

PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE RECURSOS MARINOS EN CENTROAMÉRICA

Convenio de Financiación: (BMZ 2010 66 836)

RESERVA ESTATAL SANTUARIO DEL MANATÍ BAHÍA DE CHETUMAL



INFORME FINAL DE SEGUIMIENTO DEL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA RESERVA ESTATAL SANTUARIO DEL MANATÍ BAHÍA DE CHETUMAL

Responsable Técnico: Dra. Teresa Álvarez Legorreta

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS	6
3. MÉTODOS	7
3.1. Área de estudio	7
3.2. Metodología.....	8
4. RESULTADOS	10
4.1. Evaluación de la calidad del agua	10
4.1.1.- Bahía Chetumal.....	10
4.1.2.- Laguna Guerrero.....	11
4.1.3.- Laguna Chile Verde.....	12
4.1.4.- Laguna Agua Salada.....	12
4.2. Evaluación de la variación espacio-temporal de los indicadores de la calidad del agua.....	13
4.2.1.- Bahía de Chetumal.....	13
4.2.1.1.- Físicoquímicos 2018.....	13
4.2.1.2.- Físicoquímicos 2017-2018.....	21
4.2.1.3.- Nutrientes 2018.....	27
4.2.1.4.- Nutrientes 2017-2018.....	34
4.2.2.- Laguna Guerrero.....	44
4.2.2.1.- Físicoquímicos 2018.....	44
4.2.2.2.- Físicoquímicos 2017-2018.....	49
4.2.2.3.- Nutrientes 2018.....	56
4.2.2.4.- Nutrientes 2017-2018.....	63
4.2.3.- Laguna Chile Verde.....	72
4.2.3.1.- Físicoquímicos 2018.....	72
4.2.3.2.- Físicoquímicos 2017-2018.....	78
4.2.3.3.- Nutrientes 2018.....	85
4.2.3.4.- Nutrientes 2017-2018.....	91
4.2.4.- Laguna Salada.....	99
4.2.4.1.- Físicoquímicos 2018.....	99
4.2.4.2.- Físicoquímicos 2017-2018.....	105
4.2.4.3.- Nutrientes 2018.....	112



4.2.4.4.- Nutrientes 2017-2018.....	118
4.3.Evaluación de la condición y estado trófico.....	126
4.3.1.- Bahía de Chetumal.....	126
4.3.2.- Laguna Guerrero.....	130
4.3.3.- Laguna Chile Verde.....	132
4.3.4.- Laguna Agua Salada.....	134
4.4.Identificación y caracterización de las principales fuentes de contaminación.....	136
4.4.1.- Bahía de Chetumal.....	136
4.4.2.- Laguna Guerrero.....	136
4.4.3.- Laguna Chile Verde.....	137
4.4.4.- Laguna Agua Salada.....	137
4.5.Fortalecimiento del plan de monitoreo de la RESMBCH.....	138
5. DISCUSIÓN.....	141
6. CONCLUSIONES.....	143
7. RECOMENDACIONES.....	145
8. AGRADECIMIENTOS.....	145
9. REFERENCIAS.....	146
10. ANEXOS.....	147

1.- INTRODUCCIÓN

Debido a que las actividades humanas que se desarrollan en torno a los sistemas acuáticos que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH), constituyen un factor determinante en la calidad de sus aguas; el análisis de constituyentes químicos y físicos se ha utilizado para evaluar la condición o el estado de salud en relación con factores de estrés que pueden ser de origen natural o antropogénico, como el enriquecimiento de nutrientes o la presencia de contaminantes químicos. El “Diagnóstico de la Calidad del Agua de la Bahía de Chetumal”, realizado por El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) con bases de datos de parámetros de calidad del agua de programas de monitoreo de la Secretaría de Marina, la Secretaría de Salud del Estado de Quintana Roo y el propio ECOSUR, indicó una disminución de la calidad del agua en la bahía en un lapso de 10 años (2005-2015). Entre las recomendaciones del Diagnóstico se destacó la necesidad de implementar un programa de monitoreo permanente de la calidad del agua en la Reserva Estatal para determinar la variabilidad espacial y temporal de los indicadores, para realizar acciones para su saneamiento, conservación y manejo.

A partir de esta recomendación, durante 2017 ECOSUR realizó el monitoreo de la calidad del agua y el entrenamiento de personal de la RESMBCH, con el objetivo principal de fortalecer las capacidades del personal de la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente (SEMA) del estado de Quintana Roo. Es importante indicar que para 2018, este personal capacitado pasó a formar parte del Instituto de Biodiversidad y Áreas Naturales Protegidas del estado de Quintana Roo (IBANQROO), con el que se continuaron las actividades de monitoreo y capacitación. El apoyo financiero del proyecto Conservación de Recursos Marinos en Centroamérica fue administrado por Mesoamerican Reef Fund (MAR Fund) y financiado por el Gobierno de Alemania a través del Banco Alemán de Desarrollo (KFW).

El monitoreo de 2017 indicó que la RESMBCH mantuvo una mala calidad del agua principalmente en los sitios cercanos a asentamientos humanos, sobre todo durante las épocas de secas y lluvias. Por lo que se recomendó mantener el monitoreo de los diversos indicadores de calidad del agua, con la finalidad de que los tomadores de decisiones cuenten con información para determinar las acciones para mejorar o mantener la calidad del agua de la RESMBCH, así como evaluar la efectividad de estas acciones (Álvarez, 2018).

A partir de estos resultados y recomendaciones, se continuó durante el año 2018 con el monitoreo de la calidad del agua y el estado trófico de los cuatro cuerpos de agua que comprenden la RESMBCH. Adicionalmente, debido a que la Bahía de Chetumal es un cuerpo de agua compartido entre los países de México y Belice, se incluyó la elaboración de un diagnóstico integral de la calidad del agua de las áreas naturales protegidas de Bahía Chetumal-Bahía Corozal, que permitirá a ambos países realizar acciones conjuntas de conservación, protección y saneamiento; mismo que será presentado posteriormente, en un documento independiente a este informe final.

2.- OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Continuar con la evaluación de la calidad del agua y el estado trófico de la Bahía de Chetumal y las lagunas Guerrero, Agua Salada y Chile Verde, para fortalecer el plan de monitoreo actual de la RESMBCH.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar la calidad del agua de la Bahía de Chetumal y las lagunas Guerrero, Agua Salada y Chile Verde, a partir de doce indicadores fisicoquímicos.
- Evaluar la variación espacial y temporal de los indicadores de calidad de los cuatro cuerpos de agua.
- Evaluar la condición y estado trófico en los cuatro cuerpos de agua.
- Identificar y caracterizar las principales fuentes de contaminación en los cuatro cuerpos de agua, a partir de los indicadores de calidad del agua.
- Fortalecer el plan de monitoreo de la RESMBCH a partir del entrenamiento de personal del IBANQROO en la evaluación de indicadores de calidad del agua con equipo de campo.
- Elaborar un diagnóstico integral transfronterizo de la calidad del agua del sistema Bahía Chetumal/Corozal durante el período 2017-2018.

3.- MÉTODOS

3.1.- Área de estudio

La Bahía de Chetumal es un sistema estuarino compartido entre los países de México y Belice, que tiene una superficie aproximada de 2,560 km², en dónde la parte norte del sistema forma una cuenca somera con profundidades que oscilan entre 2 y 5 m. Cuenta con varias entradas de agua dulce como el Río Hondo, arroyos pequeños y manantiales subterráneos, y está conectado a varios sistemas de lagunas adyacentes, como la Laguna Guerrero (Carrillo et al., 2009).

La Laguna Guerrero es una cuenca elongada de 8.5 km de longitud y 1.35 km en su parte más ancha, con una profundidad media de 2.22 m y máxima de 6.25 m en el centro del sistema (Alvarez-Legorreta y Carrillo-Briebiezca, 2011). De acuerdo al INEGI (2010) la Laguna Chile Verde tiene una longitud aproximada de 21 km y una anchura máxima de 1 km, con una superficie de 11.06 km²; y Laguna Salada presenta una longitud de 9.5 km², una anchura máxima de 1 km y un área de 3.97 km².

Se conservó el número y localización de los sitios de monitoreo, seleccionados durante el monitoreo de 2017, en dónde se consideraron las dimensiones de cada cuerpo de agua y la ubicación de las fuentes potenciales de contaminación debido a las actividades humanas desarrolladas en el entorno de los cuatro sistemas acuáticos. Para la Bahía de Chetumal se monitorearon 18 sitios, 5 sitios para Laguna Guerrero, 4 sitios para Laguna Chile Verde y 3 sitios para Laguna Agua Salada (fig.1).

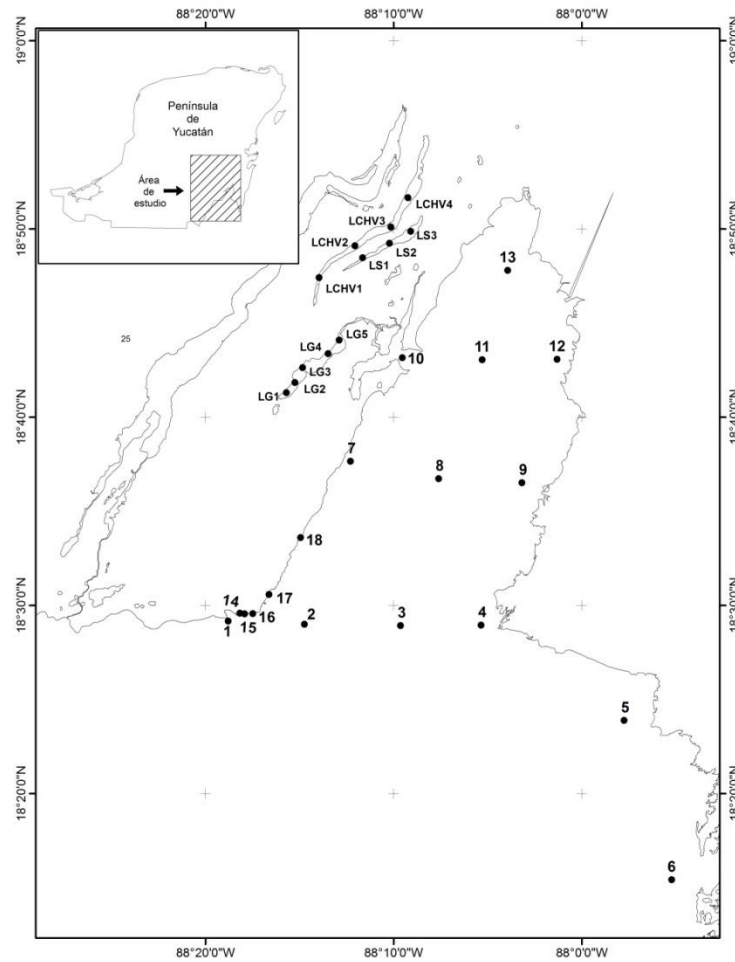


Fig. 1.- Localización de los 30 sitios de monitoreo en los cuatro cuerpos de agua que se encuentran en la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal.

3.2.- Metodología

Para el monitoreo de 2018 de calidad del agua, se contemplaron los meses de abril, agosto y noviembre, que representan las temporadas climáticas de secas, lluvias y nortes, respectivamente. Durante los tres muestreos participó personal de IBANQROO, con el objetivo de continuar con el entrenamiento por parte de personal de ECOSUR, en la colecta de muestras de agua y la medición de parámetros fisicoquímicos *in situ* en la columna de agua de los sistemas monitoreados.

Los parámetros fisicoquímicos de pH, temperatura, salinidad, conductividad, oxígeno disuelto y turbidez, se midieron con una sonda multiparamétrica marca HORIBA, modelo U-50; a un metro de profundidad en la columna de agua y dónde la profundidad era menor a 1m, la medición se realizó a la mitad de la profundidad del sitio.

Para la determinación de los indicadores de calidad del agua: nitratos, nitritos, amonio, ortofosfatos, silicatos y clorofila *a*, las muestras de agua se colectaron con una botella tipo Van Dorn a un metro de profundidad, con tres réplicas por sitio. Las muestras se depositaron en envases de plástico previamente lavados con base a un protocolo del sistema de calidad del laboratorio de ECOSUR, y se conservaron en hielo para ser transportadas para su análisis.

Una vez en el laboratorio de ECOSUR, las muestras fueron filtradas para la determinación de nutrientes disueltos y clorofila *a*. El amonio se evaluó por el método de fenol alcalino e hipoclorito de sodio (EPA, 2001). Los ortofosfatos como fósforo reactivo soluble por el método de azul de molibdeno de Murphy y Riley (1962). El nitrógeno inorgánico como nitritos se determinó por el método de la sulfanilamida y los nitratos se midieron como nitritos después de su reducción en una columna de Cd-Cu (Parson et al., 1984). Los silicatos por el método de molibdato de amonio de Schwartz (1942, en: Contreras, 1994) y la clorofila *a* por el método de extracción con acetona (90%), en filtros Millipore de 0.45 μm de abertura de poro (Parson et al., 1984). Todos los métodos cumplen los estándares de la Entidad Mexicana de Acreditación, para que el Laboratorio de Química de ECOSUR pueda realizar el proceso de acreditación.

Con los datos de nutrientes se obtuvieron dos indicadores de calidad del agua para cada sistema acuático: a) el Índice de Eutrofización de Karydis *et al* (1983), que involucra la concentración total de cada nutriente en un cuerpo de agua y la concentración de cada nutriente que aporta cada sitio de monitoreo, en un período de tiempo determinado; y b) el Índice de Condición a partir de la determinación de los valores de referencia por nutriente en cada laguna (EPA, 1992).

4.- RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos para cada cuerpo de agua durante el período de monitoreo en 2018. Así mismo, como adelanto del objetivo del diagnóstico integral, en cada sección se incluye una comparación del comportamiento de la variabilidad temporal de los indicadores de calidad en el período 2017-2018, que será retomado en el documento que incluirá Bahía Corozal.

4.1.- Evaluación de la calidad del agua

En esta sección se describe la calidad del agua de los sistemas acuáticos, a partir de los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos como Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECAs) para la protección de vida acuática para agua dulce y agua salobre o marina, por la entonces Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) en 1989; y que siguen vigentes debido a que no han recibido actualizaciones por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

4.1.1.- Bahía Chetumal

De acuerdo a los CECAs para la protección de la vida acuática marina o salobre, la calidad del agua en la Bahía de Chetumal, es mala para amonio a lo largo del año, debido a que en general su concentración se encuentra por arriba de los LMP en 61% a 100% de los sitios de monitoreo (Tabla 1). Lo mismo ocurre con la concentración de fosfatos (PO_4), que en las tres épocas climáticas es superior al LMP en más de 70% de los sitios. En relación con los niveles de nitritos y nitratos, estos son superiores al LMP en menos del 50% de los 18 sitios a lo largo del año. El de oxígeno disuelto (OD) registró concentraciones superiores a 5 mg/l, que es la considerada como segura para los organismos acuáticos, a lo largo del período de estudio.

Tabla 1.- Comparación de la concentración promedio y desviación estándar de los indicadores de calidad del agua de la Bahía de Chetumal en tres épocas climáticas, con los CECAs (SEDUE, 1989) para aguas marinas o salobres. Los datos en paréntesis se refieren al porcentaje de sitios que superan los LMP.

Indicador	Abril	Agosto	Noviembre	CECAs (Agua marina y salobre)
Nitritos (mg/l)	0.002 ± 0.003 (28%)	0.003 ± 0.004 (45%)	0.005 ± 0.006 (50%)	0.002
Nitratos (mg/l)	0.05 ± 0.07 (39%)	0.03 ± 0.04 (17%)	0.04 ± 0.06 (28%)	0.04
Amonio (mg/l)	0.03 ± 0.03 (61%)	0.03 ± 0.02 (89%)	0.03 ± 0.01 (100%)	0.01
Fosfatos (mg/l)	0.004 ± 0.002 (78%)	0.005 ± 0.004 (78%)	0.004 ± 0.002 (72%)	0.002
Oxígeno Disuelto (mg/l)	7.9 ± 0.7 (0%)	8.0 ± 0.8 (0%)	7.2 ± 0.5 (0%)	5.0

4.1.2. - Laguna Guerrero

Los CECAs no establecen LMP para nitritos y nitratos, para agua dulce. Así, en Laguna Guerrero solamente el amonio indica una mala calidad del agua durante el mes de abril (época de secas), en donde su concentración supera los LMP para protección de organismos acuáticos, en el 40% de los sitios. En tanto que los valores de los fosfatos y de OD, indican buena calidad del agua. (Tabla 2).

Tabla 2.- Comparación de la concentración promedio y desviación estándar de los indicadores de calidad del agua de la Laguna Guerrero en tres épocas climáticas, con los CECAs (SEDUE, 1989) para aguas dulces. Los datos en paréntesis se refieren al porcentaje de sitios que superan los LMP.

Indicador	Abril	Agosto	Noviembre	CECAs (Agua dulce)
Nitritos (mg/l)	0.004 ± 0.002	0.0003 ± 0.0002	0.0005 ± 0.0003	-
Nitratos (mg/l)	0.016 ± 0.009	0.018 ± 0.022	0.005 ± 0.002	-
Amonio (mg/l)	0.05 ± 0.03 (40%)	0.01 ± 0.004 (0%)	0.04 ± 0.01 (0%)	0.06
Fosfatos (mg/l)	0.005 ± 0.002 (0%)	0.004 ± 0.001 (0%)	0.002 ± 0.001 (0%)	0.1
Oxígeno Disuelto (mg/l)	8.0 ± 0.5 (0%)	8.5 ± 0.4 (0%)	7.9 ± 0.4 (0%)	5.0

4.1.3. - Laguna Chile Verde

Como el sistema anterior, en Laguna Chile Verde solamente el amonio registra concentraciones superiores al LMP para organismos de agua dulce (Tabla 3), en el 75% de los sitios durante abril y noviembre (temporadas de secas y nortes, respectivamente), y en el 25% de los sitios durante el mes de agosto que corresponde a la época de lluvias. Los valores de fosfatos y OD indican buena calidad del agua a lo largo del período del estudio, y los CECAs no establecen LMP para nitritos y nitratos para agua dulce.

Tabla 3.- Comparación de la concentración promedio y desviación estándar de los indicadores de calidad del agua de la Laguna Chile Verde en tres épocas climáticas, con los CECAs (SEDUE, 1989) para aguas dulces. Los datos en paréntesis se refieren al porcentaje de sitios que superan los LMP. (LD = Límite Detección)

Indicador	Abril	Agosto	Noviembre	CECAs (Agua dulce)
Nitritos (mg/l)	0.002 ± 0.002	0.002 ± 0.003	0.001 ± 0.001	-
Nitratos (mg/l)	0.007 ± 0.002	0.039 ± 0.039	0.004 ± 0.010	-
Amonio (mg/l)	0.09 ± 0.06 (75%)	0.06 ± 0.01 (50%)	0.07 ± 0.02 (75%)	0.06
Fosfatos (mg/l)	0.011 ± 0.003 (0%)	0.002 ± 0.000 (0%)	0.004 ± 0.001 (0%)	0.1
Oxígeno Disuelto (mg/l)	8.2 ± 0.9 (0%)	7.8 ± 0.4 (0%)	7.4 ± 0.2 (0%)	5.0

4.1.4. - Laguna Agua Salada

En este cuerpo de agua salobre la mala calidad estuvo determinada por concentraciones de amonio y fosfatos superiores a las establecidas en los CECAs, para la protección de la vida acuática. En dónde el mes de abril (época de secas) el 100% de los sitios registraron valores por arriba de los LMP, para estos dos indicadores; en tanto que para lluvias (agosto), estos LMP se rebasaron en el 67% de los sitios (Tabla 4). Mientras que los indicadores nitritos, nitratos y OD se encuentran dentro de los LMP establecidos para la protección de vida acuática.

Tabla 4.- Comparación de la concentración promedio y desviación estándar de los indicadores de calidad del agua de la Laguna Agua Salada en tres épocas climáticas, con los CECAs (SEDUE, 1989) para aguas marinas o salobres. Los datos en paréntesis se refieren al porcentaje de sitios que superan los LMP. (LD = Límite Detección)

Indicador	Abril	Agosto	Noviembre	CECAs (Agua marina y salobre)
Nitritos (mg/l)	0.001 ± 0.0002 (0%)	0.0004 ± 0.0003 (0%)	0.0003 ± 0.0001 (0%)	0.002
Nitratos (mg/l)	0.004 ± 0.001 (0%)	0.007 ± 0.004 (0%)	0.002 ± 0.000 (0%)	0.04
Amonio (mg/l)	0.04 ± 0.03 (100%)	0.02 ± 0.01 (67%)	0.02 ± 0.005 (100%)	0.01
Fosfatos (mg/l)	0.007 ± 0.004 (100%)	0.003 ± 0.001 (67%)	0.004 ± 0.001 (67%)	0.002
Oxígeno Disuelto (mg/l)	6.6 ± 0.9 (0%)	8.2 ± 0.3 (0%)	7.8 ± 0.5 (0%)	5.0

4.2.- Evaluación de la variación espacio-temporal de los indicadores de la calidad del agua.

En esta sección se analiza el comportamiento espacial y temporal de los 6 parámetros fisicoquímicos y los 6 indicadores de calidad del agua, medidos en cada sistema acuático durante 2018; y se compara su evolución en el período 2017-2018.

4.2.1.- Bahía de Chetumal

4.2.1.1.- Fisicoquímicos 2018:

Es importante indicar que durante el monitoreo de noviembre (época de nortes), no fue posible registrar los parámetros fisicoquímicos para los sitios 7 al 13 en la Bahía de Chetumal, debido a que la sonda multiparamétrica presentó una falla que modificó la calibración de los sensores.

Temperatura.-

En el análisis espacial se observa que los sitios 1 y 10 al 18, presentaron el valor promedio anual más alto (>30°C), con respecto a los demás sitios (Fig. 2a). Estas diferencias espaciales podrían deberse en general a que estos sitios se localizan

cerca de la costa occidental de la bahía, en dónde la profundidad es baja y la influencia de las descargas de aguas pluviales con mayor temperatura al circular por el pavimento de la ciudad, es mayor.

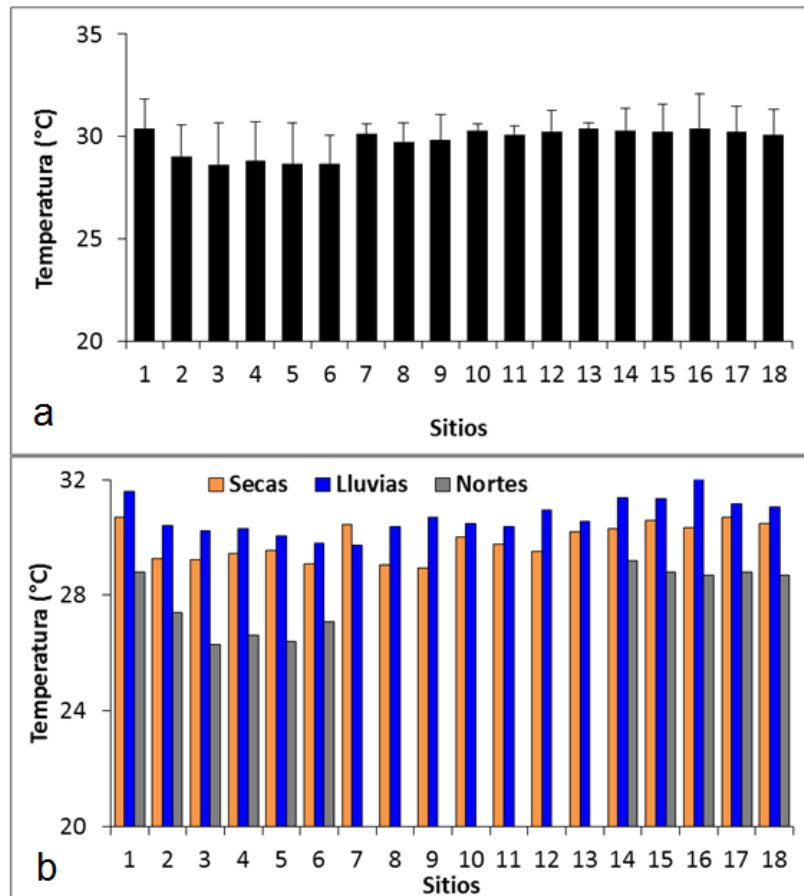


Fig.2.- Valores de temperatura anual promedio (a) y por época climática en la columna de agua (b) de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018.

El mes de agosto (lluvias) fue el que registró la temperatura promedio más alta en la columna de agua ($30.71\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.64$), seguido de las época de secas (abril) y nortes (noviembre) con $29.87\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.62$ y $29.58\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.80$, respectivamente (Fig. 2b).

pH.-

Los valores promedio anual más altos de pH se registraron en los sitios 2, 3 y 4 con 8.29 ± 0.59 , 8.34 ± 0.50 y 8.34 ± 0.48 , respectivamente; y los valores más bajos se obtuvieron en los sitios 6 y 7, con 7.66 ± 1.22 y 7.77 ± 0.33 . Sin embargo,

estas diferencias no son estadísticamente significativas, debido a la alta variabilidad entre épocas climáticas (Fig. 3a).

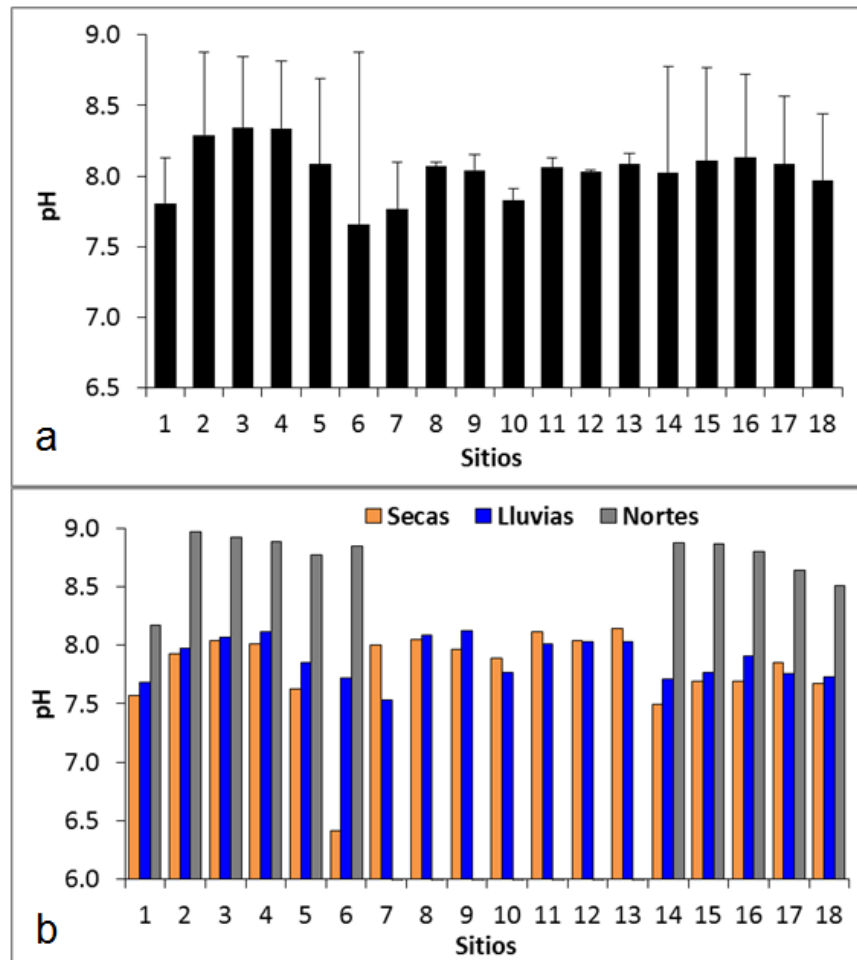


Fig.3.- Valores de pH anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018.

Durante el mes de noviembre (nortes) se registró el valor promedio más alto de pH de 8.75 ± 0.23 , y en los meses de abril (secas) y agosto (lluvias) los valores promedio fueron de 7.79 ± 0.40 y 7.88 ± 0.18 , respectivamente (Fig. 3b). Estas diferencias no son significativas, y los valores son considerados normales para cuerpos de agua salobres como la Bahía de Chetumal.

Oxígeno Disuelto.-

En todo el sistema se registraron valores promedio anuales de oxígeno disuelto superiores al límite mínimo establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática que es de 5 mg/l (Fig. 4 a y b).

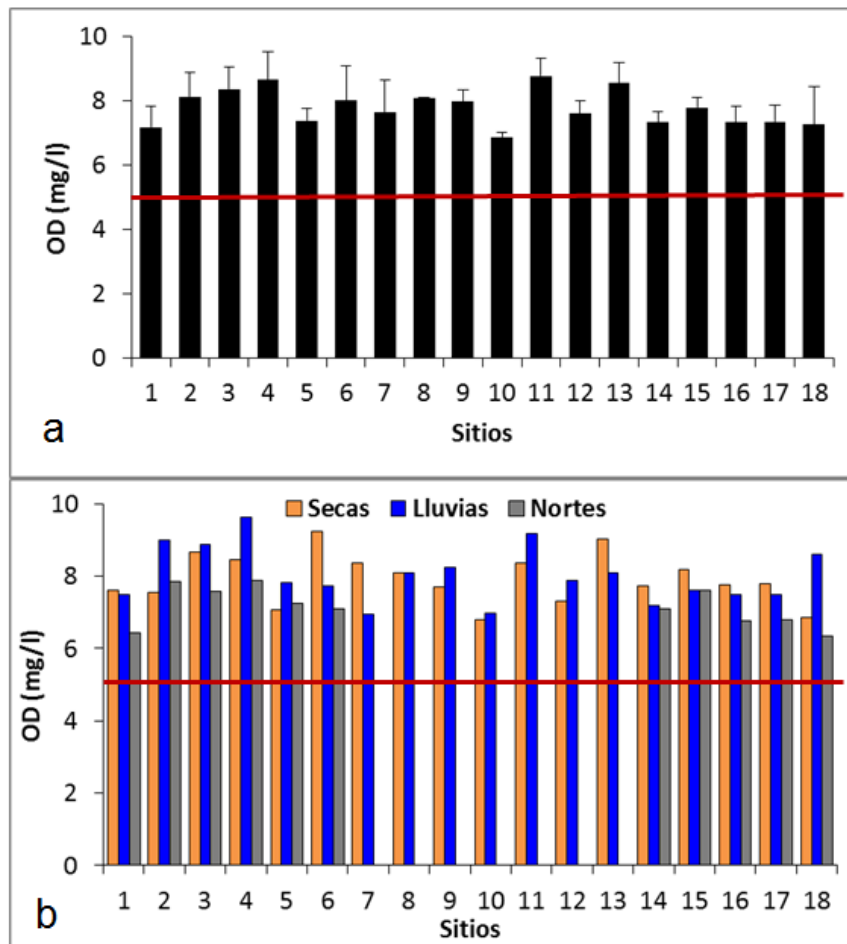


Fig.4.- Valores de oxígeno disuelto (OD) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática.

Durante la temporada de lluvias (agosto) se registró el valor promedio más alto de OD (8.02 mg/l \pm 0.77), seguido de los meses de abril (secas) y noviembre (nortes) con una concentración promedio de 7.92 mg/l \pm 0.69 y 7.16 mg/l \pm 0.54, respectivamente (Fig. 4b). No hay diferencias significativas entre temporadas y las

concentraciones de oxígeno disuelto indican condiciones saludables en éste parámetro, de acuerdo a los CECAs.

Turbidez. -

Debido a fallas en el sensor de turbidez, durante el mes de noviembre (nortes) no se registraron valores de este parámetro en todo el sistema. Este parámetro presentó la mayor variabilidad espacial y temporal en la Bahía de Chetumal, debido a la resuspensión de sedimentos en la columna de agua por la acción de oleaje, corrientes, vientos y escurrimientos de la línea de costa. Así, el valor promedio anual fue mayor en los sitios 17 ($85.4 \text{ NTU} \pm 44.8$) y 16 ($81.5 \text{ NTU} \pm 67.2$), que se localizan frente al balneario Dos Mulas y Punta Estrella, que tienen influencia de las descargas pluviales y escurrimientos de la ciudad de Chetumal (Fig. 5a).

En el comportamiento temporal se observa que la mayor turbidez se registró durante la época de lluvias (agosto) con un valor promedio de $21.7 \text{ NTU} \pm 39.9$, seguido de la época de nortes (noviembre) ($13.8 \text{ NTU} \pm 39.9$), en tanto que la menor turbidez se observó durante la época de secas (abril) con $13.6 \text{ NTU} \pm 15.7$ (Fig. 5b). Debido a que los valores de turbidez más altos se registran siempre en los sitios localizados en la costa occidental de la Bahía de Chetumal, se identifican como los principales factores que provocan el aumento de sólidos suspendidos en la columna de agua a las descargas pluviales y los escurrimientos provenientes de la zona agrícola de río Hondo y de los asentamientos humanos de Chetumal y Calderitas.

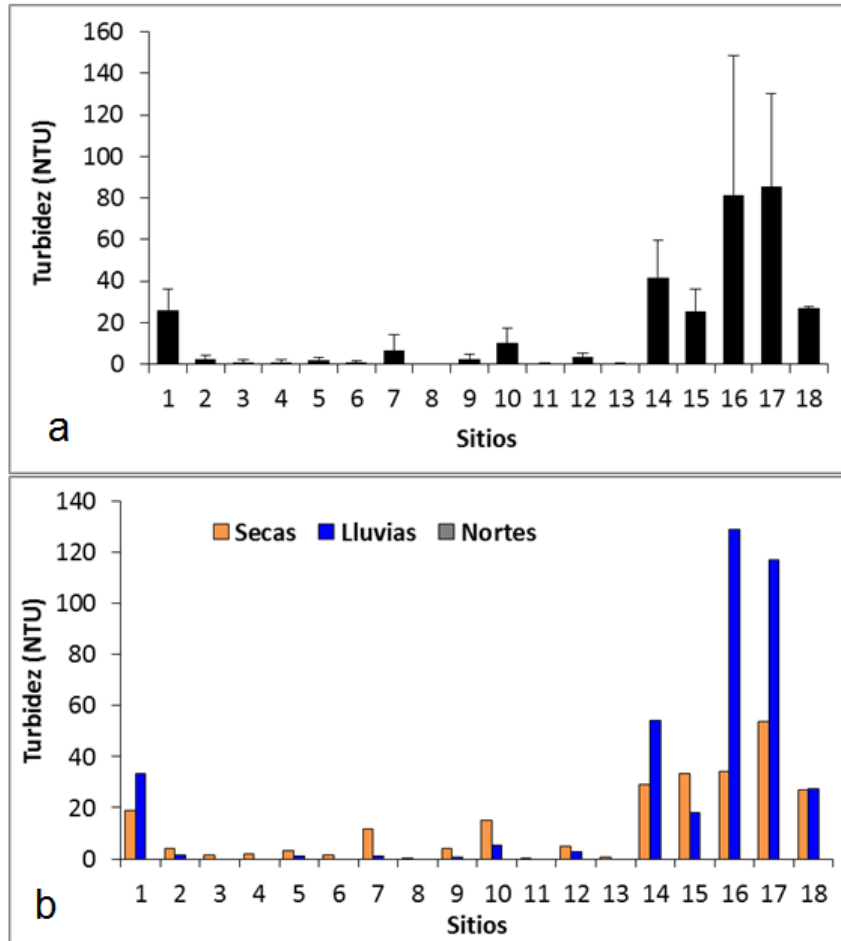


Fig.5.- Valores de turbidez anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018.

Salinidad.-

El comportamiento espacial de la salinidad es el que se espera para un cuerpo de agua con influencia de agua dulce y salada. Así, los valores de salinidad más altos se registraron en los sitios 2 al 13 que tienen una fuerte influencia de la entrada de agua marina por el Canal de Zaragoza en su costa oriental, así como del canal de comunicación con el Mar Caribe al sur del sistema, que van de 12.8 ‰ ± 0.7 (sitio 10) a 17.7 ‰ ± 2.3 en el sitio 6. Los valores más bajos se registraron en el sitio 1 frente a río Hondo (2.6 ‰ ± 1.3) y de 6.5 ‰ ± 6.7 en el sitio 14, que se localiza frente al canal pluvial del Parque Renacimiento (Fig. 6a).

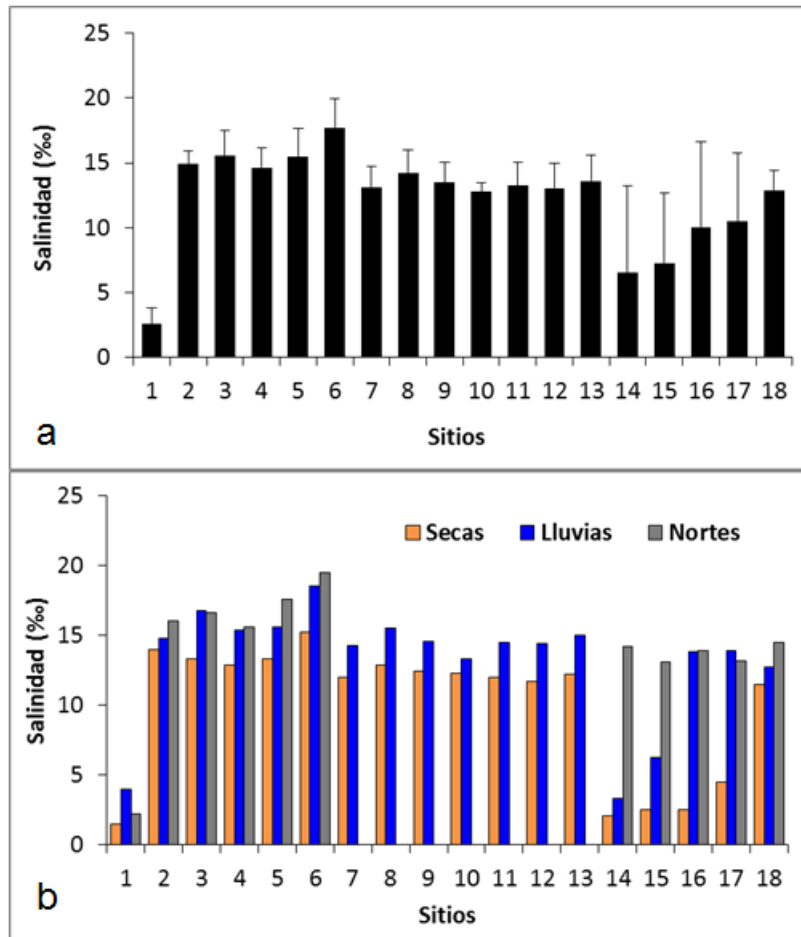


Fig.6.- Valores de salinidad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018.

La salinidad promedio en el sistema fue mayor en la temporada de nortes ($14.2\% \pm 4.4$), principalmente debido a los sitios 2 al 6 que se localizan en la región sur con fuerte influencia marina, que disminuyó hacia las época de lluvias ($13.2\% \pm 4.2$) y secas ($9.9\% \pm 4.8$) por el aporte de agua dulce del río Hondo (sitio 1) y los sitios cercanos a la costa con descargas pluviales (sitios 14 y 15) (Fig. 6b).

Conductividad.-

Este parámetro presenta el mismo comportamiento espacial que la salinidad, debido a que la conductividad es sensible a las variaciones en sólidos disueltos, principalmente sales minerales (Chapman, 1996). Así, los sitios 1 y 14 registran los valores promedio más bajos ($4.8 \text{ mS/cm} \pm 2.2$ y $11.1 \text{ mS/cm} \pm 10.5$, respectivamente), y los más altos en los sitios 2 al 6, con valores de $24.5 \text{ mS/cm} \pm 1.4$ a $28.6 \text{ mS/cm} \pm 3.3$ (Fig. 7a).

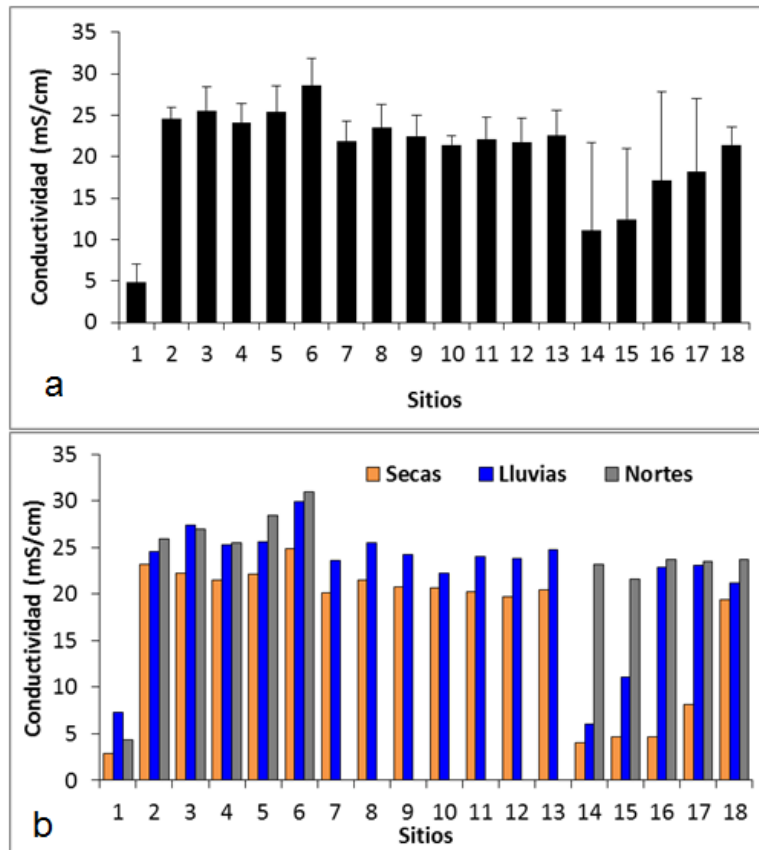


Fig.7.- Valores de conductividad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018.

El comportamiento temporal también fue similar al de la salinidad, en dónde la época de nortes (noviembre) registró el valor promedio más alto ($23.4 \text{ mS/cm} \pm 6.87$) debido a los sitios 2 al 6, observándose una disminución de la conductividad en las épocas de lluvias (agosto) y secas (abril), con valores de $21.8 \text{ mS/cm} \pm 6.63$ y $16.7 \text{ mS/cm} \pm 7.73$, respectivamente, principalmente debido al aporte de agua dulce de los sitios 1, 14 y 15 (Fig. 7b).

4.2.1.2.- Fisicoquímicos 2017-2018:

En esta sección se analiza el comportamiento temporal de los indicadores fisicoquímicos, comparando los monitoreos realizados durante 2017 y 2018.

