



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD XOCHIMILCO**

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

PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGA

**Análisis climático y trófico de dos cabeceras
estuarinas del Área Natural Protegida
Laguna de Términos, Campeche**

QUE PRESENTA LA ALUMNA

Karen Abigail Solis Méndez

Matrícula

2142042280

ASESORES:

**Dr. Luis Amado Ayala Pérez
M.E.A. Ezel Jacome Galindo Pérez**

Ciudad de México, septiembre 2023

ÍNDICE

RESÚMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
ANTECEDENTES	3
OBJETIVO GENERAL.....	4
Objetivos particulares	4
METODOLOGÍA.....	4
Área de estudio.....	4
Caracterización del comportamiento climático	6
Parámetros fisicoquímicos.....	6
Nutrientes y clorofila.....	7
Índice de estado trófico TRIX	7
RESULTADOS.....	8
Caracterización del comportamiento climático en Ciudad del Carmen	8
Caracterización del comportamiento climático en Palizada	9
Parámetros fisicoquímicos en el Sistema Pom-Atasta.....	11
Temperatura.....	11
pH.....	17
Análisis de agrupamiento de los parámetros fisicoquímicos.....	19
Parámetros fisicoquímicos en el Sistema Palizada-Del Este.....	21
Temperatura.....	21
Oxígeno disuelto.....	23
Salinidad	25
pH.....	27
Análisis de agrupamiento de los parámetros fisicoquímicos.....	29
Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) en el Sistema Pom-Atasta	30
Componentes del NID	33
Nitrato	33
Amonio	35
Nitrito	37
Fósforo Inorgánico Disuelto (FID).....	39
Fosfato	41
Clorofila <i>a</i>	43
Análisis de componentes principales	46
Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) en el Sistema Palizada-Del Este.....	48

Componentes del NID	50
Nitrato	50
Amonio	52
Nitritos	54
Fósforo Inorgánico Disuelto (FID).....	56
Fosfato	58
Clorofila <i>a</i>	60
Análisis de componentes principales	64
Índice de estado trófico TRIX en el Sistema Pom-Atasta	65
Índice de estado trófico TRIX en el Sistema Palizada-Del Este	68
DISCUSIÓN.....	70
VARIABILIDAD AMBIENTAL.....	70
Temperatura ambiental.....	70
Precipitación	71
PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	71
Temperatura	71
Salinidad	72
Oxígeno disuelto.....	73
pH.....	74
DINÁMICA DE NUTRIENTES	75
Nitrato	75
Amonio	76
Nitrito	77
Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID).....	78
Fosfatos	79
Fósforo Inorgánico Disuelto (FID).....	80
ANÁLISIS DE LA CLOROFILA <i>a</i>	81
ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO TRIX.....	82
CONCLUSIONES.....	84
REFERENCIAS	86

RESÚMEN

Los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada-Del Este se encuentran asociados al área natural protegida Laguna de Términos, son áreas de almacenamiento y transporte de sedimentos, materia orgánica, nutrientes, detritus y organismos, además, contribuyen al aporte de agua dulce, a la Laguna de Términos. Funcionan como hábitat de diversas comunidades bióticas acuáticas (plancton, bentos, y necton) y terrestres (manglar, llanuras de inundación, aves, reptiles y pequeños mamíferos). El objetivo del presente estudio es comparar la variabilidad climática y el estado trófico de los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este para generar un marco base que permita identificar cambios en la dinámica ecosistémica. Se construyó una base de datos de temperatura máxima, mínima y precipitación durante un periodo aproximado de 30 años. Se utilizó una base de datos existente, donde se analizaron los factores fisicoquímicos: temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y pH, tanto en superficie como de fondo, en tres épocas climáticas. Se determinó la concentración de nutrientes y clorofila de la columna de agua en las tres temporadas climáticas. Se realizaron cálculos para determinar el Índice del Estado Trófico (TRIX). Para encontrar diferencias significativas entre las temporadas, estaciones y el cuerpo de agua se utilizaron técnicas estadísticas. Los registros meteorológicos en las estaciones mostraron una tendencia estacional, donde las temperaturas máximas fueron de 44°C en el mes de mayo y las mínimas de 9°C en el mes de enero, la precipitación máxima fue de 25 mm en el mes de septiembre. Las mayores concentraciones de Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) se registraron en la temporada de secas con 14.09 mg/L, de el Fósforo Inorgánico Disuelto (FID) se obtuvieron las mayores concentraciones en temporada de lluvias con 2.82 mg/L, mientras que, las mayores concentraciones de clorofila se obtuvieron en la temporada de nortes con 49.06 mg m⁻³. El intervalo de variación del TRIX en los sistemas fue de 1.82 a 4.37, lo cual permite clasificar a los sistemas en un estado oligotrófico, sin embargo, condiciones particulares en espacio y tiempo muestran una tendencia a un comportamiento mesotrófico. Los dendogramas construidos por temporada climática permitieron identificar dos grupos funcionales. El análisis de correspondencia canónica para la temporada de nortes destacó relaciones entre el pH y el nitrito; en la temporada de secas se relacionó la temperatura y oxígeno disuelto con la clorofila, mientras que, la salinidad se relacionó con el nitrito y amonio; por otra parte, el oxígeno disuelto se relacionó con el nitrato y fosfato, en ambos sistemas. **PALABRAS CLAVE:** Sistemas fluvio-lagunares, Calidad del agua, Variabilidad ambiental, Índice del Estado Trófico.

INTRODUCCIÓN

El área de protección de flora y fauna Laguna de Términos en el estado de Campeche, es el sistema lagunar-estuarino de mayor volumen y extensión del país, constituye un complejo ecológico costero que comprende la plataforma continental marina adyacente, esta región forma parte del delta de la principal cuenca hidrológica del país, integrada por los ríos Mexcalapa, Grijalva y Usumacinta, cuyo volumen conjunto de descarga es el mayor de México; cuenta con ríos tributarios principales como el Palizada y tributarios secundarios como Marentes, Las Piñas, Las Cruces, Chumpán, Candelaria y Arroyo Lagartero, y se encuentra asociado con los importantes sistemas fluvio-lagunares deltáicos denominados: Pom-Atasta, Palizada-Del Este, Chumpán-Balchacah y Candelaria-Panlau, así como con el Estero Sabancuy (Anónimo 1994). Estas cabeceras se caracterizan por su valor estructural y funcional y constituyen un puente ecológico entre la planicie costera y la plataforma continental más productiva del Golfo de México, la Sonda de Campeche (Ayala-Pérez *et al.* 2014).

La región tiene gran importancia científica, social y económica por su diversidad, la abundancia de recursos naturales de interés comercial, la actividad pesquera de alta incidencia de camarón, la producción de alimento por cultivo (arroz entre otros), las actividades de exploración y explotación de petróleo y por las iniciativas de acuicultura en terrenos de propiedad privada, entre otros (Ayala-Pérez *et al.* 2003).

En la actualidad diversas publicaciones manifiestan la preocupación por el deterioro ambiental de los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este, generadas por actividades humanas, entre las que sobresale la agricultura, la explotación petrolera y la pesca, dichas actividades antropogénicas han causado una eutrofización en los ecosistemas adyacentes a la Laguna de Términos (Muciño-Márquez *et al.* 2014).

La eutrofización es un problema generado, principalmente, por el incremento de nutrientes tales como nitrógeno, fósforo y materia orgánica que se descargan en los cuerpos de agua (Andersen *et al.* 2006). Los problemas derivados de este proceso son el incremento en las concentraciones de clorofila *a* (indicador del fitoplancton), florecimientos de algas nocivos y tóxicos, reducción del oxígeno y transparencia, así como alta biomasa de macroalgas (verdes filamentosas y algas rojas) y pérdida de la vegetación acuática sumergida y fauna bentónica (Herrera-Silveira *et al.* 2011). Para estimar el estado trófico de un ecosistema se han utilizado indicadores como la concentración de oxígeno disuelto, el nitrógeno total, el fósforo total, y la productividad primaria medida por la concentración de clorofila *a*. Estas variables han sido consideradas en el diseño de diferentes índices como el AZCI (Arid Zone

Coastal Water Quality Index) y el TWQI (Trophic Water Quality Index), que son herramientas que permiten generar criterios ecológicos para definir acciones de gestión y conservación. Para los ecosistemas costeros y marinos, el índice trófico más utilizado es el TRIX, el cual incluye variables como concentración de nutrientes, de oxígeno disuelto y de clorofila a (como un indicador de biomasa fitoplanctónica) (Muciño-Márquez *et al.* 2017). Por otra parte, para analizar la condición ambiental en espacio y tiempo se necesita realizar un monitoreo de los factores fisicoquímicos (atmosféricos, clima, suelos y recursos hídricos), biológicos (animales, plantas y microorganismos) y humanos (infraestructura, tecnología, desarrollo social y económico), con el objetivo de obtener información precisa para así poder realizar un buen manejo y a aprovechamiento de estos recursos naturales (USAID 2012).

ANTECEDENTES

Las lagunas costeras son cuerpos de agua ampliamente distribuidos a lo largo de las costas del mundo y se ha estimado que ocupan el 13% de la línea de costa a nivel mundial. Asimismo son conocidas como zonas altamente productivas y dinámicas, su importancia con el medio ambiente marino reside en el intercambio de materia y energía entre la zona continental y los ambientes costero-marinos en lo que se refiere al aporte de nutrientes y movimiento de organismos en diversas etapas de su ciclo de vida con fines de protección, crianza y/o alimentación (Ramos-Miranda *et al.* 2006). La Laguna de Términos desde su desarrollo como conjunto de ecosistemas costeros críticos en el ámbito ecológico, social, político y ambiental a través de su utilización como fuente de alimento por ser reservorio natural estratégico de recursos pesqueros, la explotación forestal, la industrial, procesos de migración y crecimiento urbano y agropecuario, representa una fuente de conocimiento multidisciplinario (Ramos-Miranda y Villalobos-Zapata 2015). Los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada-Del Este se encuentran asociados a la Laguna de Términos, son áreas de almacenamiento y transporte de sedimentos, materia orgánica, nutrientes, detritos y organismos, además, contribuyen al aporte de agua dulce, a la Laguna de Términos. Funcionan como hábitat de diversas comunidades bióticas acuáticas (plancton, bentos, y necton) y terrestres (manglar, llanuras de inundación, aves, reptiles y pequeños mamíferos) (Ramos-Miranda *et al.* 2006).

En esta región se han llevado a cabo diversos y numerosos estudios entre los que destacan los relacionados con los aspectos geoquímicos (Ponce-Vélez y Vázquez Botello 1992), productividad y condiciones ambientales (Ayala-Pérez *et al.* 2012; Aguirre-León y Díaz-Ruiz

2000; Aguirre-León y Díaz-Ruiz, 2006 y Lara-Domínguez *et al.* 1980), niveles de nutrientes y productividad del fitoplancton (Muciño-Márquez *et al.* 2015; Muciño-Márquez *et al.* 2014 y Ortega 1995) y análisis trófico en un sistemas costeros (Muciño-Márquez *et al.* 2017 y Andersen *et al.* 2006).

OBJETIVO GENERAL

Comparar la variabilidad climática y el estado trófico de los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este del área natural protegida Laguna de Términos, Campeche.

Objetivos particulares

1. Describir y analizar el comportamiento climático con base en registros históricos de dos estaciones meteorológicas aledañas al área de estudio.
2. Comparar espacial y temporalmente las condiciones tróficas de los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este.
3. Analizar y discutir las diferencias ecológicas entre ambos sistemas con apoyo de técnicas estadísticas multivariadas.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El sistema Pom-Atasta (SPA) se encuentra en la porción occidental de la Laguna de Términos entre los 18°30' y 18°35' N y los 91°50' y 92°20' W. Queda comprendido dentro de la llanura costera de Campeche formada por los ríos Grijalva y Usumacinta. Presenta un gradiente estuarino con un intervalo de salinidad entre 3 y 26 unidades que varía dependiendo de la época climática. La temperatura del agua oscila de 25.6°C a 32.6°C y la transparencia de 20% a 83.3%. El oxígeno disuelto presenta variaciones muy amplias, desde 4.2 hasta 8.2 mg/l. El sistema Palizada-Del Este (SPE) se localiza en la porción sur oeste de la Laguna de Términos. Su ubicación está comprendida entre los 18°29' y 18°29'04"N y los 91°44' y 91°51'W. Incluye: a) la desembocadura del río Palizada en dos ramales y sus deltas respectivos; b) tres lagunas denominadas (de sur a norte) Laguna del Vapor, Laguna Del Este y Laguna San Francisco; c) la desembocadura de tres ríos secundarios, Las Piñas y Marentes; d) la conexión entre el sistema y la Laguna de

Términos, constituida por dos bocas de las cuales la occidental es la principal y se denomina Boca Chica. Presenta un intervalo de salinidad promedio entre 0 y 8 ‰, temperatura de 22°C a 31°C y transparencia de 48 a 66 (Ramos-Miranda *et al.* 2006) (Fig. 1).



Figura 1a-c. Localización geográfica de los sistemas fluvio-lagunares en el sur del golfo de México, en las inmediaciones de la Laguna de Términos, Campeche, México. b) Ciudad del Carmen (PA). c) Sistema Pom-Atasta y Palizada-Del Este (INEGI, 2019).

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizó una base de datos generada por el trabajo de campo realizado en el laboratorio de Ecología Aplicada de la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, que consideró muestreos en diez sitios distribuidos en cada sistema fluvio-lagunar (Fig. 2).

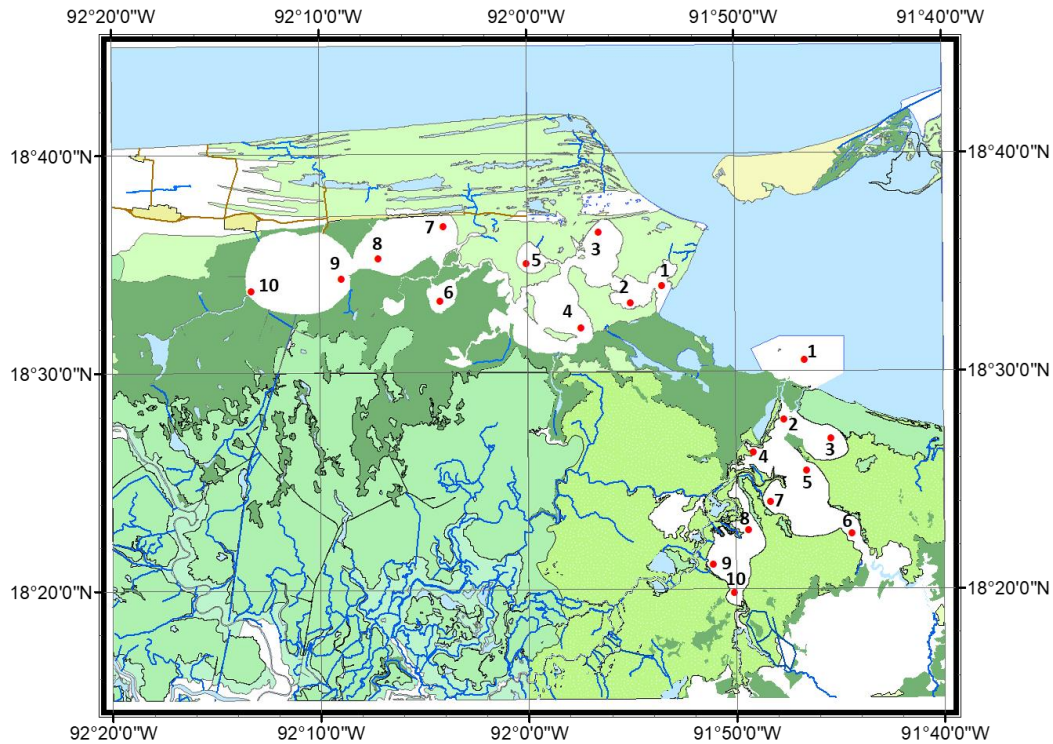


Figura 2. Sitios de muestreo en los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este.

Caracterización del comportamiento climático

Para describir el comportamiento ambiental de la región se construyó una base de datos meteorológicos (precipitación, temperaturas máximas y mínimas) a partir de los registros de dos estaciones meteorológicas (Ciudad del Carmen y Palizada) aledañas al área de estudio, en un periodo aproximado de 30 años (1985-2016).

Parámetros fisicoquímicos

La base datos existente muestra los factores fisicoquímicos: temperatura (°C), salinidad (UPS), oxígeno disuelto (mg/l), saturación de oxígeno (%) y pH (H+), tanto en superficie como de fondo, en tres épocas climáticas: Nortes (noviembre de 2017), Secas (abril de 2018) y en Lluvias (julio-agosto de 2018). Con el programa Statistica 10 se realizó el análisis de Kruskal Wallis para encontrar diferencias significativas entre las temporadas, estaciones y el cuerpo de agua (superficie/ fondo); se aplicó un análisis Cluster, utilizando la distancia euclidiana y método de ligamiento Ward para agrupar las estaciones.

Nutrientes y clorofila

Con las muestras de agua recolectadas en el trabajo de campo se realizó la determinación de la concentración de nutrientes con ayuda de un fotómetro multiparamétrico de Sobremesa marca Hanna modelo HI 83200. Se realizaron los análisis de nutrientes utilizando los kits Hanna para amoníaco rango bajo (HI 93700A-0 Y HI 93700B-0), nitrato (HI 93728-0), nitrito rango bajo (HI 93707-0) y fosfato rango bajo (HI 93713-0). Para determinar la clorofila *a* se siguió la técnica de extracción por acetona de Barreiro y Signoret (1999). Con el programa statistica 10 se realizó el análisis de Kruskal Wallis para encontrar diferencias significativas entre las temporadas, estaciones y el cuerpo de agua (superficie/fondo); con el programa ArcGis 10.5 se realizaron mapas en los que se muestran la distribución de isoconcentraciones del nitrógeno inorgánico disuelto, fosfato inorgánico disuelto y clorofila.

Índice de estado trófico TRIX

Se realizaron los cálculos para determinar el Índice del Estado Trófico (TRIX). Este índice combina logaritmo base 10 de cuatro variables: Cl *a*, NID (NO₂-NO₃-NH₄), FID (PO₄³⁻) y el valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (Muciño-Márquez *et al.*, 2017)

La fórmula del índice TRIX es:

$$\text{TRIX} = (\text{Log } 10 (\text{Cl } a \times \text{aD}\%O \times \text{NID} \times \text{FID}) + k) / m$$

Donde cada uno de los cuatro componentes representa un estado trófico variable, e incluye los siguientes factores:

a) Factores que son expresión directa de la productividad:

Cl *a* = concentración de clorofila *a*, en mg/m³

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 µg·L⁻¹

FID= fósforo inorgánico disuelto en µg·L⁻¹

Las concentraciones $k=1.5$ y $m=12/10=1.2$ son valores de escala introducidos para ajustar el valor límite más bajo del índice y la extensión de la escala trófica relacionada; es decir, el índice TRIX tiene valores entre 0 -10 y cubre cuatro estados tróficos y de la calidad del agua: alta buena, pobre y mala (Tabla 1).

Con el programa ArcGis 10.5 se realizó un mapa, en donde se muestra la distribución de isoconcentraciones del TRIX.

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
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

RESULTADOS

Caracterización del comportamiento climático en Ciudad del Carmen

En este periodo de 30 años en las dos estaciones meteorológicas se mostró una tendencia estacional.

En la estación Ciudad del Carmen la temperatura máxima osciló entre los 20-44°C, registrando el promedio máximo de 36°C en el mes de mayo, que corresponde a la temporada de secas. Las temperaturas mínimas oscilaron de los 12- 28°C, obteniendo un promedio mínimo de temperatura de 20°C en el mes de febrero, el cual corresponde a la temporada de nortes (Fig. 3).

La precipitación registró un máximo de 24 mm en el mes de septiembre, este periodo corresponde a la temporada de lluvias; se obtuvieron valores considerables para los meses de octubre y noviembre, donde se observaron valores máximos de 16 y 3 mm respectivamente, correspondientes a la temporada de nortes (Fig. 3).

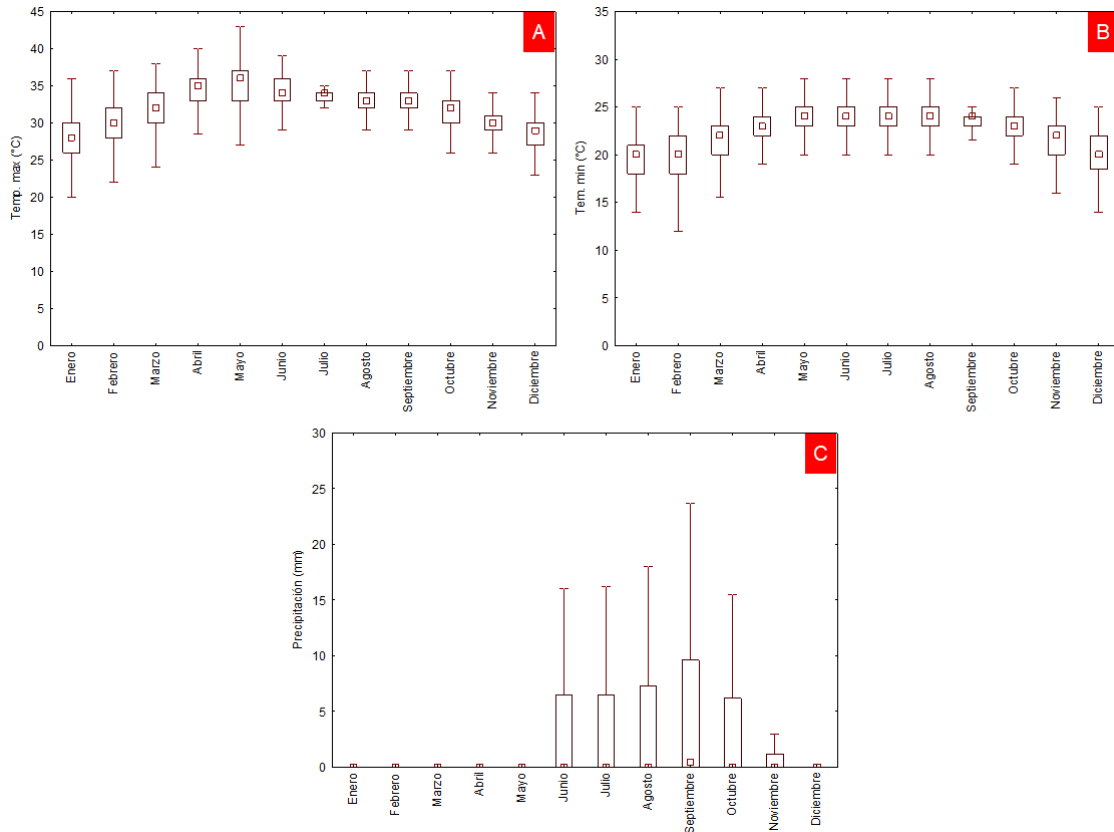


Figura 3. A) Temperatura máxima B) Temperatura mínima y C) Precipitación, registrados en la estación meteorológica de Ciudad del Carmen durante el periodo 1985-2016.

Caracterización del comportamiento climático en Palizada

Para la estación Palizada las temperaturas máximas oscilaron entre los 21-43 °C, el promedio máximo registrado fue de 43°C en el mes de abril, el cual corresponde a la temporada secas. Las temperaturas mínimas oscilaron de los 9- 29°C, obteniendo un promedio mínimo de 19°C en el mes de enero, el cual corresponde a la temporada de nortes (Fig. 4).

La precipitación registró un máximo de 25 mm en el mes de septiembre, este periodo corresponde a la temporada de lluvias; al igual que en la estación Ciudad del Carmen, se observaron valores considerables para los meses de octubre y noviembre, donde se observaron valores máximos de 23 y 5 mm respectivamente, correspondientes a la temporada de nortes (Fig. 4).

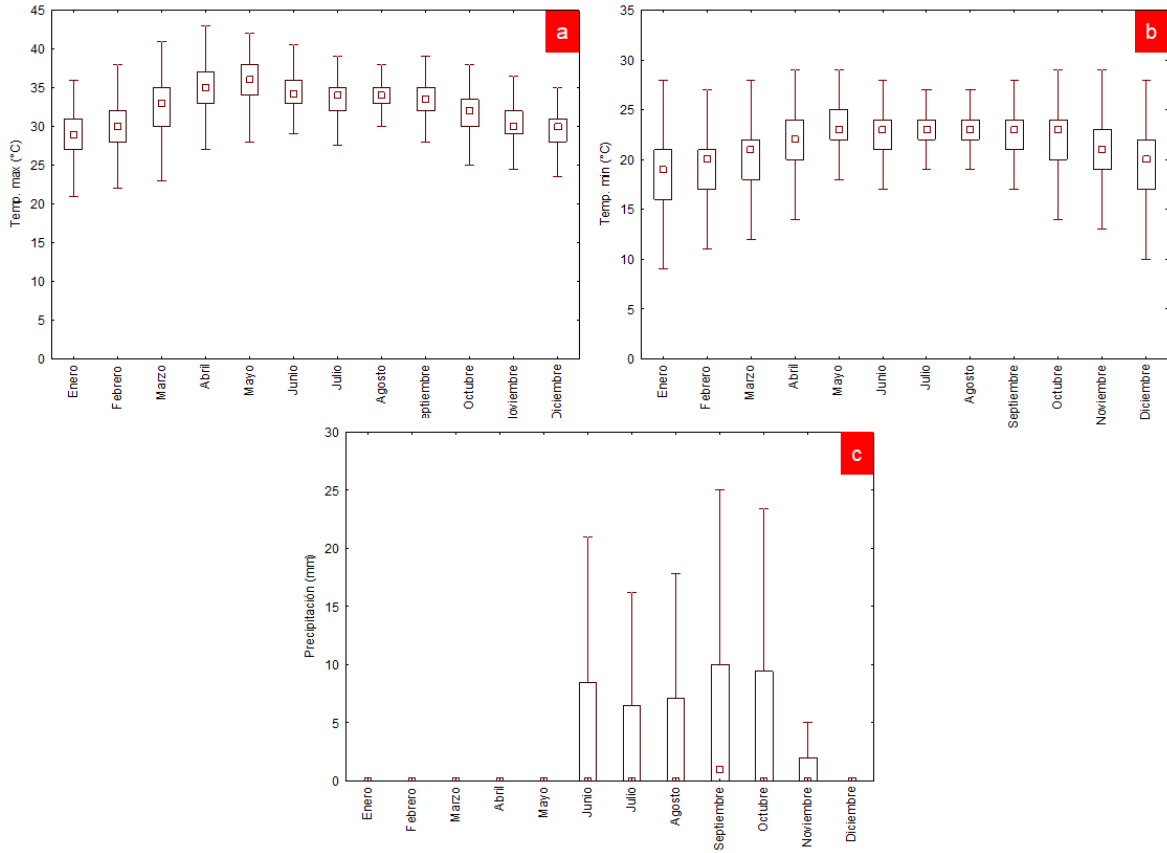


Figura 4. a) Temperatura máxima b) Temperatura mínima y c) Precipitación, registrados en la estación meteorológica de Palizada durante el periodo 1985-2016.

Parámetros fisicoquímicos en el Sistema Pom-Atasta

Temperatura

En el SPA la temperatura promedio obtenida en la temporada de nortes fue de 25°C, en la temporada de secas fue de 30.56°C, mientras que, en la temporada de lluvias fue de 30.44°C (Tabla 2).

La temperatura máxima promedio registrada fue de 33.90 °C en la estación seis en época de secas, la temperatura mínima promedio fue de 23.71 registrada en la estación tres en la temporada de nortes (Tabla 2). El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación a las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p=0.34$, secas: $p=0.16$ y lluvias: $p=0.08$) (Fig. 5).

Por otra parte, la distribución de temperatura superficial durante la temporada de nortes presentó un promedio de 25.48 °C y de fondo de 24.52 °C, en la temporada de secas se obtuvo un promedio de 31.34 °C y de fondo de 29.78 °C, mientras que, la temporada de lluvias presentó un promedio superficial de 30.68°C y 30.20 °C de fondo. El análisis de Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la temperatura superficial y de fondo en la temporada de secas y lluvias (nortes: $p= 0.04$, secas: $p=0.06$ y lluvias: $p= 0.13$) (Fig. 5).

