mesotrófico,  $60 < TSI < 90$ : Eutrófico; Índice de Salas & Martino (adaptado de Vollenweider & Kerekes 1981); de acuerdo al valor de P total en el agua de cada zona de la laguna, se asigna una probabilidad de acuerdo al gráfico de referencia.

## **6. RESULTADOS**

### **6.1. Variables fisicoquímicas**

El promedio de la profundidad para toda la Laguna del Diario durante todo el estudio fue  $1.18 \pm 0.16$  m, mientras que para la Laguna de Rocha fue de  $0.48 \pm 0.27$  m. La temperatura del agua para las lagunas del Diario y de Rocha varió en un rango de 13.0 a 23.8 y de 14.5 a 26.9 °C, respectivamente. Se registraron en todos los casos valores de saturación y sobresaturación de oxígeno para ambas lagunas, registrándose el máximo en la Laguna del Diario, en junio 2006 (153%). En la tabla 3 se indican los valores de las variables fisicoquímicas de todos los muestreos.

La conductividad del agua como indicador de salinidad fue siempre mayor en Laguna de Rocha, alcanzando un valor máximo de  $51.5 \text{ mS cm}^{-1}$ , mientras que el valor máximo que se registró en Laguna del Diario fue  $10.4 \text{ mS cm}^{-1}$ . El pH varió en el rango de 7.3 a 10.2 y de 6.7 a 8.1 para las Lagunas del Diario y de Rocha, respectivamente. Los valores más altos del  $K_d$  se registraron en la Laguna de Rocha (máximo:  $11.7 \text{ m}^{-1}$ ), mientras que para la Laguna del Diario el máximo fue  $6.5 \text{ m}^{-1}$ .

**Tabla 3.** Parámetros fisicoquímicos promedio por muestreo para ambas lagunas para todas las estaciones de muestreo. Z: profundidad de la columna de agua, % Mo sed: porcentaje de materia orgánica en el sedimento, K: conductividad, T: temperatura, Kd: coeficiente de extinción de la luz. (Datos tomados de Rodríguez-Gallego 2010).

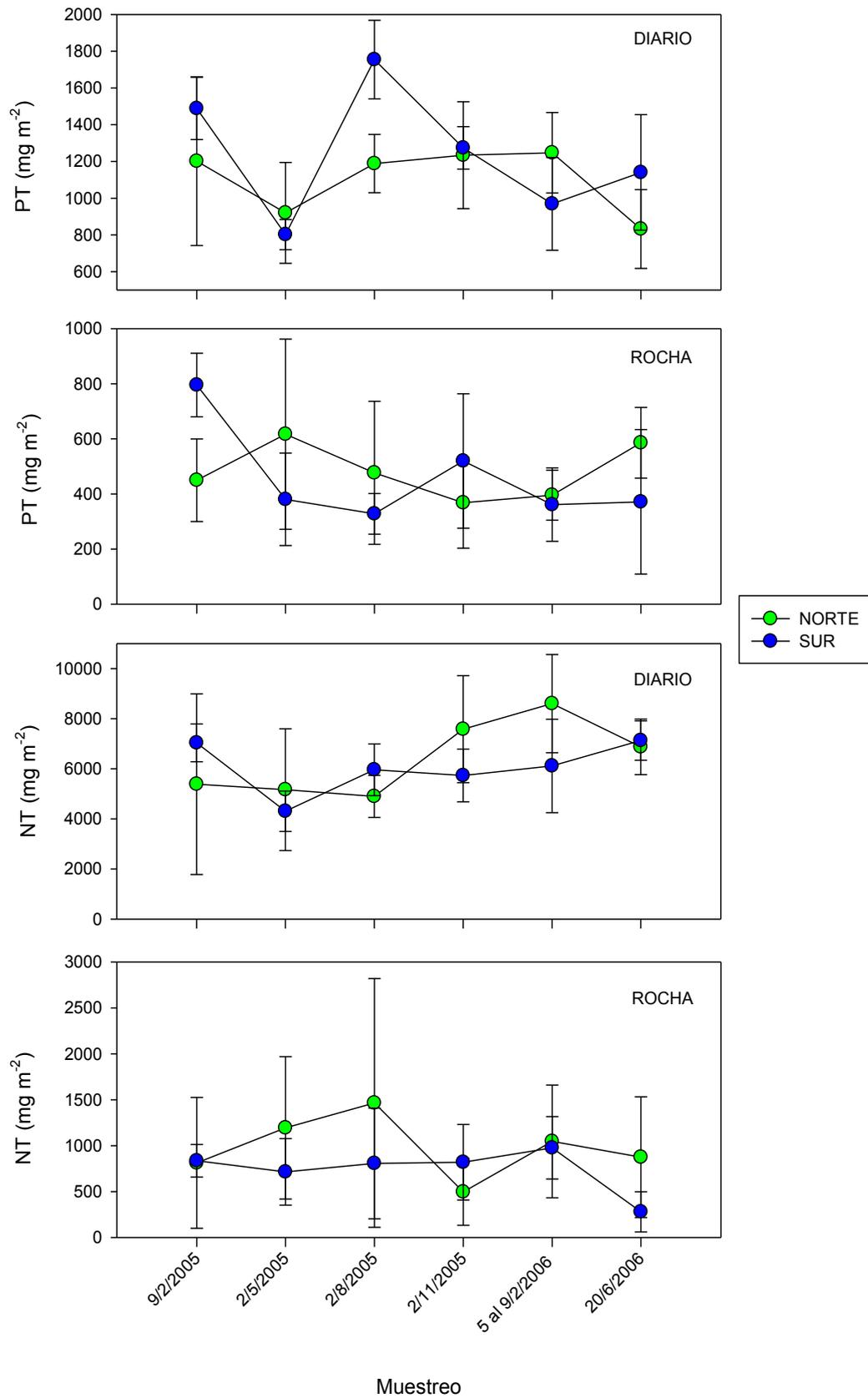
Laguna	Muestreo	Z (m)	Mo sed (%)	K (mS cm <sup>-1</sup> )	T (°C)	Kd (m <sup>-1</sup> )
Diario	1	1.5	10.8	0.5	23.1	2.1
Diario	2	1.5	10.5	0.3	17.4	4.6
Diario	3	1.6	11.8	1.1	16.8	2.6
Diario	4	1.6	12.4	0.9	19.7	1.6
Diario	5	1.3	10.9	1.4	21.8	1.5
Diario	6	1.7	13.9	2.7	13.5	5.9
Rocha	1	0.9	8.5	10.0	24.7	5.6
Rocha	2	0.4	10.8	13.1	17.1	1.9
Rocha	3	0.2	9.4	21.4	17.7	4.9
Rocha	4	0.4	8.8	26.2	23.6	3.0
Rocha	5	0.2	12.2	48.8	19.7	3.6
Rocha	6	0.4	9.6	29.3	16.5	4.4

## 6.2. Concentración total de nutrientes

En la tabla 4 se muestran los valores promedio de la concentración de fósforo total (PT) y nitrógeno total (NT), para las zonas norte y zona sur de cada laguna. El valor máximo de PT ocurrió en la zona norte de la Laguna de Rocha (81 µg l<sup>-1</sup>), mientras que el máximo valor para NT se registró en la zona sur de la Laguna del Diario (1110 µg l<sup>-1</sup>). En la figura 4 se muestra la variación temporal y entre estaciones de muestreo del contenido total de NT y PT (sumatoria del contenido de nutrientes en todos los compartimentos), donde se observó que en todos los casos las concentraciones de NT fueron superiores a las de PT. El valor máximo de NT observado en laguna del Diario (8602 mg m<sup>-2</sup>) alcanzó casi un orden de magnitud superior al mayor valor de NT registrado en laguna de Rocha (965 mg m<sup>-2</sup>). Esto también se registró para el PT, donde el valor máximo en la Laguna del Diario fue 1488 mg m<sup>-2</sup>, mientras que el valor de PT registrado para Laguna de Rocha fue de 771 mg m<sup>-2</sup>. Con respecto a la temporalidad no se observaron diferencias marcadas, o patrones claros en ninguna de las estaciones de muestreo para ambas lagunas.

**Tabla 4.** Valores de concentración de los nutrientes fósforo total (PT) y nitrógeno total (NT) (µg l<sup>-1</sup>), se indican promedio y desvío estándar por zonas norte (N) y sur (S) de cada laguna para todo el período de estudio.

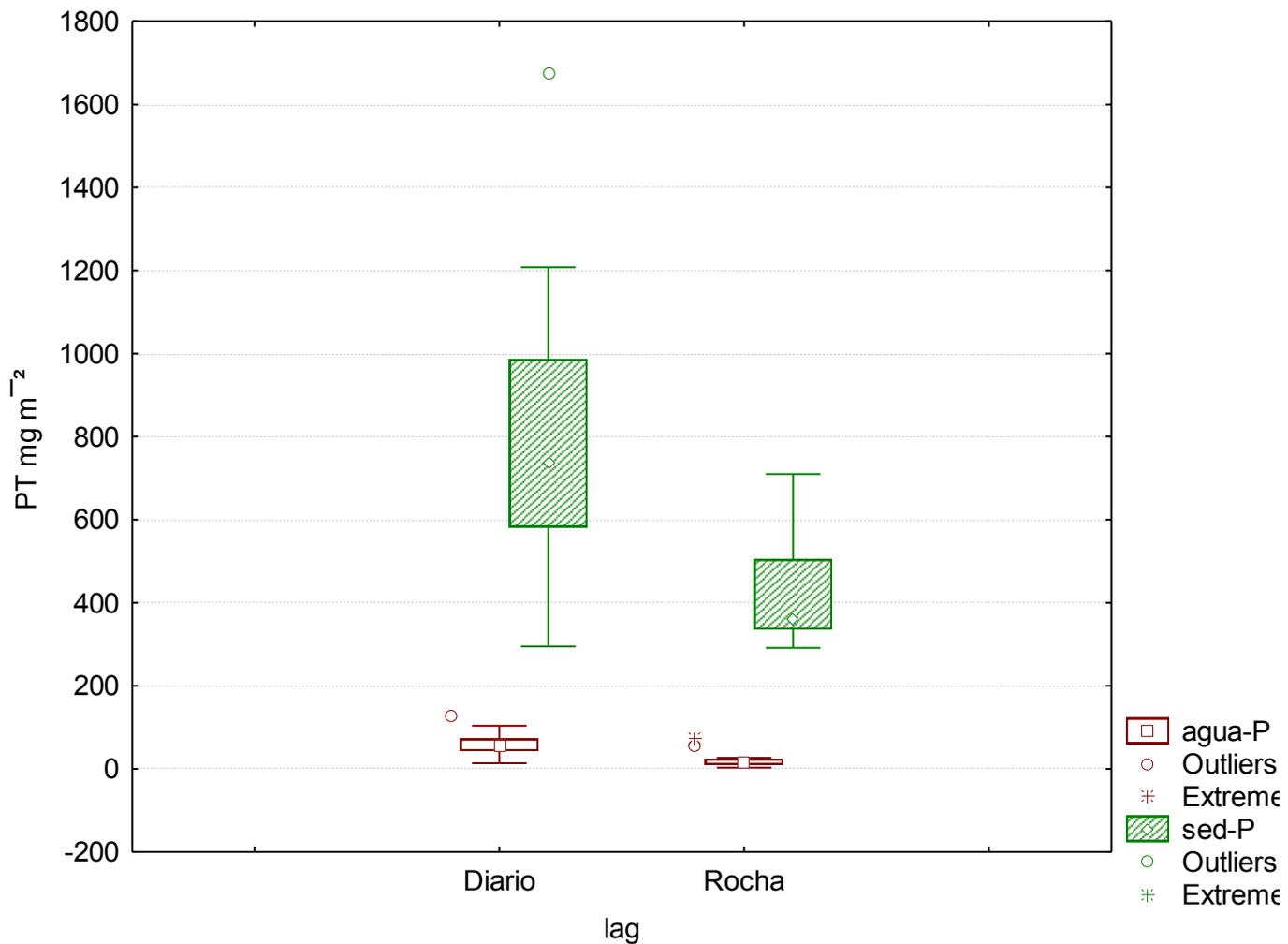
Laguna	zona	PT (µg l <sup>-1</sup> )	NT (µg l <sup>-1</sup> )
Diario	N	41.3 ± 23.5	630.2 ± 232
	S	37.0 ± 23	690.8 ± 264.7
Rocha	N	57.6 ± 17.2	411.8 ± 209.6
	S	29.5 ± 17.1	243.1 ± 168