Temperatura.-

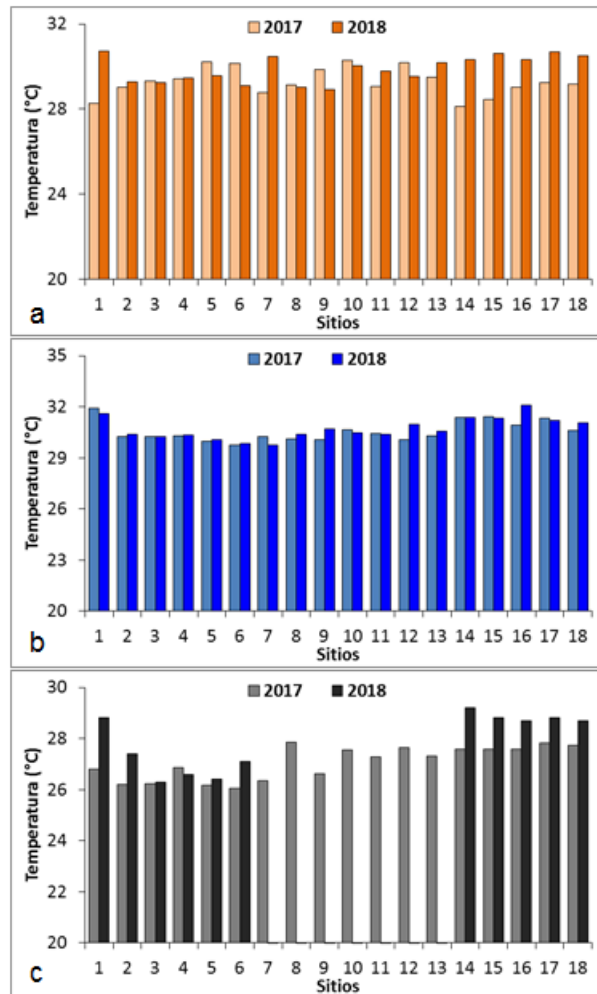


Fig.8.- Comparación de la temperatura en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

Aunque en 2018 la temperatura fue ligeramente más alta, principalmente en abril y noviembre, la temperatura promedio en las tres épocas climáticas fue similar en los dos años (Fig. 8 a, b y c). Así, en abril (secas) los valores fueron de $29.29^{\circ}\text{C} \pm 0.65$ y $29.87^{\circ}\text{C} \pm 0.62$, en agosto (lluvias) de $30.55^{\circ}\text{C} \pm 0.60$ y $30.71^{\circ}\text{C} \pm 0.64$ y en noviembre (nortes) de $27.07^{\circ}\text{C} \pm 0.65$ y $27.89^{\circ}\text{C} \pm 1.13$, respectivamente.

pH.-

Este indicador presentó valores más altos en 2017 que en 2018, en abril ($7.83^{\circ} \pm 0.64$ y 7.79 ± 0.40), valores similares en agosto de los dos años (7.86 ± 0.19 y 7.88 ± 0.18), y valores más altos en noviembre de 2018 que en 2017 (8.50 ± 0.20 y 8.75 ± 0.23); sin embargo, estas diferencias no fueron significativas (Fig. 9 a, b y c).

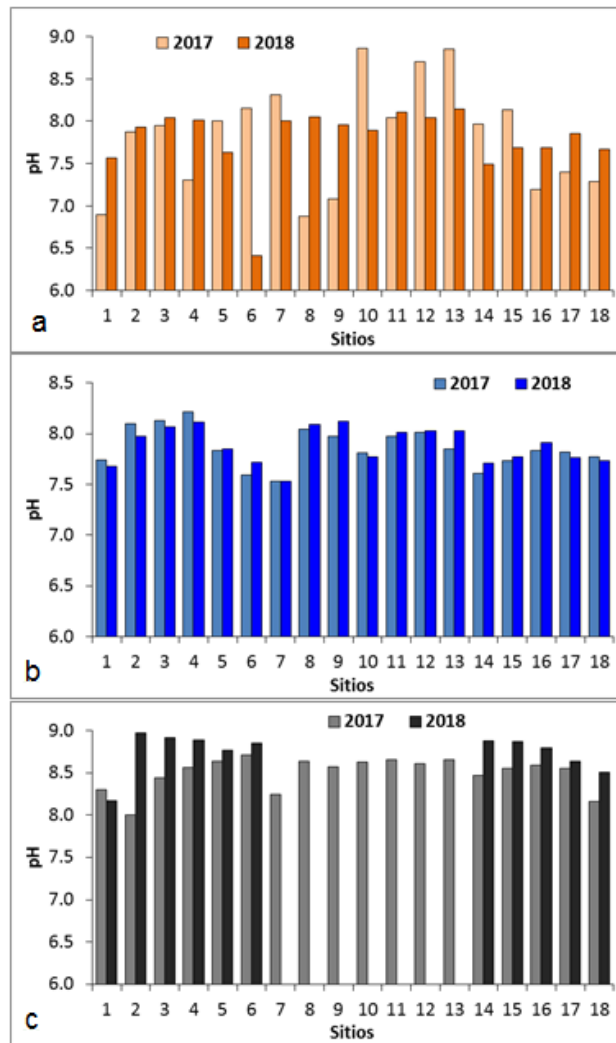


Fig.9.- Comparación de pH en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

Oxígeno Disuelto.-

En general el oxígeno disuelto fue más alto en abril (secas) y noviembre (nortes) de 2017 que en 2018, con valores promedio de 7.99 mg/l \pm 0.61 y 7.92 mg/l \pm 0.69, y 9.08 mg/l \pm 1.41 y 7.16 mg/l \pm 0.54, respectivamente; mientras que en agosto (lluvias) los niveles fueron mayores en 2018 que en 2017 (8.02 mg/l \pm 0.77 y 7.45 mg/l \pm 1.26, respectivamente) (Fig.10 a, b y c).

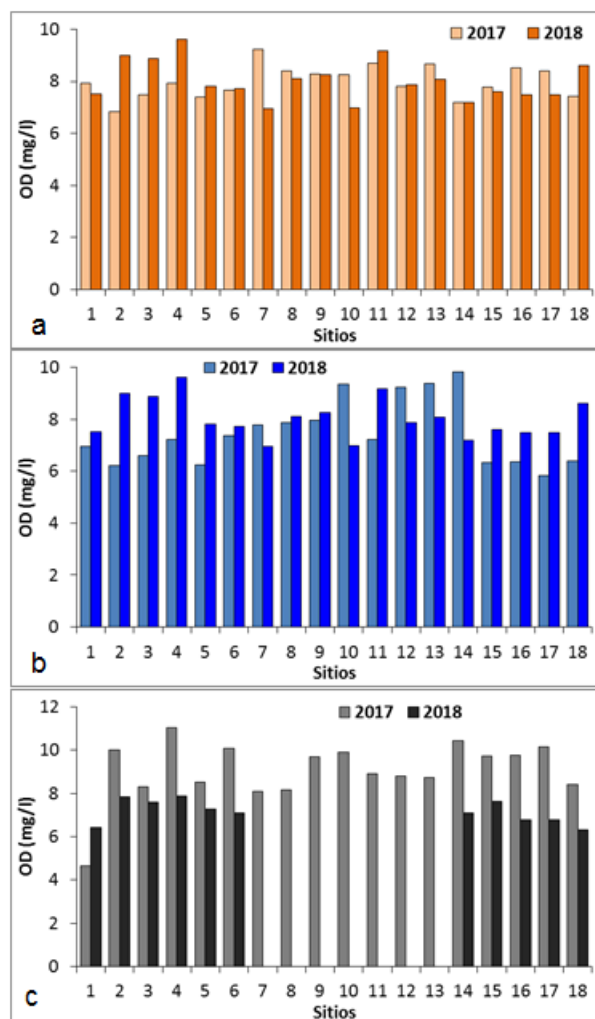


Fig.10.- Comparación de oxígeno disuelto en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

Turbidez.-

Este indicador presentó valores superiores en abril (secas) de 2017 (31.3 NTU \pm 39.9), que en 2018 (13.6 NTU \pm 15.7); mientras que en agosto (lluvias) fue más alta en 2018 (21.7 NTU \pm 39.9) que en 2017 (13.8 NTU \pm 24.1) (Fig. 11 a y b). En noviembre de 2018 no se registró la turbidez por fallas en este sensor durante el monitoreo. Debido a las grandes variaciones espaciales y temporales, no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas.

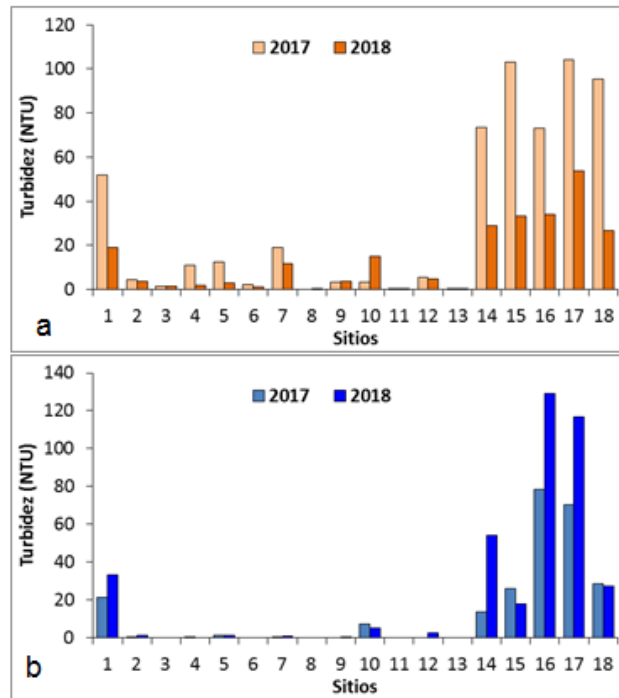


Fig.11.- Comparación de turbidez en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril) y (b) lluvias (agosto).

Salinidad.-

En abril (secas) la salinidad fue mayor en 2017 (13.0 ‰ \pm 4.5) que en 2018 (9.9 ‰ \pm 4.8), en tanto que para agosto (lluvias) y noviembre (norte) los valores fueron más altos en 2018 (13.2 ‰ \pm 0.4 y 14.2 ‰ \pm 4.4, respectivamente), que en 2017

(12.2 % ± 4.6 y 11.2 % ± 3.1, respectivamente), sin que estas diferencias fueran significativas. En las tres temporadas durante los dos años del estudio, los valores más bajos se registraron en el sitio 1 frente a río Hondo y en el sitio 14, que se localiza frente al canal pluvial del Parque Renacimiento (Fig. 12 a, b y c).

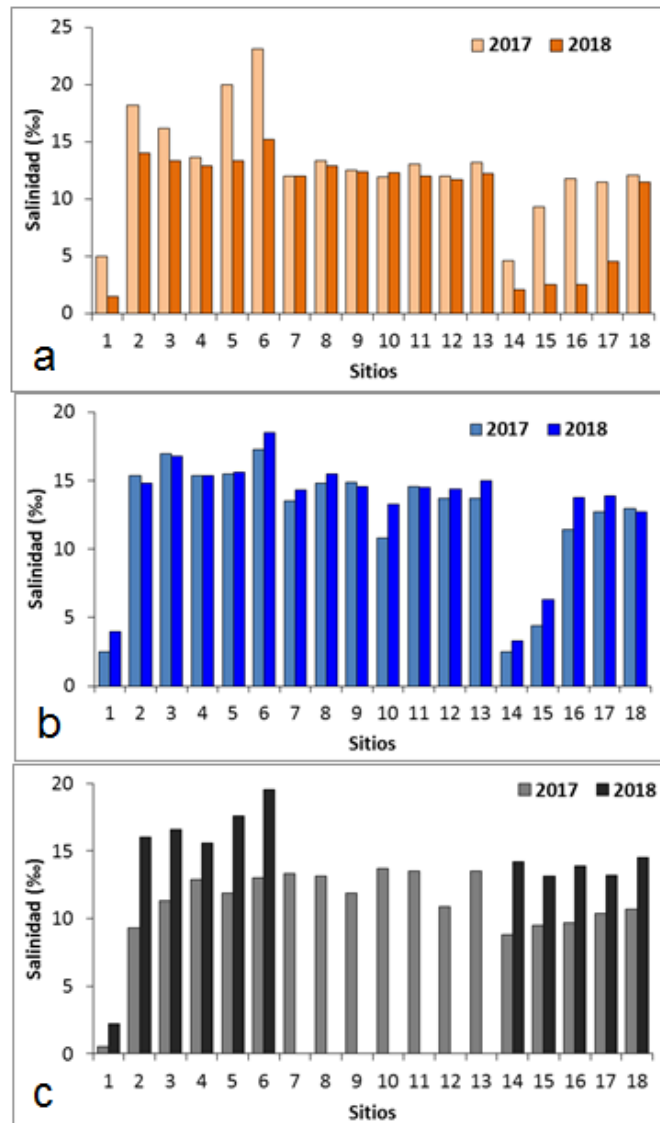


Fig.12.- Comparación de la salinidad en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

Conductividad.-

La conductividad tuvo el mismo comportamiento temporal que la salinidad. Así, en abril (secas) fue mayor en 2017 (21.5 mS/cm \pm 6.9) que en 2018 (16.7 mS/cm \pm 7.7), en tanto que para agosto (lluvias) y noviembre (norte) los valores fueron más altos en 2018 (21.8 mS/cm \pm 6.6 y 23.4 mS/cm \pm 6.9, respectivamente), que en 2017 (20.6 mS/cm \pm 7.3 y 18.5 mS/cm \pm 5.0, respectivamente), sin que estas diferencias fueran significativas (Fig. 12 a, b y c).

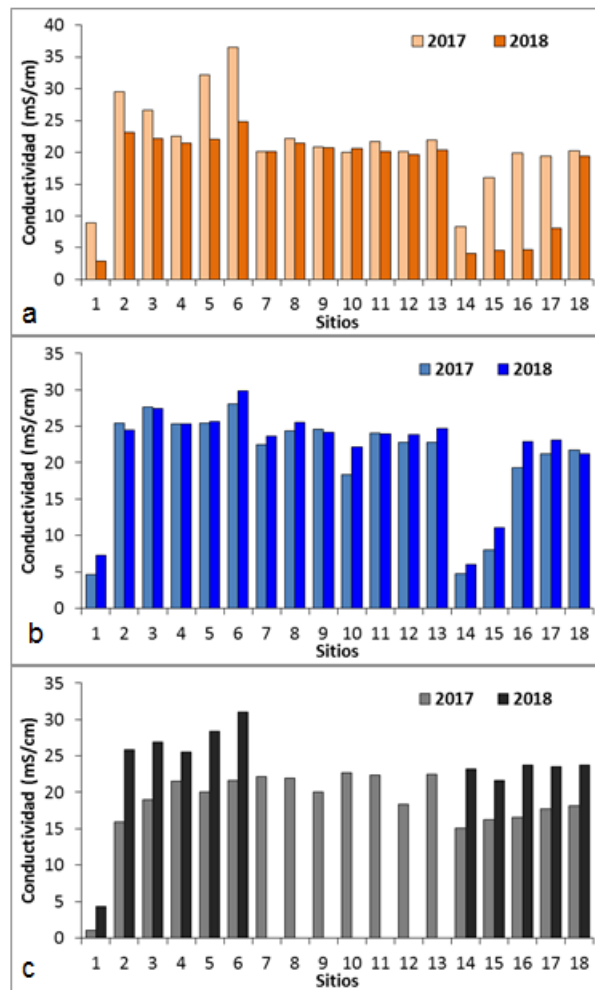


Fig.13.- Comparación de la conductividad en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

4.2.1.3.-Nutrientes 2018:

Nitritos.-

En la costa occidental de la Bahía de Chetumal se registraron las concentraciones promedio anual de nitritos más altas en los sitios 10 al 18, 1 y 2 (Fig. 14 a), en donde los valores superan el LMP de 0.002 mg/l establecido por los CECAs para la protección de vida acuática de agua salobre (Fig. 14 a). Los sitios 13, 15 y 18 presentaron la mayor concentración (0.008 mg/l), y los sitios 4, 5 y 6 las más bajas (0.0002 mg/l, 0.0004 mg/l y 0.0006 mg/l, respectivamente).

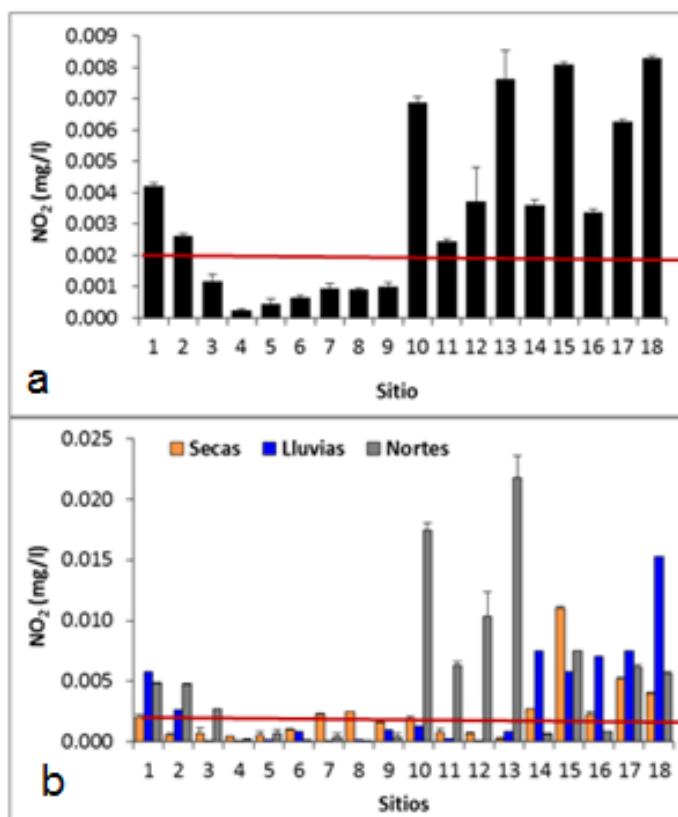


Fig.14.- Valores de nitritos (NO₂) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

En relación a la variación temporal, en la época de nortes (noviembre) se registró la concentración promedio más alta (0.005 mg/l ± 0.006), seguido de la temporada

de lluvias (agosto) con $0.003 \text{ mg/l} \pm 0.004$), y el nivel más bajo ($0.002 \text{ mg/l} \pm 0.003$) en secas (abril) (Fig. 14 b).

Nitratos.

Los sitios 1, 14, 15 y 17 presentaron la concentración promedio anual más alta con valores de $0.18 \text{ mg/l} \pm 0.02$, $0.16 \text{ mg/l} \pm 0.04$, $0.09 \text{ mg/l} \pm 0.06$ y $0.08 \text{ mg/l} \pm 0.05$, respectivamente (Fig. 15 a), que sobrepasan el LMP de los CECAs para la protección de la vida acuática de 0.04 mg/l (línea roja). El sitio 1 se localiza frente a la desembocadura del río Hondo y los otros tres frente a la ciudad de Chetumal (Fig.1). En el resto de los sitios alejados de la costa occidental, presentan bajas concentraciones.

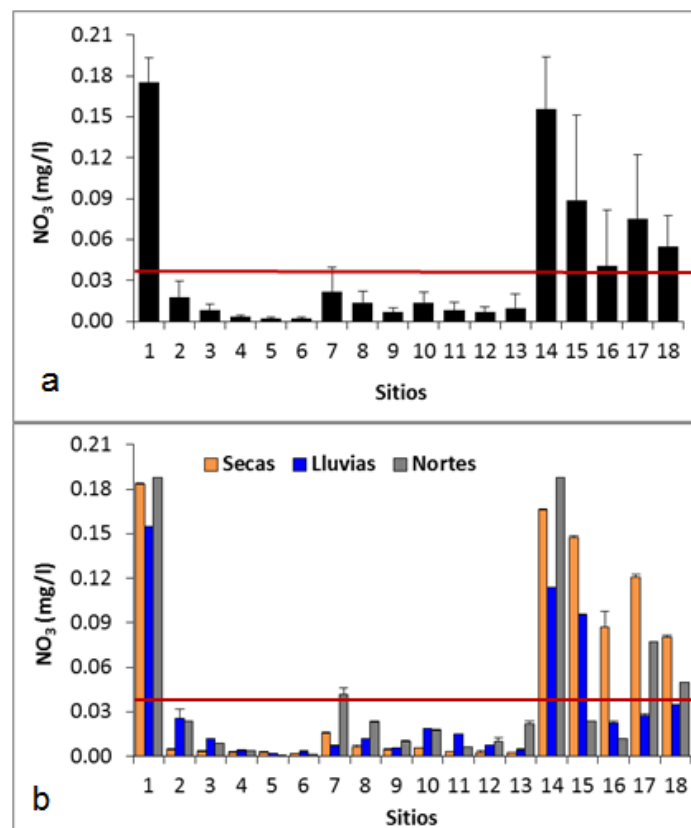


Fig.15.- Valores de nitratos (NO₃) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

La concentración promedio fue similar en las temporadas de lluvias y nortes con valores de $0.03 \text{ mg/l} \pm 0.04$ y $0.04 \text{ mg/l} \pm 0.06$, respectivamente; y el valor más bajo se registró en la época de secas ($0.05 \text{ mg/l} \pm 0.07$). Los sitios 1 y 14 al 18, superaron el LMP de 0.04 mg/l de los CECAs en al menos una época climática, destacando los sitios 1 (frente a río Hondo) y 14 (frente al parque Renacimiento), por mantener concentraciones superiores al LMP en las tres épocas climáticas (línea roja, Fig. 15 b).

Amonio.-

Las concentraciones promedio anuales de amonio en todo el sistema fueron superiores al LMP de 0.01 mg/l , establecidos por los CECAs para la protección de la vida acuática salobre (línea roja, Fig. 16 a). Los sitios 1 (frente a río Hondo), 15 (frente a Muelle Fiscal) y 18 (frente al poblado de Calderitas), presentaron los valores más altos ($0.05 \text{ mg/l} \pm 0.01$, $0.05 \text{ mg/l} \pm 0.03$ y $0.06 \text{ mg/l} \pm 0.05$, respectivamente).

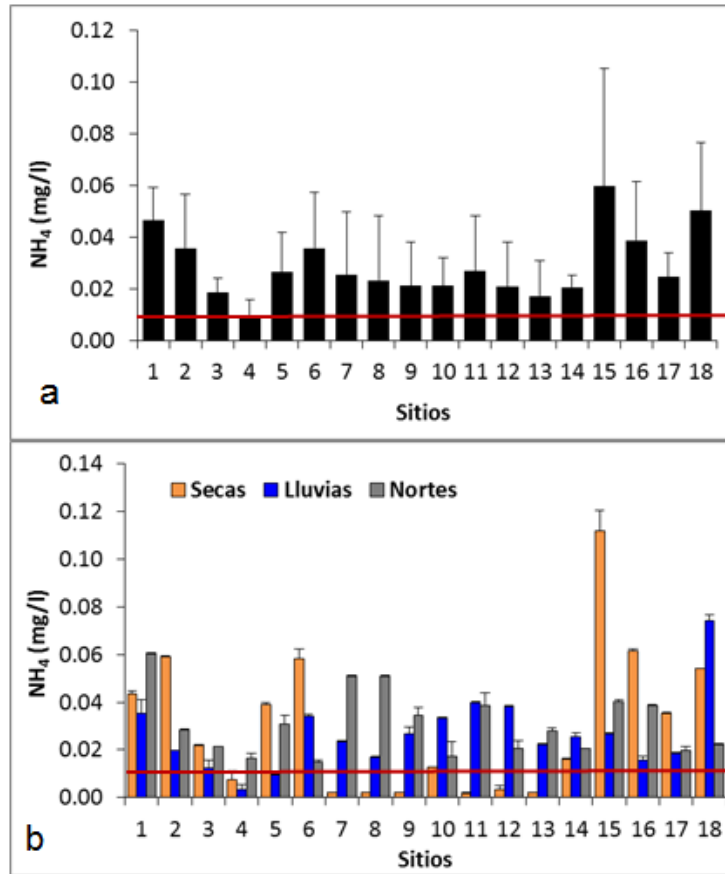


Fig.16.- Valores de amonio (NH₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

Las tres épocas climáticas presentaron concentraciones promedio similares de 0.03 mg/l, con niveles de amonio superiores al LMP (0.01 mg/l) para la protección de la vida acuática en todos sitios, en al menos uno de los meses (línea roja, Fig. 16 b). Los sitios que registraron valores mayores al LMP en las tres épocas climáticas se explican por el lugar dónde se localizan, así los sitios 14 al 18 se encuentran frente a la ciudad de Chetumal y poblado de Calderitas, en dónde las fuentes de contaminación están representadas por los escurrimientos superficiales, las descargas pluviales y de agua subterránea cerca de la línea de costa. El sitio 10 se localiza frente a los canales que comunican con la Laguna Guerrero, que pueden tener un alto contenido de materia orgánica en descomposición. Los sitios 2, 3 y 6, ubicados al centro y sur de la bahía, podrían presentar entradas de agua subterránea enriquecidas con amonio y sedimentos

con alto contenido de materia orgánica en descomposición. En tanto que el sitio 1 localizado frente al río Hondo recibe las descargas de las zonas agrícolas y de filtraciones de fosas sépticas de las poblaciones rurales (Fig. 1).

Fosfatos.-

Los fosfatos presentaron una gran variabilidad espacial y temporal en su concentración, en donde la concentración promedio anual de todos los sitios fue superior al LMP para la protección de la vida acuática de aguas salobres de 0.002 mg/l establecida por los CECAs (línea roja, Fig. 17 a). La concentración más alta (0.008 mg/l ± 0.008) se registró en el sitio 4, seguido de los sitios 13 (0.007 mg/l ± 0.002) y 15 (0.006 mg/l ± 0.002). El sitio 15 se localiza frente al Muelle Fiscal y los sitios 4 y 13 se ubican en la costa oriental de la bahía, lejos de asentamientos humanos (Fig. 1).

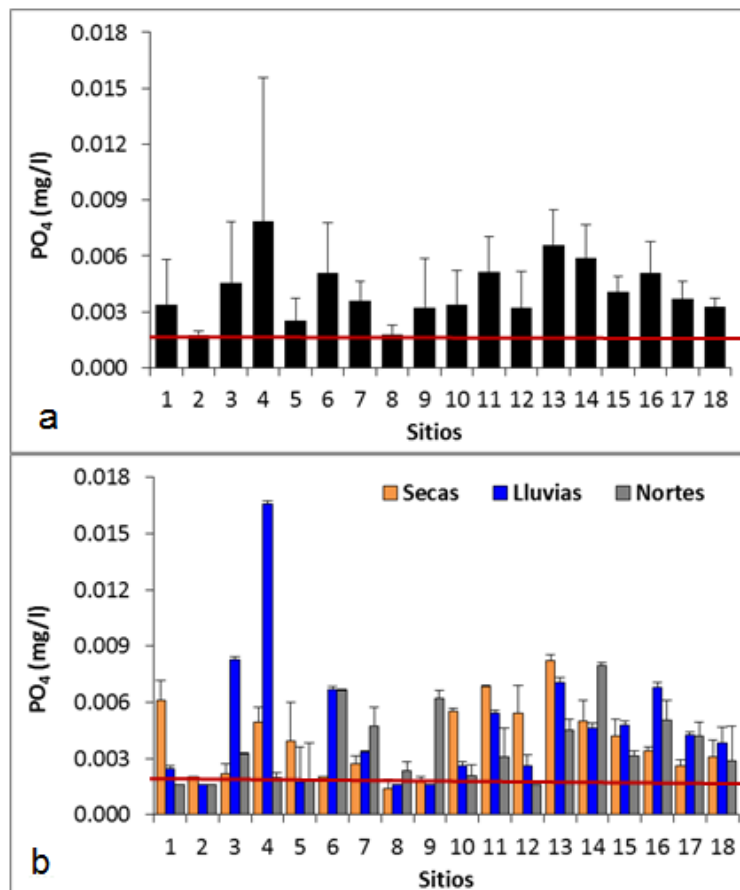


Fig.17.- Valores de fosfatos (PO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

La temporada de lluvias (agosto) se caracterizó por presentar la mayor concentración promedio ($0.005 \text{ mg/l} \pm 0.004$), con el sitio 4 registrando el valor más alto de todo el año ($0.017 \text{ mg/l} \pm 0.0002$). Las épocas de secas (abril) y nortes (noviembre) presentaron la misma concentración promedio ($0.004 \text{ mg/l} \pm 0.002$), en dónde los sitios 13 y 14 tuvieron el valor más alto de 0.008 mg/l , respectivamente. Como ocurrió con el amonio, en todo el sistema los valores fueron superiores al LMP para la protección de la vida acuática de 0.002 mg/l LMP de los CECAs (línea roja, Fig. 17b).

Las altas concentraciones de este indicador durante la temporada de lluvias podrían deberse a la descarga de agua del río Hondo rica en nutrientes por el uso de fertilizantes en las zonas agrícolas de las riberas de México y Belice durante esta temporada, así como la entrada de agua subterránea.

Silicatos. -

La concentración promedio anual más alta de silicatos se registró en los sitios 1 ($9.64 \text{ mg/l} \pm 3.70$), 14 ($8.92 \text{ mg/l} \pm 5.02$), 15 ($8.46 \text{ mg/l} \pm 4.50$) y 16 ($7.30 \text{ mg/l} \pm 3.81$) (Fig. 18 a). Debido a que el agua subterránea es rica en silicatos, se ha utilizado como un indicador de la entrada de agua subterránea a cuerpos de agua superficiales, como los que componen la Reserva Estatal del Santuario del Manatí. Por lo que el origen de las altas concentraciones de silicatos en estos sitios, se debe a la descarga de agua del río Hondo y las entradas de agua subterránea cercanas a la costa occidental de la bahía de Chetumal.

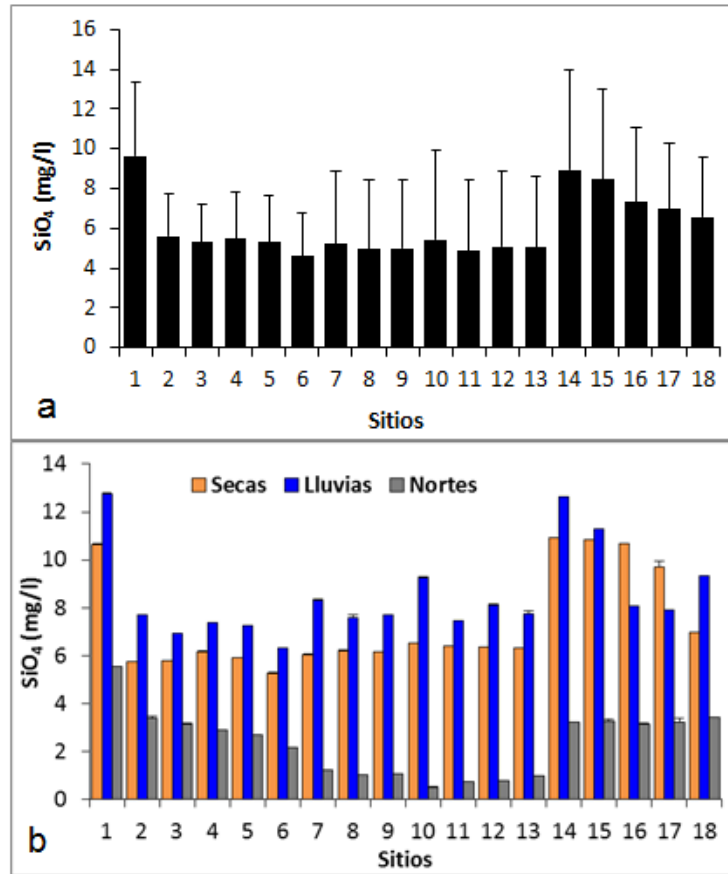


Fig.18.- Valores de silicatos (SiO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018.

La época de lluvias (agosto) registró la concentración promedio mayor (8.54 mg/l ± 1.86), seguida de la temporada de secas (abril) con 7.37 mg/l ± 2.07, y la más baja se presentó en noviembre (nortes) con 2.37 mg/l ± 1.36. En los meses de abril y agosto, los sitios con la concentración más alta fueron nuevamente 1 y 14 al 18, cuyo origen es el mencionado en el párrafo anterior. Durante noviembre disminuye la concentración de silicatos debido al aumento de la entrada de agua dulce de las lluvias, que provoca un efecto de dilución de los silicatos provenientes de la entrada de agua subterránea (Fig. 18 b).

Clorofila a.-

La clorofila a presentó gran variabilidad espacial y temporal. La concentración más alta de este indicador de productividad primaria, se registró principalmente en los sitios 10 (2.7 µg/l ± 2.9), 16 (3.1 µg/l ± 2.8) y 17 (2.7 µg/l ± 2.5) (Fig. 19 a). Los

sitios 16 y 17 se localizan frente a los balnearios Punta Estrella y Dos Mulas en la ciudad de Chetumal, y el sitio 10 frente a la desembocadura del canal de comunicación de Laguna Guerrero con la bahía (Fig. 1). La alta productividad primaria en estos sitios se relaciona en general con altos valores de las tres formas inorgánicas de nitrógeno.

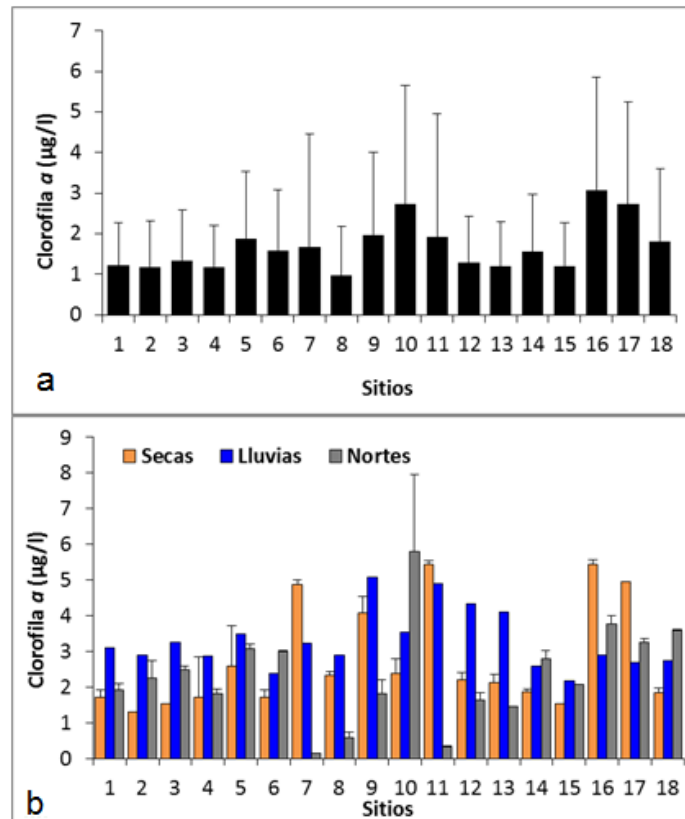


Fig.19.- Valores de clorofila a anual promedio y por época climática en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2018.

Para este parámetro la concentración promedio más alta se presentó en la época de lluvias (agosto) con un valor de $3.3 \mu\text{g/l} \pm 0.8$, seguida de la época de secas (abril) con $2.8 \mu\text{g/l} \pm 1.5$ y de nortes (noviembre) con $2.3 \mu\text{g/l} \pm 1.4$ (Fig. 19 b). Estos resultados indican que el origen de las altas concentraciones de clorofila a durante la temporada de lluvias podrían ser los escurrimientos superficiales por la precipitación pluvial, en la época de secas la fuente principal de nutrientes a la Bahía de Chetumal se relaciona con la descarga de agua subterránea combinada con filtraciones de aguas residuales de fosas sépticas; mientras que en la época

de nortes la resuspensión de sedimentos con alto contenido de nutrientes, podría ser la causa.

4.2.1.4.- Nutrientes 2017-2018.-

En esta sección se compara el comportamiento de los nutrientes por época climática, durante los dos años que comprendieron el monitoreo de la calidad del agua.

Nitritos.-

En el mes de abril (secas), los nitritos registraron la misma concentración promedio en 2017 y 2018, de $0.002 \text{ mg/l} \pm 0.006$ y $0.002 \text{ mg/l} \pm 0.003$, respectivamente; destacando las grandes variaciones espaciales en 2017, con valores extremos de 0.0001 mg/l en la mayoría del sistema a 0.027 mg/l en el sitio 15 localizado frente al Muelle Fiscal. Sin embargo, en 2018 un mayor número de sitios (8 y 14 a 18) presentaron concentraciones que sobrepasaron el LMP de 0.002 mg/l para la protección de la vida acuática de agua salobre establecido en los CECAs (Fig.20 a).

Para agosto (lluvias), la concentración promedio mayor se registró en 2017 ($0.004 \text{ mg/l} \pm 0.004$), debido principalmente a los sitios 15 ($0.016 \text{ mg/l} \pm 0.001$) y 16 ($0.010 \text{ mg/l} \pm 0.0001$). En 2018 el valor promedio fue de $0.003 \text{ mg/l} \pm 0.004$, en donde el sitio 18 localizado frente al poblado de Calderitas, presentó la concentración más alta ($0.015 \text{ mg/l} \pm 0.0002$). En los dos años, los sitios 1 y 14 a 18 tuvieron valores superiores al LMP de los CECAs (Fig. 20 b).

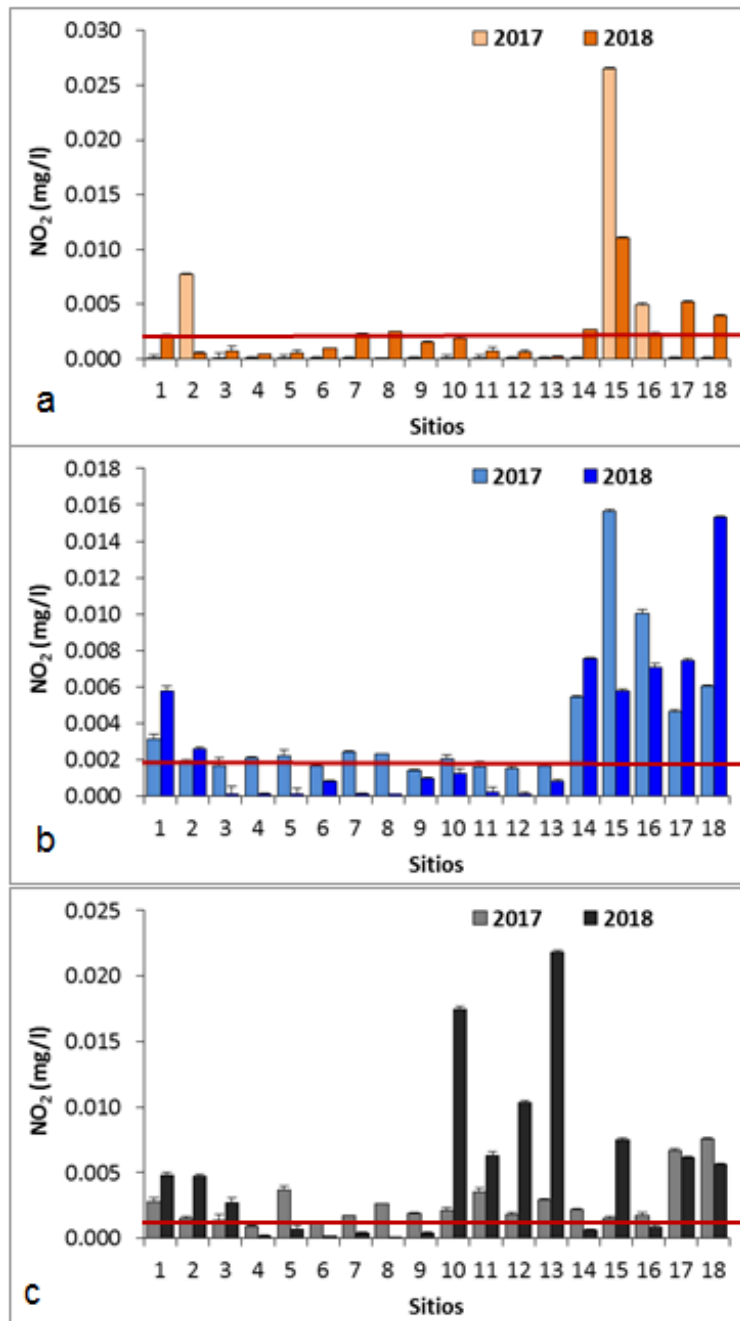


Fig.20.- Comparación de la concentración de nitritos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

En noviembre (nortes) de 2018, se registró la concentración promedio más alta de los dos años de monitoreo ($0.005 \text{ mg/l} \pm 0.006$), debido principalmente a los sitios

13 (0.022 mg/l \pm 0.002) y 10 (0.017 mg/l \pm 0.001), localizados al norte de la bahía. En 2017 el valor promedio fue de 0.003 mg/l \pm 0.002, en donde los sitios 17 (0.007 mg/l \pm 0.0001) y 18 (0.008 mg/l \pm 0.0001) registraron los niveles más altos. En esta temporada en la mayoría de los sitios durante los dos años de monitoreo, se sobrepasó el LMP de los CECAs (Fig. 20 c).

Nitratos. -

Durante el mes de abril (secas), la concentración promedio mayor (0.05 mg/l \pm 0.07), se obtuvo en 2018, debido principalmente a los sitios 1 (0.18 mg/l \pm 0.001), 14 (0.17 mg/l \pm 0.0001) y 15 (0.15 mg/l \pm 0.001). En 2017 el valor promedio fue de 0.04 mg/l \pm 0.06, en donde los niveles más altos se registraron nuevamente en los sitios 1 (0.17 mg/l \pm 0.001), 14 (0.19 mg/l \pm 0.0001) y 15 (0.13 mg/l \pm 0.001). En los dos años, los sitios 1 y 14 al 18, tuvieron concentraciones superiores al LMP de 0.04 mg/l establecidos por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua salobre (Fig. 21 a), localizados frente al río Hondo, la ciudad de Chetumal y el poblado de Calderitas (Fig. 1).

En agosto (lluvias), la concentración promedio fue mayor en 2017 (0.04 mg/l \pm 0.05) que en 2018 (0.03 mg/l \pm 0.04), en ambos años los sitios 1 (0.17 mg/l \pm 0.00 y 0.16 mg/l 0.01, respectivamente), 14 (0.13 mg/l \pm 0.00 y 0.17 mg/l 0.00, respectivamente) y 15 (0.12 mg/l \pm 0.00 y 0.10 mg/l 0.001, respectivamente) tuvieron los valores más altos. Estos mismos sitios sobrepasaron el LMP de los CECAs en los dos años (Fig. 21 b).

En noviembre (nortes) la concentración promedio fue mayor en 2018 (0.04 mg/l \pm 0.06) que en 2017 (0.01 mg/l \pm 0.02). En 2018, los sitios 1 y 14 registraron el valor más alto (0.19 mg/l \pm 0.00), mientras que en 2017 los sitios con los niveles mayores fueron el 18 (0.06 mg/l \pm 0.002) y 1 (0.04 mg/l \pm 0.00). Para esta temporada, solo el sitio 18 rebasó en ambos años el LMP de los CECAs (Fig. 21 c).