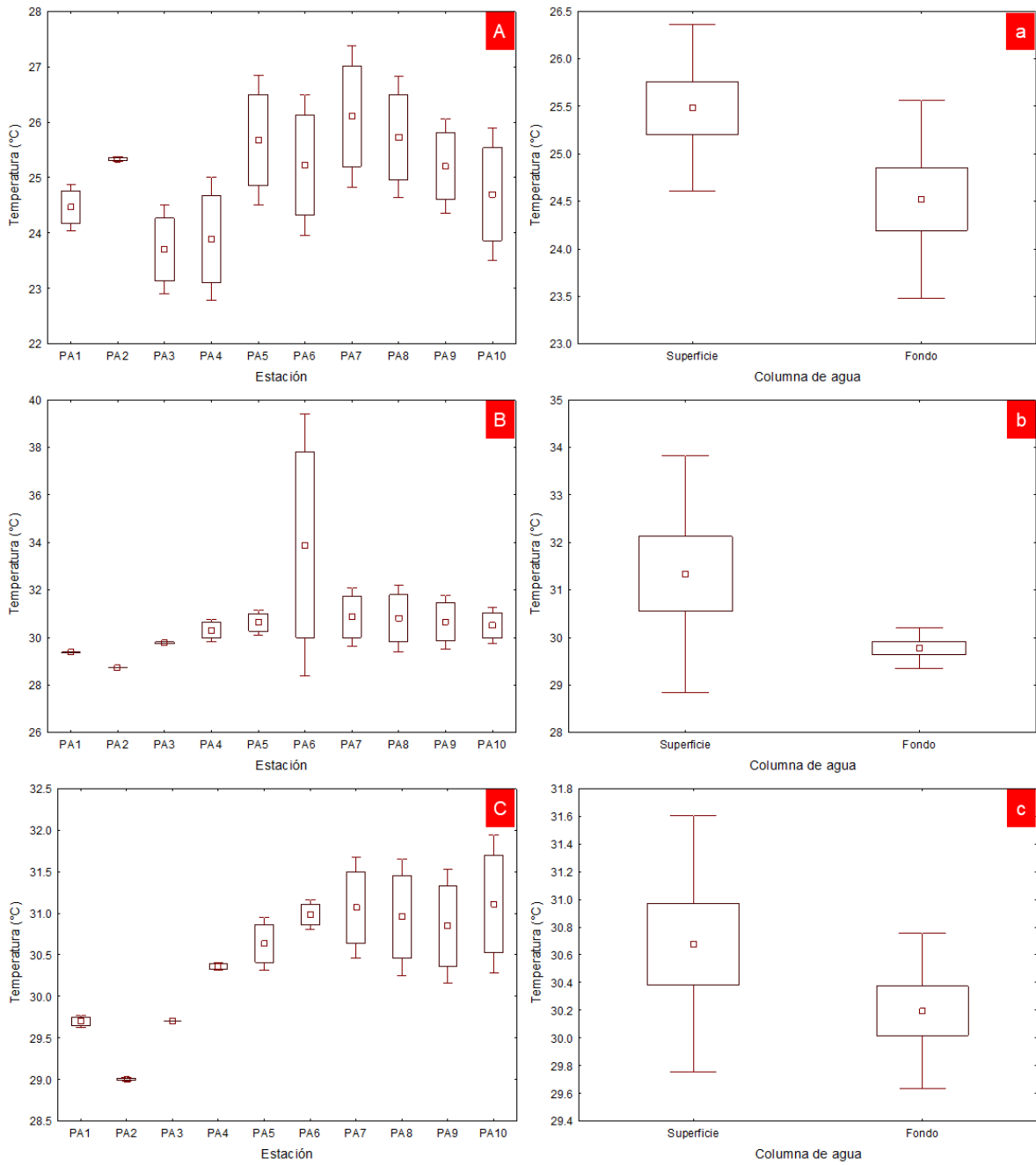


Figura 5. Dinámica de temperatura en diferentes temporadas en las estaciones de muestreo, a dos diferentes profundidades de la columna de agua del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

Oxígeno disuelto

La concentración promedio de oxígeno disuelto en la temporada de nortes fue de 3.34 mg/L, en la temporada de secas fue de 4.17 mg/L y en la temporada de lluvias se obtuvo un promedio de 4.10 mg/L (Tabla 2).

Las concentraciones de oxígeno disuelto promedio máximas fueron de 4.95 mg/L, registradas en la estación seis en temporada de secas y las concentraciones mínimas fueron de 2.82 mg/L registradas en la estación tres en temporada de nortes. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación a las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p= 0.15$, secas: $p=0.06$ y lluvias: $p= 0.10$) (Fig. 6)

Se registró un promedio de oxígeno disuelto superficial en la temporada de secas de 4.21 mg/L y de fondo entre los 4.13 mg/L, para la temporada de lluvias se registraron concentraciones superficiales de 4.08 mg/L y de fondo de 4.11 mg/L, por otra parte, para la temporada de nortes se obtuvieron concentraciones superficiales de 3.56 mg/L y de fondo de 3.11 mg/L. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la superficie y el fondo en la columna de agua (nortes: $p= 0.05$, secas: $p=0.36$ y lluvias: $p=0.54$) (Fig.6).

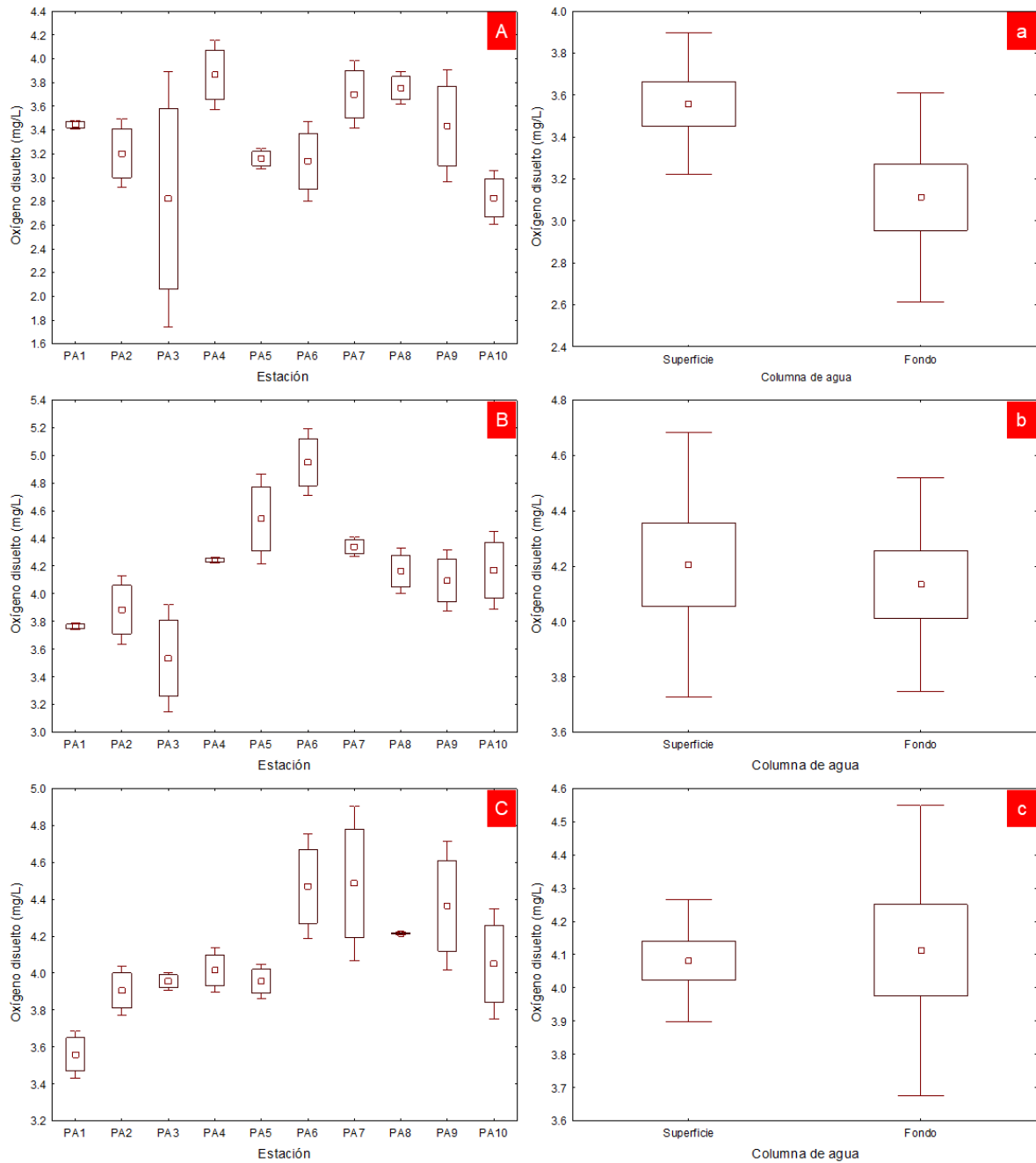


Figura 6. Dinámica de oxígeno disuelto en diferentes temporadas en las estaciones de muestreo, a dos diferentes profundidades de la columna de agua del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

Salinidad

La concentración de salinidad promedio en la temporada de nortes fue de 0.58 ups, en la temporada de secas fue de 10.02 ups y en la temporada de lluvias se obtuvo un valor de 10.12 ups (Tabla 2).

En la salinidad el máximo promedio registrado fue de 26.40 ups en la estación uno en temporada de secas, mientras que, el promedio mínimo registrado fue de 0.24 ups en la estación nueve en temporada de nortes. La distribución de salinidad en el sistema muestra un descenso en la concentración que va desde la estación uno a la diez, en las tres temporadas climáticas estudiadas. En la temporada de nortes se registró un gradiente que osciló entre los 1.12 a 0.24ups, para la temporada de secas osciló entre los 26.40 a 0.41ups y en la temporada de lluvias osciló entre los 20.90 a 0.75 ups. El análisis Kruskal-Wallis no mostró diferencias significativas en relación a las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p=0.03$, secas: $p=0.02$ y lluvias: $p=0.02$) (Fig. 7).

El promedio de salinidad superficial en la temporada de nortes fue de 0.49 ups y 0.67 ups en fondo, en la temporada de secas fue de 9.96 ups en superficie y de fondo 10.09 ups, para la temporada de lluvias se registraron concentraciones promedio de 10.09 ups para la superficie y 10.15 ups para fondo. El análisis de Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la superficie y el fondo en la columna de agua (nortes: $p= 0.73$, secas: $p= 0.85$ y lluvias: $p= 0.93$) (Fig. 7).

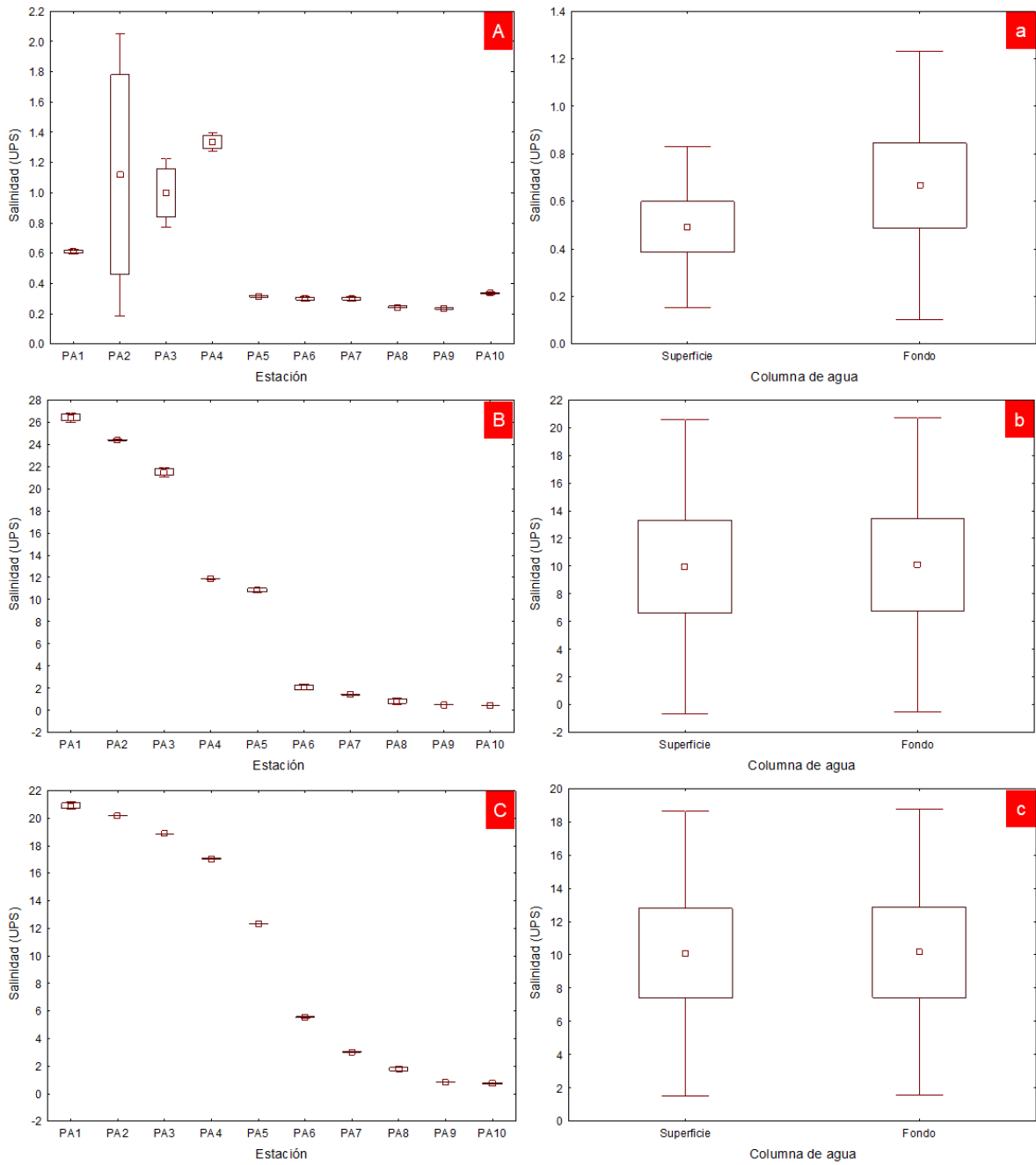


Figura 7. Dinámica de salinidad en diferentes temporadas en las estaciones de muestreo, a dos diferentes profundidades de la columna de agua del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

pH

El pH promedio obtenido en la temporada de nortes fue de 7.36, en la temporada de secas se registró un promedio de 7.43, mientras que, en la temporada de lluvias se obtuvo un promedio de 7.71 (Tabla 2).

Se registró el promedio máximo de 8.79 en la estación ocho y el valor mínimo de 6.25 en la estación dos, ambos en la temporada de lluvias, en la cual se observó mayor variabilidad en relación a las otras temporadas estudiadas. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en la temporada de nortes y secas (nortes: $p= 0.05$, secas: $p= 0.11$ y lluvias: $p= 0.04$) (Fig. 8).

En la temporada de nortes el pH promedio superficial fue de 7.41 y de fondo 7.32, en la temporada de secas se registraron valores superficiales de 7.49 y de fondo en 7.34, para la temporada de lluvias fue de 7.81 en superficie y 7.62 en fondo. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre el pH superficial y de fondo en la columna de agua (nortes: $p= 0.32$, secas: $p= 0.08$ y lluvias: $p= 0.54$) (Fig. 8).

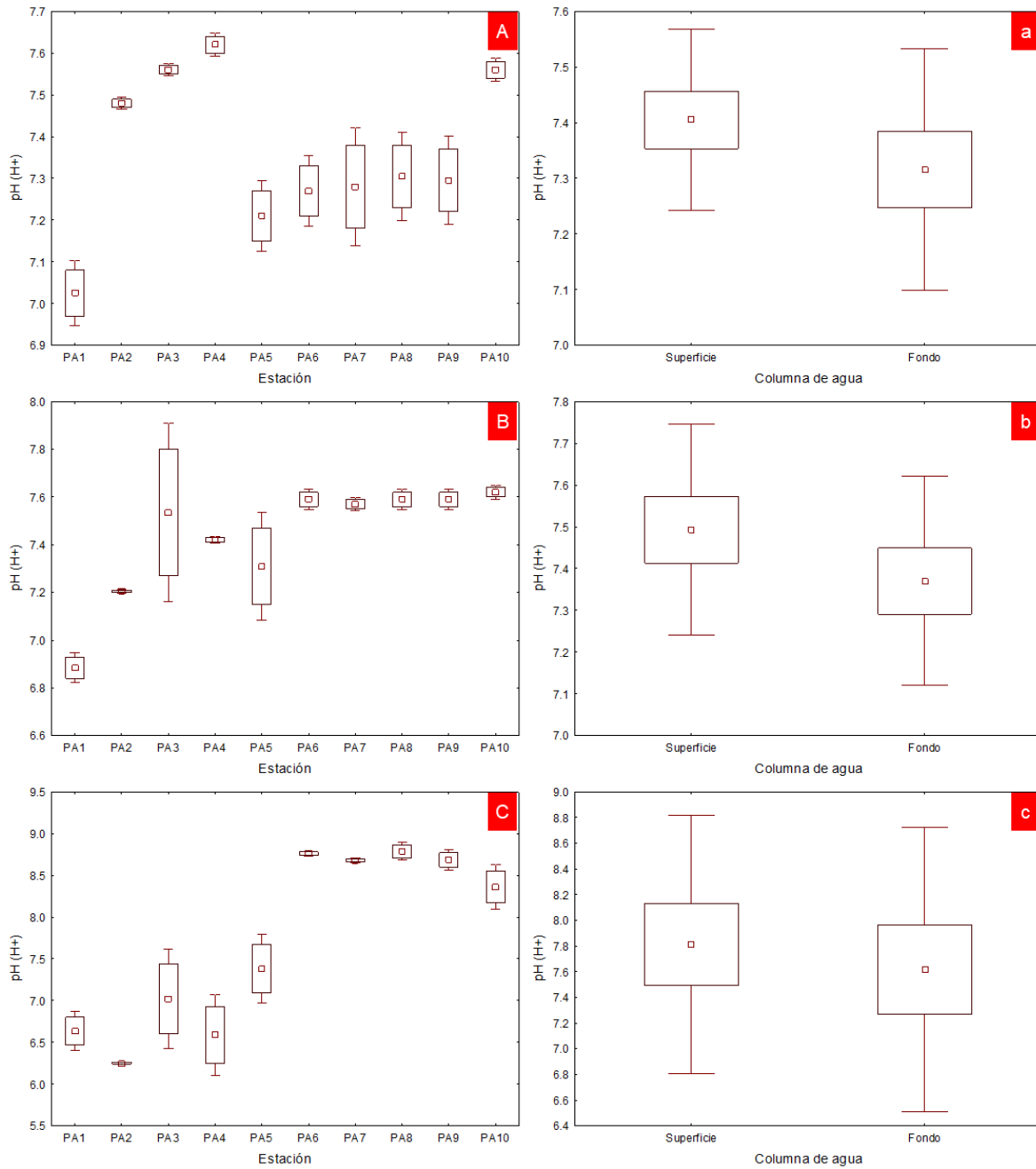


Figura 8. Dinámica de pH en diferentes temporadas en las estaciones de muestreo, a dos diferentes profundidades de la columna de agua del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

Tabla 2. Valores promedios de las variables fisicoquímicas del SPA durante las temporadas de muestreo

		ESTACIÓN										
		PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6	PA7	PA8	PA9	PA10	Promedio
NORTES	Temperatura (°C)	24.47	25.33	23.71	23.90	25.68	25.23	26.11	25.73	25.21	24.70	25
	Oxígeno disuelto (mg/L)	3.45	3.21	2.82	3.87	3.16	3.14	3.70	3.76	3.44	2.83	3.34
	Salinidad (UPS)	0.61	1.12	1.00	1.34	0.32	0.30	0.30	0.25	0.24	0.34	0.58
	pH (H+)	7.03	7.48	7.56	7.62	7.21	7.27	7.28	7.31	7.30	7.56	7.36
	Transparencia (cm)	35	60	60	60	70	85	90	100	80	80	72.00
	Profundidad (cm)	230	140	220	295	240	170	250	230	220	230	222.50
SECAS	Temperatura (°C)	29.38	28.75	29.78	30.30	30.63	33.90	30.87	30.81	30.66	30.51	30.56
	Oxígeno disuelto (mg/L)	3.77	3.89	3.54	4.25	4.54	4.95	4.34	4.17	4.10	4.17	4.17
	Salinidad (UPS)	26.40	24.37	21.48	11.86	10.85	2.08	1.42	0.86	0.51	0.41	10.02
	pH (H+)	6.89	7.21	7.54	7.42	7.31	7.59	7.57	7.59	7.59	7.62	7.43
	Transparencia (cm)	66	66	86	67	90	60	97	70	67	87	75.60
	Profundidad (cm)	446	146	146	186	160	157	270	187	190	260	214.80
LLUVIAS	Temperatura (°C)	29.70	29.01	29.70	30.36	30.64	30.99	31.07	30.96	30.85	31.12	30.44
	Oxígeno disuelto (mg/L)	3.56	3.91	3.96	4.02	3.96	4.47	4.49	4.22	4.37	4.05	4.10
	Salinidad (UPS)	20.90	20.18	18.86	17.06	12.32	5.55	3.04	1.78	0.81	0.75	10.12
	pH (H+)	6.64	6.25	7.02	6.59	7.38	8.76	8.68	8.79	8.69	8.36	7.71
	Transparencia (cm)	130	80	100	100	80	100	90	80	80	100	94.00
	Profundidad (cm)	200	160	140	200	145	160	180	200	210	280	187.50

Análisis de agrupamiento de los parámetros fisicoquímicos

Para identificar asociaciones entre los parámetros fisicoquímicos se aplicó un análisis clúster; utilizando la distancia euclidiana y método de ligamiento Ward, del cual se desprendieron dos grupos.

En la temporada de nortes se identificaron dos asociaciones principales, el grupo 1 se encuentra conformado por las estaciones 1, 2, 5, 7, 8 y 9, mientras que, en el grupo 2 se encuentran las estaciones 3, 6, 4 y 10; en la temporada de secas el grupo 1 está conformado por las estaciones 1, 5 y 7, en tanto que, el grupo 2 está conformado por las estaciones 2, 4, 9, 3, 8, 10 y 6; en la temporada de lluvias el grupo 1 está conformado por las estaciones 1, 6,4,3,2 y 10, en tanto que, el grupo 2 está conformado por las estaciones 5,8 9 y 7 (Fig. 9).

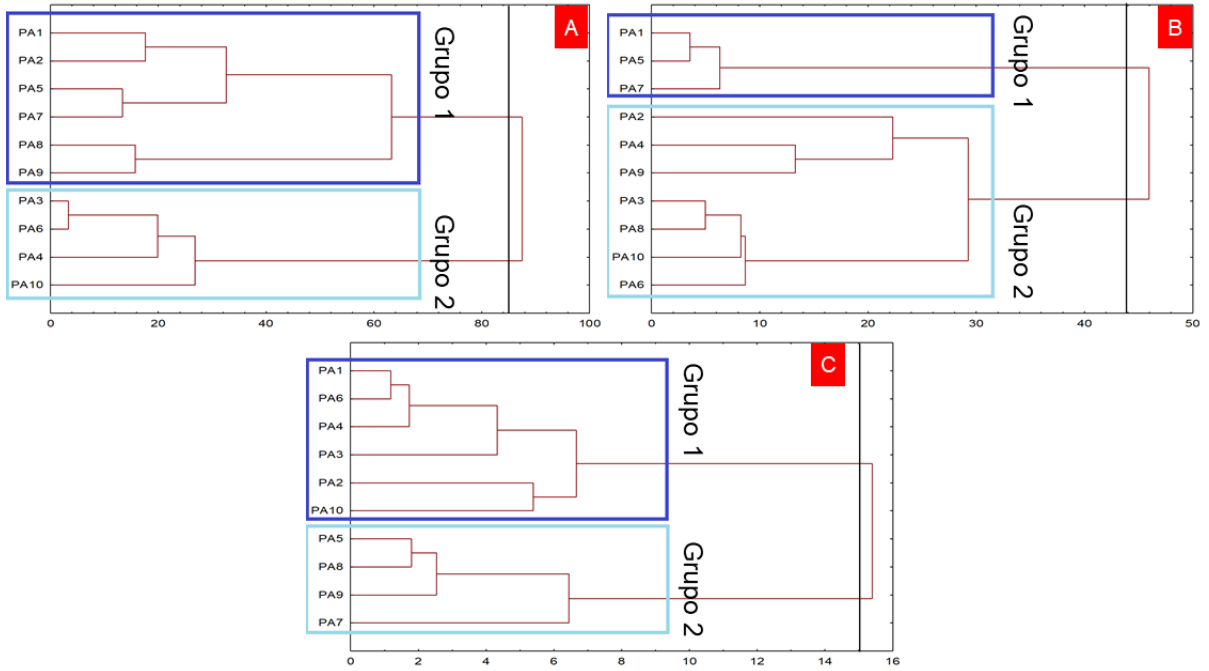


Figura 9. Análisis de clúster de las variables fisicoquímicas del SPA durante tres temporadas climáticas. A) Temporada de nortes. B) Temporada de secas. C) Temporada de lluvias.

Parámetros fisicoquímicos en el Sistema Palizada-Del Este

Temperatura

En el SPE la temperatura promedio obtenida en la temporada de nortes fue de 25.26°C, en la temporada de secas se registró un promedio de 30.45°C y durante la temporada de lluvias se obtuvo un promedio de 27.90°C (Tabla 3).

La temperatura promedio máxima fue de 31.35°C en la estación diez durante la temporada de secas, por otra parte, la temperatura promedio mínima fue de 23.74°C en la estación nueve en temporada de nortes. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación a las temporadas y sitios muestreados en la temporada de secas y nortes (nortes: $p=0.13$, secas: $p=0.17$ y lluvias: $p=0.04$) (Fig. 10).

La distribución de temperatura durante la temporada de nortes presentó un promedio superficial de 25.74°C y de fondo 24.78 °C, la temporada de secas expuso un promedio de 30.66 °C superficial y de fondo 30.25 °C, mientras que, durante la temporada de lluvias presentó un promedio de 27.77°C superficial y de fondo 28.03 °C. El análisis de Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la temperatura superficial y de fondo en la temporada de secas y lluvias (nortes: $p= 0.04$, secas: $p=0.40$ y lluvias: $p= 0.96$) (Fig. 10).

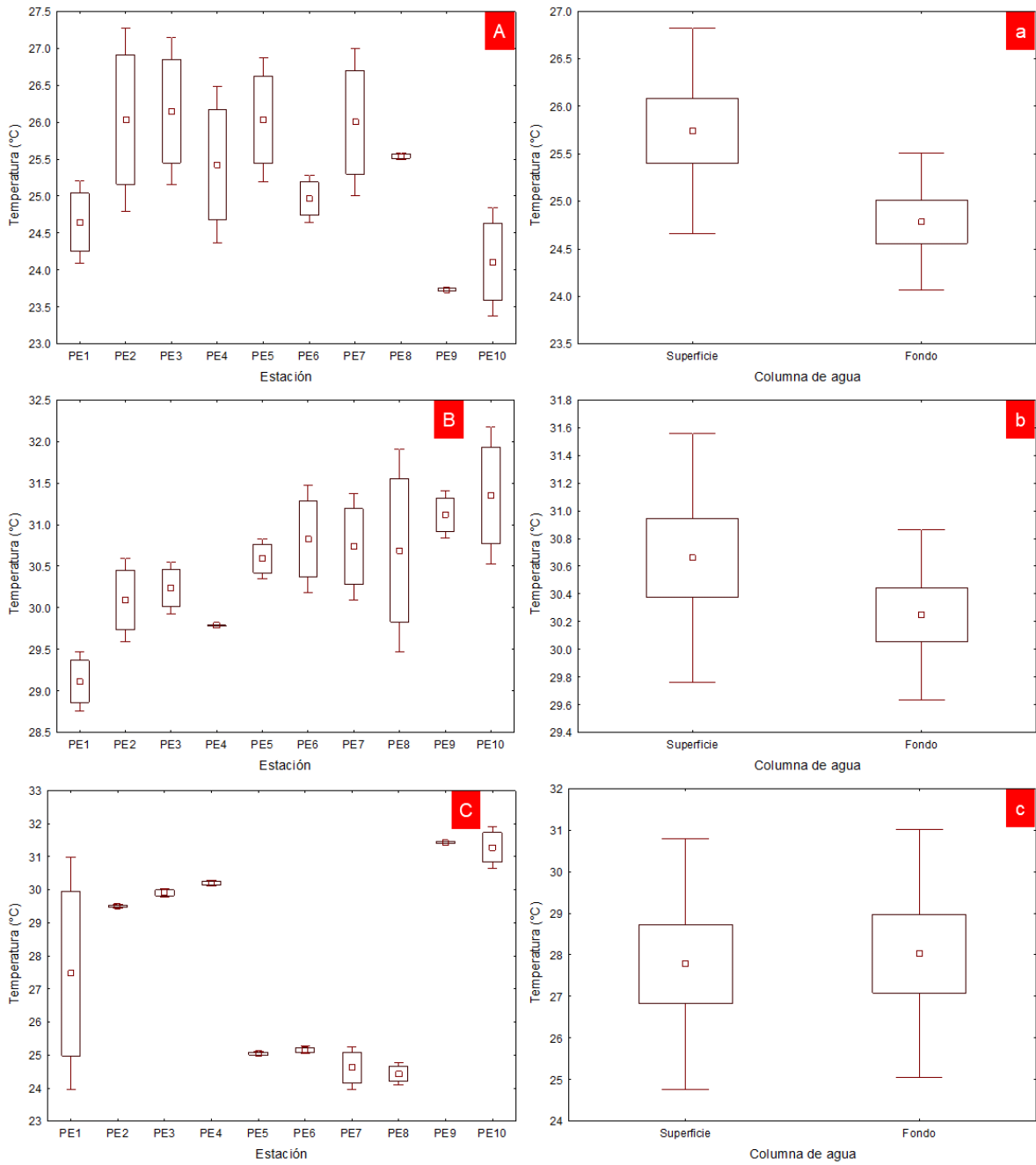


Figura 10. Dinámica de temperatura en diferentes temporadas en las estaciones de muestreo, a dos diferentes profundidades de la columna de agua del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias

Oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno disuelto promedio en la temporada de nortes fue de 1.31 mg/L, en la temporada de secas se consiguió un promedio de 2.53 mg/L, en tanto que, en la temporada de lluvias fue de 2.24 mg/L (Tabla 3).

El registro promedio máximo fue de 3.36 mg/L en la estación nueve durante la temporada de secas, en cambio, la concentración mínima fue de 0.39 mg/L en la estación seis en temporada de nortes. El análisis de Kurskal-Wallis mostró diferencias significativas en relacion a las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p= 0.33$, secas: $p=0.29$, y lluvias: $p= 0.17$) (Fig. 11).

Por otra parte, el promedio del oxígeno disuelto superficial en la temporada de nortes exhibió valores de 1.48 mg/L superficial y de fondo de 1.14 mg/L, para la temporada de secas fue de 2.87 mg/L y de fondo entre los 2.19 mg/L y en la temporada de lluvias se registraron concentraciones superficiales de 2.26 mg/L y de fondo de 2.22 mg/L. El análisis de Kurskal-Wallis mostró diferencias significativas durante la temporada de secas y lluvias en la columna de agua (nortes: $p= 0.03$, secas: $p=0.05$ y lluvias: $p=0.54$) (Fig. 11).

