

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y GEOGRAFÍA
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

Respuesta Biogeoquímica del Humedal Costero Mantagua (32,9°S,
71,5°W) Frente a Periodos de Barra de Arena Abierta y Cerrada

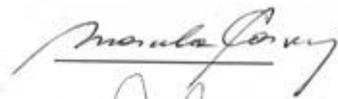
Trabajo de titulación para optar al Título de Oceanógrafo

Constanza Sepúlveda Jiménez

Valparaíso, 2018

COMISIÓN DE TITULACIÓN:

Profesor Guía: Dra. Marcela Cornejo D'Ottone



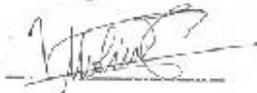
Handwritten signature of Marcela Cornejo D'Ottone, written in black ink over a horizontal line.

Profesor: Dr. Julio Salcedo Castro



Handwritten signature of Dr. Julio Salcedo Castro, written in black ink over a horizontal line.

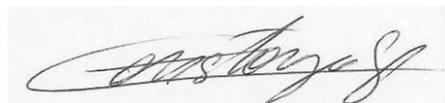
Profesor: Dra. Verónica Molina Trincado



Handwritten signature of Dra. Verónica Molina Trincado, written in black ink over a horizontal line.

AUTORIZACIÓN DE USO

Autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente del Trabajo de Titulación. Además, autorizo la reproducción parcial o total de este documento sólo con fines académicos.



Constanza Sepúlveda Jiménez

DEDICATORIA

A mi querida familia.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mis amados padres y hermana, por el apoyo incondicional en este largo y arduo camino para ser oceanógrafa. A mi compañero y amigo Jorge, por brindarme apoyo y alegrías durante los últimos años. Muchas gracias por todo.

Agradezco también a mi profesora guía Marcela Cornejo, por creer en mí, brindándome apoyo, orientación y, sobre todo, paciencia para lograr sacar adelante este trabajo. Mil gracias. También deseo agradecer a los profesores de la comisión, Verónica Molina y Julio Salcedo, por su buena disposición y apoyo.

Por otra parte, también agradezco a Constanza, Nickolas, Francisco, Cristian y Felipe de la Universidad de Playa Ancha, que realizaron gran parte de la recolección de datos para este trabajo de titulación. Además a Paola Reinoso y Carolina Pérez, por realizar el análisis de nutrientes.

Finalmente, deseo agradecer a mis compañeros de la carrera de Oceanografía Erika, Constanza, Andrea, Tomás, Darinka, Geraldine y toda la gente que me ayudó y sacó de apuros en muchas ocasiones durante este trabajo de titulación y a lo largo de la carrera.

TABLA DE CONTENIDO

PORTADA	
AUTORIZACIÓN DE USO.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABLAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS	5
OBJETIVOS.....	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos	5
MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
Zona de estudio.....	6
Campaña de muestreo.....	6
Muestreo	9
Análisis de laboratorio	9
Nutrientes	9
Procesamiento de datos.....	9
Nivel del mar.....	9
Caudal y precipitación.....	10
Análisis estadístico	10

RESULTADOS	11
Caracterización de las propiedades físicas del humedal Mantagua	11
Distribución de nutrientes	19
Análisis estadístico	31
Invierno 2017	31
Verano 2016 e invierno 2017	31
Análisis de caudal, precipitación y nivel del mar	32
Caudal y precipitación.....	32
Nivel del mar.....	34
DISCUSIÓN.....	35
CONCLUSIONES.....	39
REFERENCIAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Humedal costero de Mantagua (32,9°S, 71,5°W). Fuente: Nickolas B. Bassi, 24/06/2017.....	4
Figura 2. Mapa de la ubicación de la zona de estudio, el humedal de Mantagua (32,9°S, 71,5°W). Imagen: Google Earth.....	6
Figura 3. Mapa de la zona de estudio con la ubicación de las estaciones muestreadas en el humedal de Mantagua. Imagen: Google Earth.....	8
Figura 4. Distribución de temperatura (°C) en el agua del humedal con barra de arena cerrada durante la: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10-12-2016), c) Campaña 1 (11-12-2016) y d) Campaña 2 (24-06-2017).....	13
Figura 5. Distribución de temperatura (°C) en el agua humedal con barra de arena abierta durante la: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0 m y c) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0,8 m.....	14
Figura 6. Distribución de conductividad (mS/cm) en el agua del humedal con barra de arena cerrada durante la: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10-12-2016), c) Campaña 1 (11-12-2016) y d) Campaña 2 (24-06-2017).....	15
Figura 7. Distribución de conductividad (mS/cm) en el agua humedal con barra de arena abierta durante la: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0 m y c) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0,8 m.	16
Figura 8. Distribución de oxígeno disuelto (mg/L) en el agua del humedal con barra de arena cerrada durante la: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10-12-2016) y c) Campaña 1 (11-12-2016).....	17
Figura 9. Distribución de oxígeno disuelto (mg/L) en el agua humedal con barra de arena abierta durante la: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0 m y c) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0,8 m.	18
Figura 10. Distribución de NO_3^- (concentración en log μM) con barra cerrada para: a) Campaña 1 (09, 10 y 11-12-2016) y b) Campaña 2 (24-06-2017).....	20
Figura 11. Distribución de NO_3^- (concentración en log μM) con barra abierta para: a) Campaña 3 (29-06-2017) y b) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017).....	21

Figura 12. Distribución de PO_4^{-3} (concentración en log μM) con barra cerrada para: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10-12-2016), c) Campaña 1 (11-12-2016) y d) Campaña 2 (24-06-2017).....	22
Figura 13. Distribución de PO_4^{-3} (concentración en log μM) con barra abierta para: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 4 (12-08-2017) H1 y c) Campaña 4 (12-08-2017) H2 y H3.	23
Figura 14. Distribución de PO_4^{-3} (concentración en log μM) con barra abierta para: a) Campaña 5 (13-08-2017) H1, b) Campaña 5 (13-08-2017) H2 y c) Campaña 5 (13-08-2017) H3.....	24
Figura 15. Distribución de SiO_4^{-4} (concentración en log μM) con barra cerrada para: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10 y 11-12-2016) y c) Campaña 2 (24-06-2017).	25
Figura 16. Distribución de SiO_4^{-4} (concentración en log μM) con barra abierta para: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 4 (12-08-2017) H1 y c) Campaña 4 (12-08-2017) H2.	26
Figura 17. Distribución de SiO_4^{-4} (concentración en log μM) con barra abierta para: a) Campaña 4 (12-08-2017) H3, b) Campaña 5 (13-08-2017) H1 y H3 y c) Campaña 5 (13-08-2017) H2.....	27
Figura 18. Distribución de NO_2^- (concentración en log μM) con barra cerrada para: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10-12-2016), c) Campaña 1 (11-12-2016) y d) Campaña 2 (24-06-2017).....	28
Figura 19. Distribución de NO_2^- (concentración en log μM) con barra abierta para: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 5 (13-08-2017) y 4 (12-08-2017) H1 y H2 y c) Campaña 4 (12-08-2017) H3.....	29
Figura 20. Esquema del comportamiento biogeoquímico del humedal durante: a) barra cerrada, b) barra abierta y c) Barra cerrada con marejadas. La flecha roja indica los mayores registros observados durante ambos periodos de barra. La flecha verde indica la distribución de concentraciones descendente en dirección contraria a la desembocadura, mientras que la flecha amarilla indica la distribución de concentraciones descendente hacia la desembocadura.	30

Figura 21. Caudal y precipitación de la estación Estero Quintero en Valle alegre. En azul se observa el caudal (m^3/s), mientras que la precipitación (mm) se observa como línea roja. Los círculos amarillos representan los días muestreados. 33

Figura 22. Serie de tiempo de la anomalía del nivel del mar (m) obtenida de la estación mareográfica del SHOA en Quintero. Las secciones destacadas corresponden a los periodos muestreados. 34

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fechas de las campañas realizadas, estaciones muestreadas, estado de la barra de arena durante el muestreo y la fecha de la fotografía satelital utilizada para graficar las variables biogeoquímicas del humedal.....	7
Tabla 2. Identificación de estaciones con su respectiva ubicación geográfica.....	8
Tabla 3. Horarios de muestreos realizados el 12 y 13 de agosto del 2017.....	8
Tabla 4. Test de Kruskal-Wallis para los nutrientes entre las campañas con transecta de muestreo completa, correspondiente a la campaña 2 (barra abierta) y la campaña 3 (barra cerrada).	31
Tabla 5. Test de Kruskal-Wallis para los nutrientes entre las campañas con barra cerrada y barra abierta.	31

RESUMEN

Los humedales costeros de la zona central de Chile se caracterizan por presentar durante gran parte del año una escasa o nula comunicación con el mar, producto de la formación de una barra de arena. Estos ecosistemas se caracterizan principalmente por su capacidad de acumular materia orgánica y nutrientes (sumidero). Sin embargo, pueden ser fuentes o transformadores de nutrientes. El principal aporte de éstos proviene de la escorrentía cargada de fertilizantes, minerales y nutrientes que llegan al humedal durante eventos de lluvia. Por otro lado, eventos como el aumento del nivel del mar que sobrepasen la barra pueden disminuir las concentraciones de nutrientes en el humedal, en relación a las concentraciones que se observan en el humedal sin inundación. El presente estudio muestra un análisis de la variabilidad biogeoquímica del humedal costero de Mantagua (Chile central) ante periodos de barra de arena abierta y cerrada; y la influencia del agua de mar en estas dos situaciones. Para ello se realizaron 5 campañas de muestreo del agua del humedal, donde las primeras dos representan el periodo de barra cerrada (diciembre 2016, junio 2017); y las últimas tres, el periodo de barra abierta (junio 2017 y agosto 2017). Durante estos muestreos, se realizaron mediciones de oxígeno disuelto, temperatura y conductividad eléctrica en conjunto con la toma de muestras para la medición de nutrientes (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y SiO_4^{4-}). Los resultados mostraron una diferencia estadísticamente significativa en las concentraciones de nutrientes entre los periodos de barra abierta y cerrada. En general, los mayores registros de temperatura (en verano), conductividad y oxígeno disuelto fueron observados en el periodo de barra cerrada. Por el contrario, las variables como el NO_2^- , NO_3^- y PO_4^{3-} y la temperatura en invierno registraron su máximo en el periodo de barra cerrada. Respecto al SiO_4^{4-} , este presentó mayores concentraciones durante los muestreos en junio, tanto en periodo de barra cerrada como abierta. Estos resultados sugieren que existe una relación entre el aumento de nutrientes (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y SiO_4^{4-}) y la apertura de barra de arena en el humedal, producto de la escorrentía, ocurriendo lo contrario durante periodos de barra cerrada. Sin embargo, la dinámica biogeoquímica de las aguas del humedal Mantagua es principalmente regida por la escorrentía y no por la apertura de la barra de arena que separa el humedal del mar.

ABSTRACT

Coastal wetlands are characterized by little or no communication with the sea during most of the time of the year, as a result of the formation of a sandbar. These ecosystems are characterized mainly by their capacity to store nutrients (sink). However, they can be sources or transformers of nutrients. The main contribution of these nutrients comes from the runoff loaded with fertilizers, minerals and nutrients that reach the wetland during rain events. On the other hand, events such as the rise in sea level during ocean swell can reduce the concentrations of nutrients in the wetland by overpassing the sandbar, respect to the higher concentrations observed in the wetland without flooding.

The present study describes an analysis of the biogeochemical variability of the Mantagua coastal wetland in the situation of open and closed sandbar and the influence of sea water on this system. For these 2 situations, 5 water sampling campaigns were carried out, where the first two represent the closed bar period (December 2016, June 2017) and the last three the open bar period (June 2017 and August 2017). During these samplings, measurements of dissolved oxygen, temperature and electrical conductivity were made together with the sampling for the measurement of nutrients (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{-3} y SiO_4^{-4}).

The observed results showed a statistically significant difference in the concentration of nutrients between the open and closed bar periods. In general, the highest records of temperature (in summer), conductivity and dissolved oxygen were observed in the closed bar period, on the contrary, the variables such as nitrate, nitrite, phosphate and temperature in winter registered their maximum in the period of closed bar. Regarding silicate, this showed higher concentrations during the samplings in June, both in closed and open bar periods.

These results suggest that there is a relationship between the increase in nutrients (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{-3} y SiO_4^{-4}) and the opening of the sandbar in the wetland as a result of runoff, with the opposite occurring during periods of closed bar. However, the biogeochemical dynamics of the waters of the Mantagua wetland are mainly driven by the runoff and not by the opening of the sand bar that separates the wetland from the sea.

INTRODUCCIÓN

Los humedales proveen importantes beneficios ambientales en todo el mundo. Entre sus servicios ecosistémicos se encuentra el almacenamiento de agua, la recarga de acuíferos, el control de la erosión y la retención de nutrientes, sedimentos y agentes contaminantes (Bergkamp & Orlando, 1999).

La biogeoquímica de los humedales costeros comprende una combinación de muchas transformaciones químicas del nitrógeno, azufre, hierro, manganeso, carbono y fósforo, entre otros, como resultado de condiciones aeróbicas y anaeróbicas (Mitsch & Gosselink, 2015). Por otra parte, estos sistemas se caracterizan principalmente por su capacidad de acumular materia orgánica y por lo tanto nutrientes (sumidero). Sin embargo, pueden ser fuentes o transformadores de nutrientes (Medina *et al.*, 2003). El comportamiento de estos cuerpos de agua y su estructura se encuentran directamente ligados a las condiciones hidrológicas del humedal, ya que estas afectan diversos factores abióticos, incluyendo condiciones de oxigenación, la disponibilidad de nutrientes y, en caso de humedales costeros, la salinidad (Mitsch & Gosselink, 1986).

Los humedales costeros están expuestos a frecuentes fluctuaciones y alteraciones, producto de procesos hidrodinámicos que incluyen los vientos, mareas, forzantes meteorológicos y la variabilidad temporal/espacial de la salinidad y temperatura. En el caso de los eventos de mareas, estos influyen en los humedales a través del aumento del nivel del mar, promoviendo una onda de oscilación del nivel freático que se difunde a través del sistema, poco a poco a través del subsuelo, o rápido si es mediante el agua superficial (Dussailant *et al.*, 2009).

Ante un aumento del nivel del mar e inundación del humedal, las concentraciones de nutrientes en el humedal disminuyen en relación a las concentraciones que se observan sin inundación. Esto se debe a que la producción primaria es menor en el agua de mar y al aporte de sulfatos que promueven la sulfato reducción por sobre la metanogénesis (Libes, 1992).

Las principales condiciones que propician la producción primaria en el océano son la cantidad y calidad de luz, las fuentes de carbono disponibles, el fitoplancton y la presencia de nutrientes; mientras que en las lagunas costeras la producción primaria acuática está conformada por varios componentes básicos: el microfitobentos, los pastos marinos, la vegetación de macrofitas, la quimiosíntesis y eventualmente las macroalgas, además de los frecuentes y significativos suministros de materia orgánica proveniente de la vegetación circundante por la vía de los detritos y la regeneración de nutrientes, que incrementan la productividad total del sistema (Contreras *et al.*, 2005). Por otro lado, el principal aporte de nutrientes al humedal proviene de la escorrentía cargada de fertilizantes, minerales y nutrientes que llegan al humedal ante eventos de lluvia (Marcovecchio *et al.*, 2006).