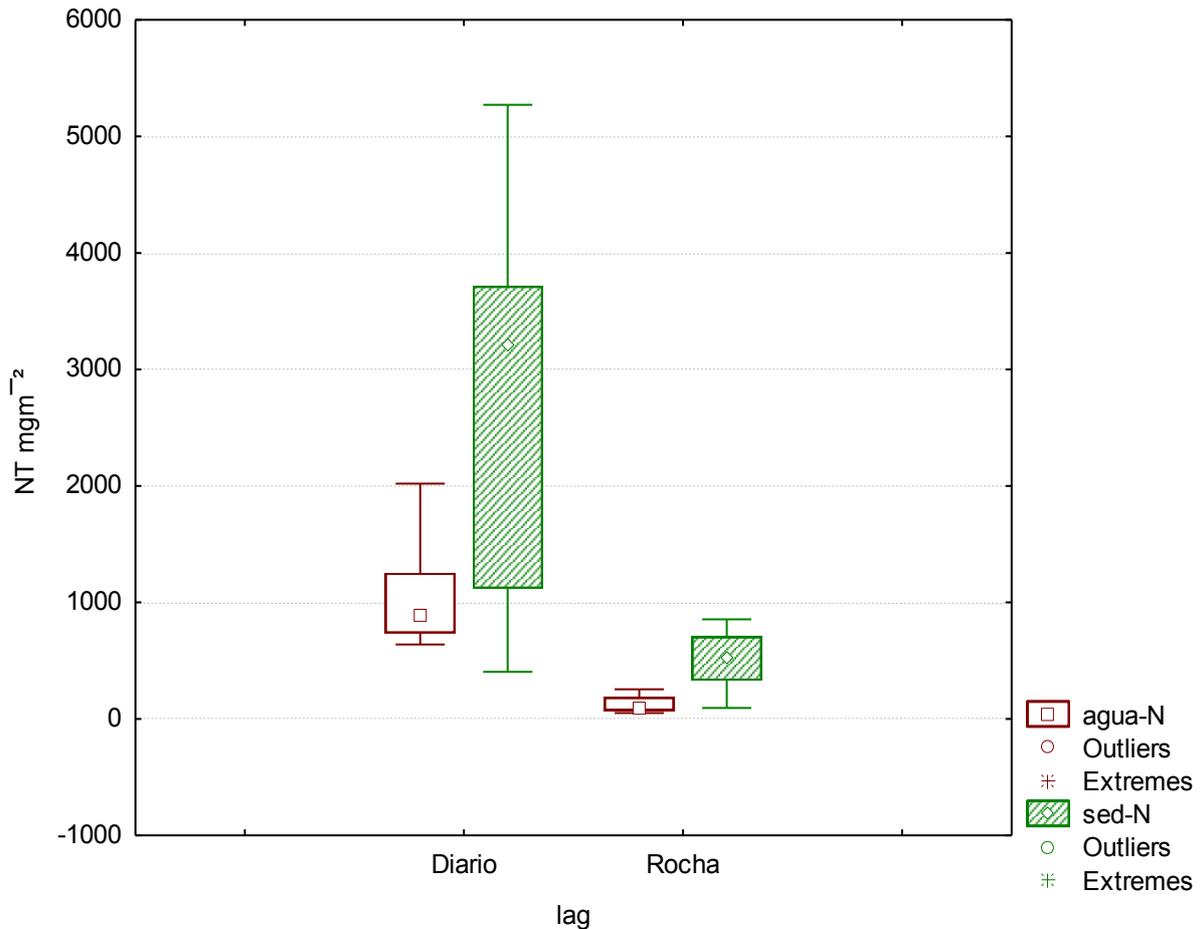
**Figura 4.** Concentración de fósforo y nitrógeno total acumulados por metro cuadrado en las lagunas del Diario y Rocha a lo largo del período de estudio (los valores representan la sumatoria de todos los compartimentos estudiados de cada laguna).

### 6.3. Contenido de nutrientes en agua y sedimento

Los contenidos de P fueron siempre mayores en el sedimento que en el agua (Fig. 5), alcanzando un valor máximo de  $1864 \text{ mg m}^{-2}$  en el sedimento de la Laguna del Diario. El mayor valor registrado en el sedimento en la Laguna de Rocha fue  $806 \text{ mg m}^{-2}$ . Los mínimos registrados fueron de  $219.3$  y  $146.2 \text{ mg m}^{-2}$  para Diario y Rocha, respectivamente. Para el compartimento agua los valores máximos de PT registrados fueron  $128.7$  y  $86.3 \text{ mg m}^{-2}$ , para las lagunas del Diario y Rocha. El valor mínimo de PT en el agua se encontró en la Laguna de Rocha ( $3.0 \text{ mg m}^{-2}$ ).



**Figura 5.** Contenido de fósforo total (PT) en agua y sedimento en cada laguna para todo el período de estudio y todas las estaciones de muestreo.



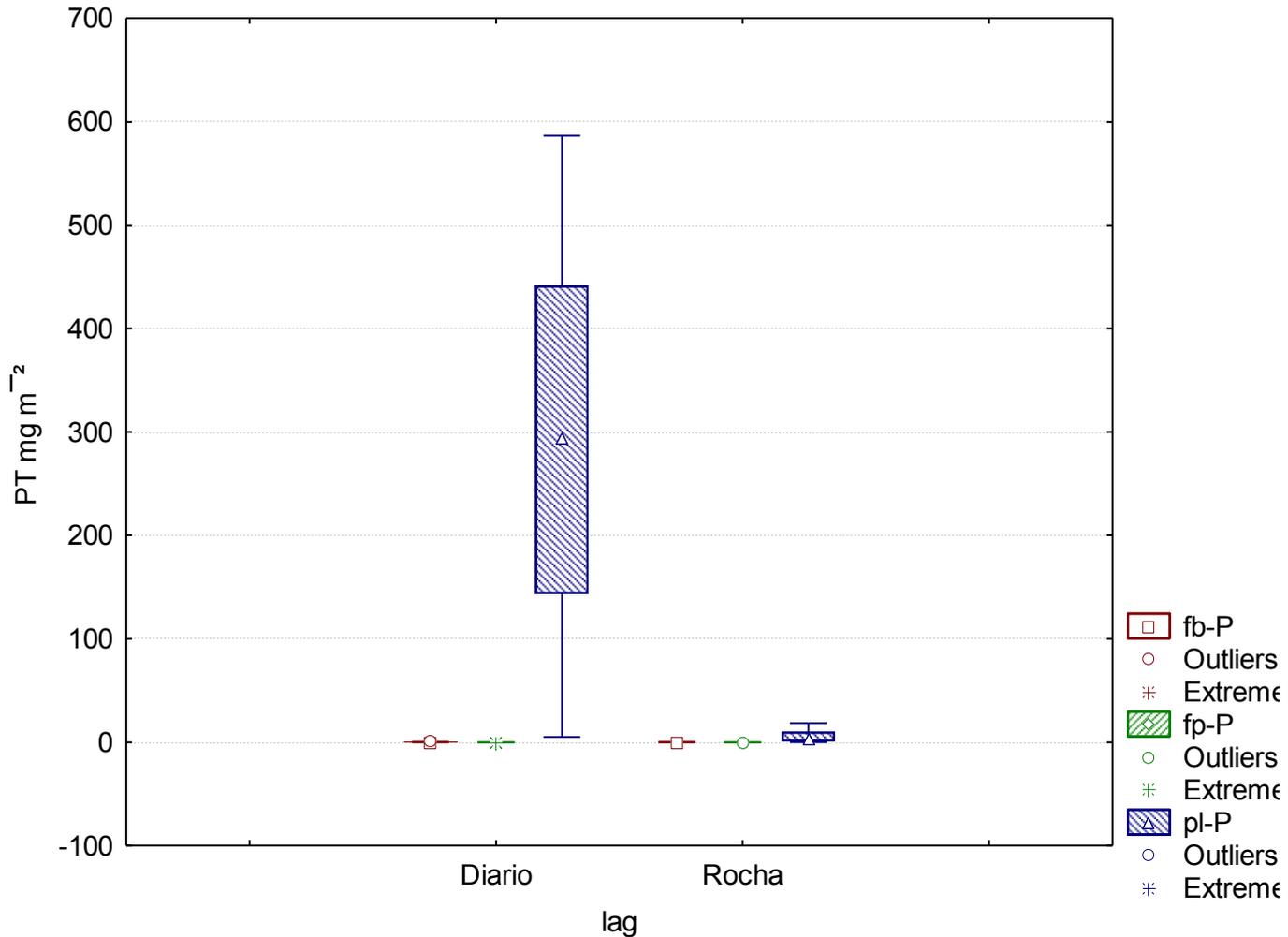
**Figura 6.** Concentración de nitrógeno total (NT) en agua y sedimento de cada laguna para todo el período de estudio y todas las estaciones de muestreo.