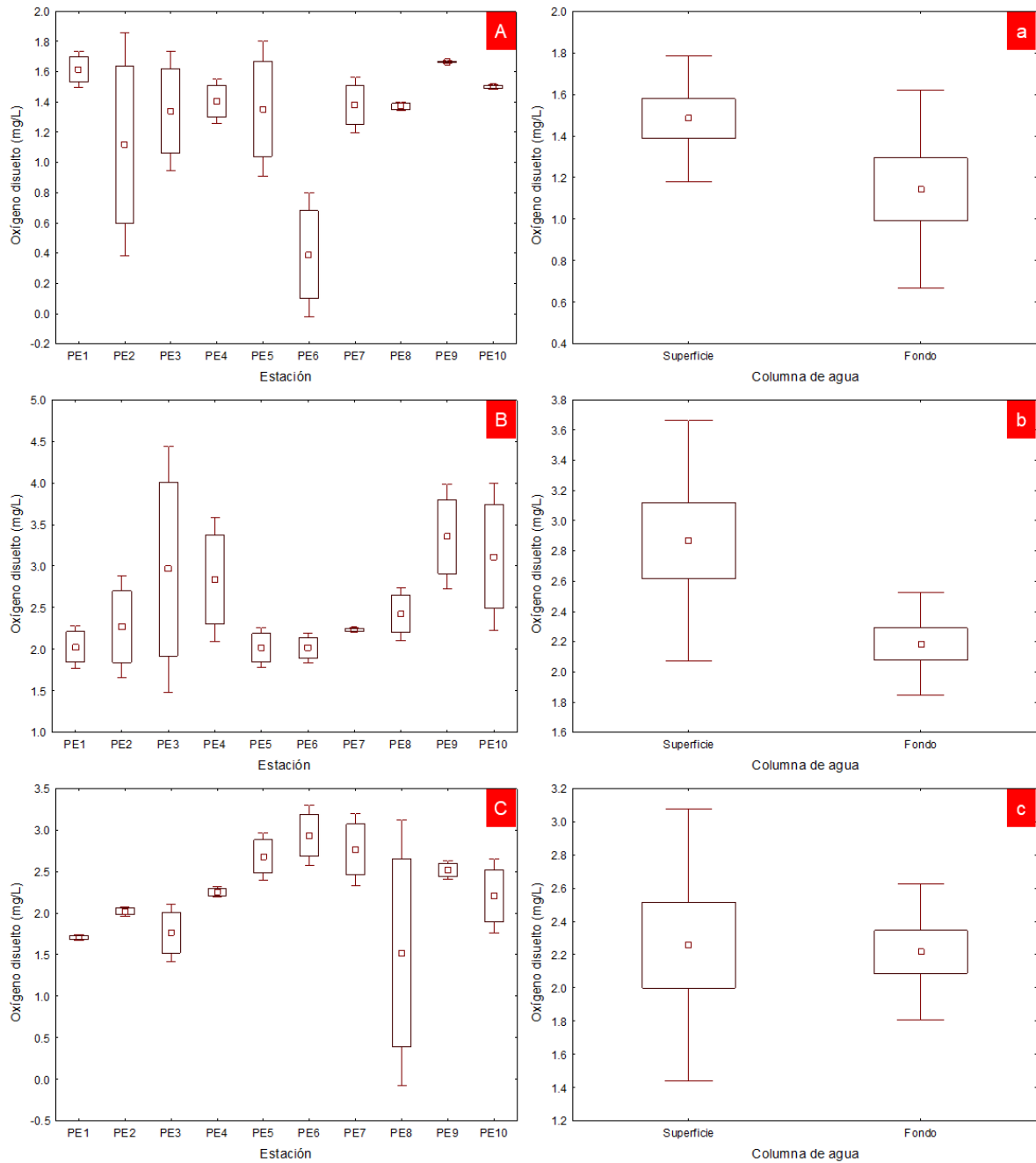


Figura 11. Dinámica de oxígeno disuelto en diferentes temporadas en las estaciones de muestreo, a dos diferentes profundidades de la columna de agua del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias

Salinidad

La concentración de salinidad promedio en la temporada de nortes fue de 0.22 ups, en la temporada de secas se registró un promedio de 7.27 ups y en la temporada de lluvias se exhibió valores de 3.26 ups (Tabla 3).

Para este parametro se registró el promedio máximo de 28.87 ups en la estación uno durante la temporada de lluvias, mientras que, el promedio mínimo fue de 0.09 ups en la estación tres durante la temporada de nortes. En la temporada de nortes se registró un gradiente que osciló entre los 0.33 a 0.09 ups, para la temporada de secas osciló entre los 27.22 a 0.40 ups y en la temporada de lluvias osciló entre los 28.87 a 0.26 ups. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en la temporada de lluvias en relación a las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p=0.02$, secas: $p=0.02$ y lluvias: $p=0.10$) (Fig. 12).

El promedio de salinidad superficial en la temporada de nortes fue de 0.22 ups y 0.23 ups en fondo, en la temporada de secas se presentó un promedio de 6.81 ups en superficie y en fondo de 7.72 ups, a la vez que, para la temporada de lluvias se registró un promedio de 2.95 ups para el agua superficial y 3.57 ups para el agua de fondo. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la superficie y el fondo del cuerpo de agua (nortes: $p=0.67$, secas: $p=0.90$ y lluvias: $p=0.44$) (Fig. 12).

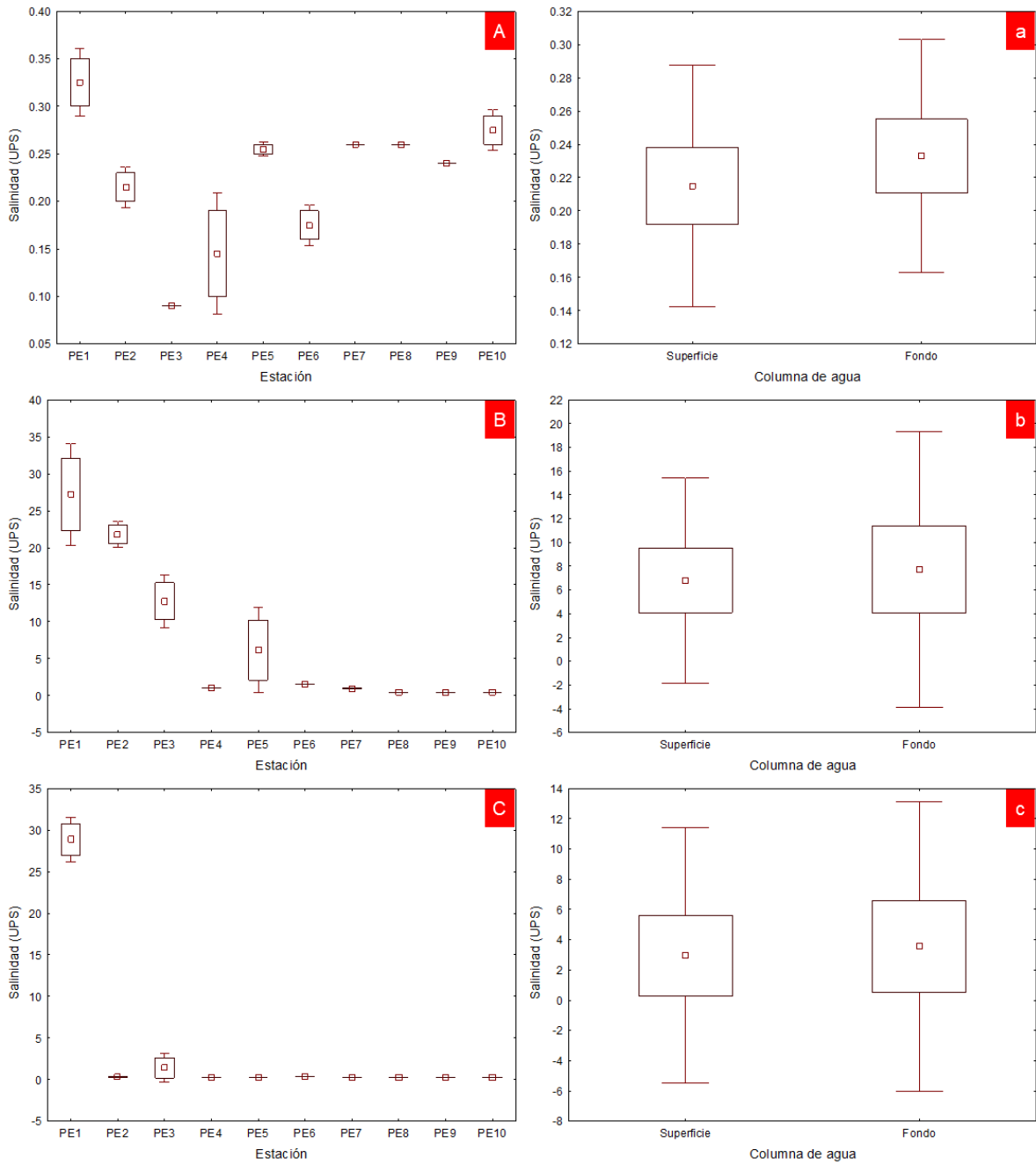


Figura 12. Dinámica de salinidad en diferentes temporadas en las estaciones de muestreo, a dos diferentes profundidades de la columna de agua del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias

pH

El pH promedio obtenido en la temporada de nortes fue de 7.44, en temporada de seca se registró un promedio de 6.70 y en temporada de lluvias fue de 8.02 (Tabla 3).

Se registró el promedio máximo de 9.17 en la estación diez durante la temporada de lluvias, en tanto que, el promedio mínimo fue de 5.24 en la estación cuatro en temporada de secas. El análisis de Kruskal-Wallis mostro diferencias significativas en la temporada de secas y lluvias en relación a las diferentes temporadas y sitios muestreados (nortes: $p= 0.03$, secas: $p= 0.07$ y lluvias: $p= 0.05$) (Fig. 13).

En la temporada de nortes el pH promedio superficial fue de en 7.44 y de fondo en 7.45, para la temporada de secas el promedio superficial registrado fue de 6.78 y de fondo en 6.62, para la temporada de lluvias exhibió valores de 8.08 en superficie y 7.96 de fondo. El análisis de Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre el pH superficial y de fondo en la columna de agua (secas: $p= 0.59$, lluvias: $p= 0.47$ y nortes: $p= 0.70$) (Fig. 13).

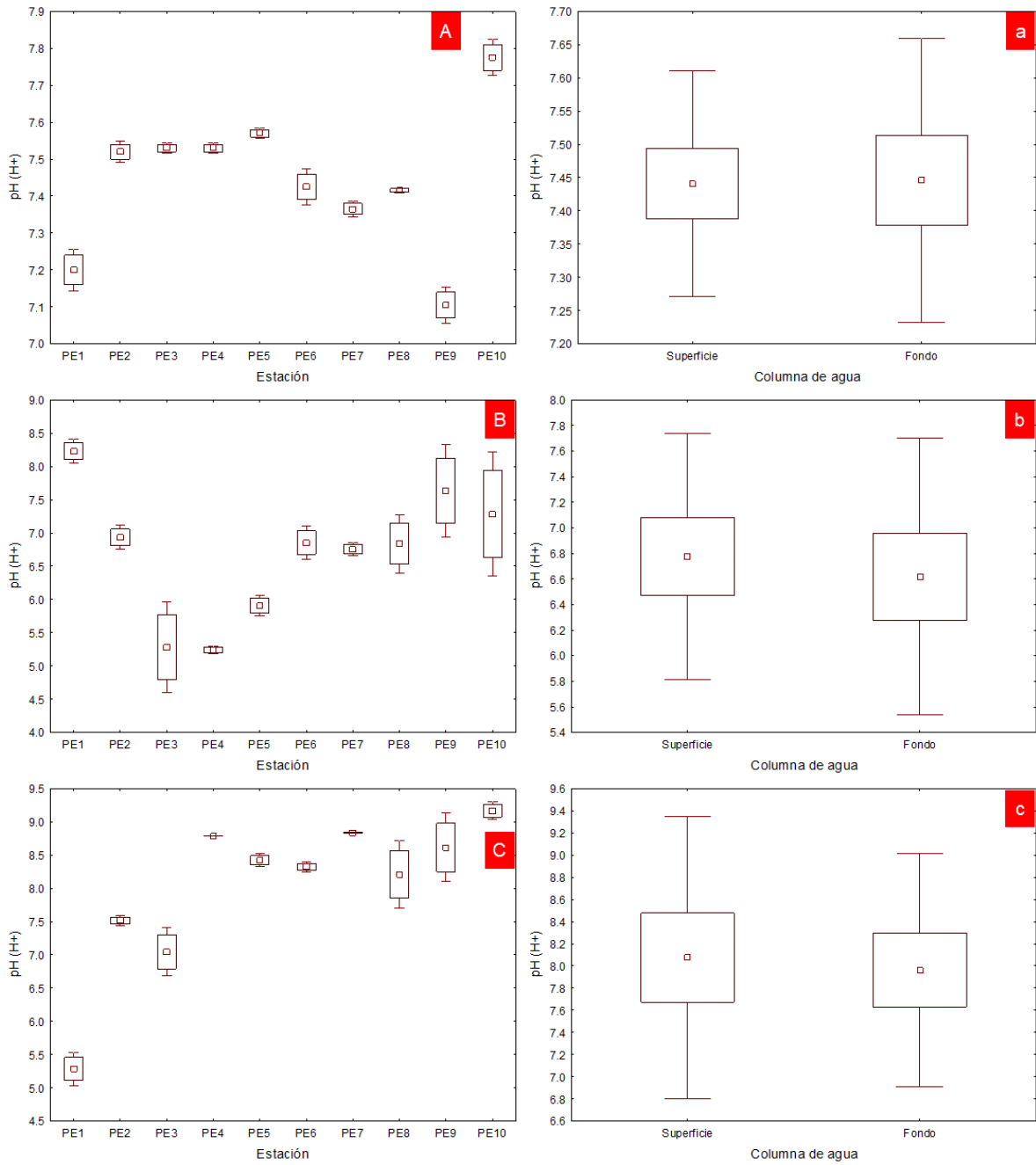


Figura 13. Dinámica de pH en diferentes temporadas en las estaciones de muestreo, a dos diferentes profundidades de la columna de agua del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias

Tabla 3. Valores promedios de las variables fisicoquímicas del SPE durante las temporadas de muestreo

		ESTACIÓN										
		PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6	PE7	PE8	PE9	PE10	Promedio
NORTES	Temperatura (°C)	24.65	26.04	26.15	25.43	26.03	24.97	26.00	25.54	23.74	24.11	25.26
	Oxígeno disuelto (mg/L)	1.62	1.12	1.34	1.41	1.36	0.39	1.38	1.37	1.67	1.50	1.31
	Salinidad (UPS)	0.33	0.22	0.09	0.15	0.26	0.18	0.26	0.26	0.24	0.28	0.22
	pH (H+)	7.20	7.52	7.53	7.53	7.57	7.43	7.37	7.42	7.11	7.78	7.44
	Transparencia (cm)	60	60	55	100	85	130	85	50	60	60	74.50
	Profundidad (cm)	190	210	180	175	270	205	190	125	180	120	184.50
SECAS	Temperatura (°C)	29.12	30.10	30.24	29.79	30.59	30.83	30.74	30.69	31.12	31.35	30.45
	Oxígeno disuelto (mg/L)	2.03	2.27	2.97	2.84	2.02	2.02	2.24	2.43	3.36	3.12	2.53
	Salinidad (UPS)	27.22	21.80	12.76	1.02	6.15	1.56	0.95	0.40	0.42	0.40	7.27
	pH (H+)	8.23	6.94	5.29	5.24	5.91	6.86	6.76	6.84	7.63	7.29	6.70
	Transparencia (cm)	47	77	170	57	57	67	57	50	57	65	70.40
	Profundidad (cm)	137	177	165	70	190	147	150	217	147	157	155.70
LLUVIAS	Temperatura (°C)	27.47	29.50	29.91	30.20	25.05	25.15	24.62	24.44	31.43	31.28	27.90
	Oxígeno disuelto (mg/L)	1.71	2.02	1.77	2.26	2.68	2.94	2.77	1.52	2.52	2.21	2.24
	Salinidad (UPS)	28.87	0.32	1.42	0.26	0.29	0.37	0.28	0.28	0.26	0.27	3.26
	pH (H+)	5.29	7.52	7.05	8.78	8.42	8.32	8.84	8.21	8.62	9.17	8.02
	Transparencia (cm)	80	60	80	50	70	70	50	70	70	70	67.00
	Profundidad (cm)	160	180	180	60	200	160	160	220	140	160	162.00

Análisis de agrupamiento de los parámetros fisicoquímicos

En la Figura 14 se muestran los dendogramas que representan las asociaciones de las estaciones con respecto a los parámetros fisicoquímicos para cada temporada climática (nortes, secas y lluvias).

En la temporada de nortes se identificaron dos asociaciones principales, el grupo 1 se encuentra conformado por las estaciones 1,10, 9 y 6, en el grupo 2 se encuentran las estaciones 2, 3, 5, 7, 4 y 8; en la temporada de secas el grupo 1 está conformado por las estaciones 1 y 2, mientras que, el grupo 2 está conformado por las estaciones 3, 5, 4, 6, 7, 8, 10 y 9; en la temporada de lluvias el grupo 1 está conformado por la estación 1, por el contrario, el grupo 2 por las estaciones 2, 3, 4, 9, 10, 5, 6, 7 y 8 (Fig. 14).

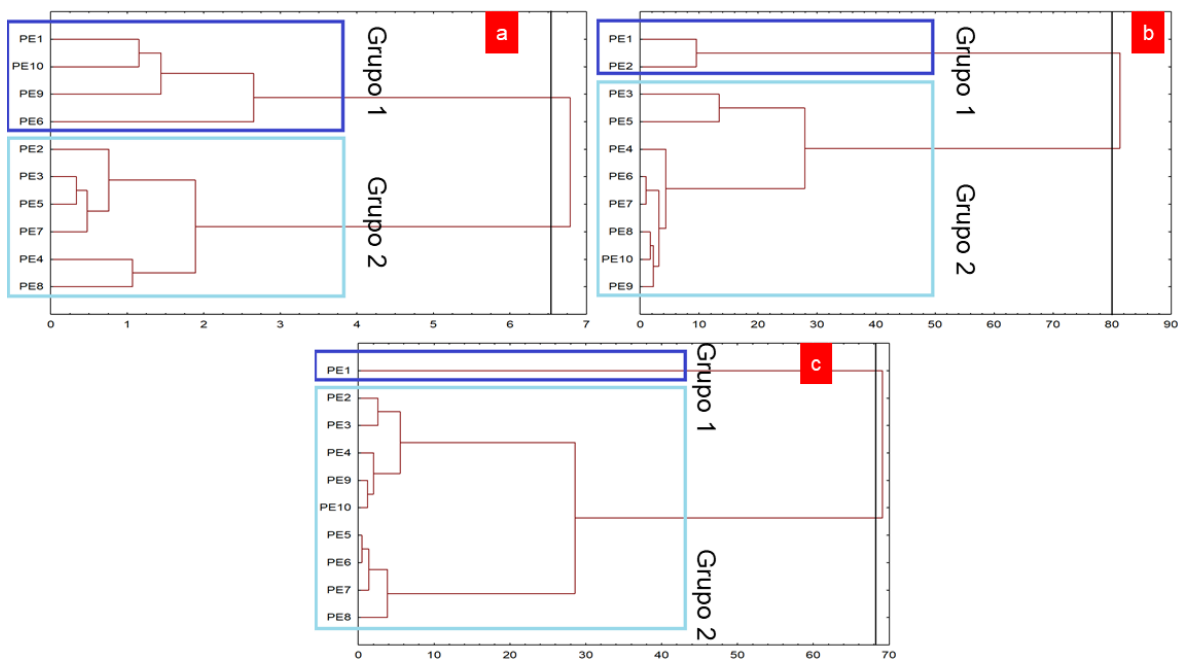


Figura 14. Análisis de clúster de las variables fisicoquímicas del SPE durante tres temporadas climáticas. a) Temporada de nortes. b) Temporada de secas. c) Temporada de lluvias

Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) en el Sistema Pom-Atasta

Las concentraciones de los compuestos nitrogenados de nitratos, nitritos y amonio se sumaron para la obtención del Nitrógeno inorgánico disuelto (NID). El promedio máximo obtenido en la temporada de nortes fue de 6.69 mg/L en la estación diez y un mínimo de 1.33 mg/L en la estación uno; en la temporada de secas se obtuvo un máximo de 14.09 mg/L en la estación cuatro y un mínimo de 3.53 mg/L en la estación tres, mientras que, en la temporada de lluvias se registró un máximo de 3.78 mg/L en la estación dos y un mínimo de 0.56 mg/L en la estación seis (Fig.15)

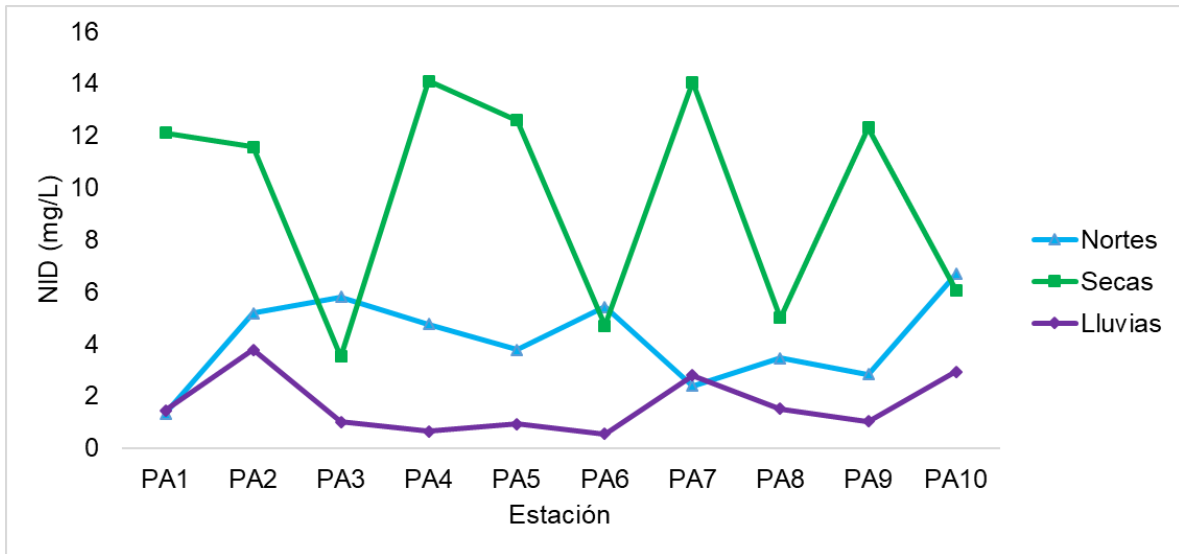


Figura 15. Concentraciones de Nitrógeno Inorgánico Disuelto del SPA en tres temporadas de muestreo

De igual manera, las mayores concentraciones de NID se obtuvieron en la temporada de secas en la zona que tiene interacción con la Laguna de Términos a través de la Boca, Laguna Palmas, San Carlos, Los Loros y Laguna Atasta. En la temporada de nortes se observó un comportamiento homogéneo con relación a las zonas evaluadas, se registraron concentraciones menores a 7 mg/L; por otra parte, en la temporada de lluvias se registraron concentraciones menores a 4 mg/L (Fig.16).

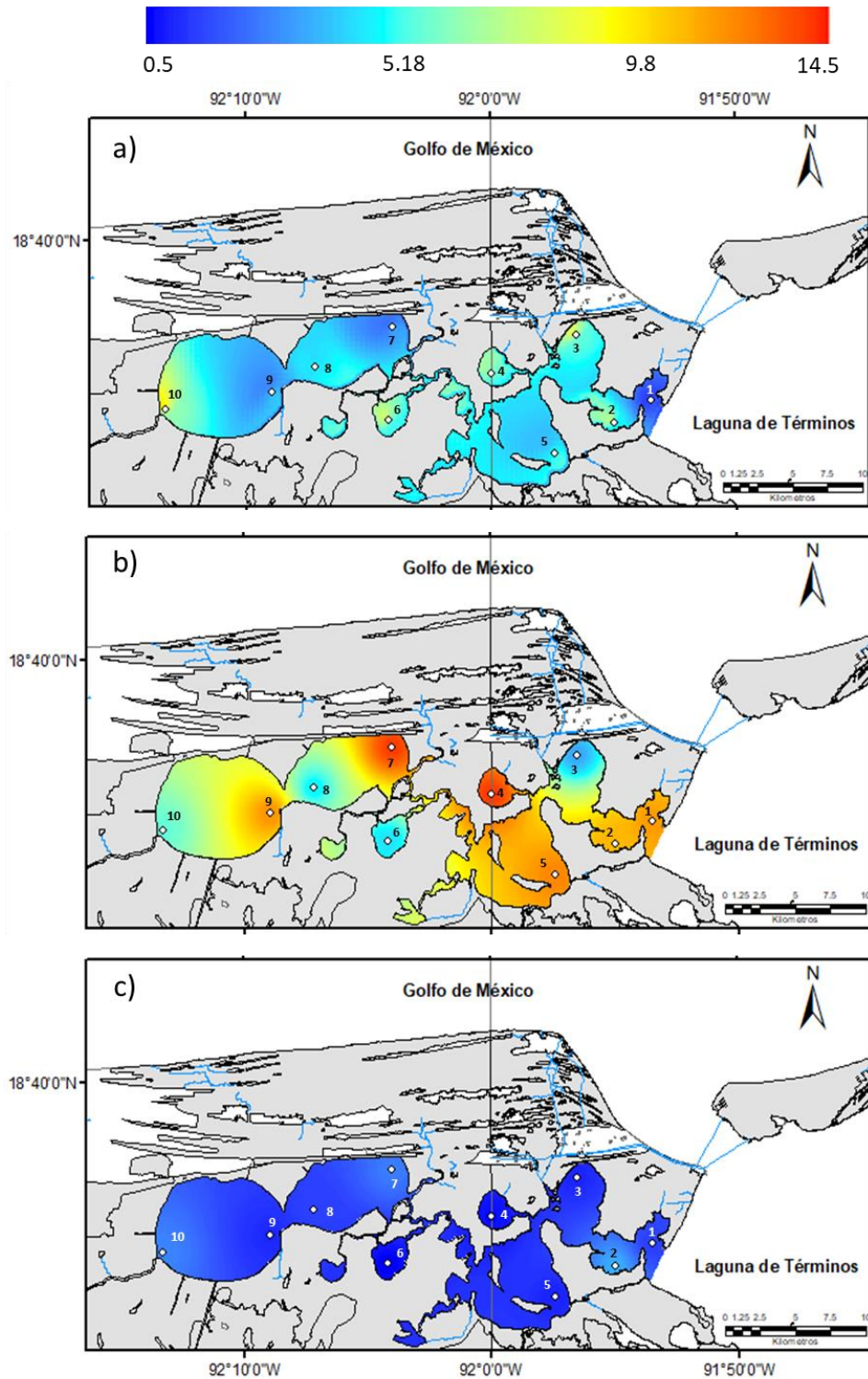


Figura 16. Distribución de Isoconcentraciones del Nitrógeno Inorgánico Disuelto del SPA en tres temporadas climáticas: A) Nortes, b) Secas, c) Lluvias

Componentes del NID

Nitrato

Durante el periodo de estudio, se observó que el nitrato fue el que más contribuyó en comparación al amonio y nitrito; el promedio del nitrato obtenido en la temporada de nortes fue de 3.88 mg/L, en la temporada de secas se registró un promedio de 9.23 mg/L y en la temporada de lluvias de 1.33 mg/L (Tabla 4).

Se registró la máxima concentración de 13.85 mg/L en la estación cuatro durante la temporada de secas, mientras que, la concentración mínima fue de 0.30 mg/L en la estación tres en temporada de lluvias. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación con las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p= 0.43$, secas: $p= 0.58$ y lluvias: $p= 0.16$ mg/L) (Figura 17).

En la temporada de nortes el nitrato promedio superficial fue de 3.16 mg/L y en fondo en 4.59 mg/L, en la temporada de secas se exhibió un promedio de 9.81 mg/L en superficie y de fondo en 8.65 mg/L y para la temporada de lluvias fue de 1.53 mg/L en superficie y 1.13 mg/L en fondo. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la superficie y fondo en la columna de agua (nortes: $p= 0.13$, secas: $p= 0.73$ y lluvias: $p= 0.70$) (Fig. 17).