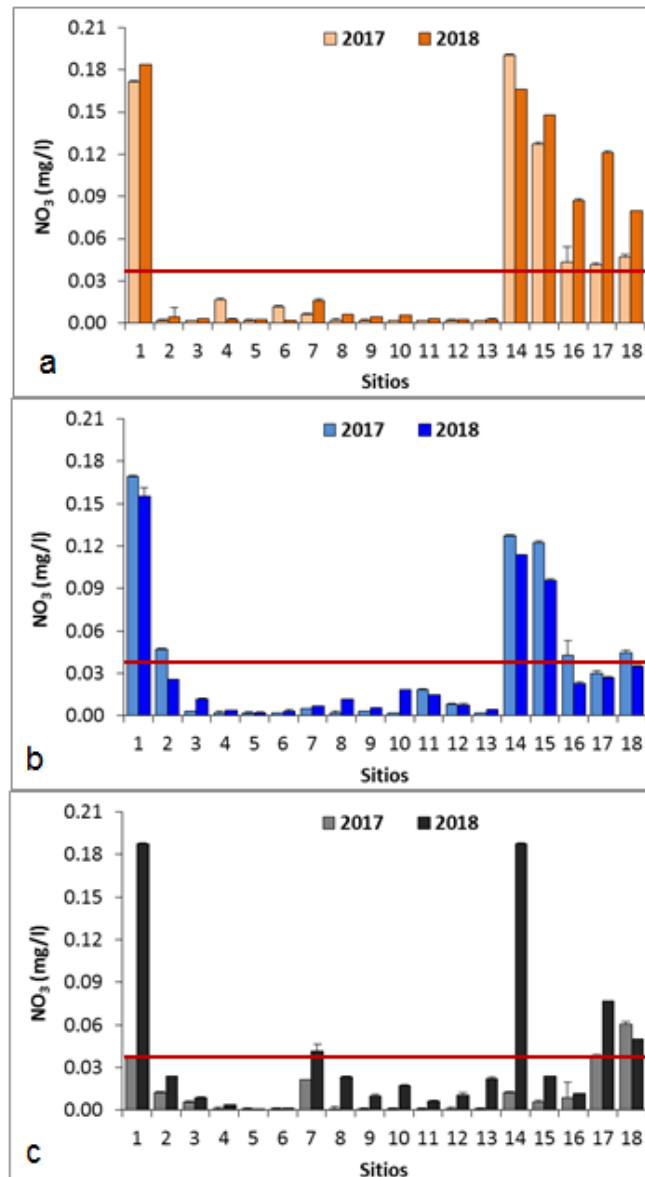


Fig.21.- Comparación de la concentración de nitratos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

Amonio.-

La concentración promedio para este indicador en abril (secas) fue mayor en 2017 (0.05 mg/l ± 0.03) que en 2018 (0.03 mg/l ± 0.03), en ambos años el sitio 15 presentó el valor más alto (0.12 mg/l ± 0.01 y 0.11 mg/l ± 0.01, respectivamente). En 2017 todos los sitios presentaron concentraciones arriba del LMP (0.01 mg/l) establecidos por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua

salobre, y para ambos años esto ocurrió en los sitios 1 a 3, 5, 6 y 14 al 18 (Fig. 22 a).

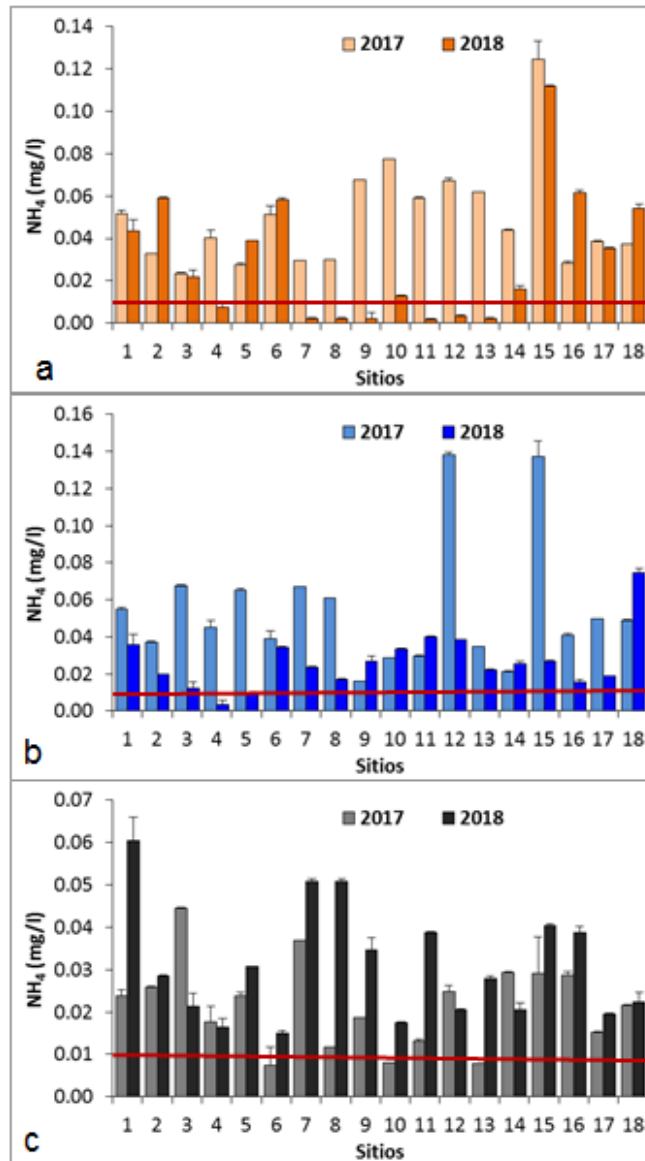


Fig.22.- Comparación de la concentración de amonio en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

En 2017 también se registró el valor promedio más alto ($0.06 \text{ mg/l} \pm 0.03$) en el mes de agosto (lluvias), comparado con 2018 ($0.03 \text{ mg/l} \pm 0.02$). Los sitios 12 y 15 ($0.14 \text{ mg/l} \pm 0.01$) presentaron la concentración más alta en 2017, y el sitio 18

(0.07 mg/l \pm 0.002) en 2018. En general en todo el sistema los niveles de amonio fueron superiores al LMP de los CECAs, en los dos años (Fig. 22 b).

Para noviembre (nortes) la concentración promedio fue mayor en 2018 (0.03 mg/l \pm 0.01) que en 2017 (0.02 mg/l \pm 0.01). En 2018 los sitios 1(0.06 mg/l \pm 0.001), 7 y 8 (0.05 mg/l \pm 0.00) registraron los valores más altos, en tanto que para 2017 los sitios 3 (0.05 mg/l \pm 0.001) y 7 (0.04 mg/l \pm 0.001) tuvieron los mayores niveles. Al igual que en agosto, en esta temporada en todo el sistema los niveles de amonio fueron superiores al LMP de los CECAs, en los dos años (Fig. 22 c).

Fosfatos.-

En el mes de abril (secas), los fosfatos presentaron mayor concentración promedio en 2017(0.005 mg/l \pm 0.003) que en 2018 (0.004 mg/l \pm 0.002). En 2017 el sitio 8 (0.012 mg/l \pm 0.0002) registró el mayor valor, mientras que en 2018 esto ocurrió en el sitio 14 (0.008 mg/l \pm 0.0004). Durante los dos años, en todo el sistema los niveles de fosfatos fueron superiores al LMP de 0.002 mg/l establecidos por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua salobre, en esta época climática (Fig. 23 a).

Para agosto (lluvias) el valor promedio fue mayor en 2018 (0.005 mg/l \pm 0.004) que en 2017 (0.003 mg/l \pm 0.002). En 2018, el sitio 5 (0.017 mg/l \pm 0.0002) registró la concentración más alta, mientras que en 2017 fue el sitio 4 (0.009 mg/l \pm 0.0002). En 2018, la mayoría de los sitios tuvieron niveles superiores al LMP de los CECAs (Fig. 23 b).

En noviembre (nortes), también en 2018 se registró la concentración promedio mayor (0.004 mg/l \pm 0.002), respecto a 2017 (0.001 mg/l \pm 0.0004); en dónde los sitios 14 al 18 presentaron los valores más elevados en 2018, destacando el sitio 15 (0.008 mg/l \pm 0.0002). Sólo durante 2018 se sobrepasó el LMP de los CECAs en la mayor parte del sistema (Fig. 23 c).

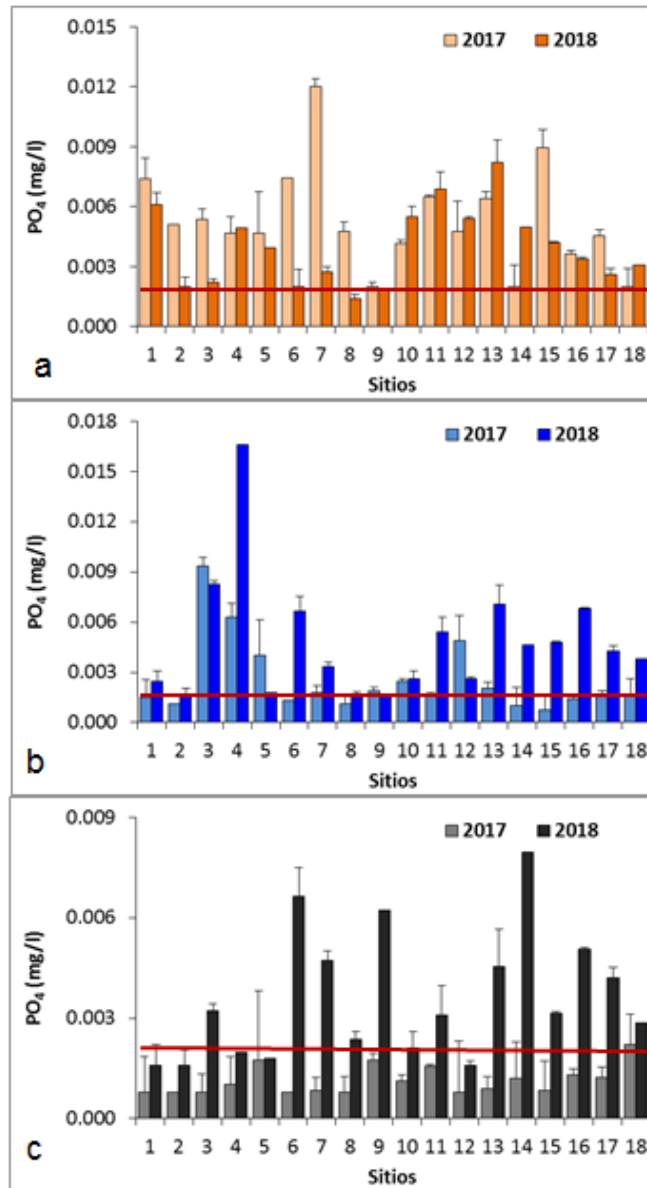


Fig.23.- Comparación de la concentración de fosfatos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

Silicatos.-

En abril (secas), la concentración promedio de silicatos fue ligeramente mayor en 2018 (7.4 mg/l ± 2.1) que en 2017 (7.1 mg/l ± 1.3); esto se debió a niveles mayores a 10 mg/l en los sitios 1 y 14 al 17 en 2018 (Fig. 24 a), localizados frente

al río Hondo y la ciudad de Chetumal, en dónde hay descarga de agua subterránea.

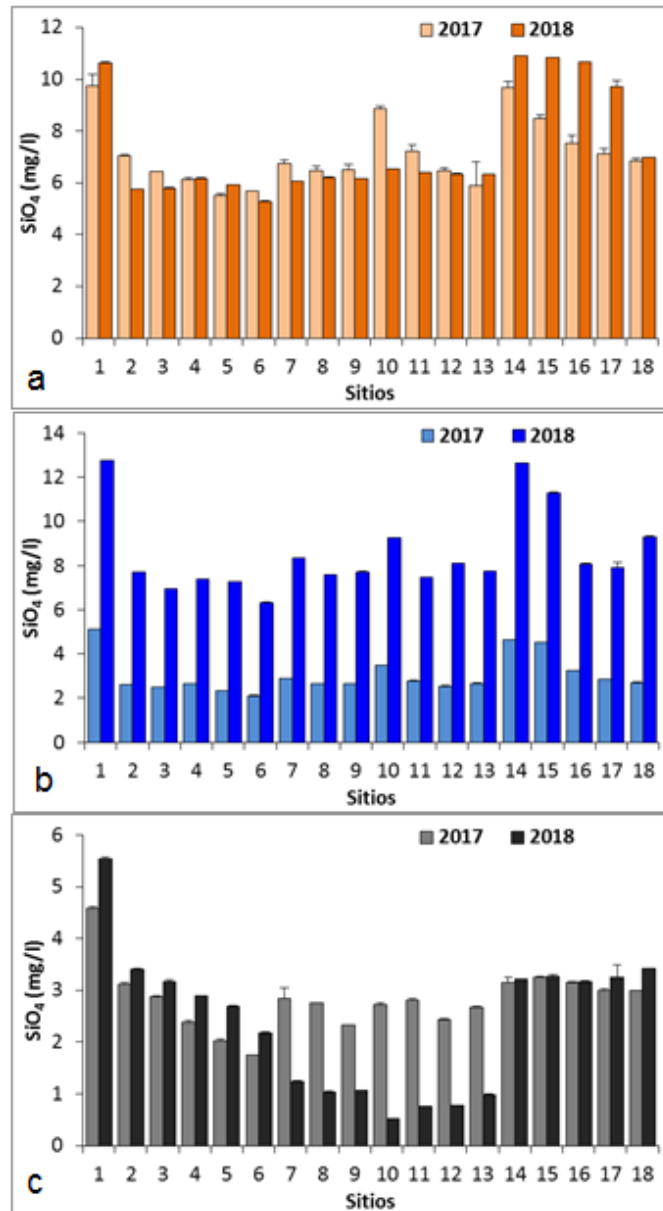


Fig.24.- Comparación de la concentración de silicatos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

En agosto (lluvias), la concentración promedio de silicatos fue mayor en 2018 (8.6 mg/l \pm 1.9) que en 2017 (3.1 mg/l \pm 0.8) (Fig. 24 b). Es posible que esto se debió a que en agosto de 2018 la precipitación pluvial fue menor que en el mismo mes durante 2017 (129.5 mm y 205.1 mm, respectivamente), lo que sugiere que en

agosto de 2018 las descargas de agua subterránea, más que la precipitación pluvial, influyeron en la calidad del agua de la bahía. Mientras que en noviembre (nortes), la concentración de silicatos fue ligeramente mayor en 2017 (2.8 mg/l \pm 0.6), que en 2018 (2.4 mg/l \pm 1.4), principalmente debido a los sitios 7 al 13 (Fig. 24 c).

Clorofila a.-

En abril (secas) de 2018 (2.8 $\mu\text{g/l} \pm 1.5$) se registró una concentración promedio mayor que en 2017 (2.4 $\mu\text{g/l} \pm 1.4$). En 2018 se debió principalmente a los sitios 11 y 16 (5.4 $\mu\text{g/l} \pm 0.1$), mientras que en 2017 a los sitios 4 (6.0 $\mu\text{g/l} \pm 0.04$) y 8 (4 $\mu\text{g/l} \pm 0.2$) (Fig. 25 a).

En agosto (lluvias), la concentración promedio fue mayor en 2018 (3.3 $\mu\text{g/l} \pm 0.8$) que en 2017 (1.3 $\mu\text{g/l} \pm 0.7$). En 2018 se debió principalmente a los sitios 9 (5.1 $\mu\text{g/l} \pm 0.02$) y 11 (4.9 $\mu\text{g/l} \pm 0.2$), mientras que en 2017 a los sitios 9 y 12 (2.4 $\mu\text{g/l} \pm 0.1$) y 17 (2.5 $\mu\text{g/l} \pm 0.1$) (Fig. 25 b).

En noviembre (nortes), la concentración media de clorofila a fue mayor en 2017 (3.3 $\mu\text{g/l} \pm 0.9$) que en 2018 (2.3 $\mu\text{g/l} \pm 1.4$), debido a los sitios 15 (5.8 $\mu\text{g/l} \pm 0.3$) y 18 (4.6 $\mu\text{g/l} \pm 0.6$) durante 2017, y a los sitios 10 (5.8 $\mu\text{g/l} \pm 2.2$) y 18 (3.4 $\mu\text{g/l} \pm 0.02$) en 2018 (Fig. 25 c).

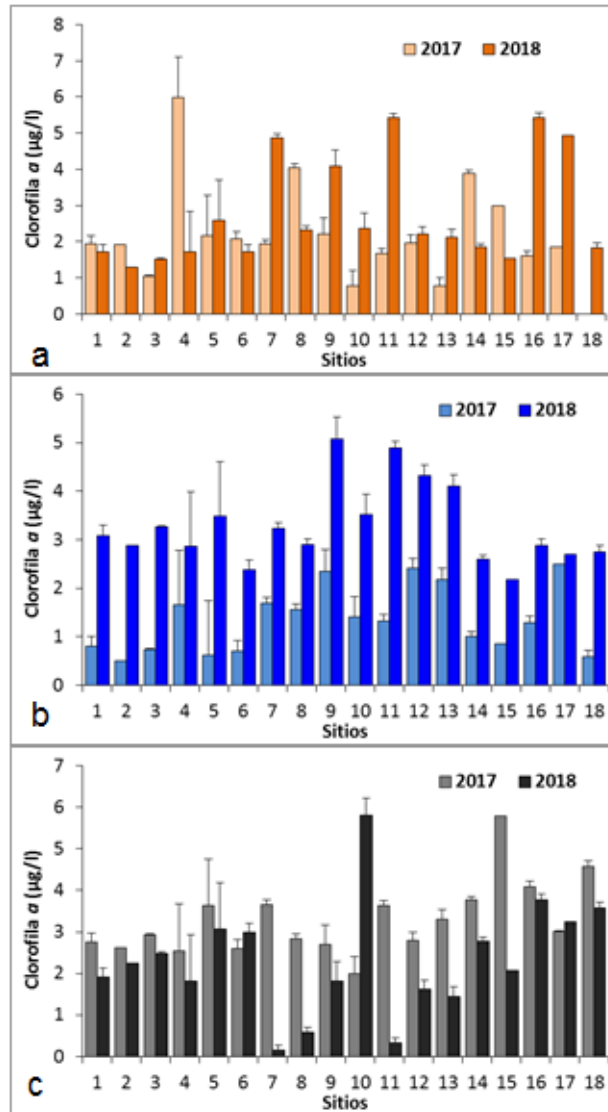


Fig.25.- Comparación de la concentración de clorofila *a* en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

4.2.2. - Laguna Guerrero

4.2.2.1. - Fisicoquímicos 2018:

Temperatura. -

Ese indicador tuvo un comportamiento espacial uniforme en toda la Laguna Guerrero, con diferencias significativas solo entre épocas climáticas. Así, en todo el sistema la concentración promedio fue de $29.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1$ (Fig. 26 a).

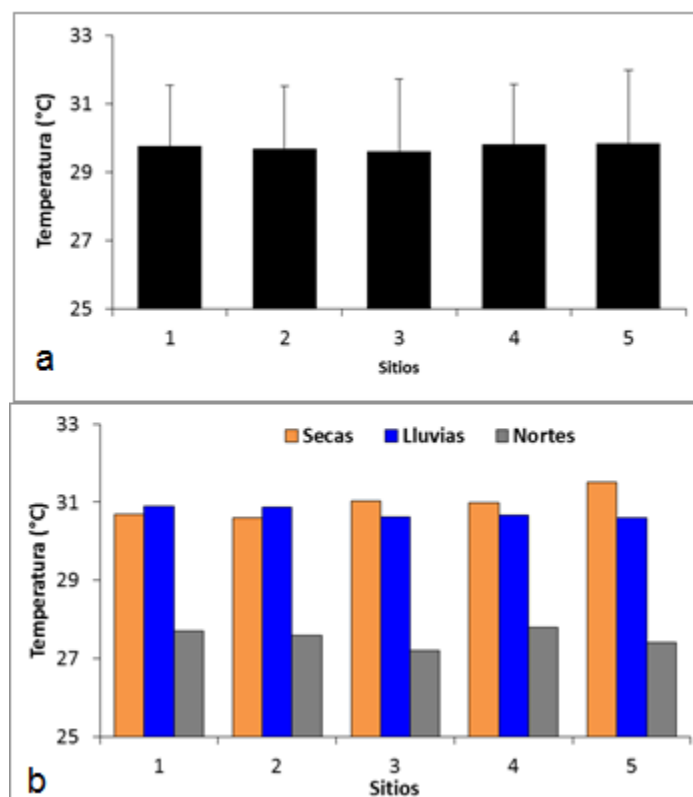


Fig.26.- Valores de temperatura anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018.

En la temporadas de secas (abril) se registró el valor promedio mayor ($31.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.4$), seguido de la época de lluvias (agosto) con $30.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2$; y la de nortes (noviembre) presentó la menor ($29.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1$) (Fig. 26 b).

pH.-

En el caso del pH no se observó variabilidad espacial significativa en este sistema acuático, presentando un valor promedio anual de 7.82 ± 0.04 (Fig. 27 a). Sin embargo, durante la temporada de nortes (noviembre) se registró el valor promedio mayor (8.18 ± 0.04), mientras que en las épocas de secas (abril) y lluvias (agosto) se presentó el mismo valor promedio de 7.64 ± 0.08 (Fig. 27 b). Se considera que valores de pH entre 6.0 y 8.5 son los normales en un cuerpo de agua natural (Chapman, 1996).

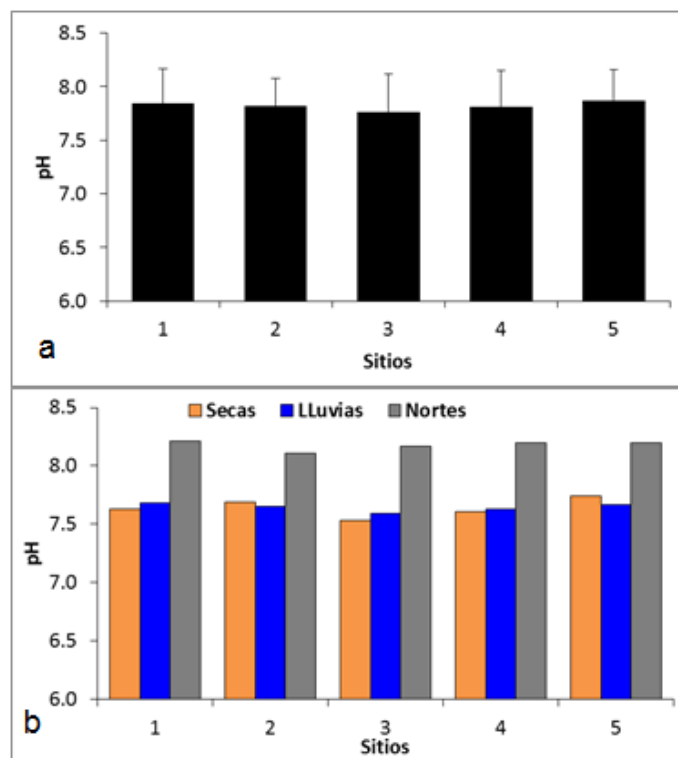


Fig.27.- Valores de pH anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018.

Oxígeno Disuelto.-

De acuerdo al límite mínimo de 5 mg/l, establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática, la Laguna Guerrero mantuvo durante el período de monitoreo una buena oxigenación de la columna de agua. En dónde los sitios 2 a 5 registraron la concentración promedio más alta con $8.2 \text{ mg/l} \pm 0.1$, y el valor más bajo se presentó en el sitio 1 (7.9 ± 0.5) (Fig. 28 a).

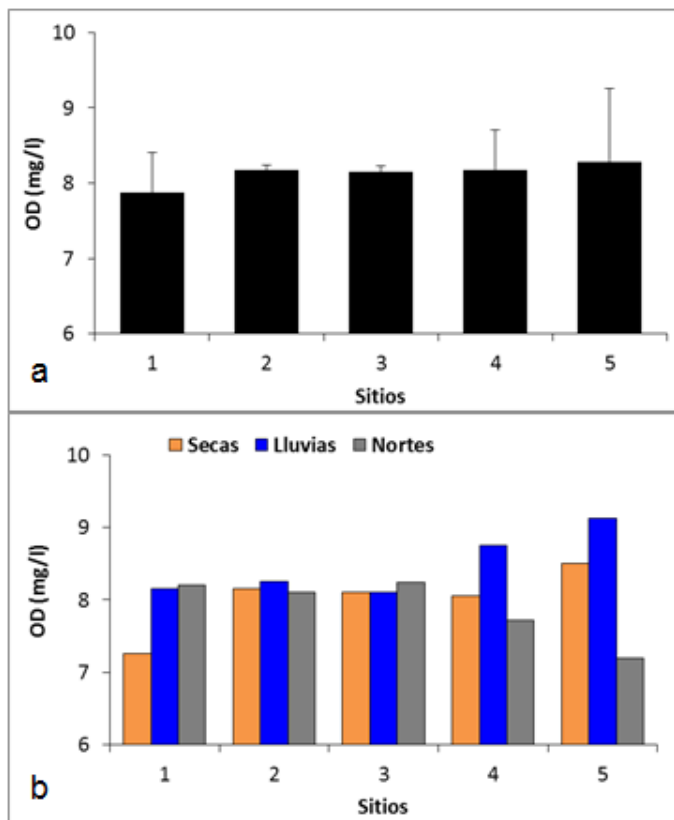


Fig.28.- Valores de oxígeno disuelto (OD) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018.

Durante la temporada de lluvias (agosto) se registró la concentración promedio de oxígeno disuelto más elevada ($7.9 \text{ mg/l} \pm 0.4$), seguida de las épocas de secas ($8.0 \text{ mg/l} \pm 0.5$) y nortes ($8.2 \text{ mg/l} \pm 0.3$). En lluvias el valor más alto lo presentaron los sitios 4 y 5 (8.8 mg/l y 9.1 mg/l), en secas se observó en el sitio 5 (8.5 mg/l) y en nortes en los sitios 1 y 3 (8.2 mg/l). La concentración más baja durante todo el período del estudio se registró en el sitio 5 (7.2 mg/l) en la temporada de nortes (Fig. 28 b).

Turbidez.-

El análisis considera sólo los meses de abril y agosto, debido a que en el monitoreo de noviembre se presentaron fallas en el sensor de turbidez de la sonda multiparamétrica. Así, la turbidez presentó gran variabilidad espacial en la laguna,

en dónde el valor promedio más alto se registró en el sitio 1 ($1.8 \text{ NTU} \pm 2.0$) y el valor más bajo en el sitio 3 ($1.0 \text{ NTU} \pm 1.4$) (Fig. 29 a).

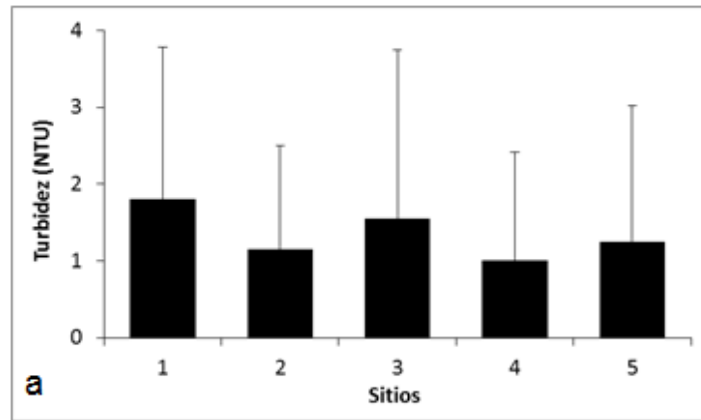


Fig.29.- Valores de turbidez anual promedio en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018.

En la temporada de secas (abril) se registró el valor promedio más alto ($2.6 \text{ NTU} \pm 0.6$), destacando con los valores más altos los sitios 1 (3.2 NTU) y 3 (2.9 NTU). En relación con la época de lluvias (agosto) el valor promedio fue de $0.1 \text{ NTU} \pm 0.2$, en dónde los sitios 1 (0.4 NTU) y 2 (0.2 NTU) presentaron los valores más altos. Los sitios 1, 2 y 3 se localizan frente a los poblados de Laguna Guerrero y Raudales, en dónde las diversas actividades humanas podrían estar contribuyendo a un alto contenido de partículas suspendidas en la columna de agua, dando como resultado valores elevados de turbidez.

Salinidad.-

En la Laguna Guerrero se observó a nivel espacial un gradiente de salinidad de menor a mayor concentración, con dirección de sur a norte; en dónde el sitio 1 registró el valor promedio anual menor ($3.4 \text{ ‰} \pm 0.9$) y el sitio 5 el más alto con $4.1 \text{ ‰} \pm 1.2$ (Fig. 30 a).

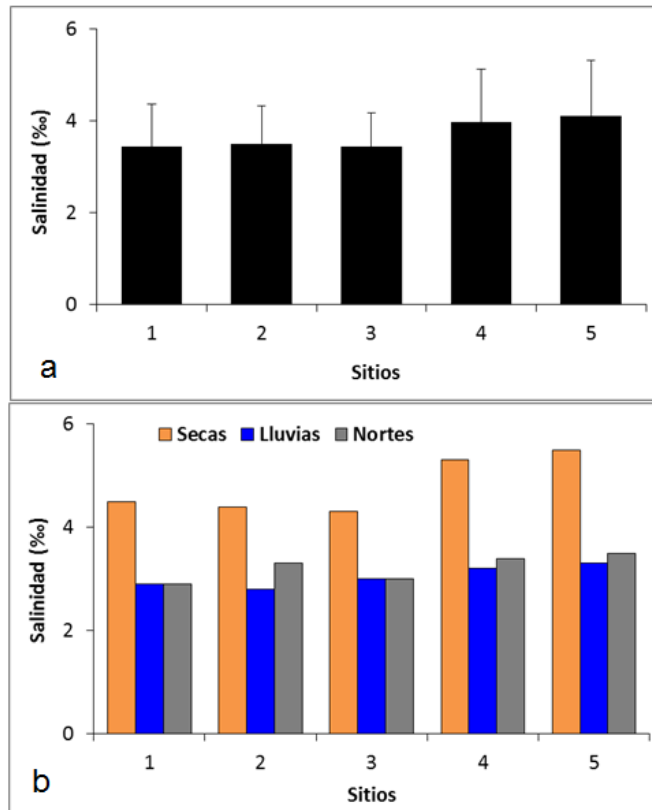


Fig.30.- Valores de salinidad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018.

En la escala temporal la salinidad promedio más alta se registró en la época de secas (abril) con $4.8 \text{ ‰} \pm 0.6$, seguido de la temporada de nortes (noviembre) con $3.2 \text{ ‰} \pm 0.3$ y la menor en lluvias (agosto) con $3.0 \text{ ‰} \pm 0.2$. En las tres épocas climáticas se observó el mismo comportamiento espacial del gradiente de salinidad de menor a mayor concentración de sur a norte (Fig. 30 b).

Conductividad.-

Este parámetro presenta el mismo comportamiento espacial que la salinidad, debido a que la conductividad es sensible a las variaciones en sólidos disueltos, principalmente sales minerales (Chapman, 1996). Así, en la laguna se observa el mismo gradiente de sur a norte, con el valor promedio anual más bajo de conductividad en el sitio 1 ($6.4 \text{ mS/cm} \pm 1.5$) y el más alto en el sitio 5 con $7.5 \text{ mS/cm} \pm 2.0$ (Fig. 31 a).

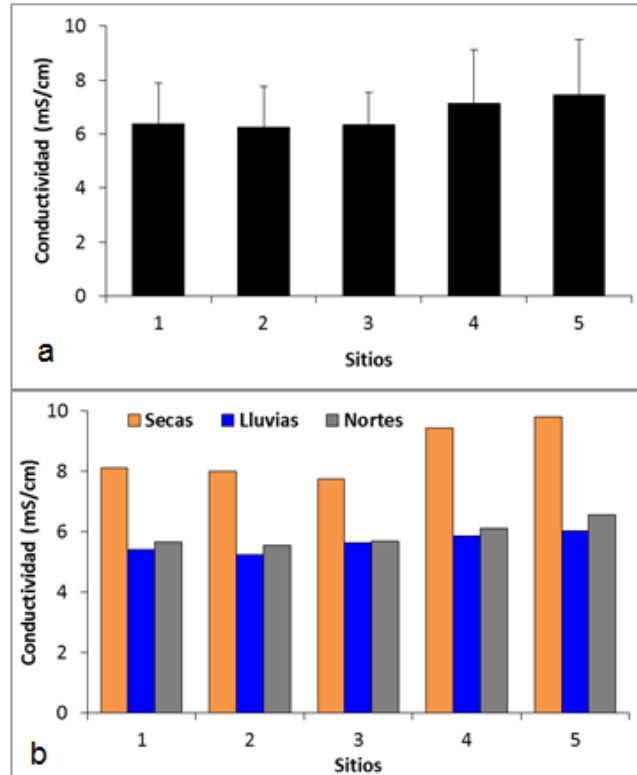


Fig.31.- Valores de conductividad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018.

En relación al comportamiento temporal de la conductividad, el valor más alto se registró en la época de secas (abril) con $8.6 \text{ mS/cm} \pm 0.9$, seguido de la temporada de nortes (noviembre) con $5.9 \text{ mS/cm} \pm 0.5$ y el valor menor en la época de lluvias (agosto) con $5.6 \text{ mS/cm} \pm 0.3$, con el mismo gradiente espacial en las tres temporadas de monitoreo (Fig. 31 b).

4.2.2.2.- Fisicoquímicos 2017-2018:

Temperatura.-

En abril (secas) se registró una temperatura promedio mayor en 2018 ($31^\circ\text{C} \pm 0.4$) que en 2017 ($29.7^\circ\text{C} \pm 0.5$), con el valor más alto en el sitio 1 en ambos años (31.5°C y 30.4°C , respectivamente) (Fig. 32 a).

En agosto (lluvias) se registró la temperatura promedio mayor en 2017 ($31.4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2$) que en 2018 ($30.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2$). En 2017 los sitios 1 y 5 tuvieron la temperatura más alta ($31.6\text{ }^{\circ}\text{C}$), y en 2018 los sitios 1 y 2 con $30.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fig. 32 b).

En noviembre (nortes) la temperatura promedio más alta se registró en 2018 ($27.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2$), comparada con 2017 ($26.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1$). El sitio 2 presentó la temperatura más alta en 2017 ($26.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) y 2018 ($27.8\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Fig. 32 c).

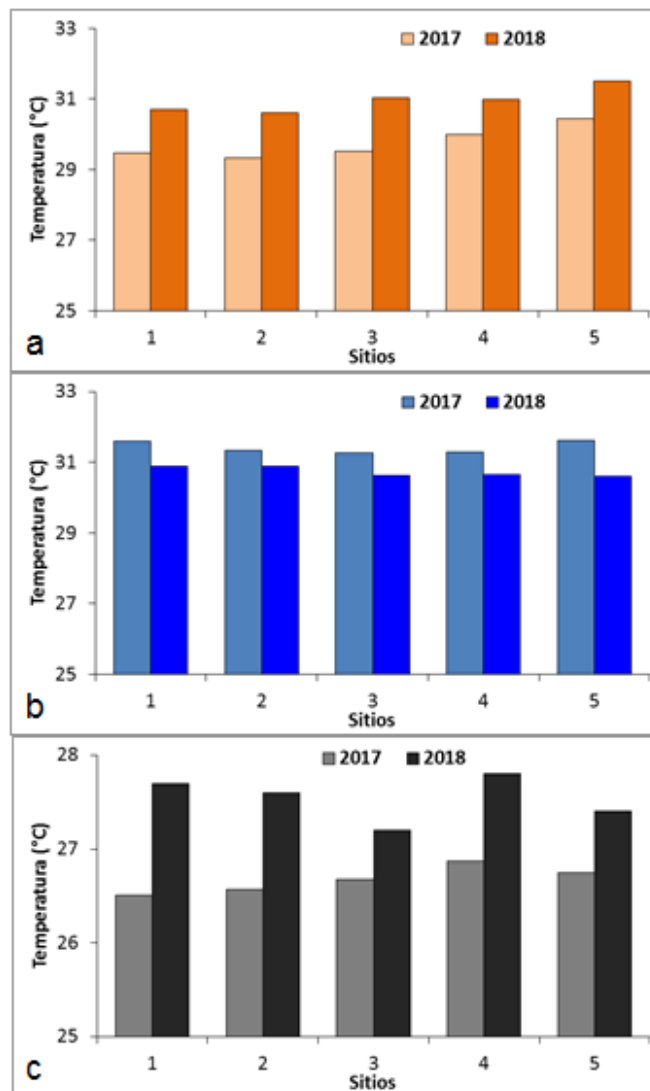


Fig.32.- Comparación de la temperatura en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

pH. -

En abril (secas) de 2017 se registró el valor promedio mayor de pH (8.4 ± 0.8), respecto a 2018 (7.6 ± 0.1). En 2017 los valores más altos se observaron en los sitios 4 (9.3) y 5 (9.0), mientras que en 2018 fueron los sitios 2 y 5 con un valor de 7.7 (Fig. 33 a).

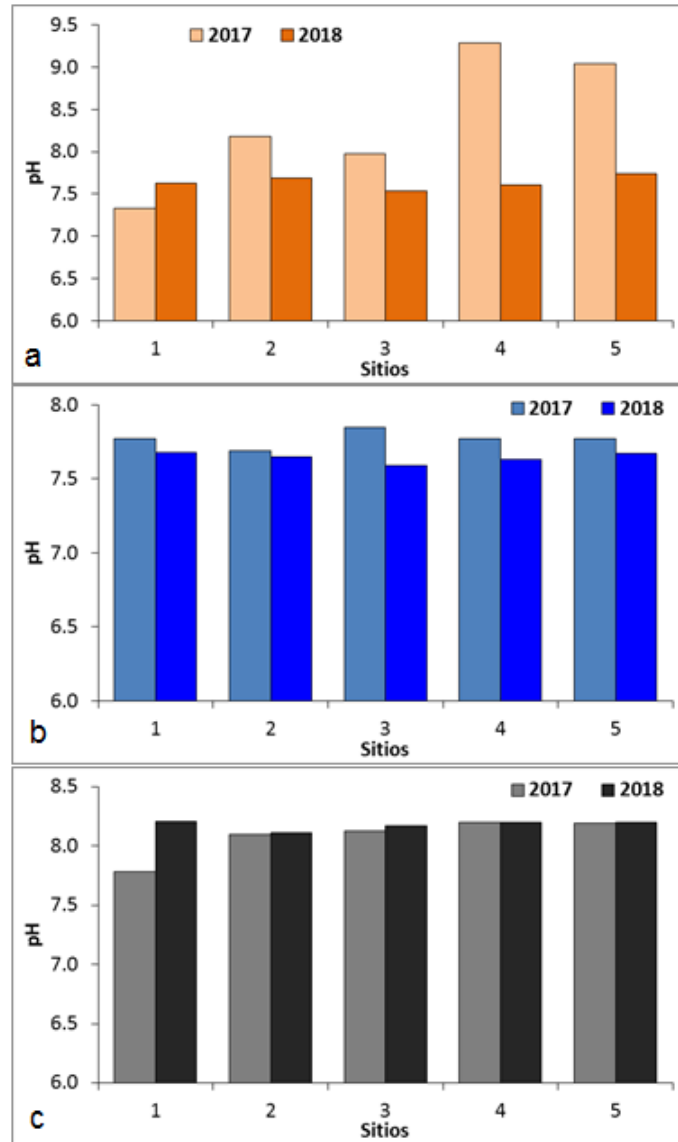


Fig.33.- Comparación del pH en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En los meses de agosto (lluvias) y noviembre (nortes), el valor de pH fue similar en 2017 (7.8 ± 0.1 y 7.6 ± 0.04 , respectivamente) (Fig. 33 b) y 2018 (8.1 ± 0.2 y 8.2 ± 0.04 , respectivamente) (Fig. 33 c).

Oxígeno Disuelto.-

En abril (secas), la concentración más alta de oxígeno disuelto se registró en 2018 (8.2 mg/l \pm 0.9) y en 2017 fue de 8.0 mg/l \pm 0.5. El sitio 1 presentó el valor más alto en 2017 (9.2 mg/l) y en 2018 fue el sitio 5 con 8.5 mg/l (Fig. 34 a).

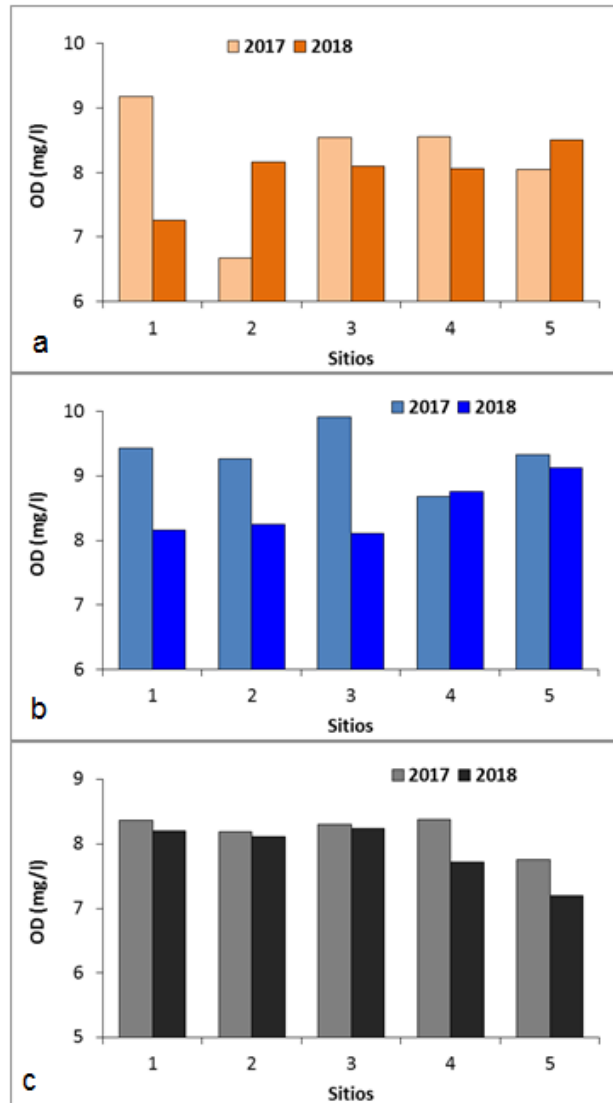


Fig.34.- Comparación del oxígeno disuelto en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), la concentración promedio fue mayor en 2017 (9.3 mg/l \pm 0.4) que en 2018 (8.5 mg/l \pm 0.4). En 2017 el valor más alto se observó en el sitio 3 (9.9 mg/l), y en 2018 en el sitio 5 con 9.1 mg/l (Fig. 34 b).

En noviembre (nortes), la concentración promedio también fue mayor en 2017 (8.2 mg/l \pm 0.3) que en 2018 (7.9 mg/l \pm 0.4). En 2017 el valor más alto se observó en los sitios 1 y 4 (8.4 mg/l), y en 2018 en los sitios 1 y 3 con 8.2 mg/l (Fig. 34 c). Durante los dos años de monitoreo el nivel de oxígeno disuelto fue mayor al de 5 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática.

Turbidez. -

Para este parámetro solo se cuenta con datos para el mes de abril (secas), que permitan comparar los dos años de monitoreo. Así, en 2018 se registró un promedio mayor (2.6 NTU \pm 0.6) que en 2017 (2.2 NTU \pm 0.9). El valor más alto fue de 3.2 NTU, se presentó en el sitio 2 en 2017 y en el sitio 1 en 2018 (Fig. 35).