Para el caso del nitrógeno (Fig. 6) el máximo valor encontrado fue en el sedimento de la Laguna del Diario ( $5826 \text{ mg m}^{-2}$ ), mientras que para la Laguna de Rocha el mayor valor observado fue  $1400 \text{ mg m}^{-2}$ .

Al igual que en el sedimento, en el agua se registró el valor máximo en la Laguna del Diario ( $2266 \text{ mg m}^{-2}$ ), siendo  $118.7 \text{ mg m}^{-2}$  el mayor valor observado para la Laguna de Rocha, donde además se observó el menor valor de concentración de NT ( $3.0 \text{ mg m}^{-2}$ ).

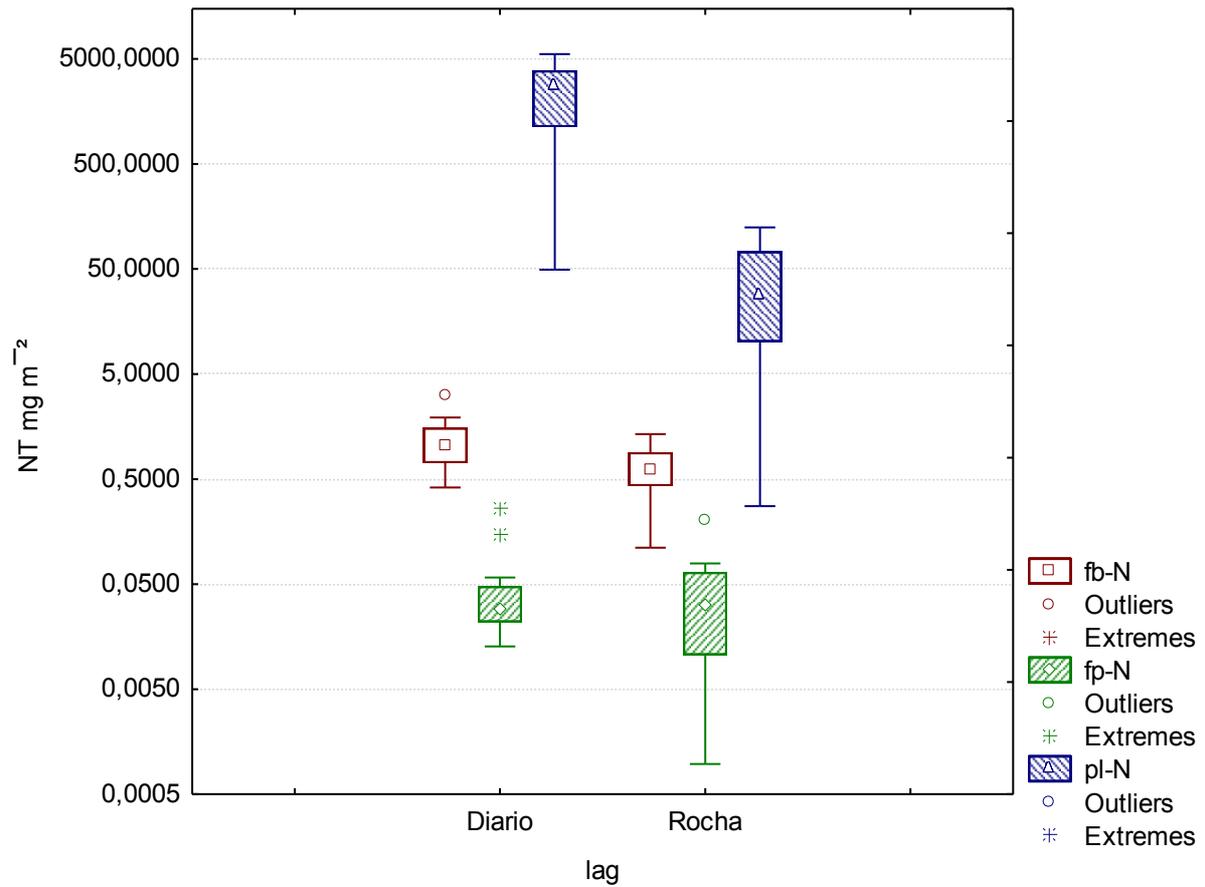
#### 6.4. Contenido de nutrientes en productores primarios

En las comunidades de productores primarios se observó que las macrofitas presentaron el mayor contenido de P en ambas lagunas, con un amplio margen de diferencia con el resto de las comunidades para el caso de Laguna del Diario (Fig. 7). El valor máximo registrado fue de  $628.0 \text{ mg m}^{-2}$  de fósforo en la Laguna del Diario, mientras que el valor máximo para la Laguna de Rocha fue  $273.8 \text{ mg m}^{-2}$ . Los mínimos fueron registrados en la comunidad de fitoplancton en ambas lagunas, con valores de  $0.2$  y  $0.1 \text{ mg m}^{-2}$  para las lagunas del Diario y de Rocha, respectivamente (Fig. 7).



**Figura 7.** Contenido de fósforo (P) en las comunidades de productores primarios de cada laguna (fb: fitobentos, fp: fitoplancton y pl: plantas acuáticas) de cada laguna, para todo el período de estudio y todas las estaciones de muestreo.

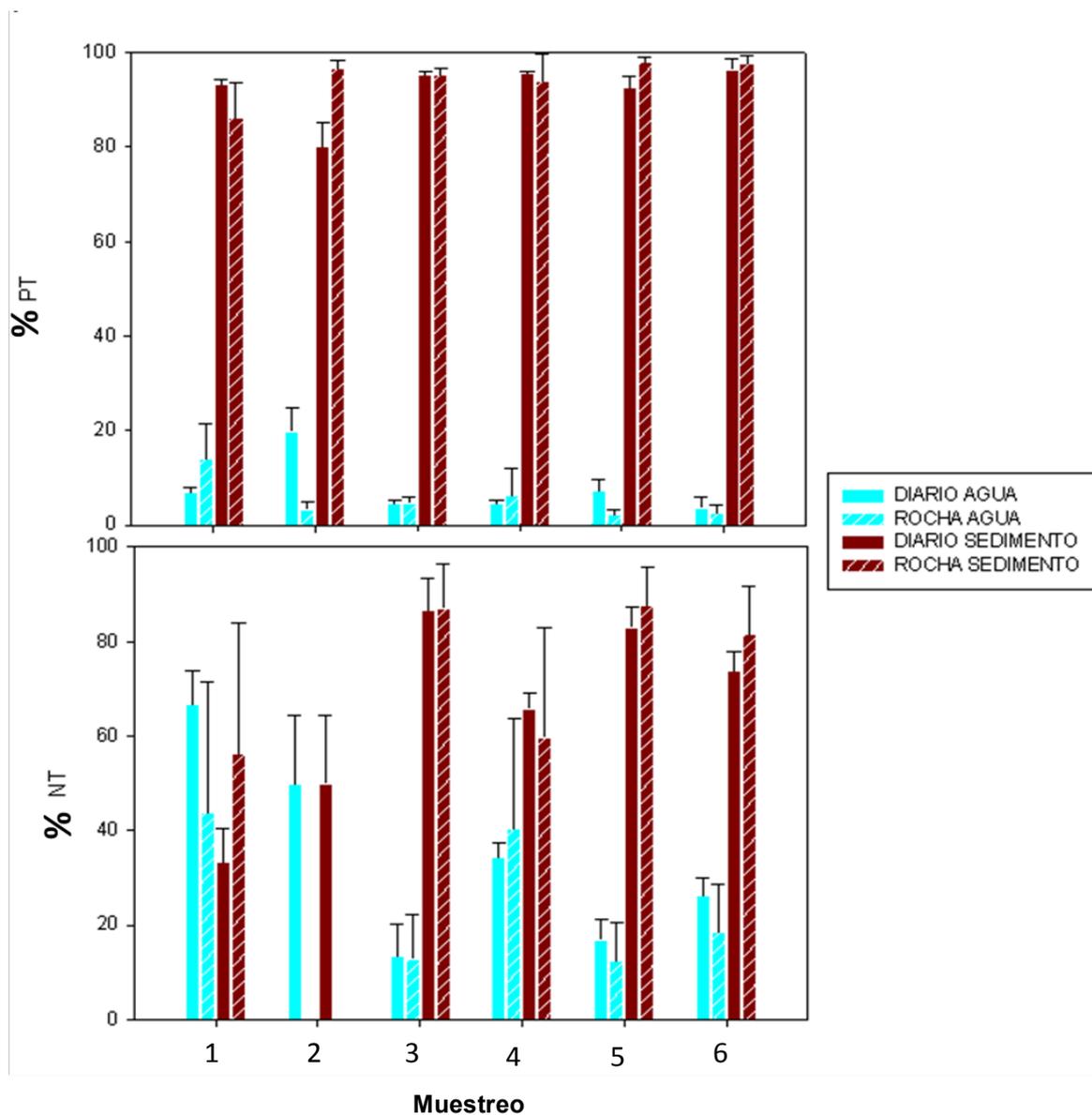
Con respecto al contenido de N se observaron diferencias muy marcadas para la comunidad de macrofitas respecto a las demás comunidades en la Laguna del Diario, observándose un valor máximo de 7198 mg m<sup>-2</sup> (Fig. 8). Para la Laguna de Rocha el máximo registrado también fue para las plantas, con un valor de 1833 mg m<sup>-2</sup>. Para las comunidades de fitobentos y fitoplancton se observaron valores máximos y mínimos similares de una misma comunidad en ambas lagunas (Fig. 8). También puede observarse que a diferencia de lo que se registró para el PT, la diferencia en el contenido de NT entre las macrofitas y el resto de las comunidades es notablemente mayor (Fig. 8).



**Figura 8.** Contenido de nitrógeno (N) en las comunidades de productores primarios de cada laguna (fb: fitobentos, fp: fitoplancton y pl: plantas acuáticas) de cada laguna, para todo el período de estudio y todas las estaciones de muestreo.

### 6.5. Distribución relativa de nutrientes en agua y sedimento

Con respecto a la distribución porcentual de los nutrientes en agua y sedimento (Fig. 9) se observó que en general el sedimento posee una mayor proporción de ambos nutrientes en ambas lagunas. La mayor proporción de PT se observó en el sedimento, con valores similares para ambas lagunas ( $94.7 \pm 2.3\%$  y  $91.8 \pm 8.0\%$ , valores promedio y desvío estándar para las lagunas del Diario y de Rocha, respectivamente).



**Figura 9.** Porcentaje relativo de Fósforo y Nitrógeno totales en el agua y sedimento de cada laguna, por muestreo.

La misma tendencia se observó para el NT, aunque se registró una mayor equidad en la distribución de dicho nutriente entre ambos compartimentos ( $53.5 \pm 28.7\%$  y  $68.9 \pm 17.8\%$ , valores promedio y desvío estándar para las lagunas del Diario y Rocha, respectivamente)

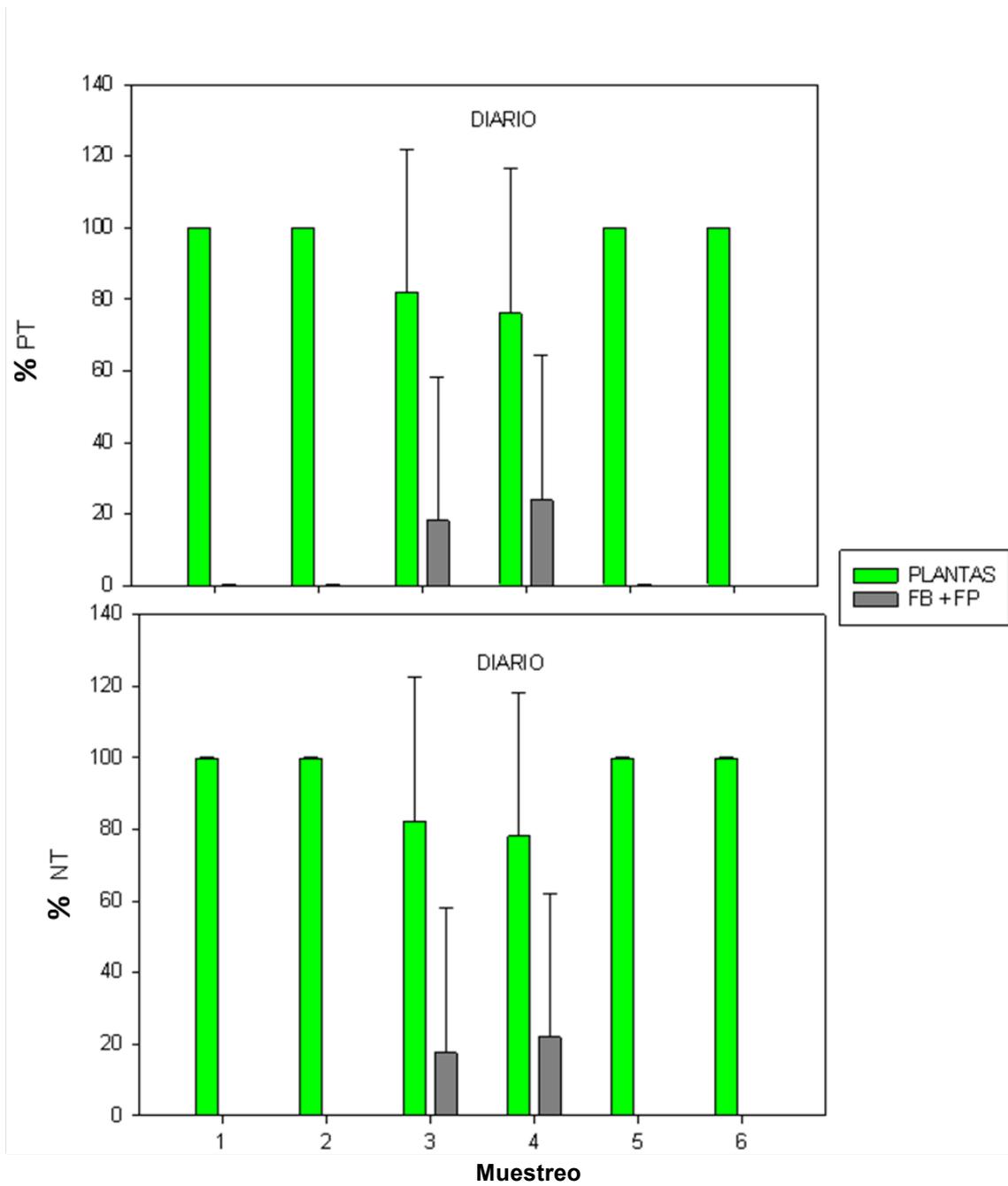
(Fig. 9). Las diferencias encontradas entre agua y sedimento para ambas lagunas, así como entre lagunas fueron significativas (Tabla 5).

**Tabla 5.** ANOVA de dos vías para los nutrientes fósforo total (PT) y nitrógeno total (NT) en agua y sedimento de las lagunas del Diario y de Rocha. Significancia=  $p < 0.05$  (marcados en rojo). Los datos fueron previamente transformados aplicando función logarítmica. N = 36, grados de libertad = 1. Compartim: compartimento.

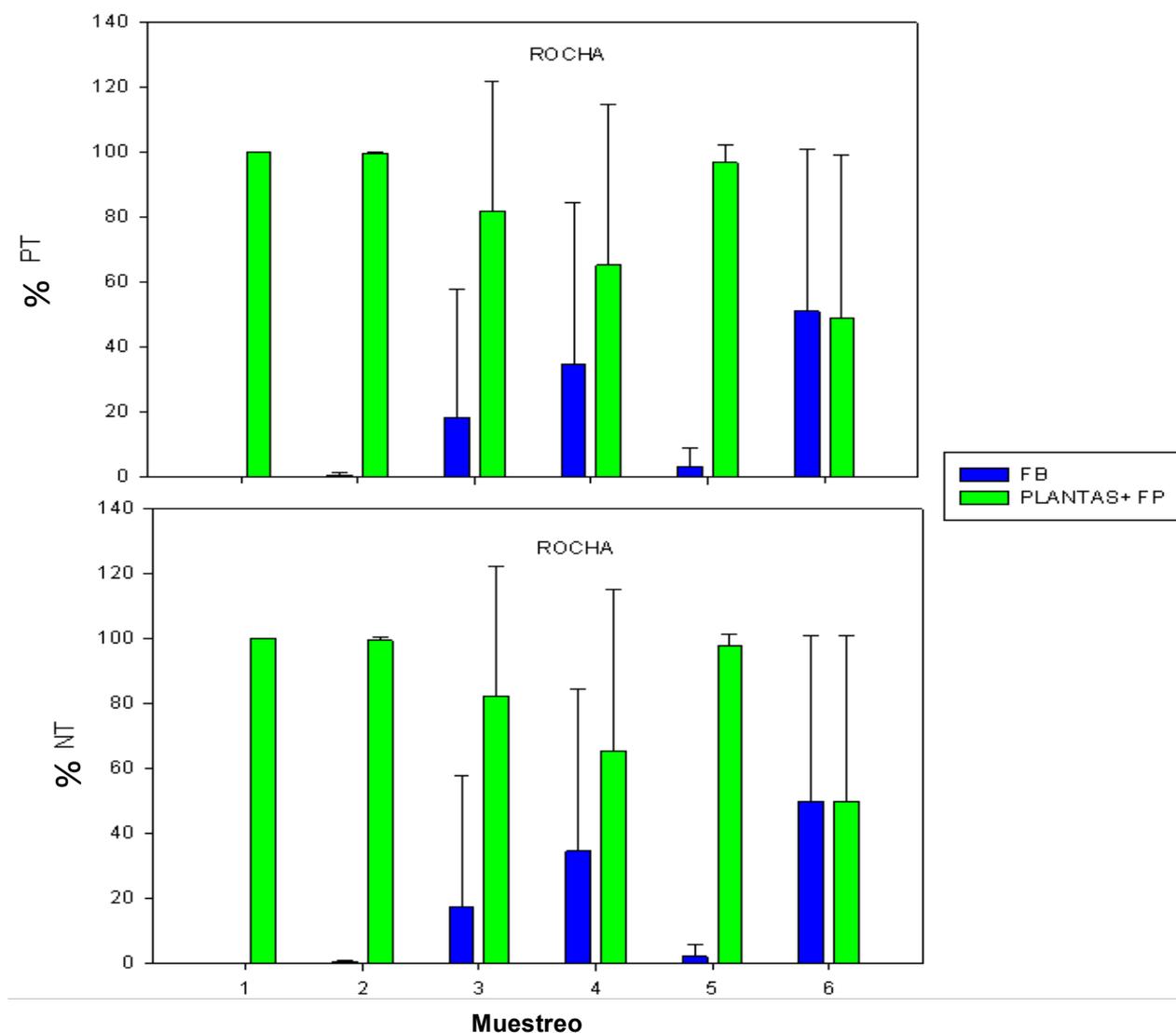
<b>log PT</b>			
	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Intercepto	628	8111	< 0,001
Laguna	5,48	70,8	< 0,001
compartim	57,55	742	< 0,001
Laguna*compartim	0,373	4,814	0,0299
<b>log NT</b>			
	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Intercepto	1036	9820	< 0,001
Laguna	24,9	236	< 0,001
compartim	6,42	60,9	< 0,001
Laguna*compartim	0,349	3,30	0,0713

#### 6.6. Distribución relativa de nutrientes en productores primarios

En la Laguna del Diario se observó que los nutrientes se encuentran mayormente contenidos en la comunidad de plantas, registrándose una amplia diferencia con las comunidades sumadas de fitoplancton y fitobentos. Como puede observarse en la figura 10, en 4 de los 6 muestreos realizados, las plantas acuáticas poseen el 100% de los nutrientes (PT y NT) en comparación con las restantes comunidades. Las diferencias encontradas para dichas comunidades en laguna del Diario fueron significativas (Tabla 6).



**Figura 10.** Porcentaje relativo de Fósforo y Nitrógeno en la comunidad de macrofitas vs. Comunidades de fitobentos (FB) y fitoplancton (FP) sumadas, por muestreo, en Laguna del Diario.



**Figura 11.** Porcentaje relativo de Fósforo y Nitrógeno totales en las comunidades de fitobentos (FB) vs. macrofitas y fitoplancton (FP) sumados, por muestreo, en Laguna de Rocha.

En laguna de Rocha se registró una distribución diferencial bien marcada de los nutrientes entre las comunidades. Como puede apreciarse en la figura 11, en general los nutrientes se encuentran mayormente contenidos en las comunidades de plantas y fitoplancton. En 3 de los 6 muestreos los nutrientes se distribuyeron en las comunidades de plantas y fitoplancton con valores muy próximos al 100%. No obstante, se registraron variantes de este patrón general en el último muestreo, donde para el caso del PT se observó un valor levemente mayor en la distribución porcentual de nutrientes para la comunidad de fitobentos en comparación con las comunidades de plantas y fitoplancton. Mientras que para el caso del NT se observó relativa similitud en la distribución porcentual del nutriente en las comunidades estudiadas. Las diferencias observadas entre dichas comunidades para la Laguna de Rocha fueron también significativas (tabla 6).

**Tabla 6.** Prueba de Wilcoxon (significancia=  $p < 0.05$ ,  $n=36$ ) entre los porcentajes relativos de NT y PT entre plantas (PL), fitobentos (FB) y fitoplancton (FP) para ambas lagunas.

Laguna	Nutriente	Comunidades	T	Z	P
Diario	PT	PL vs FB + FP	3.000	5.184	< 0.001
Diario	NT	PL vs FB + FP	3.000	5.184	< 0.001
Percent $v < V$					
Rocha	PT	FB vs PL + FP	19.444	3.500	< 0.001
Rocha	NT	FB vs PL + FP	16.666	3.833	< 0.001

### 6.7. Índices de estado trófico

Los resultados de la clasificación de las lagunas según su estado trófico, basada en el cálculo de los índices de Carlson (TSI) y de Salas & Martino (1990), se presenta en las tablas 7 y 8, respectivamente.

**Tabla 7.** Clasificación del estado trófico de cada laguna por zona (norte y sur) según índice de Carlson (TSI: Trophic state index) para cada zona (norte y sur) y para cada fecha de muestreo. O: oligotrófico, M: mesotrófico, E: eutrófico.

Laguna	Zona	Muestreo	PT ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	TSI	Clasificación
Diario	Norte	1	35.4	55.3	M
Diario	Norte	2	74.2	63	E
Diario	Norte	3	37	56.2	M
Diario	Norte	4	28.1	52.2	M
Diario	Norte	5	63.2	63.9	E
Diario	Norte	6	9.9	37.3	M
Diario	Sur	1	35.9	55.8	M
Diario	Sur	2	77.5	66.9	E
Diario	Sur	3	41.3	57.8	M
Diario	Sur	4	30.9	53.6	M
Diario	Sur	5	29.1	52.7	M
Diario	Sur	6	7.1	32.3	M
Rocha	Norte	1	81	67.5	E
Rocha	Norte	2	37	56.2	M
Rocha	Norte	3	70.8	65.6	E
Rocha	Norte	4	64.6	64.3	E
Rocha	Norte	5	47.7	59.9	M
Rocha	Norte	6	44.2	58.8	M
Rocha	Sur	1	53.6	61.6	E
Rocha	Sur	2	19.2	46.8	M
Rocha	Sur	3	44.9	41.1	M
Rocha	Sur	4	23.8	49.8	M
Rocha	Sur	5	28.2	52.3	M
Rocha	Sur	6	7.3	32.9	M

Según el TSI calculado se registró un predominio del estado mesotrófico para ambas lagunas, siendo éste estado predominante en la zonas sur de cada laguna. Se registraron 9 zonas mesotróficas para laguna del Diario, y 8 zonas mesotróficas para laguna de Rocha, sobre un total de 12 zonas promedio por laguna.

En tabla 8 se puede apreciar que para ambas lagunas la mayor probabilidad fue para el estado mesotrófico en la zona norte, con un valor de 70%, mientras que la menor probabilidad registrada fue para el estado eutrófico con un valor de 10%.

**Tabla 8.** Índice de Salas & Martino (1990) (adaptado de Vollenweider & Kerekes 1981). Estado trófico de ambas lagunas en las zonas norte (N) y sur (S). M: mesotrófico, O: oligotrófico, E: eutrófico. Los porcentajes de cada uno de los estados tróficos (E, M y O) equivalen a la probabilidad de cada estado durante el período de estudio. Los datos representan el promedio  $\pm$  SD para todo el período de muestreo.

Laguna	Zona	PT ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	Clasificación
Diario	N	41.4 $\pm$ 23.5	70% M, 20% O, 10% E
	S	3.0 $\pm$ 23.1	65% M, 25% O, 10% E
Rocha	N	57.6 $\pm$ 17.2	70% M, 20% E, 10% O
	S	29.6 $\pm$ 17.1	60% M, 40% E

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1. Contenido total de nutrientes

En este análisis se cuantificó el contenido total de nitrógeno y fósforo (N y P) en agua, sedimento, fitobentos, fitoplancton y macrofitas en Laguna del Diario y Laguna de Rocha, constatándose que el contenido de nutrientes en agua y sedimento de Laguna del Diario fue mayor que en Laguna de Rocha, y verificándose así la primera predicción.

Los resultados observados en el presente estudio nos permiten indicar que el destino final de los nutrientes N y P es fundamentalmente el sedimento y las macrofitas, dado que en ambas lagunas fue en estos compartimientos donde se encontró la mayor concentración de estos nutrientes. En el sedimento de Laguna del Diario se registraron valores de 5826 mg m<sup>-2</sup> de N y 1864 mg m<sup>-2</sup> de P, mientras que los valores registrados para Laguna de Rocha fueron del mismo orden aunque menores, registrándose valores de 1400 mg m<sup>-2</sup> de N y 806 mg m<sup>-2</sup> de P.

También se constató que la comunidad de macrofitas de Laguna del Diario fue el compartimiento donde se registró el máximo valor de concentración de N, ascendiendo a 7198 mg m<sup>-2</sup>, mientras que para el P se registró un máximo de 628.0 mg m<sup>-2</sup>. El mismo patrón se repitió en Laguna de Rocha, donde el valor máximo de N ocurrió en la comunidad

de macrofitas ( $1833 \text{ mg m}^{-2}$ ), mientras que para P el máximo valor registrado fue de  $273.8 \text{ mg m}^{-2}$ .

Si bien es esperable que los valores máximos ocurrieran en el sedimento y las macrofitas, es destacable que el valor máximo de concentración de N se haya registrado en las plantas y no en el sedimento en la Laguna del Diario. Esto puede ser una consecuencia del gran desarrollo de las plantas acuáticas y la profundidad de la Laguna del Diario. Teniendo en cuenta que cuando existe una alta biomasa de macrofitas éstas actúan como trampa de nutrientes totales y sólidos disueltos (Rodríguez-Gallego *et al.* 2010), además del efecto de la profundidad sobre la dinámica de los nutrientes (i.e. los nutrientes circulan más tiempo en la columna de agua), es probable que una gran proporción de los nutrientes quede retenida en las macrofitas, y una menor proporción tienda a sedimentar.

La concentración total de nutrientes indicó un claro predominio del N sobre el P en todos los compartimentos estudiados. Si bien esto es esperable según la relación estequiométrica existente entre ambos nutrientes y su metabolismo en los productores primarios (Klausmeier *et al.* 2004), existe multiplicidad de variables que influyen en dicha relación, y que a su vez operan a distinta escala espacio temporal. Por un lado se destacan las variables fisicoquímicas y morfológicas propias de cada laguna, como profundidad, grado de conexión con el océano, perímetro de captación, área, resuspensión de sedimentos, turbidez, etc. Por otro lado se observa una influencia antrópica diferencial en el entorno inmediato de cada laguna, la cual está regida por el cambio en los usos del suelo, reportado por Rodríguez-Gallego (2010), ocurrido en los últimos quince años en las cuencas de las lagunas en estudio. El efecto conjunto de estas variables tendría un papel muy importante en la dinámica y el destino final del N y P totales en estas lagunas costeras, siendo el grado de influencia de cada variable complejo de cuantificar por separado, para lo cual sería necesario realizar métodos experimentales y estadísticos fuera del alcance de este trabajo.

## **7.2. Contenido de nutrientes en agua y sedimento**

Se determinó que el contenido de N y P totales en agua y sedimento fue significativamente mayor en la Laguna del Diario que en la Laguna de Rocha (Figura 9, tabla 5). También se encontró que el contenido de N fue significativamente mayor que el contenido de P en agua y sedimento en todos los casos (salvo el primer muestreo), patrón registrado para ambas lagunas. Esto puede ser atribuido al dominio de macrofitas existente en Laguna del Diario, sumado al efecto que ejerce la profundidad de cada laguna en la resuspensión. Es

esperable en un sistema dominado por macrofitas, que éstas consuman la mayor proporción de los nutrientes en el agua, evitando al mismo tiempo la resuspensión (Rodríguez-Gallego 2010), que además resulta atenuada por el efecto de la profundidad en cada laguna. Por tanto, es posible afirmar que la carga de nutrientes registrada en agua es menor que la esperable en comparación con la existente en las macrofitas y el sedimento.

De nuestros resultados se desprende que para los compartimentos agua y sedimento el aporte de N y P asociado a los usos del suelo en las cuencas de cada laguna es un factor determinante que provoca una acumulación de ambos nutrientes en dichos compartimentos (Rodríguez-Gallego et al. 2010). Los usos del suelo registrados en las cuencas de las lagunas en estudio corresponden a actividades que exportan alta carga de nutrientes, como la ganadería extensiva y la ocupación humana (Rodríguez-Gallego 2010). Asimismo, los estudios realizados por Aubriot (2005) indican que las principales causas en el incremento de P pueden ser el aumento de las áreas de cultivos intensivos, como soja y papa, de la forestación en la cuenca (observado a partir de 1997), y también al aumento de la extensión del cultivo de praderas artificiales (Rodríguez-Gallego 2010).

### **7.3 Distribución de nutrientes en productores primarios**

Con respecto a la distribución porcentual de los nutrientes entre las comunidades de productores primarios, era esperable que para Laguna del Diario las macrofitas concentraran la mayor proporción de los nutrientes, confirmando en parte la segunda predicción de este estudio. Esto puede ser atribuido a las condiciones óptimas que presenta la Laguna del Diario para el desarrollo de las plantas acuáticas, que a grandes rasgos pueden resumirse en la gran estabilidad predominante en la columna de agua, y el consumo lujurioso de nutrientes provenientes del sedimento. Con respecto a la estabilidad en la columna de agua, se ha demostrado que el cambio de salinidad es una variable estructuradora de las comunidades de macrofitas (Rodríguez-Gallego et al. 2010), provocando una alta mortandad de las especies no tolerantes a la salinidad, y a su vez favoreciendo a las especies tolerantes, que por lo general son pequeñas y generan poca biomasa (Rodríguez-Gallego et al. 2010).

Para la Laguna de Rocha no se cumplió la predicción esperada, ya que la comunidad de fitobentos no fue la principal acumuladora de nutrientes, sino que fueron las macrofitas, las que concentraron la mayor proporción de N y P, al igual que en la Laguna del Diario. Sin embargo, la distribución de los nutrientes fue más equitativa en la Laguna de Rocha que en la Laguna del Diario, entre las comunidades de macrofitas y fitobentos. Esto evidencia un rol importante del fitobentos en el destino final de nutrientes en la Laguna de Rocha, donde

incluso se registró en el 50% de los muestreos realizados (figura 11) que el contenido de nutrientes registrado en esa comunidad fue comparable al contenido en las macrofitas. Esto contrasta significativamente con la Laguna del Diario, donde tanto el contenido de N y P de las comunidades de fitobentos y de fitoplancton resultaron despreciables en comparación con las macrofitas.

La mayor equitatividad observada en la distribución de los nutrientes en la Laguna de Rocha puede ser atribuible al efecto de distintos factores operando en conjunto. Se conoce que la hidrología es la principal fuerza que rige el funcionamiento de estos ecosistemas (Conde et al. 2002), y su efecto causa un gradiente salino que determina la abundancia y composición del fitobentos (Conde et al. 2002), el fitoplancton (Bonilla et al. 2005), las bacterias (Piccini et al. 2006), el bentos (Pintos et al. 1991) y las macrofitas (Rodríguez-Gallego et al. 2010). Por lo que la biomasa de macrofitas se vería limitada por el gradiente salino, confinando su distribución a determinados parches de la laguna, donde cumplen un rol ecosistémico muy importante al actuar como trampa de nutrientes totales y sólidos disueltos (Rodríguez-Gallego et al. 2010). En contraste con esto, en Laguna del Diario la hidrología no actúa con la misma severidad, y por tanto no puede contrarrestar la estabilidad de la columna de agua y la consecuente predominancia de las macrofitas.

Dado el constante aporte de nutrientes provenientes desde la cuenca de la Laguna del Diario, que se acumula progresivamente en el sedimento y la biomasa de plantas, aumentando así la carga interna potencial del sistema, es esperable que se mantenga un escenario propicio para la proliferación de las macrofitas en esta laguna. Esto alteraría la dinámica natural, resultando evidente un avanzado proceso de eutrofización del ecosistema, donde la superficie de espejo de agua irá disminuyéndose gradualmente como consecuencia del aumento de la biomasa de macrofitas y la acumulación de nutrientes en el sedimento.

No obstante, en condiciones de eutrofización cultural se puede desencadenar una sucesión de productores primarios, alterando entre estados de proliferación de macrofitas y otros organismos fotosintéticos (Rodríguez-Gallego et al. 2010), donde finalmente el fitoplancton pasaría a dominar el ecosistema (McGalthery 2001, Rabalais 2002).

#### **7.4. Estado trófico**

De acuerdo a la concentración promedio de nutrientes totales y clorofila *a* del fitoplancton, las lagunas costeras del Uruguay fueron clasificadas en un rango que va desde el estado

oligotrófico al eutrófico, según los sistemas de clasificación de Hakanson (1980), OCED (1983) y Salas & Martino (1990). Los índices de estado trófico calculados en el presente estudio indican que el estado trófico predominante en ambas lagunas es el mesotrófico (tablas 7 y 8).

Aunque estos índices son útiles para poder comparar sistemas, es necesario destacar que el criterio para el cálculo de los mismos no toma en cuenta los nutrientes totales contenidos en sedimento, ni en la comunidad de macrofitas, los cuales son importantes indicadores del estado trófico en ecosistemas someros (Rodríguez-Gallego 2010). Especialmente en sistemas donde la comunidad de macrofitas presenta un gran desarrollo, como lo es la Laguna del Diario, y también en la Laguna de Rocha aunque el desarrollo es estacional o zonal, es necesario incluir a la comunidad de macrofitas en dichos índices, como propone Canfield et al. (1983) y Chrysoula et al (2004). Esto es claramente apoyado por los resultados de este trabajo.

Siguiendo esta línea de razonamiento, no sería adecuado realizar una comparación directa entre los índices tróficos de ambas lagunas, ya que no se toma en cuenta el potencial total de la concentración de nutrientes. Por esto, se puede afirmar que el estado mesotrófico predominante para la Laguna del Diario está subestimado, al punto que se equipara con el de la Laguna de Rocha. Si los índices de estado trófico contemplaran el porcentaje de nutrientes en el sedimento y la comunidad de macrofitas, seguramente sus valores mostrarían una predominancia de un estado trófico mayor, posiblemente eutrófico, para la Laguna del Diario, en comparación con Laguna de Rocha, ya que en dichos compartimentos es donde se encuentran mayormente contenidos los nutrientes N y P.

En concordancia con lo observado, estudios locales realizados en la Laguna Blanca (Mazzeo et al. 2003) reportan que según el índice de Salas & Martino dicha laguna sería clasificada como mesotrófica (con una probabilidad de mesotrofia de 57% según el PT del agua). Sin embargo, al contemplar la carga de nutrientes contenida en las macrofitas siguiendo el criterio propuesto por Canfield (1983), dicho índice aumentaría hasta un valor de PT 64%, cambiando la clasificación a hipertrófica (Mazzeo et al. 2003). A nivel global y en concordancia con nuestras afirmaciones, los estudios realizados por Chrysoula et al (2014) donde se compara la utilización de índices de calidad de agua en diversas lagunas de Grecia, se afirma que es necesario integrar índices que contemplen la carga de nutrientes en macrofitas, destacando su relevancia como bioindicador de eutrofización en etapas tempranas en ecosistemas costeros.

Pese al impacto cultural que se evidencia en la Laguna del Diario, sus consecuencias están atenuadas ya que el sistema se estabilizó en una fase de agua clara, dominada por plantas acuáticas (Rodríguez-Gallego 2010). No obstante, dicho estado podría cambiar a un estado dominado por algas potencialmente tóxicas, debido a la acumulación de nutrientes (Scheffer et al. 2001), y también al manejo de las plantas sumergidas (van Nes et al. 2002) donde se realiza una gran remoción de biomasa por aspectos estéticos o recreacionales, lo que podría empeorar la calidad de agua (Rodríguez-Gallego 2010).

El intenso proceso de eutrofización de la Laguna del Diario podría ser tomado como un ejemplo de extremo negativo del estado trófico de las lagunas costeras atlánticas de Uruguay, resultando útil para prevenir y comparar las situaciones en las que se encuentran otras lagunas, salvando las particularidades de cada sistema, y la diferencia de variables que operan en cada uno.

De acuerdo a los análisis desarrollados en este estudio, podemos afirmar que las macrofitas tienen un papel fundamental en la distribución final de N y P en las lagunas del Diario y de Rocha, y por lo tanto su desarrollo podría ser utilizado como bioindicador de eutrofización cultural en lagunas costeras.

Resultaría de gran utilidad para el mejor conocimiento y la prevención de la problemática de la eutrofización en las lagunas costeras atlánticas, desarrollar localmente un índice de estado trófico que contemple la carga de nutrientes en macrofitas y sedimento.

Finalmente, mirando en perspectiva se recomienda que se sigan realizando estudios que permitan cuantificar y comparar el contenido de nutrientes en diferentes compartimentos en estas lagunas costeras, debido a que son relevantes para evaluar en qué medida los nutrientes provenientes desde la cuenca están siendo acumulados en el sedimento (Søndergaard et al. 2004), desarrollando una carga interna que pueda desencadenar problemas de calidad de agua a mediano plazo (Rodríguez-Gallego 2010).

## **7.5. Conclusiones**

- Los nutrientes totales (N y P) de las lagunas costeras del Diario y Rocha se encuentran mayormente contenidos en el sedimento y las macrofitas.

- Las macrofitas juegan un rol determinante para poder estimar las tendencias del proceso de eutrofización cultural en estas lagunas costeras, lo que sería extensivo a otras lagunas de la costa de Uruguay.
- El desarrollo de un índice trófico local que incorpore la carga de nutrientes totales en el sedimento y en la comunidad de macrofitas puede contribuir a un mayor entendimiento del estado trófico y funcionamiento sistémico de las lagunas costeras.
- La realización de monitoreos preventivos de evaluación de calidad de agua con proyección temporal, incorporando estudios de concentración total de nutrientes (N y P) en comunidades de productores primarios, agua y sedimento, es relevante para estimar las tendencias del estado trófico de las lagunas costeras de Uruguay.
- Es relevante utilizar ensamblajes poblacionales (biomasa y diversidad) de la comunidad de macrofitas como bioindicador de eutrofización en lagunas costeras.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Atkinson M.J & S. V. Smith 1983. C: N: P ratios on marine benthic plants. *Limnology and Oceanography*. 28: 568-574 pp.

Aubriot L., D. Conde, S. Bonilla, & R. Sommaruga. 2004 Phosphate uptake behavior of natural phytoplankton during exposure to solar ultraviolet radiation in a shallow lagoon. *Marine Biology* 144: 623-631pp.

Aubriot L., D. Conde, S. Bonilla, V. Hein, & A. Britos. 2005. Vulnerabilidad de una laguna costera en una Reserva de Biosfera: indicios recientes de eutrofización. En: Taller Internacional de Eutrofización de Lagos y Embalses. CYTEDXVIIIB. Patagonia Impresores Chile. 65-85 pp.

Barnes R. S. K. 1980. Coastal lagoons. Cambridge University Press, Cambridge

Bonilla S. 1998. Estructura y dinámica de la comunidad epifítica algal en un sistema somero mixohalino. Tesis de Maestría en Biología/PEDECIBA, UDELAR, Montevideo.

Bonilla S., D. Conde, L. Aubriot, & M.C Pérez. 2005. Influence of hydrology and nutrients on phytoplankton species composition and life strategies in a subtropical coastal lagoon *Estuaries*. 28:884-895 pp.

Bonilla S., D. Conde, L. Aubriot, L. Rodríguez-Gallego, C. Piccini, E. Meerhoff, L. Rodríguez-Graña, D. Calliari, P. Gómez, I. Machado & A. Britos. 2006. Procesos Estructuradores de las Comunidades Biológicas en Lagunas Costeras de Uruguay. En: Menafrá R., L. Rodríguez-Gallego, F. Scarabino & D. Conde (Eds). Bases para la Conservación y el Manejo de la Costa Uruguaya. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo.

Britos A., E. García, E. Meerhoff, E.S. Rodríguez., A. Schwarcbonn & V. Souza. 2002. Limitación del crecimiento fitoplanctónico por la disponibilidad de nutrientes en dos lagunas costeras atlánticas durante la primavera. Trabajo de pasaje de curso de Limnología profundización, Sección Limnología, Facultad de Ciencias (Universidad de la República) ICP 02/1 (Montevideo). 18 pp (Inédito).

Carpenter S.R. 2005. Eutrophication of aquatic ecosystems: stability and soil phosphorus. *PNAS* 102: 10002-10005pp.

Chrysoula C., G. Giordani & E. Papastergiadou 2014. Assessment of ecological quality of coastal lagoons with a combination of phytobenthic and water quality indices. *Marine Pollution Bulletin*. 86: 411-423 pp.

Conde D., L. Aubriot & R Sommaruga. 1998. Underwater UV radiation field in a brackish coastal lagoon associated to extreme DOC gradients I: Optical aspects XXVII International Congress of Limnology (S I L) (Dublin) 09-15/08/98.

Conde D., L. Aubriot & R Sommaruga. 2000. Changes in UV penetration associated with marine intrusions and freshwater discharge in a shallow coastal lagoon of the Southern Atlantic Ocean. *Marine Ecology Progress Series*. 207:19-31pp.

Conde D., L. Rodríguez-Gallego & L. Rodríguez-Graña. 2003. Análisis conceptual de las interacciones abióticas y biológicas entre el océano y las lagunas de la costa atlántica de Uruguay. PNUD/GEF/RLA/99/G31 (FREPLATA-Ciencias 8) Sección Limnología, FC/UDELAR (Montevideo). Informe técnico (inedito). 65 pp

Conde D., S. Bonilla, L. Aubriot, R. De León & W. Pintos. 1999. Comparison of the areal amount of chlorophyll a of planktonic and attached microalgae in a shallow coastal lagoon. *Hydrobiologia* 408-409:285-291 pp.

Conde D., S. Masciadri, L. Bocardi., S. Artigalás & L. Rodríguez-Gallego. 2010. Retención de los aportes de nutrientes de origen urbano por los humedales fluviales: el caso de la ciudad de Rocha. Informe no publicado, Montevideo.

Conde D., V. Hein & S. Bonilla. 2009. Floraciones de cianobacterias en lagunas costeras. En: *Cianobacterias planctónicas del Uruguay: manual para la identificación y medidas de gestión PHI-VII Documento Técnico N°16 PHI-LAC Montevideo* pp 30-31

Conley D.J., H.W. Paerl, R Howarth, D.F. Boesch, S. Seitzinger, K.E. Havens, C. Lancelot & G.E. Likens. 2009. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*.323:1014 pp.

Costanza R., W.M. Kemp & W.R Boynton. 1993. Predictability, scale and biodiversity in coastaland estuarine ecosystems: implications for management. *AMBIO*, 22:88-96 pp.

Estevez F.A., A. Caliman, J.M. Santagnelo, R.D. Guariento, V.F. Farjalla & R.L Bozeli. 2008. Neotropical coastal lagoons: An appraisal of their biodiversity, functioning, treats and conservation management. *Brazilian Journal of Biology* 68:967-981pp.

Fabiano G. & O. Santana. 2006. Las pesquerías en lagunas costeras salobres de Uruguay. En: Menafra R.L. Rodríguez-Gallego, F. Scarabino & D. Conde. *Bases para la Conservación y el Manejo de la costa Uruguaya*. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo.

Hakanson. L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Research* 14:975 -1001 pp.

Howarth R. & R. Marino. 2006. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: Evolving views over three decades. *Limnology and Oceanography* 51: 364-376 pp.

Kjerfve B. 1994. *Coastal Lagoons Processes*. Elsevier Oceanography Series (60), Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

Klausmeier C. A, E. Litchman, T. Daufresne & S. Levin. 2004. Optimal nitrogen-to phosphorus stoichiometry of phytoplankton Christopher A. *Nature* 429: 171-174 pp.

Knoppers B. 1994. Aquatic primary production in coastal lagoons En: B. Kjerfve (Ed) *Coastal lagoon processes*; Elsevier Amsterdam; *OceanogrSer* 60:243-285 pp.

Kruk C., L Rodríguez-Gallego, F. Quintans, G.Lacerot, F. Scasso, N. Mazzeo, M. Meerhoff & J.P. Paggi. 2006. Calidad de agua y biodiversidad en 18 pequeñas lagunas en la costa sureste de Uruguay. En: Menafra R., Rodríguez-Gallego L, F. Scarabino & D. Conde (Eds). *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya*. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo.

Kruk C., L Rodríguez-Gallego, F. Quintans, G.Lacerot, F. Scasso, N. Mazzeo, M. Meerhoff, & J.P. Paggi, E.T.H.M. Peers & Sheffer M.2009. Determinants of biodiversity in subtropical Sotuh American lakes. *Fresh water biology* 54: 2628-2641 pp.

Lorenzen C.J. 1967. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography* 12: 343-346 pp.

- Margalef R. 1983. *Limnología*. Omega. Barcelona.
- Mazeo N., L. Rodríguez-Gallego, C. Kruk, M. Meerhoff, J. Gorga, G. Lacerot, F. Quintans, M. Loureiro, D. Larrea & F. García-Rodríguez. 2003. Effects of *Eggeria densa* plank beds on a shallow lake without piscivorous fish. *Hydrobiologia* 506-509: 591-602.
- McGlathery K.J. 2001. Macroalgal blooms contribute to the decline of seagrass in nutrient enriched coastal waters. *Journal of Phycology* 37: 453-456 pp.
- Mitsch W.J. & J.G. Gosselink. 2000. *Wetlands*. John Wiley & Sons, Canada.
- Montanges D. & J. Berges. 1994. Estimating carbon, nitrogen, protein, and chlorophyll a from volume in marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography* 39:1044-1060 pp.
- Perrow M.R., M.L. Meijer, P. Dawidowicz & H. Coops. 1997. Biomanipulation in shallow lakes: state of the art. *Hydrobiologia* 342-343:355-365 pp.
- Rabalais N. 2002. Nitrogen in aquatic ecosystems. *Ambios* 31:101-112 pp.
- Redfield A.C. 1934. On the proportions of organic derivations in sea water and their relation to the composition of plankton. In James Johnstone Memorial Volume. (ed. R.J. Daniel). University Press of Liverpool. 177-192 pp.
- Rodríguez-Gallego L. 2010. Eutrofización de lagunas costeras de Uruguay: impacto y optimización de los usos de suelo. Tesis doctoral. Sección Limnología-PEDECIBA. FC/UDELAR (Montevideo).
- Salas H. J. & P. Martino. 1990. Metodologías simplificadas para la evaluación de la eutrofización en lagos cálidos tropicales. CEPIS/HPE/OPS.
- Sand-Jensen K. & J. Borum. 1991. Interactions among phytoplankton, periphyton and macrophytes in temperate freshwaters and estuaries. *Aquatic Botany*, 41:137-175 pp.
- Schindler D. 1977. The evolution of phosphorous limitation in lakes. Natural mechanisms compensate for deficiencies of nitrogen and carbon in eutrophied lakes. *Science* 195:260-262 pp.
- Sommaruga R. & D. Conde. 1990. Distribución de materia orgánica en los sedimentos recientes de la Laguna de Rocha (Rocha Uruguay). *Atlántica Rio Grande*. 12:35-44pp.
- Søndergaard M., J.P. Jensen & E. Jeppesen. 2001. Role of sediment and intertidal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia* 50-509: 135-145.
- Twomey L. & P. Thompson. 2001. Nutrient limitation of phytoplankton in a seasonally open bar-built estuary: Wilson Inlet, western Australia. *Journal of Phycology* 37: 16-29.
- van Nes E.H., M Scheffer, M.S. van den Berg & H Coops. 2002. Aquatic macrophytes restore, eradicate or is there a compromise? *Aquatic Botany* 72: 387-403.
- Vidal L. 2008. Estructura y biomasa del fitoplancton en lagunas costeras: relevancia del picoplancton autótrofo. Tesis de Maestría en Biología/PEDECIBA, Montevideo, 94 pp.
- Vymazal J. 1995. *Algae and element cycling in wetlands*. Lewis publisher, Boca Ratón.

## ANEXO 1

**Tabla A1.** Datos de nutrientes expresados en concentración (mg m<sup>-2</sup>) para cada compartimento en ambas lagunas.

Laguna	Muestro	Estación	Fósforo	Fósforo	Fósforo	Fósforo	Fósforo	Fósforo	Nitrógeno	Nitrógeno	Nitrógeno	Nitrógeno	Nitrógeno	Nitrógeno
			FB	FP	PL	Agua	Sedimento	Acumulado	FB	FP	PL	Agua	Sedimento	Acumulado
			mgP/m <sup>2</sup>	mgN/m <sup>2</sup>										
Diario	1	1	0,129	0,0034	44,4	52,2	712,5	809,2	0,756	0,0199	421,5	724,6	500,8	1647,7
Diario	1	2	0,172	0,0059	461,0	50,9	576,3	1088,4	1,010	0,0343	4372,8	851,2	449,2	5674,2
Diario	1	3	0,069	0,0073	760,7	47,7	897,7	1706,1	0,402	0,0428	7198,0	1004,2	636,6	8839,2
Diario	1	4	0,320	0,0110	560,9	58,8	959,6	1579,7	1,874	0,0646	5321,1	1424,1	364,5	7111,6
Diario	1	5	0,331	0,0088	660,9	69,3	904,0	1634,5	1,939	0,0513	6269,4	992,4	487,5	7751,3
Diario	1	6	0,069	0,0098	538,7	57,3	654,8	1250,9	0,406	0,0574	5110,3	775,6	362,9	6249,3
Diario	2	1	0,036	0,0059	449,8	96,2	400,3	946,5	0,211	0,0344	4267,4	727,5	806,7	5801,9
Diario	2	2	0,094	0,0019	39,0	110,5	483,7	633,3	0,549	0,0112	359,1	882,0	1239,1	2480,9
Diario	2	3	0,049	0,0085	494,3	105,0	580,8	1180,1	0,284	0,0499	4688,9	813,6	1712,7	7215,5
Diario	2	4	0,042	0,0219	294,3	126,8	301,5	722,7	0,264	0,1283	2792,2	1720,9	584,7	5098,2
Diario	2	5	0,200	0,0307	133,3	124,3	538,3	796,1	1,172	0,1800	1264,4	1093,7	1127,4	3486,9
Diario	2	6	0,205	0,0231	166,6	128,7	590,9	886,5	1,199	0,1356	1580,5	1507,2	1248,0	4337,0
Diario	3	1	0,096	0,0034	2,7	46,5	1000,9	1050,3	0,560	0,0198	21,4	676,2	4039,8	4738,0
Diario	3	2	0,050	0,0013	25,0	57,7	1070,1	1152,8	0,295	0,0075	237,1	1017,2	2893,6	4148,2
Diario	3	3	0,157	0,0052	241,0	62,8	1058,1	1362,0	0,920	0,0307	2286,5	276,1	3241,6	5805,2
Diario	3	4	0,076	0,0012	10,6	79,3	1758,9	1848,8	0,444	0,0072	100,1	874,6	5681,0	6656,1
Diario	3	5	0,067	0,0002	0,0	74,3	1434,8	1509,2	0,392	0,0013	0,0	468,2	4305,0	4773,7
Diario	3	6	0,213	0,0051	5,0	65,3	1834,3	1904,8	1,249	0,0298	47,4	575,2	5826,2	6450,1
Diario	4	1	0,118	0,0047	289,9	38,0	1071,0	1399,1	0,690	0,0278	2750,1	1687,6	3296,5	7734,9
Diario	4	2	1,117	0,0041	1,7	46,0	849,4	898,1	6,544	0,0238	15,8	1833,1	3519,9	5375,3
Diario	4	3	0,100	0,0048	488,7	45,4	870,7	1405,0	0,585	0,0281	4636,2	1457,0	3542,9	9636,6
Diario	4	4	0,115	0,0065	4,4	53,7	1269,6	1327,9	0,674	0,0380	42,1	1925,6	3685,2	5653,6
Diario	4	5	0,161	0,0070	0,0	55,2	1086,1	1141,5	0,944	0,0407	0,0	1867,9	2855,9	4724,9
Diario	4	6	0,169	0,0057	22,8	59,9	1269,3	1352,1	0,991	0,0336	216,0	2266,4	4338,4	6821,8
Diario	5	1	0,233	0,0051	553,6	71,0	874,9	1499,7	1,362	0,0298	5179,1	569,3	4990,4	10740,1
Diario	5	2	0,067	0,0058	349,5	64,0	698,5	1112,0	0,392	0,0342	2364,1	704,4	3819,0	6887,9
Diario	5	3	0,299	0,0015	394,3	82,8	652,2	1129,6	1,750	0,0085	3740,6	824,9	3612,7	8179,9
Diario	5	4	0,064	0,0071	463,0	29,5	616,3	1108,9	0,372	0,0419	3101,2	1185,2	3940,0	8206,7
Diario	5	5	0,185	0,0037	154,3	59,7	906,4	1120,7	1,086	0,0214	1033,7	827,1	3657,8	5519,7
Diario	5	6	0,058	0,0019	10,9	40,9	625,7	677,5	0,342	0,0114	75,8	730,0	3812,3	4618,5
Diario	6	1	0,000	0,0027	272,0	19,8	300,7	592,5	0,000	0,0156	2549,9	925,8	2161,7	5637,4
Diario	6	2	0,058	0,0028	628,0	13,9	364,8	1006,8	0,337	0,0166	4212,8	710,7	2295,9	7219,7
Diario	6	3	0,234	0,0027	661,5	15,4	219,3	896,4	1,370	0,0157	5256,0	681,4	1836,1	7775,0
Diario	6	4	0,304	0,0441	552,4	7,4	429,1	989,2	1,779	0,2583	3699,7	833,5	3423,2	7958,4
Diario	6	5	0,104	0,0803	472,1	28,7	1000,6	1501,5	0,608	0,4701	3277,4	1019,0	2741,2	7038,7
Diario	6	6	0,418	0,0137	325,5	5,1	598,5	929,6	2,447	0,0804	2181,6	1233,5	2976,1	6393,8
Rocha	1	1	0,053	0,0534	3,79	55,2	240,0	299,1	0,308	0,3128	33,9	146,2	58,0	238,7
Rocha	1	2	0,008	0,0361	35,0	86,3	328,2	449,5	0,045	0,2112	234,3	185,6	112,0	532,1
Rocha	1	3	0,012	0,0159	5,11	85,9	305,9	396,9	0,069	0,0930	22,7	271,8	112,9	407,6
Rocha	1	4	0,028	0,0228	5,47	61,9	806,2	873,6	0,166	0,1334	52,2	115,1	496,1	663,7
Rocha	1	5	0,014	0,0075	6,52	32,5	599,5	638,6	0,084	0,0441	62,1	46,4	114,7	223,4
Rocha	1	6	0,005	0,0073	1,48	76,1	724,1	801,6	0,029	0,0430	90,0	54,5	508,2	652,8
Rocha	2	1	0,134	0,0017	15,2	12,9	400,5	428,7	0,787	0,0099	106,6	188,8	352,6	648,8
Rocha	2	2	0,270	0,0032	34,3	19,4	792,4	846,4	1,583	0,0189	230,1	240,7	650,3	1122,7
Rocha	2	3	0,169	0,0006	1,59	12,3	324,7	338,8	0,990	0,0032	9,1	130,2	405,4	545,7
Rocha	2	4	0,160	0,0090	9,47	12,8	443,9	466,3	0,934	0,0525	90,3	no hay dato	106,4	197,7
Rocha	2	5	0,110	0,0028	5,39	7,0	389,3	401,8	0,644	0,0167	51,4	no hay dato	625,9	678,0
Rocha	2	6	0,024	0,0087	0,78	12,4	176,1	189,3	0,140	0,0510	7,5	no hay dato	155,1	162,8
Rocha	3	1	0,145	0,0110	6,77	13,9	273,2	293,9	0,850	0,0645	46,2	54,3	524,6	626,0
Rocha	3	2	0,159	0,0166	48,52	30,3	472,1	551,1	0,930	0,0972	324,9	155,4	1121,2	1602,6
Rocha	3	3	0,106	0,0127	0,20	17,6	309,7	327,7	0,623	0,0743	1,9	60,4	486,8	549,9
Rocha	3	10	0,100	0,0012	4,17	14,0	359,1	377,4	0,588	0,0072	39,8	71,0	942,4	1053,8
Rocha	3	11	0,078	0,0014	4,43	8,5	294,5	307,5	0,454	0,0080	42,3	50,1	732,0	824,9
Rocha	3	12	0,082	0,0007	0,00	13,6	238,9	252,6	0,479	0,0041	0,0	33,8	74,4	108,7
Rocha	4	1	0,105	0,0049	3,00	31,0	146,4	180,4	0,616	0,0285	27,9	157,9	41,6	228,0
Rocha	4	2	0,204	0,0034	0,00	28,6	492,9	521,8	1,192	0,0198	0,0	226,4	824,4	1052,0
Rocha	4	3	0,189	0,0036	0,39	20,8	364,6	386,0	1,107	0,0208	2,3	162,1	222,6	388,1
Rocha	4	10	0,101	0,0008	1,22	12,5	241,2	255,0	0,593	0,0047	11,6	233,7	207,9	453,8
Rocha	4	11	0,074	0,0003	0,70	7,9	539,5	548,1	0,435	0,0019	6,6	218,6	1093,5	1319,1
Rocha	4	12	0,087	0,0006	0,00	17,0	729,1	746,3	0,512	0,0037	0,0	313,3	756,5	1070,4
Rocha	5	1	0,048	0,0001	3,44	5,6	369,4	378,5	0,283	0,0005	32,9	86,4	1189,9	1309,4
Rocha	5	2	0,067	0,0001	3,54	4,8	462,1	470,4	0,395	0,0006	33,8	88,3	1199,0	1321,4
Rocha	5	3	0,058	0,0003	2,66	4,0	286,6	293,3	0,337	0,0018	25,3	62,5	176,0	264,1
Rocha	5	10	0,062	0,0019	2,69	11,1	290,1	303,9	0,363	0,0111	25,7	92,5	469,8	588,4
Rocha	5	11	0,092	0,0013	0,09	9,3	244,8	254,3	0,541	0,0076	0,8	119,2	814,8	935,4
Rocha	5	12	0,116	0,0022	0,43	7,8	500,1	508,5	0,682	0,0132	4,1	70,5	1264,1	1339,3
Rocha	6	1	0,143	0,0048	0,00	17,1	691,3	708,5	0,840	0,0281	0,0	92,1	205,0	298,0
Rocha	6	2	0,225	0,0170	3,05	34,6	544,0	581,9	1,317	0,0998	29,1	170,9	504,6	706,0
Rocha	6	3	0,168	0,0072	1,92	11,9	429,9	443,9	0,982	0,0421	16,1	105,1	1400,6	1522,9
Rocha	6	10	0,082	0,0024	0,00	3,0	659,3	662,4	0,480	0,0142	0,0	130,7	no hay dato	131,2
Rocha	6	11	0,087	0,0018	0,09	3,4	294,0	297,6	0,509	0,0103	0,8	46,3	422,5	470,2
Rocha	6	12	0,026	0,0012	0,0	3,2	150,5	153,7	0,152	0,0072	0,0	38,6	163,6	202,4

<b>FB</b>	<b>fitobentos</b>
<b>FP</b>	<b>fitoplancton</b>
<b>PL</b>	<b>plantas acuáticas</b>

## **AGRADECIMIENTOS**

La elaboración de esta tesis fue posible gracias al esfuerzo y tolerancia de los tutores Daniel Conde, Lorena Rodríguez-Gallego y Sylvia Bonilla. A ellos les agradezco enormemente por su ayuda y apoyo en todo momento, en especial a Daniel por ser una referencia constante, y a Lorena por haberme brindado su datos de tesis doctoral sin los que no hubiera sido posible realizar este trabajo. A Leticia Vidal por facilitarme datos fundamentales para la realización de este estudio.

Finalmente agradezco a mi familia y amigos que siempre me apoyaron brindándome fuerzas para seguir adelante en los momentos más difíciles.