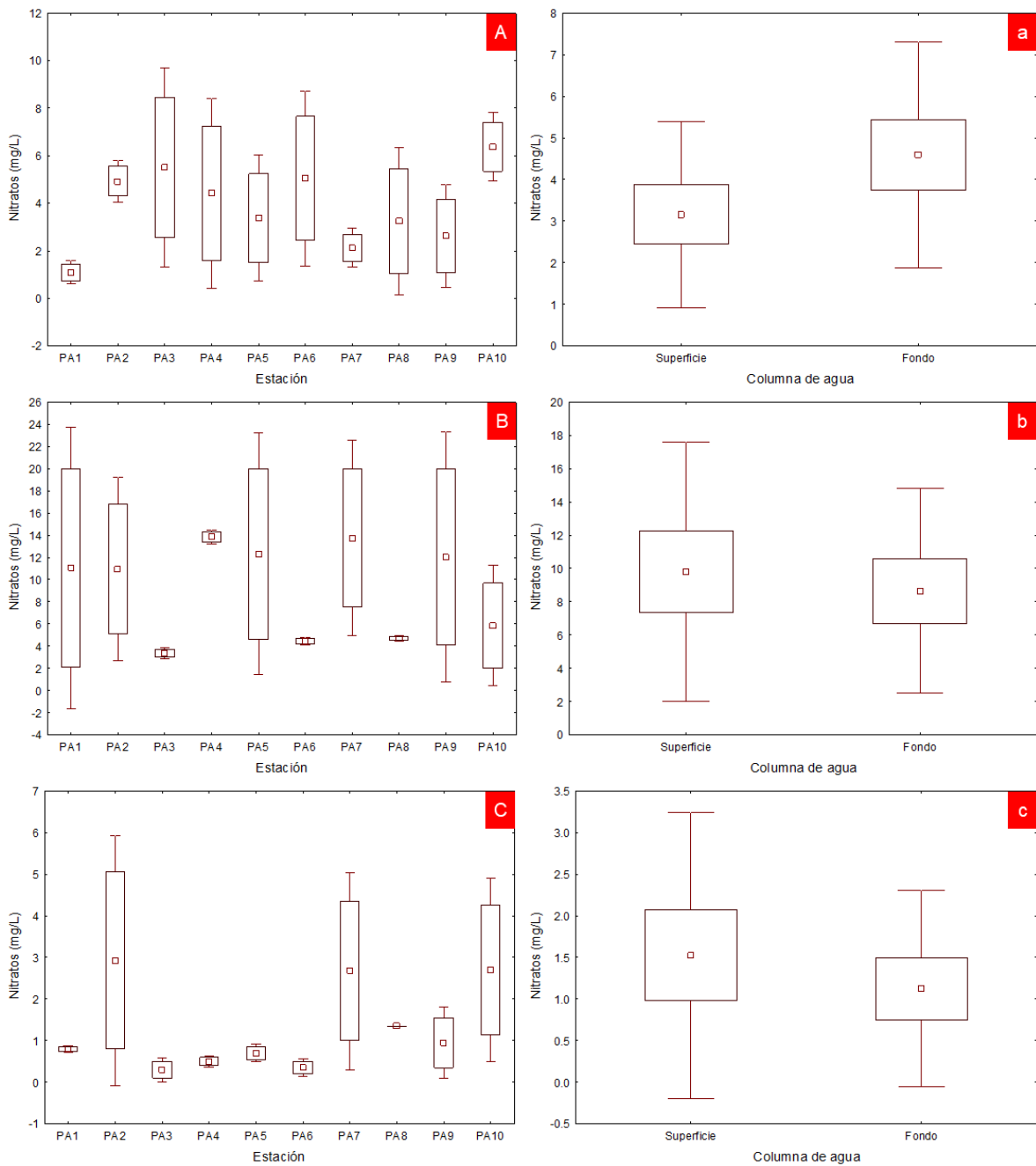


Figura 17. Análisis de nitratos a escala espacial y temporal del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias

Amonio

Otro componente del NID es el amonio. El promedio de amonio obtenido en la temporada de nortes fue de 0.25 mg/L, en la temporada de secas se presentó un promedio de 0.33 mg/L y en temporada de lluvias fue de 0.30 mg/L (Tabla 4).

El promedio máximo registrado fue de 1.01 mg/L en la estación uno durante la temporada de secas, en tanto que, el promedio mínimo fue de 0.03 mg/L en la estación nueve en temporada de lluvias. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación con las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p= 0.14$, secas: $p= 0.20$ y lluvias: $p= 0.10$) (Fig.18).

En la superficie en temporada de nortes se registró un promedio de 0.26 mg/L y 0.24 mg/L en fondo, en la temporada de secas fue de 0.41 mg/L en superficie y de fondo 0.26 mg/L y durante la temporada de lluvias se obtuvo un promedio de 0.16 mg/L en superficie y 0.43 mg/L en fondo. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la superficie y fondo en la columna de agua (nortes: $p= 0.93$, secas: $p= 0.40$ y lluvias: $p= 0.59$) (Fig. 18).

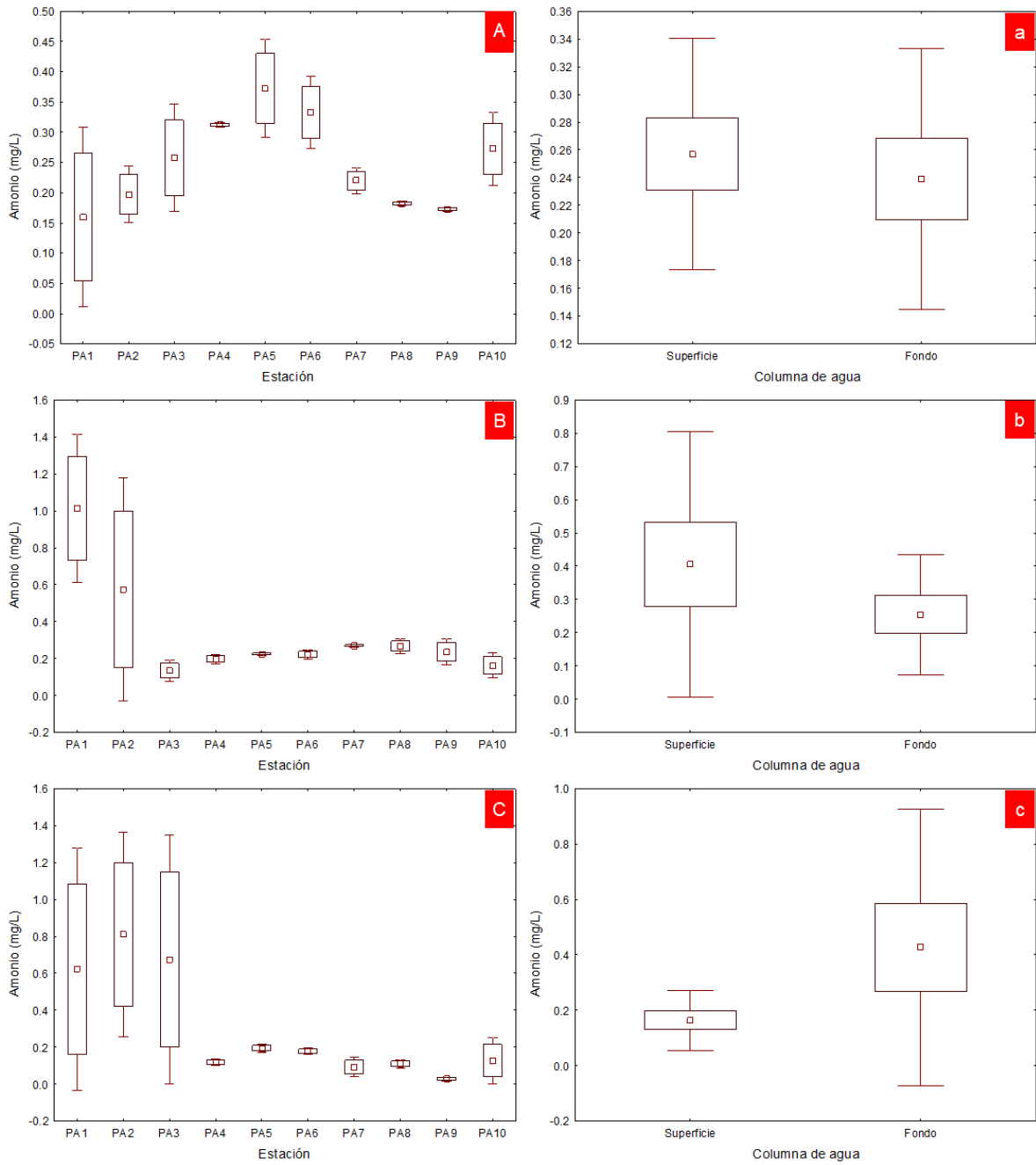


Figura 18. Análisis de amonio a escala espacial y temporal del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias

Nitrito

El tercer componente del NID, el nitrito, presentó concentraciones constantes y bajas, en comparación al nitrato y amonio. El promedio de nitrito registrado en la temporada de nortes fue de 0.04 mg/L, en temporada de secas se registró un promedio de 0.04 mg/L y en temporada de lluvias fue de 0.05 mg/L (Tabla 4).

El promedio máximo registrado fue de 0.11 mg/L en la estación diez durante la temporada de lluvias, mientras que, las concentraciones mínimas fueron de 0.03 mg/L presentes en las tres temporadas climáticas. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación con las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p= 0.80$, secas: $p= 0.64$ y lluvias: $p= 0.88$) (Fig. 19).

En la temporada de nortes y secas se registró un promedio de 0.04 mg/L en superficie y fondo, a diferencia de la temporada de lluvias que se registró un promedio de 0.05 mg/L en superficie y fondo. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la superficie y fondo en la columna de agua (nortes: $p= 0.67$, secas: $p= 0.66$ y lluvias: $p= 0.19$) (Fig. 19).

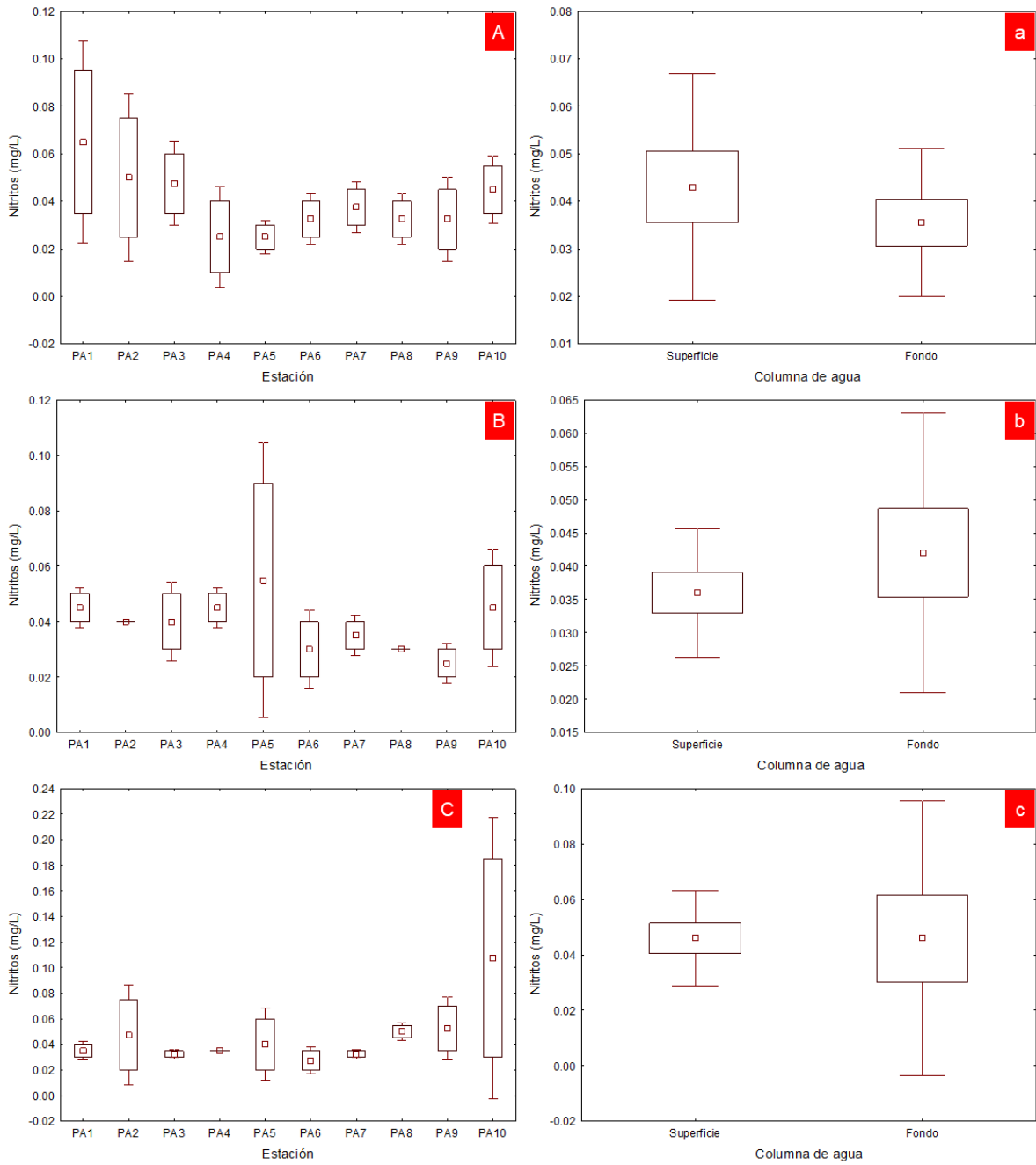


Figura 19. Análisis de nitritos a escala espacial y temporal del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias

Fósforo Inorgánico Disuelto (FID)

Se unificaron las concentraciones de ortofosfatos para la obtención del Fósforo inorgánico disuelto (FID). En temporada de nortes se registró el promedio máximo de 0.21 mg/L en la estación cinco y un mínimo de 0.02 mg/L en las estaciones ocho y nueve; en temporada de secas se obtuvo un máximo de 0.82 mg/L en la estación tres y un mínimo de 0.04 mg/L en la estación uno, mientras que, en la temporada de lluvias se obtuvo la concentración máxima de 0.27 mg/L en la estación tres y la mínima de 0.05 mg/L en la estación uno (Fig. 20).

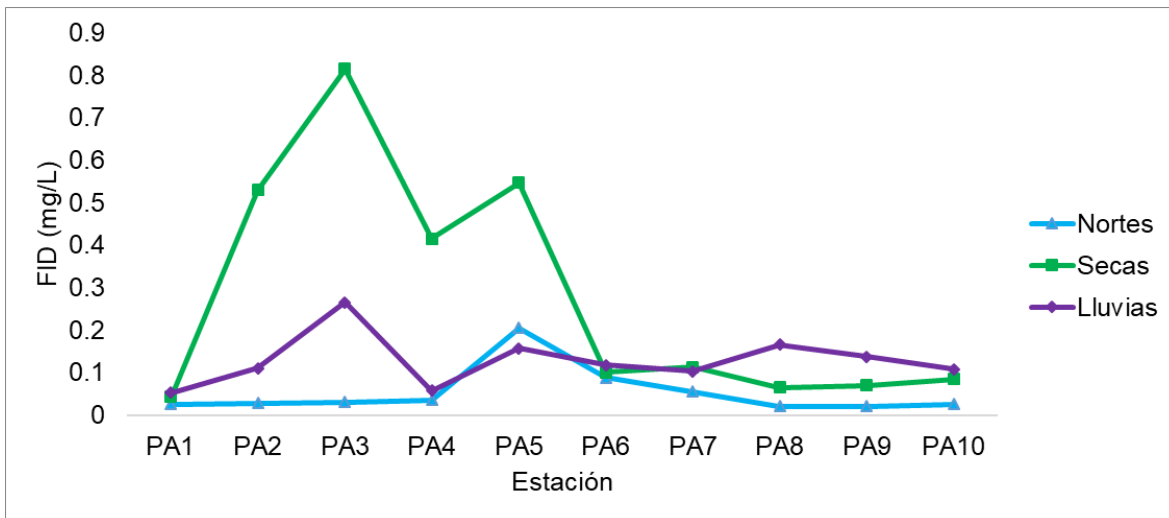


Figura 20. Concentraciones de Fósforo Inorgánico Disuelto del SPA durante tres épocas de muestreo

La mayor concentración de FID se registró en la temporada de secas al igual que las zonas con la mayor concentración de NID, que se encuentran en interacción con la Laguna de Términos. En la temporada de nortes y lluvias se observa un comportamiento homogéneo en los distintos puntos de muestreo (Fig. 21).

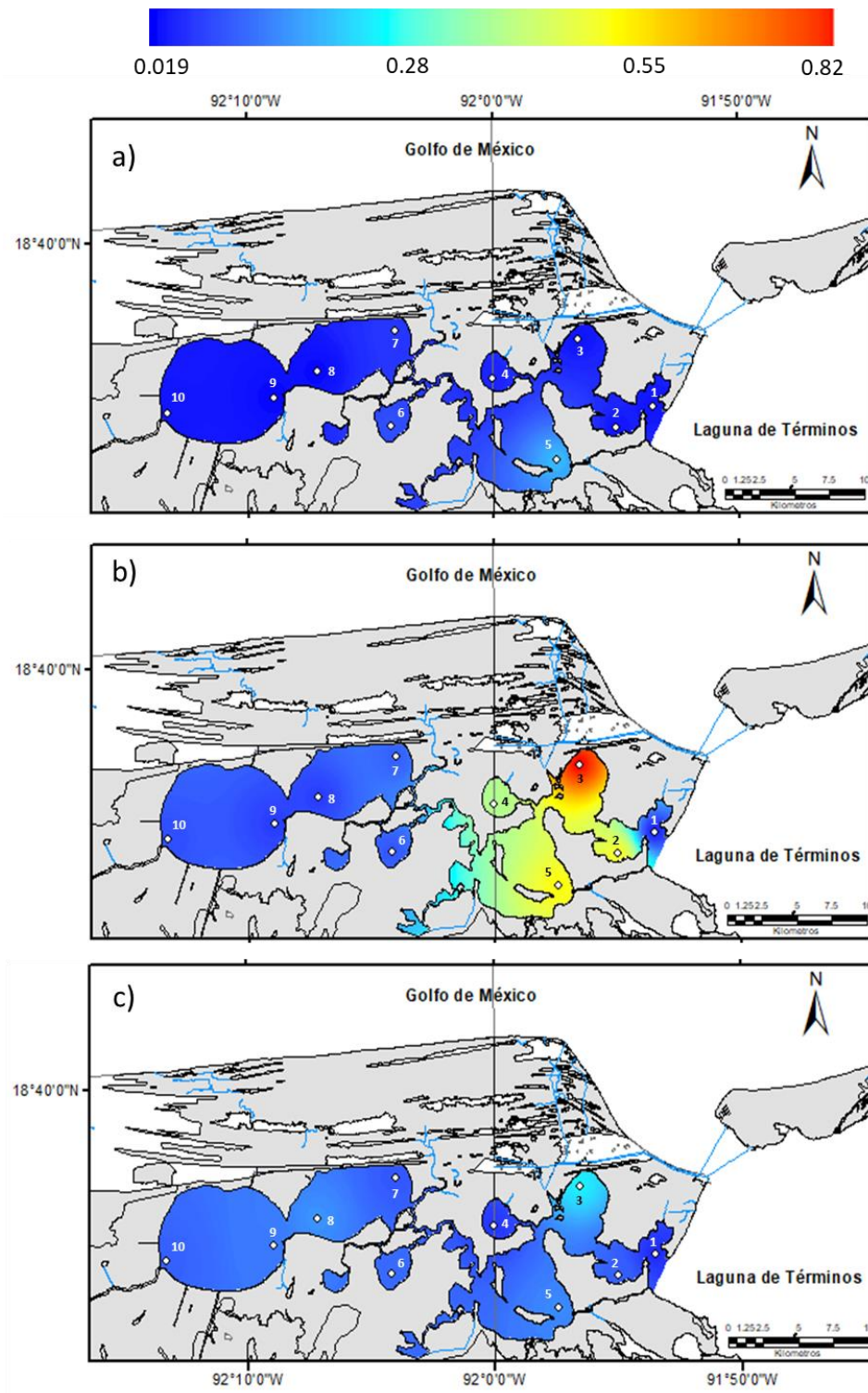


Figura 21. Distribución de Isoconcentraciones del Fósforo Inorgánico Disuelto del SPA en tres temporadas climáticas: A) Nortes, b) Secas, c) Lluvias

Fosfato

En el caso de este nutriente se observaron pulsos en las tres temporadas climáticas. En la temporada de nortes se registró un promedio de 0.05 mg/L, en temporada de secas se obtuvo 0.28 mg/L y en temporada de lluvias fue de 0.13 mg/L (Tabla 4).

El promedio máximo registrado fue de 0.82 mg/L en la estación tres durante la temporada de secas, mientras que, las concentraciones mínimas fueron de 0.02 mg/L en la estación ocho y nueve en temporada de nortes. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación con las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p= 0.39$, secas: $p= 0.61$ y lluvias: $p= 0.52$) (Fig. 22).

Las concentraciones superficiales promedio en la temporada de nortes fue de 0.07 mg/L y 0.04 mg/L en fondo, en la temporada de secas se registró 0.31 mg/L en superficie mg/L y 0.25 mg/L en fondo y en la temporada de lluvias en superficie fue de 0.10 mg/L y 0.15 mg/L en fondo. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en la temporada de nortes y secas entre la superficie y fondo en la columna de agua (nortes: $p= 0.18$, secas: $p= 0.10$ y lluvias: $p= 0.02$) (Fig. 22).

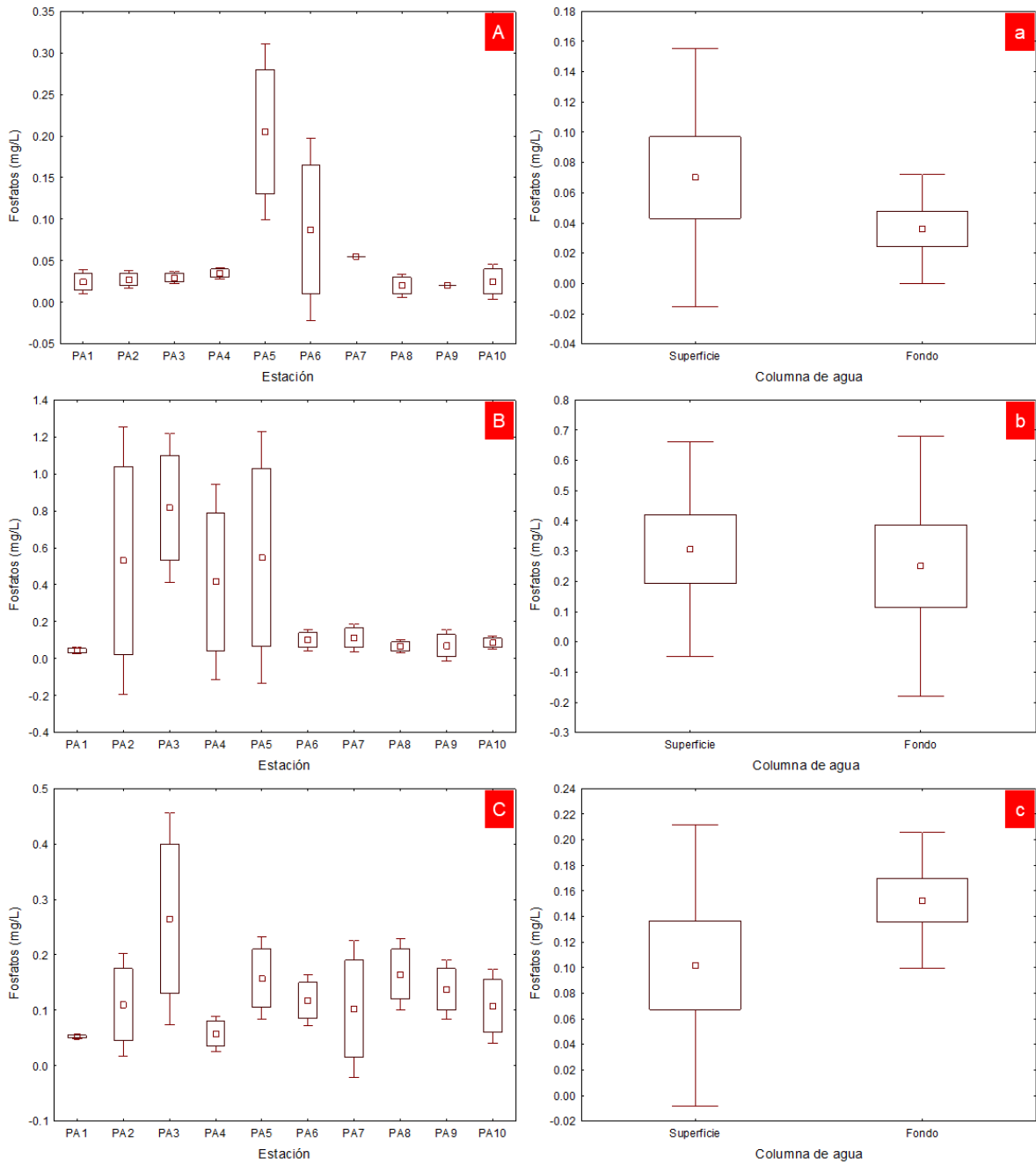


Figura 22. Análisis de fosfatos a escala espacial y temporal del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias

Clorofila a

La clorofila promedio obtenida en la temporada de nortes fue de 32.99 mg m^{-3} , en temporada de secas se exhibió un promedio de 5.24 mg m^{-3} y en temporada de lluvias de 4.26 mg m^{-3} (Tabla 4).

Se registró un promedio máximo de 49.06 mg m^{-3} en la estación dos en temporada de nortes, mientras que, el promedio mínimo fue de 0.98 mg m^{-3} registrada en la estación siete en temporada de lluvias. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación a las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p=0.47$, secas: $p=0.11$ y lluvias: $p=0.08$) (Fig.23).

Por otra parte, la distribución de clorofila superficial durante la temporada de nortes presentó un promedio de 24.80 mg m^{-3} y 41.18 mg m^{-3} en fondo, la temporada de secas ostentó un promedio de 5.98 mg m^{-3} en superficie y en fondo 4.51 mg m^{-3} , en tanto que, en la temporada de lluvias se presentó un promedio de 4.10 mg m^{-3} en superficie y 4.43 mg m^{-3} en fondo. El análisis de Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la clorofila superficial y de fondo en la temporada de secas y lluvias (nortes: $p= 0.03$, secas: $p=0.73$ y lluvias: $p= 0.82$) (Fig. 23).

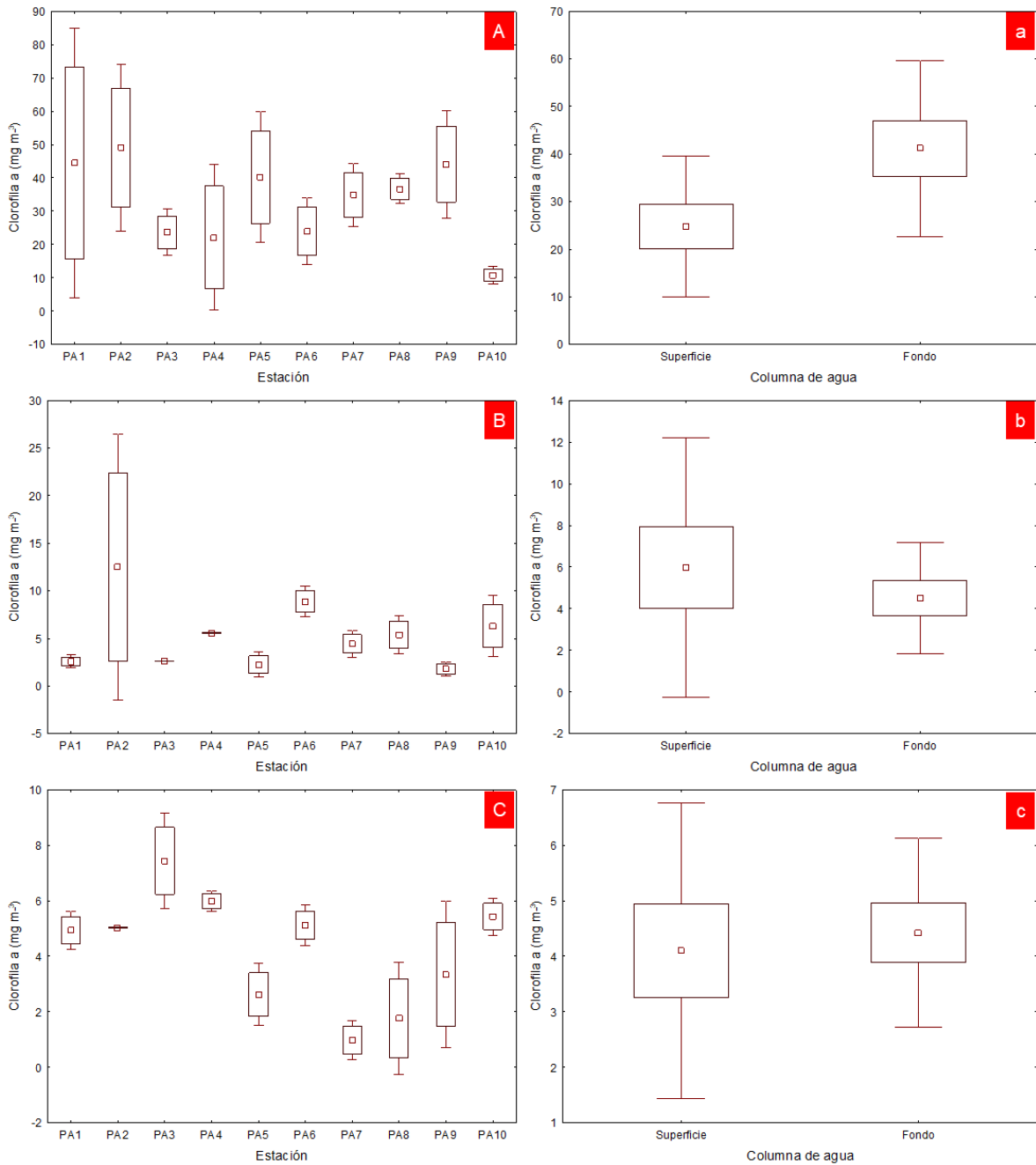


Figura 23. Análisis de la clorofila a escala espacial y temporal del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

De igual manera, en la distribución de la clorofila a se observó la mayor concentración en la temporada de nortes en la zona cercana a la boca de descarga de la Laguna de Términos. En el caso de las temporadas de secas y lluvias se observó una distribución homogénea en relación a las zonas muestreadas (Fig. 24).