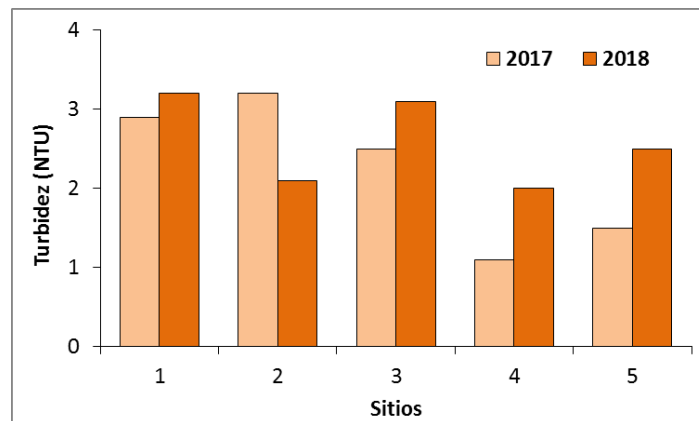


Fig.35.- Comparación de la turbidez en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en la época climática de secas (abril).

Salinidad. -

En abril (secas), la salinidad promedio fue mayor en 2017 (5.5 ‰ \pm 0.4) que en 2018 (4.8 ‰ \pm 0.6). El sitio 5 registró el valor más alto en 2017 (5.8 ‰) y 2018 (5.5 ‰) (Fig. 36 a).

En agosto (lluvias), la mayor salinidad promedio también se presentó en 2017 (3.8 ‰ \pm 0.4), respecto a 2018 (3.0 ‰ \pm 0.2). En 2017 el valor más alto de 4.2 ‰ se registró en los sitios 4 y 5, al igual que en 2018 pero con 3.2 ‰ (Fig. 36 b).

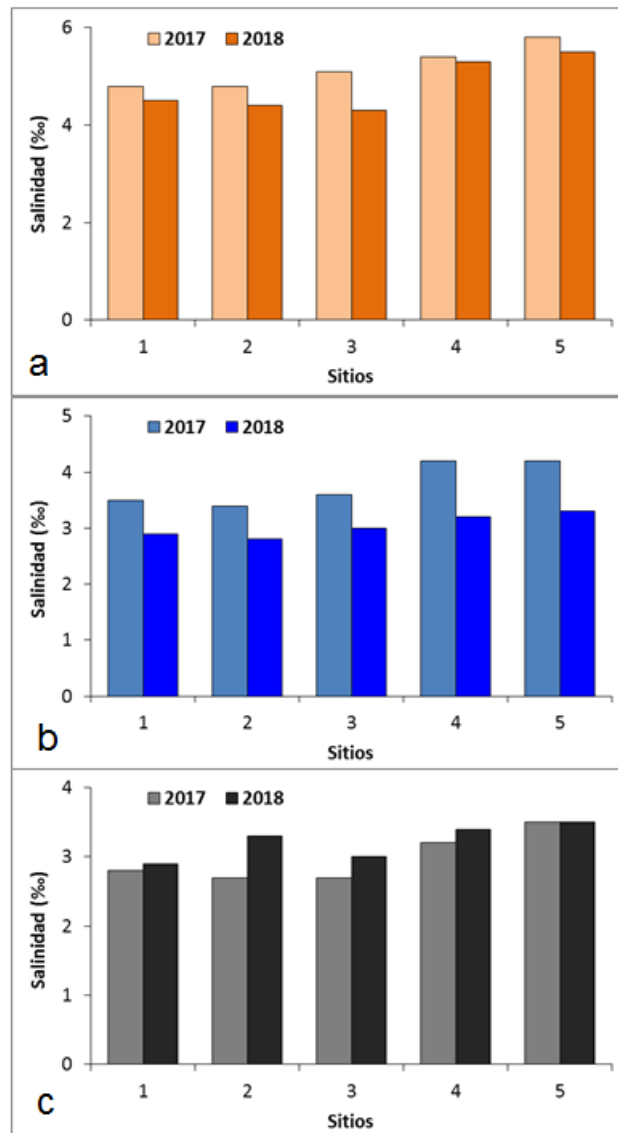


Fig.36.- Comparación de la salinidad en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En noviembre (nortes), la salinidad promedio fue mayor en 2018 que en 2017 ($3.3 \text{ ‰} \pm 1.5$ y $3.0 \text{ ‰} \pm 0.4$, respectivamente). En los dos años el valor más alto se registró en el sitio 5 con 3.5 ‰ (Fig. 36 c).

Conductividad.-

En abril (secas), la conductividad promedio fue mayor en 2017 que en 2018 (9.3 mS/cm \pm 0.7 y 8.6 mS/cm \pm 0.9, respectivamente), con el valor más alto en los sitios 4 y 5 en 2017 (9.7 mS/cm y 10.3 mS/cm, respectivamente) y en 2018 (9.4 mS/cm y 9.8 mS/cm, respectivamente) (Fig. 37 a).

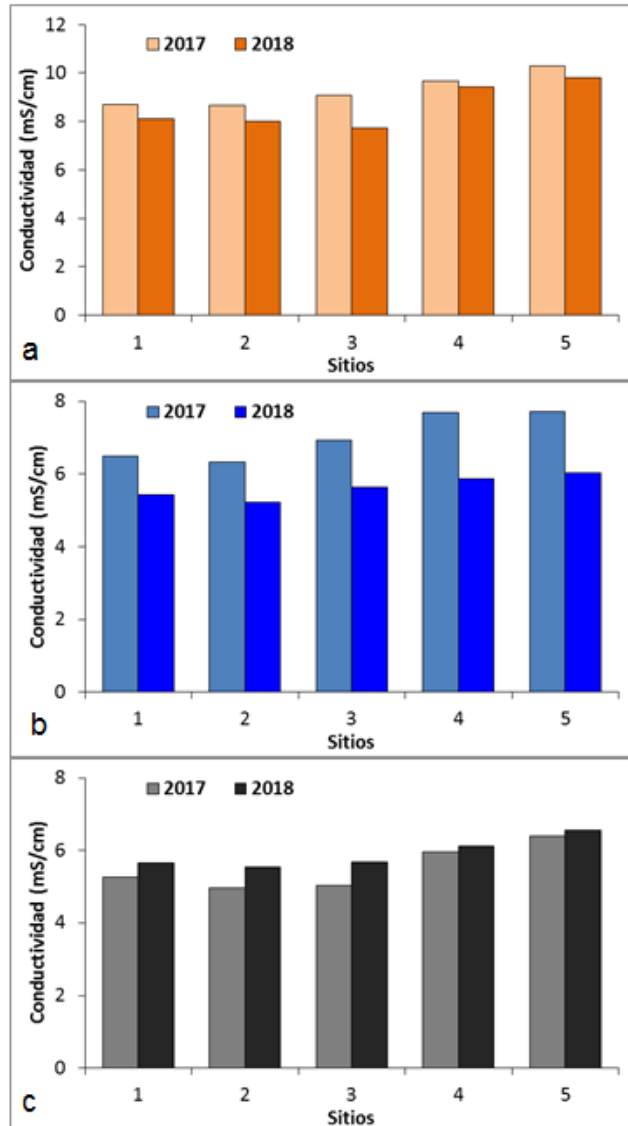


Fig.37.- Comparación de la conductividad en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), la conductividad promedio fue mayor en 2017 que en 2018 (7.0 mS/cm \pm 0.7 y 5.6 mS/cm \pm 0.3, respectivamente), con el valor más alto en

los sitios 4 y 5 en 2017 (7.7 mS/cm) y en 2018 (5.9 mS/cm y 6.0 mS/cm, respectivamente) (Fig. 37 b).

En noviembre (nortes), la conductividad promedio fue mayor en 2018 que en 2017 (5.9 mS/cm \pm 0.4 y 5.5 mS/cm \pm 0.6, respectivamente), con el valor más alto en los sitios 4 y 5 en 2017 (6.0 mS/cm y 6.4 mS/cm) y en 2018 (6.1 mS/cm y 6.6 mS/cm, respectivamente) (Fig. 37 c).

4.2.2.3. -Nutrientes 2018:

Para cuerpos de agua dulce solo se establecen criterios ecológicos de calidad del agua (CECAs) para amonio y fosfatos.

Nitritos.-

Los nitritos presentaron alta variabilidad temporal y un gradiente espacial de mayor a menor concentración de sur a norte. La concentración promedio anual mayor se registró en el sitio 1 (0.003 mg/l \pm 0.004) y la menor en los sitios 4 y 5 (0.001 mg/l \pm 0.001) (Fig. 38 a). El sitio 1 se encuentra frente al poblado de Laguna Guerrero y los sitios 4 y 5, se localizan en una zona con escasos asentamientos humanos.

El mes de abril (secas) registró la concentración promedio mayor de nitritos (0.004 mg/l \pm 0.002), seguida del mes de noviembre (nortes) con 0.0005 mg/l \pm 0.0003 y la más baja en agosto (lluvias) con 0.0003 mg/l \pm 0.0002). Durante la temporada de secas se observa un gradiente de mayor a menor concentración, de sur a norte de la laguna, en dónde el sitio 1 presentó un valor de 0.007 mg/l y el sitio 5 de 0.002. Para la época de nortes el nivel más alto se observó en el sitio 3 (0.001 mg/l), mientras que para la temporada de lluvias la concentración mayor fue de 0.0006 mg/l en el sitio 4 (Fig. 38 b).

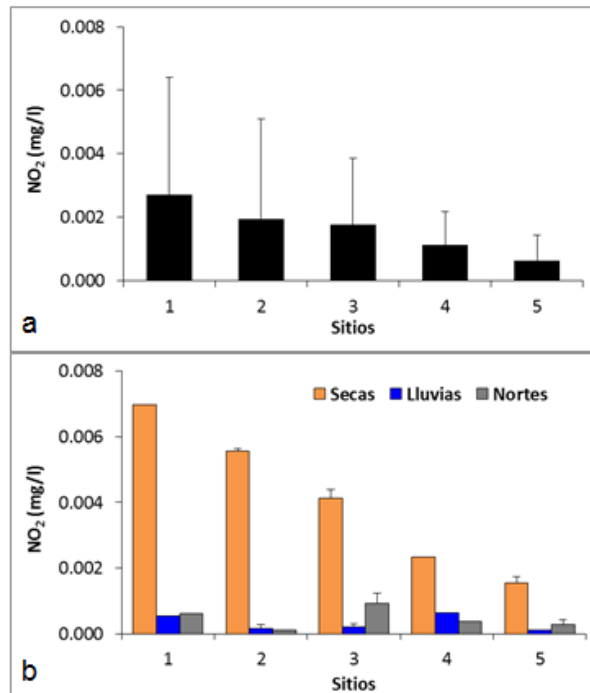


Fig.38.- Valores de nitritos (NO₂) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018.

Para este parámetro la fuente principal parecen ser las filtraciones de aguas residuales de los poblados de Raudales y Laguna Guerrero, así como la resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, durante la época de nortes.

Nitratos.-

Los nitratos presentaron alta variabilidad temporal y el mismo gradiente espacial que los nitritos. Así, la concentración promedio anual más alta se registró en el sitio 1 (0.03 mg/l ± 0.02) y el más bajo en el sitio 5 (0.004 mg/l ± 0.001) (Fig. 39 a).

Las temporadas de secas (abril) y lluvias (agosto) registraron la mayor concentración promedio (0.02 mg/l ± 0.02), seguida de la época de nortes (noviembre) con 0.005 mg/l ± 0.002. El sitio 1 presentó el valor más alto en abril (0.03 mg/l), agosto (0.05 mg/l) y noviembre (0.01 mg/l) (Fig. 39 b).

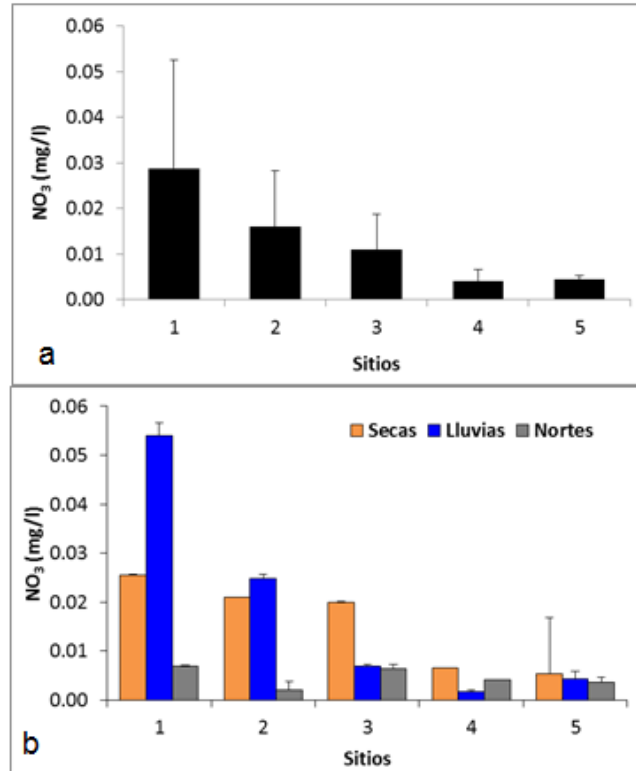


Fig.39.- Valores de nitritos (NO₃) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018.

Para este parámetro las fuentes principales parecen ser la entrada de agua subterránea combinada con filtraciones de aguas residuales.

Amonio.-

El amonio presentó alta variabilidad temporal y espacial, con la concentración promedio anual más alta en el sitio 3 (0.04 mg/l ± 0.04) y la más baja en el sitio 4 (0.02 mg/l ± 0.02) (Fig. 40 a). El sitio 3 se localiza frente al poblado de Raudales y el 4 al norte del sistema en una zona con asentamientos humanos dispersos.

Como ocurrió en los dos indicadores anteriores, la mayor concentración promedio de amonio se registró en abril (secas) con 0.05 mg/l ± 0.03, seguido del mes de noviembre (nortes) con 0.04 mg/l ± 0.01 y agosto (lluvias) con 0.01 mg/l ± 0.004.

En abril los sitios 1 y 2 registraron el valor más alto (0.07 mg/l y 0.08 mg/l, respectivamente), que fueron los únicos que sobrepasaron el LMP para la protección de la vida acuática establecidos por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua dulce (0.06 mg/l); mientras el sitio 5 registró el nivel más alto en agosto y noviembre, con 0.02 mg/l y 0.05 mg/l, respectivamente (Fig. 40 b).

En Laguna Guerrero los principales aportes de amonio son las entradas de agua subterránea quizá mezcladas con aguas residuales de fosas sépticas de los poblados y la descomposición de materia orgánica de los sedimentos. Para lluvias y nortes parecen predominar los escurrimientos superficiales, la descomposición de materia orgánica y la resuspensión de sedimentos.

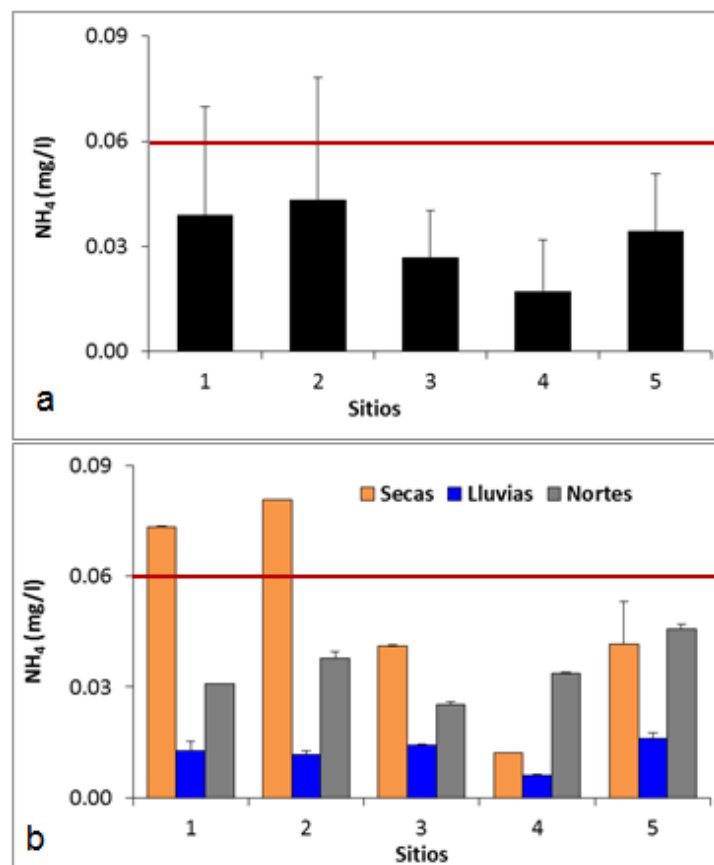


Fig.40.- Valores de amonio (NH₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua dulce.

Fosfatos.

Los fosfatos presentaron alta variabilidad temporal y baja variabilidad espacial. La concentración promedio anual más alta se registró en los sitios 3 y 4 (0.004 mg/l \pm 0.002) y para el resto de los sitios fue de 0.003 mg/l \pm 0.002 (Fig. 41 a).

La mayor concentración promedio por temporada climática se registró en secas (abril) con 0.005 mg/l \pm 0.002, seguido de la época de lluvias (agosto) con 0.004 mg/l \pm 0.001, y la más baja en temporada de nortes (noviembre) con 0.002 mg/l \pm 0.001 (Fig. 41 b). En abril el valor más alto se registró en los sitios 3 y 4 (0.007 mg/l), en agosto fue en el sitio 1 (0.006 mg/l) y en noviembre en el sitio 4 con 0.004 mg/l (Fig. 41 b).

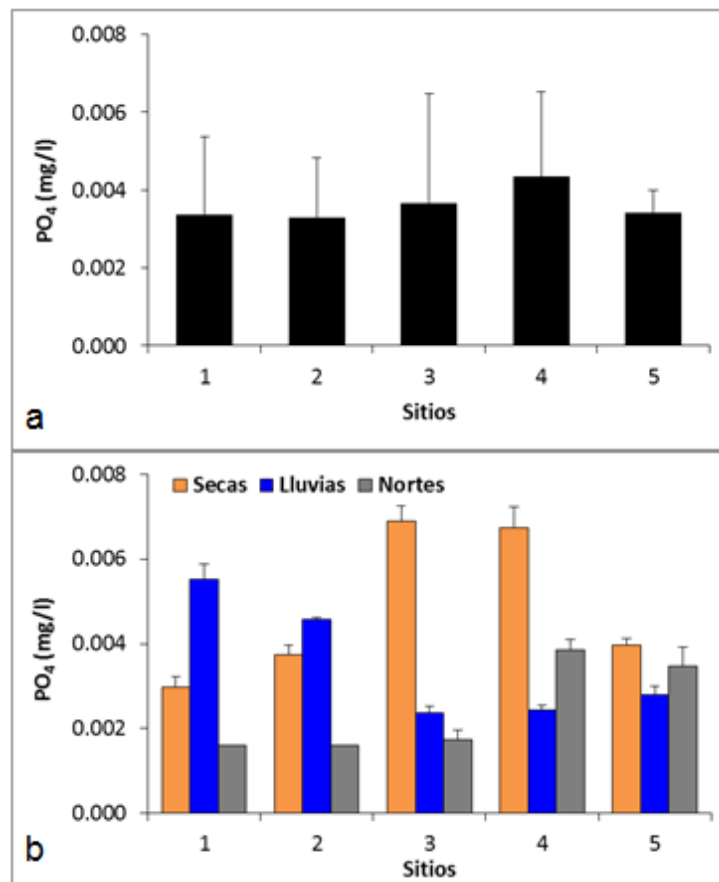


Fig.41.- Valores de fosfatos (PO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018.

La fuente potencial de fosfatos para el mes de abril son las filtraciones de agua subterránea en combinación con lixiviados de fosas sépticas de los asentamientos

humanos de Laguna Guerrero y Raudales, mientras que para lluvias y nortes serían los escurrimientos superficiales.

Durante el período de estudio, en la laguna no se rebasó el LMP de 0.1 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua dulce.

Silicatos. -

Laguna Guerrero no presentó variabilidad espacial en la concentración de silicatos en ninguna de las tres épocas climáticas. Por lo que la concentración promedio anual para los cinco sitios fue de 10.4 mg /l ± 0.2 (Fig. 42 a).

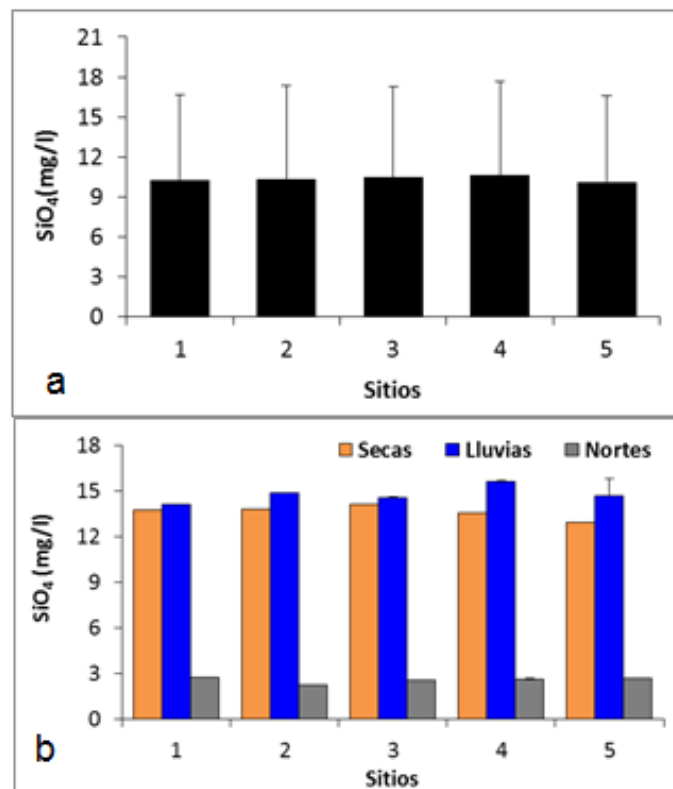


Fig.42.- Valores de silicatos (SiO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018.

En la temporada de secas (abril) la concentración promedio fue de $13.7 \text{ mg/l} \pm 0.4$, en lluvias (agosto) fue de $14.8 \text{ mg/l} \pm 0.6$ y en nortes (agosto) de $2.6 \text{ mg/l} \pm 0.2$ (Fig. 42 b).

El elevado valor de silicatos durante la época de secas confirma la fuerte influencia del agua subterránea en todo el sistema, debido a que la concentración de este elemento aumenta en el agua que se infiltra en el suelo por la disolución de minerales de silicato en su paso al acuífero. En tanto que la importante disminución de su concentración en la época de nortes se relaciona con la predominancia de los escurrimientos superficiales por la precipitación pluvial. En agosto el alto valor de silicatos se debió a que se registró una baja precipitación pluvial, por lo que predominó la influencia del agua subterránea en la laguna (Fig. 42 b).

Clorofila a.-

La variabilidad en la concentración de clorofila *a* en Laguna Guerrero se debió principalmente a las épocas climáticas, aunque también se observaron diferencias espaciales. Así, en los sitios 3 ($3.2 \text{ } \mu\text{g/l} \pm 0.7$) y 5 ($3.0 \text{ } \mu\text{g/l} \pm 1.1$) se registraron los valores promedio más altos, y en el sitio 2 ($2.1 \text{ } \mu\text{g/l} \pm 0.4$) el valor más bajo (Fig. 43 a). La alta concentración de clorofilas en los sitios 3 y 5, parecen resultado de altas concentraciones de amonio y fosfatos en estos sitios.

La temporada de secas (abril) registró la mayor concentración promedio de clorofila *a* ($2.9 \text{ } \mu\text{g/l} \pm 0.8$), seguida de la época de lluvias (agosto) con $2.8 \text{ } \mu\text{g/l} \pm 0.2$, y nortes (noviembre) fue la temporada de menor valor promedio con $2.4 \text{ } \mu\text{g/l} \pm 0.9$. Esta tendencia se mantuvo para los sitios 1, 4 y 5 (Fig. 43 b).

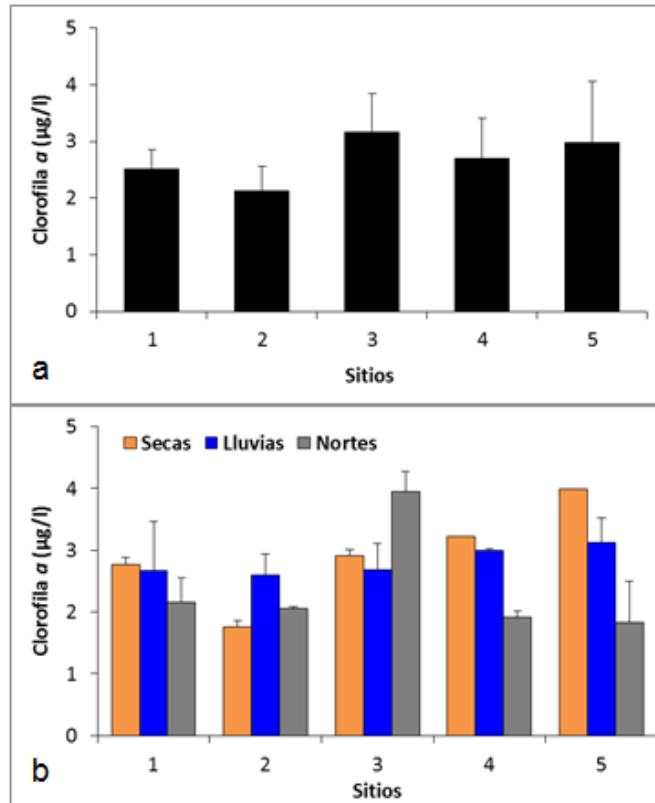


Fig.43.- Valores de clorofila a anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2018.

4.2.2.4.- Nutrientes 2017-2018.-

Nitritos.-

En abril (secas), la concentración promedio de nitritos fue mayor en 2017 que en 2018 (0.009 mg/l \pm 0.003 y 0.004 mg/l \pm 0.002, respectivamente). Conservándose el gradiente espacial de sur a norte en los dos años, con el valor más alto en el sitio 1 de 0.013 mg/l en 2017, y 0.007 mg/l en 2018 (Fig. 44 a).

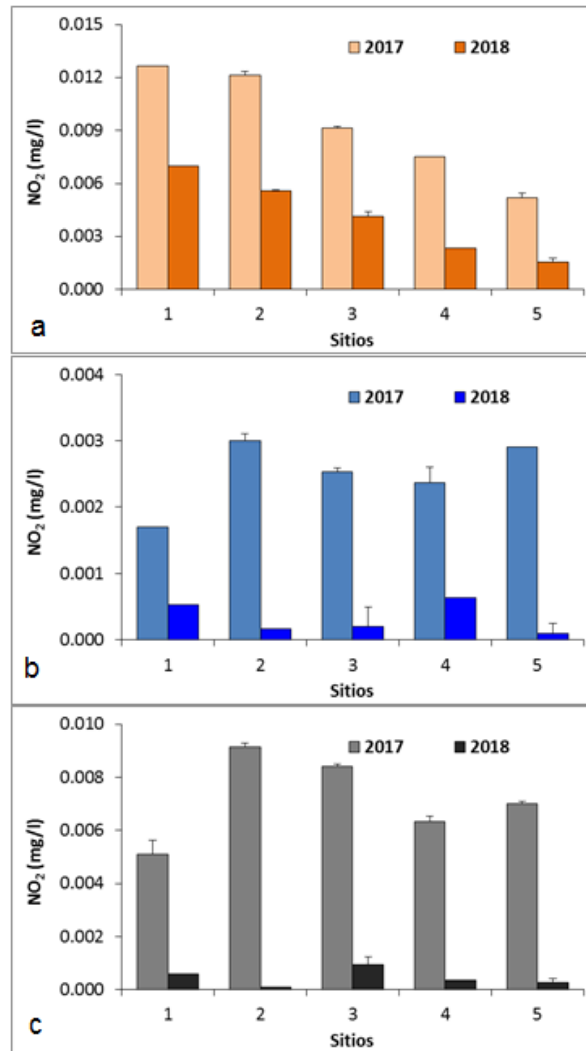


Fig.44.- Comparación de la concentración de nitritos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), la concentración media fue mayor en 2017 que en 2018 (0.003 mg/l \pm 0.001 y 0.0003 mg/l \pm 0.0001, respectivamente), con el valor más alto de 0.003 mg/l en los sitios 2, 3 y 5 durante 2017, y para 2018 en los sitios 1 (0.0005 mg/l) y 4 (0.0006 mg/l) (Fig. 44 b).

En noviembre (nortes), la concentración media fue mayor en 2017 que en 2018 (0.007 mg/l \pm 0.002 y 0.0005 mg/l \pm 0.0003, respectivamente), en dónde el valor más alto para 2017 se registró en los sitios 2 (0.009 mg/l) y 3 (0.008 mg/l), y para 2018 fue en el sitio 3 (0.0009 mg/l) (Fig. 44 c).

Nitratos. -

En abril (secas), la concentración promedio de nitratos fue mayor en 2017 que en 2018 (0.10 mg/l \pm 0.07 y 0.02 mg/l \pm 0.01, respectivamente). Con los valores más altos en los sitios 4 (0.19 mg/l) y 5 (0.15 mg/l) en 2017, mientras que para 2018 fueron los sitios 1(0.03 mg/l) y 2 (0.02 mg/l) (Fig. 45 a).

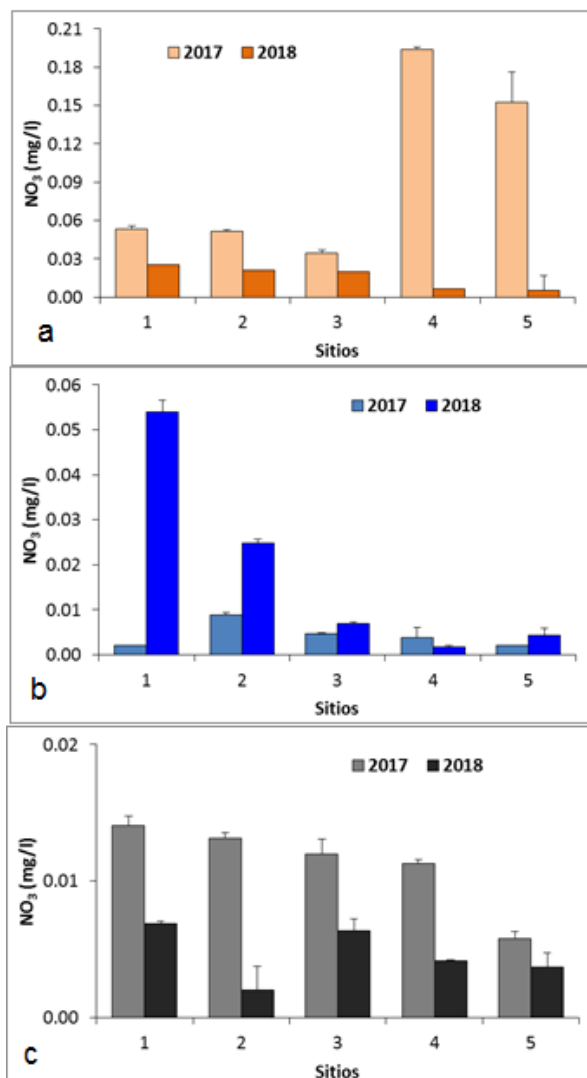


Fig.45.- Comparación de la concentración de nitratos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), la concentración promedio fue mayor en 2018 que en 2017 (0.02 mg/l \pm 0.01 y 0.004 mg/l \pm 0.003, respectivamente). Con los valores más altos en los sitios 1 (0.05 mg/l) y 2 (0.03 mg/l) en 2018, mientras que para 2017 fueron los sitios 2 (0.01 mg/l) y 3 (0.005 mg/l) (Fig. 45 b).

En noviembre (secas), la concentración promedio fue mayor en 2017 que en 2018 (0.011 mg/l \pm 0.003 y 0.005 mg/l \pm 0.002, respectivamente). Con los valores más altos en los sitios 1 (0.014 mg/l) y 2 (0.013 mg/l) en 2017, mientras que para 2018 fueron los sitios 1 (0.007 mg/l) y 3 (0.006 mg/l) (Fig. 45 c).

Amonio.-

En abril (secas), la concentración promedio de amonio fue mayor en 2017 que en 2018 (0.23 mg/l \pm 0.06 y 0.05 mg/l \pm 0.03, respectivamente). En 2017 todos los sitios presentaron valores superiores al LMP de 0.06 mg/l, establecidos en los CECAs para la protección de la vida acuática de agua dulce; mientras que en 2018, sólo los sitios 1 y 2 que se localizan frente al poblado de Laguna Guerrero, mantuvieron valores superiores a los CECAs (Fig. 46 a).

En agosto (lluvias), la concentración promedio fue mayor en 2017 que en 2018 (0.07 mg/l \pm 0.05 y 0.012 mg/l \pm 0.004, respectivamente). Solo en 2017 se registraron valores superiores al LMP de 0.06 mg/l, establecidos en los CECAs para la protección de la vida acuática de agua dulce en los sitios 2, 3 y 5, que se localizan principalmente frente a los poblados de Laguna Guerrero y Raudales (Fig. 46 b).

En noviembre (nortes), la concentración promedio fue similar en 2017 y 2018 (0.04 mg/l \pm 0.02), pero en 2017 el valor más alto (0.07 mg/l) se presentó en el sitio 1, que es superior al LMP de 0.06 mg/l de los CECAs; mientras que en 2018 el valor más alto fue de 0.05 mg/l (sitio 5) (Fig. 46 c).

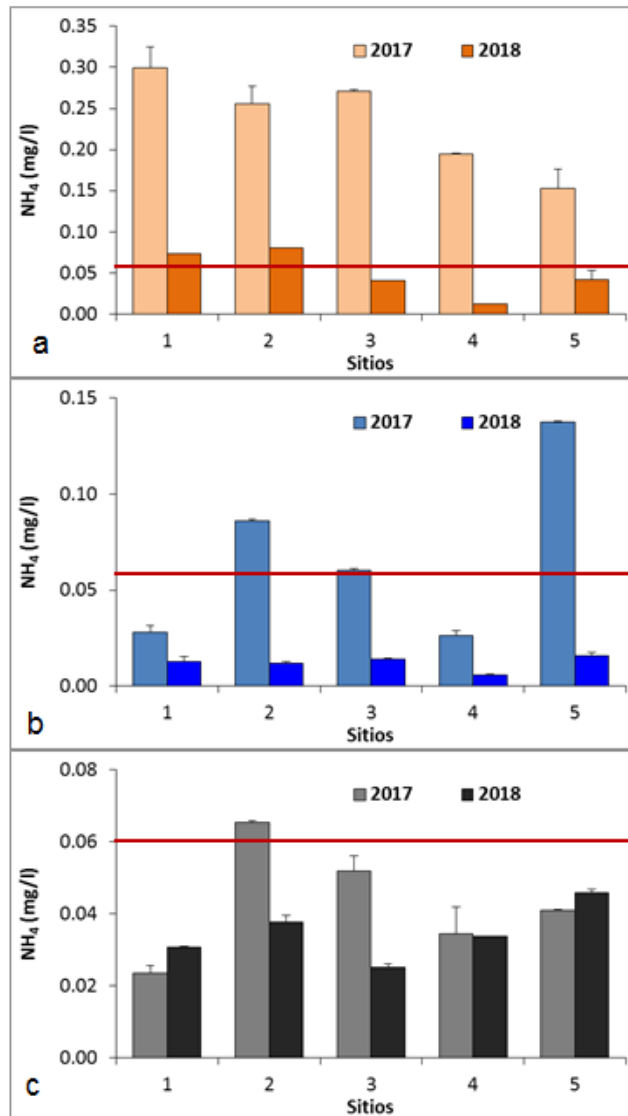


Fig.46.- Comparación de la concentración de amonio en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua dulce.

Fosfatos. -

En abril (secas), la concentración promedio fue mayor en 2017 que en 2018 (0.006 mg/l ± 0.001 y 0.005 mg/l ± 0.002, respectivamente), con el valor más alto en los sitios 1 y 2 (0.0072 mg/l) en 2017, y los sitios 3 y 4 (0.0069 mg/l) en 2018 (Fig. 47 a).

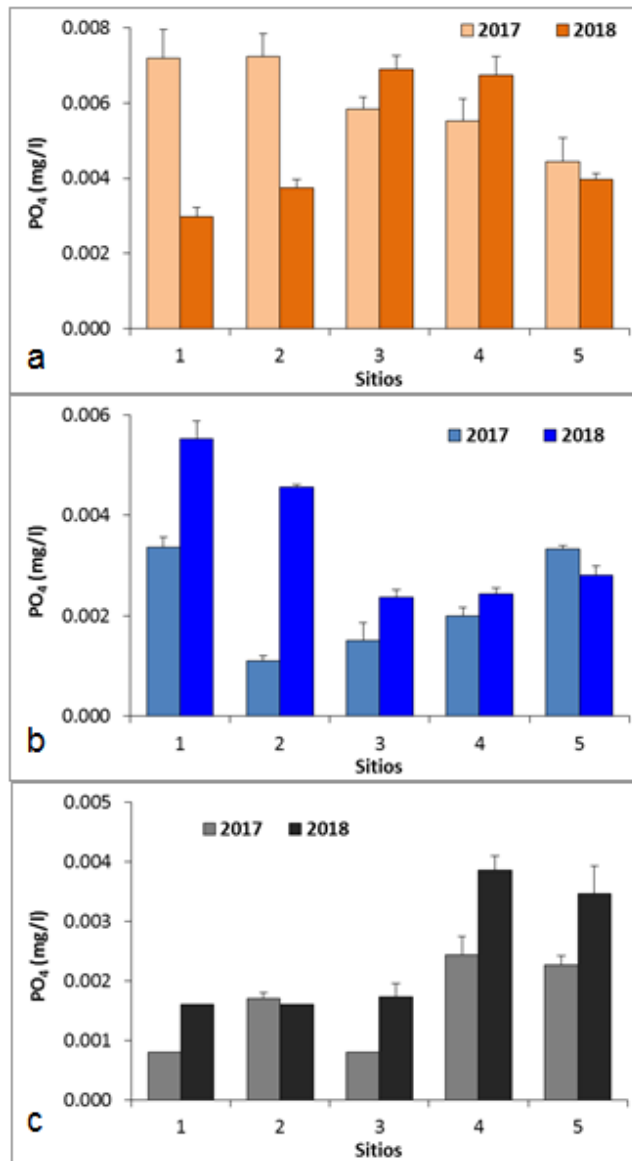


Fig.47.- Comparación de la concentración de fosfatos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), la concentración promedio fue mayor en 2018 que en 2017 (0.004 mg/l ± 0.001 y 0.002 mg/l ± 0.001, respectivamente), con el valor más alto en los sitios 1 (0.006 mg/l) y 2 (0.005 mg/l) en 2018, y los sitios 1 y 5 (0.003 mg/l) en 2017 (Fig. 47 b).

En noviembre (nortes), la concentración promedio fue igual en los dos años (0.002 mg/l \pm 0.001), aunque los valores más altos se registraron en 2018 en los sitios 4 (0.004 mg/l) y 5 (0.003 mg/l) (Fig. 47 c).

Silicatos.-

En abril (secas), la concentración de silicatos fue mayor en 2017 que en 2018 (14.8 mg/l \pm 0.6 y 13.7 mg/l \pm 0.4, respectivamente). Los sitios 1 y 2 presentaron el valor mayor (15.4 mg/l) en 2017, mientras que en 2018 fue en el sitio 3 (14.2 mg/l) (Fig. 48 a).

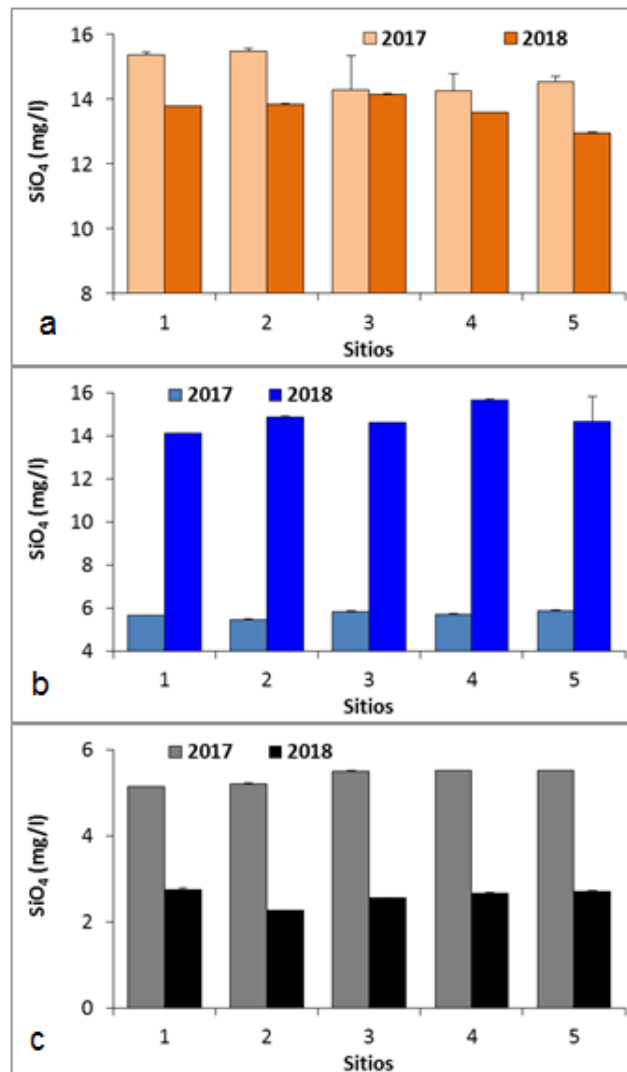


Fig.48.- Comparación de la concentración de silicatos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), la concentración de silicatos fue mayor en 2018 que en 2017 (14.8 mg/l \pm 0.6 y 5.7 mg/l \pm 0.2, respectivamente). Esta diferencia se debió a que de acuerdo al Sistema Meteorológico Nacional, en agosto de 2018 se registró una menor precipitación pluvial (129.5 mm) que en 2017 (205.1 mm); lo que permitió que se mantuviera la influencia de las descargas de agua subterránea a la laguna. El sitio 4 presentó el valor mayor (15.7 mg/l) en 2018, mientras que en 2017 fue en el sitio 5 (5.9 mg/l) (Fig. 48 b).

En noviembre (nortes), la concentración promedio fue mayor en 2017 que en 2018 (5.5 mg/l \pm 0.2 y 2.6 mg/l \pm 0.2, respectivamente), sin variación espacial significativa (Fig. 48 c). También en este mes durante 2018 se registró una menor precipitación pluvial (82.2 mm), con respecto a 2017 (94 mm).

Clorofila a.-

En abril (secas) la concentración de clorofila a fue mayor en 2018 que en 2017 (2.9 μ g/l \pm 0.8 y 0.4 μ g/l \pm 0.3, respectivamente), con el valor más alto en el sitio 1 en 2018 (4.0 μ g/l) y en 2017 (0.9 μ g/l) (Fig. 49 a).

En agosto (lluvias) la concentración de clorofila a fue mayor en 2018 que en 2017 (2.8 μ g/l \pm 0.2 y 1.0 μ g/l \pm 0.3, respectivamente), con el valor más alto en el sitio 5 en 2018 (3.1 μ g/l) y en el sitio 3 en 2017 (1.4 μ g/l) (Fig. 49 b).