Los patrones estacionales de absorción y liberación de nutrientes son característicos de muchos humedales costeros. En climas templados, la acumulación de nutrientes es mayor durante la temporada de crecimiento de la vegetación (primavera-verano), principalmente debido a la mayor actividad microbiana en la columna de agua y sedimentos (Mitsch & Gosselink, 2015).

Debido a la diversidad de climas y a la geomorfología del terreno, Chile cuenta con una gran cantidad de humedales, que se caracterizan por su gran variedad de ecosistemas terrestres y acuáticos (Parra *et al.*, 2003). De hecho, algunos de ellos han sido reconocidos a nivel internacional, contando actualmente con 13 sitios Ramsar (Carrasco *et al.*, 2015).

La región semiárida de Chile es de especial interés, dado que la estructura del paisaje permite la formación de sistemas lacustres y lagunas costeras ligadas a la dinámica marina que configura complejos de humedales de enorme singularidad hidrológica e hidroquímica (Vidal-Abarca *et al.*, 2011). Esta complejidad hidroquímica se debe a los valores extremos de conductividad eléctrica que presentan estas aguas (entre 52,20 y 1,29 mS/cm; Figueroa *et al.*, 2009). Estos sistemas incluyen una amplia variedad de cuerpos de agua (lagunas, embalses, suelos pantanosos, desembocaduras de esteros y dunas), con un

fuerte dinamismo estacional (verano-invierno), anual y plurianual, debido a los ciclos del El Niño - Oscilación del Sur (ENSO) (Vidal-Abarca *et al.*, 2011).

El humedal de Mantagua se ubica a 18 km al sur de Quintero (Figura 1), el cual corresponde a uno de varios sistemas de desembocadura de ríos y esteros de la zona centro-norte de Chile. Estos sistemas se caracterizan por presentar durante la mayor parte del año una escasa o nula comunicación con el mar, producto de la formación de una barra de arena (Leighton *et al.*, 1987). Por otro lado, la influencia del agua costera, así como el aporte de agua dulce se ve reflejada en una alta heterogeneidad, tanto espacial, como temporal de la distribución de los nutrientes, clorinidad y alcalinidad; mientras que variables como oxígeno disuelto, pH y temperatura, exhiben menor variabilidad (Ministerio del Medio Ambiente, 2015). El régimen de escorrentía que caracteriza a estos esteros y quebradas, tanto en las cuencas costeras como en los denominados sectores costeros, es esencialmente de origen pluvial, por lo que su escurrimiento está estrechamente asociado a la distribución estacional de las lluvias (DCPRH, 2016).

Los humedales, por sus características y peculiaridades, suelen ser ecosistemas sensibles a variaciones del clima y fenómenos extremos del tiempo. Estos muestran una elevada vulnerabilidad al cambio climático, debido entre otras características a la fragilidad de sus ecosistemas; fragilidad que se ve estimulada, tanto por acciones naturales, como antropogénicas (Moya *et al.*, 2005). El aumento del nivel del mar, producto del cambio climático, puede tener consecuencias devastadoras en los hábitats costeros, producto del agua de mar que penetra en zonas cada vez más alejadas de la costa, lo cual puede generar consecuencias, como la erosión, la inundación de humedales, la contaminación de acuíferos y de suelo agrícola (Crooks *et al.*, 2011). Para dimensionar cómo este aumento en el nivel del mar afectaría a las variables biogeoquímicas de los humedales, es necesario conocer su respuesta ante este escenario. Sin embargo, en la actualidad, la gran mayoría de los humedales en Chile carecen de estudios sobre su dinámica hidrológica, biológica, ecológica y biogeoquímica (Figueroa *et al.*, 2009).



Figura 1. Humedal costero de Mantagua (32,9°S, 71,5°W). Fuente: Nickolas B. Bassi, 24/06/2017.

Los estudios sobre las variaciones físico-químicas en la zona de estudio se remontan a los años 1980'. Sin embargo, estos carecen de información sobre la influencia del mar en este. Por ello, el principal objetivo de este trabajo de titulación es identificar la respuesta de los nutrientes (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y SiO_4^{4-}) ante la dinámica estacional de la barra de arena en su desembocadura (periodos de barra abierta o cerrada) y la influencia del agua de mar en éstas.

HIPÓTESIS

En el humedal de Mantagua, en periodos de barra de arena abierta, asociados a la presencia de lluvia, el aporte de nutrientes (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{-3} y SiO_4^{-4}) aumenta. Por el contrario, ante periodos de barra de arena cerrada, las concentraciones de nutrientes disminuyen, debido al bajo aporte de nutrientes por escorrentía.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la variabilidad biogeoquímica de la concentración de nutrientes en el humedal costero de Mantagua.

Objetivos específicos

- Caracterizar la dinámica de las fluctuaciones del caudal y nivel del mar, así como la influencia de estas sobre la barrera de arena que separa el humedal del mar.
- Determinar las condiciones biogeoquímicas (concentraciones de NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{-3} y SiO_4^{-4}) del humedal durante un periodo de verano e invierno.
- Comparar las condiciones biogeoquímicas (concentraciones de NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{-3} y SiO_4^{-4}) del humedal de Mantagua en dos periodos: con y sin aporte de agua de mar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

La zona de estudio corresponde al humedal costero de Mantagua (32,9°S, 71,5°W), ubicado a 7 km al norte de Concón y 18 km al sur de Quintero (Figura 2). El humedal es un sistema integrado por el estero Quintero y la laguna Mantagua, la cual tiene una profundidad promedio de 1,5 m.

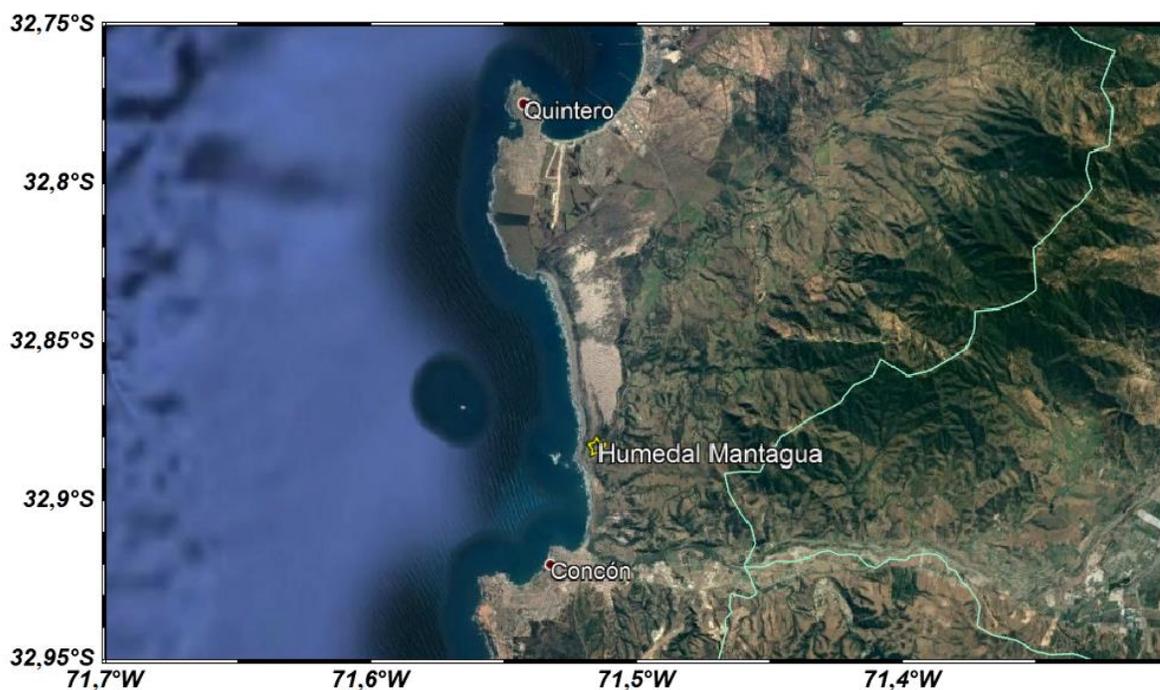


Figura 2. Mapa de la ubicación de la zona de estudio, el humedal de Mantagua (32,9°S, 71,5°W). Imagen: Google Earth.

Campaña de muestreo

Este estudio contempla el análisis de las condiciones biogeoquímicas (concentraciones de NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{-3} y SiO_4^{-4}) y físicas del humedal de Mantagua durante cuatro campañas de muestreo (Tabla 1).

La primera campaña se realizó del 9 al 11 de diciembre del 2016, donde se colectaron muestras de agua para el análisis de nutrientes en dos estaciones, una a aproximadamente 0,2 km de la barra de arena y otra a 0,94 km hacia adentro del humedal (Tabla 1, Tabla 2 y Figura 3). La temperatura, conductividad y oxígeno disuelto fueron medidas con un equipo multiparámetro (YSI ProDSS). Todas las mediciones de nutrientes realizadas en esta campaña se realizaron en superficie.

La segunda y tercera campaña fueron realizadas el 24 y 29 de junio del 2017, respectivamente, y al igual que en la primera campaña, se colectaron muestras de agua para el análisis de nutrientes en superficie en las estaciones listadas en la Tabla 1 y la Figura 3. La temperatura, conductividad y oxígeno disuelto fueron medidas con un equipo multiparámetro (YSI ProDSS). En la segunda campaña no se realizaron mediciones de oxígeno disuelto.

Tabla 1. Fechas de las campañas realizadas, estaciones muestreadas, estado de la barra de arena durante el muestreo y la fecha de la fotografía satelital utilizada para graficar las variables biogeoquímicas del humedal.

Campaña	Fecha	Estaciones muestreadas	Estado de la barra de arena	Fecha fotografía satelital
1	09-12-2016	E1 y E5	Cerrada	13-12-2016
	10-12-2016	E1 y E5	Cerrada	13-12-2016
	11-12-2016	E1 y E5	Cerrada	13-12-2016
2	24-06-2017	E1 a la E5	Cerrada	26-03-2017
3	29-06-2017	E1 a la E5	Abierta	29-06-2017
4	12-08-2017	E1 y E5	Abierta	13-08-2017
5	13-08-2010	E1 y E5	Abierta	13-08-2017

La cuarta campaña se realizó el 12 y 13 de agosto del 2017, donde se realizaron 3 muestreos diarios en las estaciones E1 y E5 en intervalos de aproximadamente 4 horas (Tabla 3). Al igual que en las campañas anteriores, se colectaron muestras de agua para el análisis de nutrientes en superficie y las variables, como temperatura, conductividad y oxígeno disuelto, fueron medidas con un equipo multiparámetro (YSI ProDSS).

Tabla 2. Identificación de estaciones con su respectiva ubicación geográfica.

Lugar	Estaciones	Ubicación	
		Latitud	Longitud
Humedal Mantagua	E1	32°53'00,63"S	71°30'01,20"W
	E2	32°52'57,53"S	71°30'07,08"W
	E3	32°52'59,25"S	71°30'15,02"W
	E4	32°53'05,39"S	71°30'21,69"W
	Ef (solo para mediciones con multiparámetro)	32°53'04,46"S	71°30'31,74"W
	E5	32°53'02,16"S	71°30'36,83"W

Tabla 3. Horarios de muestreos realizados el 12 y 13 de agosto del 2017.

Campaña	Fecha	Muestreo	Horario de muestreo
4	12-08-2017	H1	13:12 - 14:30 hrs.
		H2	17:20 - 18:15 hrs.
		H3	21:10 - 22:25 hrs.
5	13-08-2017	H1	00:15 - 01:30 hrs.
		H2	08:15 - 09:23 hrs.
		H3	12:31 - 13:28 hrs.



Figura 3. Mapa de la zona de estudio con la ubicación de las estaciones muestreadas en el humedal de Mantagua. Imagen: Google Earth.

Muestreo

Las muestras de agua para la determinación de nutrientes fueron tomadas en triplicado. Previo al almacenado de la muestra, el tubo Falcon se cebó al menos tres veces con el agua de la muestra. Posteriormente se filtraron 45 mL de agua (GF/F: 0,45 μm) y se congeló a una temperatura menor o igual a -20°C para evitar el crecimiento de organismos.

Análisis de laboratorio

Nutrientes

La determinación de nutrientes (NO_3^- , PO_4^{3-} y SiO_4^{4-}) se realizó mediante análisis colorimétrico en un autoanalizador Alpkem RFA/2, utilizando la metodología de Strickland & Parsons (1972) en el Laboratorio de Biogeoquímica Marina de la PUCV. La concentración de NO_2^- se determinó mediante colorimetría en un espectrofotómetro (Spectronic Genesys S), de acuerdo a la metodología de Strickland & Parsons (1972).

Para la graficar de forma representativa las concentraciones de nutrientes, se utilizaron fotografías satelitales del humedal (obtenidas de Google Earth) correspondientes a fechas cercanas al muestreo (Tabla 1).

Procesamiento de datos

Nivel del mar

Los datos utilizados corresponden a alturas horarias de la marea cada una hora y comprenden el período desde el 1 de enero de 2016 al 31 de agosto del 2017. La información original de nivel del mar fue obtenida de los registros efectuados en la estación mareográfica dependiente del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada que se encuentra ubicada en la bahía de Quintero. Las brechas presentes en estos datos fueron completadas con una interpolación mediante armónicos.

Caudal y precipitación

Los datos de los caudales medios diarios y las precipitaciones diarias, correspondientes a la estación fluviométrica Estero Quintero en Valle Alegre, fueron proporcionados por la Dirección Regional de Aguas de la Región de Valparaíso. Estos datos abarcan el periodo desde el 1 de diciembre del 2016 hasta el 31 de agosto del 2017.

Análisis estadístico

Para determinar si las condiciones biogeoquímicas son distintas en las aguas del humedal, cuando la barra de arena está cerrada o abierta, se realizó un análisis basado en el test de Kruskal Wallis (PERMANOVA) para datos no normales, utilizando el programa PAST versión 3.0 (Hammer *et al.*, 2001).

RESULTADOS

Caracterización de las propiedades físicas del humedal Mantagua

En los muestreos de verano de 2016 e invierno de 2017 con barra cerrada se observaron distintas condiciones físicas y químicas. En verano se observó un gradiente espacial decreciente de temperatura desde la cabeza hacia la desembocadura del humedal. Las temperaturas observadas durante el muestreo fueron aumentando con los días (Figura 4a-c), abarcando un rango entre los 22,32 y 29,13 °C. Por otro lado, la conductividad durante este periodo (Figura 6a-c) presentó un gradiente espacial ascendente hacia la desembocadura, fluctuando entre 3,48 y 10,08 mS/cm. En cambio, el oxígeno disuelto presentó un gradiente espacial decreciente hacia la desembocadura del humedal, con menores valores en la superficie de las estaciones más lejanas a la costa, a excepción del día 09-12-2016, donde se observó la menor concentración de oxígeno en profundidad (Figura 8a-c).

En invierno, la temperatura registrada (con barra cerrada) fue homogénea caracterizada por una leve disminución en profundidad, fluctuando entre 12,9 y 13,3 °C en las estaciones E1 y E5, respectivamente (Figura 4d). Del mismo modo, la distribución de conductividad (Figura 6d) fue homogénea, con disminución en profundidad, fluctuando entre 0,02 a 1,15 mS/cm. Por otro lado, en este muestreo no se realizaron mediciones de oxígeno disuelto.

Por otra parte, en los muestreos de invierno realizados cuando el humedal presentaba su barra abierta durante junio de 2017, se observó un gradiente espacial decreciente desde la cabeza hacia la desembocadura tanto en la temperatura (Figura 5a), como en la conductividad (Figura 7a), fluctuando de 13,70 a 14,5 °C y entre 0,01 y 0,33 mS/cm, respectivamente. En cambio, la concentración de oxígeno disuelto (Figura 9a) aumentó hacia la desembocadura del humedal, fluctuando entre 5,53 y 7,55 mg/L. Por otro lado, en los muestreos de agosto se observó un aumento de temperatura, conductividad y oxígeno disuelto desde la cabeza hacia la desembocadura del humedal, fluctuando de 11,2 a

12,4 °C, 0,25 a 0,46 mS/cm y 6,40 a 7,40 mg/L, respectivamente. La temperatura registró un valor máximo alrededor de las 15:00 hrs para ambos días, en superficie y a la profundidad promedio de 0,8 m (Figura 5b-c). Por otro lado, la conductividad alcanzó un máximo en superficie (Figura 7b) en el periodo de las 16:00 a 20:00 hrs el 12-08-2017; mientras que a la profundidad promedio de 0,8 m (Figura 7c) se detectaron mayores valores en el mismo periodo horario. No obstante, estas se extendieron en dirección contraria a la desembocadura. Finalmente, la concentración de oxígeno presentó un máximo alrededor de las 15:00 hrs el 13-08-2017 en superficie (Figura 9b). Del mismo modo, la distribución de oxígeno disuelto a la profundidad promedio de 0,8 m (Figura 9c) presentó mayores valores en el mismo periodo horario y alrededor de las 18:00 hrs el 12-08-2017.

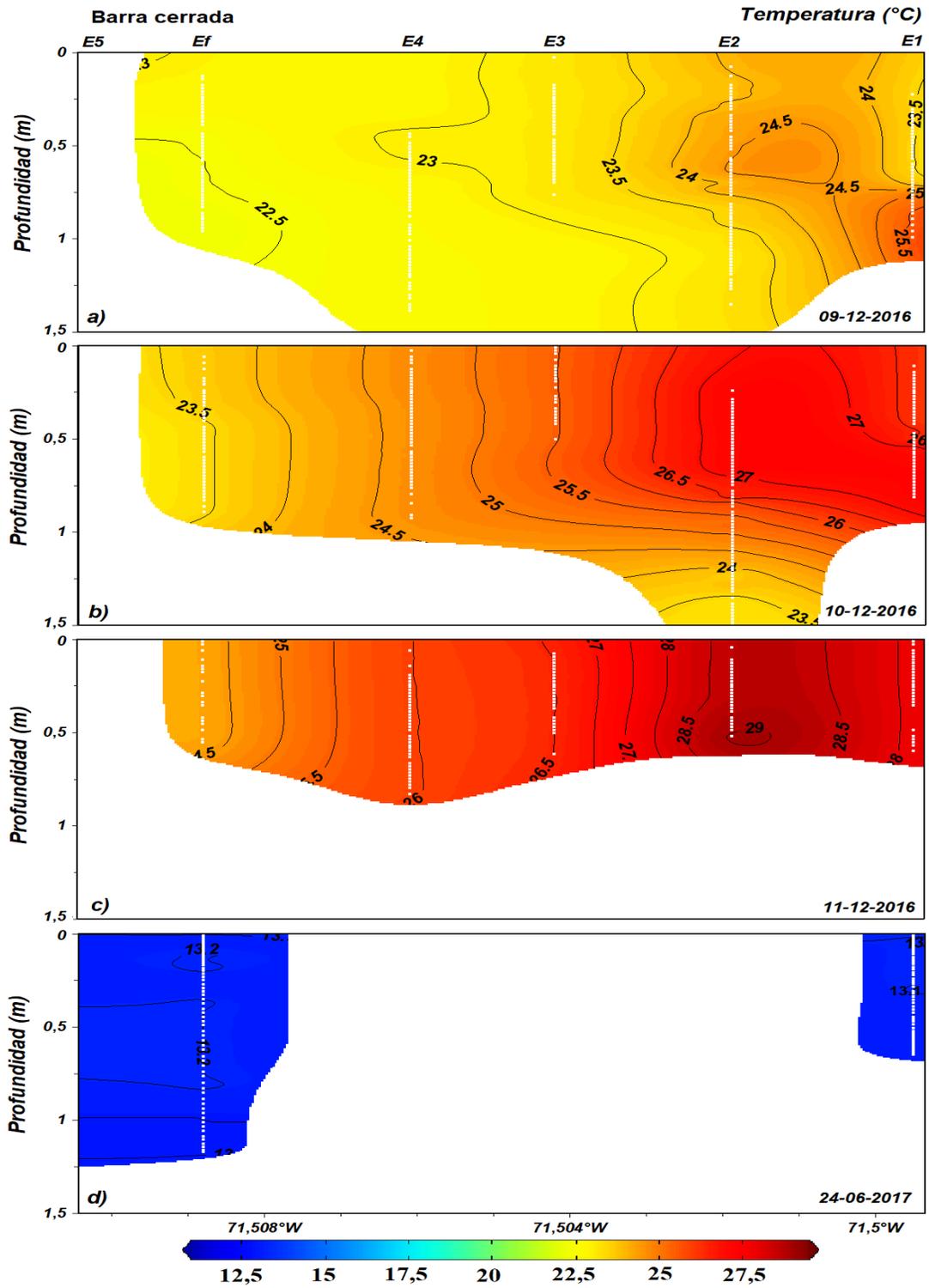


Figura 4. Distribución de temperatura (°C) en el agua del humedal con barra de arena cerrada durante la: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10-12-2016), c) Campaña 1 (11-12-2016) y d) Campaña 2 (24-06-2017).

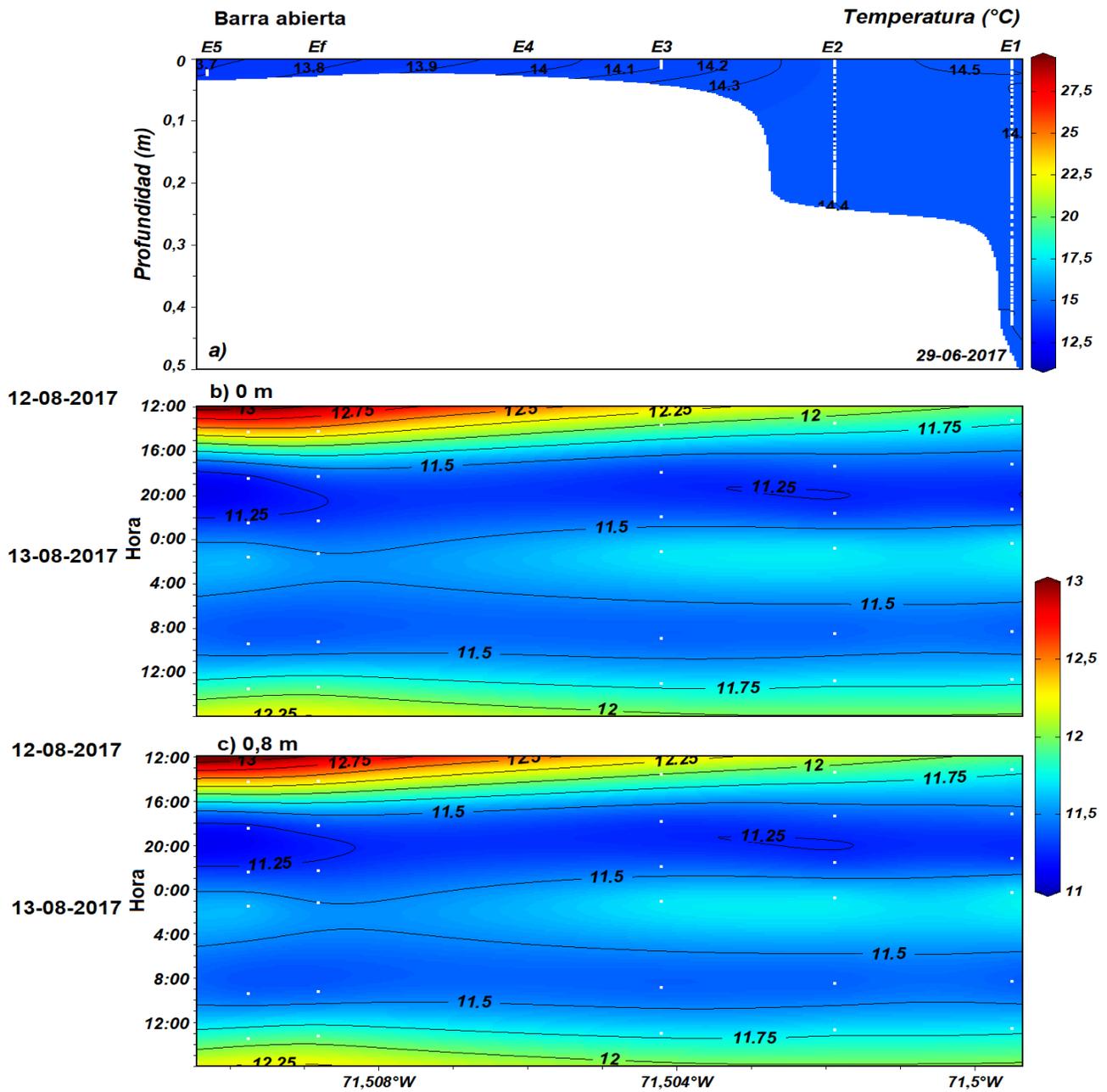


Figura 5. Distribución de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en el agua humedal con barra de arena abierta durante la: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0 m y c) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0,8 m.

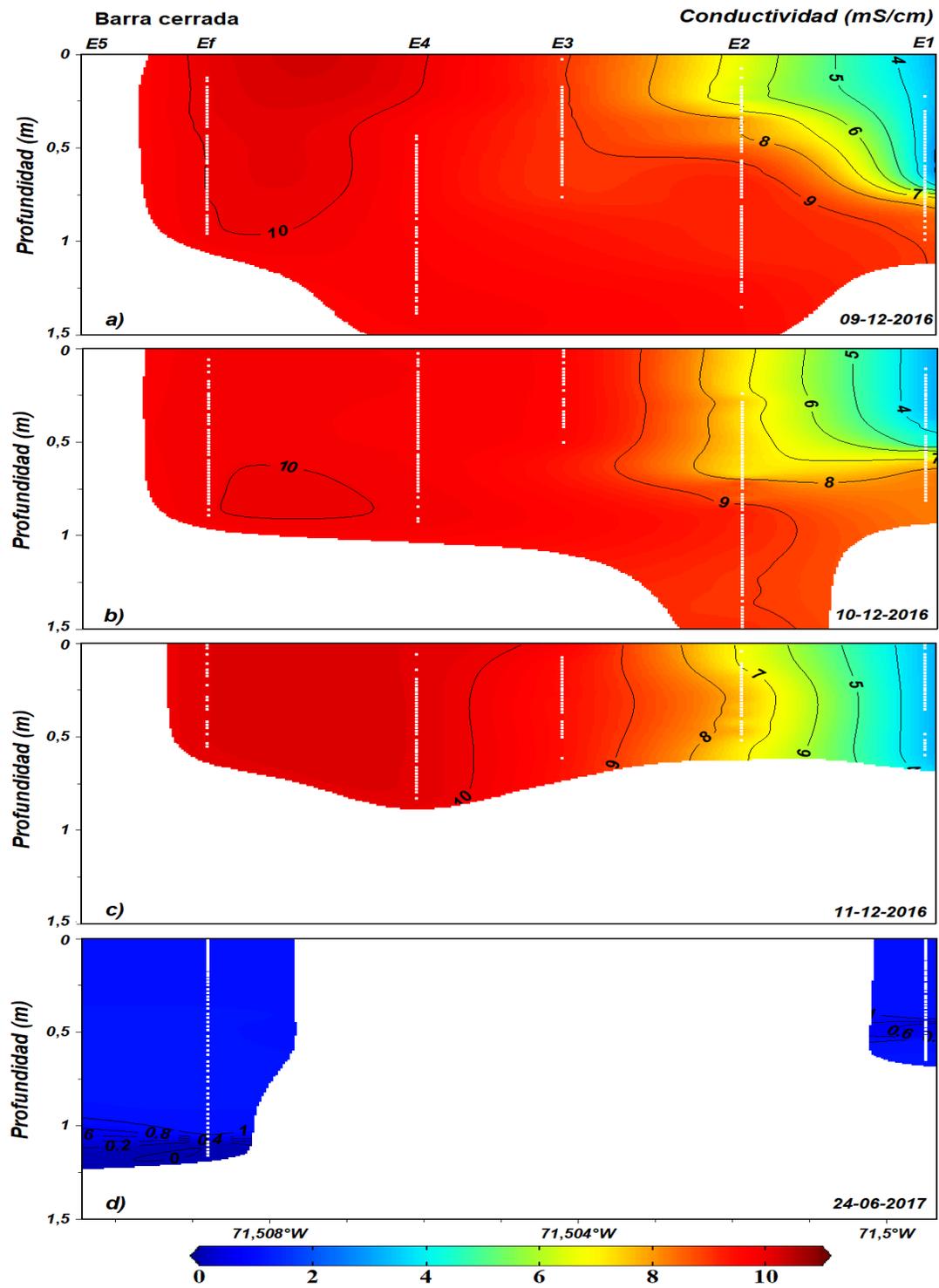


Figura 6. Distribución de conductividad (mS/cm) en el agua del humedal con barra de arena cerrada durante la: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10-12-2016), c) Campaña 1 (11-12-2016) y d) Campaña 2 (24-06-2017).

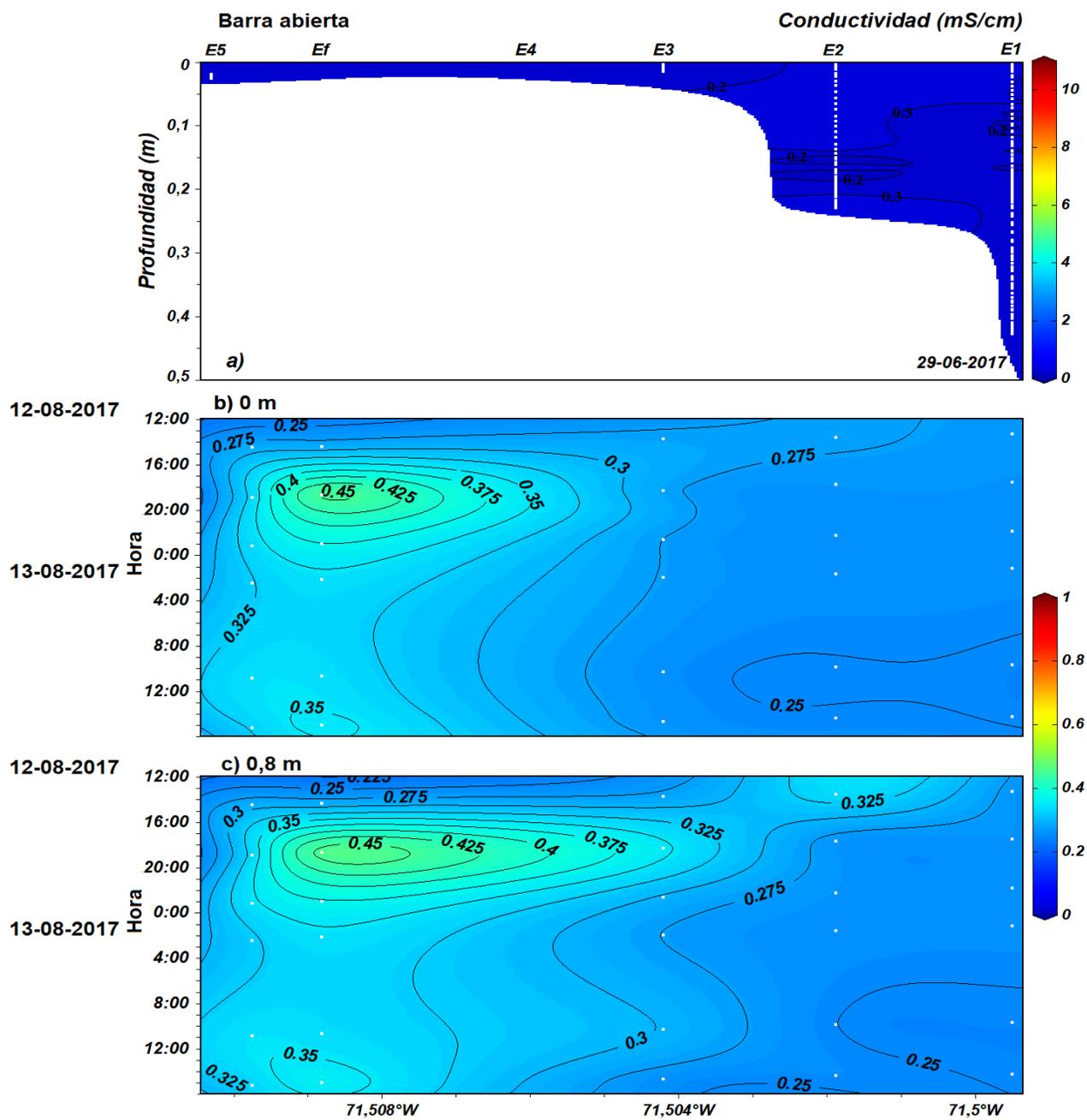


Figura 7. Distribución de conductividad (mS/cm) en el agua humedal con barra de arena abierta durante la: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0 m y c) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0,8 m.

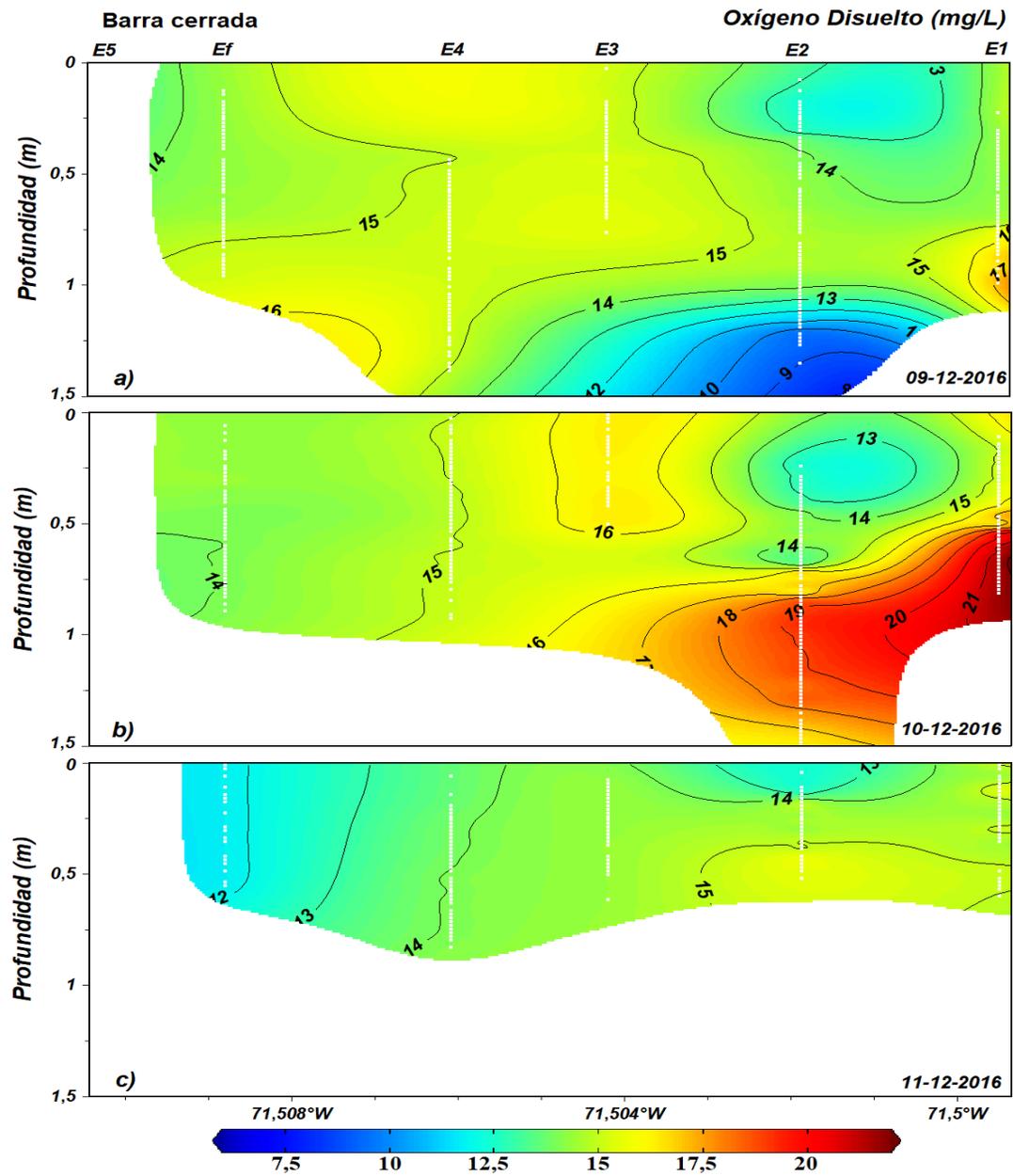


Figura 8. Distribución de oxígeno disuelto (mg/L) en el agua del humedal con barra de arena cerrada durante la: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10-12-2016) y c) Campaña 1 (11-12-2016).

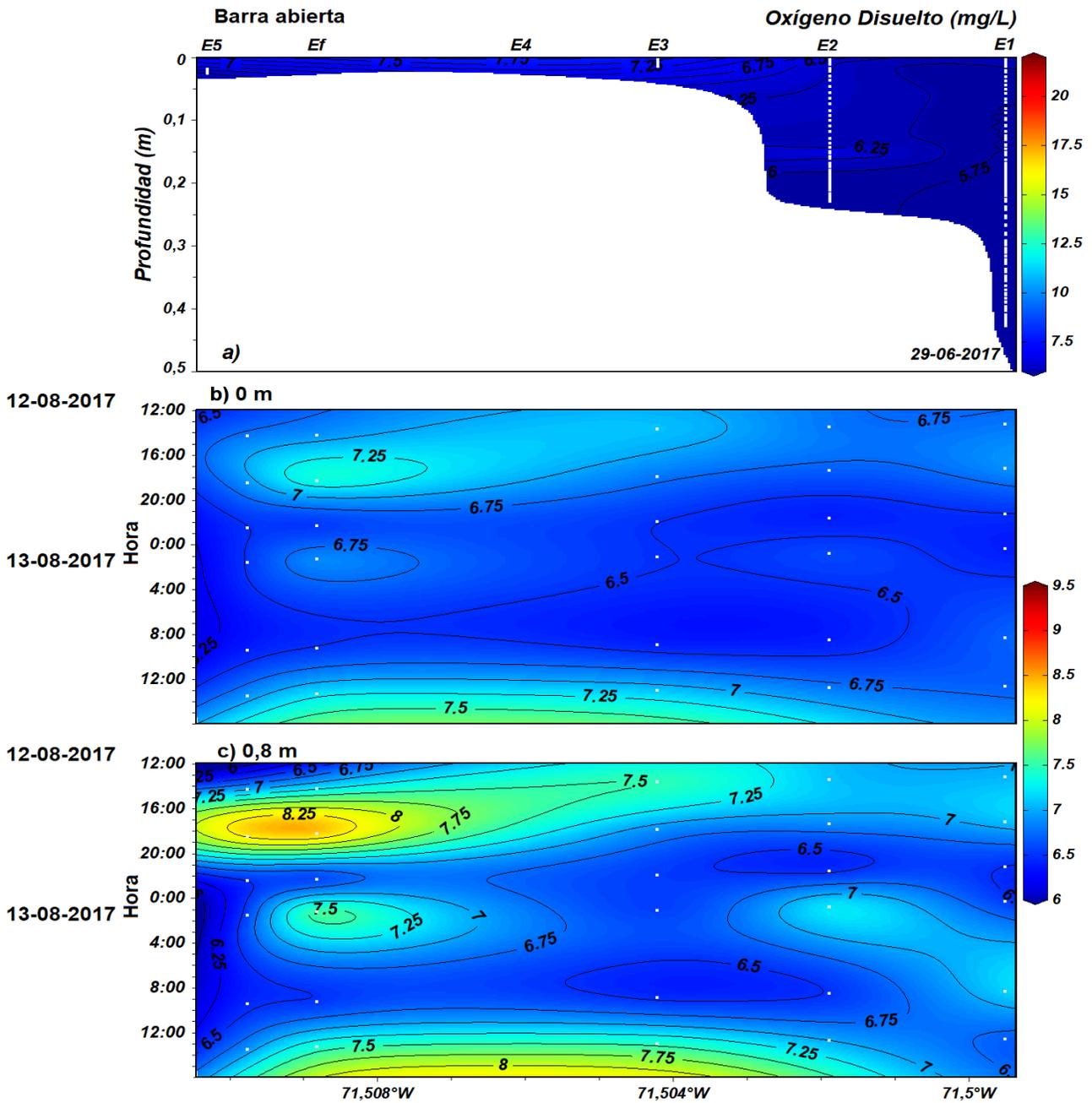


Figura 9. Distribución de oxígeno disuelto (mg/L) en el agua humedal con barra de arena abierta durante la: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0 m y c) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017) por horas a 0,8 m.

Distribución de nutrientes

En verano (barra cerrada), la distribución de nutrientes a lo largo del humedal fue relativamente homogénea a excepción de la concentración de NO_2^- , el cual presentó concentraciones entre 0,01 y 0,27 μM (Figura 18a-c). En general el contenido de NO_3^- presentó un gradiente espacial decreciente desde la cabeza hacia la desembocadura del humedal, con concentraciones promedio de $1,47 \pm 0,07 \mu\text{M}$ (Figura 10a), mientras que las concentraciones de NO_2^- , PO_4^{-3} y SiO_4^{-4} presentaron un gradiente ascendente desde la cabeza hacia la desembocadura. Las concentraciones promedio de PO_4^{-3} observadas en este periodo fueron de $0,43 \pm 0,06 \mu\text{M}$ (Figura 12a-c) y $47,81 \pm 5,06 \mu\text{M}$ de SiO_4^{-4} (Figura 15a y b). Por otro lado, en el periodo de invierno se observó un gradiente de concentraciones decreciente desde la cabeza hacia la desembocadura del humedal con barra cerrada, con una distribución no homogénea. Sin embargo, el PO_4^{-3} (Figura 12d) y NO_2^- (Figura 18d) presentaron una menor variabilidad, con concentraciones promedio de $0,66 \pm 0,20 \mu\text{M}$ y $0,12 \pm 0,12 \mu\text{M}$, respectivamente; mientras que el NO_3^- (Figura 10b) presentó concentraciones de 0,01 a 3,64 μM y el SiO_4^{-4} (Figura 15c) de 220,40 a 306,47 μM .

En los muestreos de barra abierta de invierno también se distinguieron distintos patrones. En junio, la distribución de nutrientes a lo largo del humedal fue relativamente homogénea a excepción del SiO_4^{-4} , el cual presentó concentraciones entre 166,72 y 329,37 μM (Figura 16a). El NO_2^- presentó un gradiente espacial ascendente desde la cabeza hacia la desembocadura, con concentraciones promedio de $4,35 \pm 0,69 \mu\text{M}$ (Figura 19a); mientras que las concentraciones de PO_4^{-3} , NO_3^- y SiO_4^{-4} presentaron un gradiente decreciente hacia la desembocadura. Las concentraciones promedio observadas en este muestreo fueron de $7,27 \pm 0,40 \mu\text{M}$ de PO_4^{-3} (Figura 13a) y $212,55 \pm 2,98 \mu\text{M}$ de NO_3^- (Figura 11a). Por otro lado, en los muestreos de agosto, se observó en general un gradiente de nutrientes decreciente hacia la desembocadura del humedal, a excepción del NO_2^- (Figura 19b-c), el cual presentó concentraciones promedio de $1,46 \pm 0,09 \mu\text{M}$ que fueron en aumento hacia la desembocadura. En cuanto a la distribución de nutrientes esta se presentó homogénea para el NO_2^- , PO_4^{-3} y NO_3^- , con concentraciones promedio de $6,01 \pm 0,59 \mu\text{M}$ en el PO_4^{-3}

(Figura 13b-c y Figura 14a-c) y $68,52 \pm 2,42 \mu\text{M}$ en el NO_3^- (Figura 11b); mientras que el SiO_4^{4-} presentó concentraciones entre 75,02 y 219,70 μM (Figura 16b-c y Figura 17a-c).

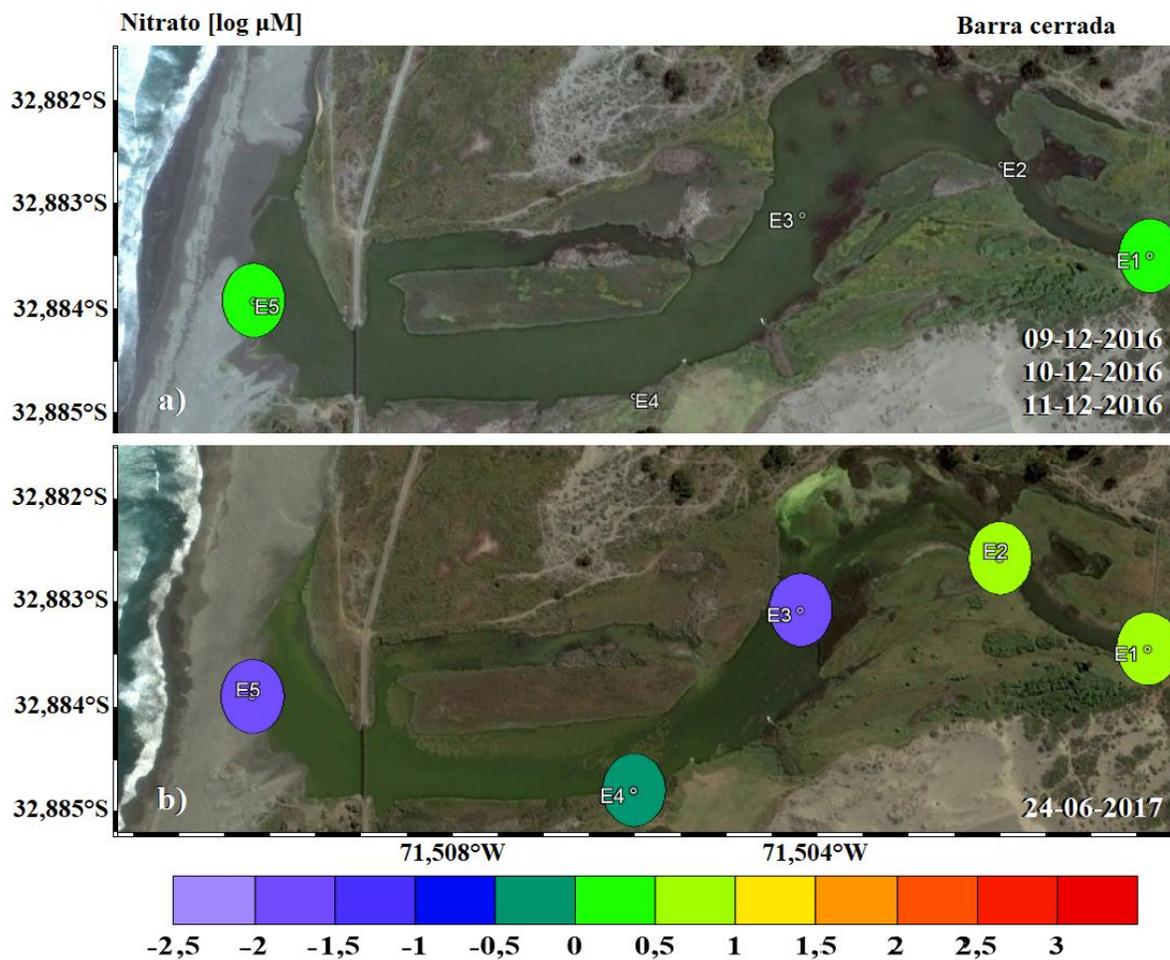


Figura 10. Distribución de NO_3^- (concentración en $\log \mu\text{M}$) con barra cerrada para: a) Campaña 1 (09, 10 y 11-12-2016) y b) Campaña 2 (24-06-2017).

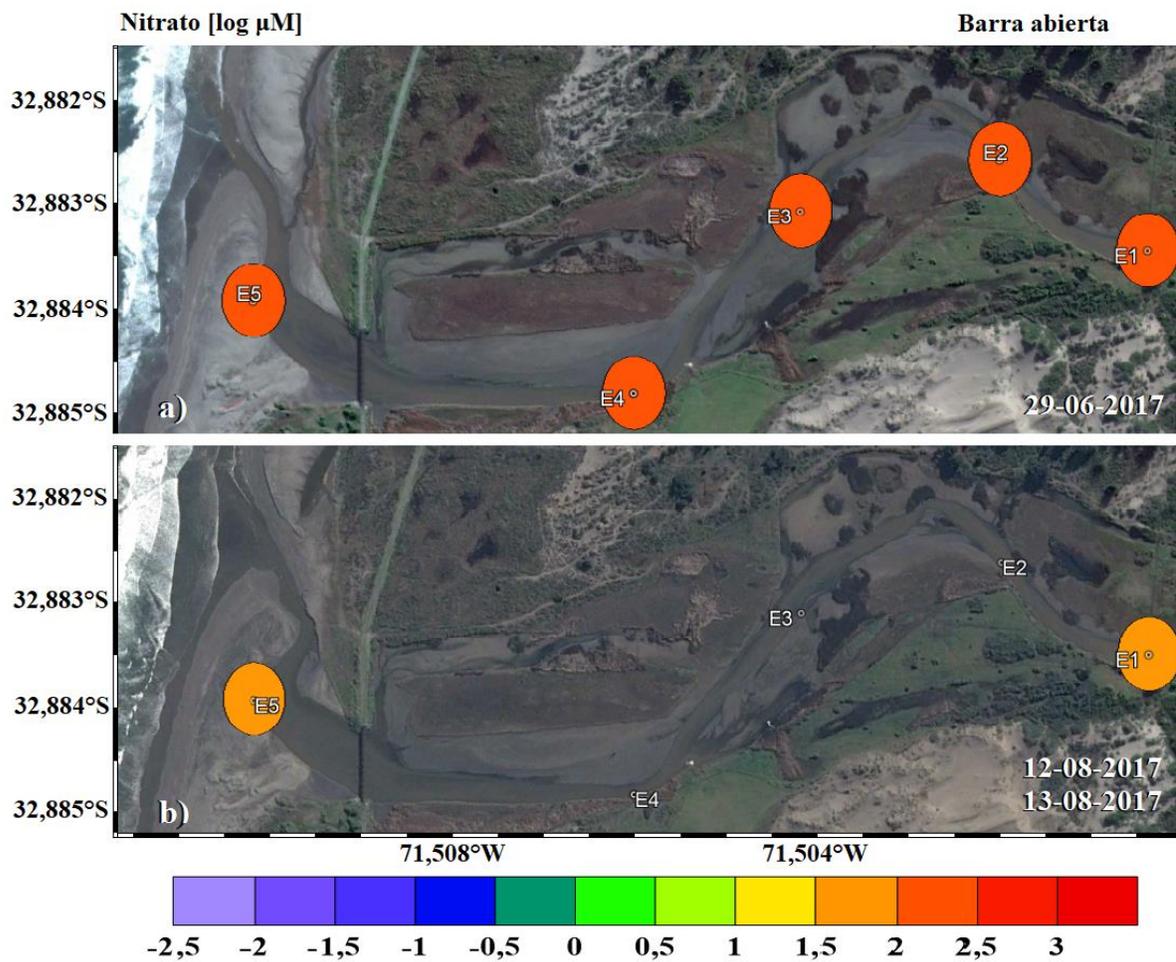


Figura 11. Distribución de NO_3^- (concentración en $\log \mu\text{M}$) con barra abierta para: a) Campaña 3 (29-06-2017) y b) Campaña 4 (12-08-2017) y 5 (13-08-2017).

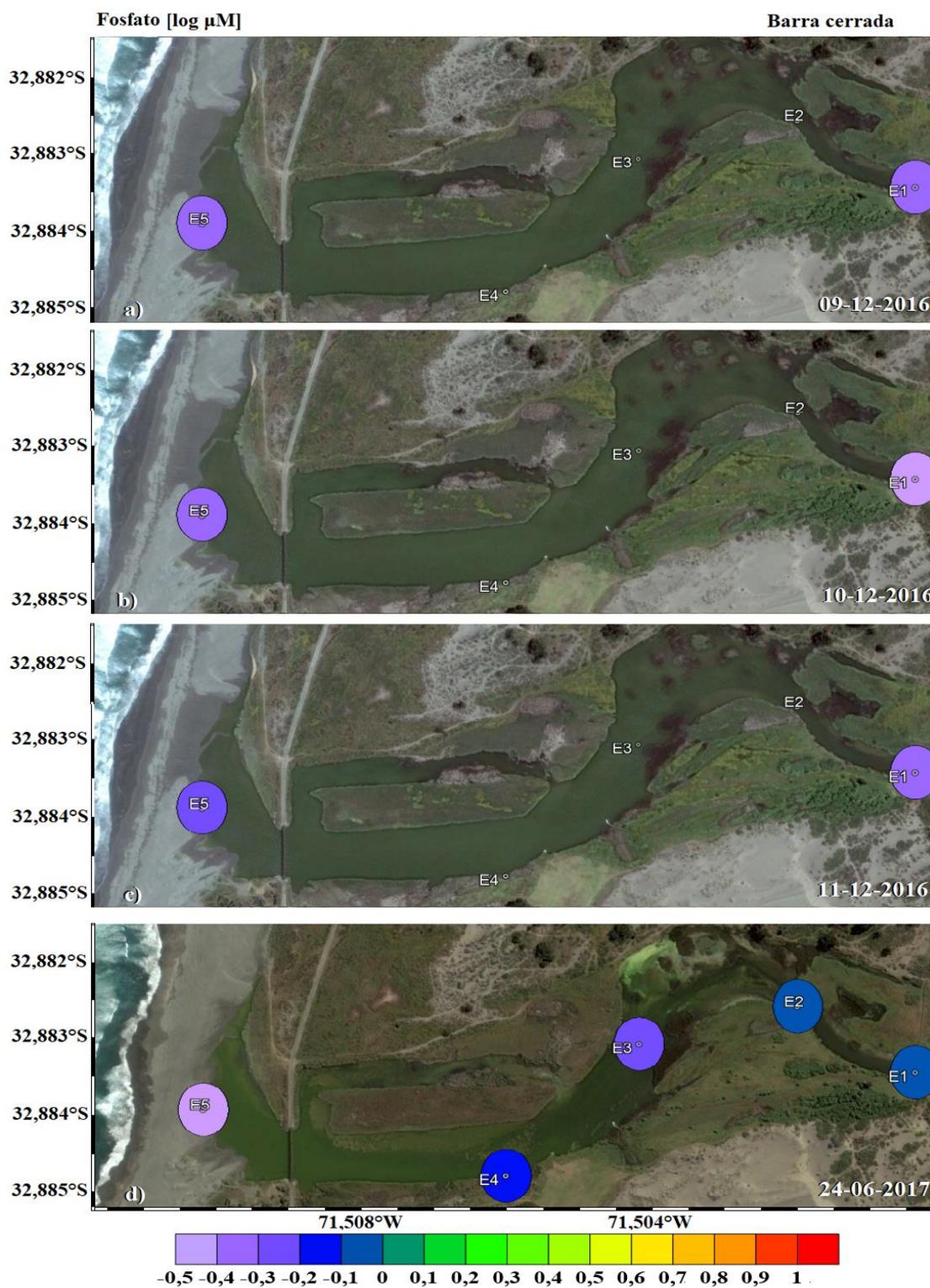


Figura 12. Distribución de PO_4^{-3} (concentración en $\log \mu\text{M}$) con barra cerrada para: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10-12-2016), c) Campaña 1 (11-12-2016) y d) Campaña 2 (24-06-2017).

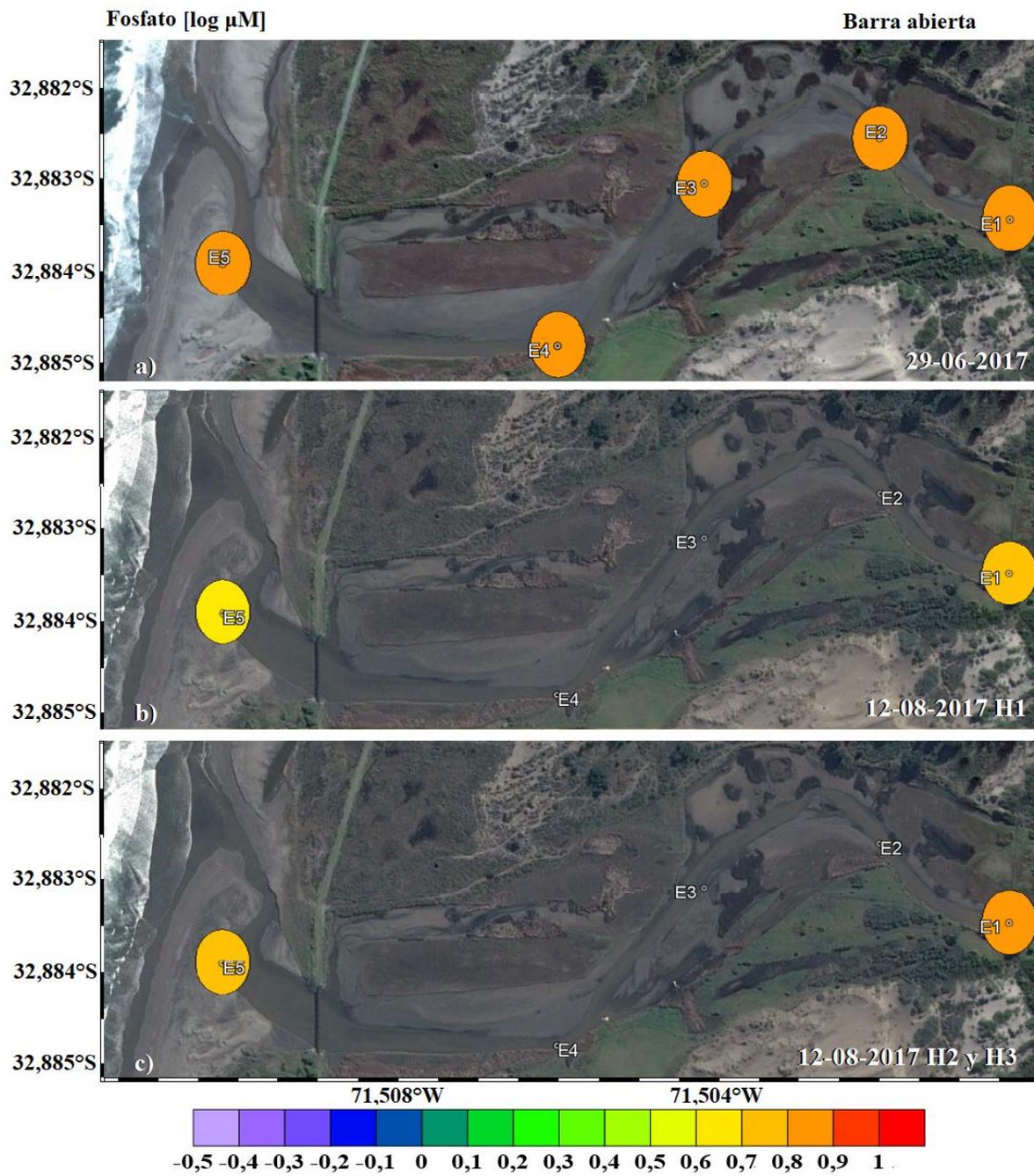


Figura 13. Distribución de PO_4^{-3} (concentración en log μM) con barra abierta para: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 4 (12-08-2017) H1 y c) Campaña 4 (12-08-2017) H2 y H3.



Figura 14. Distribución de PO_4^{-3} (concentración en log μM) con barra abierta para: a) Campaña 5 (13-08-2017) H1, b) Campaña 5 (13-08-2017) H2 y c) Campaña 5 (13-08-2017) H3.

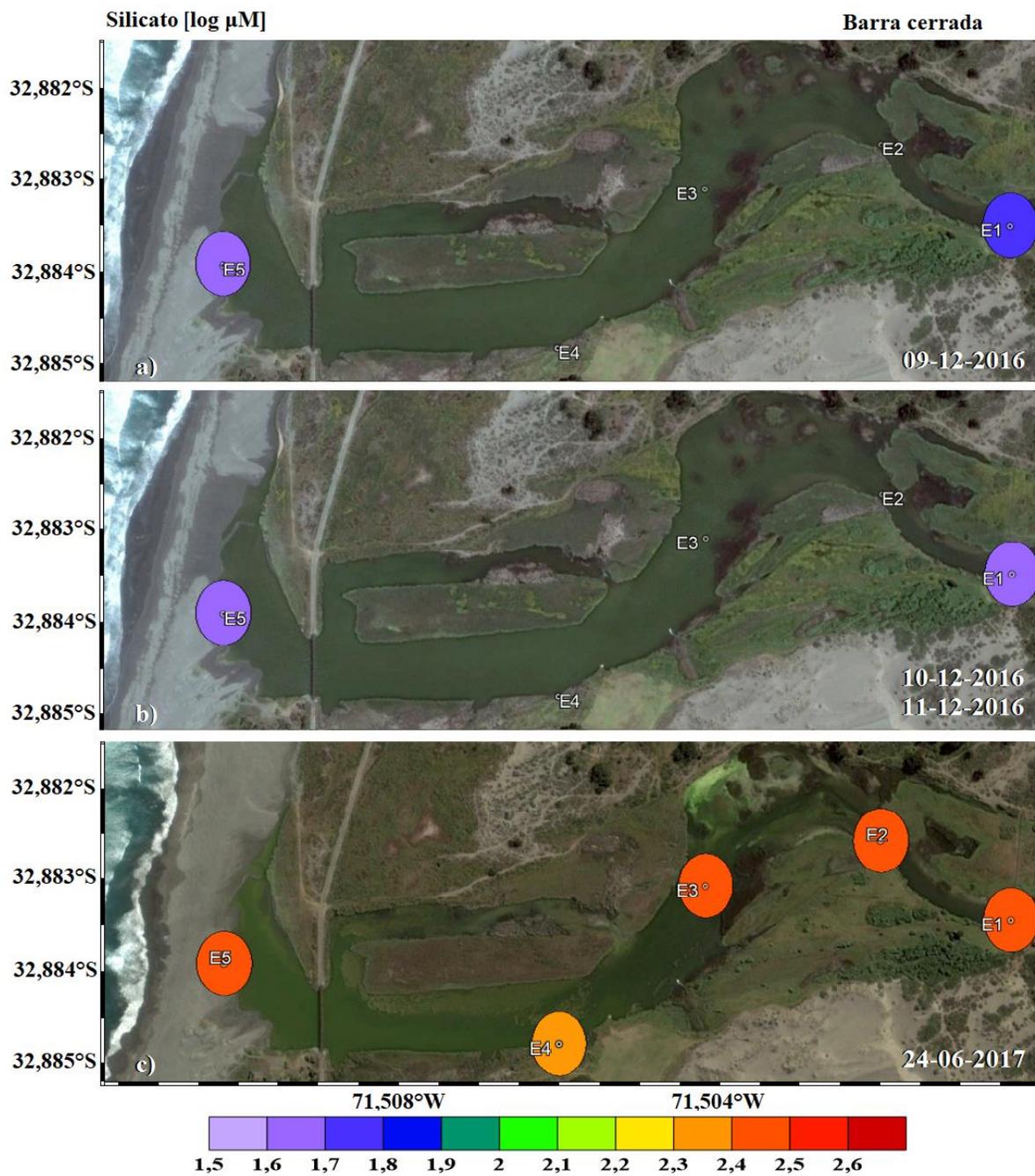


Figura 15. Distribución de SiO_4^{-4} (concentración en log μM) con barra cerrada para: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10 y 11-12-2016) y c) Campaña 2 (24-06-2017).

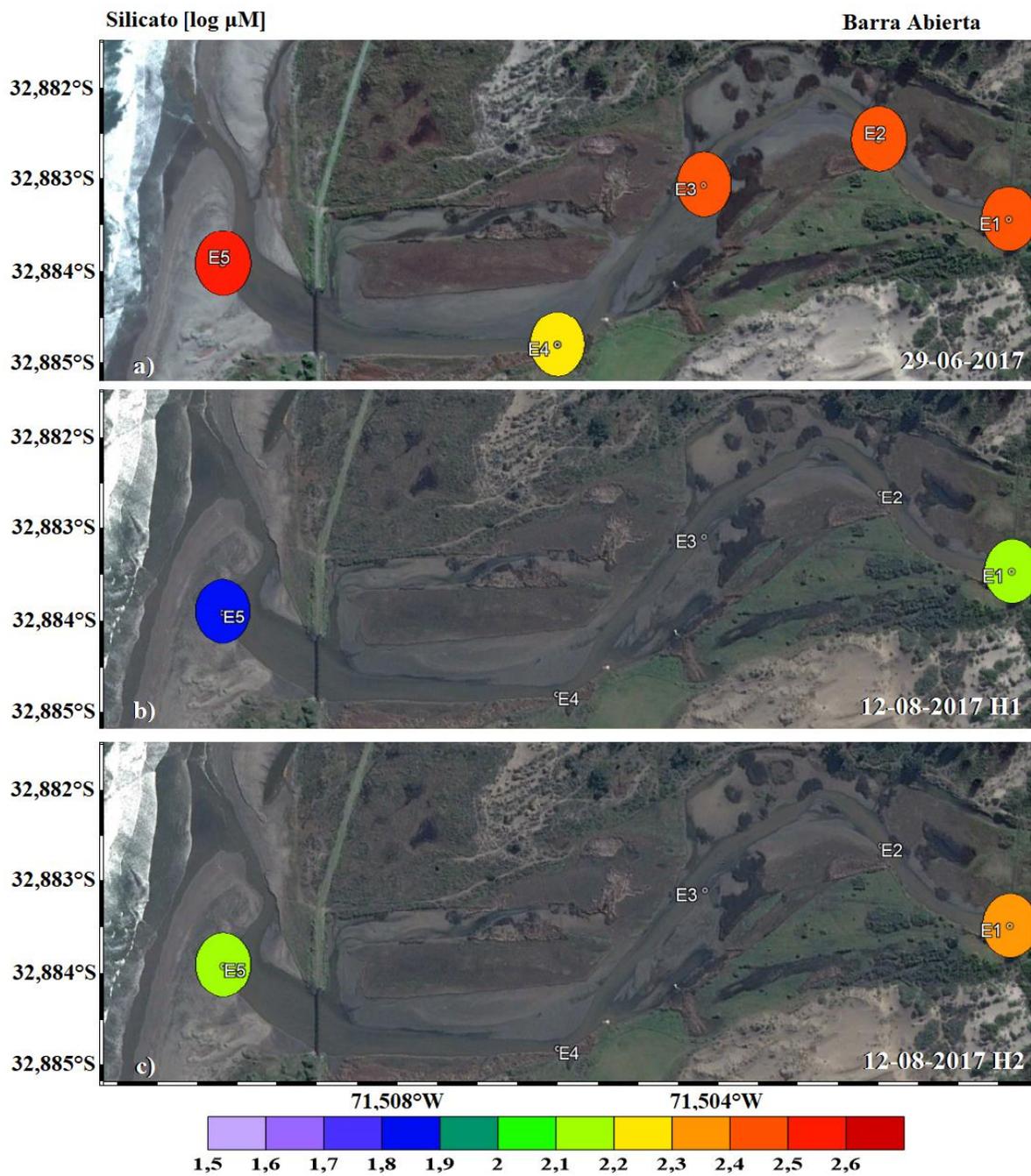


Figura 16. Distribución de SiO_4^{4-} (concentración en $\log \mu\text{M}$) con barra abierta para: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 4 (12-08-2017) H1 y c) Campaña 4 (12-08-2017) H2.

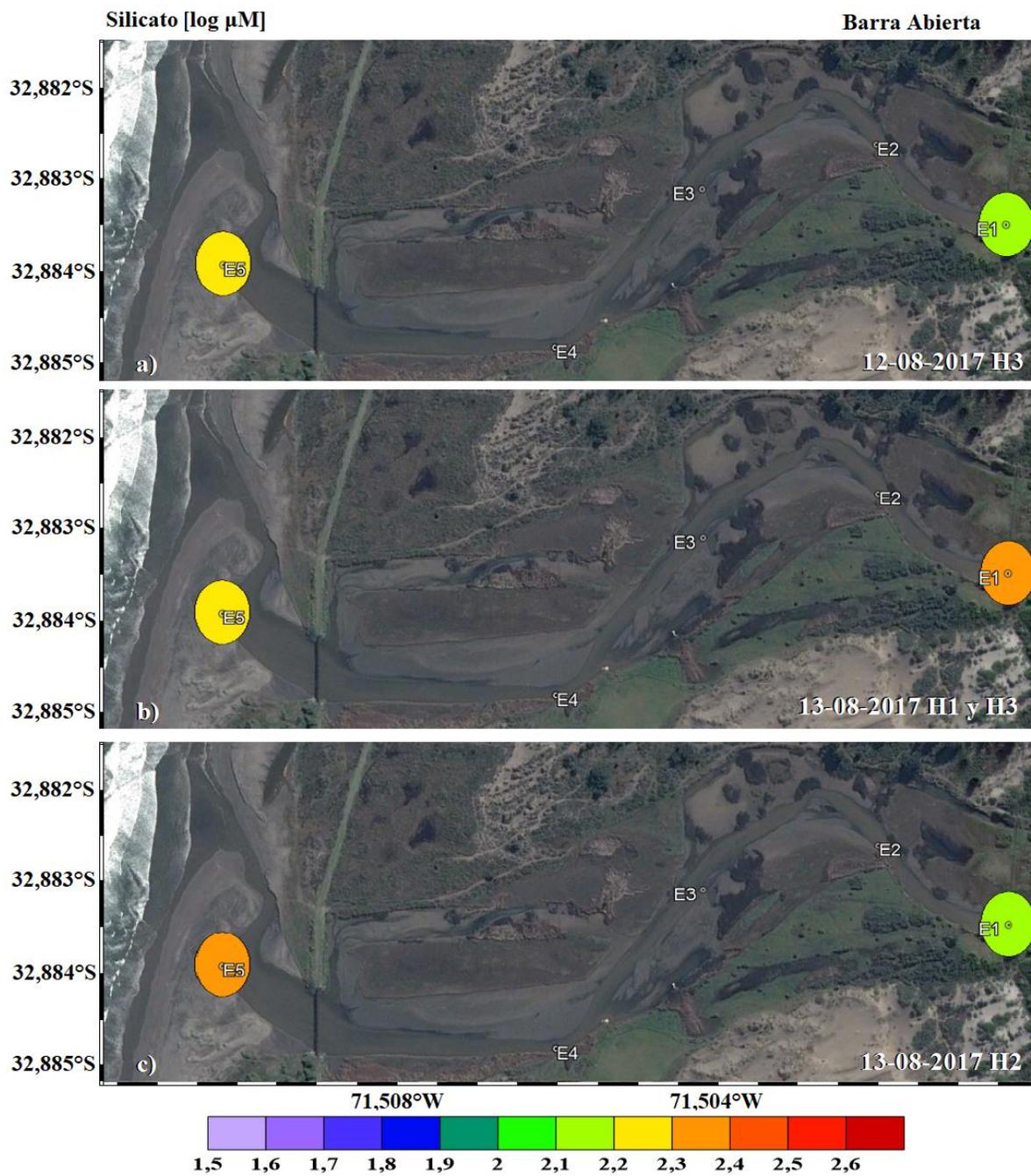


Figura 17. Distribución de SiO_4^{4-} (concentración en $\log \mu\text{M}$) con barra abierta para: a) Campaña 4 (12-08-2017) H3, b) Campaña 5 (13-08-2017) H1 y H3 y c) Campaña 5 (13-08-2017) H2.

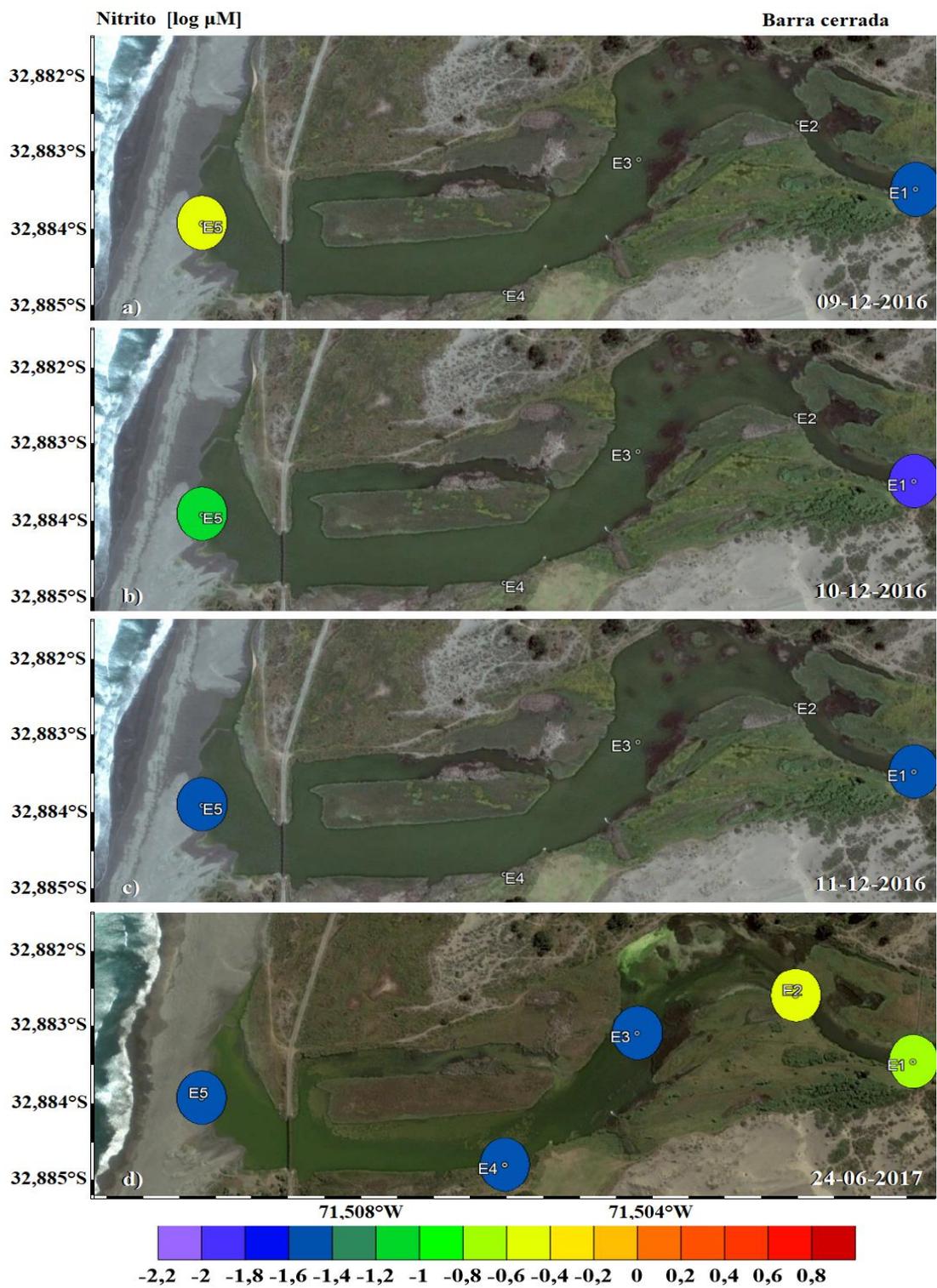


Figura 18. Distribución de NO_2^- (concentración en log μM) con barra cerrada para: a) Campaña 1 (09-12-2016), b) Campaña 1 (10-12-2016), c) Campaña 1 (11-12-2016) y d) Campaña 2 (24-06-2017).



Figura 19. Distribución de NO_2^- (concentración en log μM) con barra abierta para: a) Campaña 3 (29-06-2017), b) Campaña 5 (13-08-2017) y 4 (12-08-2017) H1 y H2 y c) Campaña 4 (12-08-2017) H3.

En general, los mayores registros de temperatura (en verano), conductividad y oxígeno disuelto fueron observados en el periodo de barra cerrada, a su vez, las variables como el NO_2^- , NO_3^- y PO_4^{3-} y temperatura en invierno registraron su máximo en el periodo de barra cerrada. Respecto al SiO_4^{4-} , este presentó mayores concentraciones durante los muestreos en junio, tanto en periodo de barra cerrada, como abierta. Por otro lado, durante el muestreo de junio con barra cerrada el humedal presentó una dinámica diferente a la observada en verano. En este se observó una distribución decreciente hacia la desembocadura de nutrientes (NO_3^- , PO_4^{3-} , SiO_4^{4-} y NO_2^-), mientras que los valores de conductividad y temperatura se mantuvieron homogéneos a lo largo del humedal (Figura 20).

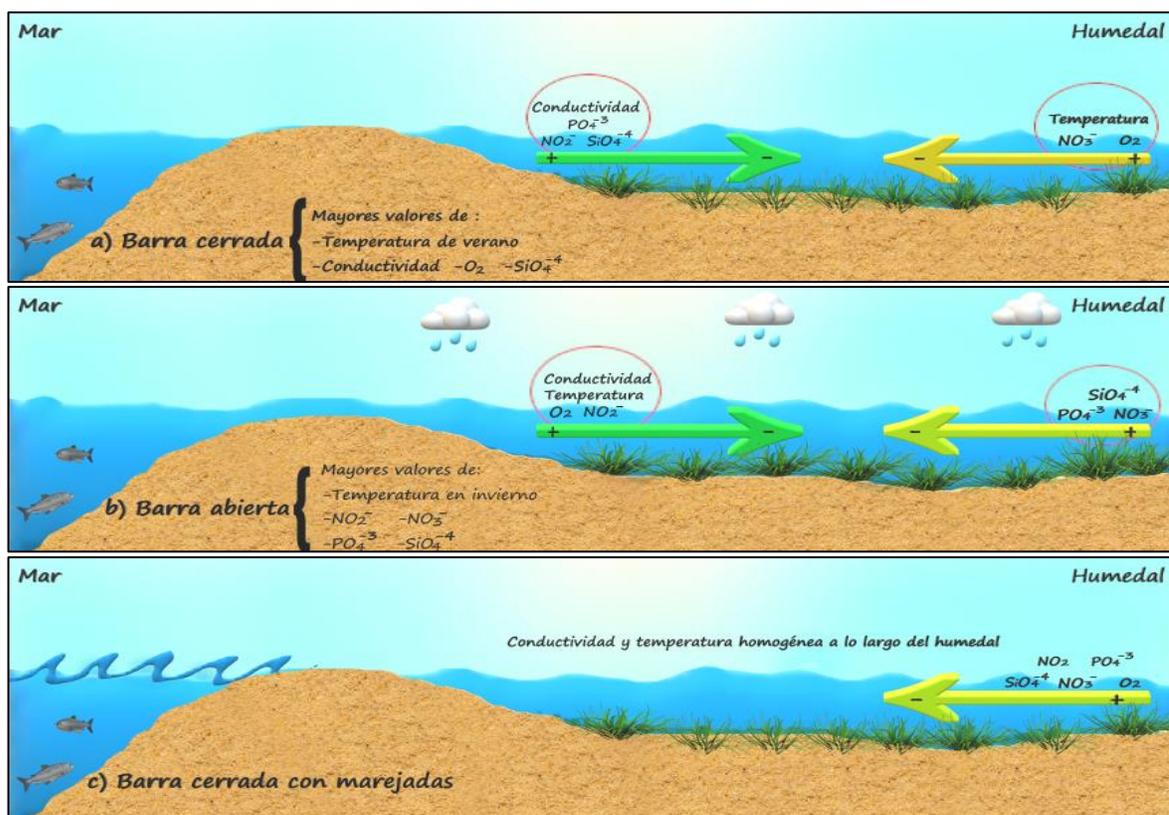


Figura 20. Esquema del comportamiento biogeoquímico del humedal durante: a) barra cerrada, b) barra abierta y c) Barra cerrada con marejadas. La flecha verde indica la distribución de concentraciones descendente en dirección contraria a la desembocadura, mientras que la flecha amarilla indica la distribución de concentraciones descendente hacia la desembocadura.

Análisis estadístico

Invierno de 2017

Las distribuciones de NO_3^- , PO_4^{-3} y NO_2^- presentaron diferencias significativas entre el periodo de barra abierta y el de cerrada de invierno (test de Kruskal-Wallis; Tabla 4). Por el contrario, la distribución de SiO_4^{-4} , no presentó diferencias significativas entre ambos periodos (Kruskal-Wallis=1,55; $p=0,21$).

Tabla 4. Test de Kruskal-Wallis para los nutrientes entre las campañas con transecta de muestreo completa, correspondiente a la campaña 2 (barra abierta) y la campaña 3 (barra cerrada).

Test de Kruskal- Wallis	Variables			
	NO_3^-	PO_4^{-3}	SiO_4^{-4}	NO_2^-
H (χ^2)	29,27	29,27	1,55	29,27
Hc	29,3	29,27	1,55	29,29
p	<0,05	<0,05	0,213	<0,05

Verano 2016 e invierno 2017

Las distribuciones de NO_3^- , PO_4^{-3} , SiO_4^{-4} y NO_2^- presentaron diferencias significativas entre el periodo de barra abierta y cerrada (Tabla 5). Sin embargo, las concentraciones de SiO_4^{-4} presentaron una menor variabilidad entre los muestreos (Kruskal-Wallis=5,78; $p=0,017$).

Tabla 5. Test de Kruskal-Wallis para los nutrientes entre las campañas con barra cerrada y barra abierta.

Test de Kruskal- Wallis	Variables			
	NO_3^-	PO_4^{-3}	SiO_4^{-4}	NO_2^-
H (χ^2)	56,26	56,26	5,78	56,26
Hc	56,27	56,27	5,78	56,28
p	< 0,05	< 0,05	0,017	< 0,05

Análisis de caudal, precipitación y nivel del mar

Caudal y precipitación

El análisis de caudal de la estación Estero Quintero en Valle Alegre (Figura 21) muestra que, durante los muestreos realizados en periodos de barra cerrada, los caudales fueron menores ($0,005 \pm 0,001 \text{ m}^3/\text{s}$).

Luego del aumento de caudal registrado el 26 de agosto con $8,65 \text{ m}^3/\text{s}$, el humedal se encontró conectado al mar para los siguientes muestreos con barra de arena abierta. En estos muestreos se observó un caudal promedio $0,78 \pm 0,40 \text{ m}^3/\text{s}$.

Respecto a las precipitaciones, durante el muestreo de verano estas fueron de 0,00 mm. Sin embargo, se registraron 0,80 mm el día anterior a los muestreos (8 de diciembre del 2016). Por otro lado, en el muestreo con barra cerrada correspondiente al 24 de junio de 2017 se registraron precipitaciones de 1,60 mm las cuales se extendieron por tres días con una sumatoria de 82,20 mm. Para los muestreos con barra abierta no se observaron precipitaciones (0,00 mm). Sin embargo, cabe destacar que entre los días 9 y 11 de agosto (previos al muestreo realizado en agosto), se observó una precipitación acumulada de 71,80 mm (Figura 21).

Caudal y precipitación de Estero Quintero en Valle Alegre

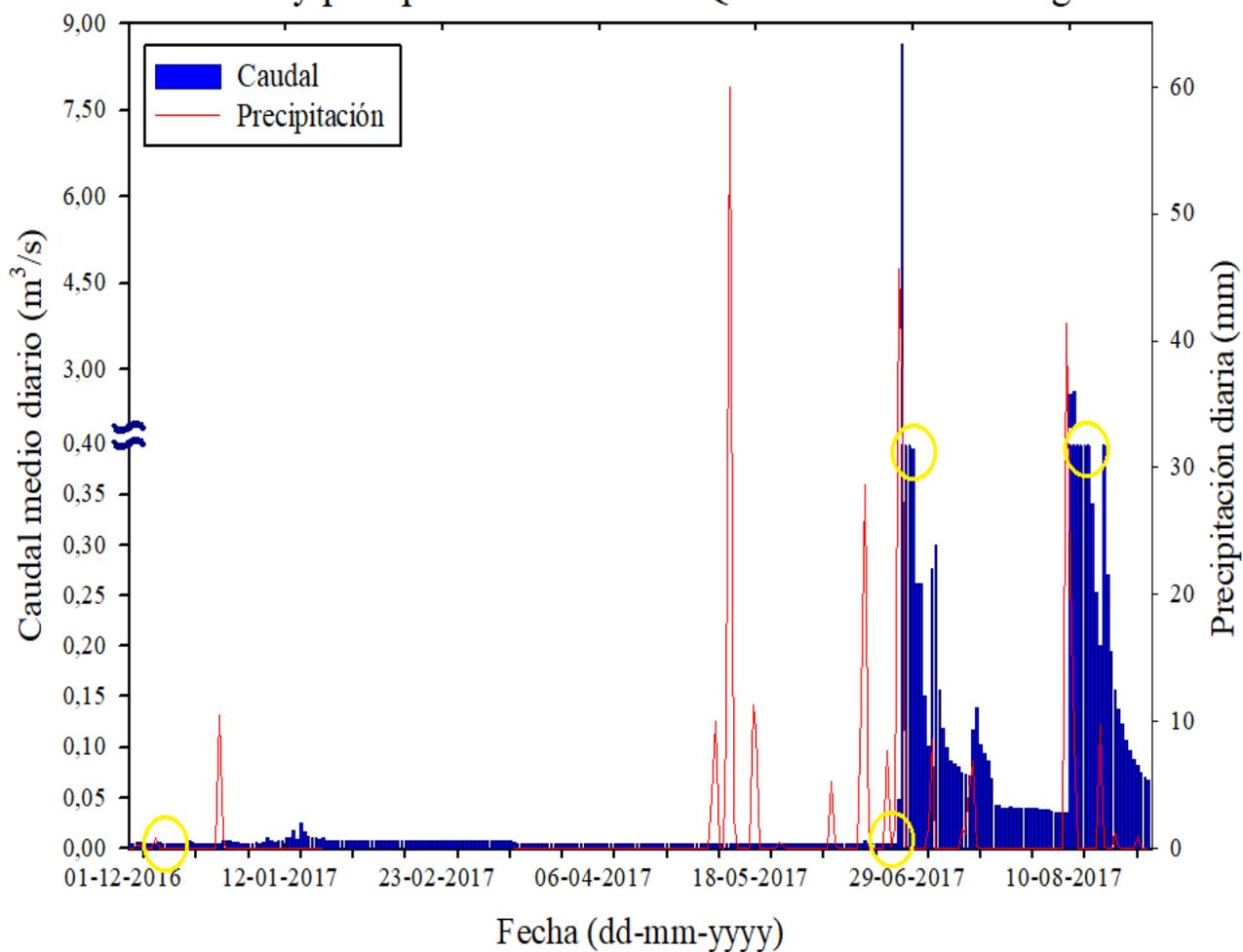


Figura 21. Caudal y precipitación de la estación Estero Quintero en Valle alegre. En azul se observa el caudal (m^3/s), mientras que la precipitación (mm) se observa como línea roja. Los círculos amarillos representan los días muestreados.

Nivel del mar

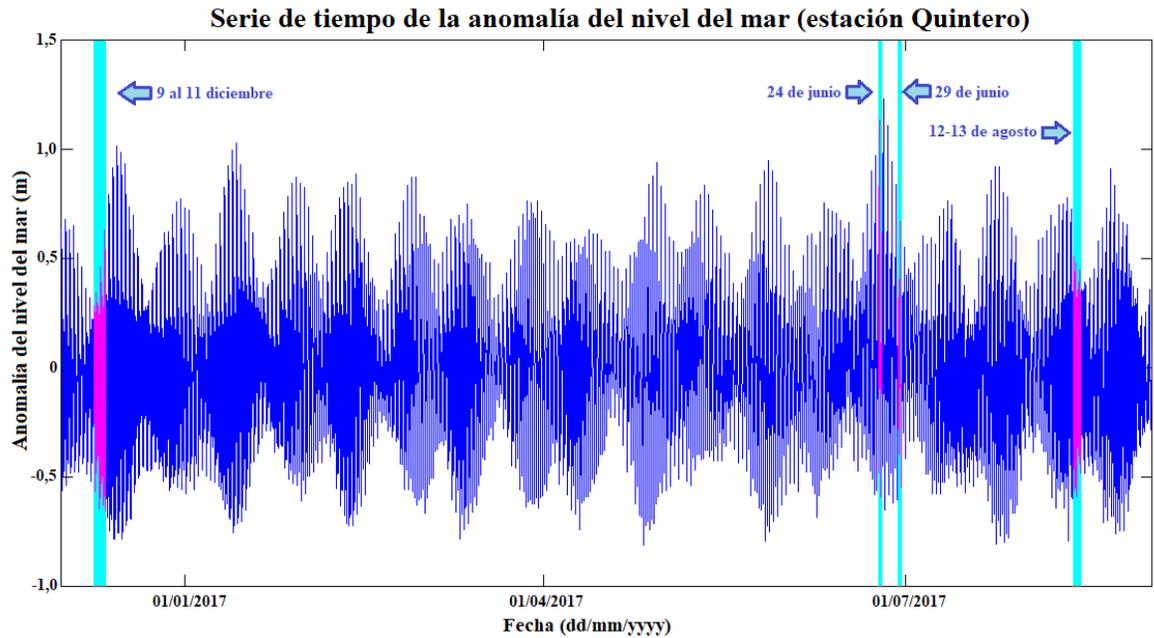


Figura 22. Serie de tiempo de la anomalía del nivel del mar (m) obtenida de la estación mareográfica del SHOA en Quintero. Las secciones destacadas corresponden a los periodos muestreados.

La anomalía del nivel del mar presentó fluctuaciones de 2,02 m de amplitud a lo largo del periodo de estudio. Las mayores amplitudes se observaron entre el 24 y 26 de junio de 2017 con valores de 1,2 m. Por otra parte, en el muestreo de verano de 2016 se observaron máximos de anomalía del nivel del mar de $0,47 \pm 0,15$ m; mientras que en los muestreos realizados en junio del 2017 se observaron mayores amplitudes, de 1,13 m el día 24 y 0,67 m el día 29. En los muestreos realizados en agosto de 2017 se observó una anomalía del nivel del mar menor, con un promedio de $0,48 \pm 0,04$ (Figura 22).

DISCUSIÓN

Los estudios asociados a humedales se han centrado principalmente en la diversidad en aves u otras comunidades biológicas, siendo escasos los trabajos que analizan las características microbiológicas, hidrológicas o funcionales de estos ecosistemas (Vidal-Abarca *et al.*, 2011). Del mismo modo, el humedal Mantagua ha sido principalmente estudiado por su flora y fauna (Simeone *et al.*, 2008; Henríquez, 2013; Barraza & Ponce, 2014), existiendo solo unas pocas investigaciones sobre su hidrología y biogeoquímica.

El periodo de barra abierta se caracterizó por presentar mayores concentraciones de nutrientes en el humedal, respecto al periodo de barra cerrada. Este aumento se debería al incremento de las precipitaciones y por consiguiente un aumento del caudal, resultando en un mayor aporte de nutrientes y sales minerales al humedal producto de la escorrentía. Cuando estos nutrientes y sales minerales llegan a la desembocadura comienzan un proceso intensivo de intercambio con las aguas del océano (Lobo *et al.*, 1989), sin embargo, este intercambio puede ser menos intensivo ante bajos caudales, generándose una mezcla impulsada por la acción del viento o inclusive por diferencia de densidades.

Estos resultados guardan relación con lo observado por De la Lanza & Rodríguez (1993) en la laguna Huizache-Caimanero y Hernández & De la Lanza (2001) en el humedal Barra de Tecoaapa, ambos de México. Estos autores señalan que durante los periodos de aporte fluvial se observan concentraciones significativamente mayores de nutrientes, además de un transporte de grandes cantidades de sedimento (materia orgánica e inorgánica) hacia el humedal. Esto contrasta con el estudio de Contreras *et al.* (2005) en la laguna La Mancha, México, donde en periodos de barra abierta se presentaron bajas concentraciones de NO_3^- y altas concentraciones de oxígeno disuelto y PO_4^{-3} , respecto al periodo con barra cerrada. No obstante, en el estudio no se clarifica si los periodos de conexión al mar están dados por un aumento fluvial o por acción de las mareas, por lo que la dinámica de este humedal podría presentar forzantes que sean diferentes a las que se presentan en el humedal de Mantagua, de modo que no es posible comparar la variabilidad biogeoquímica de ambos humedales.

En verano, la mayor intensidad de radiación solar y estrés del viento, favorecen la evaporación de las aguas del humedal. Esto hace que exista una mayor concentración de sales disueltas en el agua. Por otro lado, cuando hay episodios de lluvia, el aporte de agua dulce al humedal produce una respuesta biogeoquímica diferente a lo anteriormente descrito. Este aumento de agua dulce disminuye la concentración de iones por disolución (Dussailant, 2017). Este comportamiento es evidenciado en los perfiles de conductividad de verano e invierno con barra cerrada. En este periodo de barra, se registraron mayores concentraciones de oxígeno disuelto y SiO_4^{-4} , junto con altas temperaturas registradas durante el muestreo de verano. La presencia de mayores concentraciones de oxígeno durante este periodo está asociada a la baja disponibilidad de nutrientes, por lo que los procesos consumidores de oxígeno, como la descomposición y disolución de materia orgánica, disminuyen (Libes, 1992).

La dinámica del humedal durante este periodo concuerda con lo reportado para la laguna Huizache-Caimanero (De la Lanza & Rodríguez, 1993) y el humedal Barra de Tecoaapa (Hernández & De la Lanza, 2001) de México, donde también existe una disminución de las concentraciones de nutrientes asociada a periodos de bajo aporte fluvial. Respecto al aumento de oxígeno disuelto observado en este periodo, Leighton *et al.* (1987) señalaron que las mayores concentraciones de oxígeno en las aguas del humedal Mantagua se observaron durante los muestreos realizados durante el periodo de bajo caudal (noviembre, 1982 y enero, 1983) de acuerdo a la descripción de Vila (1980), cuyo periodo se extiende desde septiembre hasta marzo. En la actualidad este régimen presenta una variabilidad asociada al fenómeno del Niño (ENSO) (Lauro *et al.*, 2015; Araya & Isla, 2016).

Un trazador importante en el humedal fue el SiO_4^{-4} , el cual presentó una variabilidad significativa a lo largo del estudio, no obstante, durante los muestreos de junio con barra abierta y cerrada, se registraron mayores concentraciones de SiO_4^{-4} sin variabilidad significativa entre ambos muestreos. Esto se puede asociar al periodo de descomposición anual de los macrófitos (otoño e invierno), durante el cual se genera un gran sumidero de sílice biogénica en el sistema (Schoelynck *et al.*, 2010). A su vez,

Schoelynck *et al.* (2010) señala que este efecto resultante del ciclo de descomposición de macrófitos, podría ser un ciclo estacional similar al observado para la captación de sílice en primavera y verano por parte de las diatomeas. De modo que ambos ciclos estacionales explicarían la menor variabilidad de SiO_4^{-4} (respecto a los otros nutrientes) a lo largo del estudio, reflejado en el análisis estadístico de verano de 2016 e invierno de 2017 (Tabla 5). Por otro lado, el transporte posterior de sílice a la desembocadura, depende de la velocidad de disolución de sílice biogénica proveniente de la descomposición de las macrófitas (Schoelynck *et al.*, 2010). Respecto a esto, el estudio realizado por Struyf *et al.* (2007) en marismas de marea señala una rápida disolución de sílice biogénica, de más del 50% disuelto en 14 días. Esta rápida disolución de sílice podría explicar las menores concentraciones de SiO_4^{-4} observadas en los muestreos de agosto de 2017.

De los compuestos nitrogenados estudiados, el NO_2^- presentó una baja concentración en el humedal. Esto concuerda con los estudios de Kadlec & Knight (1996) quienes encontraron que el NO_2^- no es químicamente estable en la mayoría de los humedales, por lo que generalmente se encuentra en bajas concentraciones. Estos autores también sugieren que los niveles detectables de NO_2^- en humedales frecuentemente indican asimilación incompleta de nitrógeno o la presencia de una fuente de ingreso de origen antropogénico (Medina *et al.*, 2003). Del mismo modo, las mayores concentraciones de NO_2^- observadas en el periodo de barra abierta, pueden deberse a una asimilación incompleta de nitrógeno producto del muestreo en presencia de aguas con alto caudal ($0,78 \pm 0,40 \text{ m}^3/\text{s}$) respecto al observado en periodo de barra cerrada que, dado a su flujo, dificulta la realización de los ciclos del nitrógeno en comparación a un sistema relativamente pacífico, como el que se observa durante el periodo de barra cerrada.

Por otro lado, la distribución espacial durante el periodo de barra abierta registró mayores concentraciones de O_2 , NO_2^- , mayores valores de conductividad y temperatura en la desembocadura y menores de SiO_4^{-4} , PO_4^{-3} y NO_3^- . Esta distribución espacial también fue observada por Medina *et al.* (2003), para el caso del O_2 , PO_4^{-3} y NO_2^- .

La distribución espacial general en barra cerrada registró mayores valores de conductividad, SiO_4^{-4} , PO_4^{-3} y NO_2^- en la desembocadura del humedal y menores de NO_3^- y O_2 . Una situación diferente se observó cuando con barra cerrada se presentaron marejadas, donde se presentó un cambio en la distribución espacial de los nutrientes SiO_4^{-4} , PO_4^{-3} y NO_2^- , disminuyendo sus concentraciones hacia la desembocadura. La disminución de los nutrientes ante aumentos del nivel del mar es evidenciado en el estudio de Ande & Xisan (1989), donde concluye que existe una disminución de los nutrientes en pleamar y bajamar en un estuario, sin embargo, estos regímenes de marea resultan en un intercambio menor de nutrientes estuario-océano, a excepción de eventos anormales (tormentas).

Los resultados muestran que la dinámica biogeoquímica de las aguas del humedal Mantagua es principalmente determinada por la esorrentía y no por la apertura de la barra de arena que separa el humedal del mar. Esto se debe a que la dinámica de apertura o mantención de la barra está dada por el aumento de caudal del humedal y no por acción del oleaje o las mareas. Así, la hipótesis de trabajo se acepta dado que aunque la apertura de barra es un subproducto de la esorrentía, en esta se observa el aumento de nutrientes y una disminución ante periodos de barra cerrada.

En la actualidad, hay una escasa literatura asociada a la comparación de estas dinámicas del humedal de Mantagua, de modo que existe la necesidad de un análisis más detallado del tema, principalmente de la variación temporal de la composición física y química, con el objeto de describir y caracterizar la dinámica del humedal tanto para un ciclo anual, como para realizar una comparación cuantitativa y cualitativa entre periodos de barra abierta y cerrada, de modo que se logre una mejor comprensión de cómo funciona este humedal. Para lograr este objetivo, sería recomendable la utilización de drones para capturar el estado del humedal durante la realización del muestreo (estimar volumen de agua), en conjunto con la realización de un perfil de playa para dimensionar la barra de arena característica de los humedales costeros. Además, incluir muestreos durante periodos de barra cerrada sin la influencia de precipitaciones previas recientes.

CONCLUSIONES

A partir de los hallazgos encontrados, se acepta la hipótesis planteada que establece que existe una relación entre el aumento de nutrientes (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y SiO_4^{4-}) y la apertura de barra de arena en el humedal producto de la escorrentía, ocurriendo lo contrario durante periodos de barra cerrada.

Los resultados obtenidos en este estudio sobre las distintas variables biogeoquímicas del agua del humedal, revelan una variabilidad significativa temporal de tipo estacional y espacial en el ecosistema. Por otro lado, pese a que los máximos tanto del nivel del mar como el de caudal y precipitación se registraron en el periodo de invierno, se concluye que para este sistema la dinámica de apertura del humedal está dada por el aumento del caudal (escorrentía) y no por la acción de las fluctuaciones del mar. Sin embargo, el aumento de estas fluctuaciones tiene incidencia en la distribución y composición del humedal.

Finalmente, se recomiendan realizar más estudios con análisis más detallados (cuantitativos y cualitativos) sobre la dinámica del ecosistema, con el fin de generar una base de conocimiento que permita realizar un buen perfil del humedal.

REFERENCIAS

- * Ande, F. & J. Xisan. 1989. Tidal effect on nutrient Exchange in Xiansgshan Bay, China. *Marine Chemistry*, 27(1): 259-281.
- * Araya M. & F. Isla. 2016. Variabilidad hidrológica en la región del Biobío: los eventos El Niño en zonas templadas de Chile. *Revista Universitaria de Geografía*, 25(1): 31-55.
- * Barraza, D. & P. Ponce. 2014. Caracterización ecológica del humedal de Mantagua, región de Valparaíso, como base para su protección y conservación. Tesis de Ingeniero ambiental. Instituto de ciencias ambientales, Universidad de Valparaíso, 177 pp.
- * Bergkamp, G. & B. Orlando. 1999. Los humedales y el cambio climático Examen de la colaboración entre la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán 1971) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 35 pp.
- * Carrasco P., R. A. Moreno, A. Figueroa, C. Espoz & C. de la Maza. 2015. Sitios Ramsar de Chile. Seremi del Medio Ambiente Región Metropolitana de Santiago, Universidad Santo Tomás, Universidad de Chile y CONAF, 56 pp.
- * Contreras, F., N. Rivera & R. Segura. 2005. Nutrientes y productividad primaria fitoplanctónica en una laguna costera tropical intermitente (La Mancha, Ver.) del Golfo de México. *Hidrobiológica*, 15(3): 299-310.
- * Crooks, S., D. Herr, J. Tamelander, D. Laffoley & J. Vandever. 2011. Mitigating Climate Change through Restoration and Management of Coastal Wetlands and Near-shore Marine Ecosystems: Challenges and Opportunities. *Environ. Dep. Pap* 121:1.
- * De la Lanza, G. & M. Rodríguez. 1993. Nutrient Exchange between subtropical lagoon and the marine environment. *Estuaries*, 16(2): 273-279.
- * Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH). 2016. Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Valparaíso Ministerio de obras públicas, dirección general de aguas S.D.T. N° 382.
- * Dussailant, A., P. Galdames & C. Sun. 2009. Water level fluctuations in a coastal lagoon: El Yali Ramsar wetland, Chile. *Desalination*, 246: 202–214.
- * Dussailant, A. 2017. Hydrology of the Central Chile Coastal Wetlands: The Case of the Yali Reserve. *The Ecology and Natural History of Chilean Saltmarshes*, pp. 195–219.

- * Figueroa, R., M. Suárez, A. Andreu, V. Ruiz & M. Vidal-Abarca. 2009. Caracterización ecológica de humedales de la zona semiárida en Chile Central. *Gayana*, 73: 76-94.
- * Hammer O., D.A. Harper & P.D. Ryan. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.*, 4: 1–9.
- * Henríquez, J. M. 2013. Zonificación ambiental basada en la fauna vertebrada del humedal de Mantagua. Tesis de Ingeniería en medio ambiente y recursos naturales. Escuela de ingeniería, Universidad Viña del Mar, 135 pp.
- * Hernández C. & G. de la Lanza. 2001. Balance hidrológico y de nutrientes en un humedal costero del Pacífico Sur de México. *Hidrobiológica*, 11(2): 133-140.
- * Holmes, R., A. Aminot, R. Kérouel, B. Hooker & B. Peterson. 1999. A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. *Can J Fish Aquat. Sci.*, 56: 1801–1808.
- * Kadlec, R. & R. Knight. 1996. *Treatment Wetlands*. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, 893 pp.
- * Lauro, C. A. Vich & S. Moreiras. 2015. Variabilidad del régimen fluvial en cuencas de la región de Cuyo. *Geoacta*, 40(2): 28-51.
- * Leighton, G., E. Lobo & R. Ugarte. 1987. Estructuras ambientales en los sistemas de desembocadura de ríos y esteros de la zona central de Chile (V región). *Rev. Biol. Mar. Oceanog.*, 23(2): 139-157.
- * Libes, S. 1992. *An introduction to marine biogeochemistry*. J. Wiley and Sons, Inc. New York, 774 pp.
- * Lobo, E., G. Leighton & R. Ugarte. 1989. Variación espacio-temporal de características químicas y físicas en aguas del sistema de desembocadura del estero de Mantagua, Chile. *Rev. Biol. Mar.*, 24(2): 161-174.
- * Marcovecchio, J., H. Freije, S. De Marco, A. Gavio, L. Ferrer, S. Andrade, O. Beltrame & R. Asteasuain. 2006. Seasonality of hydrographic variables in a coastal lagoon: Mar Chiquita, Argentina. *Aquat Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.*, 16(4): 335-347.
- * Medina, H., A. Chacón & B. Rendón. 2003. Dinámica de nutrientes en el humedal lacustre del Lago de Pátzcuaro, Michoacán. Instituto de Investigaciones sobre los

Recursos Naturales, 10 pp.

- * Ministerio del Medio Ambiente. 2015. Informe final. Diagnóstico de sitios de alto valor para la conservación en la región de Valparaíso. Portafolio del sitio humedal de Mantagua volumen 1: líneas base, Valparaíso, 225 pp.
- * Mitsch, W. & J. Gosselink. 1986. Wetlands. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 539 pp.
- * Mitsch, W. & J. Gosselink. 2015. Wetlands. Fifth edition. John Wiley and Sons, Inc. New Jersey, 747 pp.
- * Moya, B., A. Hernández & H. Elizalde. 2005. Los humedales ante el cambio climático. Investigaciones Geográficas, 37: 127-132 pp.
- * Parra, O., C. Valdovinos, R. Urrutia, M. Cisternas, E. Habit & M. Mardones. 2003. Caracterización y tendencias tróficas de cinco lagos costeros de Chile Central. Limnetica, 22(1): 51-83.
- * Schoelynck, J., K. Bal, H. Backx, T. Okruszko, P. Meire & E. Struyf. 2010. Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: a strategic choice between silica, lignin and cellulose?. New Phytologist, 2(186).
- * Simeone, A., E. Oviedo, M. Bernal & M. Flores. 2008. Las aves del humedal Mantagua: Riqueza de especies, amenaza y necesidades de conservación. Boletín Chileno de Ornitología, 14(1): 22-35.
- * Strickland, J. & T. Parsons. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. J Fish Res Board Can. Bulletin 167 (Second Edition), 310 pp.
- * Struyf, E., S. Van Damme, B. Gribsholt, K. Bal, O. Beauchard, J. Middelburg & P. Meire. 2007. *Phragmites australis* and Si cycling in tidal wetlands. Aquatic Botany 87: 134–140.
- * Vidal-Abarca, M.R., M.L. Suárez, R. Figueroa, M. Enríquez, V. García, C. Domínguez & M.I. Arce. 2011. Caracterización hidroquímica del complejo de humedales El Yali, Chile Central. Limnetica, 30(1): 43-58.
- * Vila, I. 1980. Actual state of development of limnological studies of reservoirs and lakes of central Chile, especially on diagnosis and evaluation of the biological potential of

lakes and reservoirs of central Chile (MAB 5, Chile). Proceedings of the First Workshop for the Promotion of Limnology in Developing Countries, pp. 127-130.