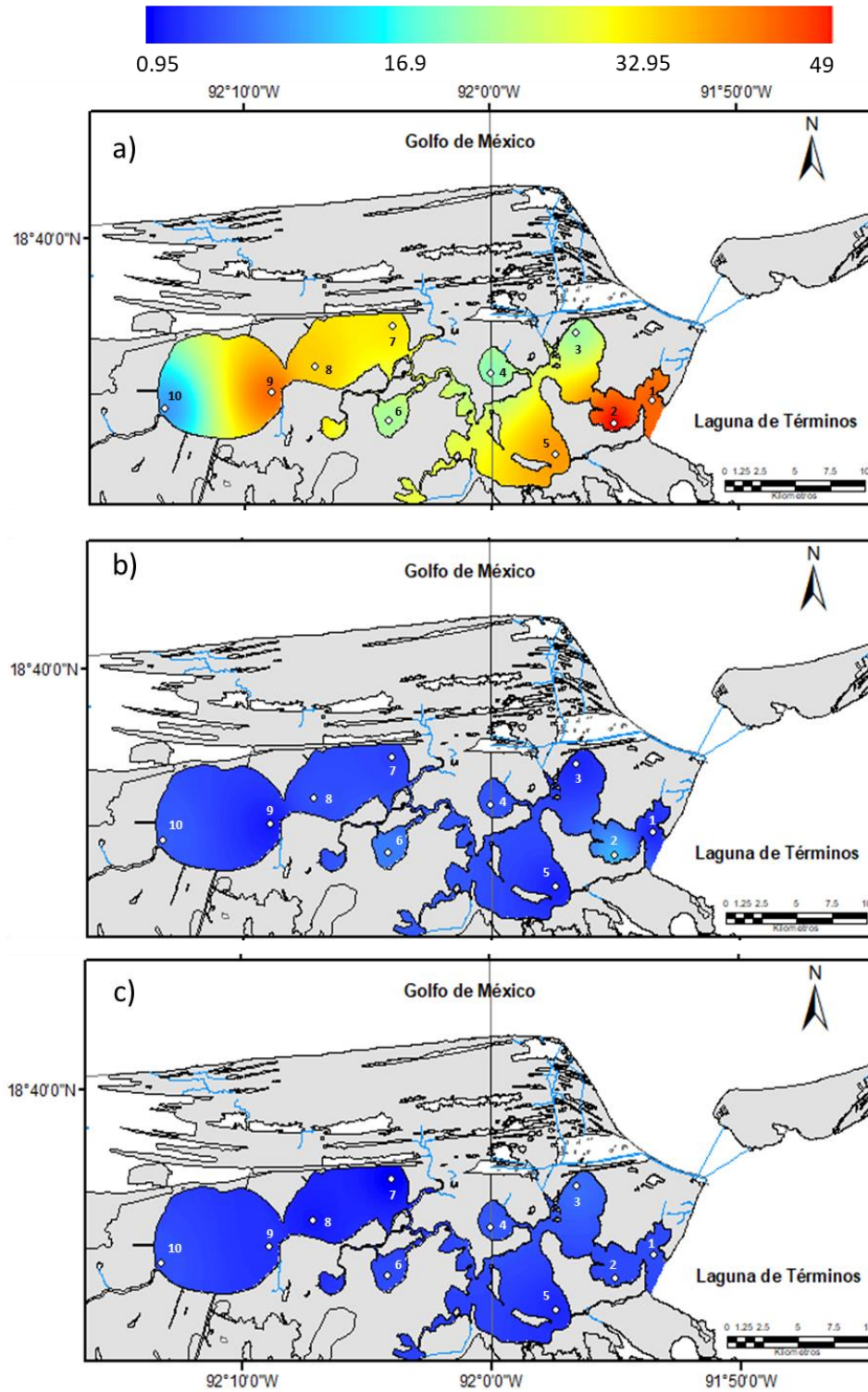


Figura 24. Distribución de Isoconcentraciones del Clorofila a del SPA en tres temporadas climáticas: a) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

Tabla 4. Concentración de nutrientes y clorofila del SPA durante las temporadas de muestreo

		ESTACIÓN										
		PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6	PA7	PA8	PA9	PA10	Promedio
NORTES	Nitratos (mg/L)	1.10	4.93	5.50	4.43	3.38	5.05	2.13	3.25	2.63	6.38	3.88
	Nitritos (mg/L)	0.07	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04
	Amonio (mg/L)	0.16	0.20	0.26	0.31	0.37	0.33	0.22	0.18	0.17	0.27	0.25
	Fosfatos (mg/L)	0.03	0.03	0.03	0.04	0.21	0.09	0.06	0.02	0.02	0.03	0.05
	Clorofila a (mg m ⁻³)	44.45	49.06	23.64	22.09	40.25	24.02	34.84	36.71	44.10	10.73	32.99
SECAS	Nitratos (mg/L)	11.05	10.95	3.35	13.85	12.30	4.45	13.75	4.70	12.05	5.85	9.23
	Nitritos (mg/L)	0.05	0.04	0.04	0.05	0.06	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04
	Amonio (mg/L)	1.01	0.58	0.14	0.20	0.23	0.22	0.27	0.24	0.16	0.33	
	Fosfatos (mg/L)	0.04	0.53	0.82	0.42	0.55	0.10	0.11	0.07	0.07	0.09	0.28
	Clorofila a (mg m ⁻³)	2.59	12.52	2.65	5.57	2.27	8.89	4.43	5.40	1.82	6.31	5.24
LLUVIAS	Nitratos (mg/L)	0.80	2.93	0.30	0.50	0.70	0.35	2.68	1.35	0.95	2.70	1.33
	Nitritos (mg/L)	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	0.05	0.11	0.05
	Amonio (mg/L)	0.62	0.81	0.68	0.12	0.20	0.18	0.09	0.11	0.03	0.13	0.30
	Fosfatos (mg/L)	0.05	0.11	0.27	0.06	0.16	0.12	0.10	0.17	0.14	0.11	0.13
	Clorofila a (mg m ⁻³)	4.94	5.03	7.44	5.98	2.63	5.11	0.98	1.76	3.35	5.43	4.26

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales que relaciona la variabilidad ambiental con los nutrientes, se realizó con los datos agrupados por temporada climática. En la temporada de nortes, el análisis expresado en los dos factores principales, presentó los eigenvalores de 2.217 y 1.032 para el factor uno y dos respectivamente, con una varianza total de 55.426 y 25.810% respectivamente. Se destaca la relación entre los parámetros de Oxígeno disuelto y temperatura con la clorofila en el cuadrante uno entre el pH y nitrito, nitrato y amonio en el cuadrante tres. En los cuadrantes dos y cuatro solo se reflejó la salinidad y el fosfato (Fig.25).

Por otra parte, en la temporada de secas, se presentaron los eigenvalores de 2.946 para el factor uno y 0.768 para el factor dos, con una varianza total de 73.668 y 19.214% respectivamente. En el cuadrante dos se relacionaron la temperatura y el oxígeno disuelto con la clorofila, en el cuadrante tres se relaciona la salinidad con el nitrato, nitrito y amonio, mientras que, en los cuadrantes uno y cuatro solo se refleja el pH y fosfato (Fig.25).

En el caso de la temporada de lluvias, el ACC presentó eigenvalores de 3.527 y 0.314 para el factor uno y dos respectivamente, con una varianza total de 88.179 y 7.885% respectivamente. En el cuadrante uno se relacionó la temperatura y pH con el nitrito, en cuadrante dos el Oxígeno disuelto se relacionó con el nitrato y fosfato, mientras que, en el cuadrante tres la salinidad se relacionó con la clorofila y el amonio (Fig.25).

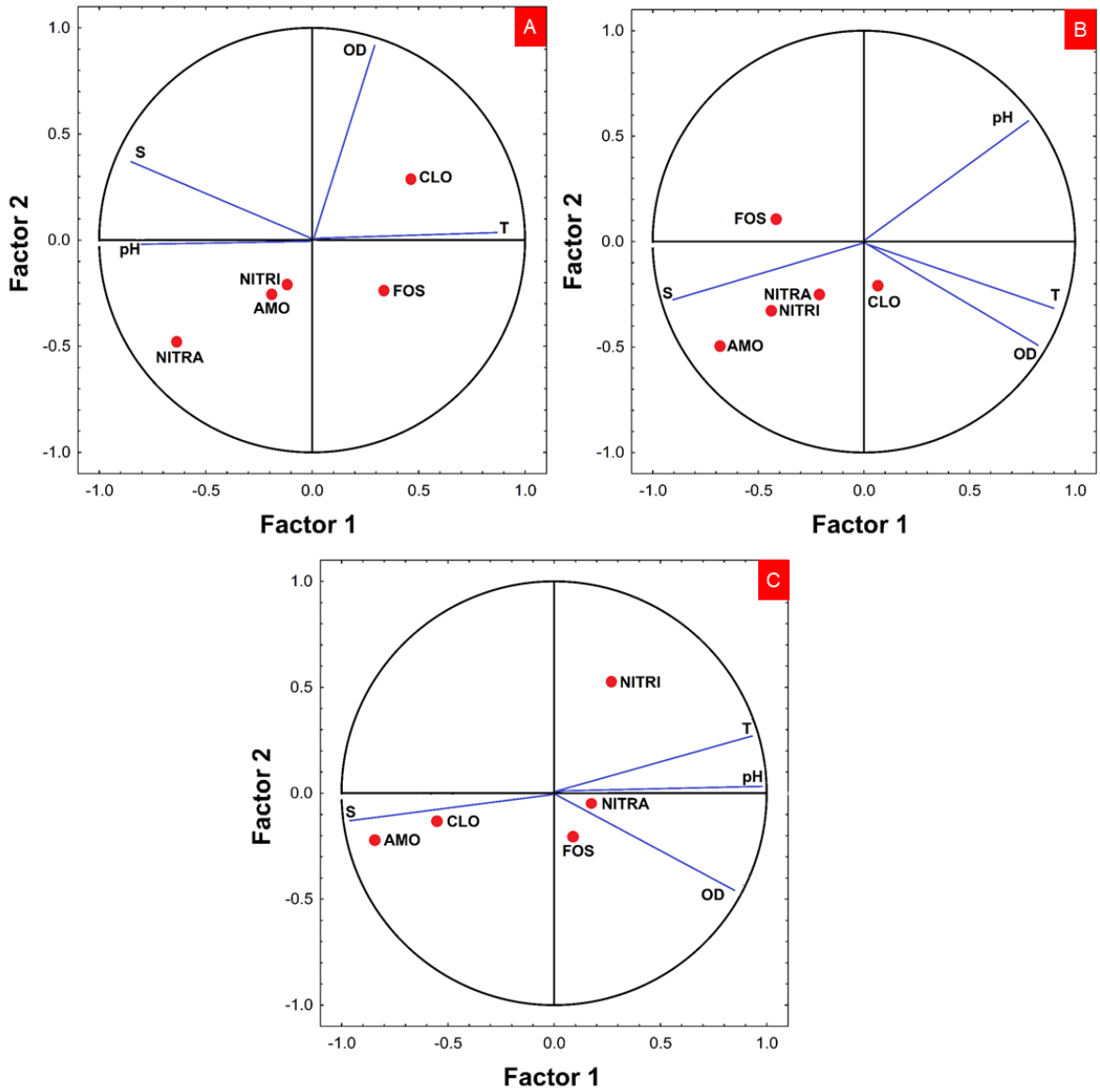


Figura 25. Análisis de correspondencias canónicas entre las variables ambientales y nutrientes en el SPA en tres temporadas climáticas: A) Nortes, B) Secas, C) Lluvias.

Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) en el Sistema Palizada-Del Este

El promedio de la concentración máxima de NID en temporada de nortes fue de 12.16 mg/L en la estación seis y un mínimo de 1.09 mg/L en la estación ocho, en la temporada de secas se obtuvo un máximo de 13.98 mg/L en la estación ocho y un mínimo de 0.45 mg/L en la estación uno, mientras que, en la temporada de lluvias se registró un máximo de 3.29 mg/L en la estación cinco y un mínimo de 0.40 mg/L en la estación cuatro (Fig. 26).

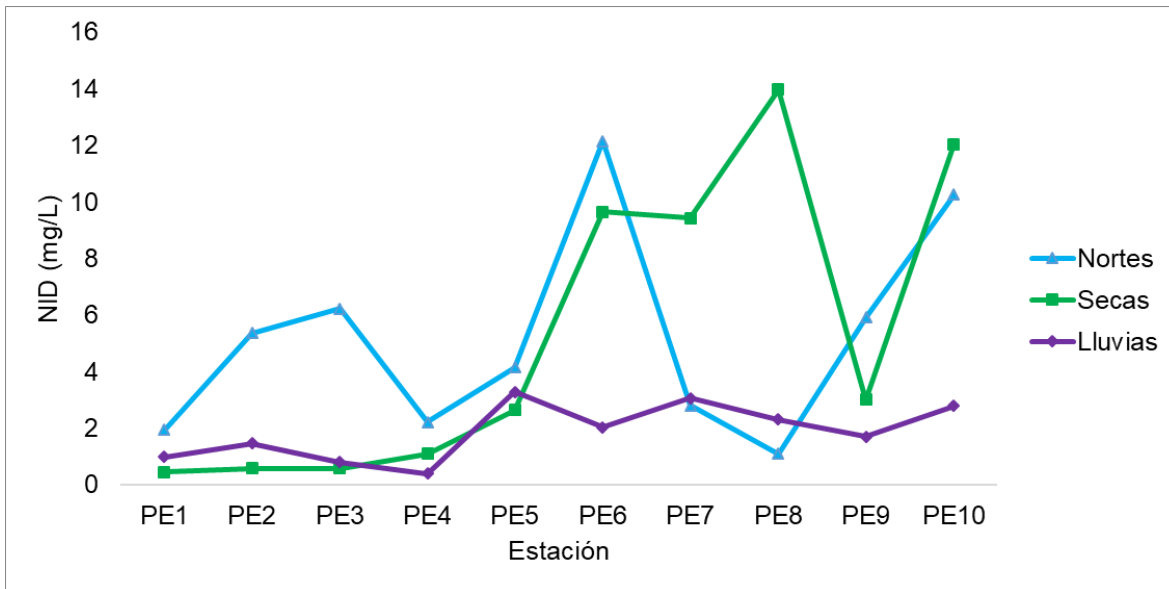


Figura 26. Concentraciones de NID del SPE en tres temporadas de muestreo

En la distribución se observaron las mayores concentraciones en la temporada de secas, al igual que en las de nortes, las máximas concentraciones se presentaron en las zonas cercanas a las descargas de los ríos Las Piñas, Marentes y Las cruces; por el contrario, para la temporada de lluvias se observó una concentración homogénea con relación a las estaciones muestreadas (Fig.27).

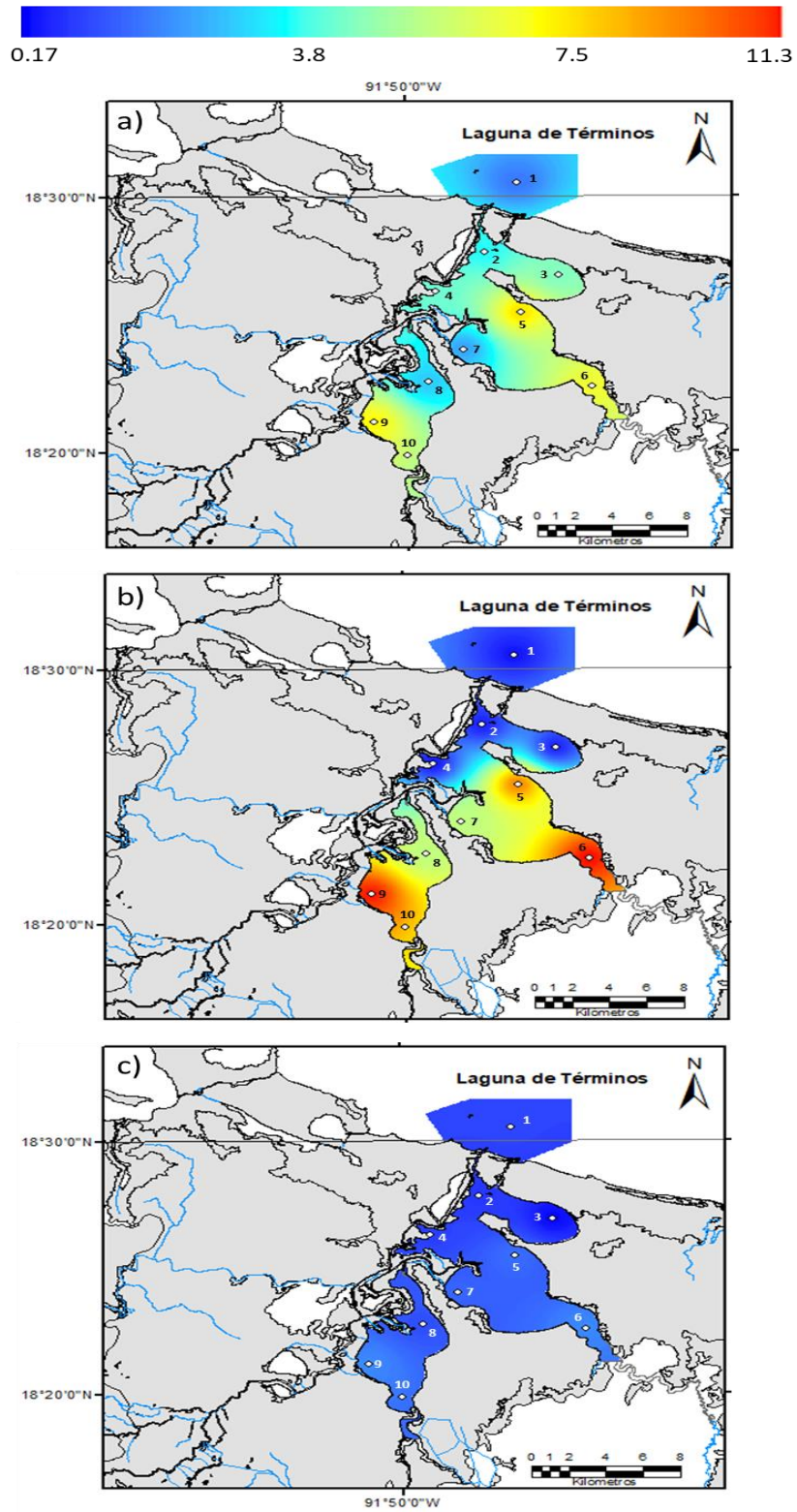


Figura 27. Distribución de Isoconcentraciones del Nitrógeno Inorgánico Disuelto del SPE en tres temporadas climáticas: A) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

Componentes del NID

Nitrato

En el lapso de estudio en el SPE, se observó que el nitrato, al igual que en el SPA aportó las mayores concentraciones en comparación al amonio y nitrito. El promedio del nitrato obtenido en la temporada de nortes fue de 4.99 mg/L, en la temporada de secas fue de 5.12 mg/L y en la temporada de lluvias de 1.73 mg/L (Tabla 5).

El promedio máximo fue de 13.73 mg/L en la estación ocho y la mínima de 0.15 mg/L en la estación uno, ambas en la temporada de secas. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación con las temporadas y sitios muestreadas (nortes: $p=0.08$, secas: $p=0.15$ y lluvias: $p=0.27$ mg/L) (Fig. 28).

En la temporada de nortes el nitrato obtuvo un promedio superficial de 4.77 mg/L y 5.21 mg/L en fondo, en la temporada de secas el promedio superficial fue de 5.29 mg/L y 4.95 mg/L en fondo, entretanto, en lluvias el promedio superficial fue de 1.26 mg/L y 2.29 mg/L en fondo. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la superficie y de fondo en la columna de agua (nortes: $p=0.96$, secas: $p=0.49$ y lluvias: $p=0.13$) (Fig. 28).

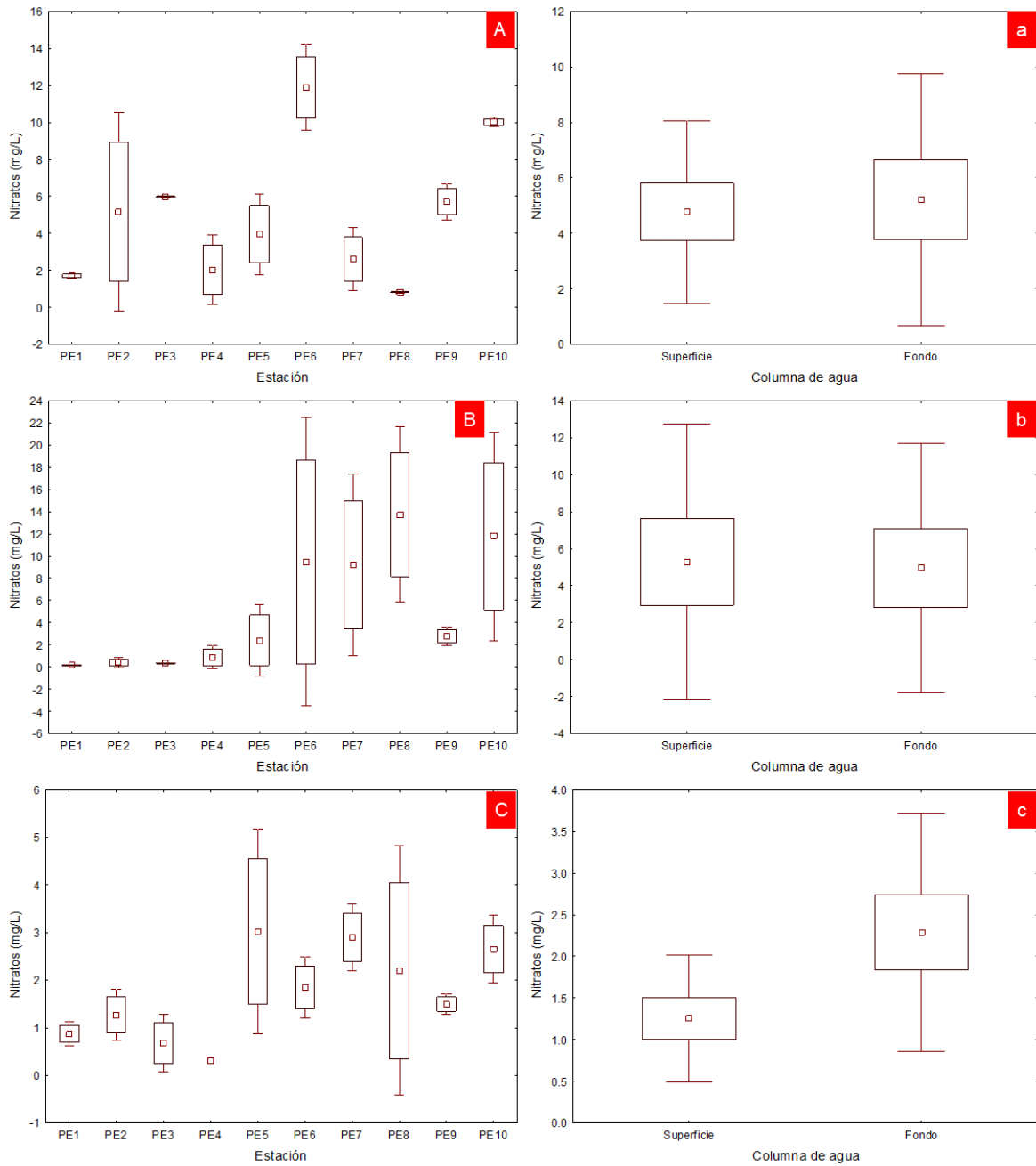


Figura 28. Análisis de nitratos a escala espacial y temporal del SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias

Amonio

El promedio de amonio obtenido en la temporada de nortes fue de 0.19 mg/L, en la temporada de secas se presentó un promedio de 0.19 mg/L y en la temporada de lluvias de 0.08 mg/L (Tabla 5).

El promedio máximo registrado fue de 0.25 mg/L en la estación uno y diez durante la temporada de secas, mientras que, las mínimas concentraciones fueron de 0.04 mg/L en la estación cuatro en la temporada de lluvias. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación a las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p= 0.72$, secas: $p= 0.30$ y lluvias: $p= 0.32$) (Fig. 29).

En la superficie en temporada de nortes se registró un promedio de 0.18 mg/L y 0.20 mg/L en fondo, en la temporada de secas fue de 0.20 mg/L en superficie y en fondo 0.18 mg/L, en tanto que, en la temporada de lluvias fue de 0.10 mg/L en superficie y 0.07 mg/L en fondo. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la superficie y fondo en la columna de agua (nortes: $p= 0.36$, secas: $p= 0.44$ y lluvias: $p= 0.15$) (Fig.29).

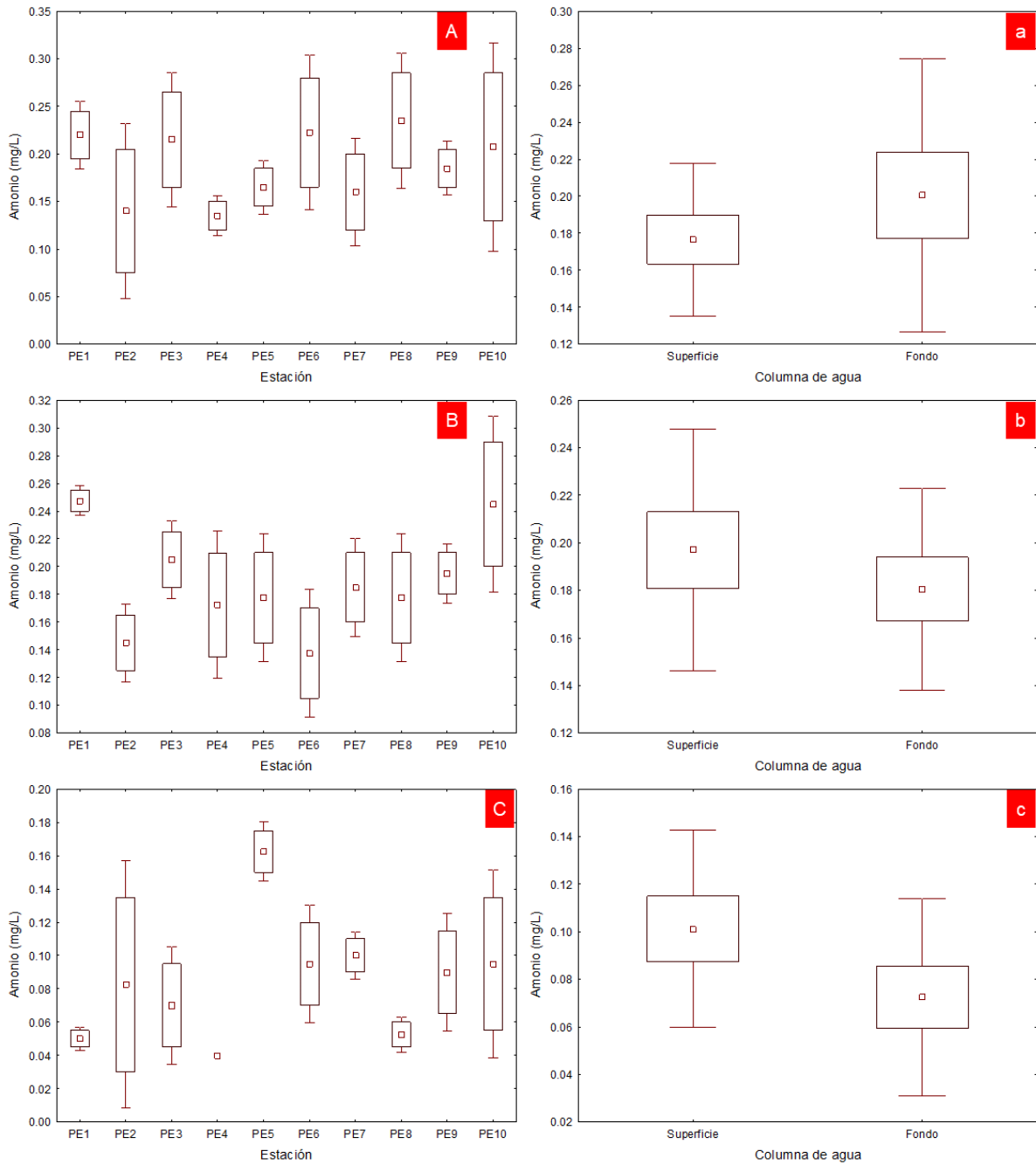


Figura 29. Análisis de amonio a escala espacial y temporal del SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias

Nitritos

El nitrito, último componente del NID, presentó, al igual que en el SPA, concentraciones constantes y bajas, en comparación al nitrato y amonio. El promedio de nitrito registrado en la temporada de nortes fue de 0.04 mg/L, en la temporada de secas se exhibió un promedio de 0.04 mg/L y en la temporada de lluvias de 0.08 mg/L (Tabla 5).

El promedio máximo obtenido fue de 0.12 mg/L en la estación nueve durante la temporada de lluvias, por el contrario, el promedio mínimo registrado fue de 0.03 mg/L presente en la temporada de nortes y secas. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación con las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p= 0.42$, secas: $p= 0.62$ lluvias: $p= 0.11$) (Fig. 30).

En la temporada de nortes se registró un promedio de 0.03 mg/L en superficie y 0.04 mg/L en fondo, en la temporada de secas fue de 0.03 mg/L en superficie y 0.05 mg/L en fondo, mientras que, en la temporada de lluvias se registró en superficie y fondo un promedio de 0.08 mg/L. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la superficie y fondo en la columna de agua (nortes: $p= 0.44$, secas: $p= 0.07$ y lluvias: $p= 0.93$) (Fig. 30).