En noviembre (nortes) la concentración de clorofila a fue mayor en 2017 que en 2018 (3.6 μ g/l \pm 0.8 y 2.4 μ g/l \pm 0.9, respectivamente), con el valor más alto en el sitio 5 en 2017 (4.9 μ g/l) y en el sitio 3 en 2018 (3.9 μ g/l) (Fig. 49 c).

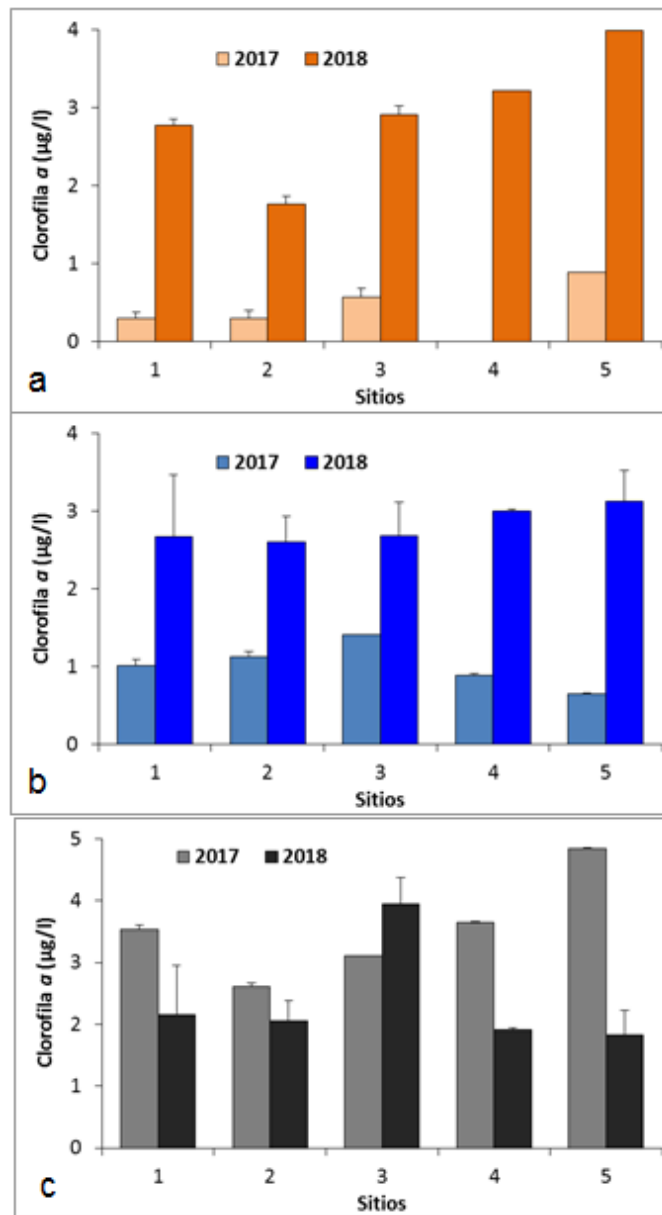


Fig.49.- Comparación de la concentración de clorofila a en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

4.2.3. - Laguna Chile Verde

4.2.3.1. - Fisicoquímicos 2018:

Temperatura.

Debido a que Laguna Chile Verde es un cuerpo de agua somero (baja profundidad) y de pequeñas dimensiones, la temperatura es espacialmente homogénea, sin embargo, experimenta ligeras variaciones no significativas. El valor promedio anual más bajo se registró en los sitios 3 y 4 ($28.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.2$) y el más alto en el sitio 2 con $29.4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.7$ (Fig. 50 a).

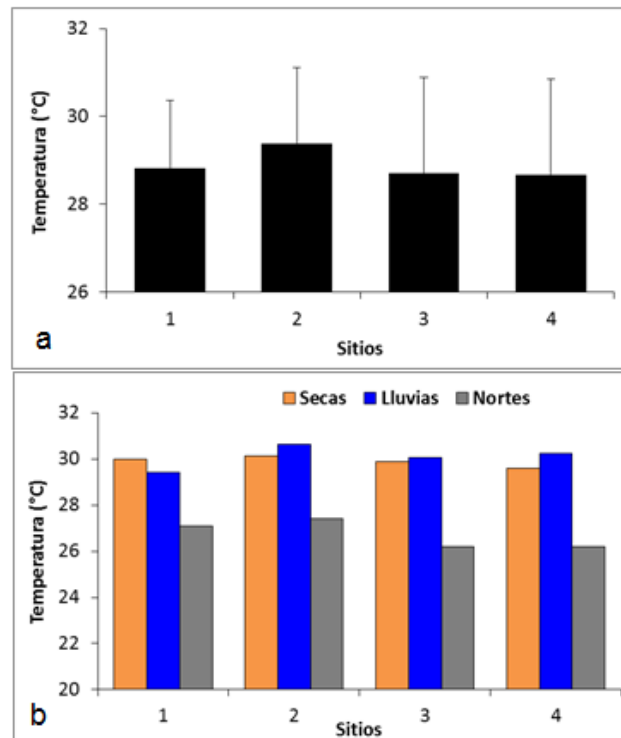


Fig. 50.- Valores de temperatura anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018.

En relación a la variabilidad temporal de la temperatura, la época de lluvias (agosto) registró el valor promedio más alto ($30.1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5$), seguido de la temporada de secas (abril) con $29.9\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2$, siendo la época de nortes la de menor valor promedio con $26.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.6$. La temperatura más alta se registró en el sitio 2 en abril, agosto y noviembre (30.1°C , 30.6°C y 27.4°C , respectivamente) (Fig. 50 b).

pH.-

El valor de este parámetro fue también espacialmente homogéneo, con el valor promedio anual más bajo registrado en el sitio 1 (7.7 ± 0.3) y el más alto en el sitio 2 con un valor de 7.8 ± 0.5 (Fig. 51 a).

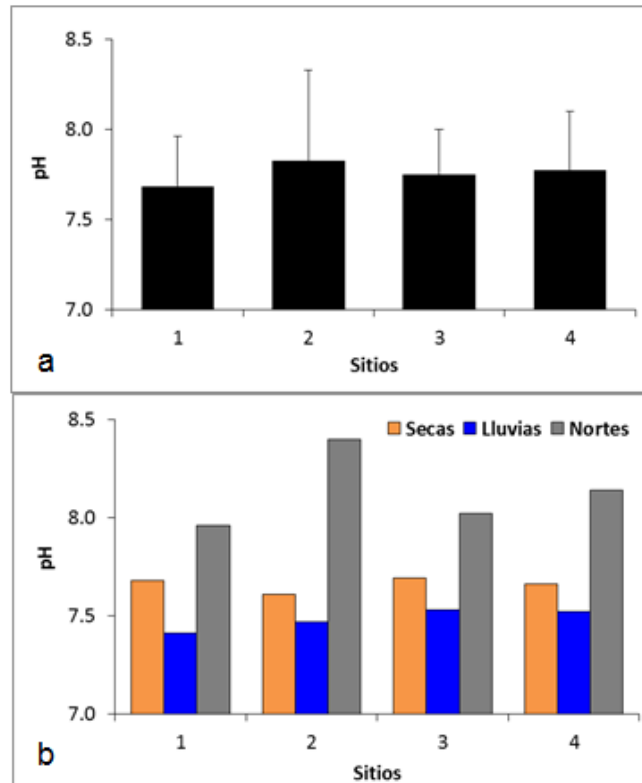


Fig. 51.- Valores de pH anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018.

Durante la temporada de nortes (noviembre) se presentó el valor promedio más alto de pH (8.1 ± 0.2), seguido de la época de secas (abril) con un valor de 7.7 ± 0.04 , y la temporada de lluvias (agosto) registró el valor promedio más bajo (7.5 ± 0.05). El valor más bajo de pH en secas se presentó en el sitio 2 (7.6), en lluvias en el sitio 1 (7.4) y en nortes en el sitio 1 (8.0) (Fig. 51 b). Se considera que valores de pH entre 6.0 y 8.5 son los normales en un cuerpo de agua natural (Chapman, 1996).

Oxígeno Disuelto.-

La concentración de oxígeno disuelto en la Laguna Chile Verde durante el período de monitoreo se mantuvo por arriba del límite mínimo de 5 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática (línea roja Fig. 52 a y b). La concentración promedio anual más alta se registró en el sitio 4 (8.2 mg/l \pm 1.1) y el más bajo en el sitio 1 con 7.2 mg/l \pm 0.2 (Fig. 52 a).

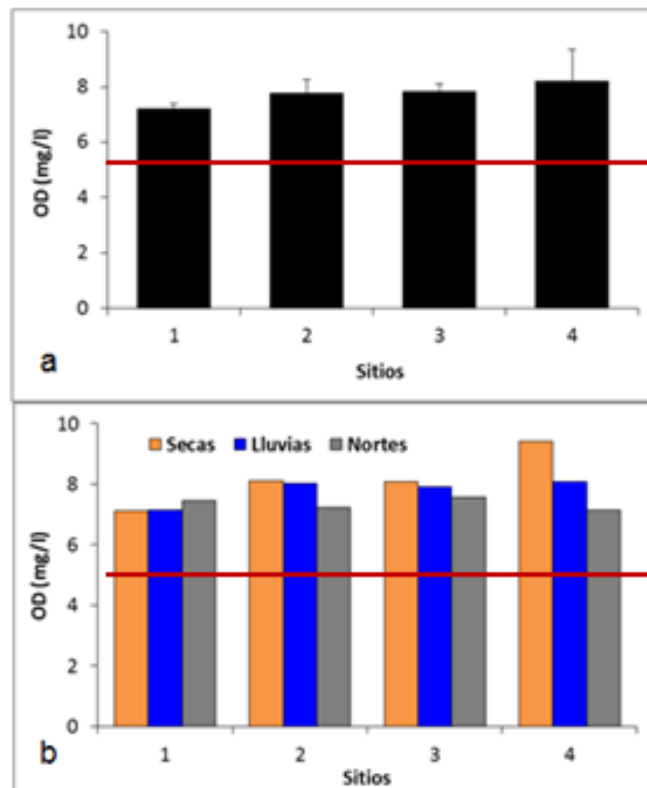


Fig.52.- Valores de oxígeno disuelto (OD) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática.

Durante el mes de abril (secas) se registró la concentración promedio más alta de oxígeno disuelto (8.2 mg/l \pm 0.9), seguido del mes de agosto (lluvias) con 7.8 mg/l \pm 0.4, y el valor más bajo en el mes de noviembre (nortes) con 7.4 mg/l \pm 0.2. Destaca el sitio 4 en dónde se registró la concentración más alta durante las temporadas de secas (9.4 mg/l) y lluvias (8.2 mg/l), mientras que en nortes el valor mayor se observó en el sitio 3 (7.6 mg/l) (Fig. 52 b).

Turbidez.-

Debido a fallas en el sensor de turbidez de la sonda multiparamétrica, no se registraron datos para el mes de noviembre (nortes). Como en los otros cuerpos de agua, la turbidez presenta una alta variabilidad espacial y temporal. El valor promedio anual más alto se registró en los sitios 1 (35.0 NTU \pm 8.8) y 4 (14.5 NTU \pm 10.3) localizados en los extremos sur y norte del sistema, respectivamente, en zonas someras que facilitan la resuspensión de sedimentos a la columna de agua. Los valores más bajos se registraron en los sitios 2 (9.0 NTU \pm 1.6) y 3 (9.3 NTU \pm 1.8), ubicados en el centro de la laguna (Fig. 53 a).

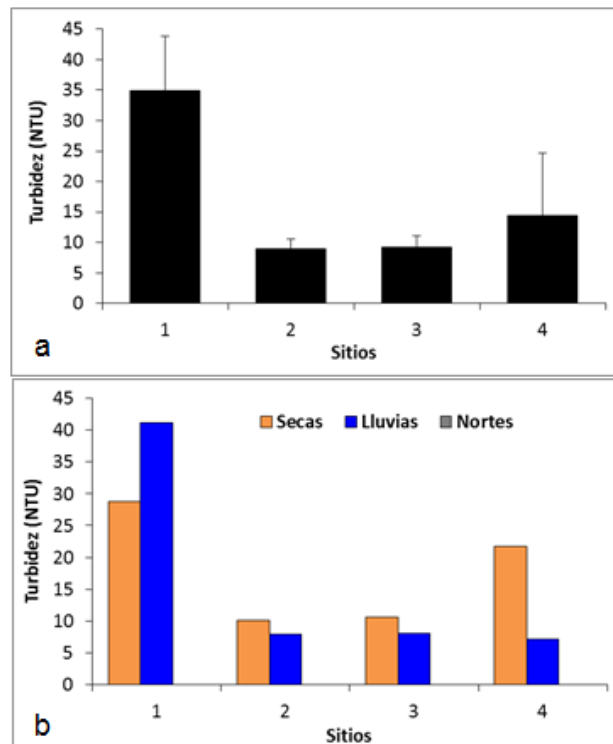


Fig. 53.- Valores de turbidez anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018.

Durante la temporada de secas (abril) se observó el valor promedio de turbidez más elevado (17.8 NTU \pm 9.0), seguido de la época de lluvias (16.1 NTU \pm 16.8). Destaca el sitio 1 dónde se registró la turbidez más alta en las dos temporadas de monitoreo, con 28.7 NTU en secas y 41.2 NTU en lluvias (Fig. 53 b).

Salinidad.-

La salinidad fue espacialmente homogénea en todo el cuerpo de agua, con un valor promedio anual de $2.1 \text{ ‰} \pm 0.3$ en los sitios 1 y 3, y de $2.0 \text{ ‰} \pm 0.2$ en los sitios 1 y 4 (Fig. 54 a).

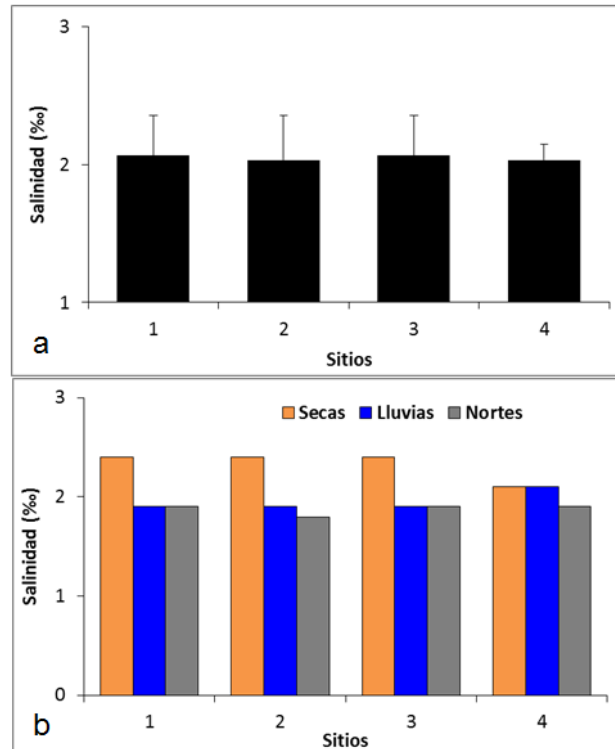


Fig. 54.- Valores de salinidad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018.

La temporada de secas (abril) registró el valor promedio de salinidad más alto ($2.3 \text{ ‰} \pm 0.2$), seguida de la época de lluvias (agosto) con un valor de $2.0 \text{ ‰} \pm 0.1$, y con el valor más bajo de $1.9 \text{ ‰} \pm 0.1$ en la época de nortes (noviembre). En los sitios 1 a 3 durante la época de secas (abril) se registró el valor más alto (2.4 ‰) de todo el período de monitoreo (Fig. 54 b).

Conductividad.-

Al igual que la salinidad, la conductividad fue espacialmente homogénea en todo el sistema, con el valor promedio anual más alto en los sitios 1 y 3 ($4.0 \text{ mS/cm} \pm 0.4$), y el más bajo en el sitio 2 con $3.8 \text{ mS/cm} \pm 0.6$ (Fig. 55 a).

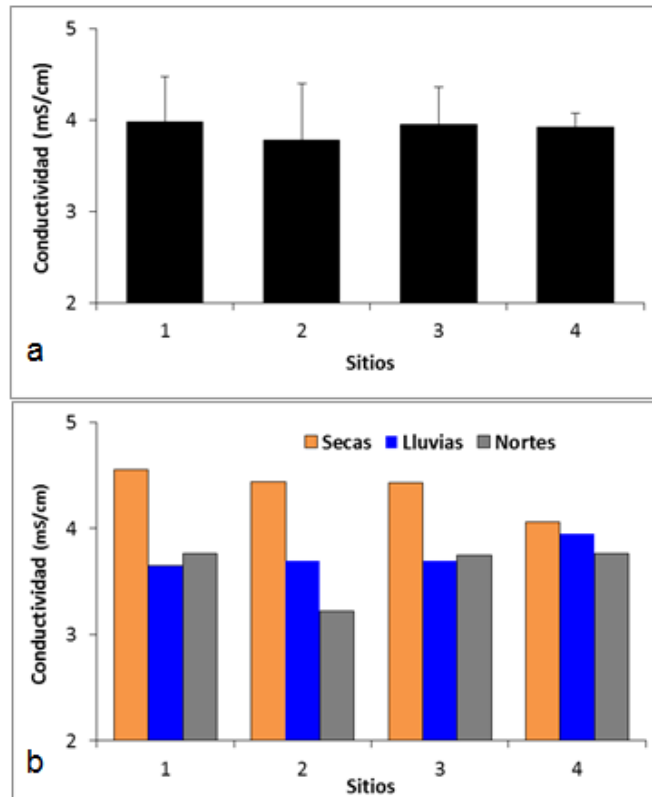


Fig. 55.- Valores de conductividad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018.

Temporalmente, el valor promedio más alto se registró en el mes de abril (secas) con $4.4 \text{ mS/cm} \pm 0.2$, seguido del mes de agosto (lluvias) con $3.8 \text{ mS/cm} \pm 0.1$ y del mes de noviembre (nortes) con el valor más bajo de $3.6 \text{ mS/cm} \pm 0.3$. En el sitio 1 se registró el valor más alto de conductividad (4.6 mS/cm) durante la época de secas (Fig. 55 b).

4.2.3.2.- Fisicoquímicos 2017-2018:

Temperatura.-

En el mes de abril (secas), el valor promedio de temperatura fue mayor en 2017 que en 2018 (30.2 °C ± 0.7 y 29.9 °C ± 0.2, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 4 (31.1 °C), y en 2018 en el sitio 2 con 30.1 °C (Fig. 56 a).

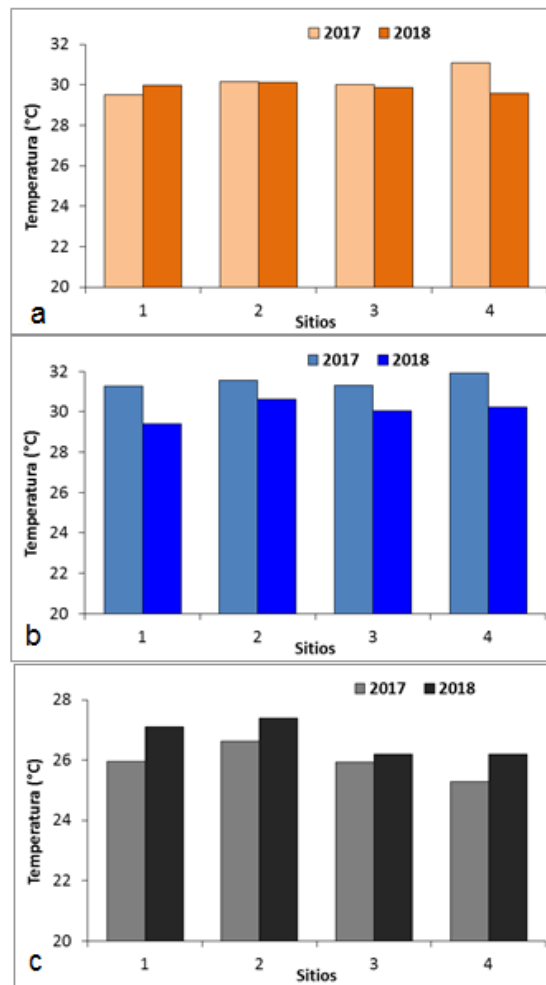


Fig.56.- Comparación de la temperatura en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En el mes de agosto (lluvias), el valor promedio de temperatura fue mayor en 2017 que en 2018 (31.5 °C ± 0.3 y 30.1 °C ± 0.5, respectivamente). En 2017 el valor

más alto se registró en el sitio 4 (31.9 °C), y en 2018 en el sitio 2 con 30.6 °C (Fig. 56 b).

Para el mes de noviembre (nortes), el valor promedio de temperatura fue mayor en 2018 que en 2017 (26.7 °C ± 0.6 y 26.0 °C ± 0.5, respectivamente). El valor más alto se registró en el sitio 2 en 2017 (26.6 °C) y 2018 (27.4 °C) (Fig. 56 c).

pH.-

En el mes de abril (secas), el valor promedio de pH fue mayor en 2017 que en 2018 (8.4 ± 0.1 y 7.7 ± 0.04, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 2 (8.5), y en 2018 en el sitio 3 con 7.7 (Fig. 57 a).

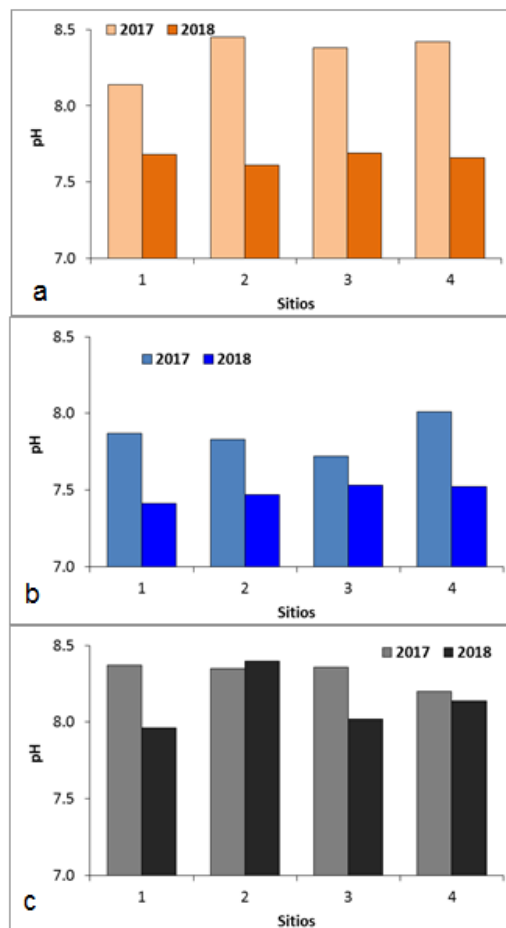


Fig.57.- Comparación de pH en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En el mes de agosto (lluvias), el valor promedio de pH fue mayor en 2017 que en 2018 (7.9 ± 0.1 y 7.5 ± 0.05 , respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 4 (8.0), y en 2018 en el sitio 3 con 7.5 (Fig. 57 b).

En noviembre (nortes), el valor promedio de pH fue mayor en 2017 que en 2018 (8.3 ± 0.1 y 8.1 ± 0.2 , respectivamente). En 2017 El valor más alto fue de 8.4 en el sitio 1 en 2017 y en el sitio 2 en 2018 (Fig. 57 c).

Oxígeno Disuelto. -

Durante los dos años de monitoreo, en la Laguna Chile Verde el nivel de oxígeno disuelto fue mayor al de 5 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática (Fig. 58 a, b y c). En abril (secas) la concentración media fue similar en 2017 ($8.3 \text{ mg/l} \pm 0.8$) y 2018 ($8.2 \text{ mg/l} \pm 0.9$), con el valor más alto en el sitio 3 (9.0 mg/l) en 2017, y en el sitio 4 (9.1 mg/l) en 2018 (Fig. 58 a).

En agosto (lluvias), la concentración media fue mayor en 2018 que en 2017 ($7.8 \text{ mg/l} \pm 0.4$ y $7.6 \text{ mg/l} \pm 0.5$, respectivamente). Nuevamente, en 2017 el valor más alto se registró en el sitio 3 (8.2 mg/l), y en 2018 en el sitio 4 (8.1 mg/l) (Fig. 58 b).

En noviembre (nortes), la concentración media de oxígeno disuelto fue mayor en 2017 que en 2018 ($10.3 \text{ mg/l} \pm 1.5$ y $7.4 \text{ mg/l} \pm 0.2$, respectivamente), con el valor más alto en el sitio 3 en 2017 (12.3 mg/l) y en 2018 (7.6 mg/l) (Fig. 58 c).

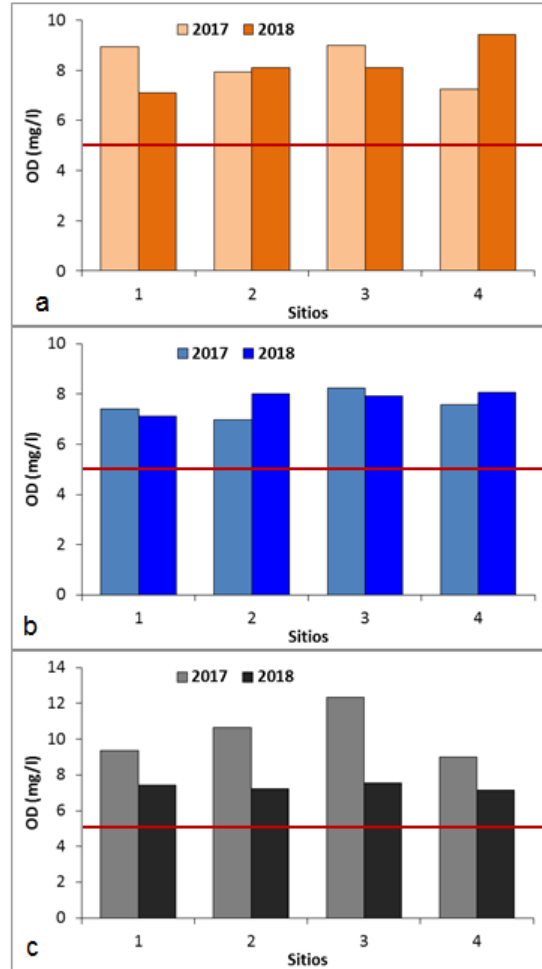


Fig.58.- Comparación de oxígeno disuelto en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática.

Turbidez -

En noviembre de 2018 no se registró la turbidez por fallas en este sensor durante el monitoreo, por lo que no se considera la época de nortes para la comparación del comportamiento de esta variable en los dos años del estudio. En abril (secas), el valor promedio fue mayor en 2017 que en 2018 ($18.8 \text{ NTU} \pm 10.5$ y $17.8 \text{ NTU} \pm 9.0$, respectivamente), en donde el valor más alto en los dos años se registró en el sitio 1 con 32.5 NTU en 2017 y 28.7 NTU en 2018 (Fig. 59 a).

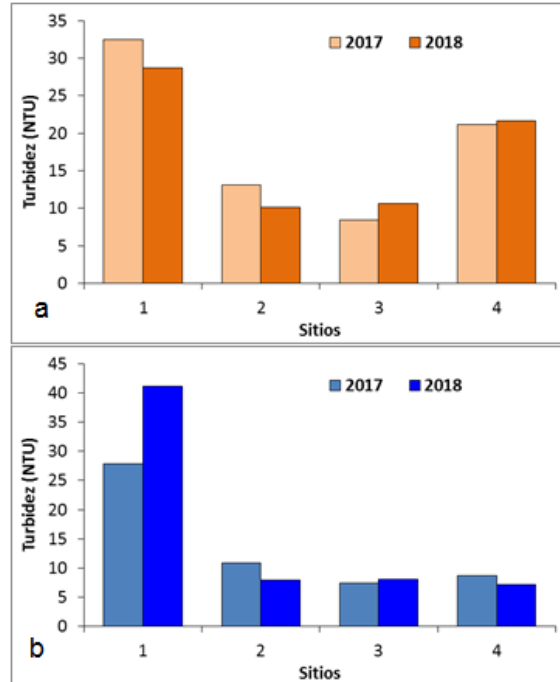


Fig.59.- Comparación de la turbidez en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril) y (b) lluvias (agosto).

En agosto (lluvias), el valor promedio de turbidez fue mayor en 2018 que en 2017 (16.1 NTU \pm 16.8 y 13.7 NTU \pm 9.5, respectivamente), en dónde nuevamente el sitio 1 registró los valores más altos en 2017 (17.8 NTU) y 2018 (41.2 NTU) (Fig. 59 b).

Salinidad.-

En abril (secas), el valor promedio de salinidad fue mayor en 2017 (2.7 ‰ \pm 0.1) que en 2018 (2.3 ‰ \pm 0.2). El valor más alto se registró en el sitio 1 (2.9 ‰) en 2017 (Fig. 60 a).

En agosto (lluvias), el valor promedio de salinidad fue mayor en 2017 que en 2018 (2.2 ‰ \pm 0.1 y 2.0 ‰ \pm 0.1, respectivamente). El valor más alto de 2.2 ‰ se registró en los sitios 1 y 4 en 2017 (Fig. 60 b).

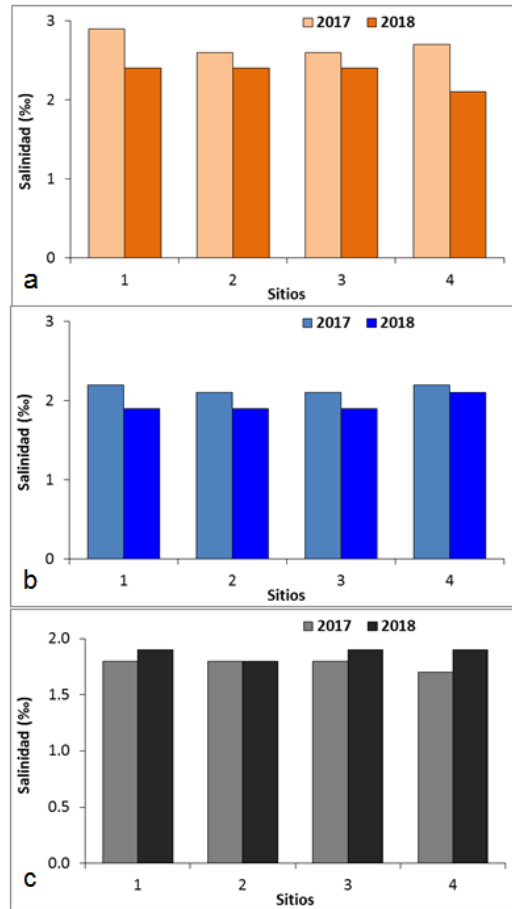


Fig.60.- Comparación de la salinidad en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En noviembre (nortes), el valor promedio de salinidad fue similar en 2017 (1.8 ‰ ± 0.1) y en 2018 (1.9 ‰ ± 0.1). El valor más alto de 1.9 ‰ se registró en los sitios 1, 3 y 4 en 2018 (Fig. 60 c).

Conductividad.-

En abril (secas), el valor promedio de conductividad fue mayor en 2017 que en 2018 (5.0 mS/cm ± 0.2 y 4.4 mS/cm ± 0.2, respectivamente), en dónde el valor más alto se registró en el sitio 1 en 2017 (5.3 mS/cm) y 2018 (4.6 mS/cm) (Fig. 61 a).

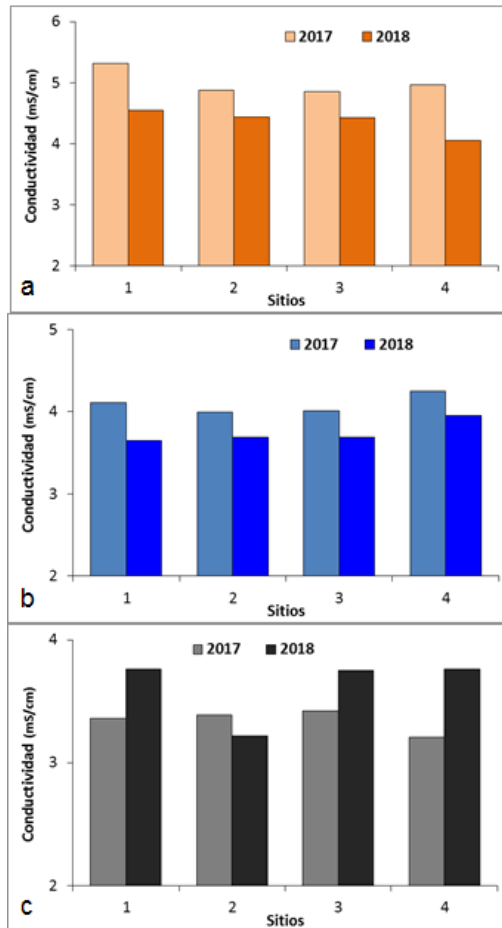


Fig.61.- Comparación de la conductividad en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), el valor promedio de conductividad fue mayor en 2017 que en 2018 (4.1 mS/cm \pm 0.1 y 3.8 mS/cm \pm 0.1, respectivamente), en dónde el valor más alto se registró en el sitio 4 en 2017 (4.3 mS/cm) y 2018 (4.0 mS/cm) (Fig. 61 b).

En noviembre (nortes), el valor promedio de conductividad fue mayor en 2018 que en 2017 (3.6 mS/cm \pm 0.3 y 3.4 mS/cm \pm 0.1, respectivamente), en dónde el valor más alto fue de 3.8 mS/cm en los sitios 1, 3 y 4 en 2018 (Fig. 61 c).

4.2.3.3.-Nutrientes 2018:

Para cuerpos de agua dulce solo se establecen criterios ecológicos de calidad del agua (CECAs) para amonio y fosfatos.

Nitritos.-

En Laguna Chile Verde se observó una importante variabilidad temporal y espacial. Así, en el sitio 1 se registró la concentración media más alta (0.005 mg/l \pm 0.002), y la más baja en el sitio 3 (0.0005 mg/l \pm 0.0004) (Fig. 62 a). El sitio 1 se localiza en el sur del sistema que es la más somera y por lo tanto con mayor mezcla de la materia orgánica del sedimento con la columna de agua, que podría explicar la mayor concentración observada.

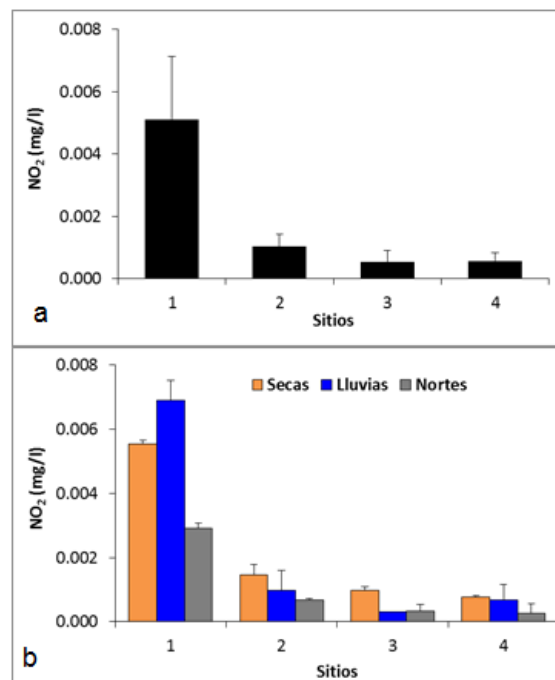


Fig.62.- Valores de nitritos (NO₂) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018.

Para este sistema, la concentración promedio más alta se registró en las temporadas de secas (abril) y lluvias (agosto) con 0.002 mg/l \pm 0.003, seguido del mes de noviembre (nortes) con 0.001 mg/l \pm 0.001. En el sitio 1 se presentó el

valor más alto en abril (0.006 mg/l), en agosto (0.007 mg/l) y en noviembre (0.003 mg/l) (Fig. 62 b).

Nitratos.

Para este parámetro se observó alta variabilidad espacial y estacional en la laguna. La concentración promedio anual más alta se registró en el sitio 1 (0.04 mg/l \pm 0.05) y la más baja en los sitios 2 y 4 con 0.009 mg/l \pm 0.005 (Fig. 63 a).

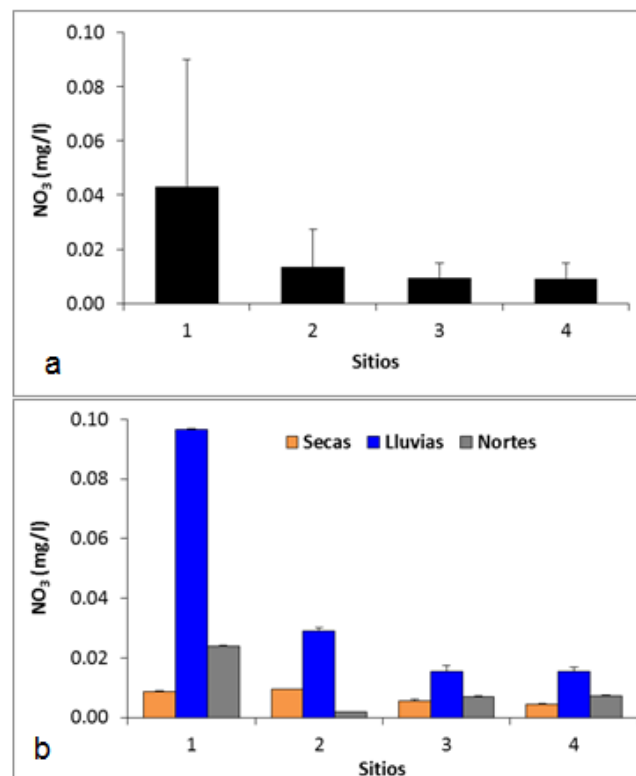


Fig.63.- Valores de nitratos (NO₃) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018.

La concentración promedio más alta por época climática se registró en lluvias (agosto) con 0.04 mg/l \pm 0.04, seguido de la época de secas (abril) con 0.007 mg/l \pm 0.002, y la más baja en secas (abril) con 0.004 mg/l \pm 0.01. En el sitio 1 se presentó el valor más alto en abril (0.010 mg/l), en agosto (0.10 mg/l) y en noviembre (0.02 mg/l) (Fig. 63 b). Estos resultados y las características del sistema, indican que las fuentes principales de nitratos son los escurrimientos superficiales y la resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, durante

las épocas de lluvias y nortes, así como la entrada de agua subterránea principalmente en el sitio 1.

Amonio.-

La concentración promedio anual más alta de amonio se registró en los sitios 1 (0.08 mg/l \pm 0.01) y 3 (0.11 mg/l \pm 0.06), cuyo valor es superior al LMP de 0.06 mg/l establecido por los CECAs para para la protección de la vida acuática de agua dulce (línea roja, Fig. 64 a); y el nivel más bajo se presentó en el sitio 4 (0.05 mg/l \pm 0.03).

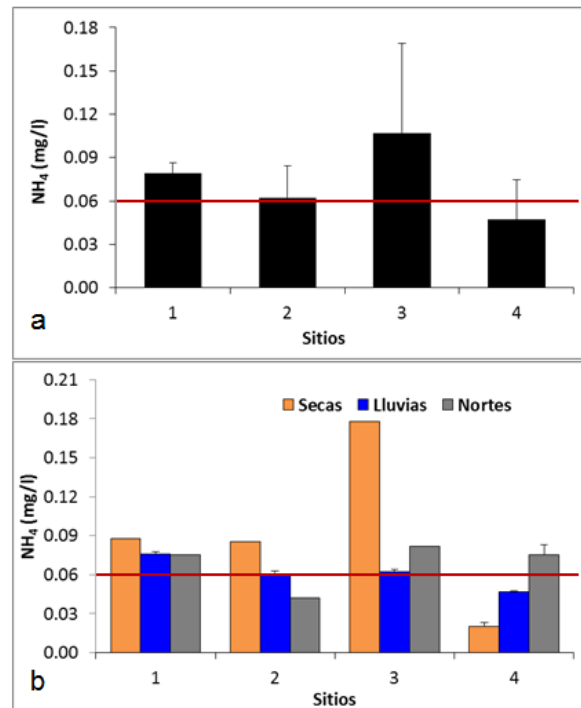


Fig.64.- Valores de amonio (NH₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua dulce.

En relación con el comportamiento temporal del amonio en Laguna Chile Verde, la concentración promedio mayor se registró en el mes de abril (secas) con 0.09 mg/l \pm 0.06, seguido del mes de noviembre (nortes) con 0.07 mg/l \pm 0.02, que son superiores al LMP de los CECAs de 0.06 mg/l; mientras que en agosto (lluvias) se registró el valor promedio más bajo (0.06 mg/l \pm 0.01). Es importante destacar que

durante las tres épocas climáticas, los sitios 1 y 3 registraron concentraciones superiores al LMP establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática (línea roja, Fig. 64 b). Las fuentes principales de amonio al sistema también son los escurrimientos superficiales y la resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, principalmente durante la época de nortes, así como la entrada de agua subterránea.

Fosfatos.

La variabilidad de este indicador en el sistema lagunar, se debió principalmente a la escala temporal. En la escala espacial, la mayor concentración promedio anual de fosfatos se registró en el sitio 3 (0.007 mg/l \pm 0.006) y la más baja en el sitio 1 con 0.004 mg/l \pm 0.003 (Fig. 65 a).

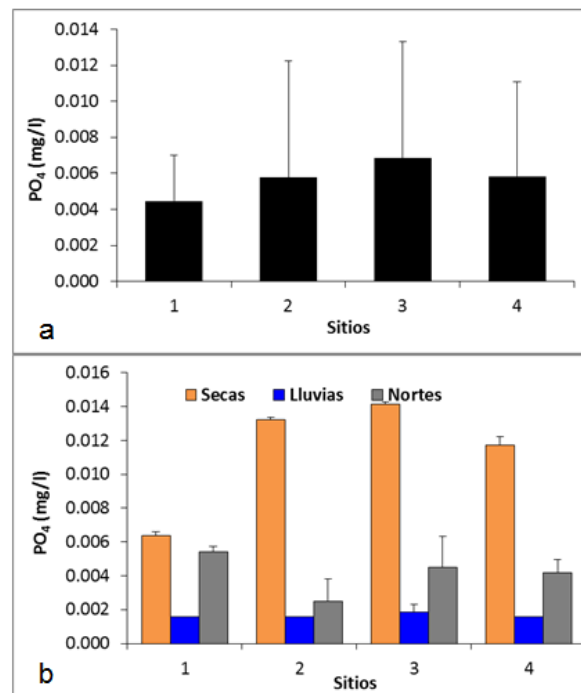


Fig.65.- Valores de amonio (PO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018.

La temporada de secas (abril) registró la concentración promedio más alta (0.011 mg/l \pm 0.003), seguido del mes de noviembre (nortes) con 0.004 mg/l \pm 0.001, y en agosto (lluvias) el valor más bajo (0.002 mg/l \pm 0.0001). En el sitio 3 se

registraron los niveles más altos en secas (0.014 mg/l) y (0.005 mg/l \pm 0.002) (Fig. 65 b).

En todo el sistema, las concentraciones de fosfatos fueron inferiores al LMP de 0.1 mg/l establecidos por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua dulce.

