



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD XOCHIMILCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO EL HOMBRE Y SU AMBIENTE
LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

INFORME FINAL DE SERVICIO SOCIAL
POR INVESTIGACIÓN

**Variación espacio temporal de la biomasa fitoplanctónica
en la Laguna de Sontecomapan, Veracruz y su relación
con los factores fisicoquímicos del sistema**

QUE PRESENTA LA ALUMNA

Pamela Cortes Ballesteros

Matrícula 2132037731

ASESOR INTERNO

M. en C. Arturo Aguirre-León

No. Eco. 18686

Ciudad de México., noviembre de 2019

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
ANTECEDENTES	3
OBJETIVOS	4
Objetivo general.....	4
Objetivos particulares.....	4
ÁREA DE ESTUDIO	5
METODOLOGÍA.....	6
Actividades de campo.....	6
Actividades de laboratorio	7
Índice del estado trófico (TRIX).....	7
Análisis estadístico	9
RESULTADOS.....	10
Variación espacial por mes de los parámetros fisicoquímicos.....	10
Variación espacio temporal anualizada de los parámetros fisicoquímicos	23
Variación espacial por mes de la concentración de nutrientes y clorofila <i>a</i>	28
Variación espacio temporal anualizada de la concentración de nutrientes y clorofila <i>a</i>	41
Caracterización espacio temporal de las variables fisicoquímicas y clorofila <i>a</i>	46
Relación espacio temporal de la biomasa fitoplanctónica con los factores fisicoquímicos y nutrientes	49
Estado trófico	52
DISCUSIÓN.....	54
Variación espacio temporal de los parámetros fisicoquímicos.....	54
Variación espacio temporal de la concentración de nutrientes y clorofila <i>a</i>	54
Caracterización espacio temporal de las variables fisicoquímicas y clorofila <i>a</i>	58
Relación espacio temporal de la biomasa fitoplanctónica con los factores ambientales	59
Estado trófico	62
CONCLUSIONES.....	63
REFERENCIAS	64
ANEXOS	70

RESUMEN

Este estudio analizó los cambios espaciales y temporales de la biomasa fitoplanctónica en la Laguna de Sontecomapan y su relación con los parámetros fisicoquímicos. Fueron definidas 10 estaciones de muestreo para registro de estos parámetros, extracción de muestras de agua para determinar concentración de nutrientes y clorofila a en dos niveles de la columna de agua durante 6 meses entre octubre 2014 y febrero 2018. La concentración de nutrientes y clorofila a fueron cuantificadas por espectrofotometría. Se utilizó análisis de varianza para encontrar diferencias significativas de los factores fisicoquímicos, nutrientes y clorofila a en escala espacio temporal entre sitios de muestreo, niveles de la columna de agua y meses de estudio. El comportamiento espacio temporal de factores fisicoquímicos fluctuó conforme a los meses de muestreo, la salinidad presentó las mayores concentraciones en los meses de febrero y las más bajas en los meses de octubre siendo la salinidad promedio de 21.62, apreciándose una cuña de sal bien diferenciada y permanente. El oxígeno disuelto promedio fue de 7.24 mg/L para febrero y 0.22 mg/L para octubre. La profundidad promedio fue de 2.54 y 1.90 m respectivamente. A diferencia de estos parámetros, la temperatura muestra un patrón inverso, con mayores valores en los meses de octubre, con un promedio de 31.23 °C y menor en los meses de febrero, con un promedio de 24 °C. El comportamiento espacio temporal de la concentración de nutrientes fue homogéneo, no obstante, se aprecia una variación en la concentración de amonio, la máxima de 7.09 mg/L NH₃ y la mínima de 0.10 mg/L NH₃ ambos para los meses de febrero. A diferencia del amonio, los ortofosfatos sí definen un patrón, con mayor concentración en los meses de febrero (2.26 mg/L PO₄³⁻) y menor en los meses de octubre (0.300 mg/L PO₄³⁻). Las concentraciones más altas de clorofila a se presentaron en los meses de febrero, con un promedio de 13.95 mg·m⁻³ y la más baja durante los meses de octubre con un promedio de 1.87 mg·m⁻³. Se observó también un patrón local con los valores más altos hacia la boca marina. Los principales factores que determinaron las variaciones espacio temporales de la biomasa fitoplanctónica fueron la salinidad, temperatura, pH, profundidad y transparencia; así como los nutrientes nitrogenados inorgánicos y los fosfatos inorgánicos. Se determinó el estado trófico del sistema mediante el índice TRIX el cual correspondió a un estado oligotrófico.

Palabras clave: Producción primaria, biomasa fitoplanctónica, clorofila a, estado trófico, Laguna Sontecomapan, Veracruz.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas costeros se consideran los ecosistemas más productivos de los litorales, cubren el 13% de la zona costera mundial y contribuyen a mantener una buena calidad del agua debido a los procesos biogeoquímicos que se llevan a cabo en ellos (Ponce, 2016; Gutiérrez *et al.*, 2006). Sin embargo, por ser ecosistemas en donde se llevan a cabo gran parte de las actividades económicas, estos han sido alterados por la introducción de compuestos nitrogenados y fosfatados, los cuales incrementan el desarrollo de los procesos de eutrofización (Herrera *et al.*, 2011). Por lo anterior, la relevancia de estudiar el fitoplancton radica en que representa el nivel primario y de este depende el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, ya que proveen la energía que se incorpora a los niveles de producción secundaria del sistema, además de que es un indicador del estado trófico del ecosistema (Muciño *et al.*, 2017).

El estudio de las poblaciones fitoplanctónicas en las zonas costeras aporta una valiosa información de las condiciones ambientales, ya que reflejan las características fisicoquímicas y las condiciones de su producción la cual contribuye al mantenimiento de los siguientes niveles tróficos del ecosistema (Varela *et al.*, 2003). Por ello, en las lagunas costeras es indispensable realizar estudios de la hidrología, así como de la concentración de los nutrientes y de la clorofila *a* en escala espacio temporal para conocer la dinámica de los ambientes acuáticos y el estado del ecosistema (Lara *et al.*, 2015).

Los ecosistemas lagunares y estuarinos del Golfo de México poseen características propias con una compleja estructura ecológica, debido a su gran variedad de hábitats, su alta diversidad biológica e importante productividad primaria (Ramos, 2014). Particularmente en la costa de Veracruz, los cuerpos lagunares cubren un área de 1166 km² (7.4% del total nacional). Entre las lagunas más estudiadas se encuentran de norte a sur, Pueblo Viejo, Tamiahua, Tampamachoco, El Llano, La Mancha, Mandinga, Alvarado, Sontecomapan y el Ostión (Lara *et al.*, 2011). La Laguna de Sontecomapan ubicada al sur del Estado, se encuentra dentro de la cordillera de los Tuxtlas y es parte de la Reserva de la Biosfera del mismo nombre, lo cual le confiere gran importancia ecológica. Así mismo fue proclamada sitio Ramsar (No. 1342) FIR (2004), por el grado de conservación de sus manglares, sin embargo, la información ecológica que se conoce sobre la variación de la biomasa del fitoplancton en el sistema lagunar es actualmente escaso, ya que existen pocos estudios previos, sin embargo, debe seguir avanzándose en su conocimiento y comportamiento espacio temporal en el sistema.

ANTECEDENTES

Desde finales de la década de los setentas, en México se han realizado diversos trabajos sobre fitoplancton en lagunas costeras de Veracruz, sin embargo, son pocos los que abordan su variabilidad y su relación con los factores ambientales. Algunos estudios sobre el fitoplancton en el litoral norte-sur del estado de Veracruz son los siguientes.

Margalef (1975) analizó el fitoplancton invernal en la Laguna de Alvarado, el cual presentó características marinas, excepto en la región del Río Papaloapan, con densidades de 1200 a 4000 cél ml⁻¹, concentración de clorofila a de 2 a 7 mg m⁻³ y una producción primaria de 6 a 34 mg C m⁻³ h⁻¹.

Cantú (1984) estudió las variaciones mensuales de clorofilas a, b y c, carotenoides y composición cualitativa y cuantitativa del fitoplancton, así como su relación con los factores abióticos en el sistema lagunar de Pueblo Viejo. Las mayores concentraciones de pigmentos ocurrieron en los meses de octubre y noviembre (2.92 y 2.98 mg m⁻³ de clorofila a; 3.85 y 3.15 mg m⁻³ de clorofila b, 11.07 y 15.00 mg m⁻³ de clorofila c; 2.43 y 2.95 mg m⁻³ de carotenoides), las cuales se relacionaron con el patrón temporal de la temperatura del agua y la profundidad. Calificó a esta laguna como un cuerpo de agua con baja producción fitoplanctónica en comparación con otros sistemas costeros del Golfo de México.

Méndez (1991) analizó la composición cualitativa y cuantitativa del fitoplancton en la Laguna del Llano durante el periodo verano-otoño de 1986. Los resultados mostraron una dominancia de las diatomeas (71%), clorofitas (20%), cianobacterias (77%) y xantofitas (2%). Se apreció una estrecha relación entre los grupos dominantes y los cambios de los factores ambientales.

Bulit *et al.* (1994) realizaron un estudio en la Laguna de Tampamachoco sobre la variabilidad espacial y temporal de los pigmentos y el proceso que inicia la vía productiva del sistema, registrando que existe heterogeneidad tanto espacial como temporal en la distribución de la clorofila a total y nanofitoplanctónica.

Contreras *et al.* (2005) analizaron la producción primaria y su relación con los nutrientes en la Laguna de la Mancha, encontrando que, cuando la barra se encuentra abierta al mar disminuyen los nutrientes y la producción primaria, en cambio con la barra cerrada, tanto los nutrientes como la producción primaria aumentan.

Actualmente no se cuenta con suficiente información sobre el comportamiento del fitoplancton en la Laguna de Sontecomapan, no obstante, existen antecedentes. Suchil (1990) analizó su variación espacio temporal y su relación con los parámetros físicos y químicos en las lagunas de Sontecomapan y del Ostión en 1985 en los meses de secas y

lluvias. Encontró una estabilidad favorable de los sistemas para el florecimiento fitoplanctónico principalmente de diatomeas y dinoflagelados en secas, comparativamente con la de lluvias donde predominaron las cianofitas y clorofitas.

Guerra y Lara (1996) estudiaron un florecimiento de *Ceratium furca* y las diferencias fisicoquímicas de los ambientes en que crecen, encontrando un florecimiento de 700 a 3000 células l⁻¹, que ocurrió por el incremento en la relación N: P, así como por el cambio de salinidad y temperatura del agua. El decaimiento de la población estuvo asociado con el incremento en la proporción de agua dulce que entra al sistema.

Aké y Vázquez (2008) analizaron la variación de la composición fitoplanctónica y su relación con los nutrientes y la materia orgánica alóctona proveniente de los mangles, que contiene una alta concentración de compuestos inorgánicos principalmente de amonio y ortofosfatos. Las variaciones de los nutrientes dependieron principalmente de los procesos biogeoquímicos de la laguna, lo que favoreció la abundancia de diatomeas (*Skeletonema sp.* y *Cyclotella sp.*) y de dinoflagelados (*Peridinium sp.* y *Prorocentrum sp.*). Observaron también, que las altas densidades y la ocurrencia de especies se debe a la influencia de la materia orgánica vegetal que puede contribuir a la dinámica del fitoplancton dentro de la laguna.

Muciño *et al.* (2011) estudiaron la distribución y abundancia de las especies que forman florecimientos algales nocivos (FAN) en la boca de la Laguna de Sontecomapan, los resultados mostraron una composición de 27 taxones, encontrando además que la salinidad fue la variable ambiental que más influyó en su estructura.

De acuerdo con el conocimiento actual sobre la ecología de la comunidad de fitoplancton en la Laguna de Sontecomapan, se proponen los siguientes:

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar los cambios espaciales y temporales de la biomasa fitoplanctónica en la Laguna de Sontecomapan y su relación con parámetros fisicoquímicos.

Objetivos particulares

1. Analizar la variación de la salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, pH, profundidad y transparencia.
2. Analizar la concentración de amonio (NH₃), nitratos (NO₃⁻), nitritos (NO₂⁻) y ortofosfatos (PO₄³⁻).
3. Analizar el volumen de la biomasa fitoplanctónica en el sistema.

4. Determinar la relación espacio temporal de la biomasa fitoplanctónica con los factores fisicoquímicos y los nutrientes.
5. Evaluar el estado trófico del sistema.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la Laguna de Sontecomapan, Veracruz, México, situada dentro de la Reserva de la Biosfera de Los Tuxtlas, en la región de la cuenca que forma el volcán de San Martín Tuxtla y la sierra de Santa Marta (Muciño *et al.*, 2011). Se localiza en las coordenadas 18° 30' y 18° 34' N y 95° 00' y 95° 04' W (Fig. 1).

La laguna tiene un área de 8.91 Km² y mide aproximadamente 12 km de largo y 1.5 km de ancho y está permanentemente conectada al Golfo de México (Guerra y Lara, 1996; Aké y Vázquez, 2008). Tiene una profundidad promedio de 1.50 m, con una transparencia media de 0.60 m y una temperatura superficial promedio de 24° C, similar a la del fondo.

El clima se caracteriza por ser Am (f)i cálido húmedo, y se distinguen tres épocas climáticas definidas: “lluvias” en verano y parte de otoño (junio-octubre), “nortes”, con un alto porcentaje de lluvias invernales y fuertes vientos (octubre-febrero) y “secas” (febrero-junio) siendo mayo el mes más cálido del año (Aké y Vázquez, 2008).

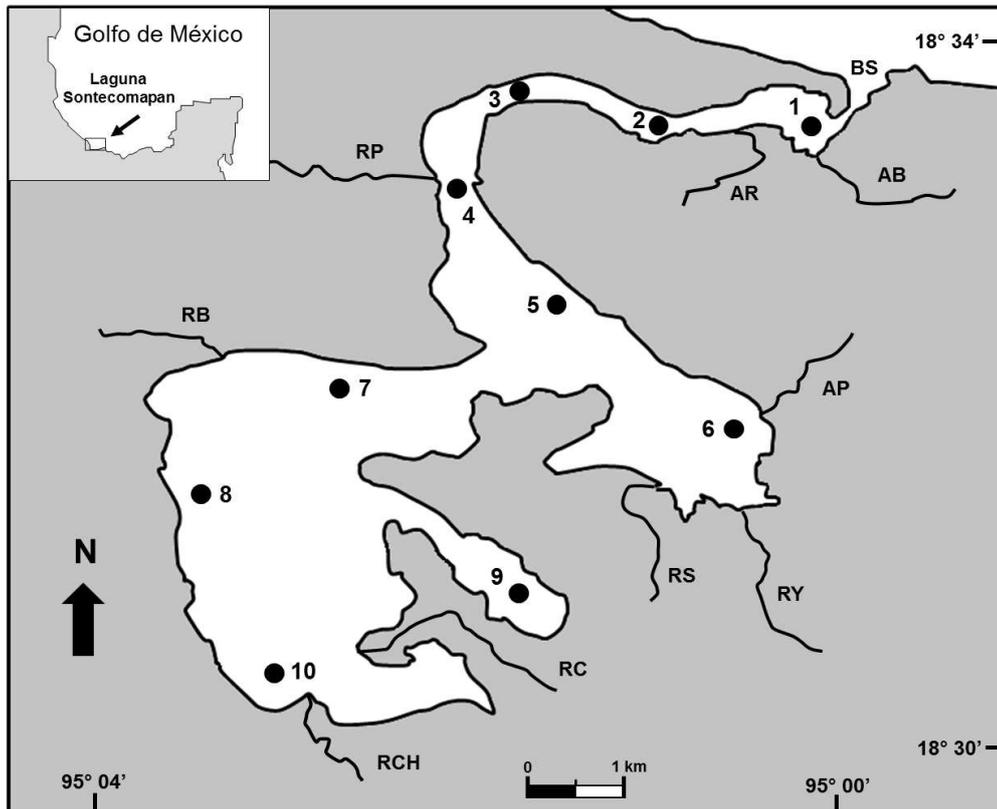


Figura 1.- Ubicación geográfica de la Laguna de Sontecomapan, Veracruz. Se muestra la ubicación de las estaciones de muestreo (1-10), los principales rasgos fisiográficos, así como los arroyos y ríos que drenan en la laguna. Arroyo La Boya (AB), Arroyo Remolino (RR), Río La Palma (RP), Río Basura (RB), Arroyo Los Pollos (AP), Río Yuhualtijapan, Río Sábalo (RS), Río Coxcoapa (RC), Río Chuniapan (RCH), Boca de Sontecomapan (BS). (Tomada de Aguirre-León *et al.*, 2018).

METODOLOGÍA

Actividades de campo

El registro de datos fisicoquímicos, así como la obtención de muestras de agua para la determinación de clorofila *a* (biomasa fitoplanctónica) y nutrientes se realizó tanto en superficie como en fondo, en 10 estaciones de muestreo abarcando diferentes ambientes del sistema, esto es, con influencia de ríos, zona de mezcla, canal de comunicación y boca marina (Fig. 1). El diseño de muestreo incluyó la obtención de las variables mencionadas durante dos días, esto es, un primer registro durante el primer día y su correspondiente réplica durante el segundo. Los registros corresponden a los meses de octubre 2014, febrero y octubre 2015, febrero 2016, octubre 2017 y febrero 2018.

Fueron registradas las variables de salinidad, temperatura, oxígeno disuelto y pH en superficie y fondo de la columna de agua utilizando un multiparamétrico YSI-85 y un

potenciómetro de campo Conductronic Modelo 7553. Así mismo, la profundidad con un profundímetro digital marca Speedtech y la transparencia con un disco de Secchi.

Para determinar la clorofila **a** y los nutrientes se siguió la técnica de Parson *et al.* (1992), donde se filtraron 250 ml de agua de cada sitio de muestreo con membranas de microfibras GF-C Whatman de 4.7 cm de diámetro en un sistema Millipore. Tanto los filtros como las muestras de agua se mantuvieron en congelación, hasta su posterior procesamiento en el laboratorio, esto para evitar la oxidación de ciertos compuestos.

Actividades de laboratorio

Para cuantificar la biomasa fitoplanctónica (concentración de clorofila **a**), los filtros se trataron con una solución de acetona al 90% para después medir la absorbancia en un espectrofotómetro Sectors 20 Genesys Modelo 4001/1 con longitudes de onda de 664, 647 y 630 nm (Barreiro y Signoret, 1999).

La determinación de los compuestos inorgánicos nitrogenados se realizó con los métodos de salicilato para amonio (NH₃), reducción del cadmio para nitratos (NO₃⁻), diazotización para nitritos (NO₂⁻), así como el de ácido amino para compuestos inorgánicos fosfatados (PO₄³⁻) (Parsons *et al.*, 1992). Todas las corridas se hicieron mediante un espectrómetro HACH Odyssey Modelo DR/2500.

El análisis de la variación espacio temporal de la biomasa fitoplanctónica, de los factores fisicoquímicos, como de la concentración de nutrientes, se hizo a partir de las determinaciones de los parámetros antes señalados ya contenidos en bases de datos que pertenecen al “Laboratorio de Ecología Costera y Pesquerías” del Departamento “El Hombre y su Ambiente”.

Índice del estado trófico (TRIX)

La estimación del estado trófico del sistema se determinó con el índice TRIX (Muciño *et al.*, 2017), con el fin de conocer la condición ambiental durante los meses de estudio.

Este índice combina logaritmos de cuatro variables:

Cl **a**, NID (NO₂ + NO₃ + NH₄), PT (fosforo total) y el valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto:

$$\text{TRIX} = \frac{(\log 10 (\text{Cl a} \times \text{aD\%O} \times \text{NID} \times \text{PT}) + K)}{m}$$

Donde:

a) Factores de expresión directa:

Cl \underline{a} = concentración de clorofila \underline{a} en $\mu\text{g L}^{-1}$

aD%O = valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, esto es 100-%OD.

b) Factores nutricionales:

NID = nitrógeno inorgánico disuelto, en $\mu\text{g L}^{-1}$

PT = concentraciones de fósforo, en $\mu\text{g L}^{-1}$

Las constantes $K= 1.5$ y $m = 12/10 = 1.2$, son valores de escala introducidos para ajustar los valores límite de índice y la escala trófica relacionada; es decir que si el índice tiene valores entre 0 y 10 y cubre cuatro estados tróficos y de la calidad del agua; alta, buena, pobre y mala (Tabla 1) (Muciño *et al.*, 2017).

Tabla 1.- Nivel trófico y calidad del agua asociado con el Índice TRIX

Escala TRIX	Nivel de estado trófico	Estado de la calidad del agua	Características del agua
0-4	Oligotrófico	Alta	Aguas poco productivas, nivel trófico bajo
4-5	Mesotrófico	Buena	Agua moderadamente productiva, nivel trófico medio
5-6	Eutrófico	Mala	Agua entre moderada y altamente productiva, nivel trófico alto
6-10	Hipertrófico	Pobre	Agua altamente productiva, nivel trófico más alto

Para determinar el Índice TRIX se realizó una conversión de los valores de oxígeno disuelto (mg/L) a porcentaje de saturación de oxígeno con la fórmula siguiente (Arocena y Conde, 1999):

$$\% \text{ de saturación de OD} = \frac{100 \times \text{concentración de OD (mg/L)}}{\text{Solubilidad de OD a temperatura del agua}}$$

La solubilidad del oxígeno disuelto depende de la temperatura del agua y de la altitud (msnm). La tabla de equivalencias se muestra en el anexo 1.

Análisis estadístico

Para estimar diferencias estadísticas espaciales (entre estaciones) y temporales (entre meses) de las variables ambientales, nutrientes y biomasa fitoplanctónica se evaluó la homogeneidad de varianzas entre grupos utilizando la prueba de Levene (1960). En los casos necesarios se hicieron transformaciones logarítmicas. Cuando se cumplió la homogeneidad de varianzas se utilizó una prueba ANOVA-F-, cuando no se cumplió se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis-H- (Zar, 1999). Para todas las pruebas anteriores se consideró un nivel de significancia $p < 0.05$ (Zar, 1999; Hair *et al.*, 2001). Se realizó un análisis de agrupamiento “cluster” utilizando los parámetros fisicoquímicos para definir hábitats, así como los de clorofila a y nutrientes para analizar afinidad entre ellos. La métrica que se utilizó fue la distancia euclidiana mediante ligamiento promedio ponderado (Hair *et al.*, 2001). Se utilizó un análisis de correlación simple para evaluar la asociación entre la concentración de clorofila a, las variables ambientales del sistema y los nutrientes entre superficie y fondo (Daniel, 2002).

RESULTADOS

Variación espacial por mes de los parámetros fisicoquímicos

A continuación, se presenta el comportamiento espacial de las variables ambientales de la columna de agua por mes considerando para todas ellas, los valores máximo y mínimo registrados por sitio de muestreo.

Octubre 2014. Los valores de **salinidad** del día 1 (7 de octubre) variaron entre 30.8 y 0.9 ups para superficie (SS), y de 31.1 a 9.7 ups para fondo (SF), estos intervalos reflejaron un gradiente desde de la boca marina al interior de la laguna (Fig. 2a y 2b). Para el siguiente día (8 de octubre) se presentó una disminución marcada en superficie que oscilo entre 4.7 a 0.9 ups, y en fondo de 23.0 a 3.1 ups. El análisis de correlación entre niveles fue de $r=0.709$ para el primer día y de $r=0.189$ para el segundo.

La **temperatura** de la columna de agua del día 1 presentó variaciones entre 30.7 y 28.7 °C para superficie (TS), y de 30.8 a 29.7 °C para fondo (TF), en comparación con el día 2 que fluctuó de 29.9 y 26.9 °C en superficie, y de 29.8 y 27 °C para fondo (Fig. 2c y 2d). Los valores de temperatura ambiente para el día 1 oscilaron entre 31.1 y 29.2 °C y para el día 2 de 30.5 a 25.2 °C. La temperatura de la columna de agua varió en función de la temperatura ambiente. El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r=0.341$ para el primer día y de $r=0.677$ para el segundo. La correlación entre la temperatura promedio del agua y temperatura ambiente fue de $r=0.770$.

El comportamiento del **oxígeno disuelto** no mostró cambios marcados entre estaciones de registro. Para el día 1 varió entre 4.16 y 3.07 mg/L para superficie (OS), y de 3.0 y 1.17 mg/L para fondo (OF). Para el día 2 fluctuó entre 7.24 y 3.48 mg/L en superficie y de 4.94 a 1.7 mg/L en fondo. (Fig. 2e y 2f). El análisis de correlación entre niveles fue de $r=-0.139$ para el primer día y de $r=-0.269$ para el segundo.

El **pH** de la columna de agua fue más alto hacia la boca marina y más bajo hacia el interior del sistema. Para el primer día varió de 8.21 a 7.32 en superficie (pHS), y de 8.21 a 7.08 en fondo (pHF). Durante el segundo día se registraron valores de 7.9 a 7.2 en superficie, y de 7.11 a 7.06 para fondo (Fig. 2g y 2h). El análisis de correlación entre niveles fue de $r=0.918$ para el primer día y de $r=0.871$ para el segundo.

La **profundidad** de la laguna varió el día 1 de 3.7 a 1.4 m y para el día 2 de 3.5 a 1.3 m, presentando mayor profundidad en la boca y en la parte central. La **transparencia** del agua no muestra una amplia variación en el sistema, osciló entre los 0.8 a 2.3 m para el día 1 y 0.76 a 1.65 m para el día 2 (Fig. 2i y 2j). El análisis de correlación entre profundidad y transparencia fue de $r= 0.297$ para el primer día y $r= 0.728$ para el segundo.

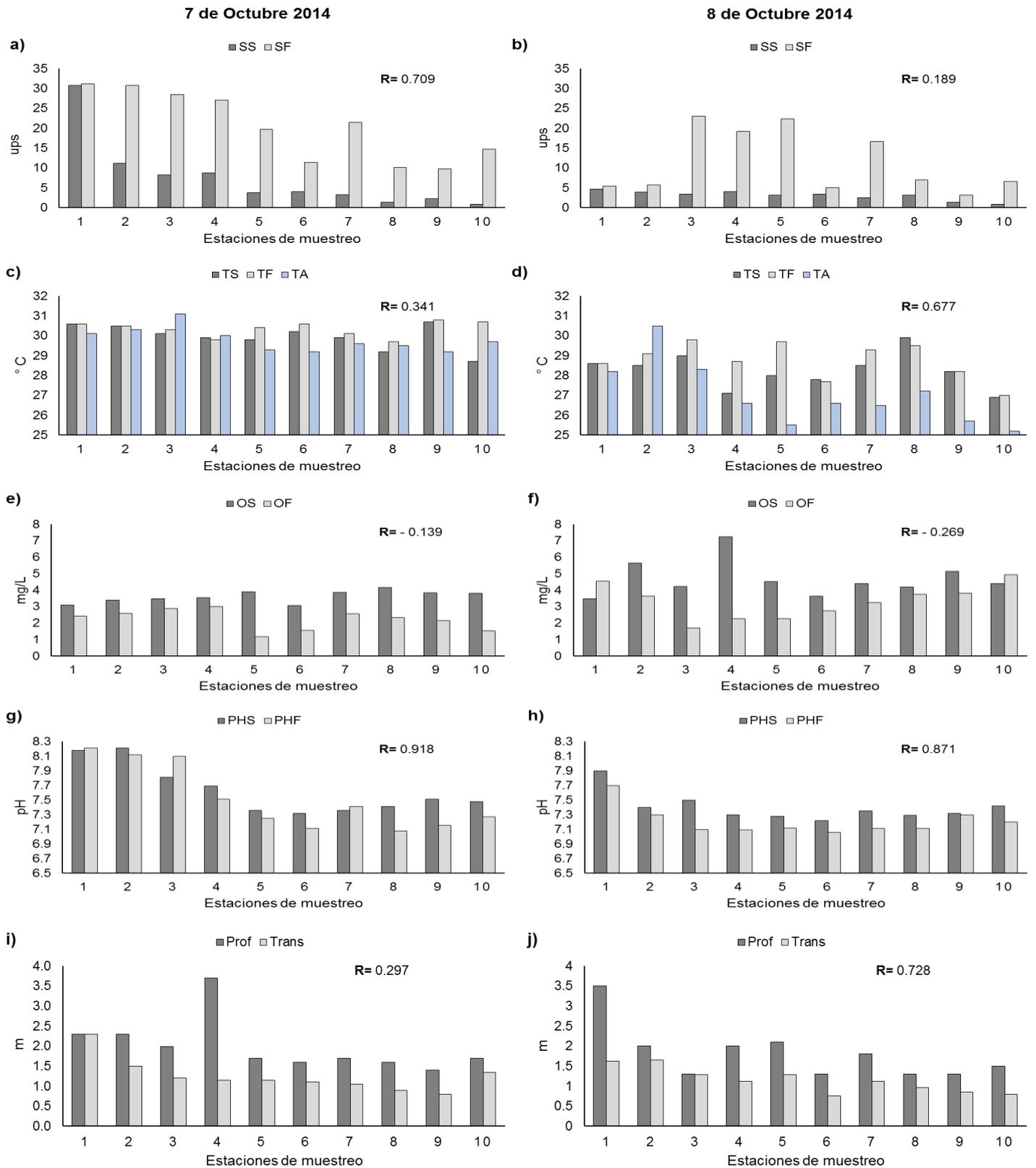


Fig. 2.- Variación espacial de los factores fisicoquímicos en octubre 2014. Salinidad superficie (SS), salinidad de fondo (SF) (a y b), temperatura de superficie (TS), temperatura de fondo (TF), temperatura ambiente (TA) (c y d), oxígeno disuelto de superficie (OS), oxígeno de fondo (OF) (e y f), pH de superficie (PHS), pH de fondo (PHF) (g y h), profundidad (Prof) y transparencia (Trans) (i y j).

Febrero de 2015. La **salinidad** en el día 1 (17 de febrero) osciló entre 25.40 y 7.50 ups para superficie, y de 28.20 a 8.70 ups para fondo (Fig. 3a y 3b). Para el segundo día (18 de febrero) varió entre 21.30 a 3.90 ups para superficie, y de 26 a 4.40 ups para fondo, mostrando un gradiente de salinidad de la boca al interior de la laguna. El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r= 0.877$ para el primer día y $r= 0.813$ para el segundo.

La **temperatura** de la columna de agua del día 1 varió entre 27 y 23.6 °C para superficie, y de 26.3 y 23.3 °C para fondo, en comparación con el día 2 donde se presentó entre 23.9 y 21.3 °C en superficie, y de 24.5 y 20.3 °C para fondo (Fig. 3c y 3d). Los valores de temperatura ambiente para el día 1 oscilaron entre 25.20 y 22.60 °C y para el día 2 de 20.0 a 18.80 °C. El análisis de correlación entre niveles fue de $r= 0.953$ para el día 1 y $r= 0.593$ para el día 2. La correlación entre la temperatura promedio del agua y temperatura ambiente fue de $r= 0.777$.

El **oxígeno disuelto** en la columna de agua mostró cambios evidentes entre estaciones, en el día 1, los valores fluctuaron entre 4.76 y 3.75 mg/L para superficie, y de 4.35 y 1.5 mg/L para fondo. Sin embargo, para el día 2, se muestra un aumento significativo en comparación con el día 1 y entre estaciones, fluctuó entre 7.65 y 5.53 mg/L en superficie, y de 7.10 y 2.0 mg/L en fondo. (Fig. 3e y 3f). El análisis de correlación entre niveles fue de $r= 0.470$ para el primer día y de $r= 0.373$ para el segundo.

El **pH** de la columna de agua fue más alcalino hacia la boca marina y más ácido hacia el interior del sistema. Para el primer día varió de 8.1 a 6.94 en superficie y de 7.9 a 6.83 en fondo. Durante el segundo día se registraron valores de 8.05 a 7.06 en superficie y de 7.93 a 6.94 para fondo (Fig. 3g y 3h). El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r= 0.683$ para el primer día y de $r= 0.663$ para el segundo.

La **profundidad** de la laguna varió para el día 1 de 3.8 a 0.90 m y para el día 2 de 4.10 a 1.10 m, presentando mayor profundidad en la boca y en la parte central. La **transparencia** del agua muestra una amplia variación en el sistema, oscila entre los 2.55 a 0.65 m para el día 1 y de 1.20 a 0.45 m para el día 2 (Fig. 3i y 3j). El análisis de correlación entre profundidad y transparencia fue de $r= 0.360$ para el primer día y $r= 0.295$ para el segundo.

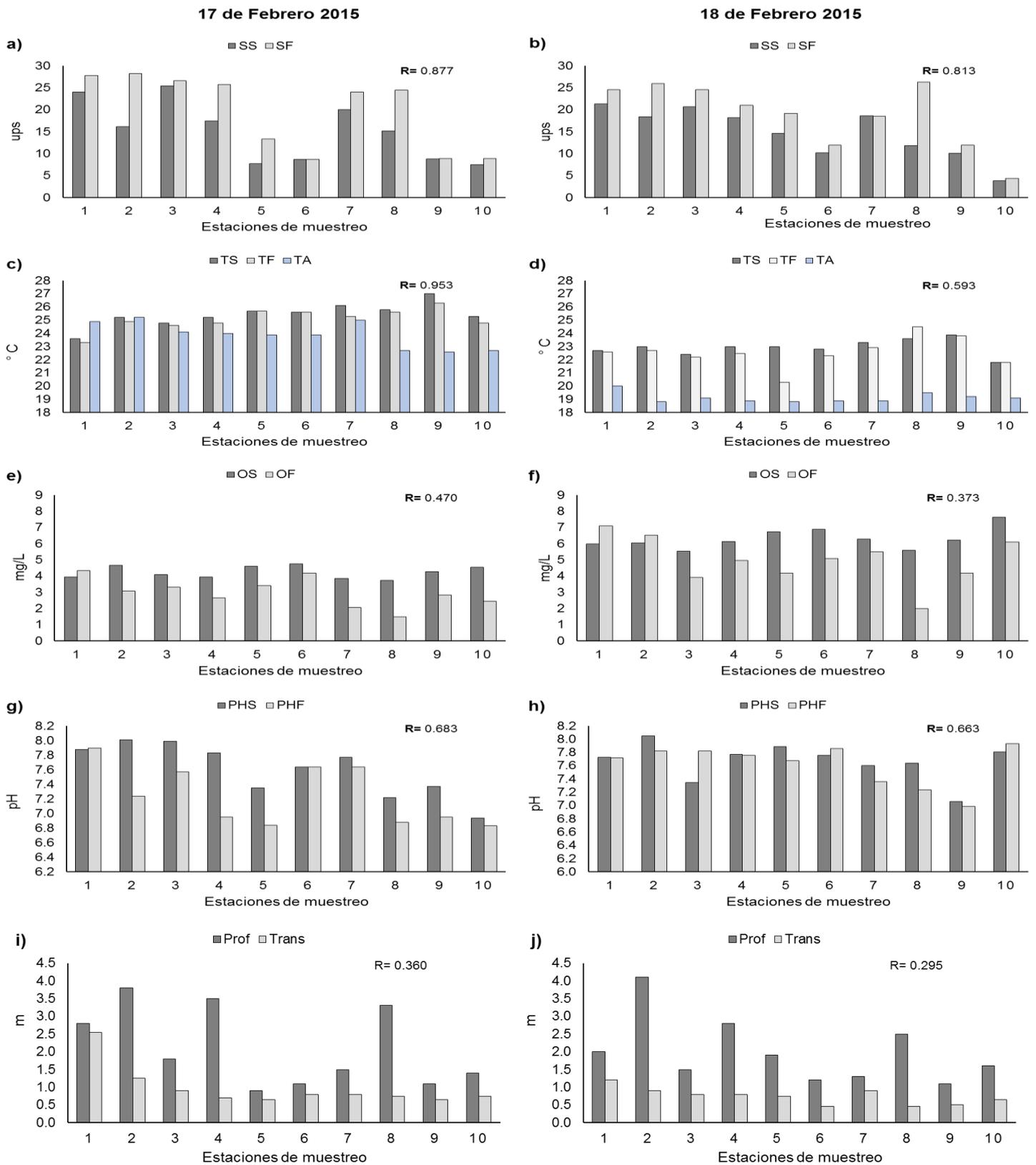


Fig. 3.- Variación espacial de los factores fisicoquímicos en febrero 2015. Salinidad superficie (SS), salinidad de fondo (SF) (a y b), temperatura de superficie (TS), temperatura de fondo (TF), temperatura ambiente (TA) (c y d), oxígeno disuelto de superficie (OS), oxígeno de fondo (OF) (e y f), pH de superficie (PHS), pH de fondo (PHF) (g y h), profundidad (Prof) y transparencia (Trans) (i y j).

Octubre 2015. La **salinidad** osciló en el día 1 (14 de octubre) entre 12 y 2 ups para superficie, y de 31 a 5 ups para fondo. Para el día 2 (15 de octubre) varió entre 10 a 2 ups para superficie, y 33 a 5 ups para fondo (Fig. 4a y 4b), mostrando un gradiente de salinidad de la boca al interior de la laguna, lo cual indicó una marcada cuña de sal. El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.332$ para el primer día y $r = 0.339$ para el segundo día.

La **temperatura** de la columna de agua en el primer día varió entre 32.3 y 26.4 °C para superficie, y de 34.6 y 29.9 °C para fondo; para el día 2 se presentaron valores de 31.1 y 28.1 °C en superficie, y de 34.5 y 28.7 °C para fondo (Fig. 4c y 4d). En ambos días se presentó mayor temperatura en el fondo. El análisis de correlación entre niveles fue de $r = 0.735$ para el día 1 y $r = 0.861$ para el día 2. Para este mes no fue posible registrar datos de temperatura ambiente.

El comportamiento del **oxígeno disuelto** en la columna de agua para el día 1, fluctuó entre 3.73 y 1.96 mg/L para superficie, y de 4.44 y 1.4 mg/L para fondo. Sin embargo, para el día 2, se muestra un aumento significativo en comparación con el día 1 entre estaciones, osciló entre 7.46 y 5.16 mg/L en superficie, y de 6.66 y 0.85 mg/L en fondo. (Fig. 4e y 4f). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = -0.097$ para el primer día y de $r = 0.091$ para el segundo.

El **pH** de la columna de agua se mantuvo con pequeñas variaciones entre niveles. Para el primer día varió de 7.7 a 7.1 en superficie y de 8.2 a 6.7 en fondo. Durante el segundo día se registraron valores de 7.6 a 6.8 en superficie y de 7.9 a 6.8 para fondo (Fig. 4g y 4h). El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.819$ para el día 1 y de $r = 0.602$ para el día 2.

La **profundidad** de la laguna varió el día 1 de 4.10 a 0.90 m y para el día 2 de 5.40 a 0.90 m, presentando mayor profundidad en la parte central. La **transparencia** del agua no mostró variación en el sistema de 1.40 a 0.75 m para el día 1 y 1.15 a 0.45 m para el día 2 (Fig. 4i y 4j). El análisis de correlación entre profundidad y transparencia fue de $r = 0.545$ para el primer día y $r = 0.660$ para el segundo.

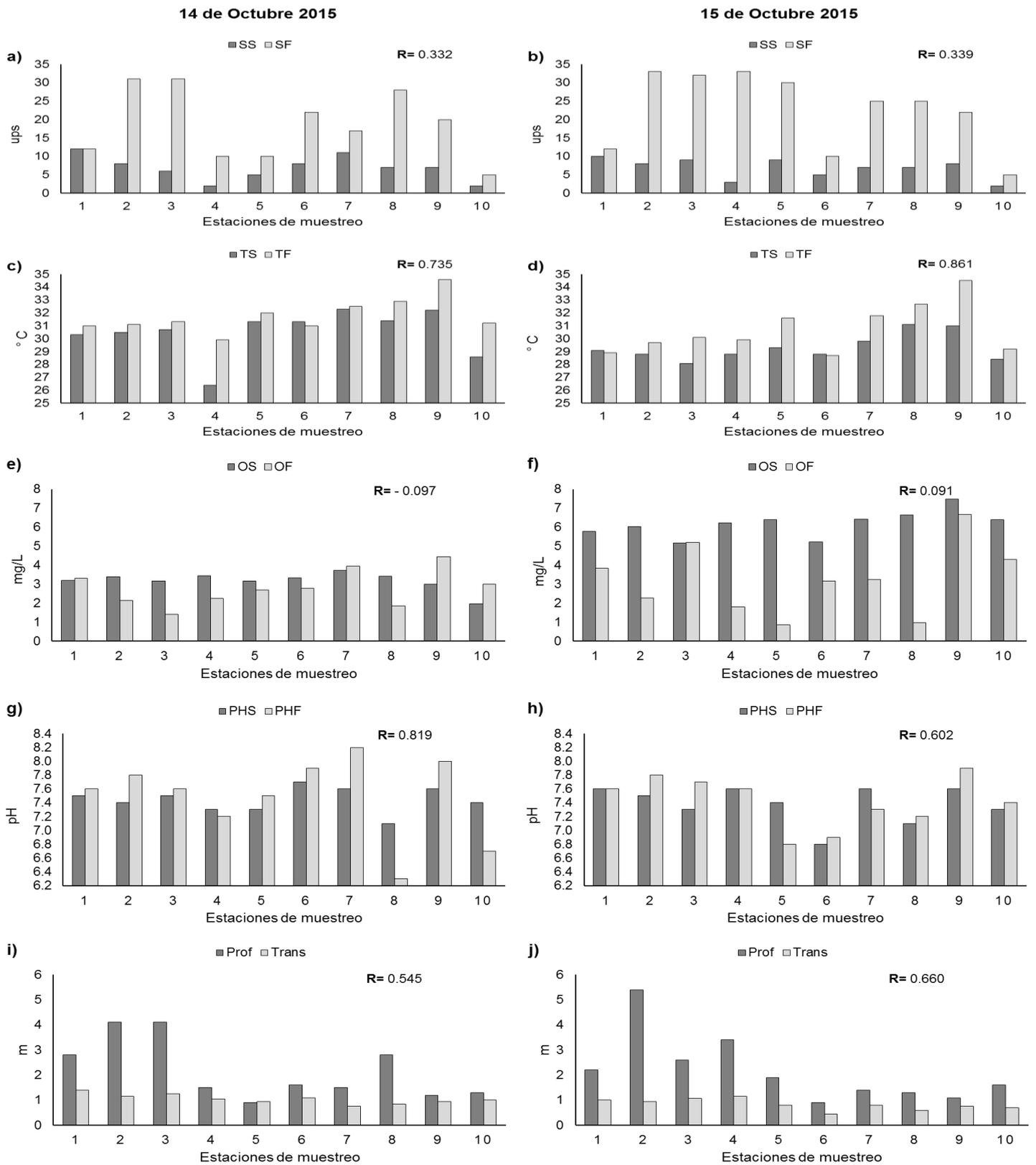


Fig. 4.- Variación espacial de los factores fisicoquímicos en octubre 2015. Salinidad superficie (SS), salinidad de fondo (SF) (a y b), temperatura de superficie (TS), temperatura de fondo (TF) (c y d), oxígeno disuelto de superficie (OS), oxígeno de fondo (OF) (e y f), pH de superficie (PHS), pH de fondo (PHF) (g y h), profundidad (Prof) y transparencia (Trans) (i y j).

Febrero 2016. La **salinidad** presentó valores el día 1 (16 de febrero) entre 34.8 y 1.3 ups para superficie, y de 34.9 a 3.7 ups para fondo (Fig. 5a y 5b). Para el día 2 (17 de febrero) osciló entre 35 a 0.6 ups para superficie, y de 35 a 1.1 ups para fondo, mostrando un gradiente de salinidad desde la boca al interior. El análisis de correlación entre niveles fue de $r= 0.940$ para el primer día y $r= 0.863$ para el segundo día.

La **temperatura** de la columna de agua mostró poca variación, para el día 1 presentó valores entre 25.8 y 23.1 °C para superficie, 27.3 y 23.2 °C para fondo, en el día 2 de 26.5 y 23.4 °C para superficie, 26.4 y 23.4 para fondo (Fig. 5c y 5d). El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r= 0.791$ para el día 1 y $r= 0.961$ para el día 2. Para este mes no fue posible registrar datos de temperatura ambiente.

El **oxígeno disuelto** en la columna de agua, para el primer día fluctuó entre 8.51 y 5.52 mg/L para superficie, y de 6.88 y 5.28 mg/L para fondo. Para el día 2, entre 7.95 y 5.33 mg/L en superficie, y de 6.96 y 4.7 mg/L en fondo. (Fig. 5e y 5f). El análisis de correlación entre niveles fue de $r= 0.632$ para el primer día y de $r= 0.151$ para el segundo.

El **pH** de la columna de agua no indicó cambios marcados entre niveles. Para el primer día fluctuó de 8.3 a 7.2 en superficie y de 8.6 a 7.3 en fondo. Durante el segundo día se registraron valores de 7.9 a 6.7 en superficie y de 7.9 a 6.8 para fondo (Fig. 5g y 5h). El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r= 0.927$ para el día 1 y de $r= 0.747$ para el día 2.

La **profundidad** de la laguna varió para el día 1 de 4.5 a 1.1 m y para el día 2 de 2.5 a 0.90 m, presentando mayor profundidad en el interior de la laguna. La **transparencia** del agua osciló entre los 3.1 a 0.70 m para el día 1 y de 2.85 a 0.70 m para el día 2 (Fig. 5i y 5j). El análisis de correlación entre profundidad y transparencia fue de $r= 0.743$ para el primer día y $r= 0.820$ para el segundo.

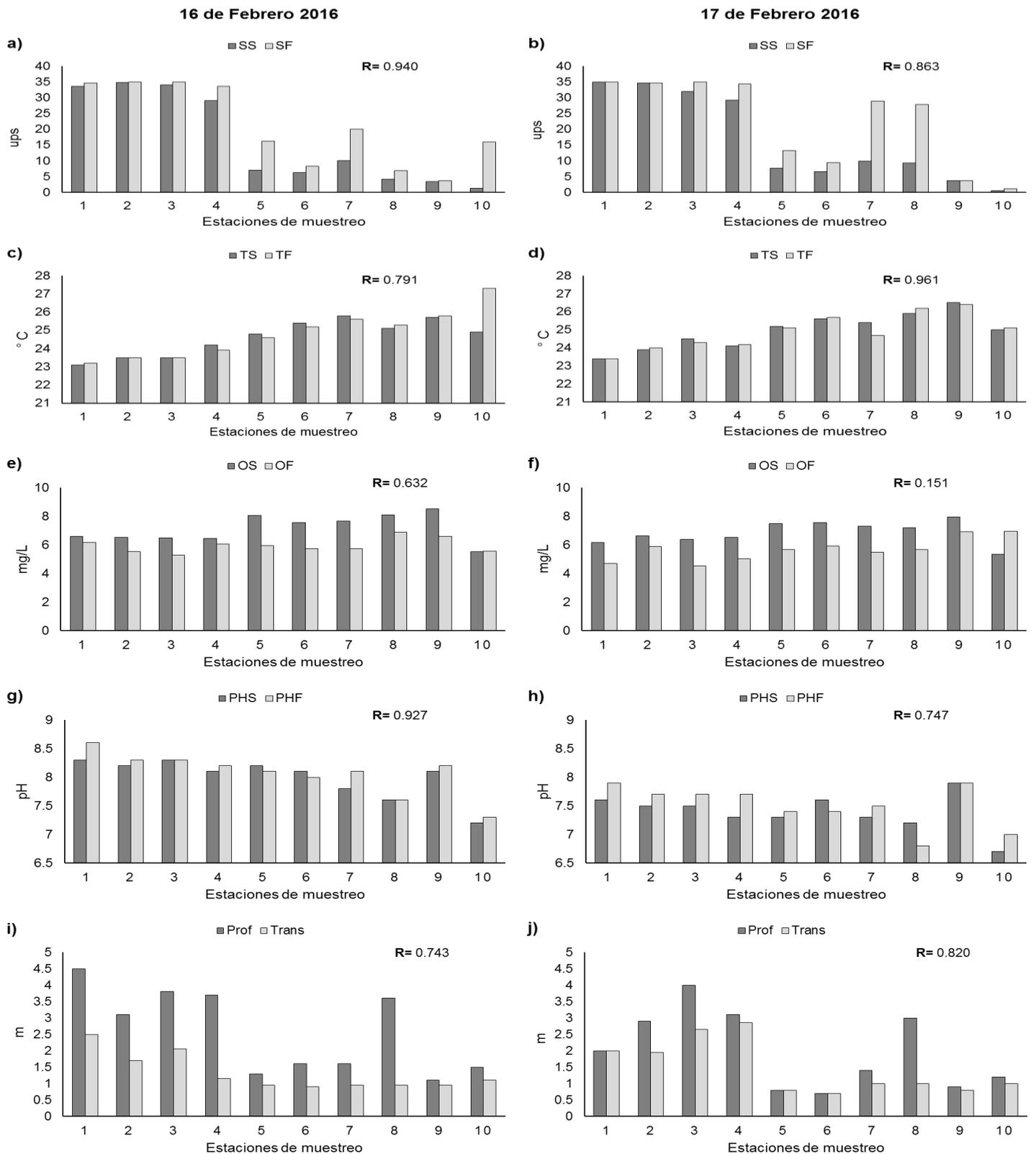


Fig. 5.- Variación espacial de los factores fisicoquímicos en febrero 2016. Salinidad superficie (SS), salinidad de fondo (SF) (a y b), temperatura de superficie (TS), temperatura de fondo (TF) (c y d), oxígeno disuelto de superficie (OS), oxígeno de fondo (OF) (e y f), pH de superficie (PHS), pH de fondo (PHF) (g y h), profundidad (Prof) y transparencia (Trans) (i y j).

Octubre 2017. La **salinidad** del día 1 (24 de octubre) varió entre 0.70 y 0 ups para superficie, y de 0.6 a 0.1 ups para fondo, con valores muy bajos debido a las precipitaciones de este día. (Fig. 6a y 6b). Para el siguiente día (25 de octubre), en superficie osciló entre 1.80 a 0.1 ups, y de 2.3 a 0.1 ups en fondo. El análisis de correlación entre estos niveles fue de $r = 0.783$ para el primer día y de $r = 0.996$ para el segundo.

La **temperatura** de la columna de agua mostró mínimas variaciones, el día 1 presentó valores entre 25.9 y 24.9 °C para superficie, y de 25.9 y 24.4 °C para fondo, en comparación con el día 2, que fueron de 24.9 y 23.9 °C en superficie, y de 24.8 y 24.1 °C para fondo (Fig. 6c y 6d). La temperatura ambiente para el día 1 osciló entre 28 y 24 °C y para el día 2 de 28 a 26 °C. El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.227$ para el primer día y de $r = 0.848$ para el segundo. La correlación entre la temperatura promedio del agua y temperatura ambiente fue de $r = -0.068$.

El comportamiento del **oxígeno disuelto** mostró variaciones entre estaciones de registro. Los valores para el día 1 fluctuaron entre 3.63 y 2.12 mg/L para superficie, y de 3.5 y 1.67 mg/L para fondo. Para el día 2 fluctuó entre 2.6 y 1.88 mg/L en superficie, y de 2.25 y 1.74 mg/L en fondo. (Fig. 6e y 6f). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = -0.645$ para el primer día y de $r = 0.685$ para el segundo.

El **pH** del agua fue más alto en el interior del sistema. Para el primer día varió de 8.34 a 7.27 en superficie y de 9.09 a 7.57 en fondo. Durante el segundo día se registraron valores de 8.79 a 7.96 en superficie y de 8.83 a 7.82 para fondo (Fig. 6g y 6h). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = -0.426$ para el primer día y de $r = -0.035$ para el segundo.

La **profundidad** de la laguna varió para el día 1 de 5.5 a 1.4 m y para el día 2 de 4.4 a 1.4 m, presentando mayor profundidad en la boca y en la parte central. La **transparencia** del agua no muestra una amplia variación en el sistema, oscila entre los 0.38 a 0.98 m para el día 1 y 0.82 a 1.54 m para el día 2 (Fig. 6i y 6j). El análisis de correlación entre profundidad y transparencia fue de $r = 0.189$ para el primer día y $r = 0.211$ para el segundo.

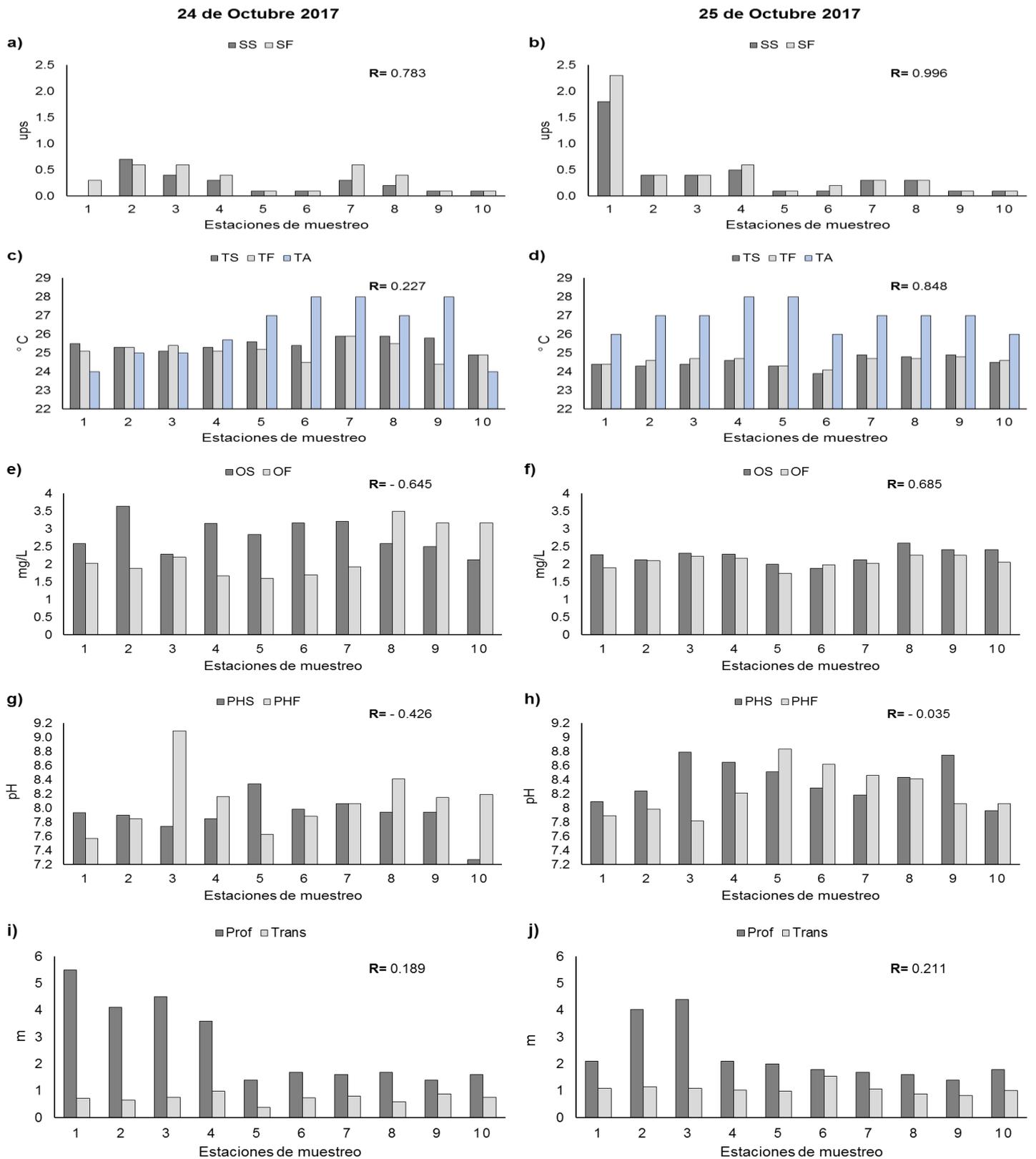


Fig. 6.- Variación espacial de los factores fisicoquímicos en octubre 2017. Salinidad superficie (SS), salinidad de fondo (SF) (a y b), temperatura de superficie (TS), temperatura de fondo (TF), temperatura ambiente (TA) (c y d), oxígeno disuelto de superficie (OS), oxígeno de fondo (OF) (e y f), pH de superficie (PHS), pH de fondo (PHF) (g y h), profundidad (Prof) y transparencia (Trans) (i y j).

Febrero 2018. La **salinidad** del día 1 (13 de febrero) osciló entre 3.2 y 0.1 ups para superficie, y de 28.1 a 0.1 ups para fondo, estos intervalos reflejaron un gradiente desde de la boca marina al interior de la laguna, indicando una cuña de sal (Fig. 7a y 7b). Para el siguiente día (14 de febrero) se presentó una disminución marcada que osciló entre 2.6 a 0.1 ups en superficie y de 3.8 a 0.1 ups en fondo. El análisis de correlación entre niveles fue de $r= 0.748$ para el primer día y de $r= 0.566$ para el segundo.

La **temperatura** de la columna de agua del día 1 presentó variaciones entre 23.9 y 22.1 °C para superficie, y de 23.9 y 22.6 °C para fondo, en comparación con el día 2, presentando valores entre 26.6 y 23.2 °C en superficie, y de 24.7 y 23.2 °C para fondo (Fig. 7c y 7d). Los valores de temperatura ambiente para el día 1 oscilaron entre 26.6 y 23.3 °C y para el día 2 de 29.6 a 24.2 °C. El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r= 0.840$ para el primer día y de $r= 0.820$ para el segundo. La correlación entre la temperatura promedio del agua y temperatura ambiente fue de $r= 0.512$.

El **oxígeno disuelto**, mostro valores para el día 1 entre 8.69 y 5.5 mg/L para superficie, y de 6.69 y 5.2 mg/L para fondo. Para el día 2 fluctuó entre 8.57 y 6.18 mg/L en superficie, y de 7.93 y 5.01 mg/L en fondo. (Fig. 7e y 7f). El análisis de correlación entre niveles fue de $r= 0.036$ para el primer día y de $r= 0.613$ para el segundo.

El **pH** de la columna de agua para el primer día varió de 8.9 a 7.4 en superficie y de 7.6 a 7.0 en fondo. Durante el segundo día se registraron valores entre 8.95 a 6.8 en superficie y de 7.9 a 6.46 para fondo (Fig. 7g y 7h). El análisis de correlación entre niveles fue de $r= 0.240$ para el primer día y de $r= 0.034$ para el segundo.

La **profundidad** de la laguna varió para el día 1 de 5.7 a 1.13 m y para el día 2 de 4.6 a 1.2 m, presentando mayor profundidad en la boca y en la parte central. La **transparencia** del agua no mostró amplia variación en el sistema, osciló entre los 0.48 a 0.89 m para el día 1 y de 0.2 a 0.55 m para el día 2 (Fig. 7i y 7j). El análisis de correlación entre profundidad y transparencia fue de $r= 0.445$ para el primer día y $r= 0.179$ para el segundo.

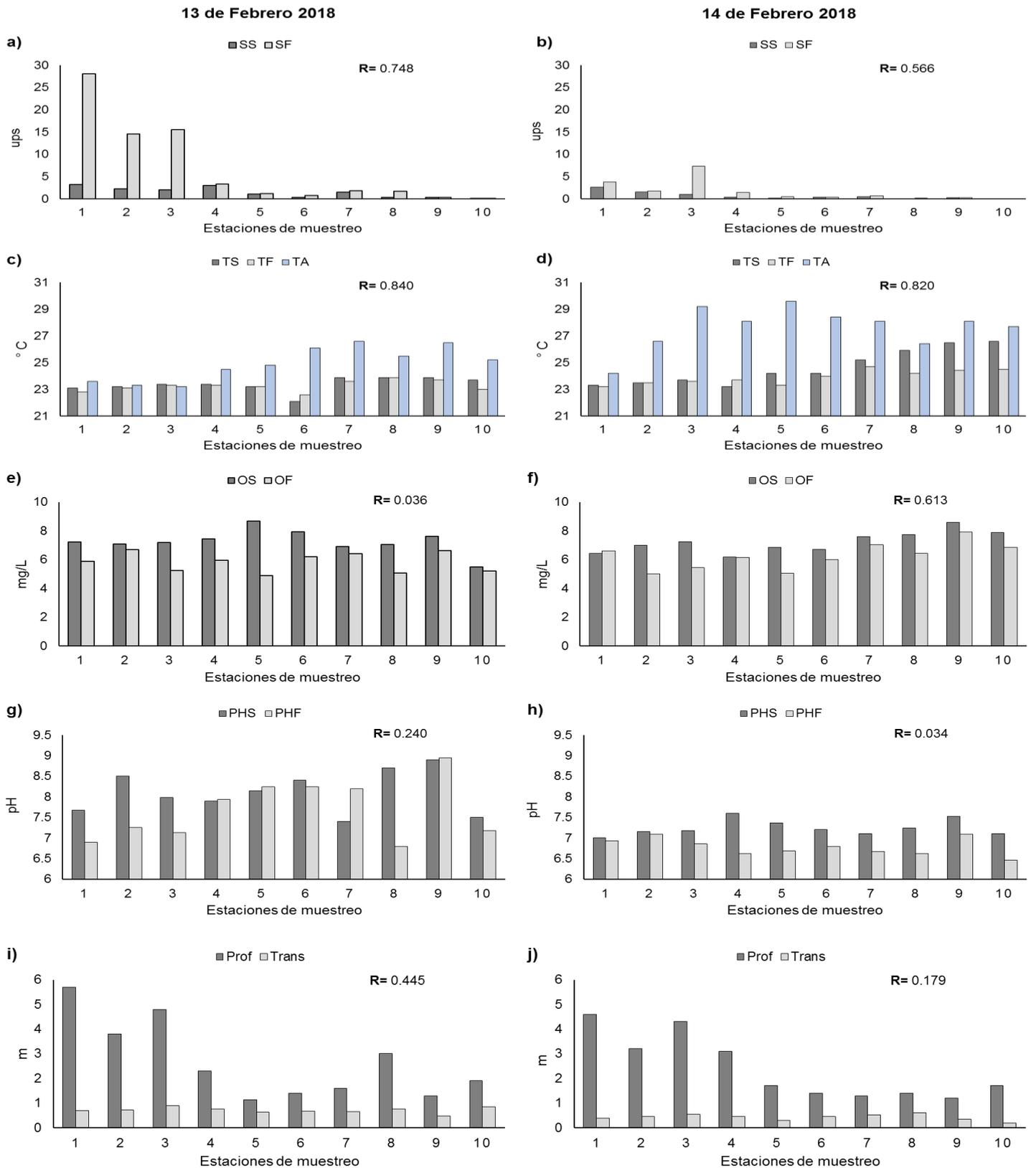


Fig. 7.- Variación espacial de los factores fisicoquímicos en febrero 2018. Salinidad superficie (SS), salinidad de fondo (SF) (a y b), temperatura de superficie (TS), temperatura de fondo (TF), temperatura ambiente (TA) (c y d), oxígeno disuelto de superficie (OS), oxígeno de fondo (OF) (e y f), pH de superficie (PHS), pH de fondo (PHF) (g y h), profundidad (Prof) y transparencia (Trans) (i y j).

Variación espacio temporal anualizada de los parámetros fisicoquímicos

En la figura 8 se muestra la variación espacio temporal de los parámetros fisicoquímicos de las series de datos por estaciones y meses, de octubre 2014 a febrero 2018.

Salinidad. Los valores promedio por estación indicaron un gradiente desde la boca marina hasta el interior del sistema. La estación con mayor valor en superficie fue la 1 (14.91 ± 13.31 ups), ubicada en la boca de laguna a diferencia del fondo, donde la estación con mayor salinidad fue la 3 (21.61 ± 12.66 ups) (Fig. 8a). La estación con menor valor tanto en superficie como fondo fue la estación 10 con intervalo de 1.62 ± 2.16 ups en superficie y 5.16 ± 5.58 ups en fondo. Los promedios por estación y su desviación estándar se muestra en la tabla 2. La salinidad entre estaciones, tanto en superficie como fondo presentaron diferencias significativas, KW-H (9,120) = 18.9359, $p = 0.0257$; y KW-H (9,120) = 24.9299, $p = 0.0030$ respectivamente. Este comportamiento reflejo una cuña de sal bien diferenciada.

En los meses los valores más altos de salinidad se presentaron en febrero 2016 (16.64 ± 13.84 ups en superficie y 21.62 ± 12.93 ups en fondo), mientras que los más bajos en octubre 2017 (0.32 ± 0.39 ups en superficie y 0.40 ± 0.48 ups en fondo) (Fig. 8b). Los promedios mensuales, su desviación estándar y la diferencia de promedios entre niveles se muestran en la tabla 3. Se presentaron diferencias significativas entre meses, tanto en superficie (KW-H (5,120) = 86.183, $p = 0.0001$) como en fondo (KW-H (5,120) = 70.2699, $p = 0.0001$).

Temperatura. Los valores promedio por estación no mostraron amplia variabilidad, los mayores tanto en superficie como en fondo se registraron en la estación 9 siendo de 27.19 ± 2.78 °C y de 27.31 ± 3.94 °C respectivamente (Fig. 8c). La estación con menor temperatura en superficie fue la 4 (25.43 ± 2.22 °C) y en fondo fue la estación 1 con promedio de 25.59 ± 3.22 °C. La temperatura entre estaciones tanto en superficie como fondo no presentaron diferencias significativas F (9,110) = 0.5566, $p = 0.8297$, y F (9,110) = 0.5566, $p = 0.8297$ respectivamente.

Temporalmente, la temperatura mostró variabilidad entre meses, los máximos se registraron en octubre 2015 con valores promedio de 29.91 ± 1.54 °C en superficie y de 31.23 ± 1.66 °C en fondo, mientras que los mínimos fueron registrados en febrero 2018 con

valores promedio de 24 ± 1.17 °C en superficie y de 23.58 ± 0.56 °C en fondo (Fig. 8d). Los promedios por estación y mes, su desviación estándar y la diferencia entre niveles se muestran en las tablas 2 y 3. Esta variable presentó diferencias significativas entre meses tanto en superficie (KW-H (5,120) = 83.9573, $p = 0.0001$) como en fondo (KW-H (5,120) = 90.0311, $p = 0.0001$).

Oxígeno disuelto. Este parámetro no presentó amplia variación entre estaciones como entre niveles. El valor promedio más alto en superficie se presentó en la estación 5 (5.44 ± 2.22 mg/L) y en fondo en la estación 9 (4.8 ± 2.04 mg/L) (Fig. 8e). Los más bajos se registraron en la estación 1 para superficie (4.73 ± 1.79 mg/L) y en la estación 5 para fondo (3.29 ± 1.82 mg/L). El oxígeno disuelto entre estaciones no presentó diferencias significativas tanto en superficie (F (9,110) = 0.2598, $p = 0.9838$) como en fondo (F (9,110) = 0.7532, $p = 0.6595$).

Para los meses, en febrero 2018 se obtuvo el valor promedio máximo de oxígeno disuelto, tanto para superficie como fondo con valores de 7.24 ± 0.75 mg/L y 6.03 ± 0.81 respectivamente (Fig. 8f). Los mínimos se registraron en octubre 2017 (2.5 ± 0.46 ups en superficie y 0.22 ± 0.51 ups en fondo). Los promedios por estación y meses, su desviación estándar y la diferencia entre niveles se muestran en las tablas 2 y 3. Los valores promedio mostraron diferencias significativas entre meses, tanto en superficie (KW-H (5,120) = 85.7931, $p = 0.0001$) como en fondo (KW-H (5,120) = 75.7959, $p = 0.0001$).

pH. Los valores de pH no indicaron gran variación entre estaciones, el valor mayor en superficie se presentó en la estación 2 con un promedio de 7.84 ± 0.43 y en fondo de 7.73 ± 0.59 en la estación 3 (Fig. 8g). Los valores menores en superficie se registraron en la estación 10 (7.34 ± 0.35) y para fondo en la estación 8 (7.20 ± 0.6). En general la laguna mantiene un pH ligeramente alcalino. Los promedios por estación y su desviación estándar se muestra en la tabla 2. No presentaron diferencias significativas entre estaciones tanto en superficie (F (9,110) = 1.3277, $p = 0.2308$) como en fondo (F (9,110) = 1.3186, $p = 0.2354$).

Para los promedios mensuales se observó un ligero aumento en los valores de esta variable, los más altos se presentaron en octubre 2017 con promedio de 8.1 ± 0.36 para superficie y de 8.2 ± 0.38 para fondo, mientras que los menores se registraron en octubre 2015 con 7.41 ± 0.22 para superficie y de 7.45 ± 0.48 para fondo (Fig. 8h). Los promedios mensuales, su desviación estándar y la diferencia entre niveles se muestran en la tabla 3.

Los valores mensuales de pH presentaron diferencias significativas entre estos, tanto en superficie (KW-H (5,120) = 29.6103, $p = 0.00002$) como en fondo (KW-H (5,120) = 36.7382, $p = 0.00001$).

Profundidad y transparencia. Los valores promedio máximos de profundidad y transparencia se presentaron en la estación 1, con valores de 3.33 ± 1.39 m y de 1.46 ± 0.74 m respectivamente (Fig. 8i). En comparación la estación 9 tuvo los mínimos con 1.21 ± 0.16 de profundidad y de 0.73 ± 0.20 para transparencia. Los promedios por estación y su desviación estándar se muestra en la tabla 2. La profundidad y transparencia, entre estaciones presenta diferencias significativas tanto en superficie (KW-H (9,120) = 76.3615, $p = 0.0001$) como en fondo (KW-H (9,120) = 23.5752, $p = 0.0050$).

Temporalmente febrero 2018 fue el que presento el promedio mayor de profundidad con un valor de 2.54 ± 1.42 m, en comparación con octubre 2014, el cual presento el menor promedio (1.90 ± 0.66 m). Para la transparencia, el promedio más alto se registró en febrero 2016 (1.39 ± 0.68 m) y el más bajo en febrero 2018 (0.57 ± 0.18 m) (Fig. 8j). Los promedios mensuales, su desviación estándar y la diferencia entre niveles se muestran en la tabla 3. Los valores mensuales de profundidad no presentan diferencias significativas entre meses (KW-H (5,120) = 3.6598, $p = 0.5994$). En tanto que la transparencia si reflejo diferencias significativas (KW-H (5,120) = 50.6693, $p = 0.00001$).

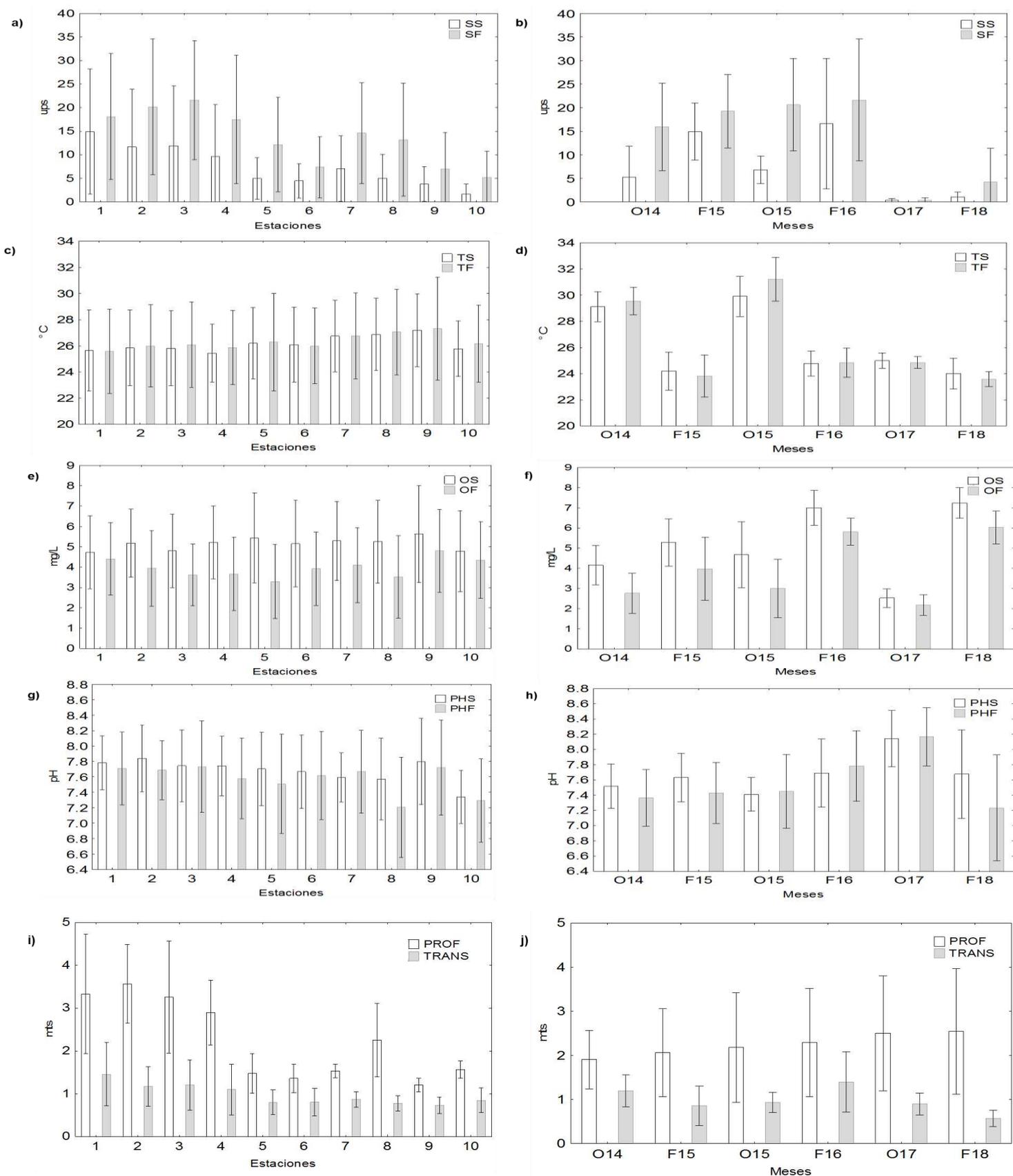


Fig. 8.- Variación promedio espacial y temporal de los factores fisicoquímicos. Salinidad superficie (SS), salinidad de fondo (SF) (a y b), temperatura de superficie (TS), temperatura de fondo (TF) (c y d), oxígeno disuelto de superficie (OS), oxígeno de fondo (OF) (e y f), pH de superficie (PHS), pH de fondo (PHF) (g y h), profundidad (Prof) y transparencia (Trans) (i y j).

Tabla 2. Promedio y desviación estándar de los factores fisicoquímicos en superficie y fondo por estaciones de muestreo en escala temporal.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SS	14.91±13.31	11.66±12.25	11.9±12.66	9.65±11.01	4.95±4.46	4.43±3.62	7.08±6.97	5±5.09	3.8±3.72	1.62±2.16
SF	18.09±13.38	20.15±2.89	21.61±12.66	17.47±13.65	12.15±9.99	7.35±6.51	14.59±10.70	13.18±12.02	6.99±7.69	5.16±5.58
TS	25.64±3.09	25.85±2.89	25.81±2.86	25.43±2.22	26.20±2.73	26.09±2.87	26.75±2.74	26.88±2.76	27.19±2.78	25.78±2.12
TF	25.59±3.22	26±3.15	26.09±3.28	25.88±2.83	26.28±3.74	26±2.90	26.76±3.27	27.06±3.27	27.31±3.94	26.18±2.95
OS	4.73±1.79	5.18±1.68	4.8±1.8	5.21±1.79	5.44±2.22	5.15±2.12	5.28±1.94	5.25±2.03	5.62±2.38	4.79±1.99
OF	4.40±1.78	3.95±1.86	3.61±1.52	3.66±1.80	3.29±1.82	3.92±1.81	4.10±1.85	3.52±2.03	4.8±2.04	4.34±1.88
PHS	7.78±0.35	7.84±0.43	7.75±0.46	7.74±0.38	7.70±0.48	7.67±0.48	7.59±0.32	7.57±0.53	7.8±0.56	7.34±0.35
PHF	7.71±0.47	7.69±0.38	7.73±0.59	7.58±0.52	7.51±0.64	7.62±0.57	7.67±0.54	7.20±0.65	7.72±0.62	7.29±0.54
PROF.	3.33±1.39	3.57±0.92	3.26±1.31	2.90±0.75	1.48±0.47	1.36±0.33	1.53±0.16	2.26±0.86	1.21±0.16	1.57±0.20
TRANS	1.46±0.74	1.17±0.46	1.21±0.59	1.10±0.59	0.80±0.29	0.81±0.32	0.87±0.18	0.78±0.18	0.73±0.20	0.85±0.28

Tabla 3. Promedio, desviación estándar y diferencia entre superficie y fondo de los factores fisicoquímicos entre meses de muestreo.

	Octubre 2014		Febrero 2015		Octubre 2015		Febrero 2016		Octubre 2017		Febrero 2018	
		Dif. \bar{x}										
SS	5.26±6.56		14.93±6.05		6.8±2.91		16.64±13.84		0.32±0.39		1.08±1.04	
		10.67		4.32		13.85		4.98		0.08		3.13
SF	15.93±9.29		19.25±7.76		20.65±9.79		21.62±12.93		0.40±0.48		4.21±7.19	
TS	29.11±1.14		24.19±1.46		29.91±1.54		24.77±0.96		25±0.58		24±1.17	
		0.45		0.36		1.32		0.08		0.2		0.42
TF	29.56±1.06		23.83±1.61		31.23±1.66		24.85±1.11		24.8±0.45		23.58±0.56	
OS	4.16±0.96		5.28±1.17		4.67±1.63		6.99±0.87		2.5±0.46		7.24±0.75	
		1.4		1.31		1.67		1.18		0.3		1.21
OF	2.76±0.99		3.97±1.56		3±1.44		5.81±0.67		2.2±0.51		6.03±0.81	
PHS	7.52±0.29		7.63±0.31		7.41±0.22		7.69±0.44		8.1±0.36		7.68±0.58	
		0.15		0.2		0.04		0.09		0.1		0.45
PHF	7.37±0.37		7.43±0.40		7.45±0.48		7.78±0.46		8.2±0.38		7.23±0.69	
PROF.	1.90±0.66		2.06±0.99		2.18±1.24		2.29±1.22		2.5±1.30		2.54±1.42	
		0.7		1.2		1.24		0.9		1.6		1.97
TRANS.	1.20±0.36		0.86±0.44		0.94±0.22		1.39±0.68		0.9±0.24		0.57±0.18	

Variación espacial por mes de la concentración de nutrientes y clorofila a

A continuación, se presenta el comportamiento espacial de los nutrientes y biomasa fitoplanctónica de la columna de agua por mes considerando para estas variables, los valores máximo y mínimo por sitio de muestreo.

Octubre 2014. La concentración de **amonio** para el día 1 (7 de octubre) fluctuó entre 0.120 y 0.70 mg/L NH₃ para superficie, y de 0.300 y 0.090 mg/L NH₃ para fondo. Para el día 2 (8 de octubre) fluctuó entre 0.110 y 0.090 mg/L NH₃ en superficie, y de 0.140 y 0.090 mg/L NH₃ en fondo. (Fig. 9a y 9b). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = -0.335$ para el primer día y de $r = -0.415$ para el segundo.

La concentración de **nitratos** en la columna de agua del día 1 presentó variaciones entre 0.600 y 0.200 mg/L NO₃⁻ para superficie, y de 0.500 y 0.300 mg/L NO₃⁻ para fondo, en comparación con el día 2, donde se muestra un aumento de la concentración de dicho nutriente, con valores de 1.8 y 0.0 mg/L NO₃⁻ en superficie, y de 2.4 y 0.0 mg/L NO₃⁻ para fondo (Fig. 9c y 9d). El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.614$ para el primer día y de $r = 0.61$ para el segundo.

La concentración de **nitritos** del día 1 varió entre 0.16 y 0.001 mg/L NO₂⁻ para superficie, y de 0.013 a 0.006 mg/L NO₂⁻ para fondo (Fig. 9e y 9f). Para el segundo día los valores en superficie oscilaron entre 0.009 a 0.003 mg/L NO₂⁻, y de 0.021 a 0.009 mg/L NO₂⁻ en fondo. El análisis de correlación entre estos niveles fue de $r = 0.185$ para el primer día y de $r = -0.590$ para el segundo.

La concentración de **ortofosfatos** en la columna de agua fue más alta en la parte central del sistema. Para el primer día varió de 0.600 a 0.0 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 1.8 a 0.0 mg/L PO₄³⁻ en fondo. Durante el segundo día se registraron valores de 1.2 a 0.0 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 1.9 a 0.0 mg/L PO₄³⁻ para fondo (Fig. 9g y 9h). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = 0.145$ para el primer día y de $r = -0.178$ para el segundo.

La concentración de **clorofila a** presenta amplia variación entre estaciones. Para el día 1 mostro valores de 12.66 a 0.818 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ en superficie y de 28.52 a 0.346 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ en fondo (Fig. 9i y 9j). Para el día 2 se registraron valores de 11.48 a 4.88 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ en superficie, y de 40.63 a 6.76 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ para fondo. El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r=0.658$ para el día 1 y de $r=0.362$ para el día 2.

7 de Octubre

8 de Octubre

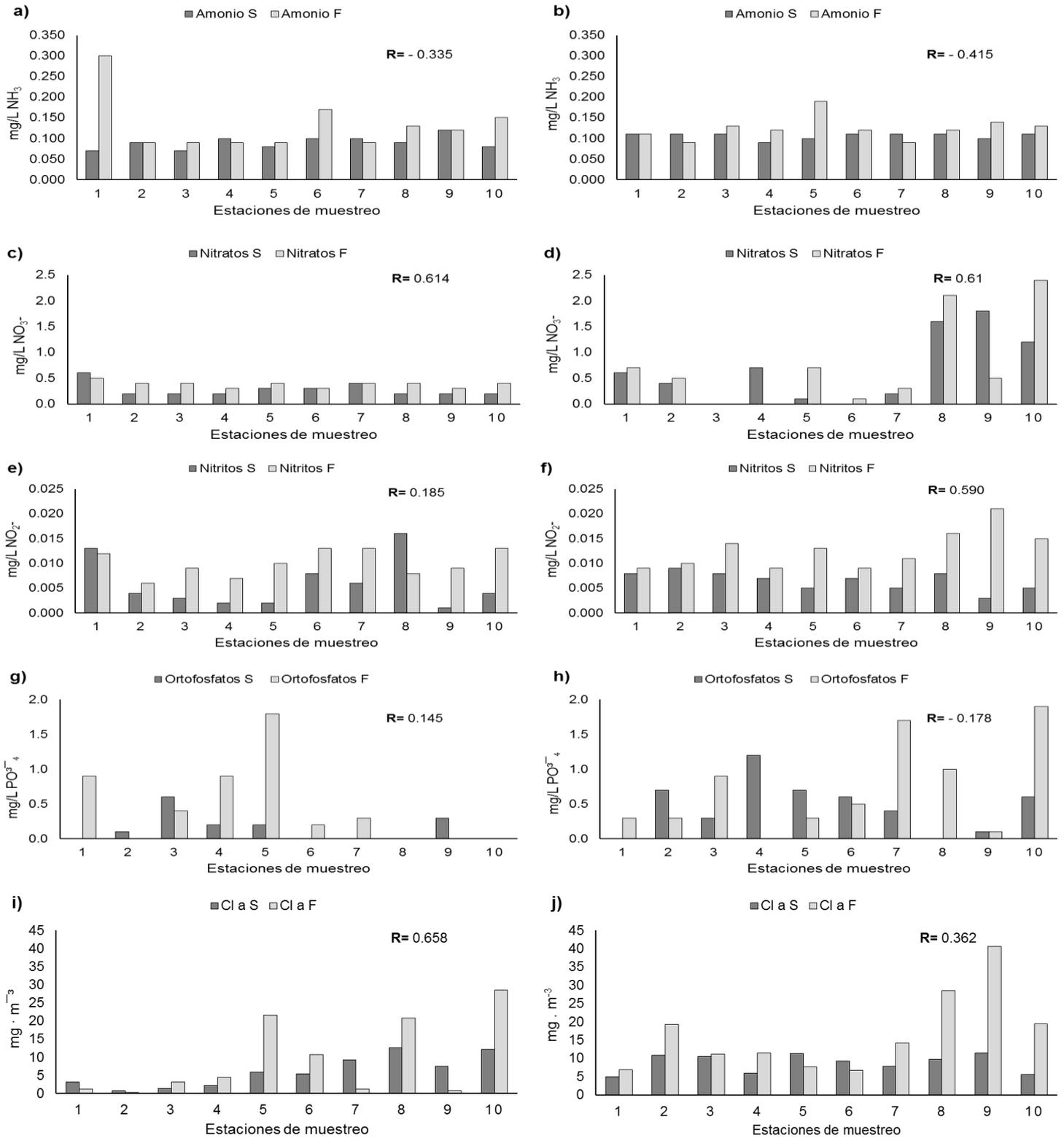


Fig. 9.- Variación espacial de nutrientes y clorofila *a* en octubre 2014. Amonio superficie (S) y fondo (F) (a y b), nitratos superficie (S) y fondo (F) (c y d), nitritos superficie (S) y fondo (F) (e y f), ortofosfatos superficie (S) y fondo (F) (g y h), clorofila *a* superficie (S) y fondo (F) (i y j).

Febrero 2015. La concentración de **amonio** fluctuó para el día 1 (17 de febrero) entre 0.060 y 0.010 mg/L NH₃ para superficie, y de 0.210 y 0.020 mg/L NH₃ para fondo. Para el día 2 (18 de febrero) varió entre 0.060 y 0.040 mg/L NH₃ en superficie, y de 0.070 y 0.040 mg/L NH₃ en fondo. (Fig. 10a y 10b). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = 0.161$ para el primer día y de $r = 0.059$ para el segundo.

La concentración de **nitratos** en la columna de agua del día 1 presentó variaciones entre 0.300 y 0.100 mg/L NO₃⁻ para superficie, y de 0.300 y 0.100 mg/L NO₃⁻ para fondo. Para el día 2 varió de 0.200 y 0.0 mg/L NO₃⁻ en superficie, y de 0.200 y 0.100 mg/L NO₃⁻ para fondo (Fig. 10c y 10d). El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.792$ para el primer día y de $r = 0.333$ para el segundo.

La concentración de **nitritos** del día 1 varió entre 0.020 y 0.002 mg/L NO₂⁻ para superficie, y de 0.016 a 0.004 mg/L NO₂⁻ para fondo (Fig. 10e y 10f). Para el siguiente día osciló entre 0.039 a 0.004 mg/L NO₂⁻, y de 0.035 a 0.004 mg/L NO₂⁻ en fondo. El análisis de correlación entre estos niveles fue de $r = -0.321$ para el primer día y de $r = -0.180$ para el segundo.

La concentración de **ortofosfatos** en la columna de agua para el primer día varió de 3.44 a 0.720 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 1.23 a 0.580 mg/L PO₄³⁻ en fondo, estos intervalos reflejan un gradiente desde la parte central al interior de la laguna. Durante el segundo día se registraron valores de 3.06 a 1.57 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 3.08 a 0.870 mg/L PO₄³⁻ para fondo (Fig. 10g y 10h). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = 0.029$ para el primer día y de $r = 0.674$ para el segundo.

La concentración de **clorofila *a*** presentó las siguientes variaciones. Para el día 1 mostro valores de 6.22 a 0.670 mg·m⁻³ en superficie y de 16.01 a 1.29 mg·m⁻³ en fondo (Fig. 10i y 10j). En comparación con el día 2, se registraron valores de 6.48 a 0.389 mg·m⁻³ en superficie, y de 6.21 a 0.099 mg·m⁻³ para fondo. El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.102$ para el día 1 y de $r = -0.221$ para el día 2.

17 de Febrero

18 de Febrero

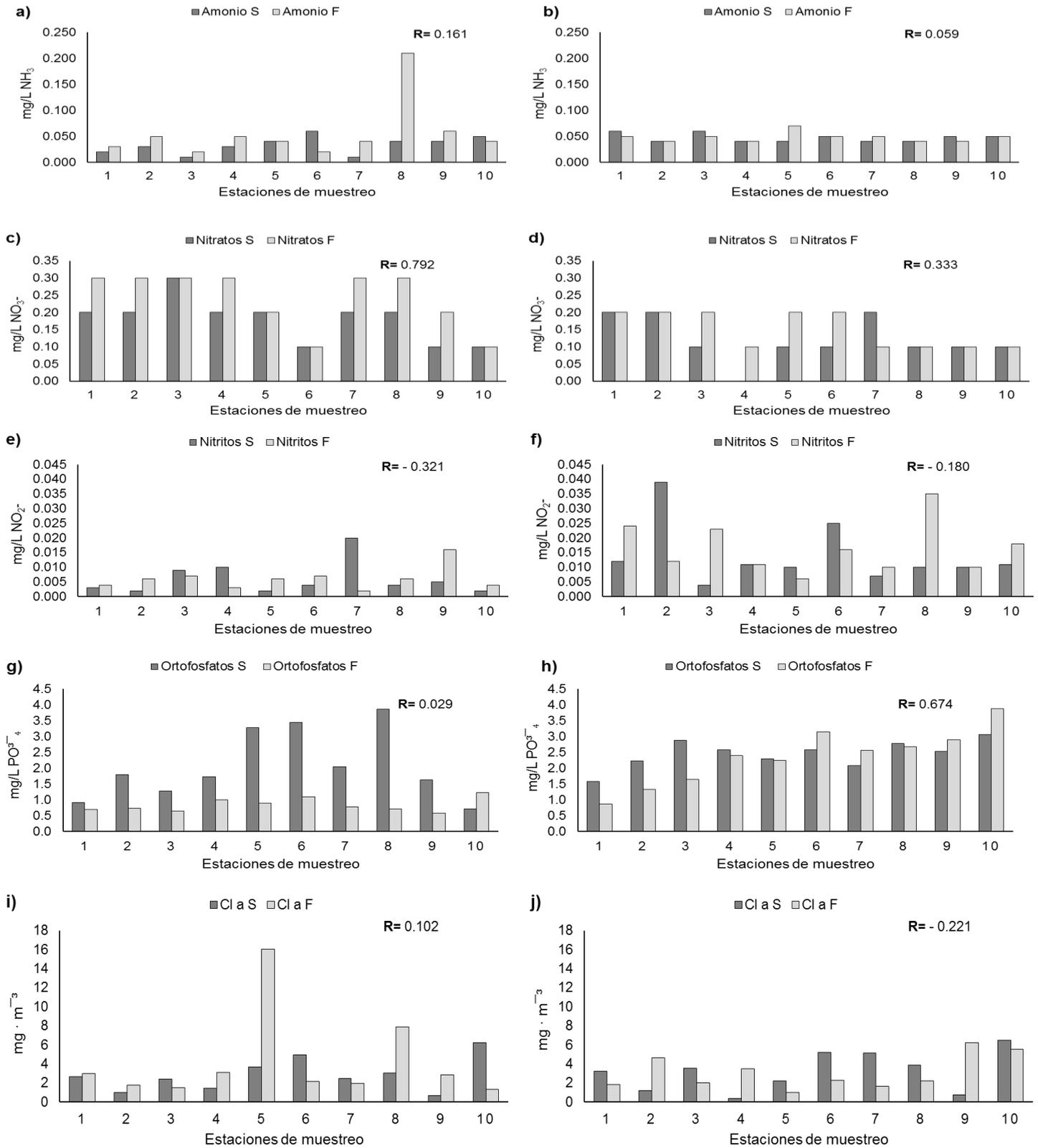


Fig. 10.- Variación espacial de nutrientes y clorofila *a* en febrero 2015. Amonio superficie (S) y fondo (F) (a y b), nitratos superficie (S) y fondo (F) (c y d), nitritos superficie (S) y fondo (F) (e y f), ortofosfatos superficie (S) y fondo (F) (g y h), clorofila *a* superficie (S) y fondo (F) (i y j).

Octubre 2015. La concentración de **amonio** fue diferente entre niveles, para el primer día (14 de octubre) fluctuó entre 1.29 y 0.100 mg/L NH₃ para superficie, y de 12.16 y 0.070 mg/L NH₃ para fondo. Para el segundo día (15 de octubre) los valores fueron de 0.480 y 0.160 mg/L NH₃ en superficie, y de 15.32 y 0.270 mg/L NH₃ en fondo. (Fig. 11a y 11b). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = 0.049$ para el primer día y de $r = 0.103$ para el segundo.

La concentración de **nitratos** mostro diferencias entre estaciones, para el primer día presentó variaciones entre 0.600 y 0.300 mg/L NO₃⁻ para superficie, y de 0.900 y 0.200 mg/L NO₃⁻ para fondo. Para el siguiente día fue de 0.400 y 0.0 mg/L NO₃⁻ en superficie, 1.0 y 0.2 mg/L NO₃⁻ para fondo (Fig. 11c y 11d). El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.792$ para el primer día y de $r = 0.333$ para el segundo.

La concentración de **nitritos** del día 1 varió entre 0.015 y 0.002 mg/L NO₂⁻ para superficie, y de 0.015 a 0.0 mg/L NO₂⁻ para fondo (Fig. 11e y 11f). Para el siguiente día osciló entre 0.018 a 0.002 mg/L NO₂⁻, y de 0.012 a 0.0 mg/L NO₂⁻ en fondo. El análisis de correlación entre estos niveles fue de $r = 0.470$ para el primer día y de $r = -0.020$ para el segundo.

La concentración de **ortofosfatos** en la columna de agua se comportó de manera diferente entre días y niveles, para el día 1 fluctuó de 1.44 a 1.05 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 15.42 a 0.120 mg/L PO₄³⁻ en fondo. Durante el segundo día se registraron valores de 3.36 a 2.24 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 1.96 a 0.140 mg/L PO₄³⁻ para fondo (Fig. 11g y 11h). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = -0.160$ para el primer día y de $r = -0.189$ para el segundo.

La concentración de **clorofila a** presentó valores para el día 1 de 4.60 a 1.30 mg·m⁻³ en superficie y de 3.73 a 1.32 mg·m⁻³ en fondo (Fig. 11i y 11j). En comparación con el día 2, donde muestra una disminución en fondo, se registraron valores de 2.44 a 1.04 mg·m⁻³ en superficie, y de 2.68 a 0.83 mg·m⁻³ para fondo. El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.534$ para el día 1 y de $r = 0.470$ para el día 2.

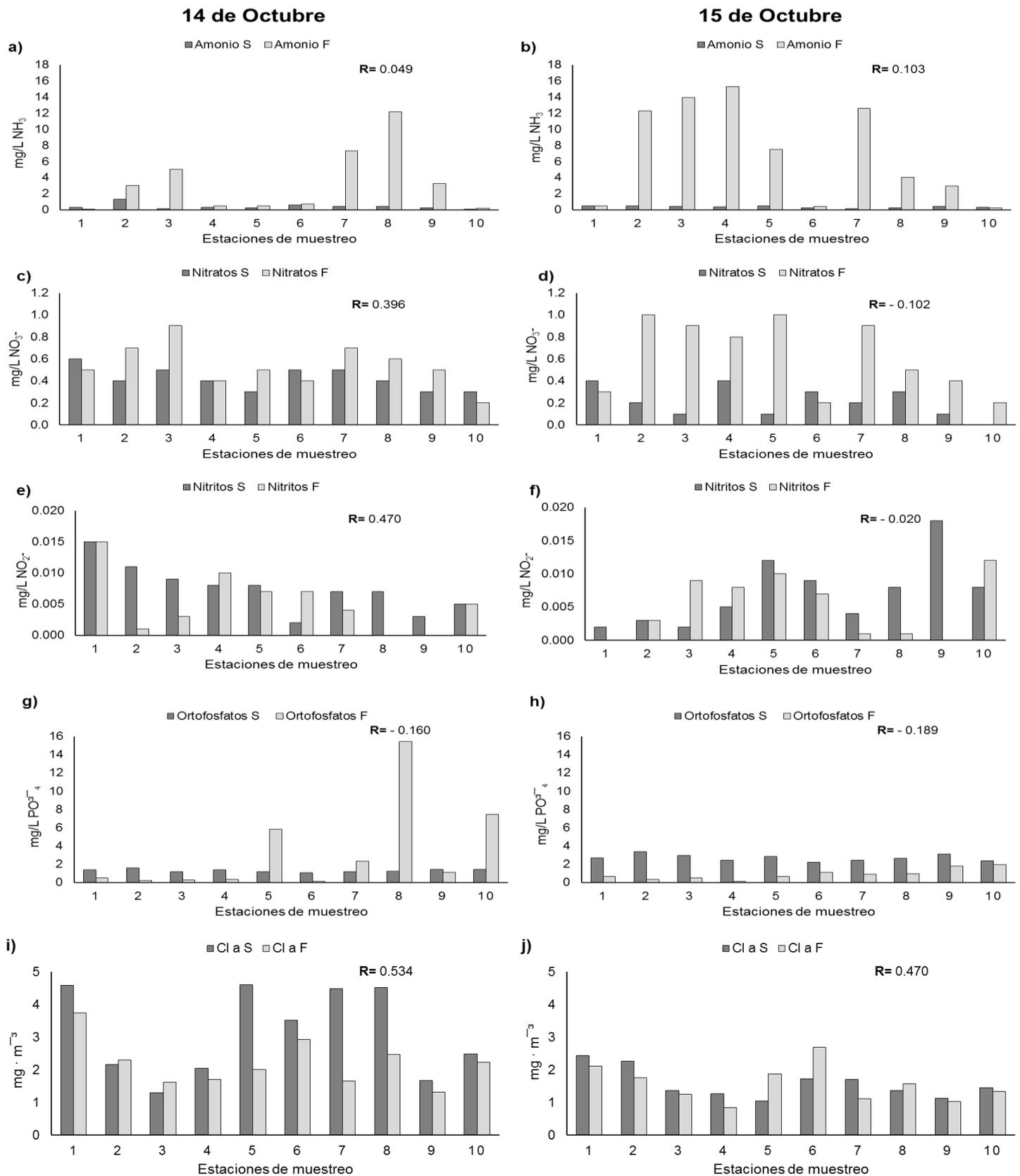


Fig. 11.- Variación espacial de nutrientes y clorofila a en octubre 2015. Amonio superficie (S) y fondo (F) (**a y b**), nitratos superficie (S) y fondo (F) (**c y d**), nitritos superficie (S) y fondo (F) (**e y f**), ortofosfatos superficie (S) y fondo (F) (**g y h**), clorofila a superficie (S) y fondo (F) (**i y j**).

Febrero 2016. La concentración de **amonio** presentó cambios entre estaciones, para el primer día (16 de febrero) fluctuó entre 23.06 y 0.200 mg/L NH₃ para superficie, y de 28.47 y 0.100 mg/L NH₃ para fondo, presentando las mayores concentraciones en la boca de la laguna. Para el segundo día (17 de febrero) varió de 21.20 y 0.120 mg/L NH₃ en superficie, y de 12.16 y 0.090 mg/L NH₃ en fondo. (Fig. 12a y 12b). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = 0.798$ para el primer día y de $r = 0.563$ para el segundo.

La concentración de **nitratos** mostro poca variación entre estaciones, para el primer día presentó variaciones entre 0.900 y 0.200 mg/L NO₃⁻ para superficie, y de 0.800 y 0.200 mg/L NO₃⁻ para fondo. Para el segundo día los valores fueron de 0.800 y 0.100 mg/L NO₃⁻ en superficie, y de 1.3 y 0.100 mg/L NO₃⁻ para fondo (Fig. 12c y 12d). El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = -0.016$ para el primer día y de $r = -0.397$ para el segundo.

La concentración de **nitritos** del día 1 varió entre 0.017 y 0.003 mg/L NO₂⁻ para superficie, y de 0.010 a 0.004 mg/L NO₂⁻ para fondo (Fig. 12e y 12f). Para el siguiente día los valores en superficie oscilaron entre 0.010 a 0.001 mg/L NO₂⁻, y de 0.011 a 0.003 mg/L NO₂⁻ en fondo. El análisis de correlación entre estos niveles fue de $r = -0.097$ para el primer día y de $r = 0.016$ para el segundo.

La concentración de **ortofosfatos** en la columna de agua tuvo diferencias entre estaciones y entre niveles, para el día 1 fluctuó de 4.5 a 0.10 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 3 a 0.10 mg/L PO₄³⁻ en fondo. Durante el segundo día se registraron valores de 0.200 a 0.0 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 0.400 a 0.0 mg/L PO₄³⁻ para fondo (Fig. 12g y 12h). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = 0.953$ para el primer día y de $r = 0.101$ para el segundo.

La concentración de **clorofila a** presentó la siguiente variación entre estaciones, para el día 1 varió de 28.26 a 2.77 mg·m⁻³ en superficie y de 59.86 a 0.630 mg·m⁻³ en fondo (Fig. 12i y 12j). En comparación con el día 2, donde muestra una disminución de los valores, se registró entre 18.11 a 3.18 mg·m⁻³ en superficie, y de 24.68 a 0.20 mg·m⁻³ para fondo. El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.763$ para el día 1 y de $r = 0.453$ para el día 2.

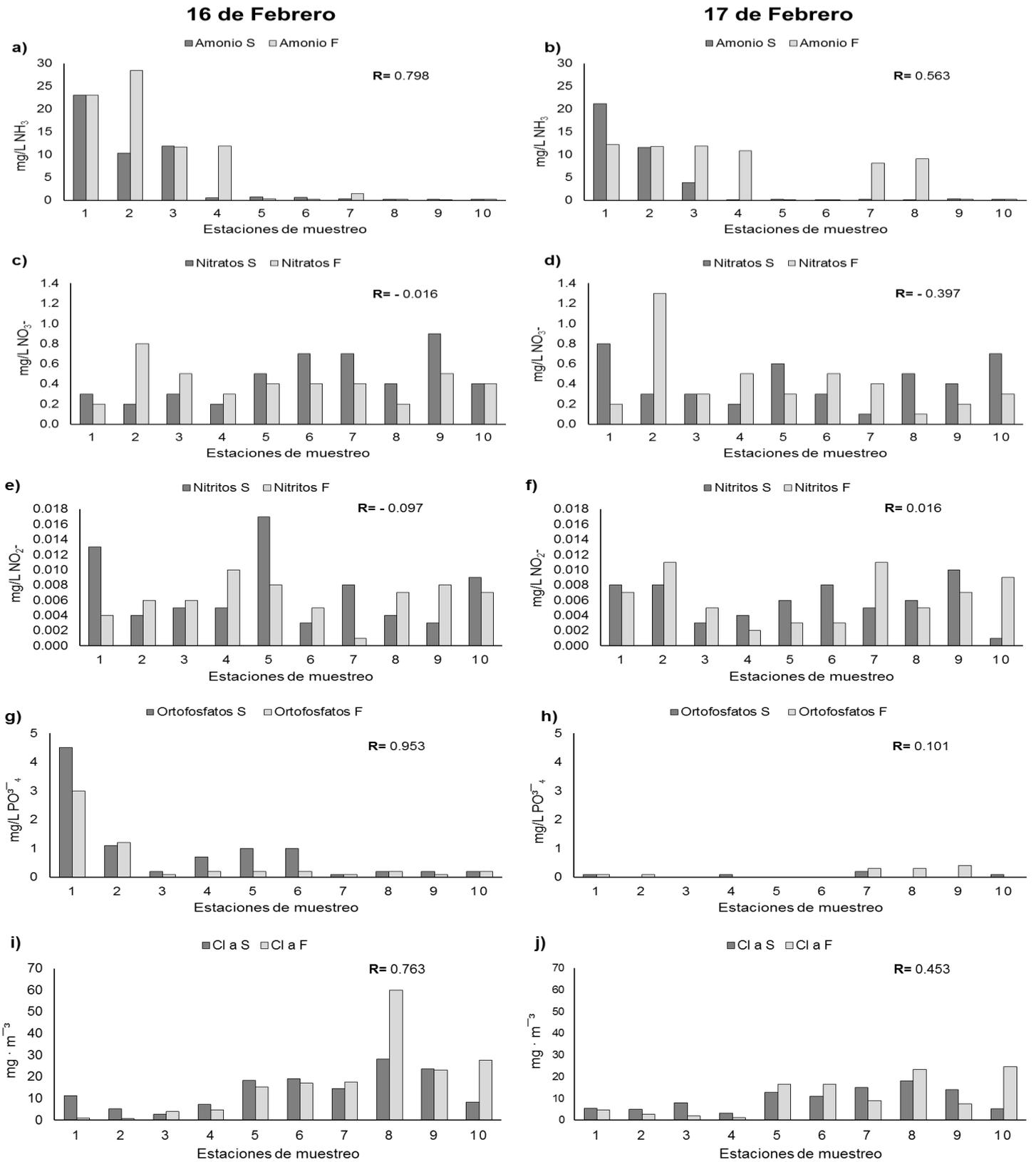


Fig. 12.- Variación espacial de nutrientes y clorofila *a* en febrero 2016. Amonio superficie (S) y fondo (F) (a y b), nitratos superficie (S) y fondo (F) (c y d), nitritos superficie (S) y fondo (F) (e y f), ortofosfatos superficie (S) y fondo (F) (g y h), clorofila *a* superficie (S) y fondo (F) (i y j).

Octubre 2017. La concentración de **amonio** para el día 1 (24 de octubre) fluctuó entre 0.12 y 0.03 mg/L NH₃ para superficie, y de 0.17 y 0.04 mg/L NH₃ para fondo. Para el día 2 (25 de octubre) varió entre 0.06 y 0.03 mg/L NH₃ en superficie, y de 0.08 y 0.04 mg/L NH₃ en fondo. (Fig. 13a y 13b). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = 0.702$ para el primer día y de $r = 0.506$ para el segundo.

La concentración de **nitratos** en la columna de agua del día 1 presentó variaciones entre 0.30 y 0.0 mg/L NO₃- para superficie, y de 0.40 y 0.10 mg/L NO₃- para fondo. El día 2 muestra valores de 0.40 y 0.10 mg/L NO₃- tanto en superficie como en fondo (Fig. 13c y 13d). El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = -0.181$ para el primer día y de $r = 0.048$ para el segundo.

La concentración de **nitritos** del día 1 varió entre 0.13 y 0.003 mg/L NO₂- para superficie, y de 0.012 a 0.002 mg/L NO₂- para fondo (Fig. 13e y 13f). Para el siguiente día, los valores en superficie oscilaron entre 0.009 a 0.003 mg/L NO₂-, y de 0.012 a 0.001 mg/L NO₂- en fondo. El análisis de correlación entre estos niveles fue de $r = -0.275$ para el primer día y de $r = 0.491$ para el segundo.

La concentración de **ortofosfatos** en la columna de agua fue más alta en la boca del sistema. Para el primer día varió de 2.21 a 0.074 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 2.66 a 1.17 mg/L PO₄³⁻ en fondo. Durante el segundo día se registraron valores de 2.25 a 0.84 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 1.31 a 0.88 mg/L PO₄³⁻ para fondo (Fig. 13g y 13h). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = -0.152$ para el primer día y de $r = -0.248$ para el segundo.

La concentración de **clorofila a** presenta una amplia variación entre estaciones. Para el día 1 mostro valores de 10.35 a 0.20 mg·m⁻³ en superficie y de 9.72 a 0.284 mg·m⁻³ en fondo (Fig. 13i y 13j). Para el día 2 se registraron valores de 11.85 a 1.02 mg·m⁻³ en superficie, y de 7.52 a 0.21 mg·m⁻³ para fondo. El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.294$ para el día 1 y de $r = 0.742$ para el día 2.

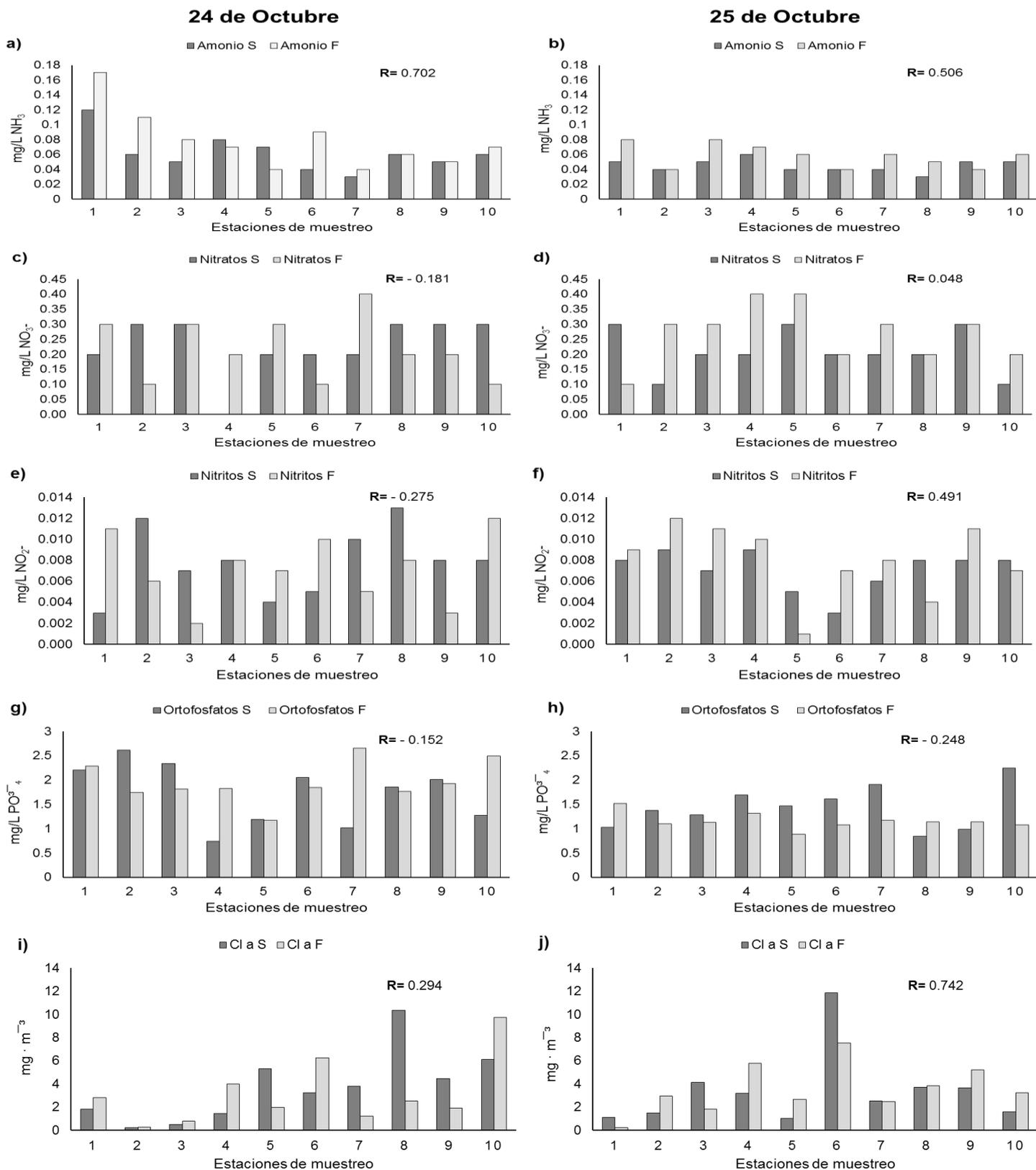


Fig. 13.- Variación espacial de nutrientes y clorofila *a* en octubre 2017. Amonio superficie (S) y fondo (F) (**a y b**), nitratos superficie (S) y fondo (F) (**c y d**), nitritos superficie (S) y fondo (F) (**e y f**), ortofosfatos superficie (S) y fondo (F) (**g y h**), clorofila *a* superficie (S) y fondo (F) (**i y j**).

Febrero 2018. La concentración de **amonio** para el día 1 (13 de febrero) fluctuó entre 0.04 y 0.01 mg/L NH₃ para superficie, y de 0.96 y 0.01 mg/L NH₃ para fondo. Para el día 2 (14 de febrero) varió entre 0.10 y 0.0 mg/L NH₃ en superficie, y de 0.12 y 0.10 mg/L NH₃ en fondo. (Fig. 14a y 14b). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = -0.205$ para el primer día y de $r = 0.052$ para el segundo.

La concentración de **nitratos** en la columna de agua del día 1 presentó variaciones entre 0.40 y 0.10 mg/L NO₃⁻ para superficie, y de 0.30 y 0.20 mg/L NO₃⁻ para fondo. Para el día 2 fluctuó entre 0.30 y 0.10 mg/L NO₃⁻ en superficie, y de 0.50 y 0.20 mg/L NO₃⁻ para fondo (Fig. 14c y 14d). El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.506$ para el primer día y de $r = 0.001$ para el segundo.

La concentración de **nitritos** del día 1 varió entre 0.008 y 0.001 mg/L NO₂⁻ tanto como en superficie y para fondo (Fig. 14e y 14f). Para el siguiente día, los valores en superficie oscilaron entre 0.008 a 0.005 mg/L NO₂⁻, y de 0.010 a 0.002 mg/L NO₂⁻ para fondo. El análisis de correlación entre estos niveles fue de $r = 0.001$ para el primer día y de $r = 0.175$ para el segundo.

La concentración de **ortofosfatos** en la columna de agua para el primer día varió de 2.61 a 0.10 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 1.75 a 1.02 mg/L PO₄³⁻ en fondo. Durante el segundo día se registraron valores de 1.71 a 0.83 mg/L PO₄³⁻ en superficie y de 1.72 a 1.16 mg/L PO₄³⁻ para fondo (Fig. 14g y 14h). El análisis de correlación entre niveles fue de $r = 0.122$ para el primer día y de $r = 0.079$ para el segundo.

La concentración de **clorofila a** presenta una amplia variación entre estaciones. Para el día 1 mostró valores de 12.07 a 1.03 mg·m⁻³ en superficie y de 12.94 a 1.28 mg·m⁻³ en fondo (Fig. 14i y 14j). En comparación con el día 2, donde muestra una disminución en fondo, se registraron valores de 12.88 a 0.18 mg m⁻³ en superficie, y de 6.15 a 0.66 mg m⁻³ para fondo. El análisis de correlación entre superficie y fondo fue de $r = 0.642$ para el día 1 y de $r = 0.145$ para el día 2.

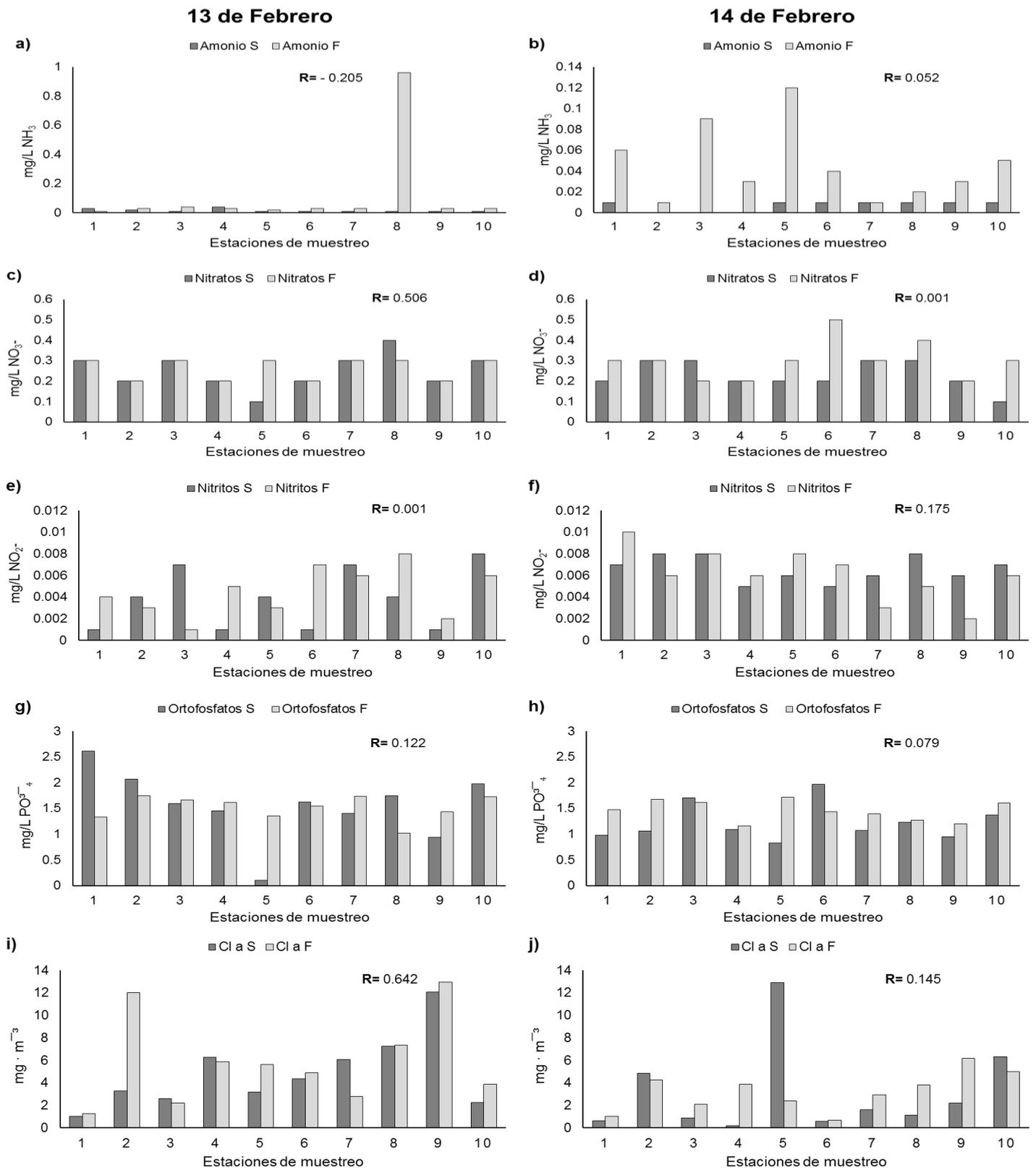


Fig. 14.- Variación espacial de nutrientes y clorofila a en febrero 2018. Amonio superficie (S) y fondo (F) (**a y b**), nitratos superficie (S) y fondo (F) (**c y d**), nitritos superficie (S) y fondo (F) (**e y f**), ortofosfatos superficie (S) y fondo (F) (**g y h**), clorofila a superficie (S) y fondo (F) (**i y j**).

Variación espacio temporal anualizada de la concentración de nutrientes y clorofila a

La variación espacio temporal de las concentraciones de nutrientes y clorofila a de las series de datos por estación y por mes de octubre 2014 a febrero 2018 se muestran en la figura 15 y en las tablas 4 y 5.

Amonio. Este nutriente no presentó variaciones entre estaciones. El valor promedio máximo en superficie se obtuvo en la estación 1 con un valor de 3.79 ± 8.57 mg/L NH_3 , en fondo se registró en la estación 2 con un valor de 4.66 ± 8.78 mg/L NH_3 (Fig. 15a). En comparación los mínimos se presentaron para superficie y fondo en la estación 10 (0.10 ± 0.09 y 0.12 ± 0.08 mg/L NH_3). La concentración de amonio entre estaciones tanto en superficie como fondo no presentan diferencias significativas, KW-H (9,120) = 1.3211, $p = 0.9983$, y KW-H (9,120) = 2.64, $p = 0.9769$ respectivamente.

En febrero 2016 se obtuvieron los valores promedio máximos de amonio en la columna de agua, tanto para superficie como para fondo con 4.29 ± 7.29 mg/L y 6.03 ± 0.81 NH_3 respectivamente (Fig. 15b). Los mínimos para superficie se registraron en febrero 2018 (0.010 ± 0.009 mg/L NH_3) y para fondo en febrero 2015 (0.052 ± 0.039 mg/L NH_3). Los promedios por estación y mes, su desviación estándar y la diferencia entre niveles se muestran en las tablas 4 y 5. Temporalmente el amonio presenta diferencias significativas entre meses de estudio tanto en superficie (KW-H (5,120) = 106.9882, $p = 0.0001$) como en fondo (KW-H (5,120) = 89.9316, $p = 0.0001$).

Nitratos. La concentración promedio de nitratos por estación mostró sus valores máximos en superficie en las estaciones 8 y 9 con 0.41 ± 0.39 y 0.41 ± 0.49 mg/L NO_3^- respectivamente y para fondo se presentó en la estación 2 (0.51 ± 0.37 mg/L NO_3^-) (Fig. 15c). La estación con menor concentración de nitratos en superficie fue la 3 (0.24 ± 0.13 mg/L NO_3^-) y la de fondo fue la estación 1 (0.27 ± 0.15 mg/L NO_3^-). En general se comparten valores similares entre estaciones tanto en superficie como en fondo (Tabla 4). La concentración de nitratos entre estaciones, tanto en superficie como fondo no presentaron diferencias significativas, F (9,110) = 0.8674, $p = 0.5566$, y F (9,110) = 0.6215, $p = 0.7766$ respectivamente.

Los nitratos mostraron variabilidad entre meses. El máximo valor se registró en octubre 2014 con promedio de 0.470 ± 0.50 mg/L NO_3^- en superficie y 0.550 ± 0.60 mg/L NO_3^- en fondo, mientras que los valores mínimos fueron registrados en febrero 2015 con promedios de 0.150 ± 0.068 mg/L NO_3^- en superficie y 0.195 ± 0.082 mg/L NO_3^- en fondo (Fig. 15d). Los promedios por estación y mes, su desviación estándar y la diferencia entre niveles se

muestran en las tablas 4 y 5. Se presentaron diferencias significativas entre meses para los nitratos tanto en superficie (KW-H (5,120) = 32.0254, $p = 0.00001$) como en fondo (KW-H (5,120) = 41.9212, $p = 0.00001$).

Nitritos. Los nitritos mostraron pequeñas variaciones entre estaciones, presentando su mayor promedio en superficie para la estación 2 (0.009 ± 0.010 mg/L NO_2^-) y para fondo en la estación 10 (0.010 ± 0.004 mg/L NO_2^-) (Fig. 15e). Los mínimos para superficie se presentaron en las estaciones 3, 4, 9 y 10 (0.006 ± 0.003 mg/L NO_2^-) y para fondo en la estación 1 (0.004 ± 0.006 mg/L NO_2^-). Los promedios por estación y su desviación estándar se muestra en la tabla 4. La concentración de nitritos, entre estaciones, tanto en superficie como fondo no presentaron diferencias significativas, $F(9,110) = 0.5282$, $p = 0.8514$, y $F(9,110) = 0.4641$, $p = 0.8958$ respectivamente.

Entre meses los valores promedio máximos se presentaron en febrero 2015 (0.010 ± 0.009 mg/L NO_2^- en superficie y 0.011 ± 0.008 mg/L NO_2^- en fondo), mientras que los mínimos fueron obtenidos en febrero 2018 (0.005 ± 0.002 mg/L NO_2^- en superficie y fondo respectivamente) (Fig. 15f). Los promedios mensuales, su desviación estándar y la diferencia entre niveles se muestran en la tabla 5. No se presentaron diferencias significativas entre meses en superficie (KW-H (5,120) = 8.0853, $p = 0.1516$), sin embargo, si se obtuvieron para fondo (KW-H (5,120) = 31.9205, $p = 0.00001$).

Ortofosfatos. Los valores de ortofosfatos mostraron poca variación entre estaciones, el promedio máximo en superficie se observó en la estación 6 con un valor de 1.51 ± 1.03 mg/L PO_4^{3-} y de 2.20 ± 4.22 mg/L PO_4^{3-} en la estación 8 para fondo (Fig. 15g). La menor concentración en superficie se observó en la estación 9 (1.18 ± 1 mg/L PO_4^{3-}) y en la estación 2 para fondo (0.88 ± 0.67 mg/L PO_4^{3-}). La concentración de ortofosfatos, entre estaciones, tanto en superficie como fondo no presentan diferencias significativas, $F(9,110) = 0.1952$, $p = 0.9943$, y KW-H (9,120) = 4.7344, $p = 0.8568$ respectivamente.

En febrero 2015 se obtuvo el valor promedio mayor en superficie, con 2.26 ± 0.83 mg/L PO_4^{3-} y en fondo en octubre 2015 con 2.12 ± 3.66 mg/L PO_4^{3-} (Fig. 15h). Mientras que el valor mínimo para superficie se registró en octubre 2014 (0.300 ± 0.335 mg/L PO_4^{3-}) y para fondo en febrero 2016 (0.335 ± 0.679 mg/L PO_4^{3-}). Los promedios por estación y mes, su desviación estándar y la diferencia entre niveles se muestra en la tabla 5. Los ortofosfatos indicaron diferencias significativas entre meses en superficie (KW-H (5,120) = 72.3592, $p = 0.0001$), así como en fondo (KW-H (5,120) = 49.7417, $p = 0.00001$).

Clorofila a. La concentración de clorofila presentó valores bajos hacia la boca marina y más altos hacia la cabecera del sistema. Los valores promedio mayores se registraron en la estación 8 tanto en superficie como en fondo con 8.67 ± 7.99 y 13.69 ± 17.31 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ respectivamente (Fig. 15i). Los menores para superficie se obtuvieron en la estación 4 (2.89 ± 2.34 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) y en fondo para la estación 1 (2.46 ± 1.88 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$). Los promedios por estación y su desviación estándar se muestra en la tabla 4. Los valores de clorofila a entre estaciones tanto en superficie como fondo presentaron diferencias significativas, KW-H (9,120) = 17.4598, $p = 0.0420$, y KW-H (9,120) = 19.3477, $p = 0.0224$ respectivamente. Durante los meses de estudio, los valores máximos de clorofila a se registraron en febrero 2016 con 11.81 ± 7.08 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ en superficie y 13.95 ± 14.04 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ en fondo, mientras que, los mínimos se presentaron en octubre 2015 con 2.35 ± 1.26 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ en superficie y 1.87 ± 0.70 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ en fondo (Fig. 15j). Los promedios mensuales, su desviación estándar y la diferencia entre niveles se muestran en la tabla 5. Se encontraron diferencias significativas entre meses para valores de superficie (KW-H (5,120) = 44.6009, $p = 0.00001$), así como para los de fondo (KW-H (5,120) = 30.1782, $p = 0.00001$).

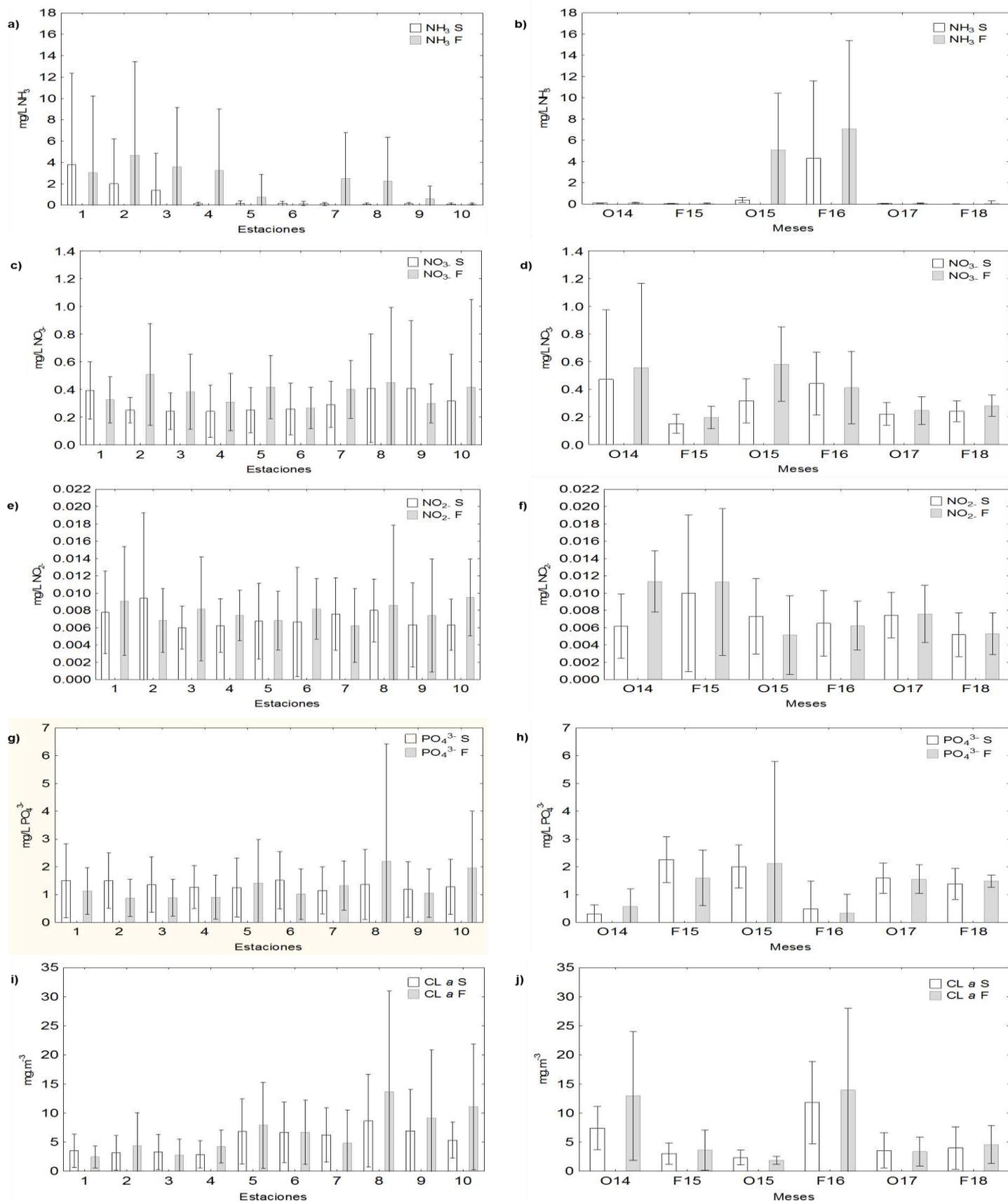


Fig. 15.- Variación promedio espacial y temporal de la concentración de nutrientes y clorofila a. Amonio superficie (S) y fondo (F) (**a y b**), nitratos superficie (S) y fondo (F) (**c y d**), nitritos superficie (S) y fondo (F) (**e y f**), ortofosfatos superficie (S) y fondo (F) (**g y h**), clorofila a superficie (S) y fondo (F) (**i y j**).

Tabla 4. Promedio y desviación estándar de las concentraciones de nutrientes y clorofila a en superficie y fondo por estaciones de muestreo en escala anualizada.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NH₃ S	3.79±8.57	2.01±4.21	1.39±3.48	0.15±0.16	0.17±0.22	0.17±0.22	0.12±0.13	0.11±0.12	0.13±0.13	0.10±0.09
NH₃ F	3.05±7.17	4.66±8.78	3.59±5.58	3.25±5.77	0.76±2.12	0.16±0.20	2.49±4.32	2.25±4.11	0.59±1.18	0.12±0.08
NO₃ S	0.39±0.21	0.25±0.09	0.24±0.13	0.24±0.19	0.25±0.16	0.26±0.19	0.29±0.17	0.41±0.39	0.41±0.49	0.32±0.34
NO₃ F	0.33±0.17	0.51±0.37	0.38±0.27	0.31±0.21	0.42±0.23	0.27±0.15	0.40±0.21	0.45±0.54	0.30±0.14	0.42±0.63
NO₂ S	0.007±0.004	0.009±0.010	0.006±0.002	0.006±0.003	0.007±0.004	0.007±0.006	0.008±0.004	0.008±0.004	0.006±0.005	0.006±0.003
NO₂ F	0.004±0.006	0.007±0.004	0.008±0.006	0.007±0.003	0.007±0.003	0.008±0.003	0.006±0.004	0.009±0.009	0.007±0.007	0.010±0.004
PO₄³⁻ S	1.5±1.33	1.50±0.99	1.36±1.0	1.27±0.77	1.26±1.06	1.51±1.03	1.15±0.84	1.37±1.26	1.18±1	1.28±0.99
PO₄³⁻ F	1.14±0.84	0.88±0.67	0.89±0.67	0.91±0.79	1.42±1.55	1.02±0.91	1.33±0.89	2.20±4.22	1.06±0.87	1.96±2.05
CL a S	3.52±2.87	3.18±2.96	3.28±3.05	2.89±2.34	6.87±5.61	6.68±5.23	6.23±4.70	8.67±7.99	6.96±7.12	5.33±3.10
CL a F	2.46±1.88	4.40±5.64	2.78±2.78	4.23±2.83	7.89±7.38	6.72±5.51	4.84±5.65	13.69±17.31	9.13±11.77	11.05±10.82

Tabla 5. Promedio, desviación estándar y diferencia entre superficie y fondo de las concentraciones de nutrientes y clorofila a entre meses de muestreo.

	Octubre 2014		Febrero 2015		Octubre 2015		Febrero 2016		Octubre 2017		Febrero 2018	
		Dif. \bar{x}										
NH₃ S	0.098±0.014		0.040±0.014		0.388±0.249		4.29±7.29		0.054±0.020		0.010±0.009	
		0.03		0.012		4.732		2.8		0.014		0.07
NH₃ F	0.128±0.049		0.052±0.039		5.12±5.33		7.09±8.28		0.068±0.03		0.080±0.208	
NO₃ S	0.470±0.50		0.150±0.068		0.315±0.159		0.440±0.225		0.220±0.083		0.240±0.075	
		0.08		0.045		0.265		0.03		0.025		0.04
NO₃ F	0.550±0.60		0.195±0.082		0.580±0.268		0.410±0.261		0.245±0.099		0.280±0.076	
NO₂ S	0.006±0.003		0.010±0.009		0.007±0.004		0.007±0.003		0.007±0.002		0.005±0.002	
		0.005		0.001		0.002		0.001		0.001		0.0
NO₂ F	0.011±0.003		0.011±0.008		0.005±0.004		0.006±0.002		0.008±0.003		0.005±0.002	
PO₄³⁻ S	0.300±0.335		2.26±0.83		2±0.77		0.485±1.01		1.58±0.54		1.38±0.55	
		0.275		0.67		0.12		0.13		0.03		0.1
PO₄³⁻ F	0.575±0.623		1.59±1		2.12±3.66		0.335±0.679		1.55±0.517		1.48±0.21	
CL a S	7.41±3.69		3.02±1.86		2.35±1.26		11.81±7.08		3.58±3.04		3.97±3.63	
		5.54		0.59		0.48		2.14		0.22		0.58
CL a F	12.95±11.07		3.61±3.42		1.87±0.70		13.95±14.04		3.36±2.46		4.55±3.25	

Caracterización espacio temporal de las variables fisicoquímicas y clorofila a

El análisis de la distribución espacial de las variables fisicoquímicas y clorofila a indicó que existen gradientes desde la boca marina hacia la cabecera del sistema, esto es, existen áreas o zonas de la laguna con comportamientos similares entre estas, las cuales tiene relación con las características hidrológicas propias del sistema. La figura 16 presenta de forma integrada el análisis de agrupamientos de los factores fisicoquímicos, los nutrientes y la concentración de clorofila a en el sistema lagunar.

El dendograma de la figura 16a muestra el comportamiento de las variables **fisicoquímicas** donde se diferenciaron 3 grupos. El primero incluyó las estaciones 1, 2, 3 y 4 que abarcan la boca marina y el canal de comunicación, donde predominan mayores salinidades de 25 a 15 ups, con variaciones de temperatura de 24 a 31° C para los meses de octubre y de 22 a 24°C para los meses de febrero, menor oxígeno disuelto que el resto del sistema (3 a 5 mg/L), y mayor profundidad de 1.5 a 3.5 m. El segundo grupo abarcó las estaciones 5, 7 y 8 que se localizan en la parte central de la laguna y se caracteriza por ser la zona de mezcla en donde convergen el agua marina con el agua dulce proveniente de los ríos, presenta salinidades de 15 a 5 ups, con temperaturas de 26 a 27°C, oxígeno disuelto de 4 a 5 mg/L, y profundidades de 2.5 a 1.20 m. El tercer grupo incluyó las estaciones 6, 9 y 10 hacia la zona sur del sistema con mayor influencia fluvial. Presentó salinidades menores de 1.62 a 7.35 ups, con temperaturas de 26 y 28°C, mayor oxígeno disuelto (4 a 6 mg/L) y menor profundidad de 1.5 a 0.80 m.

La figura 16b muestra el dendograma de la concentración de **nutrientes** en el sistema, igualmente con 3 conglomerados. El primero formado por las estaciones 1, 2 y 3 que corresponden a la boca y parte del canal de la laguna, donde predomina una mayor concentración de amonio (1.39 a 4.66 mg/L NH₃), en comparación con el resto del sistema, nitritos (0.004 a 0.009 mg/L NO₂) y ortofosfatos de 0.89 a 1.5 mg/L PO₄³⁻. El segundo grupo incluyó las estaciones 4, 7 y 8 localizadas en la parte final del canal de marea y zona de mezcla del sistema, destaca alta concentración de amonio en la estación 4 (3.25 mg/L NH₃), y presenta mayor concentración de ortofosfatos en la estación 8 (2.20 mg/L PO₄³⁻). El tercer grupo abarca las estaciones 5, 6, 9 y 10 que se localizan en la parte centro-sur de la laguna donde existe presencia de ríos y se caracteriza por concentraciones de 1.02 a 1.96 mg/L PO₄³⁻.

El dendograma de la figura 16c muestra el comportamiento de la concentración de clorofila a donde solo se diferenciaron 2 grupos. El primero formado por las estaciones 1, 2, 3, 4 y 7 con menor producción fitoplanctónica de 2.96 a 6.23 mg·m⁻³, nuevamente caracterizado por la dinámica de la boca marina y canal principal de comunicación. El segundo grupo estuvo integrado por las estaciones 5, 6, 8, 9 y 10 con mayor biomasa del fitoplancton de 5.33 a 13.69 mg·m⁻³ vinculada a una mayor influencia fluvial.

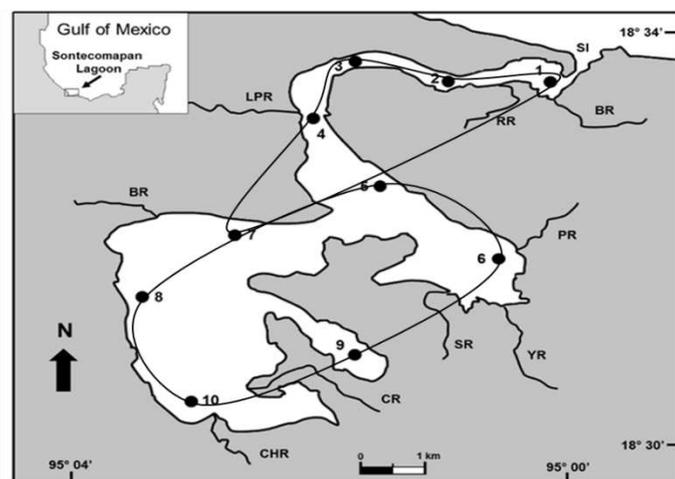
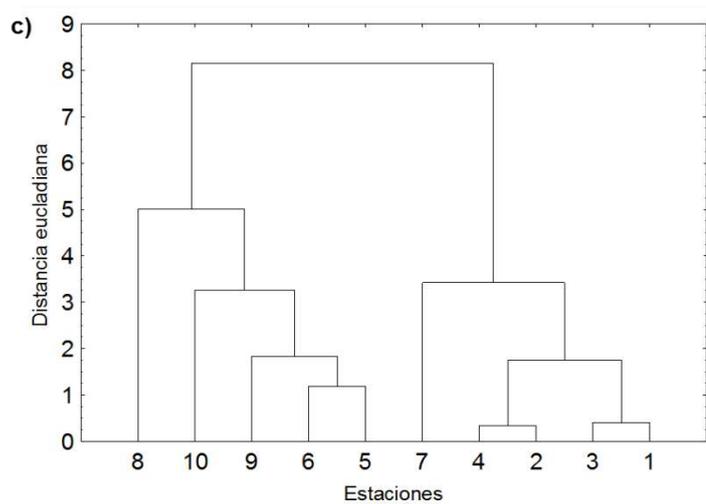
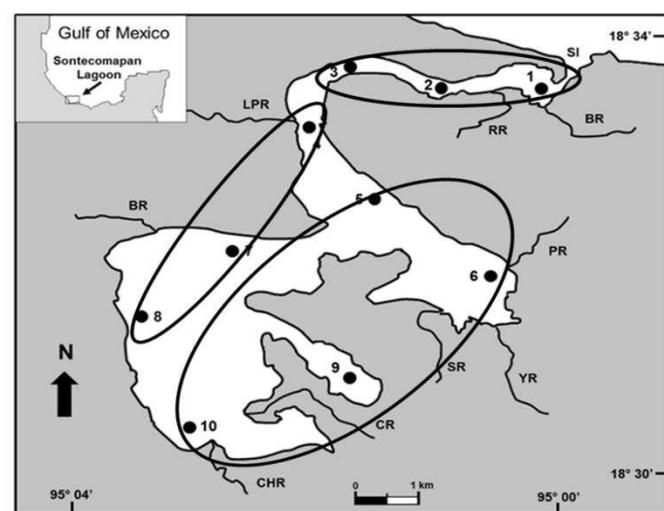
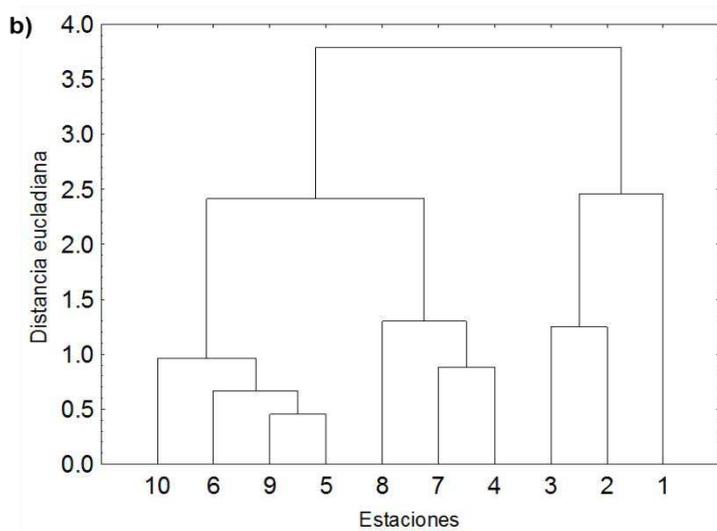
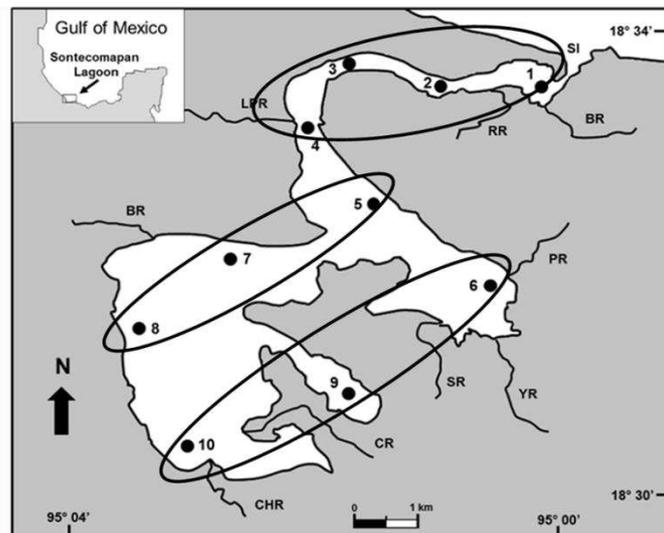
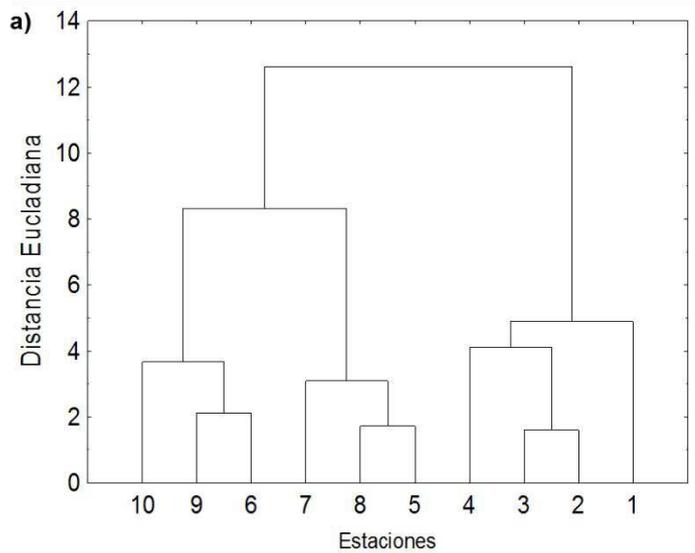


Fig. 16.- Análisis de conglomerados correspondientes a los factores fisicoquímicos (a), concentración de nutrientes (b) y concentración de clorofila a (c).

Relación espacio temporal de la biomasa fitoplanctónica con los factores fisicoquímicos y nutrientes

La correlación de los factores fisicoquímicos y nutrientes sobre la producción de biomasa fitoplanctónica se muestra en las tablas 6 y 7.

Para los meses de febrero (Tabla 6), se encontraron correlaciones inversas entre la concentración de clorofila a de superficie y la salinidad en superficie ($r = -0.795$) y fondo ($r = -0.789$), esto puede deberse a la presencia de la cuña de sal durante estos meses y por la afinidad del fitoplancton a proliferar en condiciones de bajas salinidades. En el caso de la temperatura se presenta una correlación positiva con la clorofila a tanto para superficie como fondo. El análisis de correlación es de $r = 0.819$ y $r = 0.731$, lo cual puede asociarse a que la temperatura es un factor determinante de la producción de biomasa. Otra correlación importante es con el oxígeno disuelto ($r = 0.786$), sin embargo, solo se presenta en la superficie de la columna de agua, lo cual puede verse influenciado por la temperatura y la producción propia del sistema.

Aunado a esto, se encontraron correlaciones inversas entre el pH fondo y clorofila a de fondo, en donde se determinaron condiciones ligeramente ácidas. El análisis de correlación es de $r = -0.769$. Así mismo tanto la profundidad como la transparencia presentan correlaciones inversas debido a que estos factores son limitantes para la producción fitoplanctónica por la baja penetración de la luz en la columna de agua. El análisis de correlación es de $r = -0.695$ y $r = -0.817$.

En cuanto a los nutrientes y la clorofila a, se muestra una correlación inversa para el amonio en fondo, ya que a menor concentración de amonio se puede inhibir la incorporación de componentes nitrogenados por los productores primarios.

Para los meses de octubre (Tabla 7) se encontraron correlaciones inversas entre la concentración de clorofila a en fondo con la salinidad en superficie ($r = -0.702$) y fondo ($r = -0.653$), lo cual podría atribuirse a que el comportamiento estacional de la biomasa fitoplanctónica está asociada a bajas salinidades. Otro factor que presentó correlación inversa con la producción de biomasa tanto en superficie como en fondo fue el pH, debido al intercambio de agua salada y agua dulce, lo que presenta un pH ligeramente alcalino. Las correlaciones entre pH de superficie y clorofila a son de $r = -0.711$, $r = -0.734$; las correlaciones entre pH fondo y clorofila a es de $r = -0.673$ y $r = -0.750$.

El análisis de correlación de clorofila a y profundidad fue de $r = -0.815$ y $r = -0.653$. Así como la profundidad, la transparencia también mostró valores de correlación inversa ($r = -0.835$ y

$r = -0.738$), cabe destacar que la profundidad y la transparencia son factores limitantes en la producción.

En cuanto a los nutrientes y la relación con la producción de clorofila **a**, para estos meses solo se presentó correlación positiva con los ortofosfatos tanto en superficie como en fondo ($r = 0.720$ y $r = 0.725$), por que a mayor concentración de ortofosfatos existe una mayor producción de biomasa fitoplanctónica.

Tabla 6. Correlaciones entre clorofila a, parámetros fisicoquímicos y nutrientes de superficie y fondo para los m
 resaltados indican las correlaciones más altas.

	SS	SF	TS	TF	OS	OF	PHS	PHF	PROF	TRANS	NH ₃ S	NH ₃ F	NO ₃ - S	NO ₃ - F
Cl <u>a</u> S	-0.795	-0.691	0.819	0.753	0.786	-0.120	-0.165	-0.336	-0.695	-0.817	-0.573	-0.762	0.573	-0.421
Cl <u>a</u> F	-0.789	-0.645	0.731	0.778	0.418	-0.255	-0.388	-0.769	-0.452	-0.735	-0.593	-0.639	0.397	-0.375

Tabla 7. Correlaciones entre clorofila a, parámetros fisicoquímicos y nutrientes de superficie y fondo para los m
 resaltados indican las correlaciones más altas.

	SS	SF	TS	TF	OS	OF	PHS	PHF	PROF	TRANS	NH ₃ S	NH ₃ F	NO ₃ - S	NO ₃ - F
Cl <u>a</u> S	-0.480	-0.522	0.473	0.381	-0.089	0.024	-0.711	-0.673	-0.815	-0.835	-0.376	-0.145	0.312	0.282
Cl <u>a</u> F	-0.702	-0.653	0.003	0.199	0.071	0.245	-0.734	-0.750	-0.750	-0.738	-0.323	-0.333	0.457	0.399

Estado trófico

De acuerdo con el índice del estado trófico TRIX, el sistema lagunar presenta valores espacio temporales de 1.0 a 2.2 (tabla 8), lo cual permitió clasificarlo como un sistema oligotrófico, que se caracteriza por tener aguas poco productivas. Cabe destacar que, en la mayoría de los meses de estudio, el fondo de la columna de agua siempre presentó mayores valores del índice (Fig. 17). Este comportamiento se asoció con una mayor concentración de nutrientes en el fondo de la columna de agua (tabla 4).

El estado oligotrófico se caracteriza por tener una baja productividad de biomasa fitoplanctónica, baja concentración de nutrientes y alta transparencia en la columna de agua, como lo observado en Laguna de Sontecomapan.

Tabla 8. Variación mensual promedio entre superficie y fondo del índice del estado trófico TRIX.

Meses	SUPERFICIE	FONDO
O14	1.16	1.89
F15	1.350	2.210
O15	1.727	2.178
F16	1.477	1.846
O17	1.637	1.676
F18	1.010	1.459

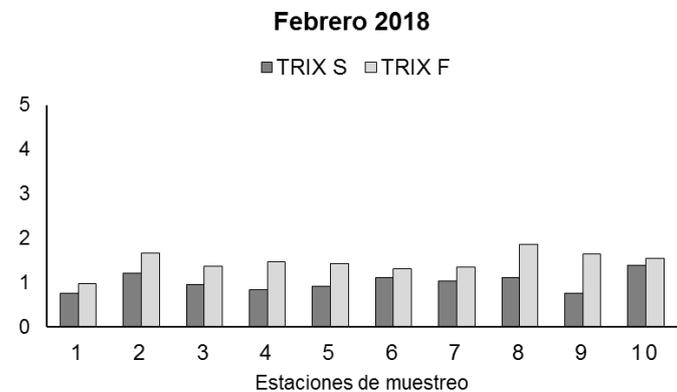
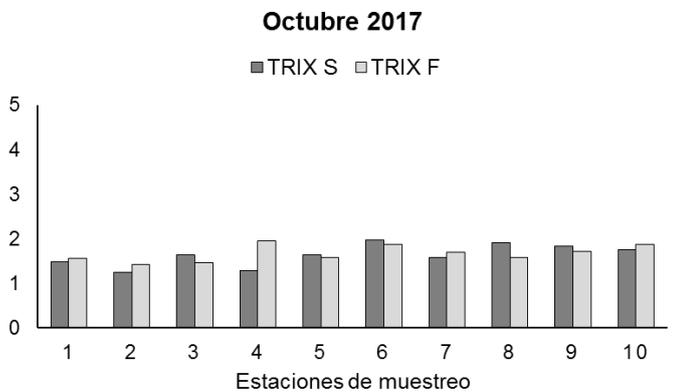
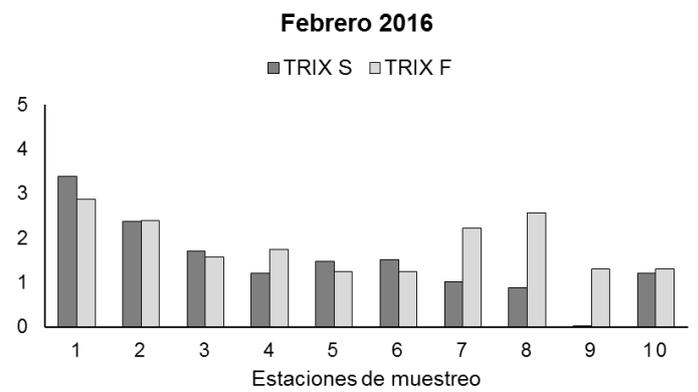
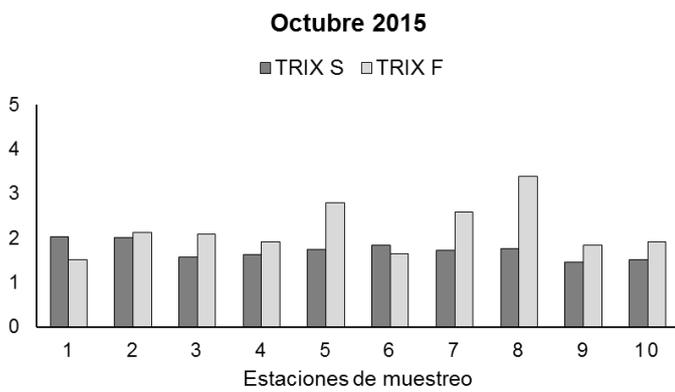
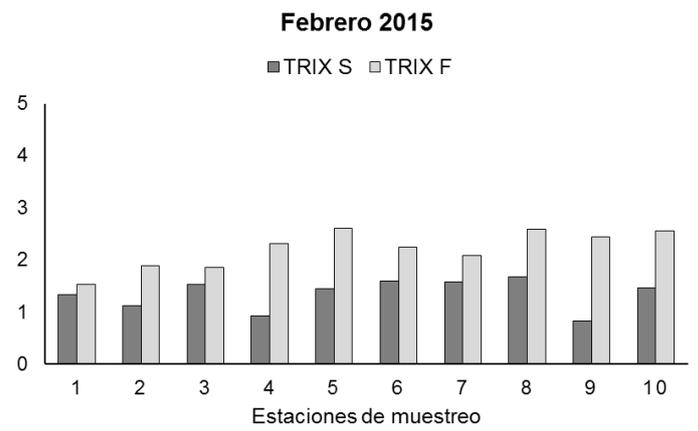
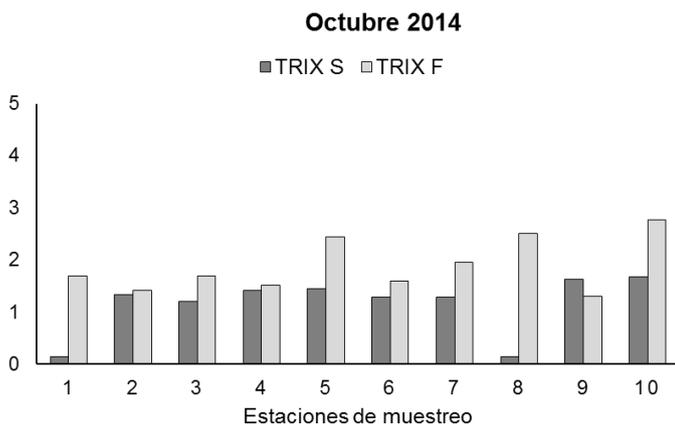


Fig. 17.- Variación mensual del índice del estado trófico TRIX en la columna de agua para superficie (S) y fondo (F).

DISCUSIÓN

Variación espacio temporal de los parámetros fisicoquímicos

La variabilidad de los parámetros fisicoquímicos en la Laguna de Sontecomapan estuvo influenciada por la intrusión de agua marina proveniente del Golfo de México y el agua dulce que proviene de los ríos adyacentes que desembocan en el cuerpo de agua.

Durante el periodo de octubre de 2014 a febrero de 2018, la salinidad espacialmente presento un gradiente desde la boca hacia el interior de la laguna hasta la zona de descarga de ríos, además, siempre se detectó la presencia de una cuña de sal. Este comportamiento fue descrito anteriormente por Aké y Vázquez (2008), Benítez-Díaz *et al.* (2014), López-Portillo *et al.* (2017) y Aguirre-León *et al.* (2018) indicando valores más altos en la boca y el canal de comunicación que disminuyeron hacia el interior del sistema. Temporalmente la salinidad mostro diferencias entre los meses analizados, los promedios más altos se presentaron en los meses de febrero, a consecuencia de una menor precipitación, mientras que, los valores más bajos de salinidad se registraron en los meses de octubre, debido a mayores precipitaciones, descargas de ríos y el efecto de la temporada de “nortes”. Por lo que, la fluctuación de la salinidad tanto espacial como temporal se relacionó con el balance de entrada de agua dulce por ríos, precipitaciones y cuña salina y estuvo estrechamente relacionada con la estacionalidad de las temporadas climáticas (Benítez-Díaz *et al.*, 2014; López-Ortega *et al.*, 2012).

La temperatura es considerada una de las variables fisicoquímicas más importantes en las lagunas costeras, ya que afecta de forma directa a la salinidad, la saturación de oxígeno y los procesos biogeoquímicos (Magaña, 2004). En la Laguna de Sontecomapan la temperatura espacialmente fue similar a lo largo del sistema con variación de 1 a 2 °C entre estaciones de muestreo y entre niveles de la columna de agua. Castellanos (2002) y Rodríguez-Varela *et al.* (2010) registraron valores similares de temperatura para el sistema, lo cual se relacionó con la penetración de la luz solar en la columna de agua que se dispersa mejor por ser un sistema poco profundo. Temporalmente, se registró la temperatura promedio más alta para octubre de 2015 y la más baja para febrero de 2018, lo cual se relaciona con la temporalidad térmica de la región, en particular con el efecto de los “nortes”, lo cual se reflejó tanto en la temperatura ambiente como en la del cuerpo de agua; Castellanos (2002) y Aguirre-León *et al.* (2018) reportaron un comportamiento similar en Sontecomapan.

El oxígeno disuelto presento poca variación espacial a lo largo del sistema, sin embargo, siempre se observó un patrón vertical entre niveles, registrándose los valores más altos en superficie y los más bajos en fondo, lo cual se relacionó con el efecto de las mareas y el efecto de los vientos que intercambian oxígeno con la superficie del agua (Aguirre-León *et al.*, 2018). López-Portillo *et al* (2017) y Castellanos (2002) registraron valores altos en la superficie debido a la actividad fotosintética a diferencia de Aké y Vázquez (2008) donde registran que el oxígeno disuelto no mostro un patrón estacional. Temporalmente se observaron diferencias entre meses de muestreo, registrándose el más bajo en octubre de 2017 y el más alto en febrero de 2018, lo cual se relacionó con la frecuencia e intensidad de los “nortes” (Aguilar, 2015). Asimismo, la variación en la concentración de oxígeno se ve afectada también por la radiación solar y la temperatura (Benítez-Díaz *et al.*, 2014).

El pH del agua espacialmente presento poca variación a lo largo del sistema, se mantuvo en un rango neutro ligeramente alcalino, sin embargo, entre niveles se observó un patrón en donde suele ser más alcalino en la superficie. De la Lanza-Espino (1994) y Magaña (2004) registraron el mismo comportamiento en otras lagunas costeras mexicanas, encontrando que el comportamiento del pH puede tener amplios intervalos debido a la intrusión tanto del agua marina como del agua epicontinental y su mezcla. Temporalmente, el pH muestra pequeñas variaciones, registrándose el más bajo en octubre de 2015 y el más alto en octubre de 2017. Este comportamiento se debió principalmente a las variaciones en las precipitaciones y las entradas de agua marina, ya que donde existe una influencia más pronunciada de agua oceánica, suele tener un pH mayor que las de origen epicontinental (Magaña, 2004).

La profundidad y la transparencia espacialmente presentaron valores mayores desde la boca y menores hacia el interior de la laguna. En escala temporal, la menor profundidad se presentó en octubre 2014 y la mayor en febrero 2018. La mayor transparencia se presentó en febrero de 2016 y la menor en febrero de 2018. Estos parámetros están influenciados por los fenómenos de efecto “norte”, la intensidad de la precipitación y el efecto de los vientos (Cabral, 2007). Un comportamiento similar en esta laguna fue registrado por Zamora (2002) y Rodríguez-Varela *et al.* (2010).

Relacionado con la distribución espacio temporal de los parámetros fisicoquímicos fue posible determinar tres ambientes bien definidos en el sistema, los cuales reflejaron el

comportamiento ambiental ligado a la interacción de este con el mar, así como una zona de mezcla central en la laguna y otra con permanente influencia fluvial.

Variación espacio temporal de la concentración de nutrientes y clorofila a

Las lagunas costeras han sido consideradas como sistemas muy productivos debido a los niveles relativamente elevados de nutrientes en sus aguas (Alcántara *et al.*, 2012). Durante el periodo de estudio de octubre 2014 a febrero de 2018 en la laguna de Sontecomapan, no se encontró una amplia variación en la concentración de nutrientes.

La concentración de amonio presento poca variación espacial, sin embargo, se observó un patrón en donde los mayores valores se presentaron hacia la boca de la laguna. No se presentaron diferencias entre niveles, Cervantes-Duarte *et al.* (2017) y Alcántara *et al.* (2012) mencionan que el patrón de incremento/decremento de la concentración de este nutriente se ve fuertemente influenciado por la marea y está asociada con la dilución y mezcla del agua oceánica. Temporalmente el amonio presentó bajas concentraciones y menor variabilidad en el área de estudio, sin embargo, se observa que en los meses de octubre de 2015 y febrero de 2016 hay un incremento en comparación con el resto de los meses, lo cual se atribuye a los arrastres fluviales y escurrimientos periféricos, los cuales transportan mayor cantidad de nutrientes disueltos y particulados (Escobedo, 2010). Rodríguez (2006) menciona que la distribución del amonio es altamente variable, dependiendo del nivel de productividad y de la cantidad de materia orgánica que entra al sistema.

Los nitratos y los nitritos presentaron valores desde cero a concentraciones bajas, sin embargo, ambos presentan un patrón espacial donde tuvieron mayor concentración en el fondo de la columna de agua y en las estaciones más cercanas a la boca marina. Cervantes-Duarte *et al.* (2010) mencionan que la concentración de estos nutrientes en las aguas costeras se debe a las fuentes y aportes cercanos al entorno terrestre, así como de los procesos biogeoquímicos que se llevan a cabo, a diferencia de los aportes que provienen del océano. Temporalmente la mayor concentración de nitratos se presentó en octubre de 2014. Cervantes-Duarte *et al.* (2010) registra el mismo comportamiento para otra laguna costera en Baja California, México y añade que para época de “nortes” la concentración de estos compuestos probablemente está asociada a los procesos de

divergencia costeros o a la mezcla vertical. Para este estudio la mayor concentración de nitritos se presentó en febrero de 2015 en comparación a la de nitratos que para este mismo mes fue más baja. De la lanza y Gutiérrez (2017) refieren que el aumento relativo de los nitritos respectó a los nitratos puede ser un indicativo de un proceso de nitrificación en los sistemas costeros.

La concentración espacial de ortofosfatos estuvo distribuida de forma más homogénea en el sistema con mínimas variaciones entre niveles. Barreiro-Güemes y Aguirre-León (1999) mencionan que este nutriente se distribuyó de manera homogénea en el sistema Pom-Atasta en Campeche, debido a la mezcla por la marea, las descargas de ríos y los escurrimientos, así como aquellos que provienen de la descomposición de la materia orgánica del mismo sistema. Cabe destacar que la concentración de este nutriente para la Laguna de Sontecomapan es más alto en comparación con otras lagunas costeras del Golfo de México y Golfo de California (Barreiro-Güemes y Aguirre-León, 1999; Varona, 2001 y Cervantes-Duarte *et al.*, 2010). Temporalmente la mayor concentración de ortofosfatos se presentó en octubre de 2015 y la menor en febrero de 2016. Varona (2001) presenta un comportamiento similar en dos lagunas costeras en Chiapas y refiere que, en la época con mayor precipitación los ortofosfatos presentan valores más elevados pudiendo deberse a los escurrimientos provocados por la precipitación o por la entrada de algunos otros productos como fertilizantes o detergentes, provenientes de los deslaves.

Con base en la distribución espacio temporal de la concentración de nutrientes fue posible determinar tres zonas bien definidos en el sistema, similares a las definidas por parámetros fisicoquímicos. Las zonas de nutrientes reflejaron el intercambio con el mar, la mezcla de agua marina y dulce, así como la influencia de los ríos.

Respecto a la distribución y concentración espacial de la clorofila a en el sistema, cabe destacar que las mayores concentraciones se observaron en el fondo de la columna de agua. Estas concentraciones de clorofila a en el fondo se explican por ser un sistema poco profundo, en donde la intensidad solar penetra la columna de agua y por la distribución de los nutrientes para la fotosíntesis (Cervantes-Duarte *et al.*, 2017). Temporalmente los valores de clorofila a presentaron diferencias, registrándose valores más bajos en octubre de 2015, a diferencia de febrero de 2016 donde se presentaron los valores más altos. Este comportamiento se relaciona con los cambios climáticos de los meses analizados (octubre como inicio de “nortes” y febrero como inicio de secas) donde existe menor o mayor

influencia de la incidencia solar, con mayor tiempo de residencia de agua que disminuye la exportación de los nutrientes y por ende una mayor disponibilidad y asimilación, lo que da como resultado una mayor estabilidad en el sistema (Varona, 2001 y Moran-Silva *et al.*, 1997). Los valores de clorofila a en Sontecomapan presentan diferencias espaciales, en donde se distinguen dos ambientes, el primero corresponde a las estaciones cercanas a la boca con las concentraciones más bajas y el segundo que corresponde a las estaciones cercanas a la desembocadura de los ríos donde se observa un aumento significativo de la concentración de clorofila a. Barreiro-Güemes y Aguirre-León (1999) y Varona (2001) mencionan que la razón de la clara estacionalidad de la clorofila a se debe a los cambios que se presentan en el sistema, esto es, los dos ambientes con diferentes concentraciones de clorofila se relacionan, por un lado, con la influencia marina y por otro con la fluvial, lo cual podría indicar la presencia de poblaciones fitoplanctónicas diferentes, una de origen marino costero y otra de procedencia dulceacuícola, no obstante, se requieren más estudios para comprobar este comportamiento.

Caracterización espacio temporal de las variables fisicoquímicas y clorofila a

La caracterización de la Laguna de Sontecomapan mostró que el comportamiento de las variables fisicoquímicas, de los nutrientes y de la clorofila a están relacionadas en escala espacio temporal ya que se observó claramente que los 3 conjuntos de variables mencionados, indican gradientes relacionados con la forma del sistema y su dinámica ambiental determinada por el intercambio de agua marina, el drenaje estacional de los ríos y la presencia de los asentamientos urbanos o rurales en las riberas del sistema.

El primer hábitat (estaciones de la 1 a la 4) integra la boca de comunicación con el mar y el canal de marea a través del cual se realiza el intercambio de agua oceánica. Debido a sus características, se determinaron los valores más altos de salinidad, temperatura, profundidad y transparencia; a diferencia del oxígeno disuelto y la clorofila a, donde se presentaron las concentraciones más bajas del sistema.

El segundo hábitat (estaciones 5, 7 y 8) se caracteriza por ser la zona central de la laguna en donde se realizan los procesos de mezcla de las aguas provenientes del mar y de los ríos adyacentes, por lo tanto, se registran valores intermedios de las variables antes mencionadas. Se registra una concentración media de clorofila a, respecto al tercero.

El tercer ambiente (estaciones 6, 9 y 10) se caracteriza por ser un área semicerrada que está influenciada directamente por las descargas de los ríos, los cuales funcionan como un receptáculo y regenerador de nutrientes, y se refleja en la producción de clorofila **a** en esta zona del sistema, donde se presentaron los valores más altos de oxígeno disuelto por la actividad fotosintética y concentraciones más altas de ortofosfatos. El comportamiento anterior ha sido descrito por Moran-Silva *et al.* (1997) definiendo tres hábitats, Castellanos (2002) definiendo cuatro y Aguirre-León *et al.* (2018) definiendo tres. Esto refleja la variación espacio temporal del sistema a lo largo del año y la importancia ecológica que tiene para los procesos de producción primaria.

Relación espacio temporal de la biomasa fitoplanctónica con los factores ambientales

El análisis de correlación permitió definir la influencia que tienen los parámetros fisicoquímicos sobre la producción de biomasa fitoplanctónica. Tanto en los octubres como en los febreros, la salinidad mostró una correlación inversa con la producción de biomasa fitoplanctónica, esto quiere decir que la salinidad es un factor determinante en la producción primaria. Diversos autores mencionan que esta juega un papel muy importante en la comunidad fitoplanctónica por que define la composición de las microalgas y de esto dependen los organismos dominantes para la producción (Zavala, 2017; Falcao y Vale, 2003; Lara *et al.*, 2015).

Orduña (2012) menciona que la presencia de una cuña salina determina que las especies estén distribuidas en diversos intervalos a lo largo del sistema, es decir que existen especies que se encuentren limitadas al interior de la laguna y especies que tienden más a la zona marina; lo que explica que la salinidad es de las variables relevantes en escala espacio temporal, lo cual fue observado también en este estudio.

A diferencia de la salinidad, la temperatura mostró una relación positiva con la producción de biomasa, cabe destacar que solo se presentó en los meses de febrero. Brown *et al.* (2004) mencionan que la temperatura es un factor determinante en las tasas de crecimiento del fitoplancton, ya que a mayor temperatura existe un incremento exponencial de las actividades metabólicas y las reacciones bioquímicas y por lo tanto es determinante en las tasas de producción de biomasa. En este estudio se observó que fue un factor que determino la producción, específicamente en los meses más cálidos (febreros).

La biomasa fitoplanctónica también tuvo una relación positiva con la saturación de oxígeno, posiblemente como resultado de la actividad fotosintética (Cervantes-Duarte *et al.*, 2017). Para este estudio se observó este mismo comportamiento, lo cual se reflejó relacionado con la estacionalidad climática, esto es, que las mayores concentraciones de oxígeno se presentan en los meses de octubre (“nortes”), sin embargo, en los meses de febrero (inicio de secas) con mayor producción de biomasa el oxígeno depende de los procesos de respiración, fotosíntesis y de la demanda energética por el incremento de la temperatura (Weist, 2001 y Zavala, 2017).

Por otro lado, el pH mostro una relación inversa con la producción de biomasa en ambos periodos de muestreo, ya que, si el pH aumenta, la producción disminuye y viceversa. Este comportamiento se explica porque el cambio de pH en el agua afecta los procesos asociados al crecimiento y metabolismo micro algal, incluyendo la disponibilidad y asimilación de iones por parte de los organismos (Zavala, 2017). Diversos autores coinciden en que el crecimiento de las microalgas es óptimo a un pH neutro 7.0 – 8.0 (Bermúdez *et al.*, 2002, Ramos, 2014 y Mondragón, 2005), lo cual coincidió con este estudio.

En cuanto a la profundidad y transparencia, se observó una relación inversa con la producción en ambos periodos. Estos factores son considerados indispensables para la producción y actúan uno en función del otro, es decir, que la transparencia presenta un comportamiento inverso a la profundidad. Mondragón (2005) menciona que la transparencia en la columna de agua representa una condición importante en cuanto a la producción de biomasa, porque determina la penetración de la luz para los procesos fotosintéticos y esta puede estar limitada por el incremento de la cantidad de materia orgánica en suspensión.

Entre la producción y la concentración de amonio en los meses de febrero se mostró una correlación inversa, esta condición se presenta debido a que la productividad primaria está limitada y regulada por la cantidad de nutrientes disponibles, principalmente del nitrógeno inorgánico disuelto y el fosforo inorgánico. Sánchez *et al.* (2011) mencionan que el amonio es el factor limitante que determina la producción ya que a mayor concentración de amonio menor productividad, debido a que este compuesto debe ser oxidado para la asimilación por parte de los productores primarios y que el incremento de este puede convertirse en una fuente potencialmente toxica, que se transforma en amoniaco.

La concentración de amonio en los sistemas estuarinos presenta un amplia variación espacial y temporal, y se encuentra en diversas fuentes como la urea, aminoácidos y péptidos procedentes de la columna de agua ya remineralizados o de aportes fluviales que son depositados en los sedimentos (De la Lanza y Gutiérrez, 2017). Por lo tanto, la

resuspensión de materia orgánica, el reciclamiento de nutrientes, la tasa de sedimentación y la circulación del agua son primordiales en la disponibilidad de los nutrientes para los fitopláctones.

Moran-Silva *et al.* (1997) describen que las temporadas climáticas determinan la dominancia tanto de las formas nitrogenadas como las fosfatadas, predominando las primeras en la época de secas y las segundas en la de “nortes”; lo cual determina que las mayores concentraciones de clorofila *a* se presenten durante esta última temporada por la alta concentración de formas fosfatadas y el decremento en las nitrogenadas, lo cual puede indicar que los compuestos nitrogenados pueden ser los responsables de promover el aumento de las poblaciones fitoplanctónicas, sin embargo para este estudio se presentó un comportamiento inverso. Al respecto Barreiro-Güemes y Aguirre-León (1999) describen que en época de “nortes” las altas concentraciones de amonio preparan las condiciones de disponibilidad de nitrógeno para el fitoplancton primaveral.

A diferencia del amonio, los ortofosfatos presentaron una relación positiva y significativa con la producción en los meses de octubre. Esta correlación se debe a que, a mayor disponibilidad de ortofosfatos, mayor producción de biomasa fitoplanctónica (Barber & Hiscock, 2006). Sin embargo, la entrada de formas fosfatadas al sistema se vuelve uno de los ciclos biogeoquímicos más complejos y puede ser considerado como un nutriente limitante que controla y restringe la productividad fitoplanctónica en los sistemas costeros, pero en menor proporción de los compuestos inorgánicos nitrogenados, ya que el requerimiento del fósforo es mínimo (De la Lanza y Gutiérrez, 2017).

Otros estudios revelan que los ortofosfatos están distribuidos homogéneamente en los sistemas costeros y que presentan una variación estacional con valores más elevados en la temporada seca, coincidiendo con la escasez de formas del nitrógeno y con los aumentos en la concentración de biomasa (Barreiro-Güemes y Aguirre-León, 1999; De la Lanza y Gutiérrez, 2017), lo cual podría describir el comportamiento presentado en este estudio.

Por lo anterior se puede concluir, que las variaciones espacio temporales en los parámetros fisicoquímicos, de los nutrientes como de la clorofila *a* registrados en la columna de agua, son el resultado tanto de factores y condiciones locales como de la interacción con los ambientes adyacentes, lo que vuelve a los sistemas costeros muy complejos al presentar cambios estacionales propios con características únicas en cada ecosistema.

Estado trófico

El estudio del fenómeno de eutrofización costera es reconocido como el proceso de enriquecimiento de estos ambientes por el aporte continuo de nutrientes, que estimula un incremento en la productividad primaria (Gómez-Ortega *et al.*, 2017). De acuerdo con lo anterior y con la aplicación del índice trófico TRIX en la Laguna de Sontecomapan, el sistema se caracterizó como oligotrófico.

El estado oligotrófico corresponde a una baja productividad en biomasa fitoplanctónica, poca concentración de nutrientes y alta transparencia (Muciño *et al.*, 2017). Álamo *et al.* (2013) mencionan que en aguas oligotróficas el ecosistema se encuentra en una tasa de utilización de nutrientes de máxima respuesta, es decir que en esta situación un incremento en los niveles de nutrientes es balanceado, de inicio, con cambios en la tasa de asimilación por el fitoplancton sin que aumente significativamente su abundancia.

En comparación con otras lagunas costeras, la Laguna de Sontecomapan es un sistema complejo con amplias variaciones espaciales y temporales de nutrientes y clorofila, lo que le confiere características intrínsecas propias del sistema. Herrera *et al.* (2011) mencionan que no existen estimaciones publicadas de la condición trófica en Sontecomapan, sin embargo, se cree que el sistema es vulnerable a procesos de eutrofización y que deberían tomarse las medidas adecuadas para su manejo, conservación y gestión de sus recursos. Por último, cabe destacar que es indispensable utilizar otros índices tróficos que incluyan variables diferentes a las consideradas como la transparencia, pH, salinidad y la composición fitoplanctónica, ya que pueden ser factores que afecten la condición trófica de estos sistemas.

CONCLUSIONES

1. La laguna de Sontecomapan se caracteriza por ser un sistema costero con amplias variaciones de los diferentes parámetros fisicoquímicos que son resultado tanto de factores y condiciones locales como de la interacción con ambientes adyacentes.
2. Con base en el análisis espacio temporal de los parámetros fisicoquímicos, la salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, profundidad y transparencia fueron los parámetros más importantes en la variación ambiental del sistema.
3. La concentración de nutrientes se mostró homogénea durante todo el estudio, sin embargo, el amonio y el fósforo fueron los nutrientes que indicaron mayores correlaciones con la biomasa fitoplanctónica.
4. La variación espacio temporal de la concentración de clorofila a mostró valores más altos hacia la cabecera del sistema y más bajos hacia la boca marina. Al mismo tiempo fue menor en los meses de octubre y mayor en los de febrero.
5. De acuerdo con el comportamiento ambiental del sistema, se definieron tres hábitats relacionados a los factores fisicoquímicos y nutrientes y solo dos para la distribución de clorofila a.
6. Los principales factores que determinan las variaciones espacio temporales de la biomasa fitoplanctónica fueron la salinidad, temperatura, pH, profundidad y transparencia, así como los nutrientes nitrogenados inorgánicos y los fosfatos inorgánicos.
7. Con base en los valores del índice TRIX, el sistema de Sontecomapan presentó un estado oligotrófico.
8. Es necesario realizar más investigaciones sobre la variación espacio temporal de la producción primaria en la Laguna de Sontecomapan con el fin de avanzar en el entendimiento de los procesos ecológicos propios del sistema.

REFERENCIAS

- Aguilar, P., 2015. Variación estacional de parámetros ambientales e hidrológicos de la Laguna Chacmochuch, Quintana Roo. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua. Centro de Investigación Científica de Yucatán. 119 p.
- Aguirre-León, A., S. Díaz-Ruiz and M. Guillén Castrillo, 2018. Fish community structure and its relationship with environmental behavior in Sontecomapan Lagoon, Los Tuxtlas Biosphere Reserve, Veracruz, Mexico, 205-234 p. In: Castellanos-Paéz, M.A., A. Esquivel Herrera, J. Aldeco-Ramírez and M. Pagano (Eds.) Ecology of the Sontecomapan Lagoon Veracruz. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco and Institut de Recherche pour le Développement (IRD) Editions, México: 339 p.
- Aké, J.A. & G. Vázquez, 2008. Phytoplankton variation and its relation to nutrients and allochthonous organic matter in a coastal lagoon on the Gulf of Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78 (1): 705-714.
- Álamo, B., S. Loza, M. Sánchez, J.F. Montalvo, I. García, T. Reyes y M. Carménate, 2013. Assessment of the trophic state of six inner bays in Sabana-Camaguey Archipelago, Cuba, using chlorophyll-a as biomarker. *Serie oceanologica*, 13: 9-21.
- Alcántara, P., A. Cravo & J. Jacob, 2012. Variability of nutrients and chlorophyll an in Ancao Inlet during a spring tidal cycle in April 2009. *Ciencias Marinas*, 38 (1B): 161-176.
- Arocena, R. & D. Conde, 1999. Métodos de ecología de aguas continentales, con ejemplos de limnología en Uruguay. DIRACT/FC/UDELAR, Montevideo. 233 pp.
- Barber, R.T. & M.R. Hiscock, 2006. A rising tide lifts all phytoplankton: growth response of other phytoplankton taxa in diatom dominated blooms. *Global Biochems*, 1: 1-25.
- Barreiro, M.T. y A. Aguirre., 1999. Distribución espacio temporal de la biomasa fitoplanctónica en el sistema lagunar Pom-Atasta, Campeche México. *Revista Biología Tropical*, 47 (1): 27-35.
- Barreiro, M.T. y M. Signoret, 1999. Productividad primaria en sistemas acuáticos costeros: Métodos de Evaluación. Colección Libros de Texto. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, México.
- Benítez-Díaz, M.I., M.E. Castellanos-Páez, G. Garza-Mouriño, M.J. Ferrara-Guerrero & M. Pagano, 2014. Spatiotemporal variations of zooplankton community in a shallow tropical brackish lagoon (Sontecomapan, Veracruz, México). *Zoological studies*, 53:59.

- Bermúdez, J.L., C. Lodeiros y E. Morales, 2002. Producción de biomasa de la microalga marina *Chroomonas sp.* En función del pH, intensidad luminosa y salinidad. *Boletín de investigaciones Marinas y Costeras*, 31: 167-185.
- Brown, J.H., J.F. Gillooly, A.P. Allen, V.M. Savage & G.B. West, 2004. Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology*, 45: 1771-1789.
- Bulit, C., M. Signoret & A. Esquivel, 1994. Pigmentos y productividad fitoplanctónica en una laguna costera. Res. III Congreso de Ciencias del Mar. La Habana, Cuba. 012.
- Cabral, R.A., 2007. Hidrología del sistema lagunar de Sontecomapan, Veracruz durante la temporada de secas y lluvias 2005 y secas 2006. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México FES Iztacala. 102 p.
- Cantú, M.C., 1984. Determinación de pigmentos del fitoplancton de la laguna de Pueblo Viejo, Veracruz. Tesis profesional. UNAM-ENEP Iztacala. 77p.
- Castellanos, A., 2002. Caracterización hidrológica de la Laguna de Sontecomapan, Veracruz. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México FES Iztacala. Estado de México, México. 120p.
- Cervantes-Duarte, R., S. López-López, E. González-Rodríguez & S. Futema-Jiménez., 2010. Ciclo estacional de nutrientes, temperatura, salinidad y clorofila a en Bahía Magdalena, BCS, México (2006-2007). *CICIMAR Oceánides*, 25 (2): 111-120.
- Cervantes-Duarte, R., L.M. Rodríguez-Mata & S. López-López, 2017. Efecto de la marea en la concentración de nutrientes, clorofila a y parámetros físicos y químicos en la laguna costera subtropical (Bahía Magdalena, México). *Hidrobiológica*, 27 (2): 253-264.
- Contreras, F., N.E Rivera & R. Segura, 2005. Nutrientes y productividad fitoplanctónica en una laguna costera tropical intermitente (La Mancha, Veracruz) del Golfo de México. *Hidrobiológica*, 15 (3): 299-310.
- Daniel, W. W. 2002. Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la salud. Limusa Wiley, México.
- De la Lanza-Espino, G., 1994. Química de las lagunas costeras. *Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano*, UABCS. 127-198.
- De la Lanza-Espino, G. & F.J. Gutiérrez-Mendieta, 2017. Intervalos de parámetros no-conservativos en sistemas acuáticos costeros de México. *Hidrobiológica*, 27 (3): 369-390.

- Escobedo, D.C., 2010. Diagnóstico y descripción del proceso de eutrofización en lagunas costeras del norte de Sinaloa. Tesis de Doctorado en Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional. 274 p.
- Falcao, M. y C. Vale., 2003. Nutrient dynamics in a coastal lagoon (Ria Formosa, Portugal): the importance of lagoon-sea water exchanges on the biological productivity. *Ciencias Marinas*, 29 (3): 425-433.
- FIR, 2004. Manglares y humedales de la Laguna de Sontecomapan. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar, Sitio No. 1342. SISR, Suiza.
- Gómez-Ortega, R., G. De la Lanza, C. Tovilla, E. Barba, J. Valle, O. Castañeda y E. Ramos, 2017. Cambios ambientales y tróficos a través de un análisis a largo plazo del sistema lagunar Chantuto-Panzacola, Chiapas, México. *Rev. Mar. Cost*, 9 (2): 75-100.
- Guerra, S.L. & M.A. Lara, 1996. Florecimiento de *Ceratium furca* (Peridinales: Ceratiaceae) en un ambiente salobre: Laguna de Sontecomapan, México. *Rev. Biología tropical*, 44 (1): 23-30.
- Gutiérrez, F.J., F. Varona & F. Contreras, 2006. Caracterización de las condiciones fisicoquímicas de la productividad fitoplanctónica de dos lagunas costeras tropicales del estado de Chiapas, México. *Hidrobiológica*, 16, 137-146.
- Hair, J.F., R.E. Anderson, R.L. Tatham & W.C. Black. 2001. Multivariate data analysis. Prentice-Hall, International, Inc.
- Herrera, J., S. Morales & O. Cortes, 2011. Eutrofización en los ecosistemas costeros del Golfo de México, V.1. SEMARNAT- NOAA-GEF-UNIDO, México, 88p.
- Lara, A.L., J.B Franco, C. Abarca, L. Díaz, A. Aguirre & M. Castillo, 2011. Diversidad de peces en los ambientes costeros y plataforma continental. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, México. 825-836 pp.
- Lara, R., R. Velásquez, L. Troccoli, D. Hernández & M. Lemus, 2015. Variación temporal de las variables fisicoquímicas y biomasa fitoplanctónica en aguas superficiales de la zona costera de Chacopata, Venezuela. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 50 (2): 367-373.
- Levene, H. 1960. Robust test for equality on variance, p. 278-292. In: I. Olkin, S.G. Ghurye, W. Hoeffding, W.G. Madow & H.B. Mann (eds.), Contributions to probability and statistics. Stanford University, California.

- López-Ortega, M., G. Pulido-Flores, A. Serrano-Solís, J.C. Gaitán-Oyarzun, W.S. Monks-Sheets & M.A. López-Jiménez, 2012. Evaluación estacional de las variables fisicoquímicas del agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12 (3): 713-719.
- López-Portillo, J., A.L. Lara-Domínguez, G. Vázquez & J.A. Aké-Castillo, 2017. Water quality and mangrove-derived in four coastal lagoons from the Gulf of Mexico with variable hydrologic dynamics. *Journal of coastal research*, Special Issue (77): 28-38.
- Magaña, M.E., 2004. Distribución de nutrientes y su efecto en el nivel trófico de la Laguna Macapule, Sinaloa. Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Instituto Politécnico Nacional. 105 p.
- Margalef, R., 1975. Fitoplancton invernal de la laguna costera de Alvarado (México). *Anal. Inst. Bot. Cavanilles*, 32 (2): 381-387.
- Méndez, J.L., 1991. Comportamiento estacional y estructura de la comunidad fitoplanctónica de la laguna del Llano, Mpio. de Actopan, Veracruz (Periodo verano-otoño). Tesis profesional. Universidad Veracruzana.
- Mondragon, A., 2005. Patrones espaciales de distribución de la producción primaria fitoplanctónica y su relación con el estado trófico en la Laguna de Sontecomapan, Veracruz, México. Informe final de servicio social. UAM-Xochimilco. 83 p.
- Moran-Silva, A., F. Contreras-Espinoza, J. Franco-López, R. Chávez-López, E. Peláez-Rodríguez & C.M. Bedia-Sánchez., 1997. Caracterización espacio temporal con base en la hidrología, nutrientes y clorofila a total y nanofitoplanctónica de la Laguna de Sontecomapan, Veracruz, México. *Oceanología*, 2 (14): 105-118.
- Muciño, R.E., M.G. Figueroa & I. Garate, 2011. Especies fitoplanctónicas formadoras de proliferaciones algales nocivas en la boca de la laguna costera de Sontecomapan, Veracruz, México. *UNED Research Journal*, 3 (2): 209-218.
- Muciño, R.E., A. Aguirre & M.G. Figueroa, 2017. Evaluación del estado trófico en los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada del Este, Campeche, México. *Hidrobiológica*, 27 (3): 281-291.
- Orduña, R.E., 2012. Patrones de distribución y abundancia del fitoplancton nocivo en la zona costera de Tuxpan Veracruz, México. Tesis de Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros. Universidad Veracruzana Campus Tuxpan. 190 p.
- Parsons, T. R., Maita Y. y Lalli C. M.1992. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, New York, USA. 344 p.

- Ponce, E.J., 2016. Variabilidad espacio temporal de los principales grupos fitoplanctónicos mediante la utilización de pigmentos marcadores, en la Laguna de Términos, Campeche. Tesis de Maestría en Ciencias. UNAM, México. 188p.
- Ramos, J.A., 2014. Variación nictímera y mensual de la abundancia fitoplanctónica de la laguna La Mancha, Ver., durante un ciclo anual (mayo 2012 a mayo 2013). Tesis de Licenciatura. UNAM-FES Zaragoza. 64 p.
- Rodríguez-Varela, A., A. Cruz-Gómez & H. Vázquez-López, 2010. List of the ichthyofauna in the Sontecomapan Lagoon, Veracruz, México. *Byocit*, 3 (9): 107-121.
- Rodríguez, A., 2006. Variación espacio temporal del fitoplancton en el Lago Tezozómoc, Azcapotzalco, Distrito Federal. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México FES Iztacala. 48 p.
- Sánchez, R.M., M. Castro y S. Zea, 2011. Efecto del enriquecimiento por nitrógeno y fosforo en los cambios netos de nutrientes y producción fitoplanctónica en la desembocadura del Río Sevilla, Ciénega Grande, Santa María. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 35 (134): 35-43.
- Suchil, M.A., 1990. Determinación de la variación estacional del fitoplancton y su relación con los parámetros físicos y químicos de las lagunas de: Sontecomapan y del Ostión, Ver. Para el año de 1985. Tesis profesional. UNAM-ENEP Zaragoza. 128p.
- Varela, R., F. Carvajal & F. Muller, 2003. El fitoplancton en la plataforma nororiental de Venezuela. *Medio ambiente y explotación en el oriente de Venezuela*, 1: 263-294.
- Varona, F., 2001. Análisis de la variación espacio temporal del fitoplancton de dos lagunas costeras del estado de Chiapas, empleando métodos multivariados. Informe final de servicio social. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. 39 p.
- Varona, F. y Mendieta F.J., 2003. Estudio multivariado de la fluctuación espacio temporal de la comunidad fitoplanctónica en dos lagunas costeras del estado de Chiapas. *Hidrobiológica*, 13 (3): 177-194.
- Weist, R.I., 2001. Composición taxonómica, distribución y abundancia de los dinoflagelados tecados de la Laguna de Sontecomapan, Veracruz, México. Reporte de Servicio Social UAM-Xochimilco. 80 p.
- Zamora, L., 2002. Hábitos alimentarios en larvas y juveniles de peces en la Laguna de Sontecomapan Veracruz durante las temporadas de 1996-1997. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México FES Iztacala. 78 p.
- Zar, J.H. 1999. Biostatistical analysis. Prentice-Hall, Nueva Jersey. USA.

Zavala, T.N., 2017. Estructura del fitoplancton marino como una respuesta a las variaciones en las condiciones ambientales y disponibilidad de nutrientes. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México Unidad Mazatlán. 164 p.

ANEXOS

Anexo 1.- Tablas de conversión de oxígeno disuelto de mg/L a porcentaje de saturación.

Tabla 1.- Relación de temperatura/presión atmosférica en mm Hg, para determinar la capacidad de oxígeno disuelto.

Capacidad de oxígeno disuelto al 100% (mg/L)												
	770 mm	760 mm	750 mm	740 mm	730 mm	720 mm	710 mm	700 mm	690 mm	680 mm	670 mm	660 mm
0°C	14.76	14.57	14.38	14.19	13.99	13.80	13.61	13.42	13.23	13.04	12.84	12.65
1°C	14.38	14.19	14.00	13.82	13.63	13.44	13.26	13.07	12.88	12.70	12.51	12.32
2°C	14.01	13.82	13.64	13.46	13.28	13.10	12.92	12.73	12.55	12.37	12.19	12.01
3°C	13.65	13.47	13.29	13.12	12.94	12.76	12.59	12.41	12.23	12.05	11.88	11.70
4°C	13.31	13.13	12.96	12.79	12.61	12.44	12.27	12.10	11.92	11.75	11.58	11.40
5°C	12.97	12.81	12.64	12.47	12.30	12.13	11.96	11.80	11.63	11.46	11.29	11.12
6°C	12.66	12.49	12.33	12.16	12.00	11.83	11.67	11.51	11.34	11.18	11.01	10.85
7°C	12.35	12.19	12.03	11.87	11.71	11.55	11.39	11.23	11.07	10.91	10.75	10.59
8°C	12.05	11.90	11.74	11.58	11.43	11.27	11.11	10.96	10.80	10.65	10.49	10.33
9°C	11.77	11.62	11.46	11.31	11.16	11.01	10.85	10.70	10.55	10.39	10.24	10.09
10°C	11.50	11.35	11.20	11.05	10.90	10.75	10.60	10.45	10.30	10.15	10.00	9.86
11°C	11.24	11.09	10.94	10.80	10.65	10.51	10.36	10.21	10.07	9.92	9.78	9.63
12°C	10.98	10.84	10.70	10.56	10.41	10.27	10.13	9.99	9.84	9.70	9.56	9.41
13°C	10.74	10.60	10.46	10.32	10.18	10.04	9.90	9.77	9.63	9.49	9.35	9.21
14°C	10.51	10.37	10.24	10.10	9.96	9.83	9.69	9.55	9.42	9.28	9.14	9.01
15°C	10.29	10.15	10.02	9.88	9.75	9.62	9.48	9.35	9.22	9.08	8.95	8.82
16°C	10.07	9.94	9.81	9.68	9.55	9.42	9.29	9.15	9.02	8.89	8.76	8.63
17°C	9.86	9.74	9.61	9.48	9.35	9.22	9.10	8.97	8.84	8.71	8.58	8.45
18°C	9.67	9.54	9.41	9.29	9.16	9.04	8.91	8.79	8.66	8.54	8.41	8.28
19°C	9.47	9.35	9.23	9.11	8.98	8.86	8.74	8.61	8.49	8.37	8.24	8.12
20°C	9.29	9.17	9.05	8.93	8.81	8.69	8.57	8.45	8.33	8.20	8.08	7.96
21°C	9.11	9.00	8.88	8.76	8.64	8.52	8.40	8.28	8.17	8.05	7.93	7.81
22°C	8.94	8.83	8.71	8.59	8.48	8.36	8.25	8.13	8.01	7.90	7.78	7.67
23°C	8.78	8.66	8.55	8.44	8.32	8.21	8.09	7.98	7.87	7.75	7.64	7.52
24°C	8.62	8.51	8.40	8.28	8.17	8.06	7.95	7.84	7.72	7.61	7.50	7.39
25°C	8.47	8.36	8.25	8.14	8.03	7.92	7.81	7.70	7.59	7.48	7.37	7.26
26°C	8.32	8.21	8.10	7.99	7.89	7.78	7.67	7.56	7.45	7.35	7.24	7.13
27°C	8.17	8.07	7.96	7.86	7.75	7.64	7.54	7.43	7.33	7.22	7.11	7.01
28°C	8.04	7.93	7.83	7.72	7.62	7.51	7.41	7.30	7.20	7.10	6.99	6.89
29°C	7.90	7.80	7.69	7.59	7.49	7.39	7.28	7.18	7.08	6.98	6.87	6.77
30°C	7.77	7.67	7.57	7.47	7.36	7.26	7.16	7.06	6.96	6.86	6.76	6.66
31°C	7.64	7.54	7.44	7.34	7.24	7.14	7.04	6.94	6.85	6.75	6.65	6.55

Tabla 2.- Presión atmosférica a diferentes alturas, la presión atmosférica se representa en mm Hg.

Presión barométrica aproximada a diferentes alturas					
Elevación (pies)	Presión (mm Hg)	Elevación (pies)	Presión (mm Hg)	Elevación (pies)	Presión (mm Hg)
0	760	2000	708	4000	659
250	753	2250	702	4250	653
500	746	2500	695	4500	647
750	739	2750	689	4750	641
1000	733	3000	683	5000	635
1250	727	3250	677	5250	629
1500	720	3500	671	5500	624
1750	714	3750	665	5750	618