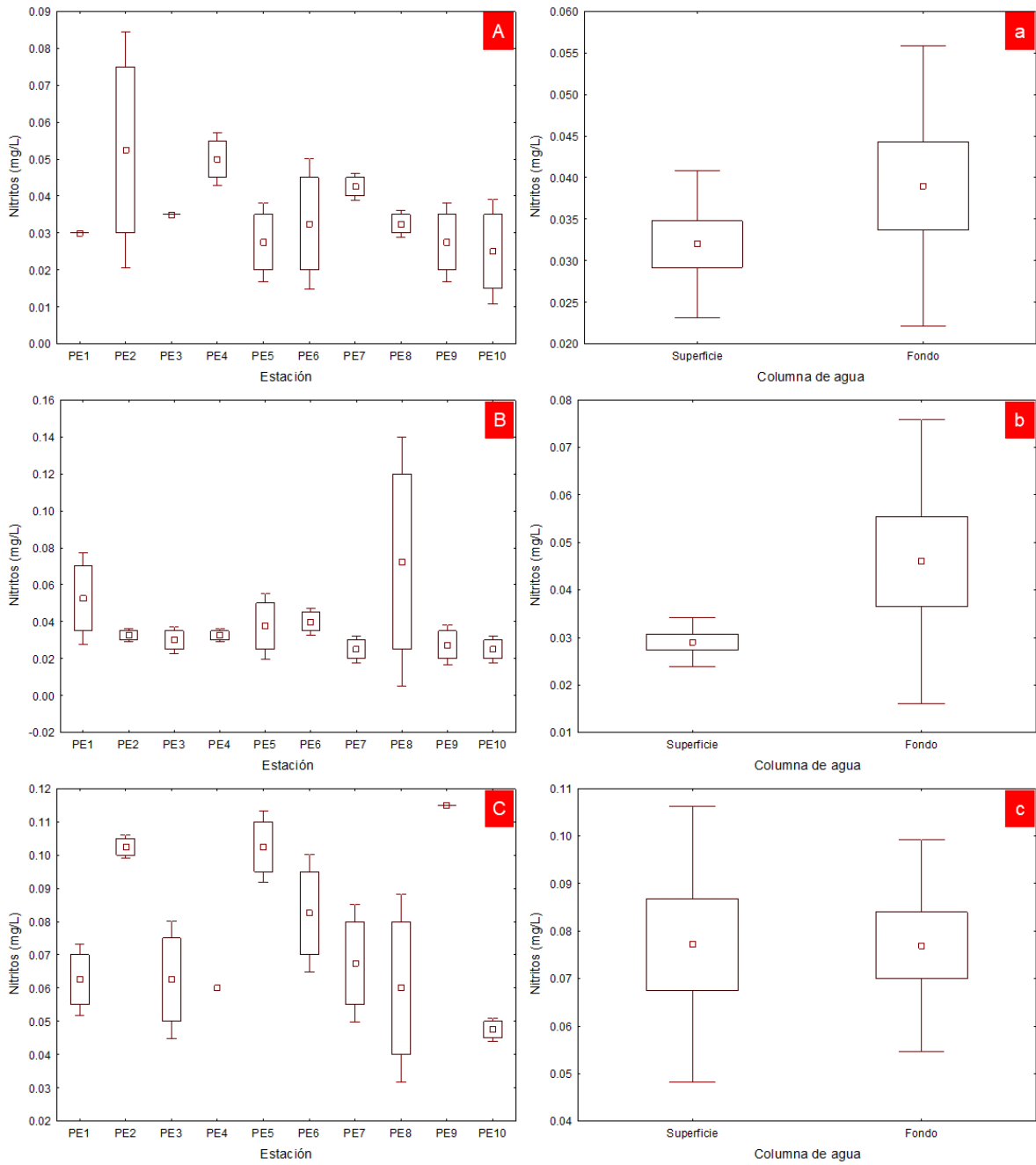


Figura 30. Análisis de nitritos a escala espacial y temporal del SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias

Fósforo Inorgánico Disuelto (FID)

En la temporada de nortes el FID presentó el máximo promedio de 0.78 mg/L en la estación ocho y un mínimo de 0.02 mg/L en las estaciones dos, tres y seis, en la temporada de secas se mostró un máximo de 0.94 mg/L en la estación siete y un mínimo de 0.08 mg/L en la estación tres, mientras que, en la temporada de lluvias la concentración máxima fue de 2.82 mg/L en la estación siete y la mínima de 0.04 mg/L en las estaciones seis y ocho (Fig. 31).

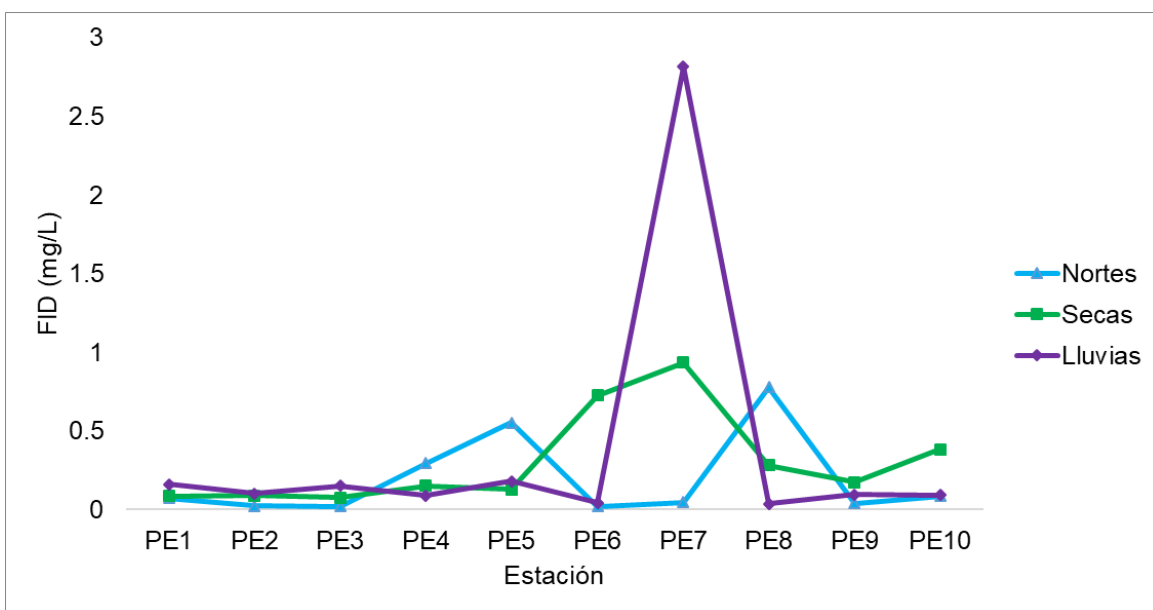


Figura 31. Concentraciones de FID del SPE en tres temporadas de muestreo

En la distribución del FID se puede observar la mayor concentración en la temporada de lluvias, en la zona cercana a las descargas del río Las Cruces, por otra parte, en la temporada de nortes y secas se observan concentraciones homogéneas en las diferentes zonas de muestreo (Fig. 32).

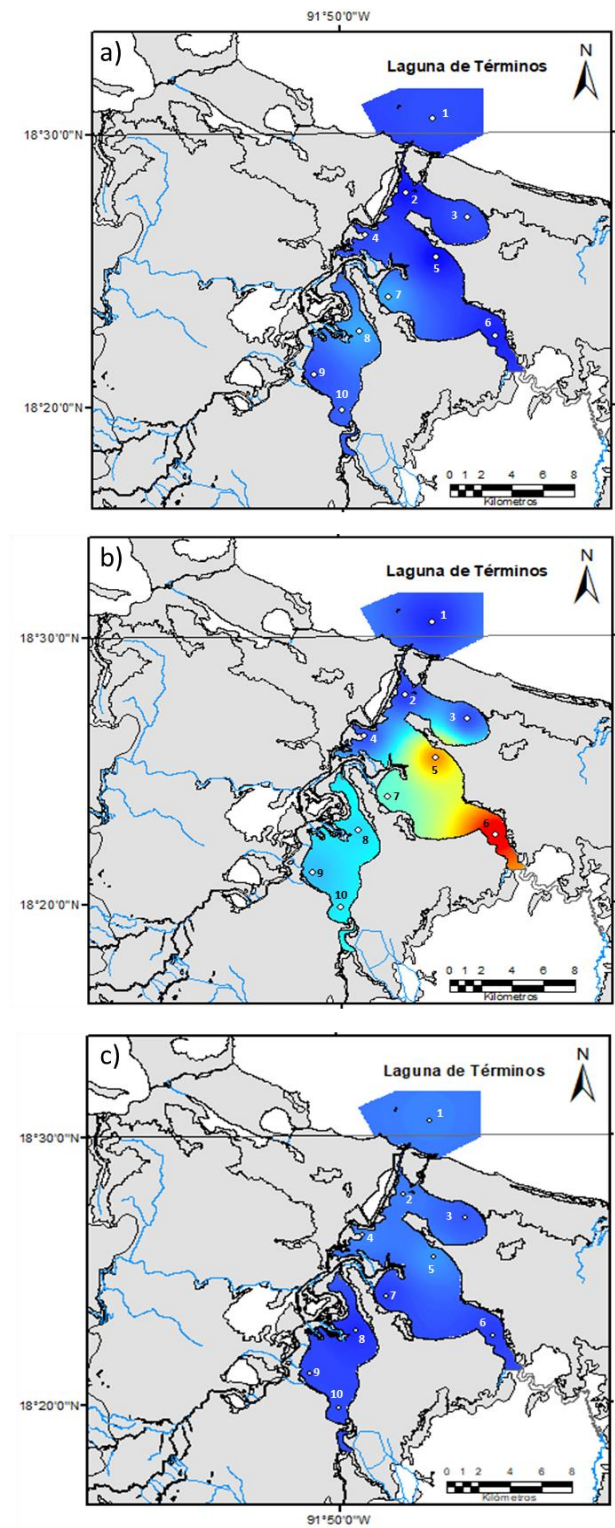


Figura 32. Distribución de Isoconcentraciones del Fósforo Inorgánico Disuelto del SPE en tres temporadas climáticas: A) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

Fosfato

Este nutriente en el SPE presentó al igual que en el SPA pulsos en las tres temporadas climáticas. En la temporada de nortes se registró un promedio de 0.19 mg/L, en la temporada de secas se registró un promedio de 0.30 mg/L y en la de lluvias de 0.38 mg/L (Tabla 5).

La máxima concentración registrada fue de 2.82 mg/L en la estación siete durante la temporada de lluvias y las concentraciones mínimas de 0.02 mg/L en la estación dos, tres y seis en la temporada de nortes. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en relación con las temporadas y sitios muestreados (nortes: $p= 0.23$, secas: $p= 0.30$ y lluvias: $p= 0.21$) (Fig. 33).

Las concentraciones superficiales promedio en la temporada de nortes fue de 0.09 mg/L y 0.30 mg/L en fondo, en la temporada de secas fue de 0.27 mg/L en superficie y 0.34 mg/L en fondo, mientras que, en la temporada de lluvias de 0.12 mg/L en superficie y 0.63 mg/L en fondo. El análisis Kruskal-Wallis mostró diferencias entre la superficie y fondo en la columna de agua (nortes: $p= 0.84$, secas: $p= 0.59$ y lluvias: $p= 0.83$) (Fig. 33).

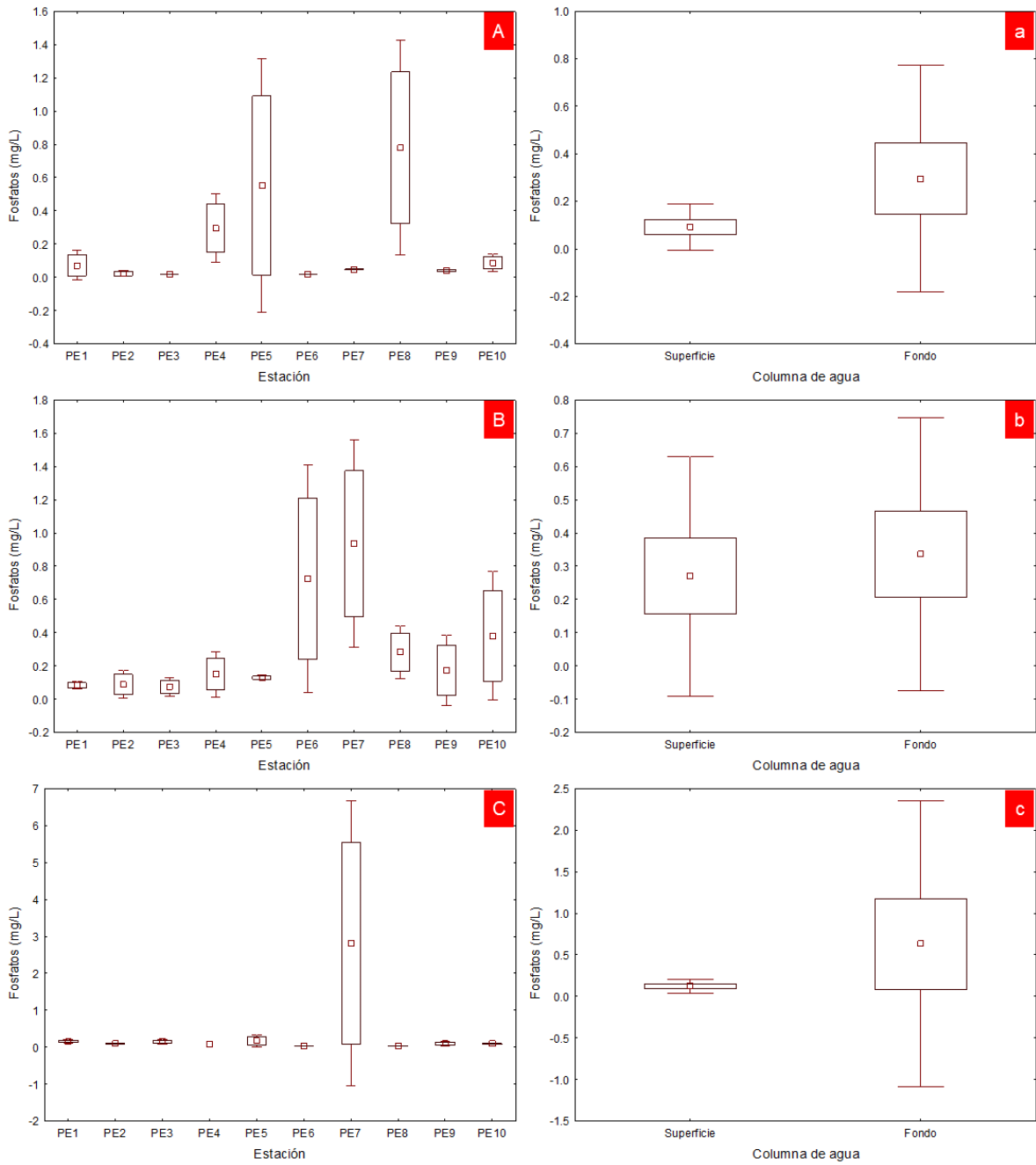


Figura 33. Análisis de fosfatos a escala espacial y temporal del SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

Clorofila a

El promedio de las concentraciones de clorofila en el SPE en temporada de nortes fue de 8.10 mg m^{-3} , en la temporada de secas de 6.28 mg m^{-3} y en la temporada de lluvias fue de 3.39 mg m^{-3} (Tabla 5).

El análisis presentó un promedio máximo de 24.82 mg m^{-3} en temporada de nortes y un promedio mínimo de 0.81 mg m^{-3} en temporada de lluvias, ambos en la estación dos. El análisis Kruskal-Wallis exhibió diferencias significativas en relación a las diferentes temporadas y sitios muestreados (nortes: $p=0.09$, secas: $p=0.35$ y lluvias: $p=0.12$) (Fig. 34).

El promedio de la clorofila superficial durante la temporada de nortes fue de 9.72 mg m^{-3} y de fondo 6.48 mg m^{-3} , en la temporada de secas se registró un promedio de 5.44 mg m^{-3} en superficie y de fondo 7.12 mg m^{-3} , mientras que, en la temporada de lluvias presentó un promedio superficial de 3.84 mg m^{-3} y de fondo 3.13 mg m^{-3} . El análisis de Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre la clorofila superficial y de fondo en la columna de agua (nortes: $p= 0.76$, secas: $p=0.08$ y lluvias: $p= 1$) (Fig. 34).

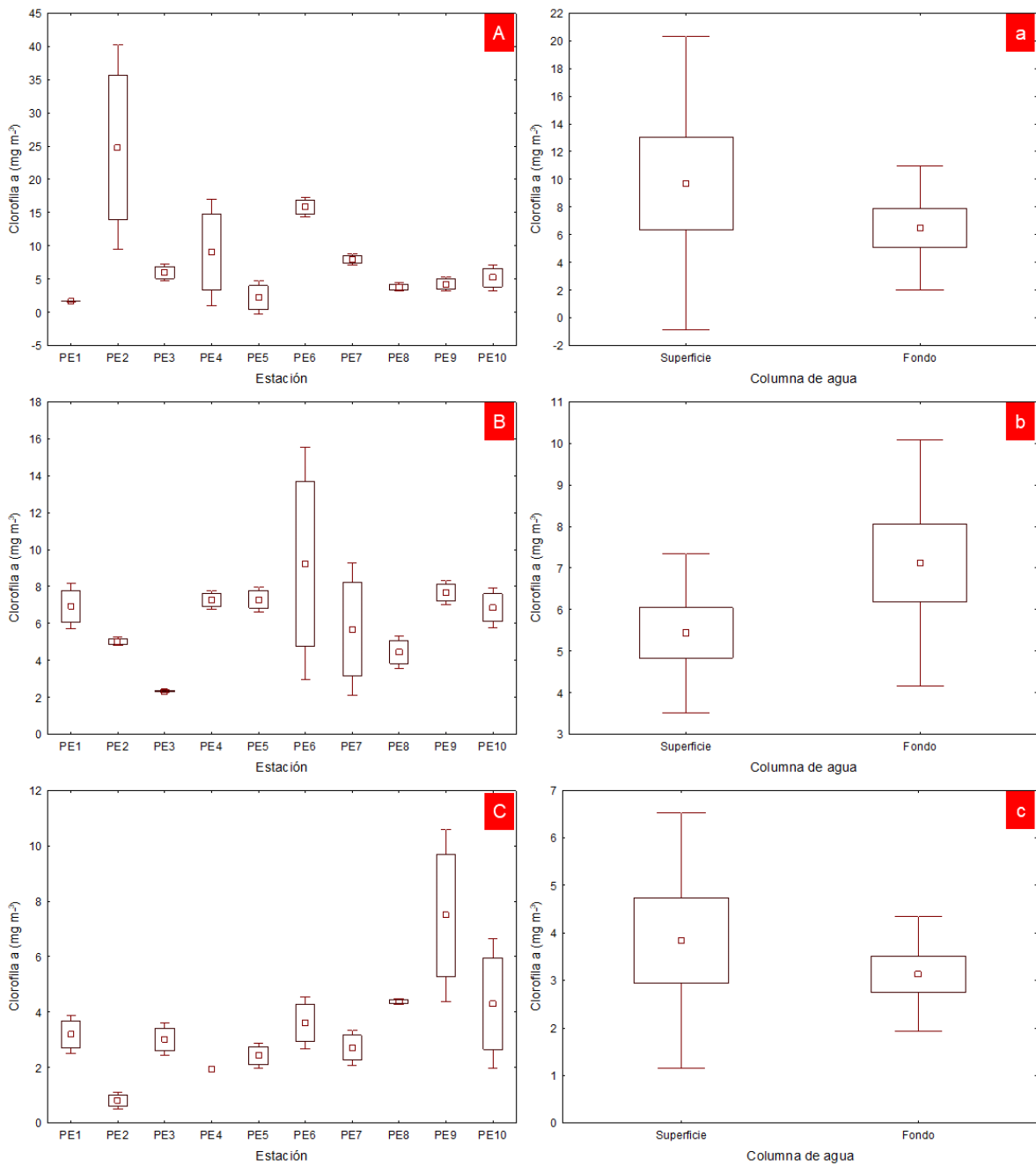


Figura 34. Análisis de la clorofila a escala espacial y temporal del SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

Al igual que en el SPA la mayor concentración de clorofila se obtuvo en la temporada de nortes en las zonas que interaccionan directamente con la Laguna de Términos. En el caso de la temporada de secas se observó un patrón de distribución homogéneo en las concentraciones a lo largo de todo el sistema, por otra parte, en la temporada de lluvias se observan que las mayores concentraciones se presentaron en la Laguna del Vapor donde descargan los ríos Las Piñas y Marentes (Fig. 35).

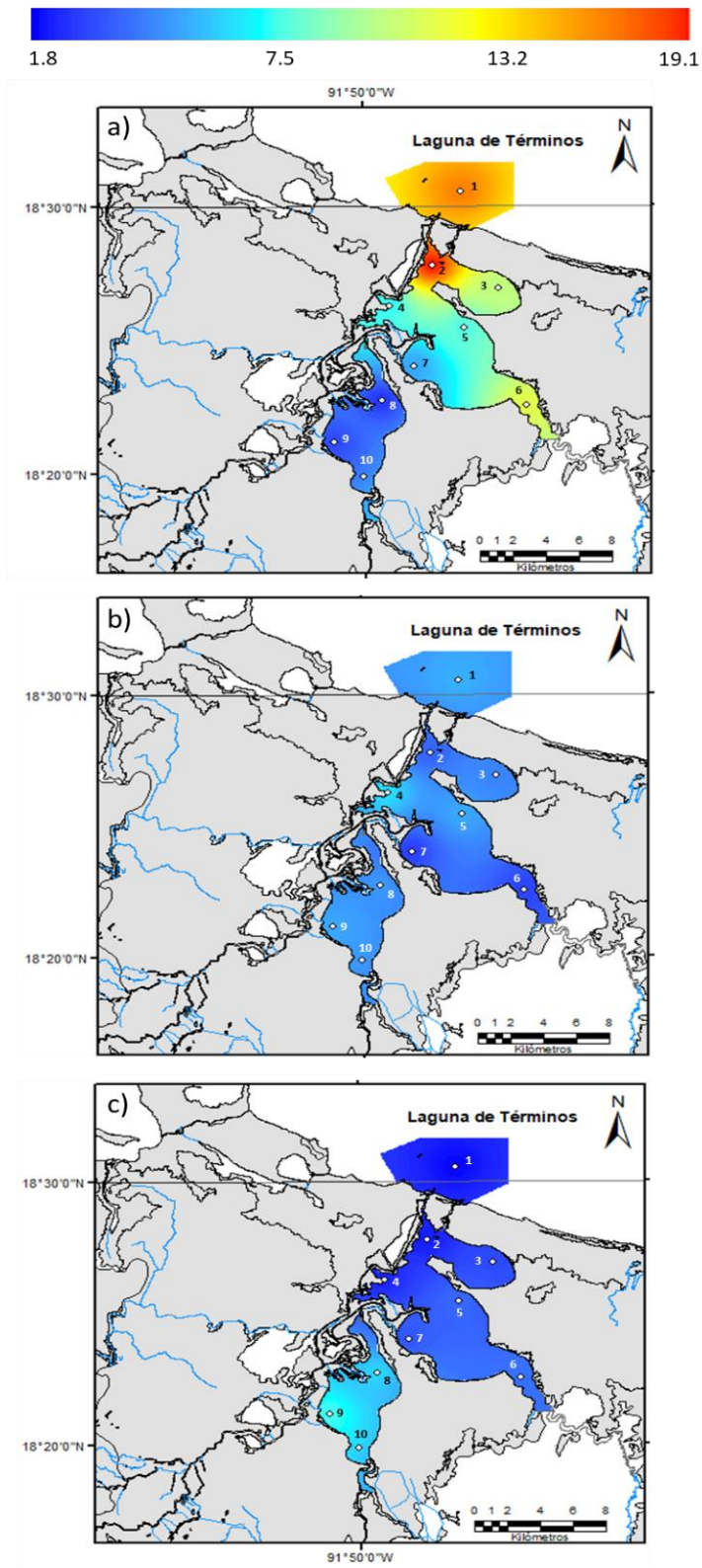


Figura 35. Distribución de Isoconcentraciones del Clorofila a del SPE en tres temporadas climáticas: A) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

Tabla 5. Concentración de nutrientes y clorofila del SPE durante las temporadas de muestreo

		ESTACIÓN										
		PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6	PE7	PE8	PE9	PE10	Promedio
NORTES	Nitratos (mg/L)	1.70	5.18	5.98	2.03	3.95	11.90	2.60	0.83	5.70	10.03	4.99
	Nitritos (mg/L)	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04
	Amonio (mg/L)	0.22	0.14	0.22	0.14	0.17	0.22	0.16	0.24	0.19	0.21	0.19
	Fosfatos (mg/L)	0.07	0.02	0.02	0.30	0.55	0.02	0.05	0.78	0.04	0.09	0.19
	Clorofila a (mg m ⁻³)	1.71	24.82	6	9.06	2.25	15.85	7.98	3.84	4.24	5.23	8.10
SECAS	Nitratos (mg/L)	0.15	0.40	0.34	0.90	2.42	9.48	9.23	13.73	2.78	11.78	5.12
	Nitritos (mg/L)	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.07	0.03	0.03	0.04
	Amonio (mg/L)	0.25	0.15	0.21	0.17	0.18	0.14	0.19	0.18	0.20	0.25	0.19
	Fosfatos (mg/L)	0.09	0.09	0.08	0.15	0.13	0.73	0.94	0.28	0.18	0.38	0.30
	Clorofila a (mg m ⁻³)	6.94	5.02	2.33	7.29	7.30	9.23	5.70	4.46	7.67	6.85	6.28
LLUVIAS	Nitratos (mg/L)	0.88	1.28	0.68	0.30	3.03	1.85	2.90	2.20	1.50	2.65	1.73
	Nitritos (mg/L)	0.06	0.10	0.06	0.06	0.10	0.08	0.07	0.06	0.12	0.05	0.08
	Amonio (mg/L)	0.05	0.08	0.07	0.04	0.16	0.10	0.10	0.05	0.09	0.10	0.08
	Fosfatos (mg/L)	0.16	0.10	0.15	0.09	0.18	0.04	2.82	0.04	0.10	0.09	0.38
	Clorofila a (mg m ⁻³)	3.20	0.81	3.02	1.94	2.43	3.62	2.72	4.38	7.49	4.30	3.39

Análisis de componentes principales

El ACC en la temporada de nortes, presentó los eigenvalores de 1.905 y 0.848 para el factor uno y dos respectivamente, con una varianza total de 47.648 y 21.216% respectivamente. En el cuadrante uno la clorofila y el nitrato se relacionaron, en el cuadrante dos se destaca la relación entre los parámetros temperatura y pH con el nitrito y fosfato, la salinidad y oxígeno disuelto se relacionaron en el cuadrante tres, a diferencia del amonio que no se encuentra relacionado a ninguno (Fig.36).

En el caso de la temporada de secas, se presentaron eigenvalores de 2.079 para el factor uno y 1.031 para el factor dos, con una varianza total de 51.986 y 25.795% respectivamente. En el cuadrante dos se relacionó los parámetros de salinidad y pH con el nitrito y amonio, en el cuadrante tres se relaciona la temperatura y oxígeno disuelto con fósforo, nitrato y clorofila (Fig.36).

Por otra parte, en temporada de lluvias se presentaron eigenvalores de 2.236 y 1.089 para el factor uno y dos respectivamente, con una varianza total de 55.922 y 27.231% respectivamente. Se destaca la relación entre el pH y la clorofila en el cuadrante uno, entre oxígeno disuelto y nitrito, nitrato, amonio y fosfato en el cuadrante dos. En los cuadrantes tres y cuatro solo se refleja la variabilidad ambiental de salinidad y temperatura, los efectos de los demás parámetros se orientaron hacia los cuadrantes uno y dos, lo que se puede interpretar como una correlación no significativa con estos dos parámetros (Fig.36).

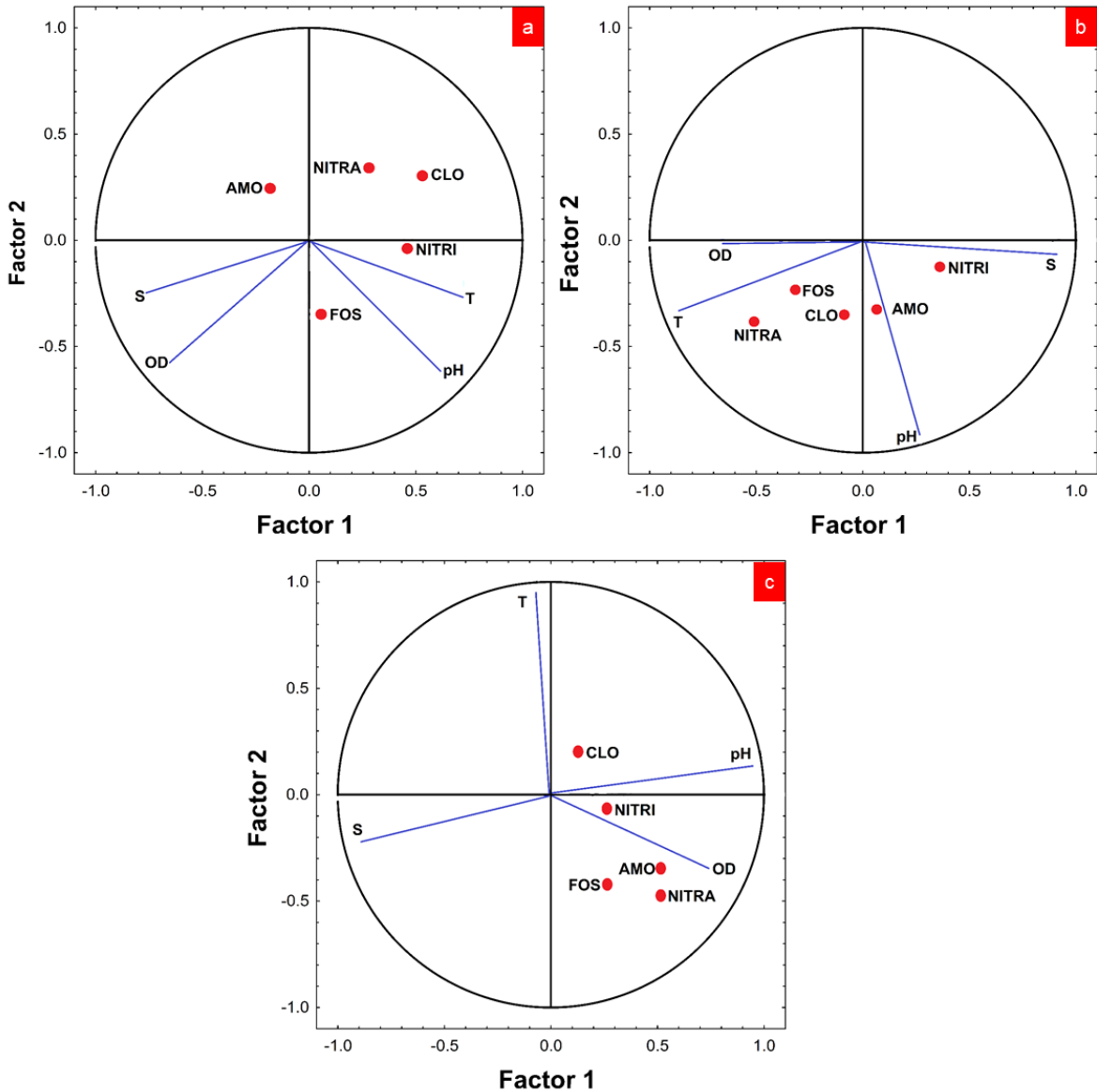


Figura 36. Análisis de correspondencias canónicas entre las variables ambientales y nutrientes en el SPE en tres temporadas climáticas: a) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

Índice de estado trófico TRIX en el Sistema Pom-Atasta

El SPA en la temporada de nortes presentó valores entre los 2.90 a 4.11, que lo clasifica principalmente como oligotrófico, no obstante, se observó un valor de 4 en la estación cinco, tendiendo a un estado mesotrófico; en temporada de secas exteriorizo valores entre los 2.92 a 4.37 que determina al sistema con condiciones oligotróficas, sin embargo, se observaron valores de 4 en las estaciones dos y cuatro, tendiendo a un estado mesotrófico;

mientras que, en la temporada de lluvias se obtuvieron valores entre los 2.27 a 3.06, lo cual se clasificó como oligotrófico (Tabla. 6).