Silicatos.

Este parámetro tuvo un comportamiento espacial homogéneo, por lo que su concentración promedio anual en el sistema fue de 11.6 mg/l \pm 0.2 (Fig. 66 a).

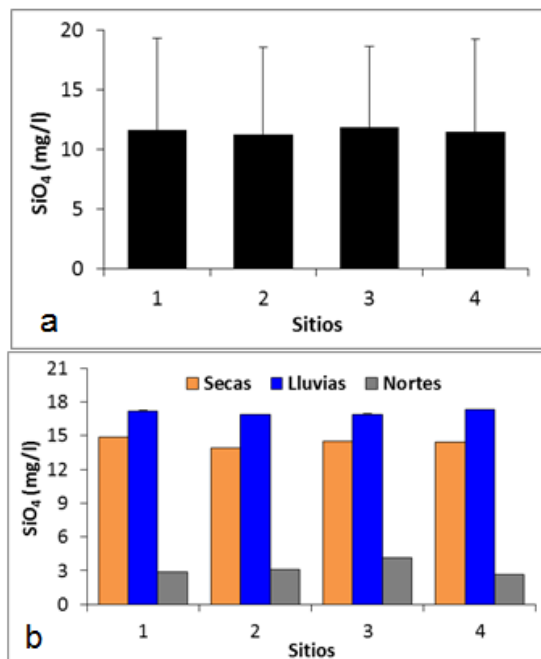


Fig.66.- Valores de silicatos (SiO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018.

En la época de lluvias (agosto) se presentó la concentración promedio más alta (17.1 mg/l \pm 0.2), seguida de la temporada de secas (abril) con 14.4 mg/l \pm 0.4 y la más baja durante la época de nortes (noviembre) con 3.2 mg/l \pm 0.6. La concentración más alta se registró en el sitio 1 (14.9 mg/l) durante la época de secas y la más baja en el sitio 1 (2.9 mg/l) en la temporada de nortes (Fig. 66 b).

Clorofila a.-

Las concentraciones promedio anual más altas de clorofila a se registraron en los sitios 3 ($2.7 \mu\text{g/l} \pm 0.6$) y 2 ($2.3 \mu\text{g/l} \pm 1.7$), y la más baja en el sitio 1 ($1.9 \mu\text{g/l} \pm 1.9$), todas con alta variabilidad temporal (Fig. 67 a y b).

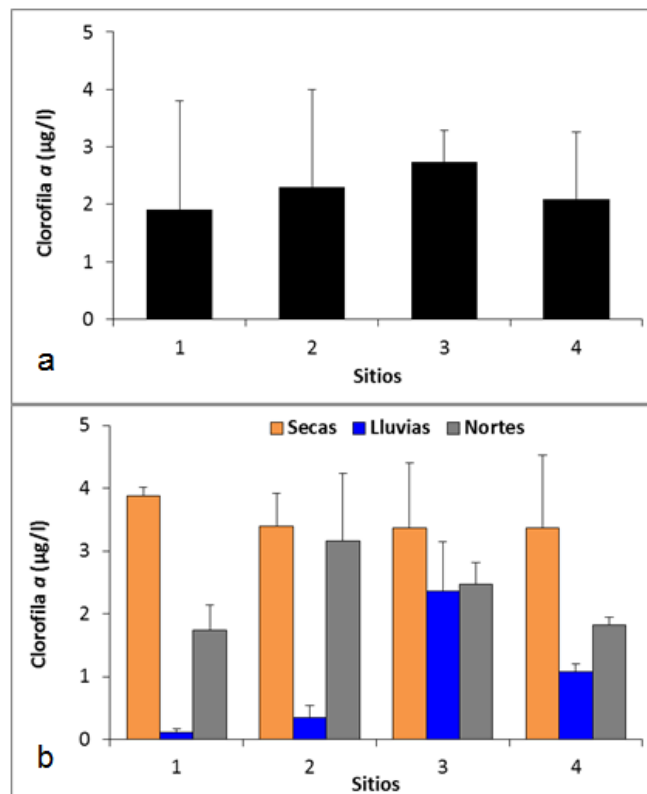


Fig.67.- Valores de clorofila a anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2018.

En la época de secas (abril) se registró la concentración promedio más alta ($3.5 \mu\text{g/l} \pm 0.3$), seguida de la temporada de nortes (noviembre) con $2.3 \mu\text{g/l} \pm 0.7$, y la más baja en lluvias (agosto) con $0.9 \mu\text{g/l} \pm 1.0$. Las concentraciones más altas se presentaron en el sitio 1 ($3.9 \mu\text{g/l}$) en secas, en el sitio 3 ($2.4 \mu\text{g/l}$) en lluvias, y en el sitio 2 ($3.2 \mu\text{g/l}$) en nortes (Fig. 67 b). Las concentraciones altas de clorofila a parecen estar asociadas a la concentración de fosfatos y amonio, principalmente.

4.2.3.4.- Nutrientes 2017-2018.-

Nitritos.-

En abril (secas), la concentración promedio de nitritos fue mayor en 2018 (0.002 mg/l \pm 0.002), ya que en 2017 este nutriente se encontraba en toda la laguna en valores cercanos al límite de detección de 0.0001 mg/l. En 2018, el sitio 1 presentó el valor más alto (0.006 mg/l) y el sitio 4 el más bajo (0.0008 mg/l) (Fig. 68 a).

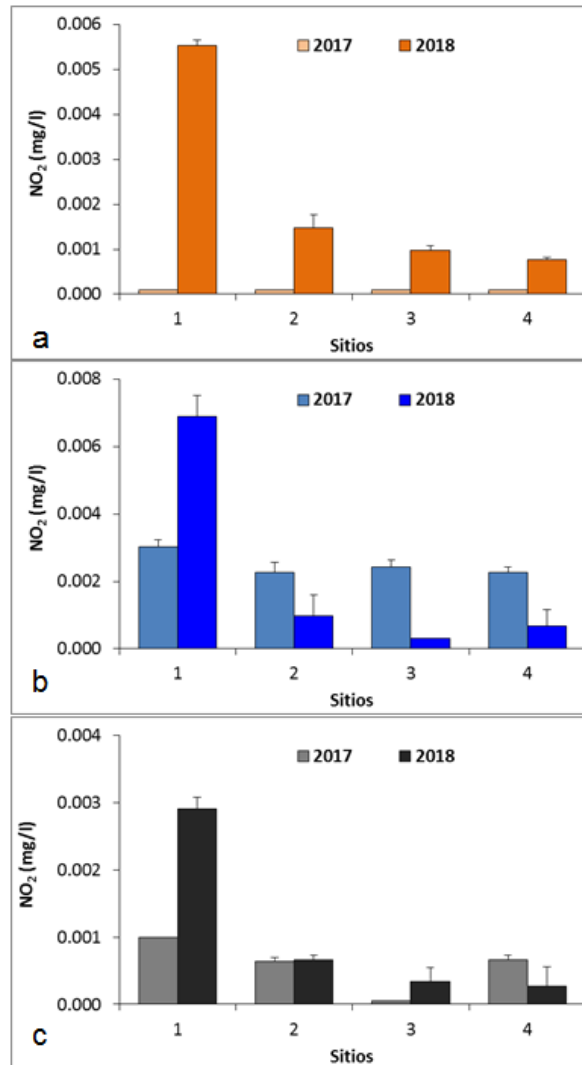


Fig.68.- Comparación de la concentración de nitritos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), la concentración media fue similar en los dos años ($0.002 \text{ mg/l} \pm 0.001$), sin embargo, en 2018 se registraron valores extremos en los sitios 1 (0.007 mg/l) y 4 (0.001 mg/l) (Fig. 68 b).

En noviembre (nortes), la concentración promedio fue mayor en 2018 que en 2017 ($0.001 \text{ mg/l} \pm 0.001$ y $0.0006 \text{ mg/l} \pm 0.0004$, respectivamente), destacando el sitio 1 con el valor más alto en 2018 (0.003 mg/l) y en 2017 (0.001 mg/l) (Fig. 68 c).

Nitratos. -

En abril (secas), la concentración promedio de nitratos fue mayor en 2018 ($0.007 \text{ mg/l} \pm 0.002$), que en 2017 ($0.003 \text{ mg/l} \pm 0.004$). En 2018, los sitios 1 (0.009 mg/l) y 2 (0.010 mg/l) presentaron el valor más alto (Fig. 69 a).

En agosto (lluvias), la concentración media también fue mayor en 2018 ($0.039 \text{ mg/l} \pm 0.039$) que en 2017 ($0.007 \text{ mg/l} \pm 0.003$). El sitio 1 presentó durante los dos años los valores más altos de 0.011 mg/l en 2017 y de 0.097 mg/l en 2018 (Fig. 69 b).

En noviembre (nortes), la concentración promedio fue mayor en 2018 que en 2017 ($0.006 \text{ mg/l} \pm 0.001$ y $0.010 \text{ mg/l} \pm 0.010$, respectivamente), destacando el sitio 1 con el valor más alto en 2018 (0.027 mg/l) y el sitio 3 en 2017 (0.008 mg/l) (Fig. 69 c).

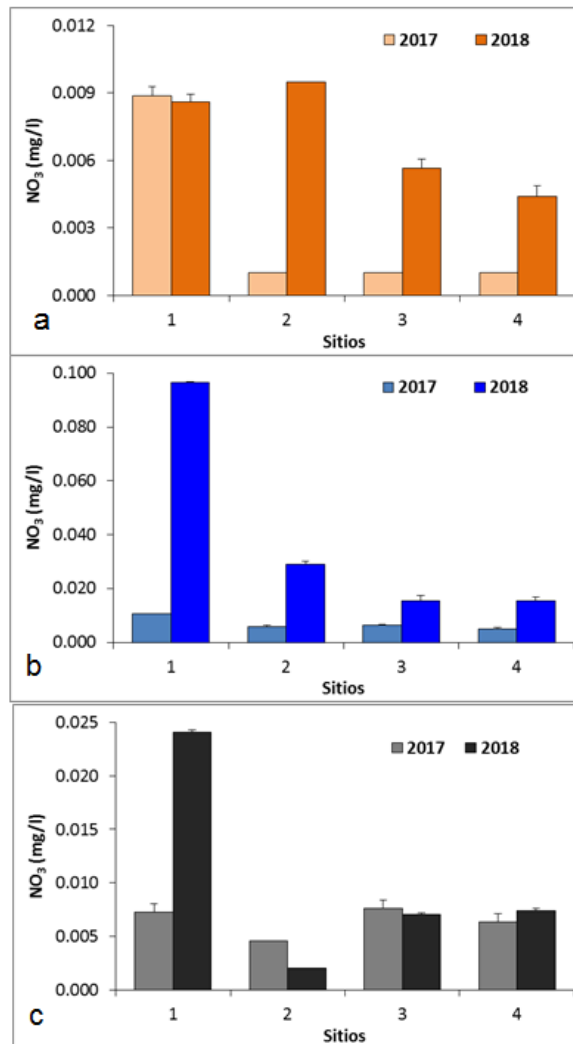


Fig.69.- Comparación de la concentración de nitratos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

Amonio.-

En abril (secas), la concentración promedio fue mayor en 2018 que en 2017 (0.09 mg/l ± 0.06 y 0.06 mg/l ± 0.03, respectivamente). Es importante destacar que en 2018, la mayoría de los sitios presentaron concentraciones superiores al LMP de 0.06 mg/l, establecidos por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua dulce (Fig. 70 a).

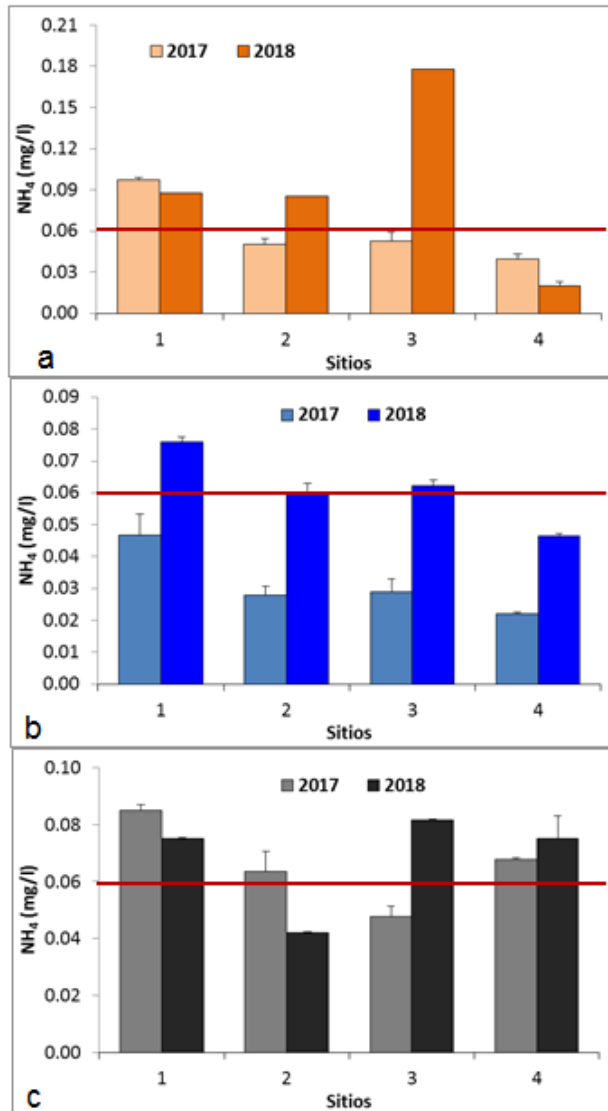


Fig. 70.- Comparación de la concentración de amonio en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua dulce.

En agosto (lluvias), la concentración promedio fue mayor en 2018 que en 2017 (0.06 mg/l \pm 0.01 y 0.03 mg/l \pm 0.01, respectivamente). Para este mes, sólo en 2018 se sobrepasó el LMP de los CECAs en los sitios 1 (0.08 mg/l) y 2 (0.062 mg/l) (Fig. 70 b).

En noviembre (nortes), la concentración media fue igual en los dos años (0.07 mg/l \pm 0.02), y en general en todo el sistema se sobrepasó el LMP de los CECAs durante 2017 y 2018 (Fig. 70 c).

Fosfatos. -

En abril (secas), la concentración promedio fue mayor en 2018 que en 2017 (0.011 mg/l \pm 0.003 y 0.006 mg/l \pm 0.002, respectivamente). Destaca los sitios 2 y 3, debido a que presentaron los valores más altos en 2018 (0.013 mg/l y 0.014 mg/l, respectivamente) y el más bajo en 2017 (0.005 mg/l y 0.004 mg/l, respectivamente), lo cual indica un proceso de enriquecimiento orgánico en el sistema (Fig. 71 a).

En agosto (lluvias), la concentración promedio fue mayor en 2018 (0.002 mg/l \pm 0.0001) que en 2017 (0.001 mg/l \pm 0.0003). Nuevamente, se observa que en la laguna está ocurriendo un proceso de enriquecimiento orgánico de 2017 a 2018, observado en los sitios 3 y 4 con los valores más altos en 2018 (0.002 mg/l) y el más bajo en 2017 (0.001 mg/l) (Fig. 71 b).

En noviembre (nortes), se observa también este proceso de enriquecimiento orgánico, pero ahora en todos los sitios. Así, la mayor concentración promedio se registró en 2018 (0.004 mg/l \pm 0.001) y la menor en 2017 (0.001 mg/l \pm 0.0003) (Fig. 71 c).

Es importante mencionar que este aumento en la concentración de los fosfatos en todo el sistema, aún no sobrepasa el LMP de 0.1 mg/l establecidos en los CECAS para la protección de la vida acuática de agua dulce.

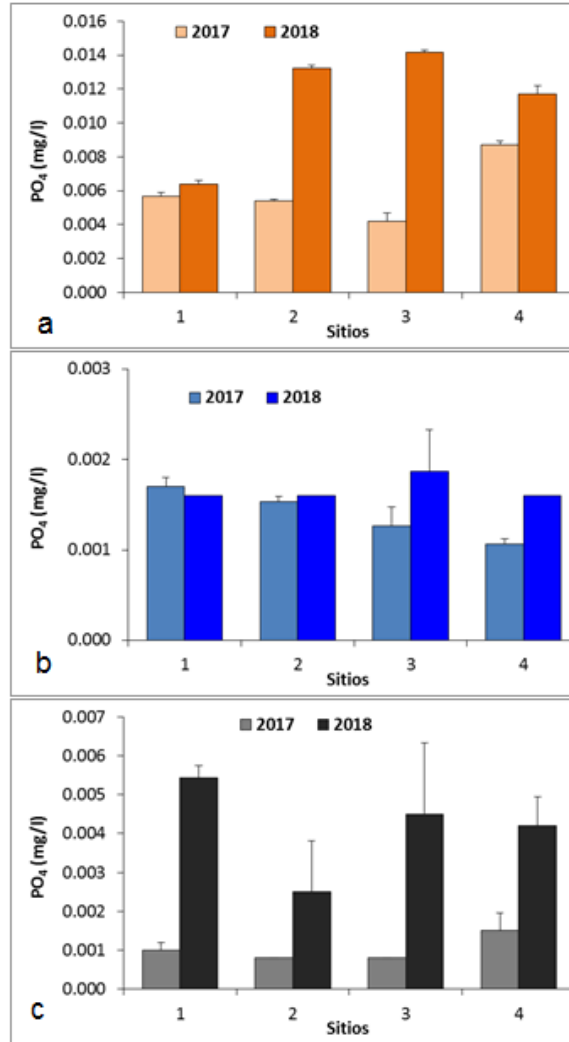


Fig. 71.- Comparación de la concentración de fosfatos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

Silicatos.-

En abril (secas), la concentración promedio de silicatos fue mayor en 2018 que en 2017 (14.4 mg/l ± 0.4 y 11.6 mg/l ± 2.2, respectivamente), debido a los sitios 2 a 4. Mientras que en el sitio 1 se mantuvo un valor de 14.9 mg/l en los dos años (Fig. 72 a).

En agosto (lluvias), la concentración de silicatos fue mayor en 2018 que en 2017 (17.1 mg/l ± 0.2 y 4.3 mg/l ± 0.2, respectivamente). Esta diferencia se debió a que

de acuerdo al Sistema Meteorológico Nacional, en agosto de 2018 se registró una menor precipitación pluvial (129.5 mm) que en 2017 (205.1 mm); lo que permitió que se mantuviera la influencia de las descargas de agua subterránea a la laguna. El sitio 4 presentó el valor mayor (17.3 mg/l) en 2018, mientras que en 2017 fue en el sitio 3 (4.4 mg/l) (Fig. 72 b).

En noviembre (nortes), la concentración promedio fue mayor en 2017 que en 2018 (5.0 mg/l \pm 0.2 y 3.2 mg/l \pm 0.6, respectivamente). El sitio 3 presentó el valor más alto en 2017 (5.2 mg/l) y en 2018 (4.1 mg/l) (Fig. 72 c).

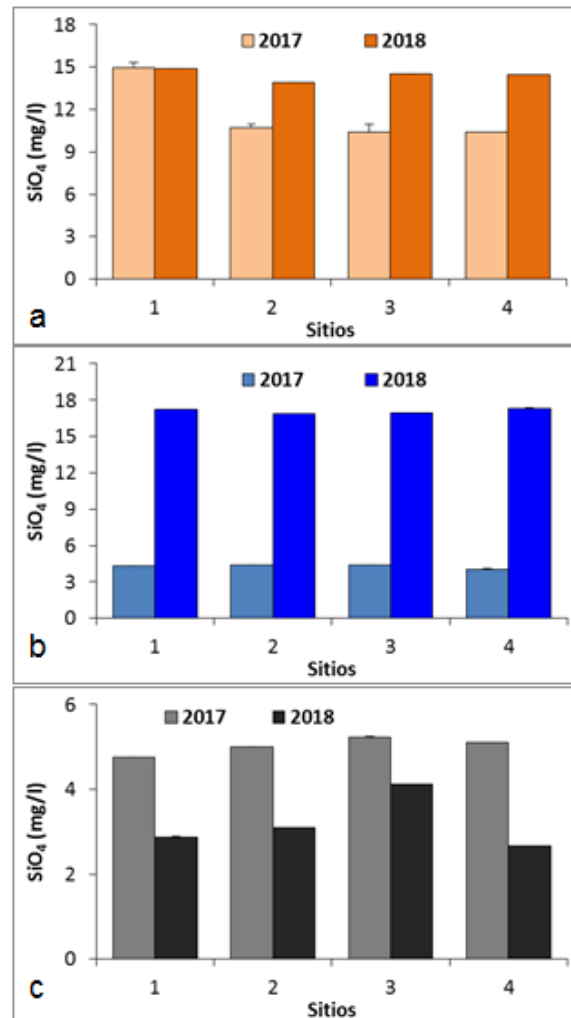


Fig. 72.- Comparación de la concentración de silicatos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

Clorofila a.-

En abril (secas) la concentración de clorofila a fue mayor en 2018 que en 2017 (3.5 µg/l ± 0.3 y 1.6 µg/l ± 0.6, respectivamente), con el valor más alto en el sitio 1 en 2018 (3.9 µg/l) y el sitio 4 (2.1 µg/l) en 2017 (Fig. 73 a).

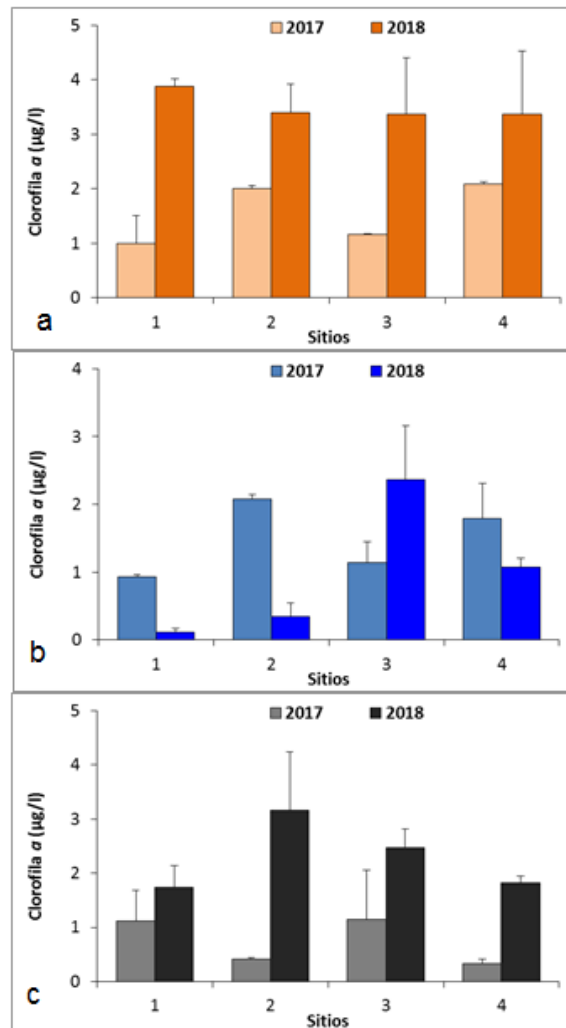


Fig. 72.- Comparación de la concentración de clorofila a en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias) la concentración de clorofila a fue mayor en 2017 que en 2018 (1.5 µg/l ± 0.5 y 1.0 µg/l ± 1.0, respectivamente), con el valor más alto en el sitio 2 en 2017 (2.1 µg/l) y en el sitio 3 en 2018 (2.4 µg/l) (Fig. 72 b).

En noviembre (nortes) la concentración de clorofila *a* fue mayor en 2018 que en 2017 ($2.3 \mu\text{g/l} \pm 0.7$ y $0.8 \mu\text{g/l} \pm 0.4$, respectivamente), con el valor más alto en el sitio 2 en 2018 ($2.5 \mu\text{g/l}$) y en el sitio 3 en 2017 ($1.2 \mu\text{g/l}$) (Fig. 72 c).

4.2.4. - Laguna Salada

4.2.4.1.-Fisicoquímicos 2018:

Temperatura. -

Debido a que Laguna Salada tiene una superficie pequeña y de poca profundidad, no se observó variabilidad espacial, solamente a nivel temporal. Así, el sitio 1 presentó el valor promedio anual mayor ($31.2^\circ\text{C} \pm 2.3$) y el más bajo en el sitio 3 con $29.7^\circ\text{C} \pm 2.2$ (Fig. 74 a).

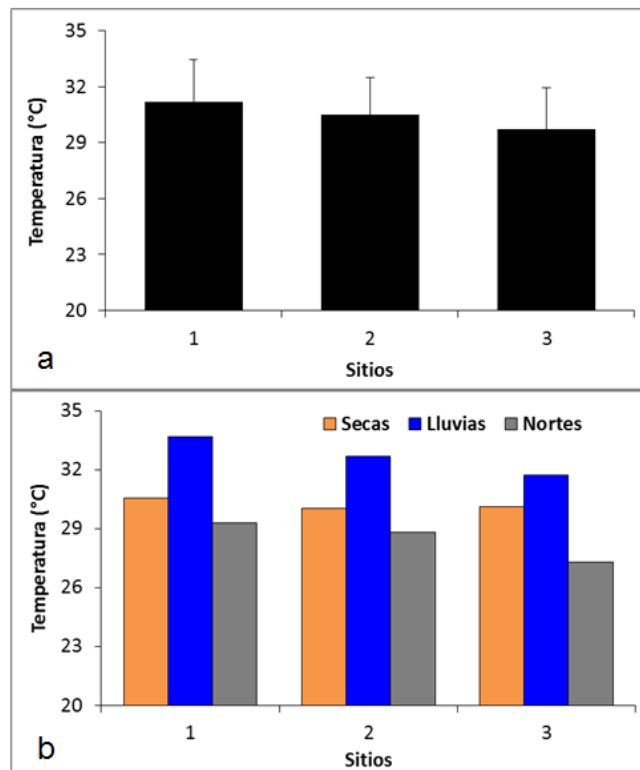


Fig.74.- Valores de temperatura anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2018.

La época de lluvias (agosto) registró el valor promedio mayor ($32.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.0$), seguido de la temporada de secas (abril) con $30.2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3$ y la menor temperatura durante la época de nortes (noviembre) con $28.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.0$. El sitio 1 presentó el valor de temperatura más alta en las tres temporadas, con $30.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en secas, $33.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en lluvias y $29.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en nortes (Fig. 74 b).

pH.

El pH presentó baja variabilidad espacial, en donde el valor promedio anual más alto se presentó en el sitio 2 (8.23 ± 0.51), y el más bajo (8.1 ± 0.5) en los sitios 1 y 3 (Fig. 75 a).

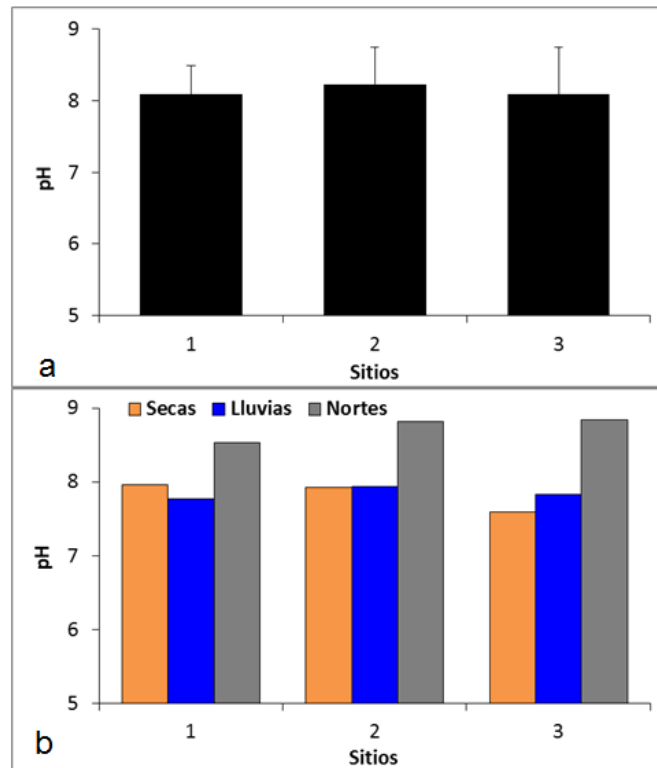


Fig.75.- Valores de pH anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2018.

Se observó una importante variabilidad temporal en el valor de pH, con la época de nortes (noviembre) registrando el valor promedio más alto (8.7 ± 0.2), mientras que las épocas de secas (abril) y lluvias (agosto) presentaron el mismo valor de

7.8 ± 0.1. Como se indicó más arriba, solo se observó variabilidad espacial durante la temporada de nortes, en dónde el valor más alto se registró en los sitios 2 y 3 (8.8) y el más bajo en el sitio 1 (8.5) (Fig. 75 b).

Oxígeno Disuelto.-

De acuerdo a los CECAs que establecen que el valor mínimo de oxígeno disuelto (OD) para la protección de la vida acuática debe ser de 5 mg/l, se puede observar en la figura 76 a y b (línea roja), que la Laguna Salada presentó una adecuada concentración de este parámetro y baja variabilidad espacial. Con valores promedio anual de 7.6 mg/l ± 0.5 para los sitios 1 y 2, y de 7.4 mg/l ± 1.6 para el sitio 3 (Fig. 76 a).

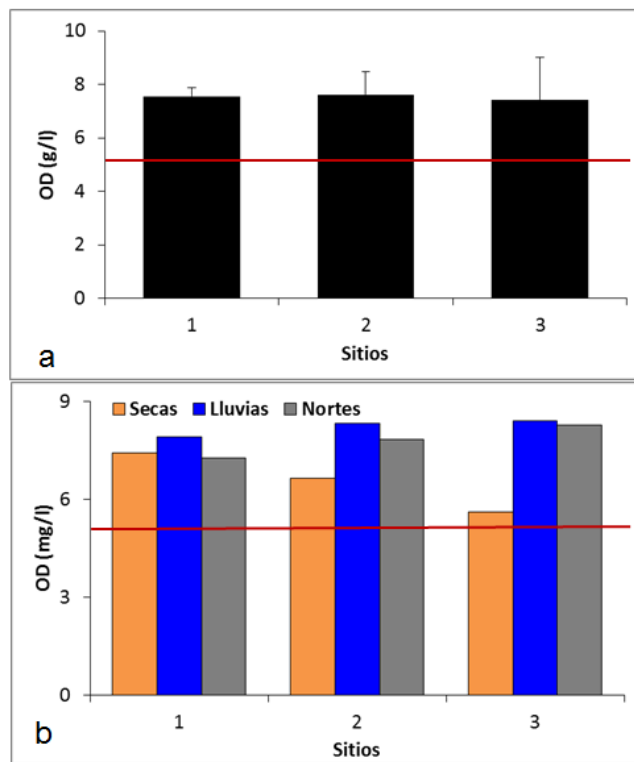


Fig.76.- Valores de oxígeno disuelto (OD) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2018. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática.

Durante la temporada de lluvias (agosto) se registró la concentración promedio más alta (8.2 mg/l ± 0.3), seguido de la época de nortes (noviembre) con un valor

promedio de 7.8 mg/l \pm 0.5, mientras que en abril (secas) se presentó el más bajo (6.6 mg/l \pm 0.9). La concentración más alta en la época de secas se observó en el sitio 1 (7.4 mg/l), y en lluvias (8.4 mg/l) y nortes (8.3 mg/l) en el sitio 3 (Fig. 76 b).

Turbidez. -

Al igual que en los otros cuerpos de agua, no se cuenta con datos de turbidez para el mes de noviembre, debido a fallas en el sensor de la sonda multiparamétrica. En Laguna Salada este parámetro mostró una alta variabilidad espacial y temporal, que registró un gradiente de sur a norte del sistema, en dónde el sitio 1 presentó el valor promedio anual más alto de 49.2 NTU \pm 67.4, seguido de los sitios 2 y 3 con valores de 9.4 NTU \pm 10.8 y 2.8 NTU \pm 4.0, respectivamente (Fig. 77 a).

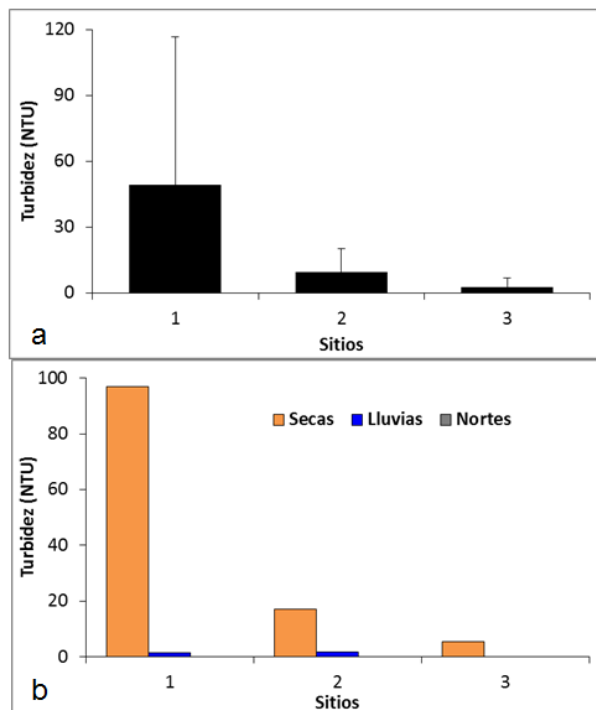


Fig.77.- Valores de turbidez anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2018.

Durante la temporada de secas se reportó la concentración promedio más alta (39.8 NTU \pm 49.7), seguida de la época de lluvias (1.1 NTU \pm 0.9); destacando el sitio 1 en la época de secas en dónde se registró el valor más alto de 96.8 NTU

(Fig. 77 b). No obstante, es importante destacar que estos valores de turbidez son muy bajos.

Salinidad.-

La salinidad presentó un pequeño gradiente espacial de sur a norte del sistema. Así, el valor promedio anual más alto se registró en el sitio 3 (15.0 ‰ ± 2.5), seguido del sitio 2 (14.5 ‰ ± 0.8) y de 14.2 ‰ ± 0.3 en el sitio 1 (Fig. 78 a).

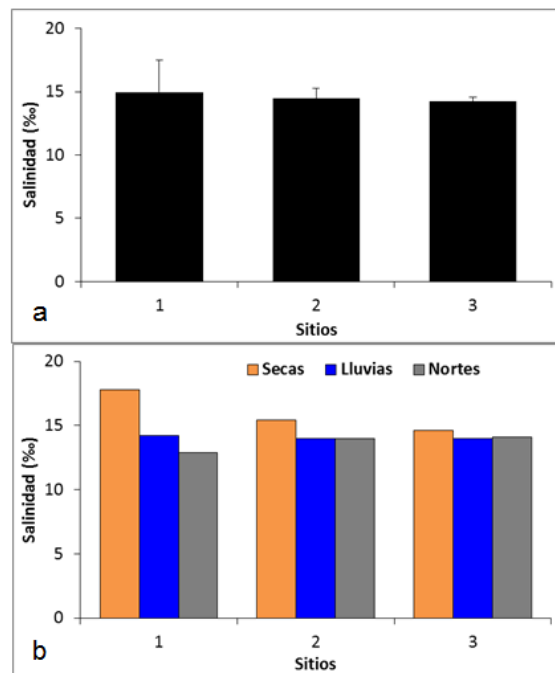


Fig.78.- Valores de salinidad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2018.

En la época de secas (abril) se reportó el valor promedio más alto (15.9 ‰ ± 1.7), seguido de la temporada de lluvias (agosto) con 14.1 ‰ ± 0.1 y la época de nortes (noviembre) con el valor más bajo de 13.7 ‰ ± 0.7. En el sitio 1 se registró el valor más alto en las temporadas de secas (17.8 ‰) y lluvias (14.2 ‰), y en el sitio 3 (14.1 ‰) en nortes (Fig. 78 b).

Conductividad.-

Como se describió para los otros cuerpos de agua, la conductividad en Laguna Salada presentó el mismo patrón espacial y temporal que la salinidad. Con un gradiente de sur a norte, con las concentraciones promedio anual de 24.6 mS/cm \pm 3.9 en el sitio 1, de 23.9 mS/cm \pm 1.3 en el sitio 2 y de 23.5 mS/cm \pm 0.6 en el sitio 3 (Fig. 79 a).

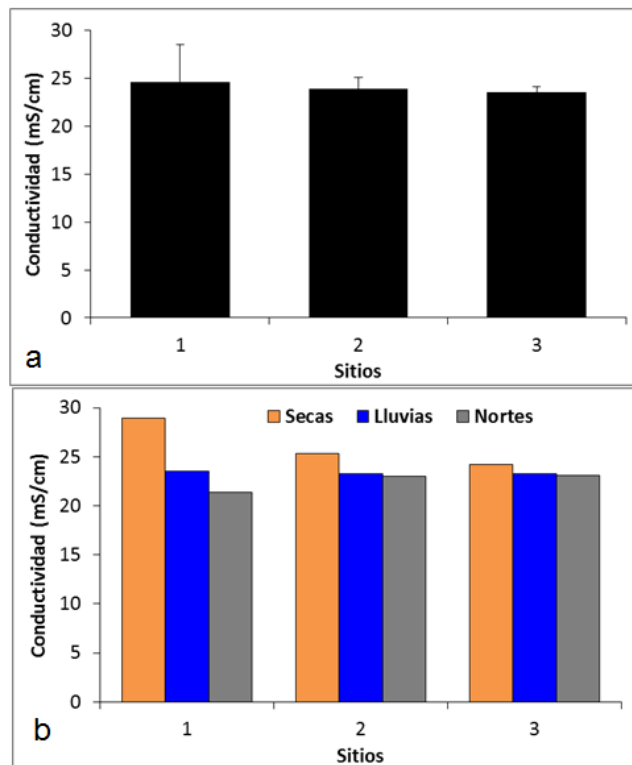


Fig.79.- Valores de conductividad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2018.

La temporada de secas presentó el valor de conductividad más alto (26.1 mS/cm \pm 2.5), seguido de la época de lluvias y de nortes con valores de 23.4 mS/cm \pm 0.1 y 22.5 mS/cm \pm 1.0, respectivamente. El sitio 1 registró el valor más alto en secas (28.9 mS/cm) y lluvias (23.5 mS/cm), y el sitio 3 (23.1 mS/cm) en temporada de nortes (Fig. 79 b).

4.2.4.2.- Fisicoquímicos 2017-2018:

Temperatura.-

En abril (secas), el valor promedio de temperatura fue mayor en 2017 que en 2018 (32.5 °C ± 1.0 y 30.2 °C ± 0.3, respectivamente). La temperatura más alta en la columna de agua se registró en el sitio 1 en 2017 (33.6 °C) y en 2018 (30.6 °C) (Fig. 80 a).

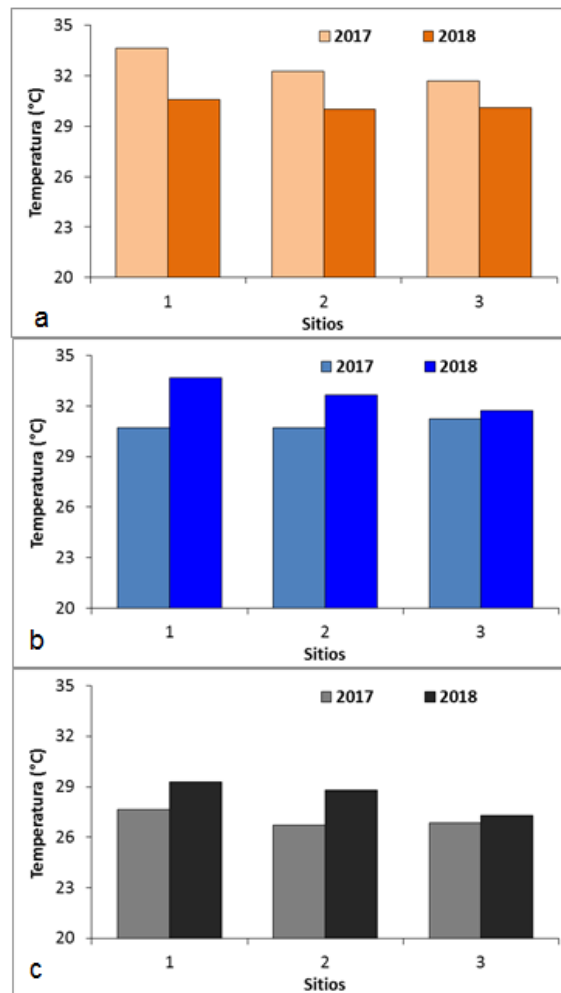


Fig. 80.- Comparación de la temperatura en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), el valor promedio de temperatura fue mayor en 2018 que en 2017 (32.7 °C ± 1.0 y 30.9 °C ± 0.3, respectivamente). El nivel más alto en 2017 se registró en el sitio 3 (31.2 °C) y en 2018 en el sitio 1 (33.7 °C) (Fig. 80 b).

En noviembre (nortes), el valor promedio de temperatura fue mayor en 2018 que en 2017 ($28.5\text{ °C} \pm 1.0$ y $27.1\text{ °C} \pm 0.5$, respectivamente). El nivel más alto se registró en el sitio 1 en 2018 (29.3 °C) y en 2017 (27.7 °C) (Fig. 80 c).

pH.-

En abril (secas), el valor promedio de pH fue mayor en 2018 que en 2017 (7.8 ± 0.2 y 7.1 ± 1.4 , respectivamente), con el valor más alto en el sitio 1 (8.0) en 2018 y en el sitio 2 (8.7) en 2017 (Fig. 81 a).

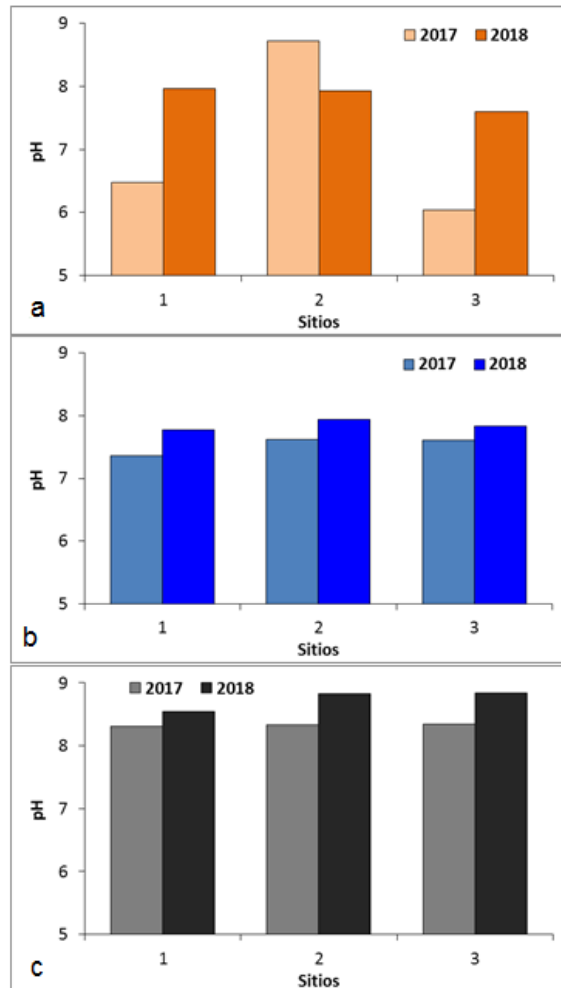


Fig. 81.- Comparación de pH en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), el valor promedio de pH fue mayor en 2018 que en 2017 (7.9 ± 0.1 y 7.5 ± 0.2 , respectivamente). En el sitio 2 se registró el valor más alto en 2017 (7.6) y en 2018 (7.9) (Fig. 81 b).

En noviembre (nortes), el valor promedio de pH fue mayor en 2018 que en 2017 (8.7 ± 0.2 y 8.3 ± 0.02 , respectivamente). En el sitio 3 se registró el valor más alto en 2017 (8.3) y en 2018 (8.8) (Fig. 81 c).

Oxígeno Disuelto. -

Es importante indicar que durante todo el período de monitoreo, la Laguna Salada presentó concentraciones de oxígeno disuelto superiores al límite mínimo de 5 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática (línea roja en Fig. 82 a, b y c).

En abril (secas), la concentración promedio de oxígeno disuelto fue mayor en 2017 que en 2018 ($7.8 \text{ mg/l} \pm 1.2$ y $6.6 \text{ mg/l} \pm 0.9$, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 3 (8.5 mg/l), y en 2018 en el sitio 1 (7.4 mg/l) (Fig. 82 a).

En agosto (lluvias), la concentración promedio de oxígeno disuelto fue mayor en 2018 que en 2017 ($8.2 \text{ mg/l} \pm 0.3$ y $6.8 \text{ mg/l} \pm 1.2$, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 2 (8.0 mg/l), y en 2018 en el sitio 3 (8.4 mg/l) (Fig. 82 b).

En noviembre (nortes), la concentración promedio de oxígeno disuelto fue mayor en 2017 que en 2018 ($9.9 \text{ mg/l} \pm 0.7$ y $7.8 \text{ mg/l} \pm 0.5$, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 1 (10.7 mg/l), y en 2018 en el sitio 3 (8.3 mg/l) (Fig. 82 c).

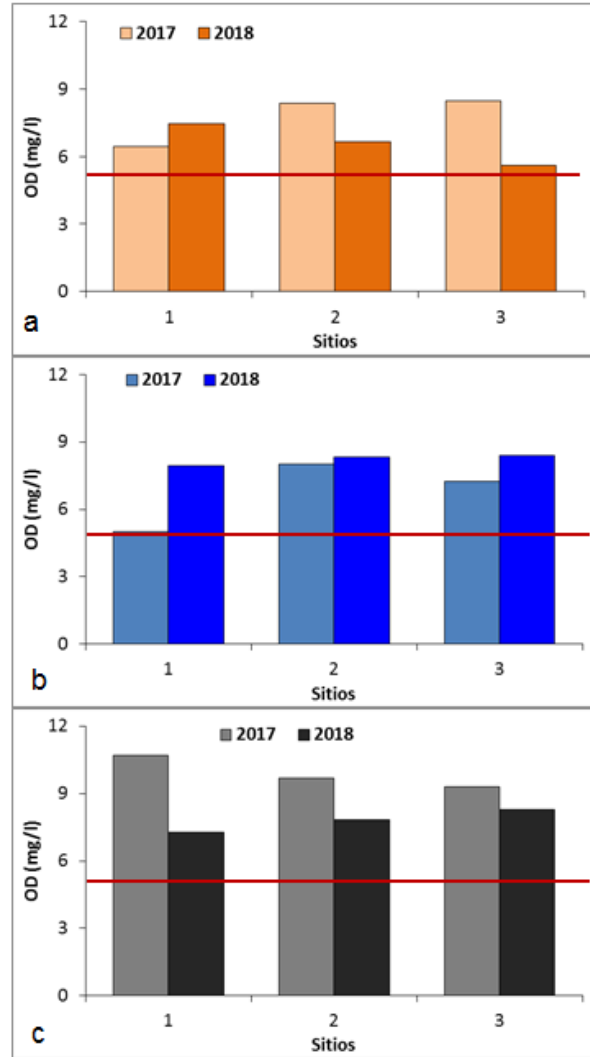


Fig. 82.- Comparación de la concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua dulce.

Turbidez.-

Para este parámetro el análisis comparativo para los dos años del estudio, no se realizó para el mes de noviembre porque no se cuentan con registros en 2018. Así, en abril (secas) el valor promedio de turbidez fue mayor en 2018 que en 2017 (39.8 NTU ± 49.7 y 6.5 NTU ± 5.8, respectivamente). En el sitio 1 se registró el valor más alto en 2017 (13.1 NTU) y en 2018 (96.8 NTU) (Fig. 83 a).

En agosto (lluvias) el valor promedio de turbidez fue mayor en 2017 que en 2018 (3.7 NTU \pm 0.2 y 1.1 NTU \pm 0.9, respectivamente). En los sitios 1 y 3 se registró el valor más alto en 2017 (3.8 NTU) y en 2018 en el sitio 2 (1.7 NTU) (Fig. 83 b).

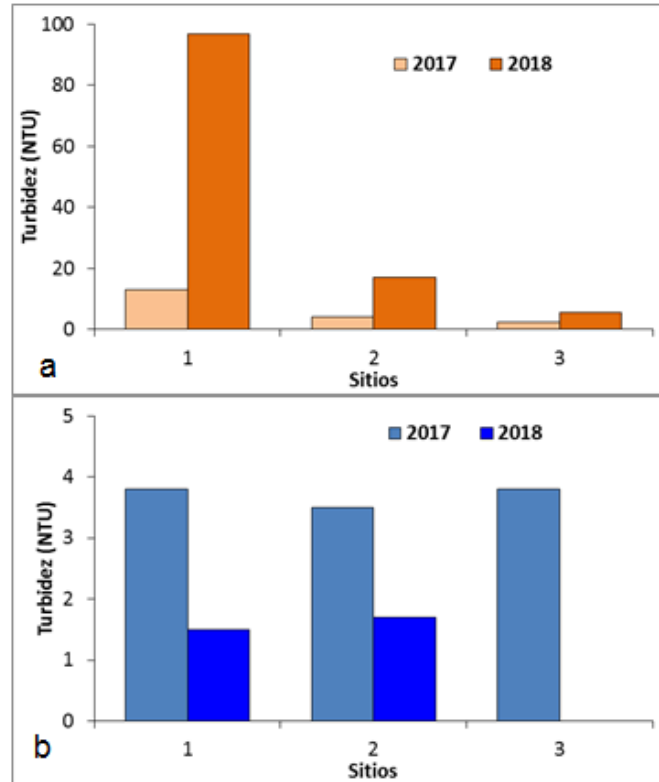


Fig. 83.- Comparación de la turbidez en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril) y (b) lluvias (agosto).

Salinidad.-

En abril (secas) el valor promedio de salinidad fue mayor en 2018 que en 2017 (15.9 ‰ \pm 1.7 y 13.1 ‰ \pm 0.9, respectivamente). El sitio 1 registró el valor más alto en 2017 (14.1 ‰) y en 2018 (17.8 ‰) (Fig. 84 a).

En agosto (lluvias) el valor promedio de salinidad fue mayor en 2018 que en 2017 (14.1 ‰ \pm 0.1 y 11.3 ‰ \pm 0.5, respectivamente). El sitio 3 registró el valor más alto en 2017 (11.7 ‰) y en el sitio 1 en 2018 (14.2 ‰) (Fig. 84 b).

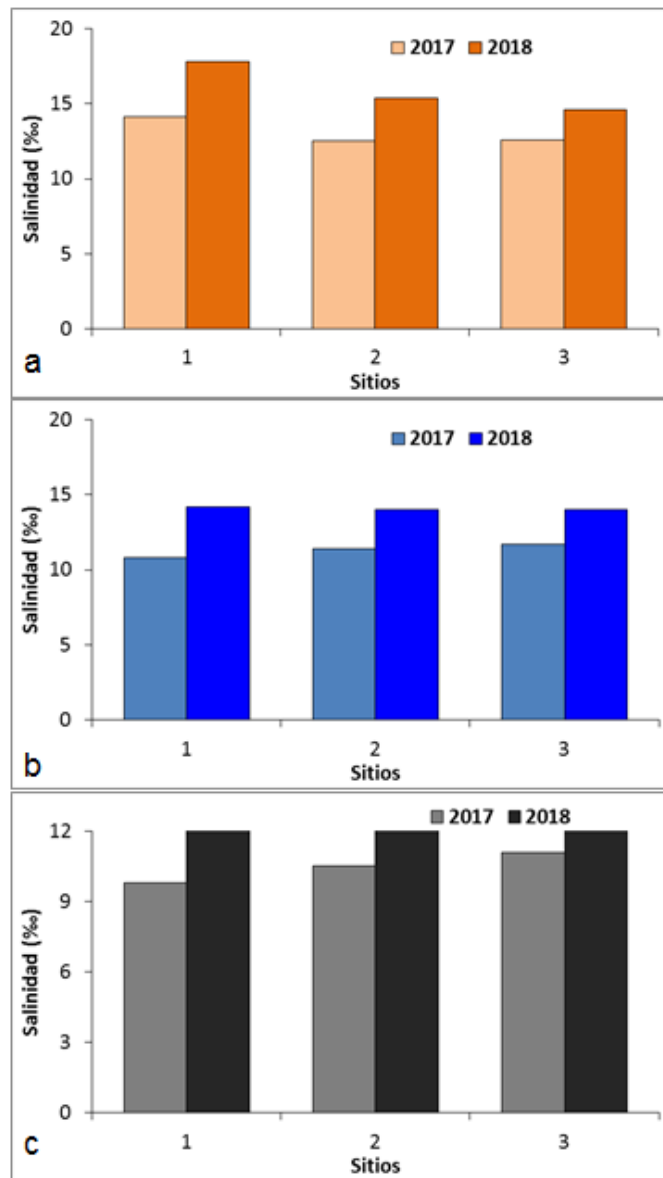


Fig. 84.- Comparación de la salinidad en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En noviembre (nortes) el valor promedio de salinidad fue mayor en 2018 que en 2017 ($13.7 \text{ ‰} \pm 0.7$ y $10.5 \text{ ‰} \pm 0.7$, respectivamente). El sitio 3 registró el valor más alto en 2017 (11.1 ‰) y en 2018 (14.1 ‰) (Fig. 84 c).

Conductividad.-

La conductividad presentó el mismo comportamiento temporal que la salinidad en la Laguna Salada, a lo largo del período del estudio. Así, en abril (secas) el valor promedio fue mayor en 2018 que en 2017 (26.1 mS/cm \pm 2.5 y 21.8 mS/cm \pm 1.4, respectivamente). El sitio 1 registró el valor más alto en 2017 (23.5 mS/cm) y en 2018 (28.9 mS/cm) (Fig. 85 a).

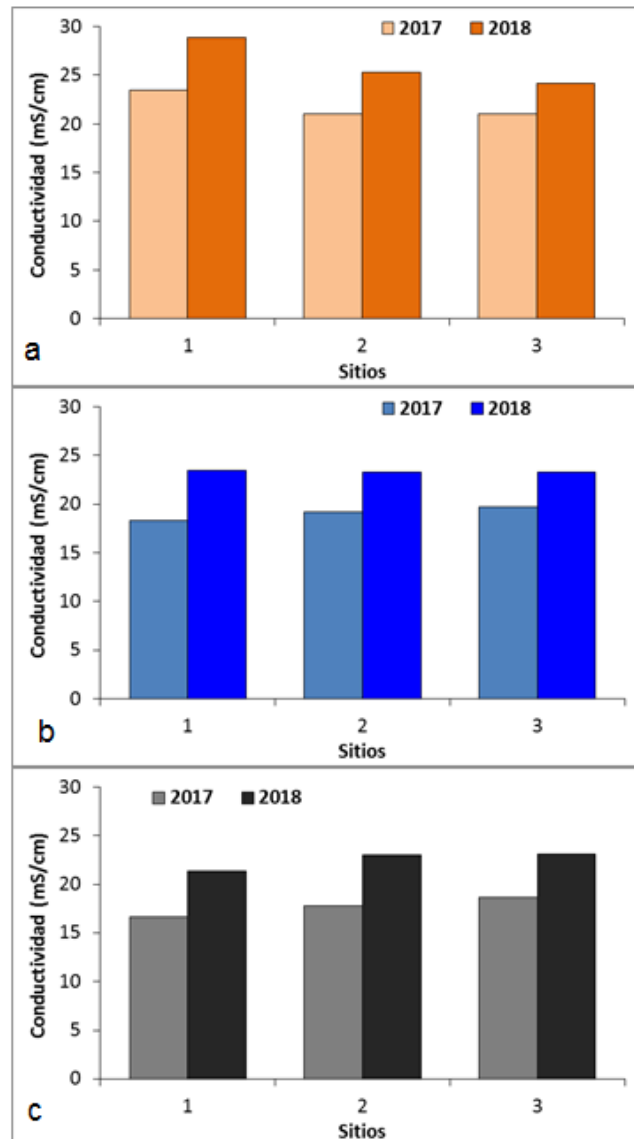


Fig. 85.- Comparación de la conductividad en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias) el valor promedio fue mayor en 2018 que en 2017 (23.4 mS/cm \pm 0.1 y 19.1 mS/cm \pm 0.7, respectivamente). El sitio 3 registró el valor más alto en 2017 (19.7 mS/cm) y en el sitio 1 en 2018 (23.5 mS/cm) (Fig. 85 b).

En noviembre (nortes) el valor promedio fue mayor en 2018 que en 2017 (22.5 mS/cm \pm 1.0 y 17.7 mS/cm \pm 1.0, respectivamente). El sitio 3 registró el valor más alto en 2017 (18.7 mS/cm) y en 2018 (23.1 mS/cm) (Fig. 85 c).

4.2.4.3.-Nutrientes 2018:

Debido a que esta laguna presenta características de un cuerpo de agua salobre, se utilizaron los mismos valores de los CECAs con que se analizó a la bahía de Chetumal.

Nitritos.-

Los nitritos en Laguna Salada presentaron una importante variabilidad espacial y estacional. Así, en el sitio 2 se registró la concentración media anual mayor (0.0008 mg/l \pm 0.0006), seguido de los sitios 1 y 3 (0.0006 mg/l \pm 0.0005 y 0.0005 mg/l \pm 0.0005, respectivamente) (Fig. 86 a).

Durante la temporada de secas (abril) se registró la concentración promedio más alta (0.0013 mg/l \pm 0.0002), seguida de las épocas de lluvias (agosto) y nortes (noviembre) con valores de 0.0004 mg/l \pm 0.0003 y 0.0003 mg/l \pm 0.0001, respectivamente (Fig. 86 b)

A lo largo del año, las concentraciones de nitritos en todo el sistema, fueron inferiores al LMP de 0.002 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua salobre o marina.

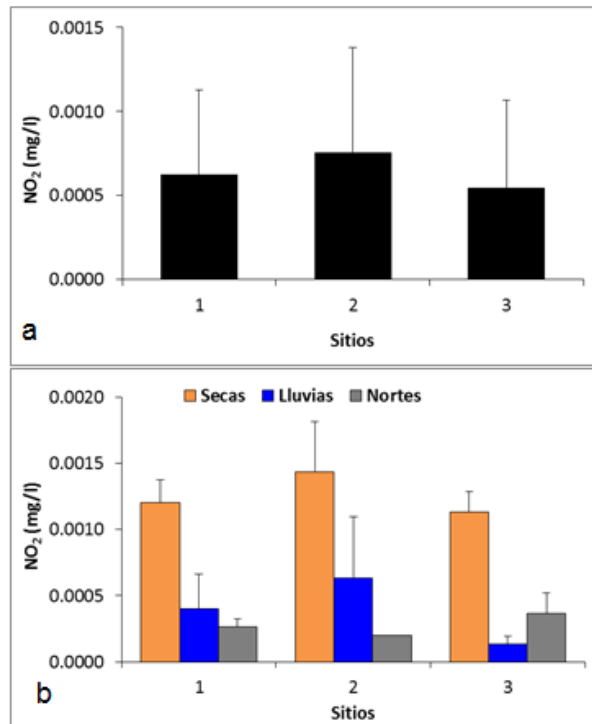


Fig.86.- Valores de nitritos (NO₂) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2018.

Nitratos. -

En este indicador de calidad del agua se observó un gradiente espacial de mayor a menor concentración de sur a norte de la laguna. En dónde el sitio 1 registró un valor promedio anual de 0.0055 mg/l \pm 0.0045), seguido del sitio 2 (0.0045 mg/l \pm 0.0036) y del sitio 3 con 0.0031 mg/l \pm 0.0011 (Fig. 87 a).

Durante la temporada de lluvias (agosto) se registró la concentración promedio más alta (0.007 mg/l \pm 0.004), seguida de las épocas de secas (abril) y nortes (noviembre) con valores de 0.004 mg/l \pm 0.001 y 0.002 mg/l \pm 0.000, respectivamente (Fig. 87 b)

A lo largo del año, las concentraciones de nitratos en todo el sistema, fueron inferiores al LMP de 0.04 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua salobre o marina.

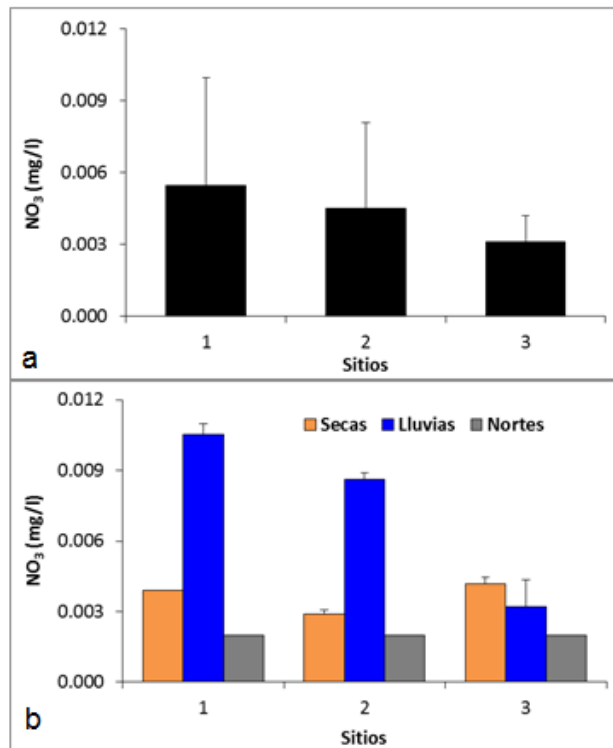


Fig.87.- Valores de nitratos (NO₃) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2018.

Amonio.-

El amonio presentó un gradiente espacial de menor a mayor concentración, de sur a norte de la laguna. En dónde el sitio 1 registró un valor promedio anual de 0.018 mg/l \pm 0.008), seguido del sitio 2 (0.020 mg/l \pm 0.015) y del sitio 3 con 0.030 mg/l \pm 0.029 (Fig. 88 a).

Durante la temporada de secas (abril) se registró la concentración promedio más alta (0.037 mg/l \pm 0.026), seguida de las épocas de nortes (noviembre) y lluvias (agosto) con valores de 0.016 mg/l \pm 0.005 y 0.015 mg/l \pm 0.010, respectivamente (Fig. 88 b)

Para este indicador solamente en el sitio 3 durante la época de secas, se sobrepasó el LMP de 0.01 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua salobre (línea roja, Fig. 88 b).

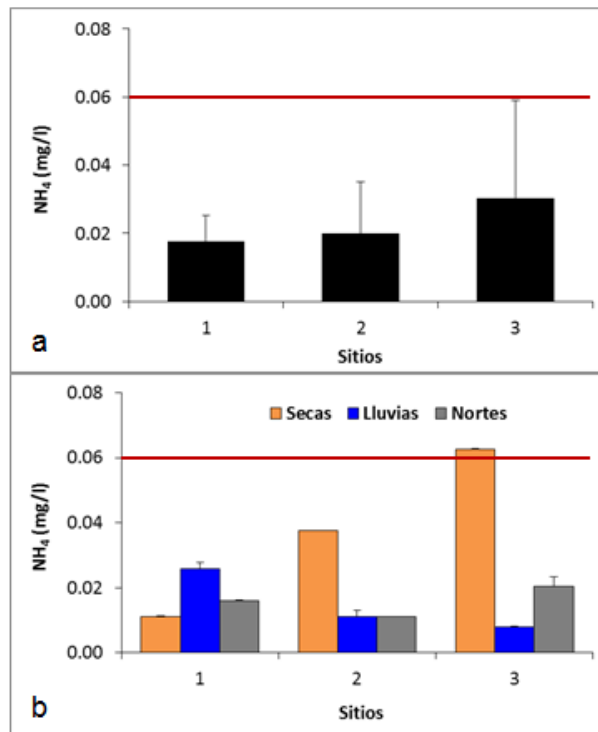


Fig.88.- Valores de amonio (NH₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2018. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

Fosfatos.-

Espacialmente se observó un gradiente de sur a norte en la concentración promedio anual de fosfatos, con un valor de 0.003 mg/l ± 0.002 en el sitio 1, de 0.005 mg/l ± 0.001 en el sitio 2 y de 0.006 mg/l ± 0.005 en el sitio 3. En los tres sitios su valor fue superior al LMP de 0.002 mg/l establecido por los CECAs para la protección de vida acuática de agua salobre (línea roja, Fig. 89 a).

Durante la temporada de secas (abril) se registró el valor promedio mayor con 0.007 mg/l ± 0.004, seguido de la época de nortes (noviembre) con 0.003 mg/l ± 0.001 y de la temporada de lluvias (agosto) con 0.003 mg/l ± 0.001. Durante las tres épocas climáticas, la concentración de nitratos en la Laguna Salada fue superior al LMP de los CECAs (línea roja, Fig. 89 b).

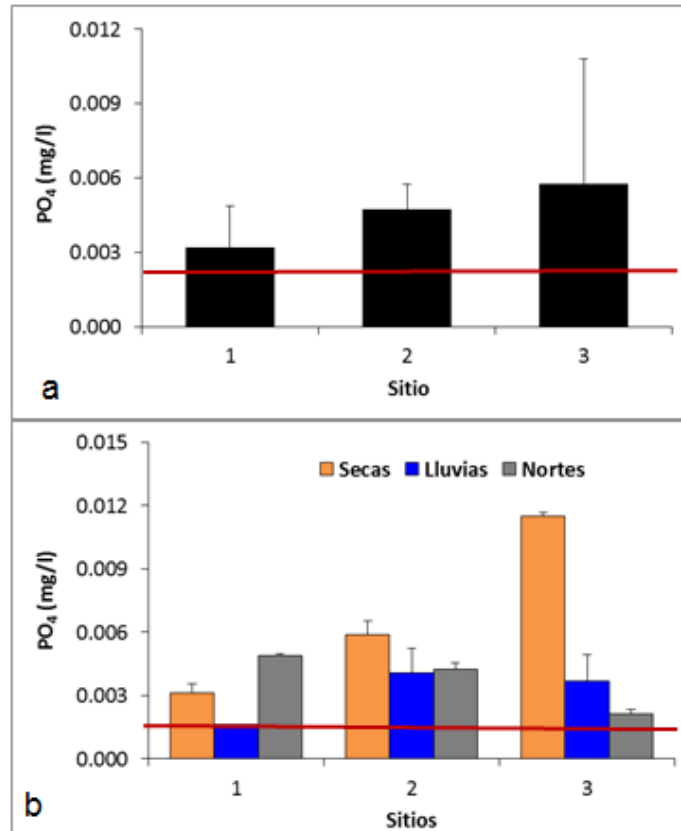


Fig.89.- Valores de fosfatos (PO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2018. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

Es probable que la entrada de agua subterránea y la descomposición de materia orgánica de los sedimentos que fácilmente pueden alcanzar la columna de agua por su baja profundidad, sean el origen de estas elevadas concentraciones.

Silicatos.-

Para este parámetro la variabilidad estuvo asociada a la época climática, ya que especialmente la concentración promedio anual de silicatos fue similar en la Laguna Salada. Así, el valor más alto fue de 7.4 mg/l ± 4.3 en el sitio 1 y el más bajo (6.9 mg/l ± 5.0) en el sitio 2 (Fig. 90 a).

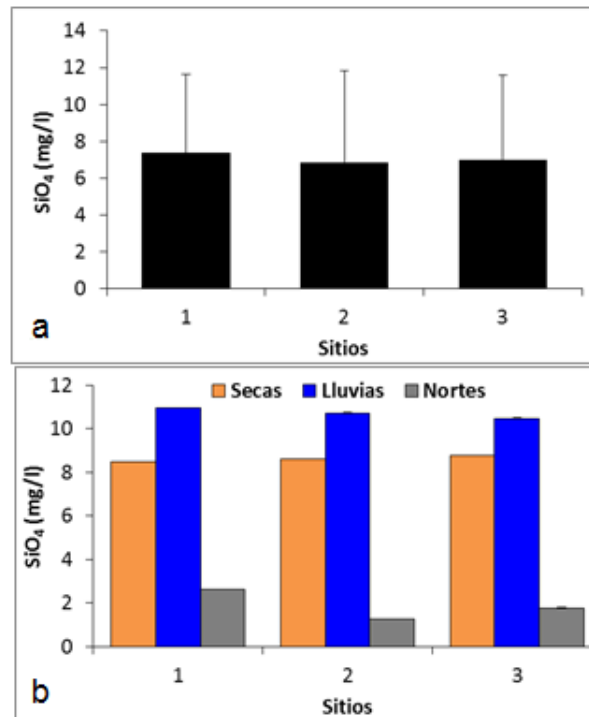


Fig.90.- Valores de silicatos (SiO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2018.

Durante la temporada de lluvias (agosto) se registró la concentración promedio mayor de silicatos (10.7 mg/l ± 0.3), seguida de la época de secas (abril) y nortes (noviembre) con valores de 8.6 mg/l ± 0.1 y 1.9 mg/l ± 0.7, respectivamente. En el sitio 1 se registró la concentración más alta durante los meses de agosto (11.0 mg/l) y noviembre (2.6 mg/l), y para abril en el sitio 3 (8.8 mg/l) (Fig. 90 b). Como se mencionó para los otros cuerpos de agua, la menor precipitación pluvial registrada en agosto de 2018, permitió que se mantuviera la influencia de la descarga de agua subterránea a la Laguna Salada en la época de lluvias.

Clorofila a.-

Para este indicador de calidad del agua la variabilidad estuvo asociada principalmente a la época climática. Se observó un gradiente espacial de sur a norte, con valores promedio anual de clorofila a de 2.0 µg/l ± 1.0 en el sitio 1, de 2.3 µg/l ± 2.1 en el sitio 2 y de 2.4 µg/l ± 1.7 en el sitio 3 (Fig. 91 a).

Durante el mes de noviembre (nortes) se registró la concentración promedio mayor de clorofila *a* ($3.7 \mu\text{g/l} \pm 0.5$), seguida del mes de abril (secas) con $2.3 \mu\text{g/l} \pm 0.7$ y del mes de agosto (lluvias) con $0.7 \mu\text{g/l} \pm 0.6$. Las concentraciones más altas se observaron para abril en el sitio 2 ($3.0 \mu\text{g/l}$), para agosto en el sitio 1 ($1.7 \mu\text{g/l}$) y para noviembre en el sitio 3 ($4.1 \mu\text{g/l}$) (Fig. 91 b).

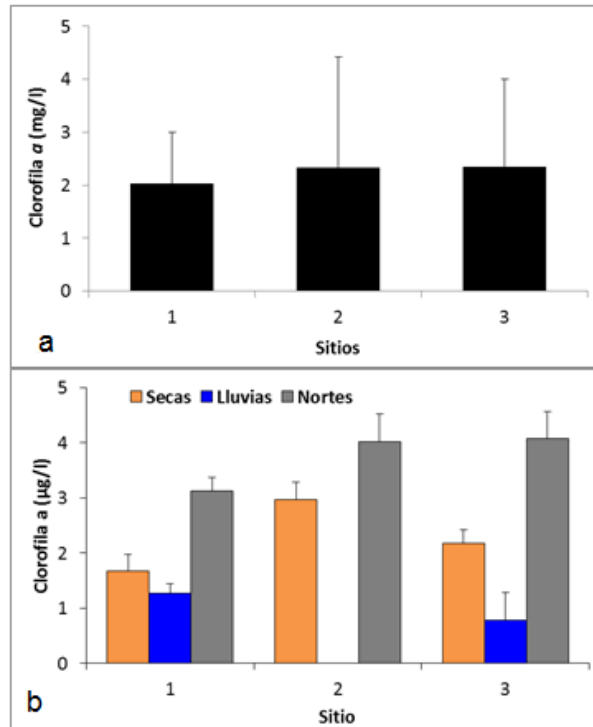


Fig.91.- Valores de clorofila *a* anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2018.

Las concentraciones altas de clorofila *a* en las temporadas de secas y nortes, parecen estar asociadas a los niveles de nitritos amonio y fosfatos registrados en estos mismos períodos de monitoreo.

4.2.4.4.- Nutrientes 2017-2018.-

Nitritos.-

En abril (secas), la concentración media de nitritos fue mayor en 2018 que en 2017 ($0.0013 \text{ mg/l} \pm 0.0002$ y $0.0001 \text{ mg/l} \pm 0.000$, respectivamente). Solo en 2018 se observó variabilidad espacial, con el valor más alto en el sitio 2 (0.0014 mg/l) y el más bajo en el sitio 3 (0.0011 mg/l) (Fig. 92 a).

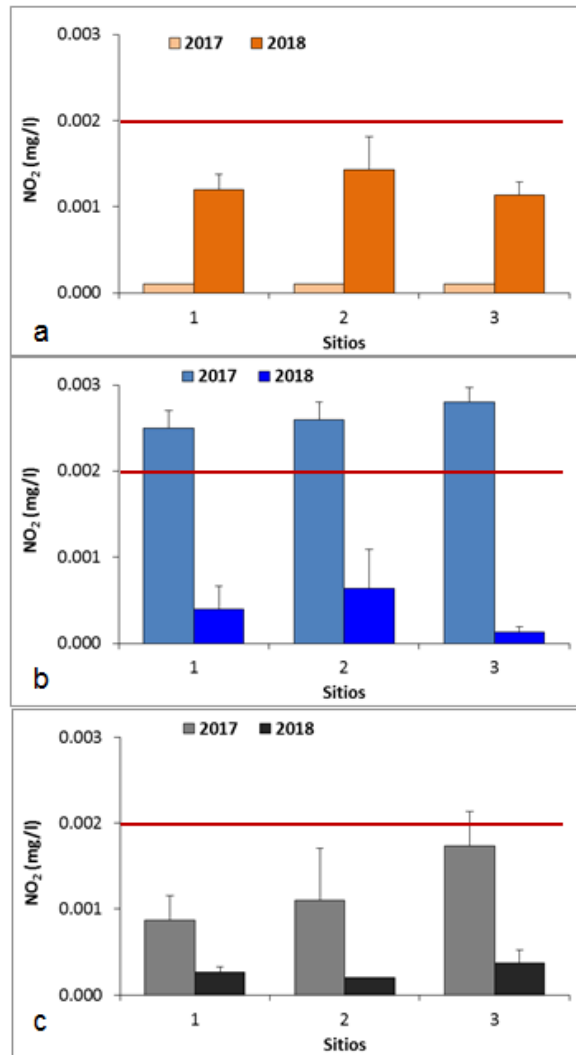


Fig. 92.- Comparación de la concentración de nitritos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

En agosto (lluvias), la concentración media de nitritos fue mayor en 2017 que en 2018 (0.0026 mg/l \pm 0.0002 y 0.0004 mg/l \pm 0.0003, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 3 (0.0028 mg/l) y para 2018 en el sitio 2 (0.0006 mg/l) (Fig. 92 b). Solamente en 2017 las concentraciones de nitritos fueron superiores al LMP de 0.002 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua salobre y marina.

En noviembre (nortes), la concentración media de nitritos fue mayor en 2017 que en 2018 (0.0012 mg/l \pm 0.0004 y 0.0003 mg/l \pm 0.0001, respectivamente). El sitio 3 registró el valor más alto en 2017 y 2018 (0.0017 mg/l y 0.0004 mg/l, respectivamente) (Fig. 92 c).

Nitratos. -

En abril (secas), la concentración media de nitratos fue mayor en 2018 que en 2017 (0.004 mg/l \pm 0.001 y 0.001 mg/l \pm 0.000, respectivamente). Solo en 2018 se observó variabilidad espacial, con el valor más alto en el sitio 3 (0.0042 mg/l) y el más bajo en el sitio 2 (0.0029 mg/l) (Fig. 93 a).

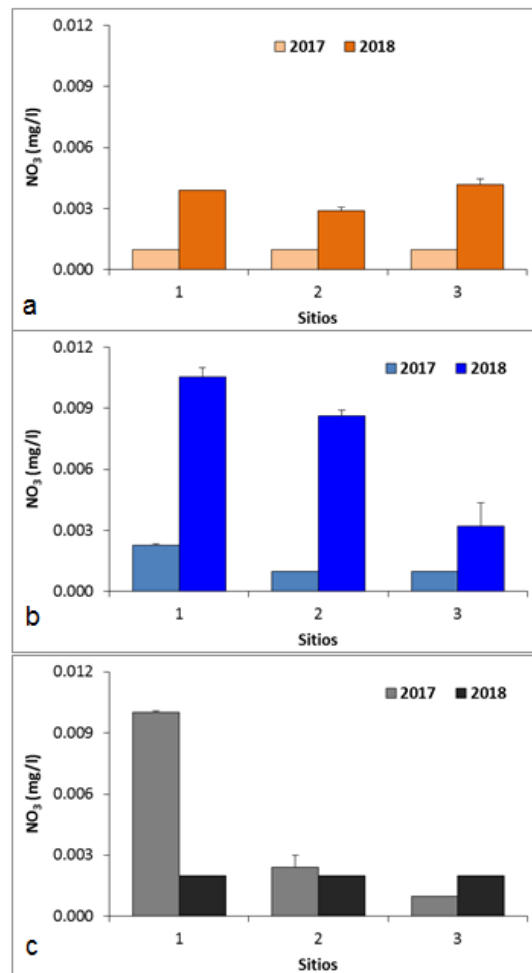


Fig. 93.- Comparación de la concentración de nitratos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), la concentración media de nitratos fue mayor en 2018 que en 2017 ($0.008 \text{ mg/l} \pm 0.004$ y $0.001 \text{ mg/l} \pm 0.001$, respectivamente). El sitio 1 registró el valor más alto en 2017 y 2018 (0.002 mg/l y 0.011 mg/l , respectivamente) (Fig. 93 b).

En noviembre (nortes), la concentración media de nitratos fue mayor en 2017 que en 2018 ($0.005 \text{ mg/l} \pm 0.005$ y $0.002 \text{ mg/l} \pm 0.000$, respectivamente). Solamente en 2017 se observó variabilidad espacial, en dónde el valor más alto se reportó en sitio 1 (0.010 mg/l) y el más bajo en el sitio 3 (0.001 mg/l) (Fig. 93 c).

Durante 2018, en Laguna Salada no se sobrepasó el LMP de 0.04 mg/l de nitratos establecidos en los CECAs, para la protección de la vida acuática de agua salobre y marina.

Amonio.-

En abril (secas), la concentración media de amonio fue mayor en 2017 que en 2018 ($0.09 \text{ mg/l} \pm 0.05$ y $0.04 \text{ mg/l} \pm 0.03$, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 1 (0.15 mg/l) y en 2018 en el sitio 3 (0.06 mg/l) (Fig. 94 a).

En agosto (lluvias), la concentración media de amonio fue mayor en 2017 que en 2018 ($0.06 \text{ mg/l} \pm 0.02$ y $0.02 \text{ mg/l} \pm 0.01$, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 3 (0.08 mg/l) y en 2018 en el sitio 1 (0.03 mg/l) (Fig. 94 b).

En noviembre (nortes), la concentración media de amonio fue mayor en 2017 que en 2018 ($0.07 \text{ mg/l} \pm 0.02$ y $0.02 \text{ mg/l} \pm 0.01$, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 3 (0.09 mg/l) y en 2018 en el sitio 1 (0.02 mg/l) (Fig. 94 c).

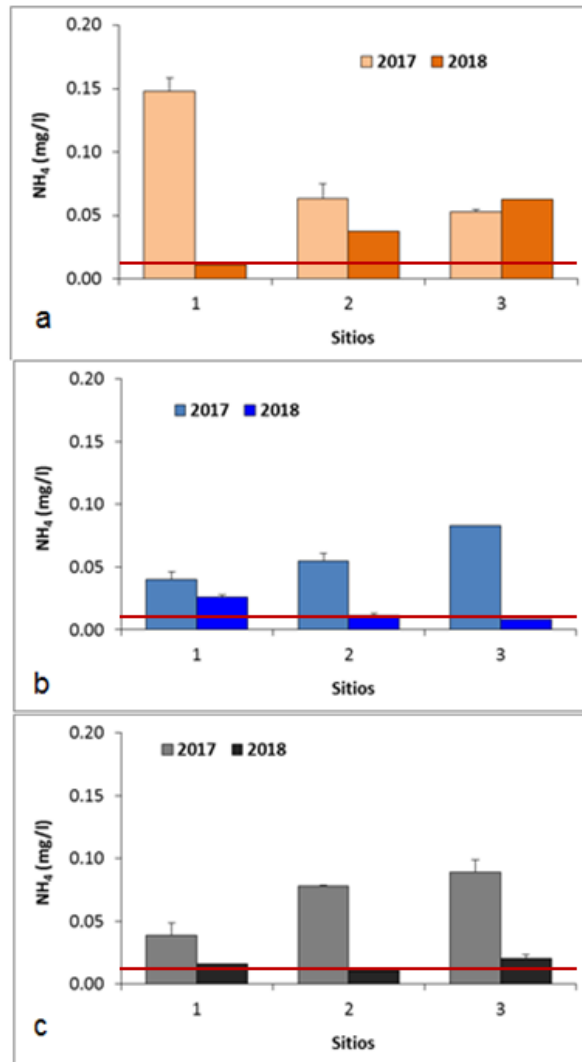


Fig. 94.- Comparación de la concentración de amonio en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

Durante las tres épocas climáticas en 2017, la Laguna Salada presentó concentraciones de amonio que sobrepasaron el LMP de 0.01 mg/l establecido por los CECAs, para la protección de la vida acuática de agua salobre y marina; mientras que para 2018 solo se rebasó en algunos sitios de cada temporada (Fig. 94 a, b y c)

Fosfatos.-

En abril (secas), la concentración media de fosfatos fue mayor en 2017 que en 2018 (0.008 mg/l ± 0.002 y 0.007 mg/l ± 0.004, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 1 (0.01 mg/l) y en 2018 en el sitio 3 (0.01 mg/l). En ambos años, toda la laguna presentó concentraciones de fosfatos que sobrepasaron el LMP de 0.002 mg/l establecido por los CECAs, para la protección de la vida acuática de agua salobre y marina (línea roja, Fig. 95 a).

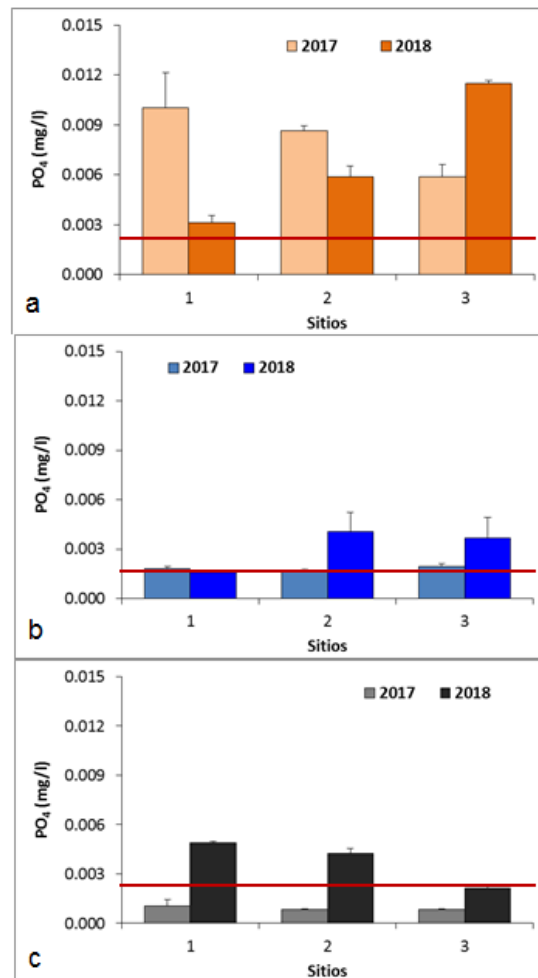


Fig. 95.- Comparación de la concentración de fosfatos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre). La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

En agosto (Lluvias), la concentración media de amonio fue mayor en 2018 que en 2017 (0.003 mg/l ± 0.001 y 0.002 mg/l ± 0.0001, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 3 (0.002 mg/l) y en 2018 en el sitio 2 (0.004

mg/l). En esta temporada, el LMP de los CECAs, sólo se sobrepasó en los sitios 2 y 3 durante 2018 (línea roja, Fig. 95 b).

En noviembre (nortes), la concentración media de amonio fue mayor en 2018 que en 2017 (0.004 mg/l \pm 0.001 y 0.001 mg/l \pm 0.000, respectivamente). En 2017 y 2018, el valor más alto se registró en el sitio 1 (0.001 mg/l y 0.005 mg/l, respectivamente). En esta temporada, el LMP de los CECAs, sólo se sobrepasó en los sitios 1 y 2 durante 2018. (línea roja, Fig. 95 c).

Silicatos. -

En abril (secas), la concentración promedio de silicatos, fue similar en 2017 y 2018 (8.1 mg/l \pm 1.3 y 8.6 mg/l \pm 0.1, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 1 (9.7 mg/l), y en 2018 en el sitio 3 (8.8 mg/l) (Fig. 96 a).

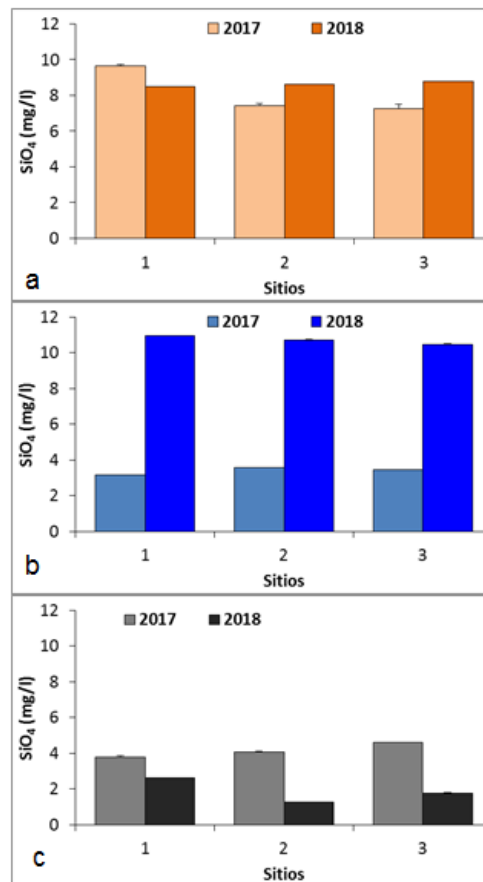


Fig. 96.- Comparación de la concentración de silicatos en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), la concentración promedio de silicatos, fue mayor en 2018 que en 2017 (10.7 mg/l \pm 0.3 y 3.4 mg/l \pm 0.2, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 2 (3.6 mg/l), y en 2018 en el sitio 1 (11.0 mg/l) (Fig. 96 b).

En noviembre (nortes) la concentración promedio de silicatos, fue mayor en 2017 que en 2018 (4.2 mg/l \pm 0.4 y 1.9 mg/l \pm 0.7, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 3 (4.6 mg/l) y en 2018 en el sitio 1 (2.6 mg/l) (Fig. 96 c).

Clorofila a.-

En abril (secas), la concentración promedio de clorofila a, fue mayor en 2018 que en 2017 (2.3 μ g/l \pm 0.7 y 1.1 μ g/l \pm 0.8, respectivamente). En 2017 el valor más alto se registró en el sitio 1 (1.8 μ g/l), y en 2018 en el sitio 2 (3.0 μ g/l) (Fig. 97 a).

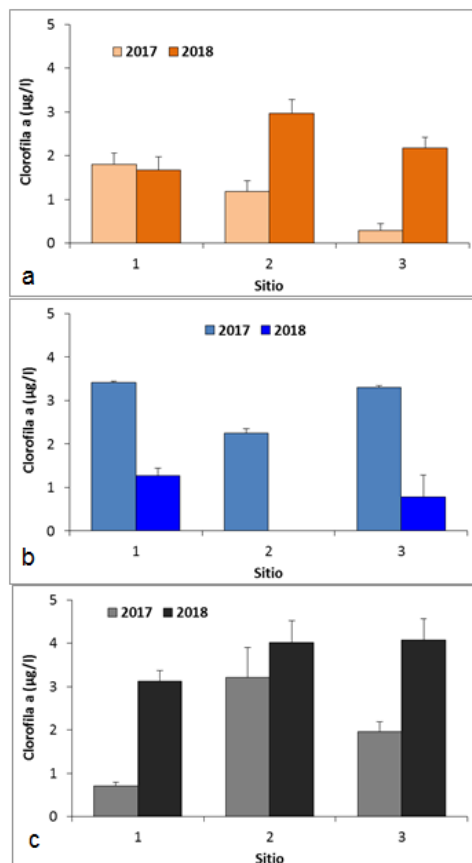


Fig. 97.- Comparación de la concentración de clorofila a en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Laguna Salada durante 2017 y 2018, en las épocas climáticas de (a) secas (abril), (b) lluvias (agosto) y (c) nortes (noviembre).

En agosto (lluvias), la concentración promedio de clorofila *a*, fue mayor en 2017 que en 2018 ($3.0 \mu\text{g/l} \pm 0.6$ y $0.7 \mu\text{g/l} \pm 0.6$, respectivamente). El sitio 1 presentó el valor más alto en 2017 y 2018 ($3.4 \mu\text{g/l}$ y $1.3 \mu\text{g/l}$, respectivamente) (Fig. 97 b).

En noviembre (nortes), la concentración promedio de clorofila *a*, fue mayor en 2018 que en 2017 ($3.7 \mu\text{g/l} \pm 0.5$ y $2.0 \mu\text{g/l} \pm 1.3$, respectivamente). El sitio 3 presentó el valor más alto en 2017 y 2018 ($2.0 \mu\text{g/l}$ y $4.1 \mu\text{g/l}$, respectivamente) (Fig. 97 c).

4.3.- Evaluación de la condición y estado trófico.

En esta sección se compara el comportamiento durante 2017 y 2018 del índice de condición y el estado trófico, que son dos indicadores que integran el comportamiento espacial y temporal de los nutrientes, y que determinan la condición de cada uno de los cuatro cuerpos de agua con base a su enriquecimiento orgánico.

4.3.1.- Bahía de Chetumal

Índice Trófico.-

En la tabla 5, se presentan los índices tróficos obtenidos para cada nutriente y por temporada climática, en cada uno de los 18 sitios monitoreados en 2017 y 2018. En relación con los nitritos (NO_2) se observa que en los dos años de monitoreo los niveles de este nutriente se mantuvieron en muy bajas concentraciones en toda la Bahía de Chetumal, dando como resultado un estado oligotrófico (color amarillo), con excepción del sitio 15 en abril de 2017 y el sitio 13 en noviembre de 2018, que presentaron un estado mesotrófico (color naranja), por un aumento en la concentración de este nutriente.

En el caso de los nitratos (NO_3), durante las tres épocas climáticas en los dos años de monitoreo, se observa claramente la influencia de las actividades humanas en la calidad del agua de los sitios localizados frente a la

desembocadura del río Hondo (sitio1), la ciudad de Chetumal (sitios 14 a 17) y el poblado de Calderitas (sitio 18); en dónde se observa un estado mesotrófico (color naranja); mientras que en el resto de los sitios el estado es oligotrófico (color amarillo), es decir, con bajas concentraciones de nitratos.

Tabla 5.- Comparación del Índice Trófico de Karydis para cada nutriente por época climática, en los 18 sitios monitoreados de la Bahía de Chetumal, durante 2017 y 2018. El color indica el estado trófico, amarillo= Oligotrófico, naranja= Mesotrófico, rojo= Eutrófico.

NO ₂ Sitio	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		NO ₂ Sitio	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018		2017	2018	2017	2018	2017	2018
1	O	O	O	O	O	O	1	M	M	M	M	M	M
2	O	O	O	O	O	O	2	O	O	M	O	O	O
3	O	O	O	O	O	O	3	O	O	O	O	O	O
4	O	O	O	O	O	O	4	O	O	O	O	O	O
5	O	O	O	O	O	O	5	O	O	O	O	O	O
6	O	O	O	O	O	O	6	O	O	O	O	O	O
7	O	O	O	O	O	O	7	O	O	O	O	O	M
8	O	O	O	O	O	O	8	O	O	O	O	O	O
9	O	O	O	O	O	O	9	O	O	O	O	O	O
10	O	O	O	O	O	O	10	O	O	O	O	O	O
11	O	O	O	O	O	O	11	O	O	O	O	O	O
12	O	O	O	O	O	O	12	O	O	O	O	O	O
13	O	O	O	O	O	M	13	O	O	O	O	O	M
14	O	O	O	O	O	O	14	M	M	M	M	O	M
15	M	O	O	O	O	O	15	M	M	M	M	O	O
16	O	O	O	O	O	O	16	M	M	M	O	O	O
17	O	O	O	O	O	O	17	M	M	M	O	M	O
18	O	O	O	O	O	O	18	M	M	M	M	M	M

NH ₄ Sitio	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		PO ₄ Sitio	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018		2017	2018	2017	2018	2017	2018
1	M	M	M	M	O	M	1	O	O	O	O	O	O
2	M	M	M	O	O	O	2	O	O	O	O	O	O
3	O	O	M	O	M	O	3	O	O	O	O	O	O
4	M	O	M	O	O	O	4	O	O	O	O	O	O
5	M	M	M	O	O	M	5	O	O	O	O	O	O
6	M	M	M	M	O	O	6	O	O	O	O	O	O
7	O	O	M	O	M	M	7	O	O	O	O	O	O
8	O	O	M	O	O	M	8	O	O	O	O	O	O
9	M	O	O	O	O	M	9	O	O	O	O	O	O
10	M	O	O	M	O	O	10	O	O	O	O	O	O
11	M	O	O	M	O	M	11	O	O	O	O	O	O
12	M	O	O	M	O	O	12	O	O	O	O	O	O
13	M	O	M	O	O	O	13	O	O	O	O	O	O
14	M	O	O	O	M	O	14	O	O	O	O	O	O
15	M	M	M	O	M	M	15	O	O	O	O	O	O
16	M	M	M	O	M	M	16	O	O	O	O	O	O
17	M	M	M	O	O	O	17	O	O	O	O	O	O
18	M	M	M	M	O	O	18	O	O	O	O	O	O

La bahía presentó durante 2017 un enriquecimiento de amonio (NH₄) con estados mesotróficos (color naranja) al menos en la mitad de los 18 sitios monitoreados durante las épocas de secas y lluvias. Esta condición mejoró durante 2018 en ambas temporadas, en dónde predominaron condiciones oligotróficas (color amarillo). En el mes de noviembre (nortes), se observó lo contrario, es decir, que el número de sitios en condición mesotrófica aumentaron de 5 en 2017 a 8 en 2018; manteniendo este enriquecimiento orgánico durante los dos años, en los sitios 7, 15 y 16 (localizados en la costa occidental de la bahía, principalmente

frente a la ciudad de Chetumal. Las causas de este enriquecimiento orgánico podrían provenir de las descargas del río Hondo en el sitio 1, de las descargas de aguas pluviales mezcladas con aguas residuales y escurrimientos superficiales en los sitios 14 al 18, de la mineralización de materia orgánica depositada en los sedimentos de los sitios 3 al 14, así como de filtraciones de agua subterráneas en todo el sistema.

Los fosfatos mantuvieron bajas concentraciones durante todo el período de monitoreo, dando como resultado una condición oligotrófica (color amarillo) en todo el cuerpo de agua en los dos años. Bajos o no detectables niveles de fosfatos son comunes en sistemas acuáticos de zonas cársticas, debido a que presentan un alto contenido de carbonatos que forman complejos con el fósforo, haciéndolo poco soluble en la columna de agua.

Índice de Condición.-

Este índice de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA, por sus siglas en inglés), se obtiene a partir de los valores de referencia para cada nutriente. Para la Bahía de Chetumal, estos valores de referencia se obtuvieron incluyendo datos generados por ECOSUR de 2005 al 2018. El índice de condición por nutriente, época climática, y año, de los 18 sitios monitoreados en la bahía, se presenta en la tabla 6.

En relación con los nitritos (NO_2) la mayor parte de la bahía presenta una condición buena (color verde) durante los meses de abril (secas) y agosto (lluvias) de los dos años del estudio, con excepción de los sitios 14 al 18 localizados frente a la ciudad de Chetumal y el poblado de Calderitas, dónde la condición es pobre (color rojo). Destaca el sitio 1 frente a la desembocadura del río Hondo, que durante la temporada de lluvias (agosto) cambió de una condición regular en 2017 a una pobre en 2018. Mientras que en el mes de noviembre (nortes), ocho sitios (1 a 3, 10 a 13 y 15) cambiaron de una condición buena y regular en 2017 a una

condición regular o pobre en 2018; en tanto que los sitios 17 y 18 mantuvieron una condición pobre.

Tabla 6.- Comparación del Índice de Condición (EPA, 1992) para cada nutriente por época climática, en los 18 sitios monitoreados de la Bahía de Chetumal, durante 2017 y 2018. El color indica la condición, verde= Buena, amarilla= Regular, roja= Pobre.

NO ₂		ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		NO ₃		ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
Sitio	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018	Sitio	2017	2018	2017	2018	2017	2018
1	B	B	R	P	R	P	P	P	1	P	P	P	P	R	P
2	P	B	B	R	B	P	B	B	2	B	B	B	B	B	B
3	B	B	B	B	B	B	B	R	3	B	B	B	B	B	B
4	B	B	B	B	B	B	B	B	4	B	B	B	B	B	B
5	B	B	B	B	B	B	R	B	5	B	B	B	B	B	B
6	B	B	B	B	B	B	B	B	6	B	B	B	B	B	B
7	B	B	B	B	B	B	B	B	7	B	B	B	B	B	R
8	B	B	B	B	B	R	B	B	8	B	B	B	B	B	B
9	B	B	B	B	B	B	B	B	9	B	B	B	B	B	B
10	B	B	B	B	B	B	P	P	10	B	B	B	B	B	B
11	B	B	B	B	B	R	P	P	11	B	B	B	B	B	B
12	B	B	B	B	B	B	P	P	12	B	B	B	B	B	B
13	B	B	B	B	B	R	P	P	13	B	B	B	B	B	B
14	B	R	P	P	B	B	B	B	14	P	P	P	P	B	P
15	P	P	P	P	B	P	P	P	15	P	P	P	P	B	B
16	P	B	P	P	B	B	B	B	16	P	P	R	B	B	B
17	B	P	P	P	P	P	P	P	17	R	P	B	B	R	P
18	B	P	P	P	P	P	P	P	18	P	P	P	R	P	P

NH ₄		ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		PO ₄		ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
Sitio	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018	Sitio	2017	2018	2017	2018	2017	2018
1	P	P	P	P	P	P	P	P	1	P	P	R	R	B	B
2	P	B	P	B	P	R	B	B	2	P	B	B	B	B	B
3	P	B	P	B	P	P	B	R	3	P	R	P	P	B	R
4	P	B	P	B	B	R	B	B	4	P	P	P	P	B	B
5	P	B	P	B	P	P	P	P	5	P	P	P	B	R	B
6	P	P	P	P	P	B	B	B	6	P	B	B	P	B	P
7	P	R	P	R	P	P	P	P	7	P	R	R	R	B	P
8	P	B	P	B	B	B	P	P	8	P	B	B	B	B	R
9	P	R	R	R	R	R	P	P	9	R	B	R	B	R	P
10	P	P	P	P	B	B	B	B	10	P	P	R	R	B	R
11	P	P	P	P	B	P	P	P	11	P	P	R	P	R	R
12	P	P	P	P	P	P	B	B	12	P	P	P	R	B	B
13	P	R	P	R	B	B	R	B	13	P	P	R	P	B	P
14	P	R	R	R	P	B	B	B	14	R	P	B	P	B	P
15	P	R	P	R	P	P	P	P	15	P	P	B	P	B	R
16	P	B	P	B	P	P	P	P	16	P	R	B	P	B	P
17	P	B	P	B	R	B	B	B	17	P	R	R	P	B	P
18	P	P	P	P	R	R	R	R	18	R	R	R	P	R	R

Para los nitratos (NO₃) en abril (secas) y agosto (lluvias) la condición fue generalmente buena durante los dos años, y regular a pobre en los sitios 1 y 14 al 18. En noviembre (nortes) la bahía mantuvo en general una condición buena, con excepción de los sitios 1, 7, 14 y 17 que cambiaron de una condición buena y regular en 2017, a una regular y pobre en 2018, destacando el sitio 18 ubicado frente al poblado de Calderitas, que mantuvo una condición pobre durante los dos años de monitoreo.

En el caso del amonio (NH₄) la condición de la bahía mejoró de 2017 a 2018, en 12 sitios para la época de secas (abril) y en 10 sitios para lluvias (agosto),

cambiando de pobre a buena/regular. Para la época de nortes (noviembre) en general se mantuvo una condición de pobre/regular, debido a que casi el mismo número de sitios mejoraron o empeoraron su condición.

En el caso del fosfato (PO₄) la condición de la bahía de 2017 a 2018, mejoró en la época de secas (abril) cambiando de una condición pobre a una pobre/regular; disminuyó en lluvias (agosto), cambiando su condición de regular/pobre a pobre/regular. Para la época de nortes (noviembre), la condición también disminuyó, cambiando de buena a pobre/regular. La disminución de la condición de debió principalmente a los sitios 13 al 18.

4.3.2. - Laguna Guerrero

Índice Trófico. -

La Laguna Guerrero presentó una condición oligotrófica (color amarillo, tabla 7) en la concentración de nitritos (NO₂) y fosfatos (PO₄), durante 2017 y 2018. Los nitratos (NO₃) también se mantuvieron en una condición oligotrófica, con excepción de los sitios 4 y 5 en abril de 2017 y del sitio 1 en agosto de 2018, que presentaron un estado mesotrófico (color naranja). Mientras que para el amonio (NH₄), se observa que la laguna en general cambió de un estado mesotrófico en 2017 a uno oligotrófico en 2018, durante las tres épocas climáticas.

Tabla 7 .- Comparación del Índice Trófico de Karydis para cada nutriente por época climática, en los 5 sitios monitoreados de la Laguna Guerrero, durante 2017 y 2018. El color indica el estado trófico, amarillo= Oligotrófico, naranja= Mesotrófico, rojo= Eutrófico.

NO ₂	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		NO ₃	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
	Sitio	2017	2018	2017	2018	2017		2018	Sitio	2017	2018	2017	2018
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	M	0	0
2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	4	M	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	5	M	0	0	0	0	0
NH ₄	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		PO ₄	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
	Sitio	2017	2018	2017	2018	2017		2018	Sitio	2017	2018	2017	2018
1	M	M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	M	M	M	0	M	0	2	0	0	0	0	0	0
3	M	0	M	0	M	0	3	0	0	0	0	0	0
4	M	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
5	M	0	M	0	0	M	5	0	0	0	0	0	0

Índice de Condición. -

Para la Laguna Guerrero, los valores de referencia se obtuvieron incluyendo datos generados por ECOSUR de 2010 a 2018. En la tabla 8 se presentan los índices de condición obtenidos por nutriente, época climática y año, en los 5 sitios de monitoreo en la laguna.

Tabla 8.- Comparación del Índice de Condición (EPA, 1992) para cada nutriente por época climática, en los 5 sitios monitoreados de la Laguna Guerrero, durante 2017 y 2018. El color indica la condición, verde= Buena, amarilla= Regular, roja= Pobre.

No ₂	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		No ₃	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
	Sitio	2017	2018	2017	2018	2017		2018	Sitio	2017	2018	2017	2018
1	P	B	B	B	R	B	1	P	P	B	P	R	B
2	P	B	B	B	P	B	2	P	P	B	P	R	B
3	P	B	B	B	P	B	3	P	P	B	B	R	B
4	P	B	B	B	R	B	4	P	B	B	B	R	B
5	R	B	B	B	R	B	5	P	B	B	B	B	B
NH ₄	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		PO ₄	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
Sitio	2017	2018	2017	2018	2017	2018		Sitio	2017	2018	2017	2018	
1	P	R	B	B	B	B	1	P	B	B	P	B	B
2	P	P	R	B	B	B	2	P	B	B	P	B	B
3	P	B	B	B	B	B	3	P	B	B	B	B	B
4	P	B	B	B	B	B	4	P	P	B	B	B	R
5	P	B	P	B	B	B	5	P	R	B	B	B	B

En relación con los nitritos (NO₂), la condición de Laguna Guerrero mejoró de 2017 a 2018, en la época de secas (abril) de una condición pobre a buena, y en la de nortes (noviembre) de una condición regular/pobre a buena. Mientras que en la época de lluvias (agosto), se mantuvo una buena condición en los dos años.

La condición de los nitratos (NO₃) también mejoró de 2017 a 2018, en la época de secas (abril) cambiando de pobre a pobre/buena; y en la época de nortes (noviembre) cambiando de regular a buena. Mientras que en la temporada de lluvias (agosto) la condición disminuyó, cambiando de buena a buena/pobre, debido a los sitios 1 y 2 localizados frente a los poblados de Laguna Guerrero y Raudales.

La condición del amonio (NH₄) también mejoró de 2017 a 2018, cambiando en la época de secas (abril) de pobre a buena/regular, y en la de lluvias (agosto) de buena/regular a buena. Mientras que en la época de nortes (noviembre), se mantuvo una buena condición durante los dos años.

La condición de los fosfatos (PO₄) de 2017 a 2018, mejoró en la época de secas (abril) cambiando de pobre a pobre/buena. Para la temporada de lluvias (agosto),

su condición disminuyó al cambiar de buena a buena/pobre; y mantuvo una buena condición en la época de nortes (noviembre), con excepción del sitio 4 que cambió de bueno a regular.

4.3.3.- Laguna Chile Verde

Para esta laguna ya fue posible calcular el índice de condición a partir de valores de referencia obtenidos del monitoreo de 2017. Por lo que se analiza el índice de condición en 2018, y se compara el comportamiento del índice trófico en 2017 y 2018.

Índice Trófico.-

En la tabla 9 se observa que la Laguna Chile Verde presentó bajas concentraciones de nitritos (NO_2) y fosfatos (PO_4), que le permitieron mantener una condición oligotrófica (color amarillo) a lo largo de los dos años de monitoreo. En el caso de los nitratos (NO_3), también se mantuvo una condición oligotrófica durante los dos años, con excepción del sitio 1 en agosto (lluvias) y noviembre (nortes) de 2018, que presentó una condición eutrófica (color rojo) y mesotrófica (color naranja), respectivamente.

La concentración de amonio (NH_4) aumentó en la laguna de 2017 a 2018, en las épocas se secas (abril) y lluvias (agosto), lo que provocó su cambio de un estado oligotrófico a uno mesotrófico; mientras que en la temporada de nortes (noviembre) se mantuvo en general una condición mesotrófica.

Tabla 9.- Comparación del Índice Trófico de Karydis para cada nutriente por época climática, en los 4 sitios monitoreados de la Laguna Chile Verde, durante 2017 y 2018. El color indica el estado trófico, amarillo= Oligotrófico, naranja= Mesotrófico, rojo= Eutrófico.

NO_2		ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		NO_3		ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
Sitio	2017	2018	2017	2018	2017	2018	Sitio	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
1	O	O	O	O	O	O	1	O	O	O	E	O	M	O	O
2	O	O	O	O	O	O	2	O	O	O	O	O	O	O	O
3	O	O	O	O	O	O	3	O	O	O	O	O	O	O	O
4	O	O	O	O	O	O	4	O	O	O	O	O	O	O	O
NH_4		ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		PO_4		ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
Sitio	2017	2018	2017	2018	2017	2018	Sitio	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
1	M	M	M	M	M	M	1	O	O	O	O	O	O	O	O
2	O	M	O	M	M	O	2	O	O	O	O	O	O	O	O
3	O	E	O	M	O	M	3	O	O	O	O	O	O	O	O
4	O	O	O	O	M	M	4	O	O	O	O	O	O	O	O

Es posible que las fuentes de amonio al sistema provengan principalmente de la mineralización de la materia orgánica de los sedimentos a lo largo del año, y de la resuspensión de materia orgánica a la columna de agua durante la temporada de nortes.

Índice de Condición. -

En relación con los nitritos (NO_2), la laguna presentó una condición buena durante las tres épocas climáticas, con excepción del sitio 1 que presentó una condición pobre. Los nitratos (NO_3) mantuvieron una condición buena/regular en la época de secas (abril), con el sitio 2 en condición pobre; en lluvias (agosto) la condición fue pobre. Mientras que en nortes (noviembre) fue regular/buena, con el sitio 1 en condición pobre.

Tabla 10 .- Comparación del Índice de Condición (EPA, 1992) para cada nutriente por época climática, en los 4 sitios monitoreados de la Laguna Chile Verde, durante 2018. El color indica la condición, verde= Buena, amarilla= Regular, roja= Pobre.

NO_2		2018			NO_3		2018		
Sitio	ABRIL	AGOSTO	NOVIEMBRE	Sitio	ABRIL	AGOSTO	NOVIEMBRE		
1	P	P	P	1	R	P	P		
2	B	B	B	2	P	P	B		
3	B	B	B	3	B	P	R		
4	B	B	B	4	B	P	R		
NH_4		2018			PO_4		2018		
Sitio	ABRIL	AGOSTO	NOVIEMBRE	Sitio	ABRIL	AGOSTO	NOVIEMBRE		
1	P	P	P	1	P	B	R		
2	P	B	B	2	P	B	B		
3	P	B	P	3	P	B	R		
4	B	B	P	4	P	B	R		

El amonio (NH_4) presentó una condición principalmente pobre en la temporada de secas (abril) y nortes (noviembre), mientras que en la temporada de lluvias (agosto) la condición fue buena, con excepción del sitio 1 (pobre). Los fosfatos (PO_4) presentaron una condición pobre en abril (secas), buena en agosto (lluvias) y regular en nortes (noviembre, con excepción del sitio 2 (buena).

4.3.4. - Laguna Agua Salada

Para esta laguna también fue posible calcular el índice de condición a partir de valores de referencia obtenidos del monitoreo de 2017. Por lo que se analiza el índice de condición en 2018, y se compara el comportamiento del índice trófico en 2017 y 2018.

Índice Trófico. -

La Laguna Salada presentó durante 2017 y 2018, bajas concentraciones de nitritos (NO_2), nitratos (NO_3) y fosfatos (PO_4), que le confieren un estado oligotrófico para todo el período de monitoreo. Mientras que para el amonio (NH_4), se observó una mejoría en la condición trófica, debido a que en general el sistema cambió de una condición principalmente mesotrófica a una oligotrófica en las tres temporadas. (Tabla 10).

Tabla 11 .- Comparación del Índice Trófico de Karydis para cada nutriente por época climática, en los 3 sitios monitoreados de la Laguna Salada, durante 2017 y 2018. El color indica el estado trófico, amarillo= Oligotrófico, naranja= Mesotrófico, rojo= Eutrófico.

NO ₂	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		NO ₃	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
	Sitio	2017	2018	2017	2018	2017		2018	Sitio	2017	2018	2017	2018
1		O	O	O	O	O	1		O	O	O	O	O
2		O	O	O	O	O	2		O	O	O	O	O
3		O	O	O	O	O	3		O	O	O	O	O
NH ₄	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE		PO ₄	ABRIL		AGOSTO		NOVIEMBRE	
	Sitio	2017	2018	2017	2018	2017		2018	Sitio	2017	2018	2017	2018
1		E	O	M	O	O	1		O	O	O	O	O
2		M	O	M	O	M	2		O	O	O	O	O
3		O	M	M	O	M	3		O	O	O	O	O

Índice de Condición. -

En la Laguna Salada los nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3) mantuvieron una condición regular en la época de secas (abril) y buena en la época de nortes (noviembre), mientras que en la época de lluvias (agosto) la condición fue buena para nitritos, y pobre/regular para nitratos.

Tabla 12 .- Comparación del Índice de Condición (EPA, 1992) para cada nutriente por época climática, en los 3 sitios monitoreados de la Laguna Salada, durante 2018. El color indica la condición, verde= Buena, amarilla= Regular, roja= Pobre.

NO ₂		2018			NO ₃		2018		
Sitio	ABRIL	AGOSTO	NOVIEMBRE	Sitio	ABRIL	AGOSTO	NOVIEMBRE		
1	R	B	B	1	R	P	B		
2	R	B	B	2	R	P	B		
3	R	B	B	3	R	R	B		
NH ₄		2018			PO ₄		2018		
Sitio	ABRIL	AGOSTO	NOVIEMBRE	Sitio	ABRIL	AGOSTO	NOVIEMBRE		
1	B	B	B	1	B	B	P		
2	B	B	B	2	P	P	P		
3	P	B	B	3	P	R	B		

El amonio presentó una buena condición a lo largo del año, con excepción del sitio 3 en secas (abril) que tuvo una condición pobre. Los fosfatos (PO₄), mantuvieron en general una condición pobre en secas y nortes, y en lluvias presentó las tres categorías de condición.

Las principales fuentes de amonio a la laguna podrían ser las filtraciones de agua subterránea, la descomposición de materia orgánica y su resuspensión a la columna de agua, así como los escurrimientos superficiales durante lluvias y nortes.

4.4.- Identificación y caracterización de las principales fuentes de contaminación.

Se mantienen en 2018 las fuentes de contaminación que se identificaron en 2017, con base en el comportamiento espacial y temporal de los diversos indicadores de calidad del agua, en cada uno de los sistemas acuáticos.

4.4.1.- Bahía de Chetumal

Las fuentes de contaminación orgánica identificadas en este cuerpo de agua son:

- a) Descargas de aguas pluviales potencialmente mezcladas con aguas residuales provenientes de la ciudad de Chetumal, que comprenden los sitios 14 al 17 identificados como Parque Renacimiento, Muelle Fiscal, Punta Estrella y Dos Mulas, respectivamente.
- b) Filtraciones de agua subterránea a lo largo de la línea de costa y en el lecho de la bahía, con alto contenido de nutrientes probablemente debido a lixiviados de fosas sépticas y tiraderos de basura a cielo abierto.
- c) Escurrimientos superficiales a lo largo de la línea de costa durante la temporada de lluvias que predominan sobre las entradas de agua subterránea.
- d) Descarga de agua del río Hondo rica en nutrientes por el uso de fertilizantes en las zonas agrícolas de las riberas de México y Belice, así como de las filtraciones de fosas sépticas de los asentamientos humanos.
- e) Mineralización de nutrientes en zonas de almacenamiento y descomposición de materia orgánica en sedimentos de textura fina de zonas profundas localizadas principalmente al centro de la bahía.

4.4.2.- Laguna Guerrero

Las fuentes de contaminación orgánica identificadas en este cuerpo de agua son:

- a) Filtraciones de agua subterránea combinada con lixiviados de aguas residuales de fosas sépticas de los poblados de Raudales y Laguna Guerrero.
- b) Escurrimientos superficiales a lo largo de la línea de costa durante la temporada de lluvias que predominan sobre las entradas de agua subterránea.

- c) Resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, principalmente durante la época de nortes cuyos vientos favorecen su mezcla en la columna de agua.
- d) Mineralización de nutrientes por la descomposición de materia orgánica depositada en los sedimentos.

4.4.3. - Laguna Chile Verde

Las fuentes de contaminación orgánica identificadas en este cuerpo de agua son:

- a) Filtraciones de agua subterránea combinada con lixiviados de las actividades agrícolas y ganaderas, dispersas en las zonas aledañas al sistema.
- b) Escurrimientos superficiales a lo largo de la línea de costa durante la temporada de lluvias que predominan sobre las entradas de agua subterránea.
- c) Resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, principalmente durante la época de nortes cuyos vientos favorecen su mezcla en la columna de agua.
- d) Mineralización de nutrientes por la descomposición de materia orgánica depositada en los sedimentos.

4.4.4. - Laguna Agua Salada

Las fuentes de contaminación orgánica identificadas en este cuerpo de agua son:

- a) Filtraciones de agua subterránea.
- b) Escurrimientos superficiales a lo largo de la línea de costa durante la temporada de lluvias que predominan sobre las entradas de agua subterránea.
- c) Resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, principalmente durante la época de nortes cuyos vientos favorecen su mezcla en la columna de agua.
- d) Mineralización de nutrientes por la descomposición de materia orgánica depositada en los sedimentos.

4.5.- Fortalecimiento del plan de monitoreo de la RESMBCH.

Para el fortalecimiento del plan de monitoreo de la RESMBCH durante 2018, se mantuvo el entrenamiento en campo del personal de IBANQROO a través de su participación en la colecta de muestras de agua y sedimentos, así como en la medición y registro de parámetros fisicoquímicos *in situ* con una sonda multiparamétrica (Fig. 98).



Figura 98.- Personal de IBANQROO y ECOSUR durante el entrenamiento para la colecta de muestras, medición y registro de datos ambientales en el monitoreo de la RESMBCH.

Por otra parte, en Laboratorio de Biotecnología Ambiental de ECOSUR-Unidad Chetumal se realizó el “Taller de operación de un colorímetro portátil y análisis de indicadores de calidad del agua en muestras ambientales con uso de kits”, durante los días 26 y 27 de noviembre de 2018; utilizando el colorímetro HACH modelo DR900 propiedad del IBANQROO. En el entrenamiento participó personal del IBANQROO y de Sarteneja Alliance for Conservation and Development (SACD) de Belice. Estas actividades forman parte del objetivo de fortalecimiento del plan de monitoreo de la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal, a partir del entrenamiento de personal del IBANQROO en la evaluación de indicadores de calidad del agua con equipo de campo.

Durante el taller se realizaron tres actividades para la operación del equipo portátil HACH DR900 y el procesamiento de muestras ambientales:

Actividad 1.- descripción del colorímetro portátil HACH DR900 (propiedad del IBANQROO), así como del procedimiento de operación para cada método analítico que se realizaría con kits (Fig. 99).

Actividad 2.- procesamiento de muestras de agua de la Bahía de Chetumal/Corozal, utilizando kits para la determinación de los parámetros siguientes: nitritos, nitratos, amonio, fosfatos y silicatos (Fig. 100)..

Actividad 3.- interpretación de los datos obtenidos del procesamiento de muestras ambientales en el laboratorio, considerando para ello los límites de detección de cada uno de los kits de los parámetros ambientales evaluados, así como los factores de dilución; con el objetivo de proporcionar a los participantes todos los elementos que les sean de utilidad para reportar los resultados en sus programas de monitoreo.



Figura 99.- Personal técnico del Laboratorio de Biotecnología Ambiental de ECOSUR, explicando sobre la operación del colorímetro portátil HACH DR900 y el procedimiento de preparación de muestras ambientales para el uso de kits de nutrientes.



Figura 100.- Personal de IBANQROO y SACD procesando una muestra de agua de la Bahía de Corozal para la determinación de nutrientes, utilizando kits y el equipo DR900.

5.- DISCUSIÓN

Para el monitoreo de 2018, se mantiene la discusión sobre los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECAs) (SEDUE, 1989), que han sido utilizados como referencia para determinar la salud de los cuerpos de agua en México, a partir de límites máximos permisibles (LMP) de diferentes parámetros químicos para la protección de la vida acuática en general, pero que presentan limitaciones de uso como guía de calidad del agua, debido a que se considera que en México todos los cuerpos de agua son similares en sus características fisicoquímicas. Sin embargo, para sistemas acuáticos de naturaleza kárstica como los evaluados en este estudio, que naturalmente presentan bajas concentraciones de nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P), un incremento en los niveles naturales de estos nutrientes que son inferiores a los valores de LMP establecidos en los CECAs, podrían aun así tener un impacto negativo en el sistema acuático.

Lo anterior representa para este estudio, que mientras los CECAs podrían indicar una buena calidad del agua en algunos nutrientes, los índices tróficos y de condición podrían indicar una mala calidad del agua. Este fue el caso para la Laguna Guerrero, en dónde los CECAs indicaron una buena calidad del agua para nitratos y fosfatos, pero un índice de condición pobre para estos mismos nutrientes. Lo contrario ocurrió en la Laguna Salada, en dónde los CECAs indicaron una mala calidad para fosfatos y amonio, pero el índice trófico indicó una condición oligotrófica en todos los nutrientes, es decir, un bajo enriquecimiento orgánico y por lo tanto una buena calidad del agua.

Debido a los aspectos antes mencionados, es recomendable realizar el diagnóstico de salud de cada sistema acuático considerando integralmente todos los indicadores, debido a que la enorme variabilidad que presentan las concentraciones de nutrientes en los sistemas acuáticos puede conducir a subestimar o sobrestimar la condición de cada sistema. El uso en este estudio del índice de condición de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

(USEPA, por sus siglas en inglés), evita sesgos en la estimación debido a que utiliza los valores de referencia para cada nutriente en cada cuerpo de agua.

En relación con el efecto de concentraciones de nutrientes superiores al límite máximo permisible (LMP) de los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECAs), en los organismos acuáticos que habitan el sistema Bahía Chetumal/Corozal, es muy importante considerar que los CECAs establecen que el término “Calidad para la Protección de la Vida de Agua Dulce y Marina, indica: el grado de calidad del agua, requerido para mantener las interacciones e interrelaciones de los organismos vivos, de acuerdo al equilibrio natural de los ecosistemas de agua dulce y marina”(SEDUE, 1989); sin indicar efectos o grupos específicos de organismos. Por lo que solo podemos suponer que los valores superiores a los CECAs en este estudio, podrían causar efectos negativos en las interacciones e interrelaciones de los organismos que habitan este sistema.

Sin embargo, existen estudios que indican que concentraciones anormalmente elevadas de nitrógeno inorgánico disuelto (NID= amonio + nitritos + nitratos) pueden “mermar la habilidad de los animales acuáticos para sobrevivir, crecer y reproducirse” (Camargo y Alonso, 2007). El efecto tóxico de estos nutrientes se relaciona principalmente con disrupciones en el proceso respiratorio y el sistema inmunológico de los organismos acuáticos, que en casos extremos podrían causar la muerte. Camargo y Alonso (2007), a partir de la revisión de criterios de calidad del agua establecidos por agencias ambientales de diversos países, consideran que niveles máximos de NID en un rango de 0.5 a 1 mg/l, pueden ser adecuados para proteger a los animales acuáticos de los efectos tóxicos de estos compuestos nitrogenados. En el Sistema Bahía Chetumal/Corozal, la concentración más alta de NID en los dos años de monitoreo fue menor a 0.3 mg/l; por lo que podríamos esperar que los organismos acuáticos no estuvieran expuestos a efectos tóxicos. No obstante, es importante resaltar que estos criterios de calidad son de ambientes templados y que generalmente sus concentraciones “normales” de nutrientes, son superiores a las que caracterizan cuerpos de agua tropicales de

naturaleza kárstica, que son naturalmente pobres en nutrientes; por lo que podríamos esperar que los valores de nutrientes superiores a los CECAs, podrían estar causando efectos negativos en los sistemas respiratorio e inmunológico, de las especies más sensibles.

6.- CONCLUSIONES

Con base en los objetivos específicos planteados en este estudio, se concluye lo siguiente para los cuatro cuerpos de agua:

1.- La calidad del agua es mala en relación con el amonio para la protección de la vida acuática de agua dulce y salobre, debido a que su concentración durante el período de monitoreo fue superior al límite máximo permisible establecido por los CECAs.

2.- En relación con la variabilidad espacial, se observó que los sitios cercanos a los asentamientos humanos y en dónde se llevan a cabo diversas actividades humanas, presentaron las concentraciones más altas en todos los nutrientes y que además rebasaron los LMP de los CECAs.

3.- En relación con la variabilidad temporal se observó que en el mes de abril (época de secas), se registraron las concentraciones más altas de nutrientes, principalmente de amonio y fosfatos, seguida de la temporada de lluvias (agosto) con nitratos y amonio, y en el mes de noviembre (nortes) amonio principalmente.

4.- De acuerdo al índice trófico de Karidys, la RESMBCH presenta una condición oligotrófica para nitritos, nitratos y fosfatos, y un estado mesotrófico debido a enriquecimiento orgánico por amonio. Esto significa, que el sistema acuático debido a las fuentes de contaminación por amonio, está experimentando principalmente en sitios cercanos a los asentamientos humanos, un incremento de la biomasa de microalgas, la reducción de transparencia y disponibilidad de luz y

el aumento de materia orgánica en los sedimentos, que podrían llevar a la disminución de la concentración de oxígeno disuelto, que podría ocasionar eventos de mortandad de las especies aeróbicas más sensibles.

5.- La Bahía de Chetumal presentó en general una condición regular/pobre para los cuatro nutrientes (nitritos, nitratos, amonio y fosfatos) durante las tres épocas climáticas. La Laguna Guerrero presentó una condición pobre para nitratos y fosfatos en las temporadas de secas y lluvias. La Laguna Chile Verde presentó una condición regular/pobre para nitratos, amonio y fosfatos todo el año. Y la Laguna Salada una condición regular/pobre para nitratos y amonio todo el año. El impacto negativo para los organismos acuáticos, de una condición regular y/o pobre principalmente en las formas de NID, son los efectos tóxicos potenciales en los sistemas respiratorio e inmunológico de las especies acuáticas expuestas, que en casos extremos podrían ocasionar la muerte.

6.- Se mantienen las fuentes de contaminación identificadas en 2017: a) las filtraciones de agua subterránea conteniendo lixiviados de las diversas actividades humanas, b) los escurrimientos superficiales durante la temporada de lluvias principalmente, c) la mineralización de materia orgánica depositada en los sedimentos, y en particular para la Bahía de Chetumal d) la descarga del río Hondo.

7.- RECOMENDACIONES

Se mantiene la recomendación de continuar con el monitoreo a largo plazo de los diversos indicadores de calidad del agua, que permita alimentar las bases de datos para calcular los diversos indicadores de calidad del agua y observar su comportamiento espacial y temporal, que ayudará a los tomadores de decisiones no solo a determinar las acciones para mejorar o mantener la calidad del agua de la RESMBCH, sino también a evaluar si las acciones son efectivas o hay que cambiarlas.

Otras recomendaciones puntuales se plantearán a partir del diagnóstico en el documento respectivo.

8.- AGRADECIMIENTOS

Este proyecto contó con el financiamiento, gestión administrativa y apoyo operativo, de las instituciones siguientes: Mesoamerican Reef Fund (MAR Fund), Cooperación Alemana (Deutsche Zusammenarbeit) a través del KfW, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A.C. (FMCN), PRONATURA Península de Yucatán A.C., Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal, administrada por el Instituto de Biodiversidad y Áreas Naturales Protegidas del Estado de Quintana Roo y El Colegio de la Frontera Sur-Unidad Chetumal (ECOSUR).

9.- REFERENCIAS

- Alvarez-Legorreta, T. y L. Carrillo-Briebezca. 2011. Desarrollo de indicadores de calidad del agua en lagunas costeras y continentales de Quintana Roo para el diseño e implementación de un programa de monitoreo estatal. Conacyt-Fondos Mixtos. QROO-2009-C01-123254. 174 p.
- Camargo, J.A. y A. Alonso. 2007. Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Ecosistemas* 16 (2): 98-110
- Carrillo, L., E. Palacios-Hernández, M. Yescas and AM. Ramírez-Manguilar. 2009. Spatial and Seasonal Patterns of Salinity in a Large and Shallow Tropical Estuary of the Western Caribbean. *Estuaries and Coasts*, 32:906–916.
- Chapman, D. 1996. *Water Quality Assessments- A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring-Second Edition*. WHO by F & FN Spon. 651 p.
- EPA. 1992. *An Updated Summary of Status and Trends in Indicators of Nutrient Enrichment in the Gulf of México*. U.S. Environmental Protection Agency Office of Water, gulf of México Program, United States of America, 272 pp
- EPA. 2001. *National Coastal Assessment: Field operations manual*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Health and Environmental Effects Research Laboratory, Gulf Ecology Division, Gulf Breeze, F.L. EPA/620/R-01/003. pp 72.
- Herrera-Silveira, J.A. Nancy Aranda Cirerol, Luis Troccoli Ghinaglia, Francisco A. Comín y Chris Madden. 2003. Eutrofización Costera en la Península de Yucatán. 823-850p. En: M. Casso, I. Pisanty & E Escurra (Cmps.) *Diagnóstico Ambiental del Golfo de México*. Vol.2, SEMARNAT, INE, Inst de Ecología, A.C., Harte Research .
- INEGI. 2010. *Censo de Población y Vivienda 2010*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. MEX-INEGI.40.201.01-CPV-2010. <http://www3.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/71/>
- Karydis, M., L. Ignatiades and N. Moschopoulou. 1983. An index associated with nutrient eutrophication in the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 16: 339-344.
- Murphy, J. and J.P. Riley. 1962. Modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Chemical Acta*, 27.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, Oxford.
- SEDUE. 1989. *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001-89*. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. *Diario Oficial* 13 de diciembre de 1989, 17 p.

10.- ANEXOS

Se entregan anexos seis archivos en Excel de las bases de datos siguientes:

1.- Fisicoquímicos.- comprende tres bases de datos, una por cada época climática (secas, lluvias y nortes). Cada base contiene datos de los parámetros fisicoquímicos: temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbidez, salinidad y conductividad, correspondientes a 18 sitios de la Bahía de Chetumal, 5 sitios de la Laguna Guerrero, 4 sitios de la Laguna Chile Verde y 3 sitios de la Laguna Salada.

2.- Nutrientes.- comprende tres bases de datos, una por cada época climática (secas, lluvias y nortes). Cada base contiene datos de los parámetros: nitritos, nitratos, amonio, fosfatos, silicatos y clorofila a, correspondientes a 18 sitios de la Bahía de Chetumal, 5 sitios de la Laguna Guerrero, 4 sitios de la Laguna Chile Verde y 3 sitios de la Laguna Salada.