Tabla 6. Índice de Estado Trófico TRIX para el SPA durante las temporadas de nortes, secas y lluvias

Estación	NORTES		SECAS		LLUVIAS	
	Nivel de estado trófico	Valor índice TRIX	Nivel de estado trófico	Valor índice TRIX	Nivel de estado trófico	Valor índice TRIX
1	Oligotrófico	2.99	Oligotrófico	2.92	Oligotrófico	2.48
2	Oligotrófico	3.56	Mesotrófico	4.37	Oligotrófico	3.06
3	Oligotrófico	3.39	Oligotrófico	3.54	Oligotrófico	3.05
4	Oligotrófico	3.30	Mesotrófico	4.04	Oligotrófico	2.27
5	Mesotrófico	4.11	Oligotrófico	3.75	Oligotrófico	2.45
6	Oligotrófico	3.74	Oligotrófico	3.25	Oligotrófico	2.37
7	Oligotrófico	3.38	Oligotrófico	3.49	Oligotrófico	2.31
8	Oligotrófico	3.17	Oligotrófico	3.00	Oligotrófico	2.49
9	Oligotrófico	3.18	Oligotrófico	2.96	Oligotrófico	2.51
10	Oligotrófico	2.90	Oligotrófico	3.22	Oligotrófico	2.99

Por otro lado, se observa que en la temporada de nortes y secas las mayores concentraciones se encuentran distribuidas principalmente en las cinco estaciones cercanas a la Laguna de Términos. En la temporada de lluvias se observó un patrón de distribución homogéneo en las concentraciones a lo largo de todo el sistema (Fig. 37).

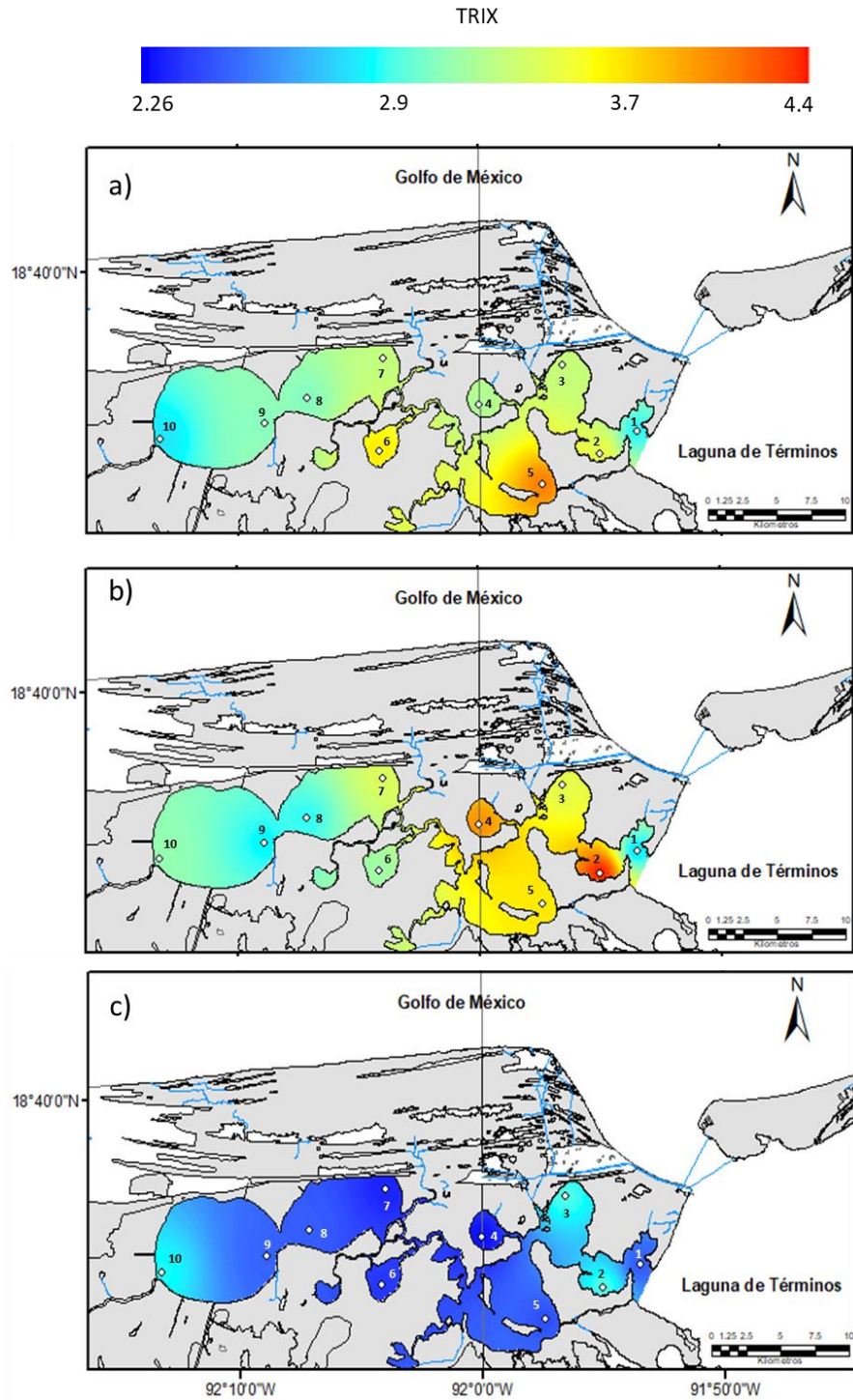


Figura 37. Distribución espacio-temporal de índice de estado trófico TRIX del SPA

Índice de estado trófico TRIX en el Sistema Palizada-Del Este

En el SPE los valores del índice TRIX durante la temporada de nortes oscilaron entre los 2.32 a 3.49; en la temporada de secas oscilaron entre 1.89 a 4.34 clasificándose principalmente como oligotrófico, sin embargo, se presentaron valores de 4 en las estaciones seis y siete, tendiendo a un estado mesotrófico; mientras que, en la temporada de lluvias se presentaron valores entre los 1.82 a 3.92 clasificándose como oligotrófico (Tabla 7).

Tabla 7. Índice de Estado Trófico TRIX para el SPE durante las temporadas de nortes, secas y lluvias

Estación	NORTES		SECAS		LLUVIAS	
	Nivel de estado trófico	Valor índice TRIX	Nivel de estado trófico	Valor índice TRIX	Nivel de estado trófico	Valor índice TRIX
1	Oligotrófico	2.32	Oligotrófico	2.30	Oligotrófico	2.55
2	Oligotrófico	3.26	Oligotrófico	2.29	Oligotrófico	2.04
3	Oligotrófico	2.75	Oligotrófico	1.89	Oligotrófico	2.45
4	Oligotrófico	3.49	Oligotrófico	2.81	Oligotrófico	1.82
5	Oligotrófico	3.44	Oligotrófico	3.13	Oligotrófico	2.93
6	Oligotrófico	3.39	Mesotrófico	4.34	Oligotrófico	2.33
7	Oligotrófico	2.87	Mesotrófico	4.20	Oligotrófico	3.92
8	Oligotrófico	3.28	Oligotrófico	3.81	Oligotrófico	2.40
9	Oligotrófico	2.84	Oligotrófico	3.20	Oligotrófico	2.84
10	Oligotrófico	3.40	Oligotrófico	3.97	Oligotrófico	2.82

Por otra parte, se observa una distribución homogénea con condiciones oligotróficas a lo largo del SPE durante la temporada de nortes y lluvias, por el contrario, en la temporada de secas se observan condiciones mesotróficas en las zonas donde se tiene la influencia de las entradas de los ríos Las Cruces, Las Piñas y Marentes (Fig. 38).

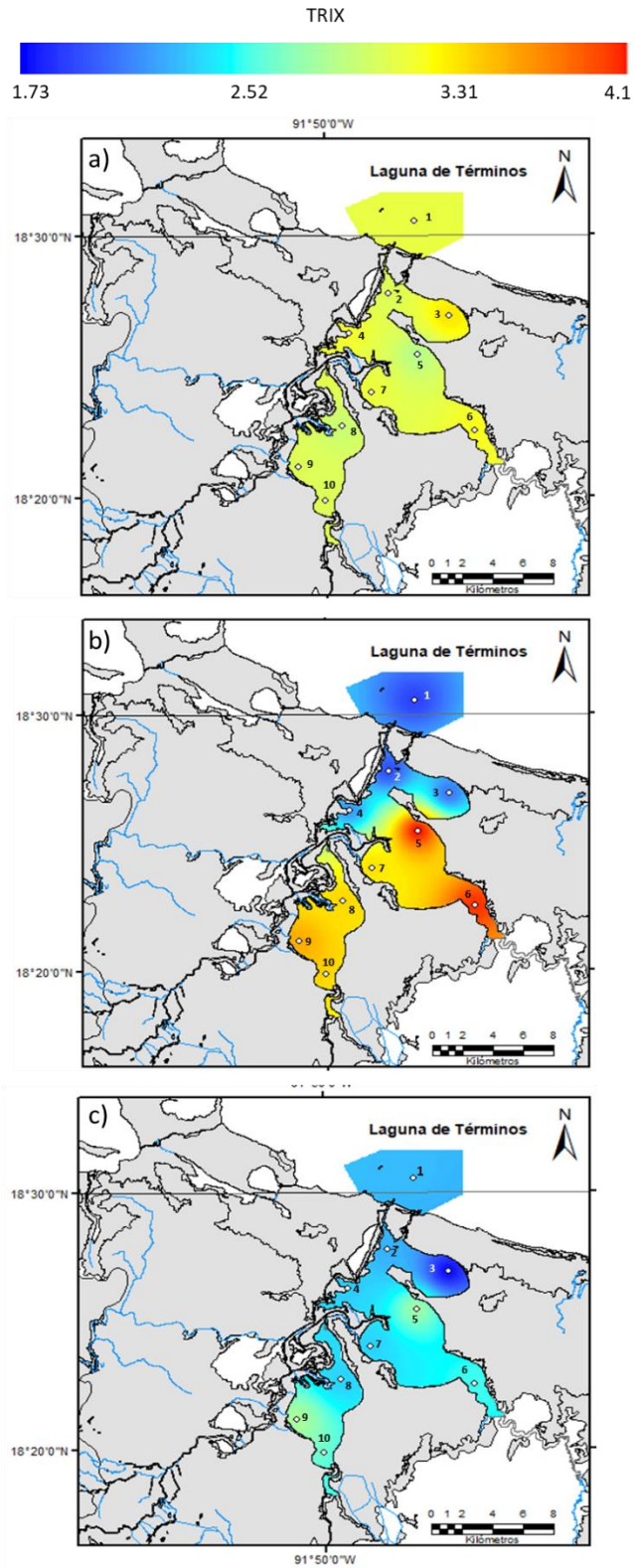


Figura 38. Distribución espacio-temporal de índice de estado trófico TRIX del SPE

DISCUSIÓN

VARIABILIDAD AMBIENTAL

Temperatura ambiental

Citando a Ayala-Pérez (2006), un trabajo de monitoreo sistemático tanto de parámetros físico-químicos del agua como de registro meteorológico debe ser abordado con la intención de fundamentar la estabilidad del sistema o por el contrario identificar cambios en los patrones de variación natural condicionados por fluctuaciones de gran escala o inducidas por el hombre.

De acuerdo con los resultados la temperatura ambiental presentó un patrón estacional, los valores máximos se registraron durante la época de secas y los valores mínimos durante la época de nortes. Ramos-Miranda (2015) menciona que en la región se han descrito tres épocas climáticas: secas (febrero a mayo), lluvias (junio a octubre) y nortes (noviembre a enero).

Se registraron temperaturas históricas máximas de 44°C durante el mes de mayo y mínimas de 9°C en el mes de enero. De acuerdo con Anónimo (1997) y Ramos-Miranda (2006) la Laguna de Términos presenta temperaturas máximas de 40.3°C en mayo y mínimas de 13.7 °C en diciembre, esto indica que en los últimos años existe un incremento en los valores máximos de 4°C, mientras que, los valores mínimos llegan a ser aún más bajos.

En las series de tiempo se observó que la temperatura se mantiene en un promedio de máximas de 32.3°C y mínimas de 21.2°C, lo que corresponde con los valores que registró Ruiz (2017), donde determinó que en la Laguna de Términos en los meses de enero, febrero y diciembre del año 2009 y 2010 se registraron anomalías negativas mayores a dos veces la desviación estándar, en el caso de enero y diciembre la anomalía negativa fue mayor a tres desviaciones, siendo estos probables eventos históricos de bajas temperaturas en la zona. Los meses de mayo y junio muestran una anomalía positiva que en el caso de mayo es dos veces mayor que la desviación estándar lo cual lo convierte en una temporada de estiaje muy cálida. El autor sugiere que dicho comportamiento se puede encontrar influenciado por algunos eventos atmosféricos singulares del 2010 como lo son un norte muy severo registrado el 23 de febrero y tres trayectorias de ciclones tropicales que pasaron a menos de 150 km de la Laguna (el ciclón Richard fue un evento que paso sobre la Laguna). Galindo-Pérez (2020), menciona que la temperatura media anual para la región durante un periodo de 30 años es de 26.8°C.

Precipitación

El análisis climatológico de la precipitación, al igual que la temperatura, mostró que se encuentra intrínsecamente relacionada por la temporalidad climática. Se obtuvieron registros máximos de 25 mm en el mes de septiembre, el cual corresponde a la temporada de lluvias. Villalobos *et al.* (1999) y Ayala-Pérez *et al.* (2012) mencionan que en la región el promedio anual varía entre 1100- 2000 mm, con registros máximos en temporada de lluvias (junio- octubre).

De acuerdo con Méndez (2008), la tendencia estacional de la precipitación en México varía enormemente en espacio y tiempo; es heterogénea a lo largo del año, geográficamente aumenta en dirección norte-sur debido a la influencia de la latitud, así mismo, está gobernada en gran medida por la proximidad al Océano Pacífico y Golfo de México, a la orografía del país, a los rasgos de la circulación atmosférica y a la teleconectividad del fenómeno del Niño. Ruiz (2017) menciona registros con anomalías en la segunda mitad del 2010, se presentan algunos eventos de lluvia severa, las cuales están principalmente relacionadas a la ocurrencia de los ciclones tropicales que tuvieron influencia sobre la región. La precipitación muestra una anomalía positiva, sin embargo, los picos tienen ocurrencias en las fechas de eventos extremos como los ciclones tropicales que afectaron la región y otros eventos ligados a vientos tropicales, con lo cual se concluyó que el inicio de la Niña no influencia en la precipitación sobre la Laguna. Lo que si se pudo apreciar es la claridad de la temporada de lluvias (de junio a octubre) y de secas (diciembre a mayo).

PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Temperatura

El análisis comparativo a escala temporal en los dos sistemas fluvio-lagunares permitió el registro de temperaturas que oscilaron entre los 25°C a 30.5°C, destacándose las temperaturas mínimas en noviembre (temporada de nortes) y máximas en abril (temporada de secas). La temperatura de la columna de agua mantuvo un comportamiento similar entre los SPA y SPE, mostró poca variación desde la boca hacia el interior de los sistemas.

Como señala Álvarez-Guillén *et al.* (1985), la temperatura de la columna de agua llega a oscilar entre 22°C a 31.2°C, con mínimos en los meses de diciembre a febrero y máximos de abril a septiembre. Muciño-Márquez *et al.* (2014) registró temperaturas entre 21.6°C a

23. 8°C en febrero; mientras que, Guevara *et al.* (2007) y Echeverría-Ávila *et al.* (2019) reportaron temperaturas entre 26°C a 32°C, con mínimos en temporada de nortes y los máximos en lluvias, estos resultados son comparables a los registrados en el presente trabajo.

Tal como menciona Piñeiro *et al.* (2001) y De la Lanza-Espino (2004), esta variable se encuentra influenciada por la presencia de la fluctuación de los “pulsos estacionales”, los cuales lo condicionan diversos factores tales como: 1) el viento y las corrientes de marea, 2) la profundidad (que refleja la permanencia y temporalidad de las termoclinas) y 3) el intercambio de masa de agua de los ríos de los SPA y SPE con la Laguna de Términos. De acuerdo con Galindo-Pérez (2020), la oscilación de este parámetro se debe a diversos factores; principalmente a la comunicación que existe entre la Laguna de Términos y los SPA y SPE, que mantiene flujos de circulación naturales y artificiales, así como a las diversas entradas de ríos, arroyos y de escurrimientos de aguas templadas hacia los sistemas. Otro factor a considerar y que influye en la temperatura de la columna de agua es la estacionalidad intrínseca de ambos sitios, que determinan los cambios de temperatura superficial y de fondo. Por otra parte, menciona que la profundidad es otro factor que influye en la distribución de la temperatura en la columna de agua, ya que, en ambos sistemas registro profundidades menores a 2.2 m, esta variable es fundamental para que exista un flujo de calor directo entre la temperatura del aire hacia la columna de agua. Por lo cual, atribuye el incremento gradual registrado en los últimos años de la temperatura atmosférica, provocada por el calentamiento global puede inducir el incremento de la temperatura de las condiciones de la columna de agua en ambos sistemas.

Salinidad

La salinidad es otro parámetro que marca el efecto de temporalidad en la dinámica ambiental de los sistemas. El promedio de salinidad osciló entre 0.22-10.12 ups para ambos sistemas. En el SPA se presentaron concentraciones máximas en temporada de secas en las primeras cinco estaciones y en el SPE en las primeras tres en la misma temporada, esto se debe a que estos sitios mantienen mayor interacción con la Laguna de Términos. Por otro lado, las concentraciones mínimas se presentaron en temporada de nortes en ambos sistemas, principalmente por aporte de aguas continentales provenientes de ríos, arroyos y precipitación local. Los estudios elaborados por De la Lanza-Espino y Lozano-Montes (1999) registraron concentraciones de salinidad máximas de 29.0 ups. Ayala-Pérez (2006)

registró salinidades máximas en el SPE de 33.3 ups, en el caso del SPA registró máximos de 14.9 ups en diciembre, valores similares a lo obtenido en la presente investigación.

En los SPA y SPE se registró un gradiente de salinidad que vario desde condiciones oligohalinas a condiciones polihaninas. Durante abril (secas) la salinidad fue máxima como resultado de la poca precipitación, el incremento en la insolación, evaporación y por la disminución del caudal de descarga de los ríos en los sistemas. En agosto (lluvias) se registraron salinidades bajas que estuvieron relacionadas con una alta precipitación y máxima descarga de los ríos, mientras que las salinidades mínimas se obtuvieron en noviembre (nortes) resultado del efecto de dilución causado por las lluvias de la temporada previa y por la influencia de los vientos de invierno que mueven el agua dulce proveniente de los afluentes hacia la boca de conexión y atenúan el efecto de marea (Díaz-Ruiz *et al.* 2018 y Aguirre-León, 2014).

Oxígeno disuelto

Las concentraciones de oxígeno disuelto en el SPA oscilaron en 3.34-4.17 mg/L, estas concentraciones son óptimas para el desarrollo de las diversas especies que se encuentran en el sistema. Para el caso del SPE las concentraciones oscilaron en 1.31-2.53 mg/L, se registraron las concentraciones máximas en temporada de secas y las mínimas en nortes. Al respecto, Ayala-Pérez *et al.* (2003) reporta promedios máximos de 5.15- 6.77mg/L en temporada de lluvias y los mínimos de 5.38 -6.35 mg/L en temporada de secas. Por otro lado, de acuerdo a Ayala-Pérez *et al.* (2014) en temporada de secas se presentan los promedios máximos de 8.43 mg/L y los mínimos de 0.48 mg/L en temporada de lluvias.

En general, el oxígeno mantuvo promedios menores que los registros en otras investigaciones. El SPE mostró concentraciones muy bajas en el periodo de estudio, presentando zonas de hipoxia (<2 mg/L), la cual es causante de mortalidad, cambios en el comportamiento en los organismos, reducción de crecimiento, disminución en la biomasa y composición de especies. Algunos de los factores que influyen en la generación de zonas con bajas concentraciones de oxígeno en los SPA y SPE son: 1) la producción de grandes masas de fitoplancton que evitan la penetración de la luz a capas profundas y aportan materia orgánica que al descomponerse consumen el oxígeno disuelto y 2) las descargas urbanas en los diversos ríos y arroyos en particular en el río Palizada, ya que durante la temporada de lluvias existe un incremento en la corriente, la cual arrastra los desechos hasta los sistemas, esto llega causar eutrofización y procesos de descomposición que

reducen los niveles de oxígeno en el sistema (De la Lanza-Espino *et al.*, 2008 y Sandoval-Huerta *et al.*, 2014).

Teniendo en cuenta a Ayala-Pérez *et al.* (2014) y Díaz-Ruiz *et al.* (2018), la variabilidad del oxígeno disuelto se ve influenciado por las condiciones de temperatura y salinidad, ya que los promedios mínimos se dieron en temporada nortes, dado el incremento en la temperatura del agua y por la aportación de materia orgánica alóctona transportada por la descarga de agua continental.

pH

Finalmente, el pH presentó poca variación en ambos sistemas (6.70-8.02). Los promedios registrados en este estudio son comparables con lo reportado por Ayala-Pérez (2006) donde registró valores de 7.3 en octubre y 8.3 en junio, mientras que Ruiz-Marín *et al.* (2009) registró valores entre 7.6 y 8.8.

En este caso, es preciso mencionar algunas variables que tienen efecto sobre el pH en estos sistemas costeros. Un factor importante es la degradación de la materia orgánica o la remoción del sedimento por efectos de las corrientes, la cual permite la remineralización y flujo de nutrientes hacia la columna de agua. Los resultados sugieren que los sistemas se encuentran sometido por la biogeoquímica de diversos compuestos de carbono, en especial carbonatos y CO₂, razón por la cual, las condiciones ácidas o alcalinas (por encima de 9 pH) son casi imposibles de encontrar en estos sistemas. Por último, los niveles de productividad primaria, temperatura y salinidad definen los valores de pH, tal y como lo mencionan Ruiz-Marín *et al.* (2009), Ayala-Pérez *et al.* (2014) y López Ortega *et al.* (2012).

DINÁMICA DE NUTRIENTES

La variación en la cantidad de nutrientes y sus fuentes, juegan un papel importante en todos los ecosistemas acuáticos, tal es el caso de las lagunas costeras, las cuales poseen abundantes fuentes de nutrientes (amoníaco, nitritos y nitratos, fosfatos, silicatos e iones de elementos traza), aparte de los nutrientes autóctonos, se suman los alóctonos, tanto de origen natural como antropogénicos (Poot Delgado, 2006).

Nitrato

El nitrato fue la forma nitrogenada predominante a lo largo del estudio en ambos sistemas, presentó las mayores concentraciones en temporada de secas y lluvias. En el SPA el promedio máximo fue de 9.23 mg/L, los máximos niveles de nitrato se reportaron en las estaciones 4 (13.85 mg/L) y 7 (13.75 mg/L), estos sitios se encuentran en interacción con las lagunas San Carlos, Atasta y El Corte, así como, con la descarga del río Torno Largo. El SPE presentó un promedio máximo de 5.12 mg/L, se registraron concentraciones máximas en las estaciones 8 (13.73 mg/L) y 10 (11.8 mg/L), las cuales se encuentran relacionadas con la Laguna del Vapor. Las concentraciones registradas en este estudio son superiores a lo reportado por De La Lanza-Espino y Lozano-Montes (1999) que señalan una concentración máxima de 1.6 µg at/l en el mes de junio en la Laguna de Términos, así como, Ruiz-Marín *et al.* (2009) registro una concentración máxima de 1.43 mg/L en la época de lluvias en las lagunas de Atasta y Pom. Las concentraciones de nitrato en temporada de nortes y secas exceden los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 (<10 mg/L) y los criterios ecológicos de calidad de agua de la norma CE-CCA-001/89 (<5 mg/L).

Los procesos de nitrificación se encuentran relacionados con la cantidad de oxígeno. El oxígeno es un parámetro que regula la nitrificación, para realizar este proceso el nivel no debe ser inferior a 2 mg O₂/L. En este estudio, ambos sistemas en temporadas de nortes y secas mantuvieron un promedio de oxígeno de 3.88 a 9.23 mg/L en la columna de agua, lo que generó condiciones favorables para realizar la conversión de nitratos de amonio. Por otra parte, es importante resaltar las zonas cercanas a los manglares que regulan la fijación de nitratos, se ha demostrado que <10% de la remoción de nitratos en los sedimentos de las zonas de manglares puede perderse por desnitrificación y el resto por procesos de inmovilización en el sedimento. Por ello, es importante preservar la población de manglares

de la región, con el fin de regular el flujo de nitrógeno que ingresa al sistema (Ruiz-Marín *et al.*, 2009).

De acuerdo con Poot-Delgado (2016), los sistemas con los sitios con más altas concentraciones de nitratos se encuentran cerca de las áreas habitadas, que están sujetas a impactos ambientales tales como la actividad petrolera, actividades agrícolas (eliminación de manglar), actividades de acuacultura, así como por asentamientos humanos (deficientes tratamientos de las aguas residuales); lo que ocasiona la alteración de las características fisicoquímicas de la Laguna.

Amonio

En el SPA se encontraron concentraciones máximas en temporada de secas (0.33mg/L) en las estaciones cercanas a la Laguna de Términos y Los Loros, mientras que, las mínimas se registraron en temporada de nortes (0.25mg/L) en las estaciones cercanas a la Laguna de Términos, Pom y Atasta. El SPE presentó un promedio máximo (0.19mg/L) en temporada de nortes y secas en las estaciones con interacción con las lagunas Boca Chica, San Francisco, Vapor y Del Este, en tanto, las concentraciones mínimas se registraron en temporada de lluvias (0.08mg/L). El amonio es fundamental en ambos sistemas, ya que es la estructura química del nitrógeno preferentemente asimilada en la fase oscura y luminosa por bacterias, fitoplancton, pastos marinos y algas epibénticas, con lo cual permite mantener el equilibrio del nivel de nitrógeno (Valdés, 1994).

De acuerdo con las concentraciones de amonio obtenidos en los SPA y SPE ambos quedan dentro del intervalo establecido de la norma NOM-127-SSA1-1994 (<0.50 mg/L). Esta norma establece tales criterios con base en las concentraciones de nutrientes permitidas para la salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Al respecto, Ruiz-Marín *et al.*, 2009, describe la variación del amonio en las lagunas de Atasta y Pom, las cuales son similares a lo que se reporta en el presente estudio.

En este sentido se obtuvieron concentraciones mayores a 0.1 mg/L, lo cual podría considerarse un indicador de contaminación, ya que el amonio es el producto final de la reducción de las sustancias orgánicas e inorgánicas nitrogenadas y debe su origen a factores como: 1) nitrógeno atmosférico, por fijación química; 2) proteínas animales o vegetales, por putrefacción mediante acción bacteriana; y 3) reducción de nitritos. La presencia de este nutriente en el agua está íntimamente relacionada con descargas de desagües, que aportan altas concentraciones de materia orgánica; además, por los aportes

de escorrentía terrestres y aguas subterráneas, fertilizantes nitrogenados y excremento de animales. Sin embargo, los aumentos en las concentraciones no solo se encuentran atribuidas a descargas de aguas residuales, sino también a otros procesos que determinan el contenido de amonio como: la dinámica de nutrientes dominada por mecanismos de retroalimentación entre la Laguna y el mar (Lin *et al.*, 2018).

Trabajos realizados en las lagunas Pom-Atasta y Términos registran principalmente una mayor concentración en el interior de las lagunas. Los estudios sugieren que para una Laguna el flujo de nutrientes a largo plazo, siempre ocurre desde la Laguna hacia el exterior, donde los sedimentos juegan un papel importante, ya que el amonio es la forma principal de intercambio de nitrógeno a través de la interfase entre el sedimento y el agua. Se menciona que la alta cantidad de amonio que se produce en la Laguna de Atasta en temporada de secas probablemente se exporta hacia la Laguna Pom, resultado de la mezcla de aportes de las contribuciones de las descargas de vertidos orgánicos, infiltraciones y los originados por la descomposición de materia orgánica producida por los aportes de los detritos de los manglares, pastos marinos y las comunidades de fauna Ruiz-Marín *et al.* (2009) y Ruiz- Marín *et al.* (2011).

Por otro lado, las concentraciones mínimas de amonio durante la temporada de nortes y lluvias posiblemente se deban a los procesos de dilución. A pesar de que, en esta temporada las lagunas reciben un alto aporte del material orgánico transportado por filtración. En este sentido, la descomposición bacteriana de la materia orgánica potencialmente proporcione un enriquecimiento de amonio en las temporadas de nortes y secas (Ruiz-Marín *et al.*, 2009).

Nitrito

El nitrito fue la forma nitrogenada que exteriorizo menos variación y bajas concentraciones con respecto al nitrato y amonio. En ambos sistemas las concentraciones máximas se presentaron en temporada de lluvias. En SPA (0.11 mg/L) se registró la concentración máxima en la estación diez que se encuentra en interacción directa con la Laguna Pom y Colorada, mientras que, en el SPE (0.10 y 0.12 mg/L) las concentraciones máximas se obtuvieron en el sitio dos, el cual mantiene interacción con la Laguna de Términos y Seno Palizada, y el sitio nueve, que se encuentra en interacción con la Laguna del Vapor. Las concentraciones de nitrito en este estudio en temporada de lluvias exceden los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 (<0.05 mg/L) y los criterios ecológicos de calidad de agua de la norma CE-CCA-001/89 (<0.05 mg/L). Las

concentraciones registradas en este trabajo son similares a lo reportado por De la Lanza-Espino y Lozano Montes (1999), donde la Laguna de Términos registró concentraciones máximas de 0.2 µg at/L en junio en la zona que recibe aporte del río Palizada y el mínimo de 0.1 µg at/L en noviembre. Mientras que, Barreiro-Güemes (1999) reporto en la Laguna de Pom-Atasta una concentración máxima de 0.1-2.7 nmol/l en temporada de lluvias y nortes.

Diversos autores indican que la presencia de compuestos nitrogenados como el nitrito se encuentran relacionados con los patrones de circulación que están definidos por las estaciones del año, el ascenso y descenso de aguas del fondo, además de los aportes continentales. De manera natural los nutrientes ingresan a los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este a través de los ríos, la filtración del agua subterránea y el mar, y se exportan vía intercambio de corrientes, mareas, la acumulación en los sedimentos, y a través del proceso de desnitrificación (González-Gándara, 2011 y Romero Beltrán *et al.*, 2014).

Barreiro-Güemes (1999) menciona que las concentraciones de nitritos son generalmente bajas en aguas naturales, ya que estos compuestos son intermediarios fugases entre el amonio y los nitratos. Considera que el aumento de nitritos durante la temporada de lluvias y de nortes, mantienen el proceso de enriquecimiento de nitrógeno previo a los florecimientos de biomasa fitopláctica que se presentan en la primavera. Por otro lado, Herrera-Silveira (2006) en su estudio indica que la alta concentración media obtenida de nitrito podría reflejar tanto los aportes de aguas subterráneas como de aguas residuales de infraestructura urbana que no cuenta con sistemas de tratamiento de aguas residuales, el cual a altas concentraciones llega a ser toxico para la vida acuática.

Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID)

Las concentraciones máximas de NID en el SPA se encontraron en la temporada de secas, se registró un máximo de 14 mg/L en la localidad Laguna de San Carlos y Atasta, esto se debe a que estos sitios mantienen características de baja energía, con lo cual los tipos de residencia de los nutrientes suspendidos en la columna de agua es mayor. La desembocadura de la Laguna de Atasta regula el flujo de nutrientes que proviene de los sistemas Pom-Atasta, fluyen hacia el estrecho de Torno Largo, lo cual sugiere la función de filtración y retención de nutrientes (Galindo-Pérez, 2020). En el SPE se registraron en el sitio ocho las concentraciones máximas de 13.9 mg/L en la temporada de secas, este sitio

se ubica en la Laguna del Vapor, y sitio diez el cual se encuentra en la desembocadura de los ríos Las Piñas y Marentes.

Se han realizado investigaciones en torno a las concentraciones de NID presentes en ambos sistemas, en las cuales encontraron máximos de nitrógeno inorgánico en la Laguna de Las Palmas en el SPA. En el SPE se registraron máximos en la Laguna del Vapor, sin embargo, el comportamiento en los dos sistemas fluviolagunares no presentaron diferencias estadísticamente significativas, con lo cual ambos sistemas mantienen un comportamiento similar en diferentes temporadas de estudio (Muciño–Márquez *et al.*, 2014).

Por otro lado, Muciño–Márquez *et al.* (2017) determinaron los compuestos de NID en los SPA y SPE, encontraron máximos de nitrógeno inorgánico en la estación que corresponde a la Laguna de Atasta en la temporada de nortes (noviembre 2008). En el caso del SPE las concentraciones máximas se encontraron en la Laguna de San Francisco, en este sitio se encuentra la desembocadura de Las Cruces. Por lo tanto, las concentraciones de compuestos nitrogenados en ambos sistemas lo determinan los flujos hídricos de los ríos y arroyos presentes en cada sistema. Así mismo, observaron que uno de los compuestos nitrogenados que determinaron el nitrógeno inorgánico fue el nitrato, este compuesto nitrogenado se encontró en mayores proporciones para todos los sitios en SPA y en el SPE se encontró en la Laguna del Este, esta evaluación coincide con lo que se registró en el presente estudio.

Teniendo en cuenta ambos estudios se observa que las mayores concentraciones de NID mantienen a lo largo del tiempo sus características de generación y mineralización de nutrientes de compuestos nitrogenados, así mismo los SPA y SPE son complejos fluviolagunares que exportan flujos considerables de NID hacia la Laguna de Términos.

Fosfatos

Las concentraciones promedio máximos de fosfatos fueron de 0.82 mg/L, estos se registraron en la Laguna de Puerto Rico del SPA en la temporada de secas. En el SPE se registró un promedio máximo de 2.82 mg/L durante la temporada de lluvias en la zona con interacción con la Laguna del Este y la desembocadura de los ríos La Leona y Las Cruces. Las concentraciones de fosfatos en este estudio en temporada de secas y lluvias exceden

los límites máximos permisibles en los criterios ecológicos de calidad de agua de la norma CE-CCA-001/89 (<0.1 mg/L).

Muciño–Márquez *et al.* (2014) determinó que las concentraciones de fosfatos en el sistema Pom-Atasta son mayores en los sitios con interacción con las lagunas de Las Palmas, Atasta, Pom y con la desembocadura del río Tomo Largo. En el caso del sistema Palizada-Del Este se encontraron concentraciones máximas en las zonas relacionadas con las lagunas Cuenca Palizada, Del Este y con la descarga del río Las Cruces. Estas concentraciones se asocian principalmente a diferentes mecanismos de descargas de la cuenca hídrica hacia los cuerpos de agua, así como la mineralización, hidrodinámica y el intercambio de flujo de fosfatos entre la fase sedimentaria y la columna de agua.

De acuerdo con Muciño–Márquez *et al.* (2017) las concentraciones máximas en el SPA se presentaron en los sitios que comprenden las lagunas la Boca y Palmas, mientras que, en el SPE se presentaron en los sitios que interaccionan con la Laguna Boca y Cuenca Palizada. Por otro lado, se menciona que en el sistema Pom-Atasta hay niveles de fósforo mayores (2.0-3.5 mg/L), que no son considerados seguros para el ambiente. En el río Palizada y en los jagüeyes se han detectado descargas de aguas residuales urbanas, por lo que sus aguas no son aptas para consumo humano, ni para actividades como la natación y la pesca.

Los ríos asociados a los sistemas, el tiempo de residencia hidráulica, la geomorfología, la asimilación por los organismos, la sedimentación, la volatilización, la reactividad química de los compuestos y los procesos hidrodinámicos que se encuentran en cada sitio, son fundamentales para la aportación de los diversos compuestos nitrogenados y fosforados, y mantener los procesos biogeoquímicos locales (Muciño–Márquez *et al.*, 2017).

Fósforo Inorgánico Disuelto (FID)

Los valores máximos de FID fueron de 0.81 mg/L, estos se registraron en la Laguna de Puerto Rico del SPA en la temporada de secas. En el SPE se registraron máximos de 1.14 mg/L durante la temporada de secas en la Laguna del Este. En esta temporada las concentraciones de FID se concentran por las altas temperaturas de la columna de agua y la evaporación de las mismas.

Existen diversos trabajos que realizaron investigaciones en torno a la determinación de los compuestos de FID en los SPA y SPE. Encontraron las mayores concentraciones en el sitio de la Laguna de Las Palmas y en la Laguna de Pom. En el caso del SPE se encontraron

valores máximos en la cuenca de Palizada y en el sitio de descarga del río Las Cruces (Muciño–Márquez *et al.*, 2014). Estas concentraciones se asocian principalmente a diferentes mecanismos de descargas de la cuenca hídrica hacia los cuerpos de agua, así como la mineralización, hidrodinámica y el intercambio de flujo de FID entre la fase sedimentaria y la columna de agua.

Muciño–Márquez *et al.* (2017) registraron concentraciones máximas en los sitios que comprenden Boca Chica y Laguna Las Palmas en el SPA, y en Boca Chica y las Cruces en el SPE. Así mismo no encontraron diferencias significativas entre los sitios y las diferentes temporadas de muestreo, lo que indicó que se mantiene un transporte y generación de FID homogéneo en las tres temporadas climáticas. Los ríos asociados a los sistemas, el tiempo de residencia hidráulica, la geomorfología, la asimilación por los organismos, la sedimentación, la volatilización, la reactividad química de los compuestos y los procesos hidrodinámicos que se encuentran en cada sitio, son fundamentales para la aportación de los diversos compuestos nitrogenados y fosforados, y mantener los procesos biogeoquímicos locales.

Existen muchos factores que determinan la presencia y concentración de los compuestos nitrogenados y fosforados. Sin embargo, ambos sistemas fluviolagunares son fundamentales ya que se llegan a comportar como sistemas con una alta remineralización y fijación de nitrógeno y fósforo, lo que indica que es un ecosistema de alto flujo de materia y energía (Conan *et al.*, 2017).

ANÁLISIS DE LA CLOROFILA *a*

La concentración de clorofila *a*, se considera como un índice de la biomasa fitoplanctónica, determina la productividad primaria en la columna de agua, además es empleada como indicador de la eutrofización de los sistemas costeros (Lara-Domínguez, 2011 y USEPA, 1999).

Se presentaron promedios máximos en temporada de nortes en los sitios que interaccionan con la Laguna de Términos y la zona de influencia de la marea en ambos sistemas. Estas zonas las conforman la Boca del sistema, Los Loros, Palmas y Pom para el SPA (33 mg/m³), en el caso del SPE (8.10 mg/m³) lo conforman las lagunas del Este y Seno Palizada.

Las concentraciones obtenidas en el SPA y SPE son superiores a las registradas en el sistema lagunar Pom-Atasta que son de 8.7-26.4 mg/m³ (Barreiro-Güemes y Aguirre-

León,1999), en la Laguna de Términos, se registraron concentraciones entre 7.1 y 8.8 mg/m³ (De la Lanza-Espino, 1999) y en otros sistemas similares en las costas del Golfo de México como la Laguna la Mancha donde se reportan entre 3.04 y 11.30 mg/m³ (Contreras-Espinosa, 2005).

Vargas González, 2012 menciona que concentraciones >5 mg/m³, pueden ser indicadores de problemas relacionados con presencia de fitoplancton nocivo e hipoxia, asociados a síntomas de eutrofización. Las altas concentraciones se asocian principalmente a los aportes de nutrientes por las aguas residuales urbanas.

De la Lanza-Espino (2004) determinaron que el factor que controla la variación estacional de la concentración de clorofila *a* es la profundidad de la columna de agua y la disponibilidad de nutrientes. La biomasa de algas es alta cuando la capa de mezcla superficial es más profunda; en consecuencia, la productividad primaria está controlada por la variación del flujo de los nutrientes de la interfase sedimentaria hacia la columna superior. Lara-Lara y Álvarez-Borrego (1975) indican que la razón por la que la clorofila *a* presenta una estacionalidad tan clara es resultado de la influencia de la irradiación solar, la precipitación pluvial y la salinidad, que pueden provocar grandes cambios en pocas horas en la concentración de clorofila de hasta un 300%.

De acuerdo con Barreiro-Güemes (1999) cada mg de clorofila *a* es capaz de incorporar de 2 a 24 mg de carbono por hora de iluminación, dependiendo de la cantidad de luz incidente y de las condiciones de la comunidad. Para el fitoplancton estuarino tropical se ha calculado una cifra promedio de 10 mg de carbono por mg de clorofila *a* por hora de iluminación. menciona que los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada-Del Este reciben un subsidio valioso de agua por parte de la Laguna de Términos a través de la marea, sin embargo, estos sistemas son más productivos y constituyen un enlace que recibe los escurrimientos de las tierras bajas de inundación fertilizando sus aguas, que al parecer subsidian a la Laguna de Términos e indirectamente a la Sonda de Campeche.

ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO TRIX

Para valorar la calidad del agua es necesario definir índices que relacionen los parámetros físicos, químicos y biológicos (Vargas González, 2012). A partir de la evaluación del índice trófico TRIX en los SPA y SPE se determinó que ambos se caracterizaron como oligotróficos con tendencia a ser mesotróficos. El SPA mantiene condiciones mesotróficas durante la

temporada de nortes y secas en los sitios que interaccionan con las lagunas los Loros, San Carlos y Palmas. Mientras que en el SPE se registró condiciones mesotróficas en temporada de secas en los sitios relacionados con las lagunas Del Este y con la descarga del río Las Cruces, el cual influye en la incorporación de compuestos nitrogenados y fosfatos.

Muciño-Márquez *et al.*, (2017) registraron en los SPA y SPE valores de 0-3.9 en su evaluación de TRIX, por lo cual clasificaron a esos sistemas como oligotróficos. Relacionaron el estado oligotrófico a una baja productividad en biomasa fitoplanctónica, poca concentración de nutrientes y alta transparencia del agua. Sin embargo, observó valores de 4 en los meses de febrero y octubre, con una tendencia a un estado mesotrófico.

De acuerdo con Herrera-Silveira *et al.* (2011) en su estudio donde estimaron el estado trófico de la Laguna de Términos y Pom-Atasta, indica que tienden a ser meso-eutrófico debido a que presenta 1) altas concentraciones de nutrientes principalmente fósforo, siguiereen que la agricultura en la cuenca tiene un impacto importante en la calidad del agua de estos sistemas, 2) las descargas de los ríos y la intensidad de la influencia marina estacional controla en gran medida las características de calidad del agua que intervienen en la definición de la condición trófica de estas lagunas y 3) el desarrollo urbano el cual carece de un sistema de drenaje.

CONCLUSIONES

El trabajo de monitoreo mostró que la temperatura ambiental mantiene fluctuaciones a lo largo de un periodo de 30 años, presentan máximos de 44°C durante la temporada de secas y mínimas de 9°C en temporada de nortes. El comportamiento histórico determina tres temporadas climáticas marcadas que corresponden a la época de nortes, secas y lluvias. Este parámetro se puede encontrar influenciado por algunos eventos atmosféricos presentados en los años 2009 y 2010, como lo son un norte muy severo registrado el 23 de febrero y tres ciclones tropicales que pasaron a menos de 150 km de la Laguna.

El análisis climatológico de la precipitación exhibo que se encuentra intrínsecamente relacionada por la temporalidad climática, registrándose máximos de 25 mm en temporada de lluvias. La tendencia estacional de la precipitación varía en espacio y tiempo; es heterogénea a lo largo del año, geográficamente aumenta en dirección norte-sur debido a la influencia de la latitud, así mismo, está gobernada en gran medida por la proximidad al Océano Pacífico y Golfo de México, a la orografía del país, a los rasgos de la circulación atmosférica y a la teleconectividad del fenómeno del Niño. Por otro lado, se puede apreciar con claridad la temporada de lluvias (de junio a octubre) y de secas (diciembre a mayo).

En la temporada de secas se registraron las máximas concentraciones de las variables fisicoquímicas y de nutrientes. Los parámetros fisicoquímicos que mantuvieron relaciones significativas con los nutrientes fueron la salinidad, temperatura y oxígeno disuelto. El pH no mantiene una relación significativa con respecto a algún nutriente en las diferentes temporadas de muestreo y sobre la distribución de los nutrientes en los SPA y SPE.

Las altas concentraciones de clorofila a en la temporada de nortes están influenciadas a las concentraciones de nitratos y amonio, así como a las condiciones particulares de los sistemas que permiten el crecimiento de diferentes especies de microalgas. La clorofila a permite determinar problemas relacionados con la presencia de fitoplancton nocivo e hipoxia, asociados a síntomas de eutrofización. Las altas concentraciones se asocian principalmente a los aportes de nutrientes por las aguas residuales urbanas.

Las condiciones tróficas en el SPA y SPE se mantienen en un estado oligotrófico con tendencia a mesotrófico durante la temporada de nortes y secas, estas condiciones indican una alta productividad y generación de materia orgánica *in situ* y por las diferentes aportaciones en el sistema. Cabe destacar que las diferentes condiciones de ambos sistemas se encuentran relacionadas con las aportaciones antrópicas, variables ambientales , temporales y espaciales de los sistemas, por lo cual es recomendable un monitoreo constante a largo plazo del tiempo, lo que permitirá realizar tendencias y predicciones que ayuden a determinar los sitios que mantengan una presión ambiental y generen cambios en su estado trófico y así ayuden a mitigar las condiciones ante un incremento en su estado trófico.

REFERENCIAS

Aguirre-León A y Díaz-Ruiz S. 2000. Estructura poblacional, madurez gonádica y alimentación de *Eugerres plumieri* (gerreidae) en el sistema fluvio deltáico Pom-Atasta, México. *Ciencias Marinas*, 26 (2):253-273.

Aguirre-León A y Díaz-Ruiz S. 2006. Estructura de tallas, madurez gonádica y alimentación del pez *Diapterus rhombeus* (Gerreidae) en el sistema fluvio-deltaico Pom-Atasta, Campeche, México. *Rev. Biol. Trop.*, 54 (2): 599-611.

Aguirre-León A, Pérez-Ponce HE, Díaz-Ruiz S. 2014. Heterogeneidad ambiental y su relación con la diversidad y abundancia de la comunidad de peces en un sistema costero del Golfo de México. *Revista de Biología Tropical*, 62:145-163.

Álvarez-Guillén H, Yáñez-Arancibia A y Lara-Domínguez AL. 1985. Ecología de la boca del Carmen, Laguna de Términos: El hábitat y estructura de las comunidades de peces. *An. Inst. Cienc. Mar Limnol.* 12: 107-144.

Andersen JH, Schlüter L y Ærtebjerg G. 2006. Coastal eutrophication: recent developments in definitions and implications for monitoring strategies. *Journal of Plankton Research*. 28 (7):621–628.

Anónimo. 1994. Decreto por el que se declara área natural protegida con el carácter de protección de flora y fauna, la región conocida como Laguna de Términos, ubicada en los municipios de Carmen, Palizada y Champotón, Camp. (Segunda publicación) Estado de Campeche. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4745237&fecha=27/09/1994 [consultada el 30 Sep. 2018].

Anónimo. 1997. Programa de manejo del área de protección de flora y fauna “Laguna de Términos” México. Semarnat. Instituto Nacional de Ecología. 166p.

Ayala-Pérez LA, Ramos-Miranda J y Flores-Hernández D. 2003. La comunidad de peces de la Laguna de Términos: Estructura actual comparada. *Rev. Biol., Trop.* 51: 783–794.

Ayala-Pérez LA. 2006. Modelo de simulación de la comunidad de peces en el área natural protegida Laguna de Términos, Campeche, México. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma Metropolitana.

Ayala-Pérez LA, Terán-González GJ, Ramos-Miranda J y Flores-Hernández D. 2012. Cambios interanuales en la abundancia de la comunidad de peces en la costa occidental de Campeche, México. *Ciencias Marinas*. 38(2): 395–410.

Ayala-Pérez LA, Vasco-Villa O y Sosa-López A. 2014. Evaluación de las asociaciones de peces dominantes influenciados por el ciclo nictemeral y la variación temporal en la reserva de la biosfera Los petenes, Campeche, México. *Ciencia VAT*, 9(1):33-43.

Barreiro-Güemes MT y Aguirre-León A. 1999. Distribución espacio-temporal de la biomasa fitoplanctónica en el sistema lagunar Pom-Atasta, Campeche, México. *Revista de Biología Tropical*, 47: 27-35.

Barreiros Güemes MT y Signoret Poillon M. 1999. Productividad primaria en sistemas acuáticos costeros: Métodos de evaluación. 1ed. México: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, 16-22p.

Conan P, Pujo-Pay M, Agab M, Calva-Benítez L, Chifflet S, Douillet P, Dussud C, Fichez R, Grenz C, Gutierrez F, Origel-Moreno M, Rodríguez-Blanco A, Sauret C, Severin T, Tedetti M, Torres R y Jean-François G. 2017. Biogeochemical cycling and phyto- and bacterioplankton communities in a large and shallow tropical lagoon (Términos Lagoon, Mexico) under 2009–2010 El Niño Modoki drought conditions. *Biogeosciences*, 14:959-975.

Contreras-Espinosa F, Rivera-Guzmán NE y Segura-Aguilar R. 2005. Nutrientes y productividad primaria fitoplanctónica en una Laguna costera tropical intermitente (La Mancha, Ver.) del Golfo de México. *Hidrobiológica*, 15: 299-310.

De la Lanza-Espino G y Lozano-Montes H. 1999. Comparación fisicoquímica de las lagunas de Alvarado y Términos. *Hidrobiológica*, 9(1):15-30.

De la lanza-Espino G y Gómez-Rojas JC. 2004. Cap.1 Características físicas y químicas del Golfo de México. Diagnóstico ambiental del Golfo de México (pp.103-129). México, CDMX: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).

De la Lanza-Espino G, Alcocer-Durand J, Moreno-Ruiz JL y Hernández-Pulido SP. 2008. Análisis químico-biológico para determinar el estatus trófico de la Laguna de Tres Palos Guerrero, México. Hidrobiológica, 18 (1): 21-30.

Diario Oficial de la Federación. 1989. Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua. CE-CCA-001-89. México.

Diario Oficial de la Federación. 1994. Norma Oficial Mexicana Nom-127-ssa1-1994," Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". Introducción.

Díaz-Ruiz S, Aguirre-León A, Mendoza-Sánchez E y Lara-Domínguez AL. 2018. Factores ambientales que influyen en la ictiofauna de la Laguna La Mancha, sitio Ramsar, Golfo de México. Rev. Biol. Trop., 66: 246-265.

Echeverría-Ávila S, Pérez-Ceballos R, Zaldívar-Jiménez A, Canales-Delgadillo J, Brito-Pérez R, Merino-Ibarra M y Vovides A. 2019. Regeneración natural de sitios de manglar degradado en respuesta a la restauración hidrológica. Madera y bosques, 25:1.

Galindo-Pérez E. 2020. Biogeoquímica de dos cabeceras estuarinas de la Laguna de Términos, Campeche: estudio base para generar propuestas de conservación. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana.

González-Gándara C. 2011. Cap. 4 Recursos hídricos: La zona marina. La biodiversidad de Veracruz: estudio de estado (pp.293-300). México, Veracruz: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio).

Guevara E, Álvarez H, Mascaró M, Rosas C y Sánchez A. 2007. Hábitos alimenticios y ecología trófica del pez *Lutjanus griseus* (Pisces: Lutjanidae) asociado a la vegetación sumergida en la Laguna de Términos, Campeche, México. Rev. Biol. Trop., 55: 989-1004.

Herrera-Silveira JA. 2006. Lagunas costeras de Yucatán (SE, MÉXICO): investigación, diagnóstico y manejo. *ECOTROPICOS*, 19:94-108.

Herrera-Silveira JA, Morales-Ojeda SM y Cortes-Balan TO. 2011. Eutrofización en los ecosistemas costeros del Golfo de México: V.1. SEMARNAT-NOAA-GEF-UNIDO. 88p.

Lara-Domínguez AL, Yáñez-Arancibia A y Amezcua Linares F. 1980. Biología y ecología del bagre *Arius melanopus* Gunther en la Laguna de Términos, sur del Golfo de México (Pisces: Ariidae). *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología – UNAM*, 8(1): 267-304.

Lara-Domínguez AL. 2011. Cap. 4 Recursos hídricos: La zona marina. La biodiversidad de Veracruz: estudio de estado (pp.285-287). México, Veracruz: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio).

Lara-Lara J y Álvarez-Borrego S. 1975. CICLO ANUAL DE CLOROFILAS Y PRODUCCION ORGANICA PRIMARIA EN BAHIA SAN QUINTIN, B. C. *Ciencias Marinas*, 2(1): 77–97.

Lin Yu-Lin, Delgado-Blas VH y Gutiérrez-Aguirre MA. 2018. Batimetría y Calidad de Agua de La Laguna Milagros, Quintana Roo, México. *Teor. Prax.*, 25: 9-30.

López Ortega, M, Pulido Flores G, Serrano Solís A, Gaytán Oyarzún JC, Monks Sheets WS Y López Jiménez MA. 2012. Evaluación estacional de las variables fisicoquímicas del agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12: 713-719.

Méndez G. 2008. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones geográficas*, 65: 38-55.

Muciño-Márquez RE, Figueroa-Torres MG y Aguirre-León A. 2014. Composición fitoplanctónica en los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada Del Este, adyacentes a la Laguna de Términos Campeche, México. *Acta Biol. Colomb*, 19(1):63-84.

Muciño-Márquez RE, Figueroa-Torres MG y Aguirre-León A. 2015. Cianofitas de los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada-Del Este, adyacentes a la Laguna de Términos, Campeche, México. *Polibotánica*, 39: 49-78.

Muciño-Márquez RE, Aguirre-León A y Figueroa-Torres MG. 2017. Evaluación del estado trófico en los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada Del Este, Campeche, México. *Hidrobiológica*, 27 (3): 281-291.

Ortega M. 1995. Observaciones del fitobentos de la Laguna de términos, Campeche, México. *Ser. Bot.*, 66(1): 1-36.

Piñeiro R, Giménez E, Moreno V, Burgos R y Betanzos A. 2001. Características térmicas del Banco de Campeche. *Cienc. Pesq.*,15: 83-87.

Ponce-Vélez G y Vázquez Botello A. 1992. Aspectos geoquímicos y de contaminación por metales pesados en la Laguna de Términos, Campeche. *Hidrobiológica*,1 (2):1-10.

Poot-Delgado CA. 2006. Estructura de la comunidad fitoplanctónica con énfasis en las especies tóxicas y/o nocivas de la Laguna de Macapule, Sinaloa. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.

Poot-Delgado CA. 2016. Microalgas como indicadores de la calidad del agua en los bancos ostrícolas de la Laguna de Términos, Golfo de México. Tesis de Doctorado. Universidad Veracruzana.

Ramos-Miranda J, Flores-Hernández D, Ayala-Pérez LA, Rendón-Von Osten J, Villalobos-Zapata G y Sosa-López A. 2006. Atlas Hidrológico e Ictiológico de la Laguna de Términos. Universidad Autónoma de Campeche. 173p.

Ramos-Miranda J y Villalobos-Zapata GJ. 2015. Aspectos socioambientales de la región de la Laguna de Términos, Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. 210p.

Romero B, E, Aldana G, Muñoz M, Medina P, Valdez P, Bect J, Gaspar M, Campos L, Romero A, Tirado E, Saucedo C, Osuna D y Romero N. 2014. Estudio de la calidad del agua y sedimento en las lagunas costeras del estado de Sinaloa, México. Informe de

Investigación (pp.5-191). México, CDMX: Instituto Nacional de Pesca e Instituto Sinaloense de Acuacultura y Pesca.

Ruiz AC. 2017. Respuesta y vulnerabilidad ante eventos atmosféricos de la Laguna de Términos. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ruiz-Marín A, Campos-García S, Zavala-Loría J y Canedo-López Y. 2009. Aspectos hidrológicos de las Lagunas De Atasta y Pom, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10: 63 – 74.

Ruiz-Marín A, Canedo López Y, Campos García SC, Zavala Loria JC, Elvira Antonio N, y Sabido Pérez MY. 2011. Hydrology and Pollution in Coastal Zone of Carmen City: Relationships with Effluents of Urban Areas. *International Journal of Environmental Protection*, 5:34-40.

Sandoval-Huerta ER, Madrigal-Guridi X, Escalera-Vázquez LH, Medina-Nava M y Domínguez-Domínguez O. 2014. Estructura de la comunidad de peces en cuatro estuarios del Pacífico mexicano central. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85: 1184-1196.

USAID. 2012. Manual del curso de monitoreo ambiental. 1ed. República Dominicana: Printcorp servicios gráficos corporativos. 33p.

USEPA. 1999. Ecological Condition of Estuaries in the Gulf of Mexico. Environmental Protection Agency Washington, D.C: EPA.

Valdés D y Real E. 1994. Flujos de amonio, nitrito, nitrato y fosfato a través de la interfase sedimento-agua, en una Laguna tropical. *Ciencias Marinas*, 20(1): pp.65- 80.

Vargas González HH. 2012. Vertimientos de aguas residuales urbanas y sus efectos en la condición ambiental de la Ensenada La Salada, Sonora, México. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Villalobos GJ, Yáñez-Arancibia A, Day J y Lara-Domínguez AL. 1999. Ecología y manejo de los manglares en la Laguna de Términos, Campeche, México. *Ecosistemas de manglar en América Tropical* (pp.263-274). México, CDMX: Instituto de Ecología A.C. México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA.