



Tabla de contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>2. ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>5</b>
<b>3. DIAGNÓSTICO INTEGRAL.....</b>	<b>8</b>
3.1.- Comportamiento espacial y temporal de los indicadores en relación con los Criterios de Calidad del Agua (CECAs).....	9
3.2.- Comportamiento espacial y temporal del Índice Tráfico.....	34
3.3.- Comportamiento espacial y temporal del Índice de Condición.....	39
3.4.- Principales fuentes de contaminación a los cuerpos de agua.....	45
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>48</b>
<b>5. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>6. AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>52</b>
<b>7. REFERENCIAS.....</b>	<b>53</b>

## 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 y 2018, 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 del Instituto de Biodiversidad y Áreas Naturales Protegidas del estado de Quintana Roo (IBANQROO), con el apoyo financiero del proyecto Conservación de Recursos Marinos en Centroamérica administrado por MAR Fund y financiado por el Gobierno de Alemania a través del Banco Alemán de Desarrollo (KfW).



Adicionalmente, debido a que la Bahía de Chetumal es un cuerpo de agua compartido entre los países de México y Belice, durante 2017 y 2018 ECOSUR también trabajó coordinadamente con personal de Sarteneja Alliance for Conservation and Development (SACD), para realizar el monitoreo de la calidad del agua de la Bahía de Corozal y la capacitación de algunos de sus miembros, con el objetivo principal de fortalecer las capacidades de su personal; contando también con el apoyo financiero del proyecto Conservación de Recursos Marinos en Centroamérica.

Los resultados de la evaluación de la calidad del agua realizados durante 2017 y 2018 en Bahía Chetumal/Corozal, indicaron que se mantuvo una mala calidad del agua principalmente en los sitios cercanos a asentamientos humanos, sobre todo durante las épocas de secas y lluvias; así como una condición de enriquecimiento orgánico en zonas alejadas de la línea de costa, asociadas principalmente a procesos naturales de mineralización de materia orgánica, proveniente de los extensos humedales que se localizan sobre todo al sur de la bahía, en el canal de comunicación con el Mar Caribe (Álvarez, 2019).

Como parte de los objetivos del monitoreo de 2018, se incluyó la elaboración de un diagnóstico integral de la calidad del agua de las áreas naturales protegidas de Bahía Chetumal y Bahía Corozal, que permitirá a ambos países realizar acciones conjuntas de conservación, protección y saneamiento. Este diagnóstico es el que se desarrolla en el presente documento.

## 2.- ÁREA DE ESTUDIO

La Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH), comprende cuatro cuerpos de agua: las lagunas Guerrero, Salada y Chile Verde, y el sistema estuarino Bahía de Chetumal. La Bahía de Chetumal tiene una superficie aproximada de 2,560 km<sup>2</sup>, en dónde la parte norte del sistema forma una cuenca somera con profundidades que oscilan entre 2 y 5 m; y cuenta con diversas entradas de agua dulce como el Río Hondo, arroyos pequeños y manantiales subterráneos, además de estar conectado a varias 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 (Álvarez-Legorreta y Carrillo-Briebiezca, 2011). De acuerdo al INEGI (2010) Laguna Chile Verde tiene una longitud aproximada de 21 km y una anchura máxima de 1 km, con una superficie de 11.06 km<sup>2</sup>; y Laguna Salada presenta una longitud de 9.5 km<sup>2</sup>, una anchura máxima de 1 km y un área de 3.97 km<sup>2</sup>.

El Santuario de Vida Silvestre de la Bahía de Corozal (CBWS, por sus siglas en inglés), se localiza al sur de la Bahía de Chetumal y forma parte del sistema estuarino transfronterizo compartido entre los países de México y Belice. Bahía Corozal comprende una superficie aproximada de 720 km<sup>2</sup> y es principalmente somera (menor a 2 m de profundidad), aunque al sur en el canal de comunicación con el Mar Caribe, puede alcanzar hasta 5 m de profundidad. El sistema también cuenta con diversas entradas de agua dulce superficiales entre las que destacan New River y Laguna Progreso, así como descargas de agua subterráneas a lo largo de su línea de costa (SACD, 2009).

Con el objetivo de desarrollar el diagnóstico de una manera integral, que permita analizar el comportamiento de los diversos indicadores de calidad del agua de las Bahías Chetumal y Corozal como un solo sistema estuarino que es en realidad, se procedió a etiquetar los sitios de monitoreo con una numeración continua. Así, el sistema Bahía Chetumal/Corozal (denominado así en adelante), comprende los sitios 1 al 32, Laguna Chile Verde los sitios 33 a 36, Laguna Salada los sitios 37 a 39, y Laguna Guerrero los sitios 40 a 44 (Fig.1 y Tabla 1).

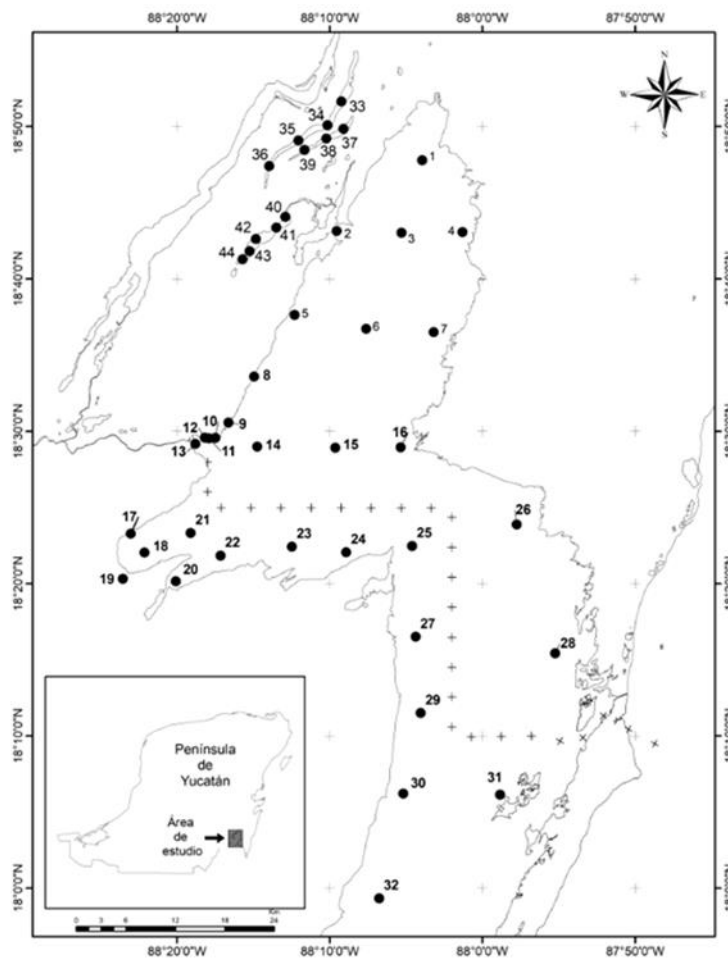


Fig. 1.- Mapa con los 44 sitios de monitoreo que comprenden el Sistema Bahía Chetumal/ Corozal y las tres lagunas, durante el período de monitoreo 2017-2018.

**Tabla 1.-** Datos de posición geográfica de los 44 sitios que comprenden el Sistema Bahía Chetumal/ Corozal y las tres lagunas, durante el período de monitoreo 2017-2018.

BAHÍA CHETUMAL/COROZAL			LAGUNA CHILE VERDE		
Sitio	Latitud	Longitud	Sitio	Latitud	Longitud
1	18°47'47.84"N	88° 03'56.51"O	33	18°51'39.26"N	88°09'14.08"O
2	18°43'09.52"N	88° 09'32.49"O	34	18°50'05.73"N	88°10'08.57"O
3	18°43'02.58"N	88° 05'17.83"O	35	18°49'06.01"N	88°12'03.03"O
4	18°43'04.53"N	88° 01'18.41"O	36	18°47'24.62"N	88°13'57.78"O
5	18°37'38.91"N	88°12'17.72"O	<b>LAGUNA SALADA</b>		
6	18°36'43.70"N	88° 07'36.54"O			
7	18°36'30.77"N	88° 03'10.92"O	37	18°49'51.88"N	88°09'05.67"O
8	18°33'35.58"N	88°14'56.50"O	38	18°49'13.97"N	88°10'12.98"O
9	18°30'34.65"N	88°16'37.51"O	39	18°48'28.22"N	88°11'38.79"O
10	18°29'33.79"N	88°17'29.24"O	<b>LAGUNA GUERRERO</b>		
11	18°29'32.50"N	88°17'54.89"O			
12	18°29'34.85"N	88°18'10.42"O	40	18°44'05.25"N	88°12'53.89"O
13	18°29'09.97"N	88°18'47.72"O	41	18°43'22.50"N	88°13'29.13"O
14	18°28'59.57"N	88°14'44.12"O	42	18°42'37.42"N	88°14'50.06"O
15	18°28'55.24"N	88° 09'37.93"O	43	18°41'49.97"N	88°15'14.71"O
16	18°28'56.88"N	88° 05'21.16"O	44	18°41'17.76"N	88°15'41.88"O
17	18°23'16.34"N	88°23'01.34"W			
18	18°22'02.77"N	88°22'07.40"W			
19	18°20'18.63"N	88°23'32.18"W			
20	18°20'09.44"N	88°20'04.34"W			
21	18°23'19.18"N	88°19'05.86"W			
22	18°21'49.92"N	88°17'08.86"W			
23	18°22'25.46"N	88°12'28.48"W			
24	18°22'03.72"N	88°08'55.29"W			
25	18°22'28.14"N	88°04'35.80"W			
26	18°23'52.91"N	87°57'45.37"O			
27	18°16'30.55"N	88°04'22.06"W			
28	18°15'25.14"N	87°55'13.39"O			
29	18°11'30.01"N	88° 04'2.66"W			
30	18°06'13.02"N	88°05'10.25"W			
31	18°06'08.74"N	87°58'50.59"W			
32	17°59'20.17"N	88°06'45.57"W			

### 3.- DIAGNÓSTICO INTEGRAL

El diagnóstico integral comprende el análisis del comportamiento espacial y temporal de los diversos indicadores de calidad del agua que se evaluaron durante el período 2017-2018, en dónde las bahías de Chetumal y Corozal, son analizadas como un solo sistema estuarino denominado Bahía Chetumal/Corozal. Los indicadores que se abordaron fueron: 1) los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECAs) establecidos para la protección de vida acuática de agua dulce y agua salobre y marina (SEDUE, 1989); 2) El Índice Trófico (TRIX) (Vollenweider et. al., 1998), que evalúa el enriquecimiento orgánico de un cuerpo de agua, integrando simultáneamente varios de los parámetros evaluados durante el monitoreo (la concentración de nitrógeno y fósforo inorgánico disuelto, clorofila *a*, oxígeno disuelto y temperatura del agua); y 3) El Índice de Condición a partir de la determinación de los valores de referencia por nutriente en cada cuerpo de agua (EPA, 1992).

Así mismo, se caracterizaron las fuentes de contaminación por actividades humanas, así como los procesos naturales que inciden en la calidad del agua, de los sistemas acuáticos que comprenden este diagnóstico.

Finalmente, se plantean algunas conclusiones y recomendaciones que permitirán a ambos países desarrollar acciones conjuntas de conservación, protección y saneamiento de este importante sistema estuarino transfronterizo.



### 3.1.- Comportamiento espacial y temporal de los indicadores en relación con los Criterios de Calidad del Agua (CECAs)

En esta sección se describe el comportamiento espacial y temporal de los indicadores de calidad del agua de los cuatro sistemas acuáticos. Además, se comparan sus concentraciones con 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 (SEDUE, 1989), mismos que siguen vigentes debido a que no han recibido actualizaciones por la autoridad responsable.

#### Indicadores Fisicoquímicos:

Se analizó el comportamiento espacial y temporal de oxígeno disuelto, temperatura, salinidad, conductividad, pH y turbidez; medidos *in situ* con sondas multiparamétricas, en cada uno de los cuerpos de agua.

#### Temperatura.-

La evaluación de la temperatura del agua es muy importante, debido a que éste parámetro determina la solubilidad del oxígeno disuelto en el agua que es indispensable para los organismos acuáticos aerobios. Además, favorece los procesos aerobios de descomposición de la materia orgánica, que hacen disponibles nutrientes como fósforo y nitrógeno, para los productores primarios que son la base de las cadenas tróficas.

En el sistema Bahía Chetumal/Corozal la temperatura media anual fue similar en 2017 ( $28.57\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.78$ ) y 2018 ( $28.55\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.92$ ). En relación con el comportamiento estacional de la temperatura, las épocas de secas (abril) y lluvias (agosto) registraron los valores promedio más altos durante los dos años de monitoreo, con valores de  $29.98\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.79$  y  $30.31\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.60$  en 2017, y de  $29.27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.87$  y  $29.57\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.41$  en 2018, respectivamente (Tabla 2).

**Tabla 2.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio  $\pm$  desviación estándar de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Media $\pm$ DS	29.98 $\pm$ 0.79	30.31 $\pm$ 0.60	26.45 $\pm$ 0.90	29.27 $\pm$ 0.87	29.57 $\pm$ 1.41	26.34 $\pm$ 1.67
	Min.	27.40	29.30	25.90	28.0	27.90	23.80
	Máx.	30.29	31.89	27.86	30.71	32.11	29.20
Laguna Chile Verde	Media $\pm$ DS	30.19 $\pm$ 0.65	31.52 $\pm$ 0.29	25.95 $\pm$ 0.54	29.89 $\pm$ 0.22	30.09 $\pm$ 0.51	26.73 $\pm$ 0.62
	Min.	29.52	31.28	25.92	29.59	29.41	26.20
	Máx.	31.08	31.91	26.62	30.12	30.63	27.40
Laguna Salada	Media $\pm$ DS	32.53 $\pm$ 0.98	30.38 $\pm$ 0.31	27.08 $\pm$ 0.50	30.23 $\pm$ 0.30	32.70 $\pm$ 0.99	28.47 $\pm$ 1.04
	Min.	31.71	30.70	26.74	30.01	31.73	27.30
	Máx.	33.62	31.24	27.65	30.57	33.70	29.30
Laguna Guerrero	Media $\pm$ DS	29.74 $\pm$ 0.46	31.42 $\pm$ 0.18	26.68 $\pm$ 0.14	30.96 $\pm$ 0.35	30.73 $\pm$ 0.15	27.54 $\pm$ 0.24
	Min.	29.33	31.26	26.51	30.60	30.60	27.20
	Máx.	30.43	31.62	26.87	31.50	30.90	27.80

En el mes de agosto de los dos años se registraron valores superiores a  $31^{\circ}\text{C}$  en los sitios 9 a 13, que se localizan frente a la ciudad de Chetumal y el río Hondo (Fig. 1). En tanto que la época de nortes (noviembre) registró las temperaturas promedio más bajas de  $26.45^{\circ}\text{C} \pm 0.90$  (2017) y  $26.34^{\circ}\text{C} \pm 1.67$  (2018) (Tabla 2), con valores menores a  $26^{\circ}\text{C}$  en los sitios 18 a 32, localizados al sur del sistema que corresponden a Bahía Corozal (Fig.1).

En relación con las tres lagunas conectadas al norte con la Bahía de Chetumal, se observó el mismo comportamiento, en dónde los meses de abril (secas) y agosto (lluvias), presentaron las temperaturas promedio mensual más elevadas, y en nortes (noviembre) se registraron las más bajas (Tabla 2). Sin embargo, es importante resaltar que en Laguna Salada se registraron las temperaturas promedio más altas de los cuatro cuerpos de agua, con valores de  $32.53^{\circ}\text{C} \pm 0.98$  (secas de 2017) y de  $32.70^{\circ}\text{C} \pm 0.99$  (lluvias de 2018) (Tabla 2), esto debido principalmente a la poca profundidad del cuerpo de agua.

### Oxígeno Disuelto.-

El oxígeno disuelto (OD) es indispensable para la respiración de todos los organismos acuáticos aerobios, por lo que se considera que una concentración de 5 mg/l es el valor mínimo indispensable para mantener la vida en un cuerpo de agua saludable (SEDUE, 1989). Por otra parte, la descomposición de la materia orgánica por microorganismos aerobios implica el consumo de OD, por lo que un exceso de carga orgánica puede causar el abatimiento de este parámetro. La materia orgánica puede provenir de fuentes naturales como son los humedales, o de fuentes antropogénicas como las descargas de aguas residuales sin tratamiento. Por lo anterior, este parámetro ha sido utilizado como un importante indicador de la salud de los sistemas acuáticos.

En el sistema Bahía Chetumal/Corozal la concentración media anual de OD fue similar en 2017 (7.46 mg/l  $\pm$  1.45) y en 2018 (7.25 mg/l  $\pm$  1.13). La concentración media por época climática durante los dos años, fue en general superior a 7 mg/l, (Tabla 3).

Es importante destacar que solo el sitio 19 presentó concentraciones de OD menores o cercanas a 5 mg/l durante los dos años de monitoreo (valores mínimos en Tabla 3), que son inferiores al Límite Permisible para protección de la vida acuática de agua dulce, salobre y marina, establecida por los CECAs (SEDUE, 1989). Este sitio corresponde a la desembocadura de New River en aguas someras de Bahía Corozal, con una importante carga orgánica que podría estar demandando OD para su descomposición.

**Tabla 3.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio  $\pm$  desviación estándar del oxígeno disuelto (mg/l), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Media $\pm$ DS	7.36 $\pm$ 0.92	6.93 $\pm$ 1.30	8.09 $\pm$ 1.79	7.19 $\pm$ 1.14	7.24 $\pm$ 1.18	7.35 $\pm$ 1.07
	Min.	5.88	2.99	2.64	3.39	3.67	3.06
	Máx.	9.23	9.82	11.04	9.22	9.62	8.67
Laguna Chile Verde	Media $\pm$ DS	8.27 $\pm$ 0.84	7.56 $\pm$ 0.52	10.33 $\pm$ 1.51	8.18 $\pm$ 0.94	7.78 $\pm$ 0.44	7.35 $\pm$ 0.19
	Min.	7.24	6.98	9.01	7.11	7.13	7.15
	Máx.	8.98	8.24	12.33	9.41	8.07	7.57
Laguna Salada	Media $\pm$ DS	7.76 $\pm$ 1.15	6.75 $\pm$ 1.55	9.90 $\pm$ 0.74	6.57 $\pm$ 0.92	8.22 $\pm$ 0.26	7.80 $\pm$ 0.51
	Min.	6.43	5.01	9.30	5.61	7.93	7.27
	Máx.	8.48	8.00	10.72	7.44	8.41	8.28
Laguna Guerrero	Media $\pm$ DS	8.20 $\pm$ 0.94	9.32 $\pm$ 0.44	8.20 $\pm$ 0.26	8.02 $\pm$ 0.46	8.48 $\pm$ 0.44	7.89 $\pm$ 0.44
	Min.	6.68	8.68	7.75	7.26	8.11	7.20
	Máx.	9.18	9.91	8.38	8.50	9.13	8.24

En relación con las lagunas Chile Verde, Salada y Guerrero, se observó que la concentración media anual de OD disminuyó de 2017 (8.72 mg/l  $\pm$  1.55, 8.14 mg/l  $\pm$  1.74 y 8.57 mg/l  $\pm$  0.79, respectivamente) a 2018 (7.77 mg/l  $\pm$  0.66, 7.53 mg/l  $\pm$  0.92 y 8.13 mg/l  $\pm$  0.49, respetivamente), aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas (Tabla 3). Sin embargo, a lo largo de los dos años de monitoreo, las concentraciones en todos los sitios fueron superiores a 5 mg/l establecidos por los CECAs (SEDUE, 1989), para la protección de vida acuática de agua dulce y salobre; por lo que para este indicador, presentan una buena calidad del agua.

### Salinidad.-

La variación de la salinidad en un cuerpo de agua indica la influencia de las entradas de agua dulce y marina, que pueden modificar la distribución espacial y temporal de los indicadores de calidad del agua, así como de las especies acuáticas, de ahí la importancia de su medición.

En la Bahía Chetumal/Corozal el valor medio anual de salinidad fue de 13.7 ‰  $\pm$  6.4 en 2017 y de 14.4 ‰  $\pm$  6.6 en 2018, que son propios de cuerpos de agua con influencia de agua dulce y marina, como es el caso de este sistema. La salinidad media estacional más baja se registró en la época de nortes de 2017 (10.1‰  $\pm$

4.0) y la más alta en la época de lluvias de 2018 ( $16.4 \text{ ‰} \pm 6.9$ ) (Tabla 4). La salinidad más alta durante 2018 y particularmente en la época de lluvias, se debió a que la precipitación pluvial registrada en este año fue menor, principalmente en el mes de agosto; por lo que la influencia del agua marina fue mayor. Espacialmente, se observó que a lo largo del período de monitoreo, se registraron valores menores a  $5 \text{ ‰}$  en los sitios 13 (río Hondo), 9 a 12 (Calderitas y ciudad de Chetumal) y 19 (New River), en dónde ocurre la descarga de agua dulce superficial y subterránea (Fig. 1).

**Tabla 4.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio  $\pm$  desviación estándar de la salinidad ( $\text{‰}$ ), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Media $\pm$ DS	15.9 $\pm$ 7.1	15.0 $\pm$ 6.4	10.1 $\pm$ 4.0	14.0 $\pm$ 8.4	16.4 $\pm$ 6.9	14.5 $\pm$ 6.5
	Min.	4.6	2.5	0.5	1.5	3.3	0.5
	Máx.	38.3	30.7	18.2	37.2	34.2	29.0
Laguna Chile Verde	Media $\pm$ DS	2.7 $\pm$ 0.1	2.2 $\pm$ 0.1	1.8 $\pm$ 0.1	2.3 $\pm$ 0.2	2.0 $\pm$ 0.1	1.9 $\pm$ 0.05
	Min.	2.6	2.1	1.7	2.1	1.9	1.8
	Máx.	2.9	2.2	1.8	2.4	2.1	1.9
Laguna Salada	Media $\pm$ DS	13.1 $\pm$ 0.9	11.3 $\pm$ 0.5	10.5 $\pm$ 0.7	15.9 $\pm$ 1.7	14.1 $\pm$ 0.1	13.7 $\pm$ 0.7
	Min.	12.5	10.8	9.8	14.6	14.0	12.9
	Máx.	14.1	11.7	11.1	17.8	14.2	14.1
Laguna Guerrero	Media $\pm$ DS	5.2 $\pm$ 0.4	3.8 $\pm$ 0.4	3.0 $\pm$ 0.4	4.8 $\pm$ 0.6	3.0 $\pm$ 0.2	3.2 $\pm$ 0.3
	Min.	4.8	3.4	2.7	4.3	2.8	2.9
	Máx.	5.8	4.2	3.5	5.5	3.3	3.5

La salinidad promedio anual en la laguna Salada fue similar a la de la Bahía de Chetumal, con valores de  $11.6 \text{ ‰} \pm 1.3$  en 2017 y de  $14.6 \text{ ‰} \pm 1.4$  en 2018. La laguna Chile Verde registró valores promedio anual de  $2.2 \text{ ‰} \pm 0.4$  en 2017 y de  $2.1 \text{ ‰} \pm 0.2$  en 2018, característicos de cuerpos de agua dulce. En tanto que laguna Guerrero presentó valores promedio anuales en 2017 de  $4.0 \text{ ‰} \pm 1.0$  y en 2018 de  $3.7 \text{ ‰} \pm 0.9$ , que indican una influencia de entrada de agua salobre de la Bahía de Chetumal. Es interesante observar que las tres lagunas registraron un comportamiento temporal de la salinidad acorde a lo esperado, con valores más altos en la época de secas, que descienden hacia la temporada de nortes (Tabla 4), por lo que en las lagunas continentales la influencia principal proviene del agua subterránea y la precipitación pluvial.

## Conductividad.-

Este parámetro se analiza sólo para Bahía de Chetumal, debido a que no fue medido en Bahía Corozal. La conductividad puede presentar similar comportamiento que la salinidad, debido a que este indicador es sensible a las variaciones en sólidos disueltos, principalmente sales minerales (Chapman, 1996), por lo que la salinidad y la conductividad media anual fue igual en 2017 (12.1 ‰ ± 4.1 y 20.2 mS/cm ± 6.5, respectivamente) y en 2018 (12.2 ‰ ± 4.8 y 20.2 mS/cm ± 7.5, respectivamente). La variabilidad temporal de los dos parámetros también fue similar. Así, durante 2017 se registró un comportamiento descendente de la época de secas a la de nortes, en la salinidad (13.5 ‰ ± 4.5, 12.7 ‰ ± 4.6 y 11.1 ‰ ± 3.1, respectivamente) y la conductividad (Tabla 5); mientras que en 2018 el comportamiento fue ascendente en la conductividad (Tabla 5) y la salinidad (10.2 ‰ ± 4.8, 13.4 ‰ ± 4.2 y 14.7 ‰ ± 7.9, respectivamente). Es probable que este comportamiento este asociado a los regímenes pluviales que fueron menores en 2018, que favorecieron una mayor influencia marina.

En relación al comportamiento espacial, se observó que los valores más bajos de conductividad y salinidad a lo largo de todo el período de monitoreo, se registraron en los sitios cercanos a la ciudad de Chetumal y Calderitas (8 a 12) y el río Hondo (13) (Fig. 1), con fuerte influencia de la descarga de agua dulce superficial y subterránea.

**Tabla 5.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio ± desviación estándar de la conductividad (mS/cm), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Media ± DS	21.5±6.9	20.6±7.3	18.5±5.0	16.7±7.7	21.8±6.6	23.4±6.9
	Min.	8.3	4.6	1.1	2.9	6.1	4.3
	Máx.	36.6	28.1	22.7	24.9	29.9	31.0
Laguna Chile Verde	Media ± DS	5.01±0.21	4.09±0.12	3.35±0.09	4.37±0.21	3.75±0.14	3.62±0.27
	Min.	4.86	3.99	3.21	4.06	3.65	3.22
	Máx.	5.32	4.25	3.42	4.55	3.95	3.76
Laguna Salada	Media ± DS	21.8±1.4	19.1±0.7	17.7±1.0	26.1±2.5	23.4±0.1	22.5±1.0
	Min.	21.0	18.3	16.7	24.2	23.3	21.4
	Máx.	23.5	19.7	18.7	28.9	23.5	23.1
Laguna Guerrero	Media ± DS	9.27±0.70	7.04±0.65	5.52±0.63	8.62±0.93	5.63±0.32	5.91±0.42
	Min.	8.65	6.34	4.96	7.74	5.23	5.54
	Máx.	10.30	7.72	6.40	9.80	6.03	6.56

En relación con las tres lagunas, la conductividad promedio anual fue similar a la salinidad. Así, en la Laguna Salada la conductividad en 2017 fue de  $19.5 \text{ mS/cm} \pm 2.0$  y de  $24.0 \text{ mS/cm} \pm 2.1$  en 2018. La Laguna Chile Verde registró valores promedio anual de  $4.15 \text{ mS/cm} \pm 0.72$  en 2017 y de  $3.91 \text{ mS/cm} \pm 0.39$  en 2018. En tanto que Laguna Guerrero presentó valores promedio anuales en 2017 de  $7.28 \text{ mS/cm} \pm 1.71$  y en 2018 de  $6.72 \text{ mS/cm} \pm 1.51$ . De la misma manera que ocurrió con la salinidad, las tres lagunas registraron un comportamiento temporal de la conductividad acorde a lo esperado, con valores más altos en la época de secas, que descienden hacia la temporada de nortes (Tabla 5); que indica que en cuerpos de agua continentales la influencia principal proviene del agua subterránea y la precipitación pluvial.

#### pH.-

El pH es una variable importante cuando se evalúa la calidad del agua, debido a que tiene influencia en muchos procesos químicos y biológicos; así, en la mayoría de los cuerpos de agua naturales, el pH se encuentra en el rango de 6.0 a 8.5, aunque valores más altos pueden ocurrir en aguas eutrofizadas (Chapman, 1996).

En Bahía Chetumal/Corozal el valor promedio anual de pH fue similar en 2017 y 2018, con valores de  $8.07 \pm 0.43$ , y  $8.14 \pm 0.38$ , respectivamente. El pH tuvo un comportamiento estacional ascendente de la época de secas a la de nortes (Tabla 6), sin diferencias estadísticamente significativas. Estos valores se encuentran en el rango normal de cuerpos de agua naturales, con algunos valores máximos superiores a 8.5 en secas de 2017 y nortes de los dos años de monitoreo, registrados en sitios cercanos a la ciudad de Chetumal, donde nutrientes como amonio y fosfatos superaban el Límite Máximo Permissible de los CECAs, para la protección de vida acuática de aguas salobres (SEDUE, 1989).

**Tabla 6.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio  $\pm$  desviación estándar del pH (unidades), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Media $\pm$ DS	7.92 $\pm$ 0.49	7.98 $\pm$ 0.34	8.33 $\pm$ 0.33	7.97 $\pm$ 0.37	8.07 $\pm$ 0.26	8.47 $\pm$ 0.32
	Min.	6.88	6.74	7.27	6.41	7.53	7.76
	Máx.	8.86	8.42	8.71	8.44	8.40	8.97
Laguna Chile Verde	Media $\pm$ DS	8.35 $\pm$ 0.14	7.86 $\pm$ 0.12	8.32 $\pm$ 0.08	7.66 $\pm$ 0.04	7.48 $\pm$ 0.05	8.13 $\pm$ 0.19
	Min.	8.14	7.72	8.20	7.61	7.41	7.96
	Máx.	8.45	8.01	8.37	7.69	7.53	8.40
Laguna Salada	Media $\pm$ DS	7.08 $\pm$ 1.44	7.53 $\pm$ 0.15	8.33 $\pm$ 0.02	7.83 $\pm$ 0.20	7.85 $\pm$ 0.09	8.73 $\pm$ 0.17
	Min.	6.04	7.36	8.31	7.60	7.77	8.54
	Máx.	8.72	7.62	8.34	7.96	7.94	8.84
Laguna Guerrero	Media $\pm$ DS	8.36 $\pm$ 0.80	7.77 $\pm$ 0.06	8.08 $\pm$ 0.17	7.64 $\pm$ 0.08	7.64 $\pm$ 0.04	8.18 $\pm$ 0.04
	Min.	7.33	7.69	7.78	7.53	7.59	8.11
	Máx.	9.29	7.85	8.20	7.74	7.68	8.21

En Laguna Salada se observó un aumento en el valor promedio anual de pH de 2017 (7.65  $\pm$  0.91) a 2018 (8.14  $\pm$  0.47), con un comportamiento estacional ascendente de la época de secas a la de lluvias en los dos años, como se observa en los valores medios en la Tabla 6. En las lagunas de agua dulce Chile Verde y Guerrero, el valor medio anual de pH fue mayor en 2017 (8.18  $\pm$  0.26 y 8.07  $\pm$  0.51, respectivamente), que en 2018 (7.76  $\pm$  0.30 y 7.82  $\pm$  0.27, respectivamente), con los valores medios estacionales más bajos registrados durante la época de lluvias de los dos años de monitoreo (Tabla 6). Todos los valores de pH se encuentran en el rango considerado para cuerpos de agua naturales, con un valor máximo de 9.29 en Laguna Guerrero durante la época de secas de 2017, que coincide con altas concentraciones de fosfatos principalmente.

### Turbidez y Transparencia.-

De acuerdo con Chapman (1996), la turbidez y la transparencia del agua son controladas por el tipo y concentración de la materia suspendida que está conformada por partículas de limo, arcilla, materia orgánica e inorgánica, plancton y otros microorganismos. La turbidez es una medida de la dispersión y absorción de la luz por las partículas en un cuerpo de agua, mientras que la transparencia mide el límite de visibilidad en la columna de agua. De acuerdo con estos conceptos, ambas variables son complementarias, ya que a mayor turbidez en la columna de agua le corresponde una menor transparencia y viceversa.



Debido a que en Bahía Chetumal se midió turbidez y en Bahía Corozal se midió transparencia, los valores promedio de este indicador se calcularon por separado (Tabla 7). Es importante anotar también que para el mes de noviembre (nortes) de 2018, no se tienen datos de turbidez para la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía Chetumal, debido a fallas en los sensores de la sonda multiparamétrica.

Como se puede observar en la tabla 7, durante 2017 en Bahía Chetumal y Bahía Corozal, la turbidez más elevada ( $31.3 \pm 40.0$ ) y por lo tanto la menor transparencia ( $66 \pm 34$ ), se registró en la temporada de secas (abril); mientras que la menor turbidez ( $3.1 \text{ NTU} \pm 3.0$ ) y por lo tanto la mayor transparencia ( $79\% \pm 28$ ) se observó en la época de nortes. Esto se explica principalmente porque en 2017, ocurrió una mayor precipitación pluvial en abril (132 mm) que en noviembre (74 mm), que representa una fuente de escurrimiento de sólidos a los cuerpos de agua.

**Tabla 7.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio  $\pm$  desviación estándar de la turbidez (NTU), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal, y de transparencia (%) para Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal	Media $\pm$ DS	31.3 $\pm$ 40.0	13.8 $\pm$ 24.0	3.1 $\pm$ 3.0	13.6 $\pm$ 16.0	21.7 $\pm$ 40.0	sd
	Min.	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	sd
	Máx.	104.0	78.6	12.4	53.7	129.0	sd
Bahía Corozal	Media $\pm$ DS	66 $\pm$ 34	68 $\pm$ 35	79 $\pm$ 28	79 $\pm$ 25	74 $\pm$ 27	69 $\pm$ 30
	Min.	5	16	9	29	29	27
	Máx.	100	100	100	100	100	100
Laguna Chile Verde	Media $\pm$ DS	18.8 $\pm$ 10.5	13.7 $\pm$ 9.5	8.7 $\pm$ 2.4	17.8 $\pm$ 9.0	16.1 $\pm$ 16.8	sd
	Min.	8.5	7.4	7.2	10.1	7.2	sd
	Máx.	32.5	27.8	12.2	28.7	41.2	sd
Laguna Salada	Media $\pm$ DS	6.5 $\pm$ 5.8	3.7 $\pm$ 0.2	0.7 $\pm$ 0.7	39.8 $\pm$ 40.7	1.1 $\pm$ 0.9	sd
	Min.	2.3	3.5	0.0	5.6	0.0	sd
	Máx.	13.1	3.8	1.4	96.8	1.7	sd
Laguna Guerrero	Media $\pm$ DS	2.2 $\pm$ 0.9	0.0	1.1 $\pm$ 0.9	2.6 $\pm$ 0.6	0.1 $\pm$ 0.2	sd
	Min.	1.1	0.0	0.0	02.0	0.0	sd
	Máx.	3.2	0.0	1.9	3.2	0.4	sd

Para 2018, el comportamiento temporal fue a la inversa, es decir, en secas se registró el valor más bajo de turbidez ( $13.6 \text{ NTU} \pm 16.0$ ) y el más alto de transparencia ( $79\% \pm 25$ ), mientras que la menor transparencia se registró en la época de nortes ( $69\% \pm 30$ ). Debido a que en 2018 la precipitación pluvial fue

similar en abril (92 mm) y noviembre (78 mm), es posible que el comportamiento de la turbidez y transparencia en Bahía Chetumal/Corozal, se debió a la concentración de clorofila *a* que fue mayor en abril (2.94 µg/l ±1.22) que en noviembre (2.15 µg/l ±1.66) (Tabla 13). En relación al comportamiento espacial, la mayor turbidez en Bahía Chetumal se observó siempre en los sitios cercanos a la costa occidental, principalmente frente a la ciudad de Chetumal (9 a 12) y el río Hondo (13) (fig. 1). Mientras que la menor transparencia en Bahía Corozal, se presentó en los sitios 17 a 21 en dónde se encuentran New River y la ciudad de Corozal.

En relación con las lagunas, durante 2017 el valor promedio anual mayor se registró en Chile Verde (13.7 NTU ± 8.7) y el menor en Guerrero (1.1 NTU ± 1.2), mientras que durante 2018 el valor más alto se observó en laguna Salada con 20.4 NTU ± 37.9, y el más bajo se mantuvo en laguna Guerrero con 1.4 NTU ± 1.4. Este comportamiento se debe a que las lagunas Chile Verde y Salada son cuerpos de agua pequeños y someros, lo que favorece la re-suspensión de sedimentos que son un factor de turbidez.

En relación al comportamiento temporal, se observa que durante 2017 en las tres lagunas el valor promedio mensual fue mayor en secas y menor en nortes (Tabla 7), que se explica igualmente por el régimen pluvial durante este año. En 2018 también se registró una mayor turbidez en secas que en lluvias, que se debe al mismo comportamiento de la concentración de clorofila *a* en las tres lagunas (Tabla 13). Sobre el comportamiento espacial, los altos valores en las lagunas Chile Verde (sitios 33 y 36) y Salada (sitio 39), se registraron en las zonas más someras en donde el viento es un factor determinante en la re-suspensión de sedimentos (Fig. 1).

## Indicadores Nutrientes y Clorofila a:

En esta sección se analiza el comportamiento espacial y temporal de los indicadores de la carga orgánica de los cuerpos de agua, durante el período de monitoreo de 2017-2018. Así mismo, se compara su concentración con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECAs) para la protección de la vida acuática dulce y salobre/marina (SEDUE, 1989), para determinar la calidad de los cuatro cuerpos de agua.

El fósforo y el nitrógeno son nutrientes esenciales para todos los seres vivos. Sus formas inorgánicas son utilizadas por los organismos fotosintéticos para la producción de biomasa, que es la base de las cadenas alimenticias. En los cuerpos de agua, la presencia en exceso de estos elementos proveniente de fuentes naturales y antropogénicas, podría estimular la producción de biomasa de plantas macroscópicas y microscópicas como el fitoplancton; que al descomponerse, demandará el uso de oxígeno disuelto por los microorganismos degradadores, disminuyendo su concentración y disponibilidad para los organismos aeróbicos. Este proceso se llama eutrofización. Por todo lo anterior, se utilizan como indicadores de la calidad y salud de los cuerpos de agua.

Con el objetivo de determinar la calidad de los cuatro cuerpos de agua, durante 2017 y 2018, se analiza el comportamiento espacial y temporal de los nitritos, nitratos, amonio y fosfatos, y se compara su concentración con los CECAs. Se analiza también el comportamiento de los silicatos como un trazador del aporte de agua subterránea a los cuatro cuerpos de agua, que puede ser fuente del ingreso de nutrientes resultado de actividades humanas. Y se evalúa a la clorofila *a* como una respuesta del enriquecimiento orgánico por exceso de nutrientes.

## Nitritos. -

En Bahía Chetumal/Corozal la concentración promedio anual de nitritos fue igual en 2017 y 2018 (0.003 mg/l  $\pm$  0.004). Durante los dos años de monitoreo, las épocas de lluvias (agosto) y nortes (noviembre), presentaron concentraciones promedio superiores al Límite Máximo Permissible (LMP) de 0.002 mg/l, establecido en los CECAs para la protección de la vida acuática de agua salobre y marina (Tabla 8).

En relación con la variabilidad espacial en Bahía Chetumal/Corozal, durante la temporada de secas (abril) el porcentaje de sitios que presentaron concentraciones superiores a los CECAs, aumentó de 2017 (16%) a 2018 (25%), ubicándose principalmente frente a las ciudades de Chetumal y Corozal, y de Orchid Bay, que son zonas poco profundas con influencia de las descargas pluviales y de aguas subterráneas potencialmente enriquecidas con aguas residuales (Fig. 2). Para la época de lluvias (agosto) el porcentaje de sitios con valores superiores a los CECAs aumenta con respecto a la temporada de secas, pero disminuye de 2017 (50%) a 2018 (35%); en esta temporada los sitios se extienden desde el poblado de Calderitas hasta el río Hondo, y de ciudad de Corozal hasta el poblado de Sarteneja (Fig. 3).

En la época de nortes, mejora la calidad del agua con 32% de los sitios con valores superiores a los CECAs, durante los dos años de monitoreo. En esta temporada, la mala calidad del agua se mantiene en los sitios cercanos a la ciudad de Chetumal y se extiende a la zona norte de la bahía, debido principalmente a la influencia de los vientos que re-suspenden los sedimentos con alto contenido de materia orgánica (Fig. 4).

**Tabla 8.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio  $\pm$  desviación estándar de nitritos (mg/l), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Media $\pm$ DS	0.002 $\pm$ 0.005	0.004 $\pm$ 0.004	0.003 $\pm$ 0.002	0.002 $\pm$ 0.002	0.003 $\pm$ 0.004	0.003 $\pm$ 0.005
	Min.	0.0001	0.001	0.001	0.0002	0.0001	0.0001
	Máx.	0.027	0.016	0.010	0.011	0.015	0.022
	Porcentaje	16% (5)	50% (16)	32% (10)	25% (8)	35% (11)	32% (10)
Laguna Chile Verde	Media $\pm$ DS	0.0001 $\pm$ 0.000	0.003 $\pm$ 0.0004	0.001 $\pm$ 0.0004	0.002 $\pm$ 0.002	0.002 $\pm$ 0.003	0.001 $\pm$ 0.001
	Min.	0.0001	0.002	0.0001	0.001	0.0003	0.0003
	Máx.	0.0001	0.003	0.001	0.006	0.007	0.003
	Porcentaje	0	100% (3)	0	0	0	0
Laguna Salada	Media $\pm$ DS	0.0001 $\pm$ 0.000	0.003 $\pm$ 0.0002	0.001 $\pm$ 0.0004	0.001 $\pm$ 0.0002	0.0004 $\pm$ 0.000	0.0003 $\pm$ 0.000
	Min.	0.0001	0.003	0.001	0.001	0.0001	0.0002
	Máx.	0.0001	0.003	0.002	0.001	0.001	0.0004
	Porcentaje	0	100% (3)	0	0	0	0
Laguna Guerrero	Media $\pm$ DS	0.009 $\pm$ 0.003	0.003 $\pm$ 0.001	0.007 $\pm$ 0.002	0.004 $\pm$ 0.002	0.0003 $\pm$ 0.000	0.0005 $\pm$ 0.000
	Min.	0.005	0.002	0.005	0.002	0.000	0.000
	Máx.	0.013	0.003	0.009	0.007	0.001	0.001
	Porcentaje	0	100% (3)	0	0	0	0

En Laguna Salada la concentración media anual de nitritos disminuye de 2017 (0.0013 mg/l  $\pm$  0.0011) a 2018 (0.0006 mg/l  $\pm$  0.0005). En general, en las tres épocas climáticas se mantienen bajas concentraciones de este nutriente, con excepción de la época de lluvias (agosto) de 2017, en dónde todo el sistema presenta niveles superiores al LMP de 0.002 mg/l establecido en los CECAs para la protección de vida acuática en ambientes salobres (Tabla 8 y Fig. 3).

Debido a que los CECAs no establecen LMP de este parámetro para aguas dulces, no se realiza esta comparación en las lagunas Chile Verde y Guerrero. Sin embargo, se observó que la concentración promedio anual de nitritos en laguna Chile Verde, aumentó de 2017 (0.001 mg/l  $\pm$  0.001) a 2018 (0.002 mg/l  $\pm$  0.002). Este aumento se registró en la época de secas (abril) de 2018 (Tabla 8), principalmente en el sitio 36 localizado al norte de la laguna (Fig. 2), en dónde su baja profundidad facilita la re-suspensión de sedimentos con alto contenido de materia orgánica; por lo que a lo largo de 2018 mantuvo la concentración más alta en el sistema.

Por el contrario, en la laguna Guerrero la concentración media anual de nitritos disminuyó de 2017 (0.006 mg/l  $\pm$  0.004) a 2018 (0.002 mg/l  $\pm$  0.002). Durante los dos años la época de secas (abril) registró la concentración promedio mensual más alta (Tabla 8), debido principalmente a los sitios 43 y 44 (Fig. 2), que se localizan frente a Raudales y el poblado de Luis Echeverría, en dónde las fuentes

de contaminación potenciales son los lixiviados de aguas residuales mezclados con el agua subterránea.

### Nitratos. -

La concentración promedio anual de nitratos en Bahía Chetumal/Corozal disminuyó de 2017 (0.037 mg/l  $\pm$  0.057) a 2018 (0.028 mg/l  $\pm$  0.044). Si bien esta disminución se observó para las épocas de secas (abril) y lluvias (agosto), durante la temporada de nortes (noviembre) la concentración aumentó de 2017 (0.012 mg/l  $\pm$  0.015) a 2018 (0.032 mg/l  $\pm$  0.045) (Tabla 9).

En relación con la variabilidad espacial en Bahía Chetumal/Corozal, durante la época de secas (abril) de 2017, 63% de los sitios (8 a 13, 17 a 25 y 29 a 32) presentaron concentraciones superiores a los LMP de los CECAs (0.04 mg/l), todos ellos localizados en la costa occidental del sistema, que incluye asentamientos humanos y humedales con alto contenido orgánico, por lo que las fuentes son de origen antropogénico y natural. Para 2018 los sitios (8 a 13) con valores superiores a los CECAs comprendieron solo el 19% localizados frente al poblado de Calderitas, la ciudad de Chetumal y desembocadura de Río Hondo (Fig. 2). Para la temporada de lluvias (agosto) de 2017, 19% de los sitios (8 a 14) presentaron valores superiores a los CECAs, ubicados nuevamente frente al poblado de Calderitas, ciudad de Chetumal y río Hondo; para agosto de 2018 solo 9% de los sitios (11 a 13) mantuvieron valores arriba de los CECAs, localizados frente a ciudad de Chetumal y río Hondo (Fig. 3). Mientras que para la temporada de nortes (noviembre), los sitios con valores superiores a los CECAs aumentaron de 2017 (3%, sitio 8 en Calderitas) a 2018 (22%) principalmente en sitios cercanos a la ciudad de Chetumal (8 a 12), río Hondo (13) y ciudad de Corozal (17 y 21) (Fig. 4).

**Tabla 9.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio  $\pm$  desviación estándar de nitratos (mg/l), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Media $\pm$ DS	0.074 $\pm$ 0.077	0.024 $\pm$ 0.040	0.012 $\pm$ 0.015	0.030 $\pm$ 0.053	0.022 $\pm$ 0.034	0.032 $\pm$ 0.045
	Min.	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.000
	Máx.	0.242	0.169	0.060	0.184	0.155	0.188
	Porcentaje	63% (19)	13% (4)	3% (1)	19% (6)	9% (3)	22% (8)
Laguna Chile Verde	Media $\pm$ DS	0.003 $\pm$ 0.004	0.007 $\pm$ 0.003	0.006 $\pm$ 0.001	0.007 $\pm$ 0.002	0.039 $\pm$ 0.039	0.010 $\pm$ 0.010
	Min.	0.001	0.005	0.005	0.004	0.016	0.002
	Máx.	0.009	0.011	0.008	0.010	0.097	0.024
	Media $\pm$ DS	0.001 $\pm$ 0.000	0.001 $\pm$ 0.001	0.005 $\pm$ 0.005	0.004 $\pm$ 0.001	0.008 $\pm$ 0.004	0.002 $\pm$ 0.000
Laguna Salada	Min.	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002
	Máx.	0.001	0.002	0.010	0.004	0.011	0.002
	Media $\pm$ DS	0.097 $\pm$ 0.071	0.004 $\pm$ 0.003	0.011 $\pm$ 0.003	0.016 $\pm$ 0.009	0.018 $\pm$ 0.022	0.005 $\pm$ 0.002
	Min.	0.035	0.002	0.006	0.005	0.002	0.002
Laguna Guerrero	Máx.	0.194	0.009	0.014	0.025	0.054	0.007

En la Laguna Salada la concentración promedio anual de nitratos se duplicó de 2017 (0.002 mg/l  $\pm$  0.003) a 2018 (0.004 mg/l  $\pm$  0.003), no obstante este incremento no sobrepasó el LMP de los CECAs. Este aumento de nitratos se registró en las épocas de secas (abril) y lluvias (agosto), y disminuyó para la temporada de nortes (noviembre) (Tabla 9). A lo largo del período de monitoreo el sitio 39 localizado al sur de la laguna (Fig. 1), fue el que presentó el valor más alto de este indicador, debido a que es una zona somera en la que se depositan sedimentos y materia orgánica por excurrimientos terrestres, que se resuspenden fácilmente por la acción de los vientos.

En la laguna Chile Verde también aumentó la concentración media anual de nitratos de 2017 (0.005 mg/l  $\pm$  0.003) a 2018 (0.019 mg/l  $\pm$  0.026). Al igual que ocurrió en laguna Salada, este aumento se registró en las épocas de secas y lluvias, con una disminución en la época de nortes (Tabla 9). Las concentraciones más altas se observaron generalmente en los sitios 35 y 36, localizados al sur del sistema (Fig. 1).

Por el contrario, en la Laguna Guerrero se observó un decremento en la concentración de nitratos de 2017 (0.038 mg/l  $\pm$  0.058) a 2018 (0.013 mg/l  $\pm$  0.014). Este decremento se presentó en las épocas de secas y nortes, mientras que en la temporada de lluvias ocurrió un aumento (Tabla 9). A lo largo del período del estudio, los valores más altos se registraron en los sitios 42 a 44, en donde se

localizan los poblados de Luis Echeverría y Raudales, así como una zona agrícola (fig. 1), por lo que las fuentes potenciales de contaminación se relacionan con lixiviados de aguas residuales de fosas sépticas y escurrimientos de fertilizantes desde la zona agrícola.

### Amonio. -

En la Bahía Chetumal/Corozal la concentración promedio anual de amonio disminuyó de 2017 ( $0.040 \text{ mg/l} \pm 0.028$ ) a 2018 ( $0.031 \text{ mg/l} \pm 0.020$ ), debido a las temporadas de secas (abril) y lluvias (agosto), ya que en la época de nortes se registró un aumento en el valor medio por época climática (Tabla 10). En abril y agosto de 2017, el 100% y 97% de los 32 sitios que comprenden el sistema presentaron valores de amonio superiores al LMP ( $0.01 \text{ mg/l}$ ) de los CECAs, para la protección de vida acuática de aguas salobres/marinas; que para 2018 disminuyeron a 66% en abril y a 88% en agosto (Fig. 2 y 3). Mientras que para noviembre (nortes), 66% de los sitios en 2017 presentaron valores superiores a los CECAs, que para 2018 pasaron al 100% (Fig.4).

Para este parámetro es importante indicar que las fuentes de amonio en la costa occidental de Bahía Chetumal y la costa norte de Bahía Corozal, se relaciona con las filtraciones de aguas residuales provenientes de lixiviados de fosas sépticas y los escurrimientos de aguas pluviales, así como de las zonas agrícolas del río Hondo y New River, respectivamente. En la costa sur de Belice la carga de amonio proviene de los escurrimientos superficiales de los humedales que tienen un alto contenido orgánico, mientras que en la zona norte y centro de Bahía Chetumal la fuente principal es la mineralización de materia orgánica en sitios de depósito en los sedimentos.



**Tabla 10.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio  $\pm$  desviación estándar de amonio (mg/l), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Media $\pm$ DS	0.043 $\pm$ 0.021	0.057 $\pm$ 0.034	0.021 $\pm$ 0.012	0.034 $\pm$ 0.029	0.028 $\pm$ 0.016	0.032 $\pm$ 0.013
	Min.	0.022	0.012	0.001	0.001	0.004	0.015
	Máx.	0.124	0.159	0.058	0.112	0.074	0.060
	Porcentaje	100% (32)	97% (31)	66% (21)	66% (21)	88% (28)	100% (32)
Laguna Chile Verde	Media $\pm$ DS	0.060 $\pm$ 0.025	0.031 $\pm$ 0.011	0.066 $\pm$ 0.015	0.093 $\pm$ 0.065	0.061 $\pm$ 0.012	0.068 $\pm$ 0.018
	Min.	0.040	0.022	0.048	0.020	0.046	0.042
	Máx.	0.097	0.047	0.085	0.178	0.076	0.082
	Porcentaje	25% (1)	0	50% (2)	75% (3)	25% (1)	75% (3)
Laguna Salada	Media $\pm$ DS	0.088 $\pm$ 0.052	0.059 $\pm$ 0.022	0.069 $\pm$ 0.026	0.037 $\pm$ 0.026	0.015 $\pm$ 0.010	0.016 $\pm$ 0.005
	Min.	0.053	0.040	0.039	0.011	0.008	0.011
	Máx.	0.148	0.083	0.089	0.063	0.026	0.021
	Porcentaje	100% (3)	100% (3)	100% (3)	66% (2)	33% (1)	66% (2)
Laguna Guerrero	Media $\pm$ DS	0.234 $\pm$ 0.060	0.068 $\pm$ 0.046	0.043 $\pm$ 0.016	0.050 $\pm$ 0.028	0.012 $\pm$ 0.004	0.035 $\pm$ 0.008
	Min.	0.153	0.026	0.024	0.012	0.006	0.025
	Máx.	0.299	0.137	0.066	0.081	0.016	0.046
	Porcentaje	100% (5)	40% (2)	20% (1)	40% (2)	0	0

En Laguna Salada también disminuyó la concentración promedio anual de amonio de 2017 (0.072 mg/l  $\pm$  0.034) a 2018 (0.023 mg/l  $\pm$  0.018). Esta disminución ocurrió en las tres épocas climáticas (Tabla 10). Los valores más altos se registraron generalmente en los sitios 37 y 39, que se localizan en los extremos norte y sur del sistema, en donde su baja profundidad permite la deposición de materia orgánica proveniente de los escurrimientos superficiales y su posterior descomposición y re-suspensión por las corrientes de aire (Fig.1). Durante 2017 el 100% de los sitios presentaron concentraciones superiores al LMP (0.01 mg/l) de los CECAs para la protección de vida acuática salobre, en las tres épocas climáticas; en tanto que para 2018 en abril y noviembre ocurrió en dos de los 3 sitios (66%), y en agosto en 1 de 3 sitios (33%) (Fig. 2, 3 y 4).

En laguna Chile Verde la concentración promedio anual de amonio aumentó de 2017 (0.052 mg/l  $\pm$  0.023) a 2018 (0.074 mg/l  $\pm$  0.038), principalmente en las temporadas de secas (abril) y lluvias (agosto), ya que en nortes (noviembre) se registró la misma concentración mensual promedio (Tabla 10). En relación con el comportamiento espacial, se observó que las altas concentraciones se registraron principalmente en los sitios localizados en los extremos norte (36) y sur (33) del sistema, que se encuentran en zonas someras en donde ocurren procesos como los mencionados para Laguna Salada. En relación con los CECAs, esta laguna

presentó sitios con valores superiores al LMP (0.06 mg/l) establecido para protección de vida acuática de agua dulce, que aumentaron de 2017 a 2018 para la temporada de secas de 25% a 75%, en lluvias de 0% a 25% y en nortes de 50% a 75%, respectivamente (Fig. 2, 3 y 4).

En Laguna Guerrero la concentración promedio anual de amonio disminuyó de 2017 (0.115 mg/l  $\pm$  0.097) a 2018 (0.032 mg/l  $\pm$  0.022), durante las tres épocas climáticas (Tabla 10). Las concentraciones más altas en cada época climática, se registraron en los sitios 42, 43 y 44, que se localizan frente a los poblados de Luis Echeverría y Raudales, así como a la zona agrícola al sur de la laguna (Fig. 1), dónde las fuentes potenciales de contaminación son los lixiviados de fosas sépticas y escurrimientos superficiales de la zona agrícola. En relación con los CECAs, el LMP de 0.06 mg /l, fue superado durante 2017 en el 100% de los sitios en abril, el 40% de los sitios en agosto y el 20% de los sitios en noviembre; mientras que para 2018 disminuyó a 40% de los sitios en abril, y a 0% de los sitios en agosto y noviembre (fig. 2, 3 y 4).

### Fosfatos. -

En el sistema Bahía Chetumal/Corozal la concentración media anual de fosfatos se incrementó de 2017 (0.003 mg/l  $\pm$  0.003) a 2018 (0.004 mg/l  $\pm$  0.002). Este aumento se debió al registrado durante la temporada de nortes (noviembre), ya que en secas (abril) disminuyó, y en lluvias (agosto) se mantuvo la misma concentración promedio mensual (Tabla 11). En relación con los CECAs, en el sistema se sobrepasó el LMP de fosfatos (0.002 mg/l) establecido para la protección de la vida acuática salobre y marina, en el 75% de los sitios en abril de 2017, que disminuyó a 63% para el mismo mes de 2018. Mientras que para la temporada de lluvias (agosto), el porcentaje de sitios con valores mayores que el LMP aumentó de 53% en 2017 a 66% en 2018. En tanto que en la época de nortes (noviembre) de 2017, se registraron en todo el sistema valores menores al

LMP, pero en 2018 el 53% de los sitios superó los CECAs. En general, los sitios en los que se superó el LMP, se localizaron en el norte de Bahía Chetumal, frente a las ciudades de Chetumal y Corozal, los ríos Hondo y New River, así como el sur de Bahía Corozal (Fig. 2, 3 y 4); en dónde las fuentes se asocian a asentamientos humanos, escurrimientos superficiales de carga orgánica de ríos y humedales, así como descomposición de materia orgánica en las zonas de deposición y/o almacenamiento de residuos orgánicos.

**Tabla 11.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio  $\pm$  desviación estándar de fosfatos (mg/l), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Media $\pm$ DS	0.005 $\pm$ 0.003	0.004 $\pm$ 0.003	0.001 $\pm$ 0.000	0.004 $\pm$ 0.002	0.004 $\pm$ 0.003	0.003 $\pm$ 0.002
	Min.	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
	Máx.	0.012	0.010	0.002	0.008	0.017	0.008
	Porcentaje	75% (24)	53% (17)	0%	63% (20)	66% (21)	53% (17)
Laguna Chile Verde	Media $\pm$ DS	0.006 $\pm$ 0.002	0.001 $\pm$ 0.000	0.001 $\pm$ 0.000	0.011 $\pm$ 0.003	0.002 $\pm$ 0.000	0.004 $\pm$ 0.001
	Min.	0.004	0.001	0.001	0.006	0.002	0.003
	Máx.	0.009	0.002	0.002	0.014	0.002	0.005
	Porcentaje	100% (3)	0	0	100% (3)	66% (2)	66% (2)
Laguna Salada	Media $\pm$ DS	0.008 $\pm$ 0.002	0.002 $\pm$ 0.000	0.001 $\pm$ 0.000	0.007 $\pm$ 0.004	0.003 $\pm$ 0.001	0.004 $\pm$ 0.001
	Min.	0.006	0.002	0.001	0.003	0.002	0.002
	Máx.	0.010	0.002	0.001	0.012	0.004	0.005
	Porcentaje	100% (3)	0	0	100% (3)	66% (2)	66% (2)
Laguna Guerrero	Media $\pm$ DS	0.006 $\pm$ 0.001	0.002 $\pm$ 0.001	0.002 $\pm$ 0.001	0.005 $\pm$ 0.002	0.004 $\pm$ 0.001	0.002 $\pm$ 0.001
	Min.	0.004	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002
	Máx.	0.007	0.003	0.002	0.007	0.006	0.004
	Porcentaje	100% (3)	0	0	100% (3)	66% (2)	66% (2)

En Laguna Salada también aumentó la concentración promedio anual de fosfatos de 2017 (0.004 mg/l  $\pm$  0.004) a 2018 (0.005 mg/l  $\pm$  0.003). Este incremento se experimentó durante las épocas de lluvias (agosto) y nortes (noviembre), en tanto que en la temporada de secas (abril) se observó una disminución (Tabla 11). Sin embargo, en la temporada de secas se registraron las concentraciones más altas de fosfatos en los dos años, que sobrepasaron el LMP de 0.002 mg/l establecido para la protección de vida acuática salobre (Fig. 2). Mientras que para las épocas de lluvias y nortes, el incremento del nivel de fosfatos en 2018, resultó en el rebase de los CECAs en dos de los tres sitios monitoreados (Fig. 3 y 4).

En Laguna Chile Verde también se observó un incremento de la concentración promedio anual de fosfatos de 2017 (0.003 mg/l  $\pm$  0.003) a 2018 (0.006 mg/l  $\pm$

0.005), durante las tres épocas climáticas (Tabla 11). Las concentraciones más altas generalmente se registraron en los sitios 33 y 36, localizadas al norte y sur del sistema (Fig.1), en zonas someras con fuerte influencia de escurrimientos superficiales. En relación con los CECAs, el LMP de fosfatos de 0.1 mg/l para la protección de organismos de agua dulce no fue excedido, durante todo el período de monitoreo (Fig. 2, 3 y 4).

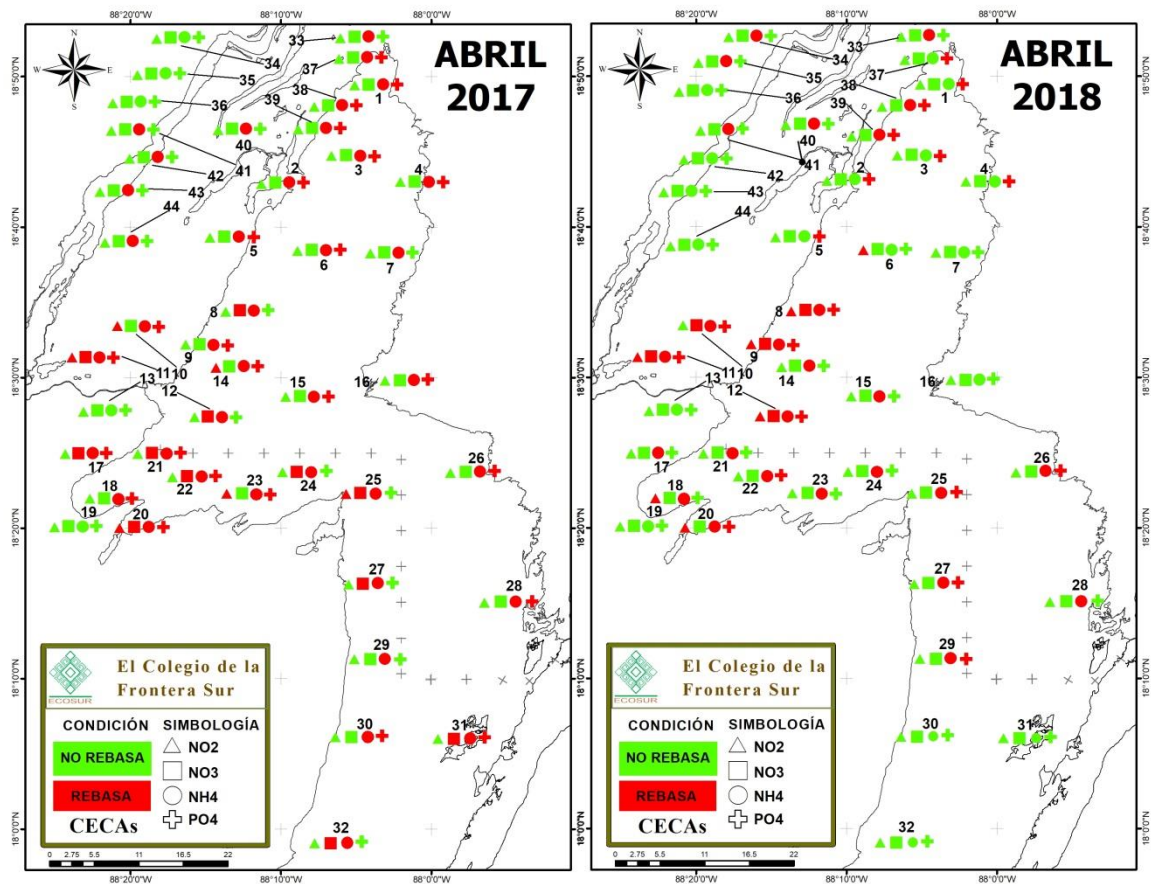


Fig. 2.- Comparación del comportamiento espacial de los CECAs en los 44 sitios de monitoreo que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH) y el Santuario de Vida Silvestre Bahía Corozal (CBWS, por sus siglas en inglés), durante la época de secas (abril 2017 y 2018).

Como ocurrió en toda la RESMBCH, la concentración media anual de fosfatos en Laguna Guerrero se incrementó de 2017 (0.003 mg/l ± 0.002) a 2018 (0.004 mg/l ± 0.002), aunque este aumento ocurrió solamente durante la época de lluvias (Tabla

11). No obstante, la mayor concentración de fosfatos se registró en las dos épocas de secas (abril), principalmente en los sitios cercanos a las localidades de Luis Echeverría y Raudales y la zona agrícola; en dónde las fuentes principales se relacionan con las filtraciones de aguas residuales de fosas sépticas y de agua subterránea. No fue superado el LMP de los CECAs (0.1 mg/l) para la protección de vida acuática de agua dulce, durante todo el período de monitoreo (Fig. 2, 3 y 4).

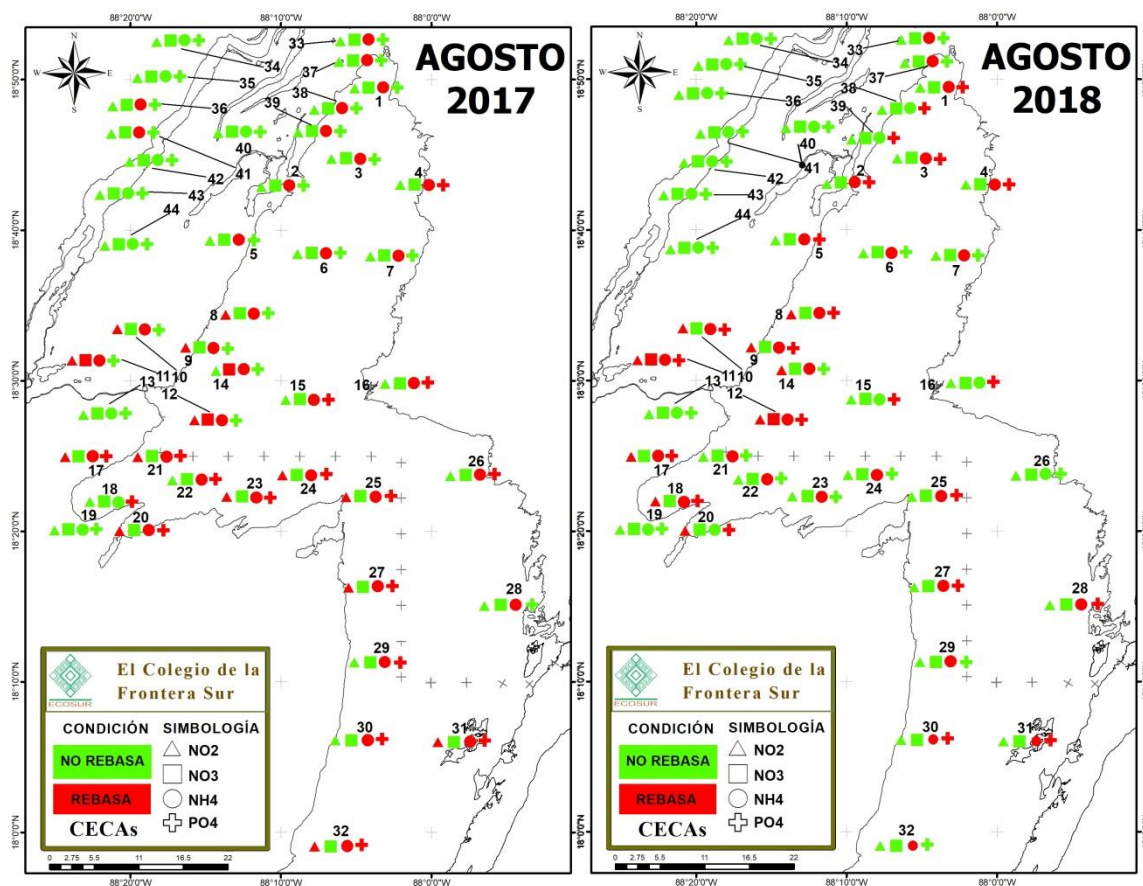


Fig. 3.- Comparación del comportamiento espacial de los CECAs en los 44 sitios de monitoreo que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH) y el Santuario de Vida Silvestre Bahía Corozal (CBWS, por sus siglas en inglés), durante la época de lluvias (agosto 2017 y 2018).

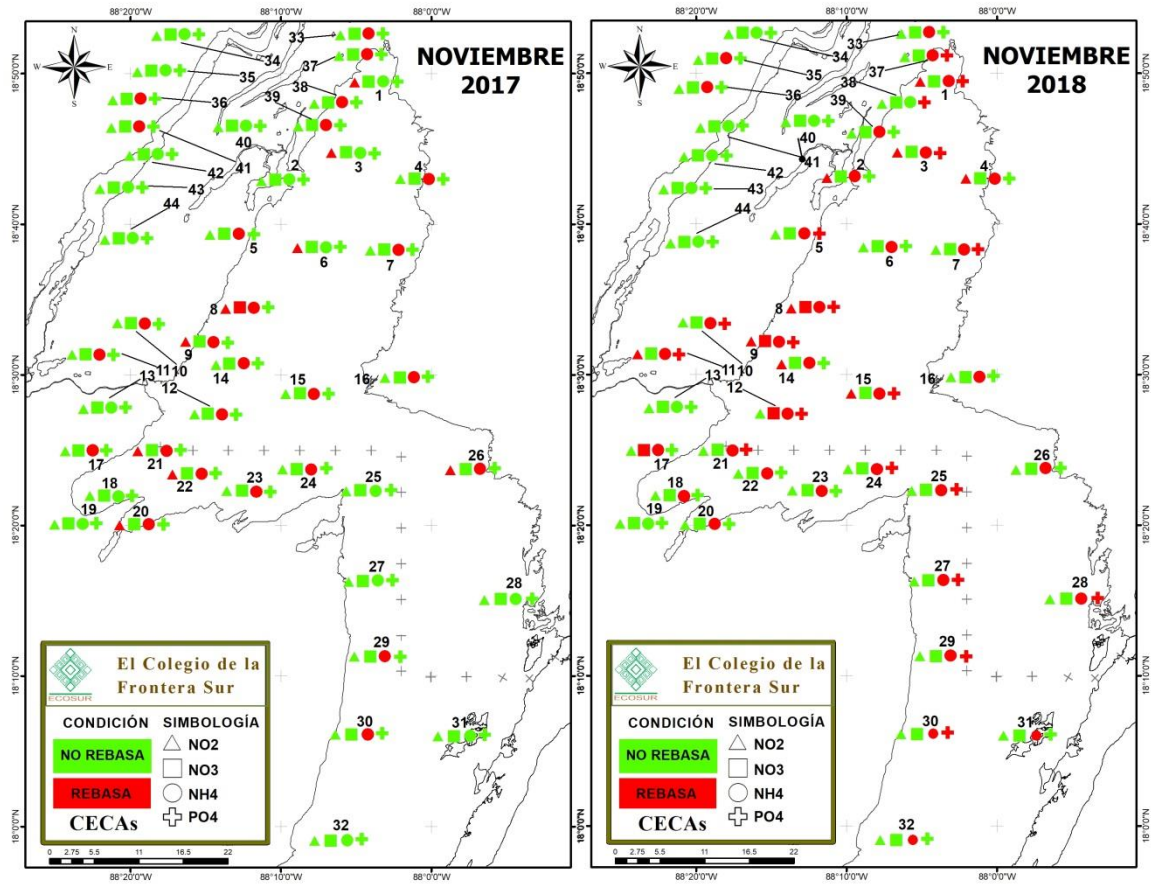


Fig. 4.- Comparación del comportamiento espacial de los CECAs en los 44 sitios de monitoreo que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH) y el Santuario de Vida Silvestre Bahía Corozal (CBWS, por sus siglas en inglés), durante la época de nortes (noviembre 2017 y 2018).

### Silicatos.-

Los silicatos se utilizan como un trazador de la entrada de agua subterránea a cuerpos de agua superficiales, debido a que de acuerdo con Stewart et al (2007), 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. Los cuatro cuerpos de agua que comprenden la RESMBCH y Bahía Corozal, reciben la descarga de agua subterránea, que en zonas con asentamientos humanos con uso de fosas sépticas y basureros a cielo abierto, pueden ir acompañadas de lixiviados con alto contenido orgánico; por lo que la evaluación de los silicatos puede servir para identificar fuentes potenciales de contaminación a cuerpos de agua superficiales.

En los cuatro cuerpos de agua, la concentración media anual de silicatos aumentó de 2017 a 2018. En el sistema Bahía Chetumal/Corozal pasó de 2.75 mg/l  $\pm$  2.02 a 5.44 mg/l  $\pm$  2.88, en la Laguna Chile Verde aumentó de 6.97 mg/l  $\pm$  3.64 a 11.57 mg/l  $\pm$  6.30, en Laguna Salada el cambio fue de 5.22 mg/l  $\pm$  2.30 a 7.07 mg/l  $\pm$  4.01 y en Laguna Guerrero de 8.63 mg/l  $\pm$  4.62 a 10.35 mg/l  $\pm$  5.71, respectivamente. Este aumento se debió principalmente a que de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua, en los meses de abril (secas) y agosto (lluvias), la precipitación pluvial fue menor en 2018 (92 mm y 80.2 mm, respectivamente), que en 2017 (131.5 mm y 116.1 mm, respectivamente); por lo que predominó la descarga de agua subterránea rica en silicatos durante estos meses (Tabla 12). En tanto que para la temporada de nortes (noviembre), la precipitación fue ligeramente superior en 2018 (77.7 mm) que en 2017 (73.7 mm), lo que contribuyó a una menor concentración de silicatos en 2018 en los cuatro sistemas acuáticos, por efecto de dilución (Tabla 12).

**Tabla 12.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio  $\pm$  desviación estándar de silicatos (mg/l), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Media $\pm$ DS	5.80 $\pm$ 2.18	2.62 $\pm$ 0.95	2.83 $\pm$ 0.57	6.28 $\pm$ 2.33	7.34 $\pm$ 2.40	2.69 $\pm$ 1.37
	Min.	0.98	0.48	1.44	0.74	1.07	0.52
	Máx.	9.74	5.11	4.59	10.92	12.74	5.54
Laguna Chile Verde	Media $\pm$ DS	11.62 $\pm$ 2.22	4.28 $\pm$ 0.15	5.02 $\pm$ 0.20	14.44 $\pm$ 0.40	17.08 $\pm$ 0.22	3.19 $\pm$ 0.64
	Min.	10.39	4.05	4.76	13.92	16.89	2.67
	Máx.	14.94	4.38	5.24	14.90	17.33	4.12
Laguna Salada	Media $\pm$ DS	8.10 $\pm$ 1.34	3.39 $\pm$ 0.22	4.16 $\pm$ 0.41	8.62 $\pm$ 0.14	10.71 $\pm$ 0.25	1.89 $\pm$ 0.68
	Min.	7.24	3.15	3.80	8.48	10.46	1.27
	Máx.	9.64	3.57	4.61	8.77	10.96	2.61
Laguna Guerrero	Media $\pm$ DS	14.79 $\pm$ 0.59	5.71 $\pm$ 0.16	5.38 $\pm$ 0.18	13.67 $\pm$ 0.44	14.80 $\pm$ 0.56	2.59 $\pm$ 0.20
	Min.	14.26	5.47	5.15	12.97	14.14	2.27
	Máx.	15.47	5.88	5.52	14.16	15.67	2.76

En relación con el comportamiento espacial de este indicador, en Bahía Chetumal/Corozal las concentraciones más altas de silicatos se registraron principalmente en los sitios 9 a 13 que se localizan frente a la ciudad de Chetumal y el río Hondo, y en los sitios 17 a 22 que se ubican frente a la ciudad de Corozal,

New River y Orchid Bay (Fig. 1); dónde se encontrarían las principales entradas de agua subterránea.

En las lagunas Chile Verde, Salada y Guerrero, debido a sus dimensiones más pequeñas y su ubicación en la zona continental, los silicatos presentaban una distribución espacial más homogénea, por lo que no se observaron diferencias significativas en la concentración de este parámetro entre sitios de monitoreo.

La entrada de nutrientes vía la descarga de agua subterránea fue específica del cuerpo de agua. Así, en la Bahía Chetumal/Corozal predominó el ingreso de nitritos, nitratos y amonio; en la laguna Chile Verde fueron los nitratos y amonio, en laguna Salada fueron amonio y fosfatos, y en laguna Guerrero nitritos, nitratos y fosfatos.

Clorofila a.-

La clorofila a es un pigmento verde que está presente en la mayoría de los organismos que realizan fotosíntesis y debido a que proporciona una medida indirecta de la biomasa de algas, se le ha utilizado como un indicador del estado trófico de un cuerpo de agua (Chapman, 1996).

**Tabla 13.-** Comparación del valor mínimo, máximo y promedio  $\pm$  desviación estándar de clorofila a ( $\mu\text{g/l}$ ), en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	Estadístico	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Media $\pm$ DS	3.21 $\pm$ 1.43	1.68 $\pm$ 0.83	3.46 $\pm$ 0.92	2.94 $\pm$ 1.22	3.86 $\pm$ 1.04	2.15 $\pm$ 1.66
	Min.	0.79	0.51	1.99	1.30	2.18	0.00
	Máx.	5.99	3.50	5.79	5.44	6.17	5.80
Laguna Chile Verde	Media $\pm$ DS	1.56 $\pm$ 0.56	1.49 $\pm$ 0.54	0.76 $\pm$ 0.44	3.50 $\pm$ 0.25	0.97 $\pm$ 1.01	2.30 $\pm$ 0.66
	Min.	1.00	0.93	0.34	3.37	0.11	1.75
	Máx.	2.08	2.08	1.15	3.88	2.36	3.16
Laguna Salada	Media $\pm$ DS	1.10 $\pm$ 0.76	2.98 $\pm$ 0.64	1.97 $\pm$ 1.25	2.28 $\pm$ 0.65	0.69 $\pm$ 0.64	3.74 $\pm$ 0.53
	Min.	0.29	2.25	0.71	1.68	0.00	3.13
	Máx.	1.81	3.41	3.22	2.97	1.27	4.07
Laguna Guerrero	Media $\pm$ DS	0.41 $\pm$ 0.33	1.01 $\pm$ 0.28	3.55 $\pm$ 0.83	2.93 $\pm$ 0.80	2.81 $\pm$ 0.23	2.38 $\pm$ 0.86
	Min.	0.00	0.65	2.60	1.76	2.60	1.83
	Máx.	0.88	1.40	4.85	3.98	3.13	3.94



En el sistema Bahía Chetumal/Corozal y las lagunas Chile Verde, Salada y Guerrero, la concentración media anual de clorofila *a* aumentó de 2017 (2.78 µg/l ± 1.34, 1.27 µg/l ± 0.60, 2.02 µg/l ± 1.15 y 1.65 µg/l ± 1.49, respectivamente) a 2018 (2.99 µg/l ± 1.49, 2.26 µg/l ± 1.26, 2.24 µg/l ± 1.42 y 2.71 µg/l ± 0.69, respectivamente). Este incremento se dio durante la época de lluvias (agosto) en Bahía Chetumal/Corozal, en secas (abril) y nortes (noviembre) en las lagunas Chile Verde y Salada, y en secas y lluvias en laguna Guerrero (Tabla 13).

Durante los dos años de monitoreo, las concentraciones más altas de clorofila *a* (4 a 6 µg/l) en Bahía Chetumal/Corozal se registraron principalmente en los sitios 17, 21 a 24 y 29 a 31, que se localizan frente a la ciudad de Corozal, Orchid Bay, Sarteneja y el extremo sur del canal de comunicación con el Mar Caribe (Fig.1); en dónde los fosfatos y los nitritos regularon la respuesta de la clorofila *a*.

En laguna Chile Verde, las concentraciones mayores (2 a 4 µg/l) se registraron en los sitios 34 y 35 localizados en la parte central del sistema (Fig.1), en dónde los fosfatos y nitratos regularon la respuesta de la clorofila *a*. En Laguna Salada los valores más altos de este indicador (3 a 4 µg/l) se presentaron en los sitios 37 y 38, localizados al centro y sur del sistema (Fig.1); con los fosfatos y amonio regulando la respuesta de la clorofila *a*. En tanto que en laguna Guerrero los niveles más elevados de clorofila *a* (mayores a 3 µg/l) se observaron en los sitios 40 y 41 que se ubican al norte de la laguna (fig. 1), en dónde los fosfatos y nitratos regularon la respuesta de la clorofila *a*.

### 3.2.- Comportamiento espacial y temporal del Índice Trófico

El enriquecimiento orgánico de los cuerpos de agua por diversas fuentes de contaminación asociadas a las actividades humanas, es la causa del proceso llamado eutrofización. Este consiste en el aumento de la biomasa de productores primarios como las microalgas que utilizan nitrógeno y fósforo durante la fotosíntesis, que al descomponerse demanda el uso de oxígeno disuelto por parte de los microorganismos degradadores, resultando en una disminución de este elemento esencial para los organismos aeróbicos, que puede provocar la muerte masiva de especies acuáticas sensibles.

Para evaluar este enriquecimiento orgánico en los cuerpos de agua, se han utilizado diversos índices tróficos, uno es el de Karidis et al (1983) que determina el estado trófico para cada nutriente, y que se utilizó en los informes finales de este proyecto de monitoreo. Otro índice trófico es el TRIX de Vollenweider et al (1998), que estima la calidad de un cuerpo de agua a partir de cuatro variables: clorofila *a*, oxígeno disuelto, nitrógeno inorgánico disuelto (nitritos + nitratos + amonio) y fósforo inorgánico disuelto (fosfatos). A partir de la aplicación de la ecuación, se obtienen cuatro niveles tróficos: 1) Oligotrófico: Alta calidad de aguas poco productivas; 2) Mesotrófico: Buena calidad de aguas moderadamente productivas; 3) Eutrófico: Mala calidad de aguas entre moderada y altamente productivas; y 4) Hipertrófico: Pobre calidad de aguas altamente productivas.

En la tabla 14 se reporta el porcentaje de sitios que presentaron los diferentes niveles tróficos, por cuerpo de agua y época climática, durante el período de monitoreo.

**Tabla 14.-** Comparación del Índice Tráfico TRIX, en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el periodo de monitoreo 2017-2018. En la clasificación Alta= Oligotrófico, Buena= Mesotrófico y Mala= Eutrófico.

Sistema	TRIX	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Alta	16% (5)	37% (12)	66% (21)	47% (15)	22% (7)	64% (16)
	Buena	62% (20)	53% (17)	34% (11)	50% (16)	75% (24)	32% (8)
	Mala	22% (3)	10% (3)	-	3% (1)	3% (1)	4% (1)
Laguna Chile Verde	Alta	-	100% (4)	75% (3)	-	100% (4)	-
	Buena	100% (4)	-	25% (1)	75% (3)	-	100% (4)
	Mala	-	-	-	25% (1)	-	-
Laguna Salada	Alta	33% (1)	33% (1)	67% (2)	33% (1)	100% (3)	100% (3)
	Buena	33% (1)	67% (2)	33% (1)	33% (1)	-	-
	Mala	33% (1)	-	-	33% (1)	-	-
Laguna Guerrero	Alta	20% (1)	20% (1)	60% (3)	-	40% (2)	80% (4)
	Buena	80% (4)	80% (4)	40% (2)	100% (5)	60% (3)	20% (1)
	Mala	-	-	-	-	-	-

En el sistema Bahía Chetumal/Corozal la calidad del agua mejoró a escala anual de 2017 a 2018, ya que el porcentaje de sitios con nivel alto u oligotrófico aumentó (34% a 41%, respectivamente), y disminuyeron los sitios con calidad buena o mesotrófica (60% a 51%). A escala temporal, se observa que la época de nortes (noviembre) fue la que presentó la mejor calidad del agua durante los dos años, debido a que más del 60% de los sitios presentaron condiciones oligotróficas (alta calidad); en tanto que la peor calidad del agua se registró durante secas de 2017 y lluvias de 2018, en donde aproximadamente el 80% de los sitios presentaron condiciones mesotróficas y eutróficas (Tabla 14). A nivel espacial destacan en abril de 2017 los sitios 9, 11, 13, 17 a 20, 24 y 31 que presentaron una condición eutrófica, que mejora para 2018 (Fig. 5). Esto sitios se localizan frente a las ciudades de Chetumal y Corozal, el río Hondo y New River; en donde las descargas de aguas residuales por lixiviados de fosas sépticas y de fertilizantes provenientes de zonas agrícolas, son las fuentes de nutrientes.

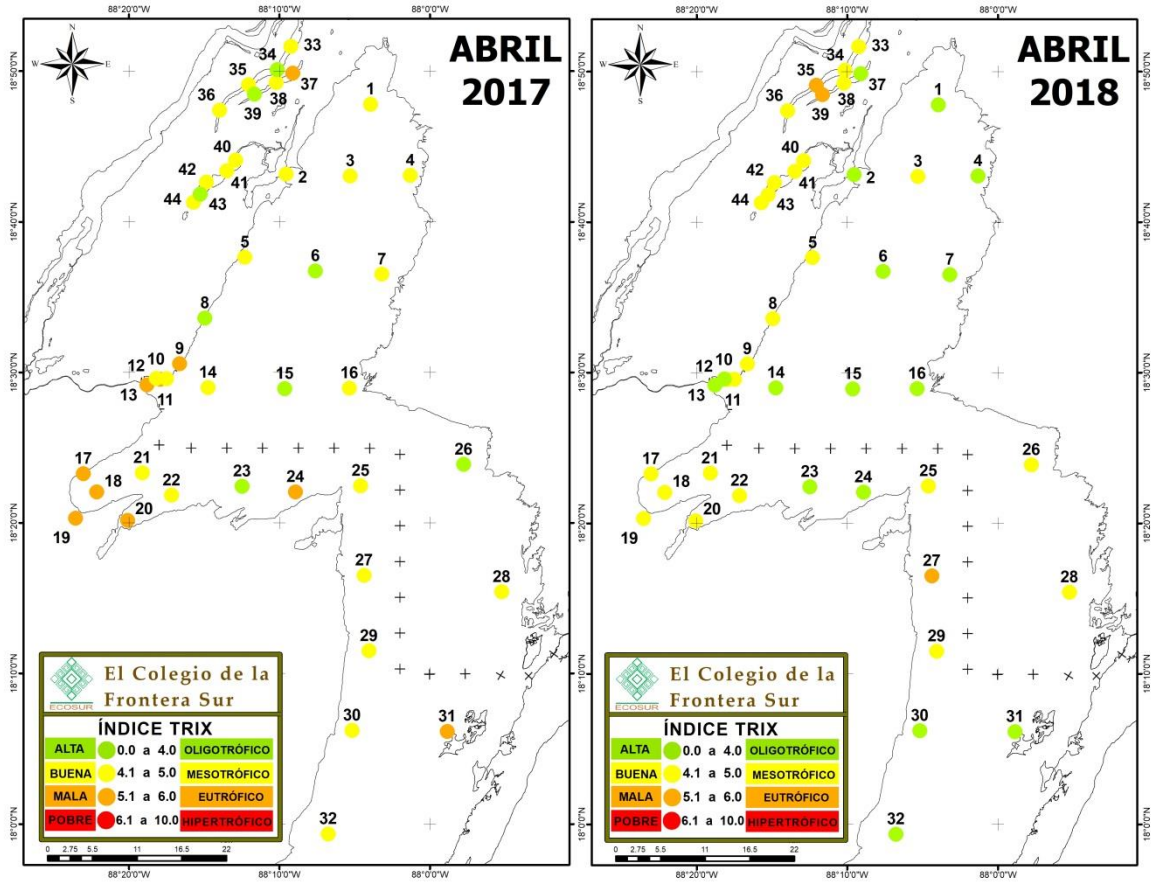


Fig. 5.- Comparación del comportamiento espacial del Índice Trófico TRIX, en los 44 sitios de monitoreo que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH) y el Santuario de Vida Silvestre Bahía Corozal (CBWS, por sus siglas en inglés), durante la época de secas (abril 2017 y 2018).

Para la temporada de lluvias (agosto), en 2017 los sitios 4, 29 y 31 presentaron mala calidad del agua (condiciones eutróficas), que para el sitio 31 se mantuvieron en 2018 (Fig. 6). La posición geográfica de los sitios indica que la mala calidad del agua se relaciona con la descomposición de materia orgánica depositada en los sedimentos, así como los escurrimientos superficiales de los humedales cercanos.

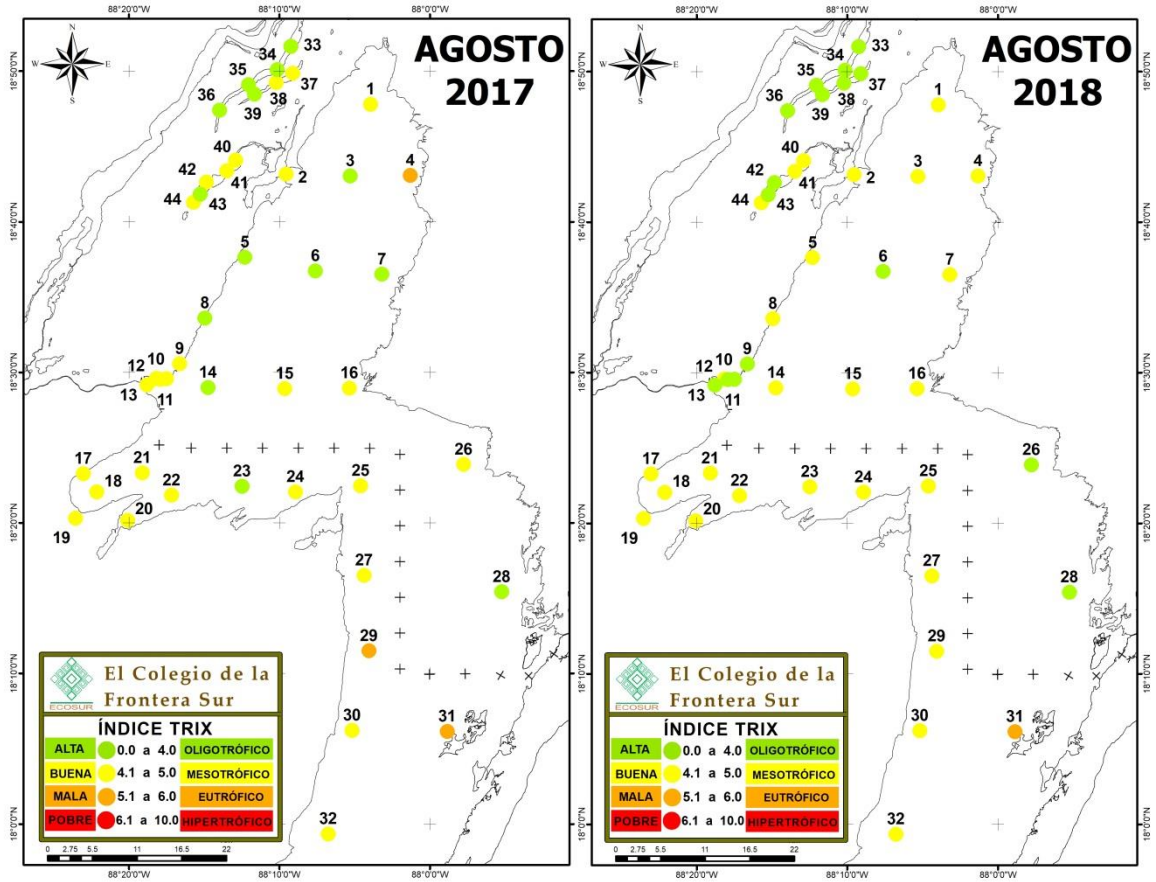


Fig. 6.- Comparación del comportamiento espacial del Índice Trófico TRIX, en los 44 sitios de monitoreo que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH) y el Santuario de Vida Silvestre Bahía Corozal (CBWS, por sus siglas en inglés), durante la época de lluvias (agosto 2017 y 2018).

Como se mencionó en párrafos anteriores, la época de nortes (noviembre) presentó la mejor calidad del agua, sin embargo ocurrió una disminución en la condición trófica de 2017 a 2018 en sitios específicos; en dónde el sitio 12 que se localiza frente al Parque del Renacimiento en la ciudad de Chetumal, cambió de mesotrófico a eutrófico, y los sitios 21, 25 y 28 cambian de oligotrófico a mesotrófico (Fig. 7). En el primer caso la fuente de contaminación es la descarga de un canal de aguas pluviales, y en el segundo grupo se trata de sitios localizados en zonas someras en dónde los sedimentos que se re-suspenden en la columna de agua, favorecen el aumento de la carga orgánica que provoca la mesotrofia.

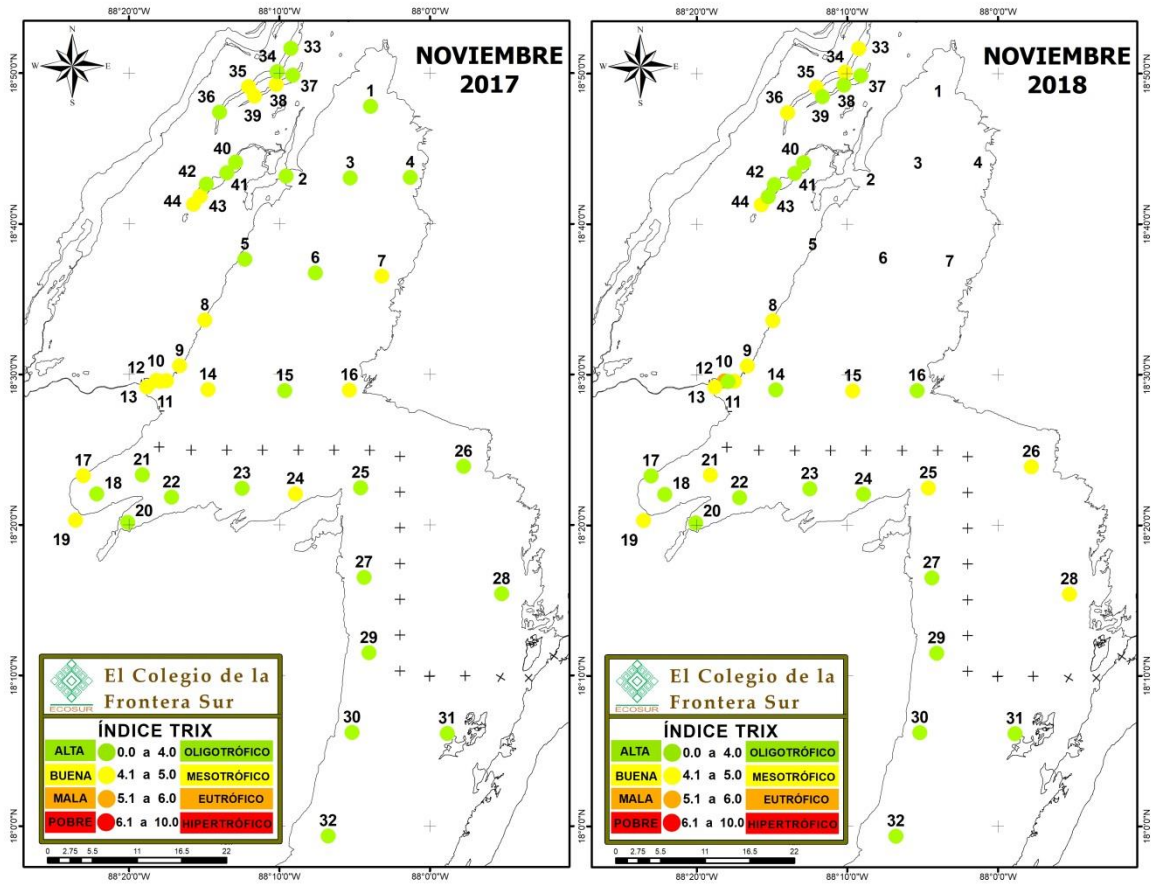


Fig. 7.- Comparación del comportamiento espacial del Índice Trófico TRIX, en los 44 sitios de monitoreo que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH) y el Santuario de Vida Silvestre Bahía Corozal (CBWS, por sus siglas en inglés), durante la época de nortes (noviembre 2017 y 2018).

En la laguna Chile Verde la calidad del agua disminuyó a escala anual de 2017 a 2018, ya que el 100% de los sitios pasaron del nivel alto u oligotrófico en 2017, al nivel bueno o mesotrófico. A escala temporal, en el mes de agosto (lluvias) se presentó la mejor calidad del agua, ya que el 100% de los sitios tuvieron condición oligotrófica; mientras que la peor calidad del agua se observó en la temporada de secas (abril), en dónde todos los sitios tuvieron condición mesotrófica en 2017, y el sitio 35 pasó a una condición eutrófica en 2018 (Tabla 14, Fig. 5). Esta mala calidad del agua se debe a la entrada de agua subterránea con nitratos y amonio.

En la Laguna Salada mejoró la calidad anual del agua de 2017 (2 de 3 sitios con mesotrofia) a 2018 (100% de los sitios oligotróficos). A escala temporal, la mejor

calidad del agua se presentó en la época de nortes (noviembre) con el 67 a 100% de los sitios en condición oligotrófica; mientras que la menor calidad del agua se registró en las dos épocas de secas (abril), 2 de 3 sitios tuvieron condición mesotrófica y eutrófica (Tabla 14). A nivel espacial destacan los sitios 37 y 39 que en secas presentaron condiciones eutróficas (Fig. 5), ambos se localizan en las zonas someras de los extremos norte y sur del sistema con influencia de las descargas de aguas subterráneas con amonio y fosfatos.

En la laguna Guerrero también mejoró la calidad anual del agua, ya que el 80% de los sitios pasaron de una condición mesotrófica a una oligotrófica, de 2017 a 2018. Como ocurrió con los otros cuerpos de agua, la mejor calidad se registró en las temporadas de nortes (noviembre) en la que predominaron condiciones oligotróficas, mientras que la calidad más baja se observó en las épocas de secas (abril) en las que el 80 a 100% de los sitios tuvieron condición mesotrófica (Tabla 14). A nivel espacial destaca el sitio 44 debido a que durante los dos años de monitoreo se mantuvo en condiciones mesotróficas (Fig. 5, 6 y 7). Este sitio se localiza frente al poblado de Laguna Guerrero y cerca de una zona agrícola, por lo que las fuentes potenciales de contaminación son los lixiviados de fosas sépticas a las aguas subterráneas asociadas a nitratos y fosfatos, así como escurrimientos superficiales, respectivamente.

### 3.3.- Comportamiento espacial y temporal del Índice de Condición

Para determinar la condición de cada cuerpo de agua, se siguieron las recomendaciones de la Agencia de Protección al Ambiente (EPA por sus siglas en inglés, 2004). En dónde primero se obtuvo de cada nutriente su estado (bueno, regular y pobre), a partir de sus valores de referencia. Posteriormente, con el valor de condición de las diferentes variables de calidad del agua, se calificó la condición global con base en los criterios siguientes: a) buena: menos de 10% de sitios en condición pobre y menos del 50% de sitios en condición regular y pobre combinados; 2) regular: menos del 20% de los sitios en condición pobre o más del 50% en condición regular y pobre; y 3) pobre: más del 20% de sitios en condición pobre.

En la tabla 15 se reportan los porcentajes de sitios por cuerpo de agua y época climática, que presentaron una condición buena, regular y pobre; con los que se obtuvo la condición global de cada sistema acuático.

**Tabla 15.-** Comparación del Índice de Condición de la EPA, en los cuatro cuerpos de agua que comprenden el Sistema Bahía Chetumal-Bahía Corozal, durante el período de monitoreo 2017-2018.

Sistema	EPA	2017			2018		
		Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Bahía Chetumal/Corozal	Buena	-	3% (1)	56% (18)	32% (10)	34% (11)	22% (7)
	Regular	75% (24)	88% (28)	44% (14)	56% (18)	54% (17)	72% (23)
	Pobre	25% (8)	9% (3)	-	12% (4)	12% (4)	6% (2)
Laguna Chile Verde	Buena	-	-	-	-	-	-
	Regular	-	-	-	50% (2)	75% (3)	25% (1)
	Pobre	-	-	-	50% (2)	25% (1)	50% (2)
Laguna Salada	Buena	-	-	-	33% (1)	33% (1)	33% (1)
	Regular	-	-	-	67% (2)	67% (2)	67% (2)
	Pobre	-	-	-	-	-	-
Laguna Guerrero	Buena	-	80% (4)	60% (3)	20% (1)	60% (3)	100% (5)
	Regular	-	20% (1)	40% (2)	80% (4)	40% (2)	-
	Pobre	100% (5)	-	-	-	-	-

El sistema Bahía Chetumal/Corozal mantuvo una condición anual regular durante los dos años de monitoreo, debido a que más del 50% de los sitios monitoreados presentaron una condición regular y pobre. A escala temporal, durante 2017 se registraron condiciones extremas, es decir buena en nortes (noviembre) y pobre



en secas (abril), mientras que en el resto de las temporadas prevaleció una condición regular (Tabla 15). En abril de 2017 los sitios 11, 13, 14, 17, 20, 22 y 25 presentaron una condición pobre, la mayoría de ellos localizados frente a río Hondo, las ciudades de Chetumal y Corozal y Orchid Bay, con influencia de escurrimientos de la zonas agrícolas, de lixiviados de aguas residuales de fosas sépticas y la descomposición de materia orgánica en la zona somera frente a Corozal. En abril de 2018 se mantienen los sitios 11 y 13 en condición pobre y los sitios 8 (Calderitas) y 9 (Balneario dos Mulas) pasan a una condición pobre (Fig. 8).

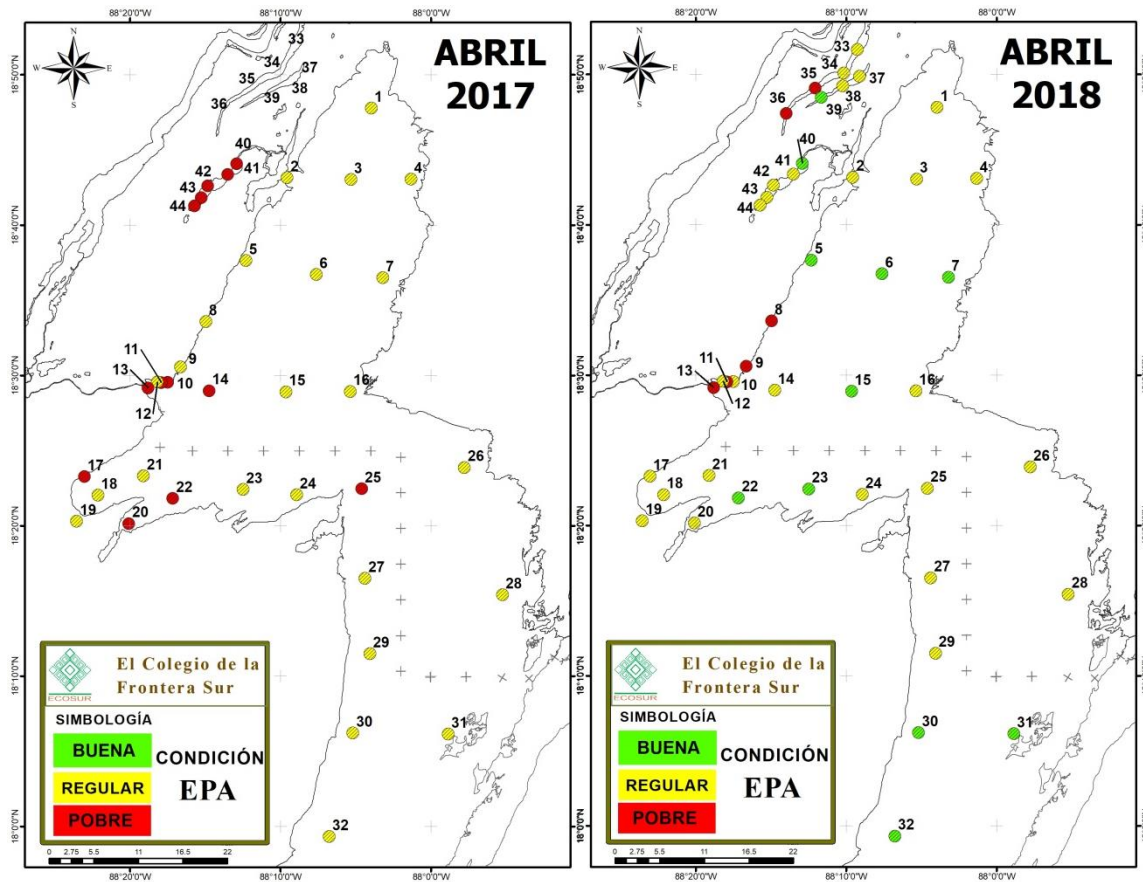


Fig. 8.- Comparación del comportamiento espacial del Índice de Condición de la EPA, en los 44 sitios de monitoreo que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH) y el Santuario de Vida Silvestre Bahía Corozal (CBWS, por sus siglas en inglés), durante la época de secas (abril 2017 y 2018).

Durante la época de lluvias (agosto) de los dos años, los sitios 8 (Calderitas) y 11 (Muelle Fiscal) se mantienen en condición pobre, en tanto que el sitio 13 (río Hondo) pasa de una condición regular en 2017 a una pobre para 2018 (Fig. 9). Mientras que en nortes (noviembre) de 2018, los sitios 11 y 13 mantienen la condición pobre (Fig. 10).

Para las lagunas Chile Verde y Salada solo fue posible calcular el índice de condición para 2018, debido a que los valores de referencia con los que se construye el índice, utiliza datos de años anteriores; por lo que para estos dos sistemas se usaron los datos generados en el monitoreo de 2017.

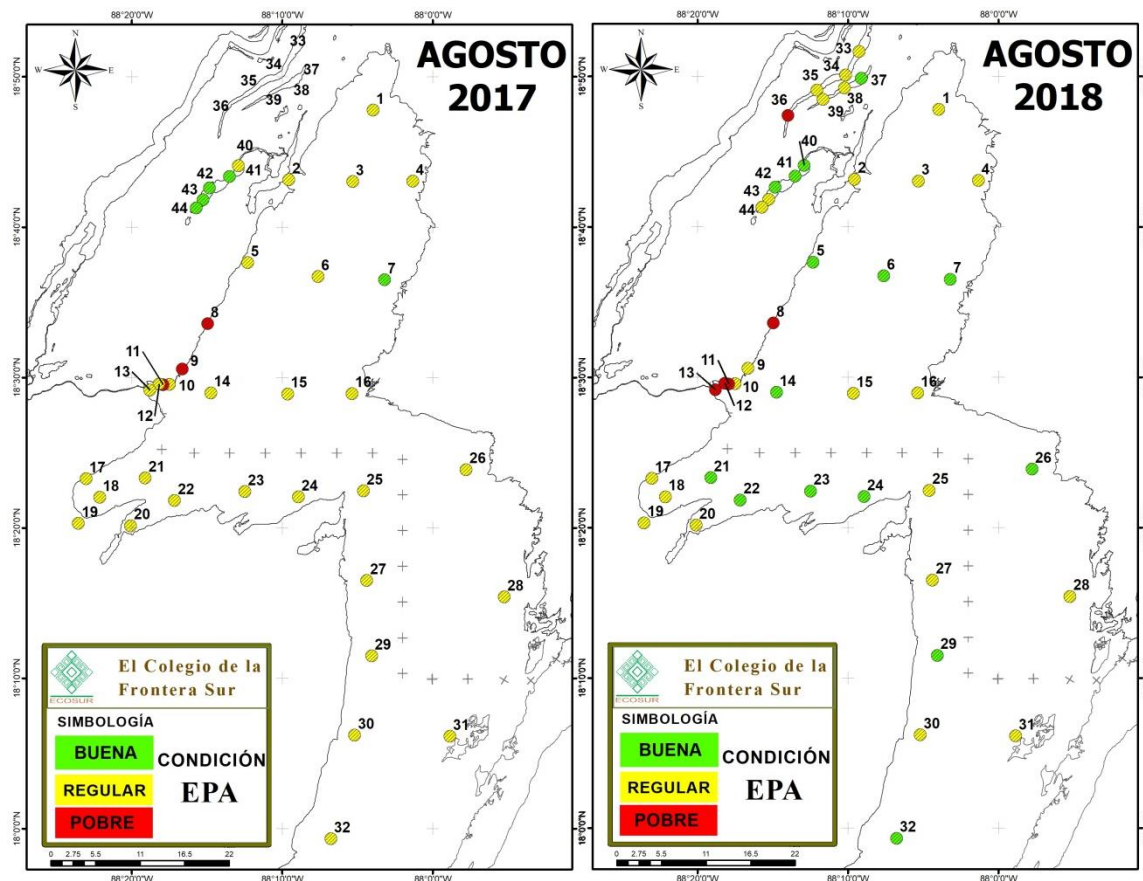


Fig. 9.- Comparación del comportamiento espacial del Índice de Condición de la EPA, en los 44 sitios de monitoreo que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH) y el Santuario de Vida Silvestre Bahía Corozal (CBWS, por sus siglas en inglés), durante la época de lluvias (agosto 2017 y 2018).

Así, durante 2018 ambas lagunas presentaron una condición regular durante las tres épocas climáticas, debido a que en Chile Verde más del 50% de sus sitios presentaron condiciones regulares y pobres, mientras que en Laguna Salada 2 de 3 sitios mantuvieron condición regular (Tabla 15). A nivel espacial, en Chile Verde destaca el sitio 36 que a lo largo del año mantuvo una condición pobre (Fig. 8, 9 y 10). Este sitio se localiza en una zona somera al sur del sistema, en donde las filtraciones de aguas subterráneas con nitratos y amonio y los escurrimientos superficiales, podrían influir en su mala calidad del agua. Mientras que en Laguna Salada destaca el sitio 38 localizado al centro del sistema, que durante 2018 mantuvo una condición regular (Fig. 8, 9 y 10), debido a filtraciones de agua subterránea con amonio y fosfatos, así como escurrimientos superficiales.

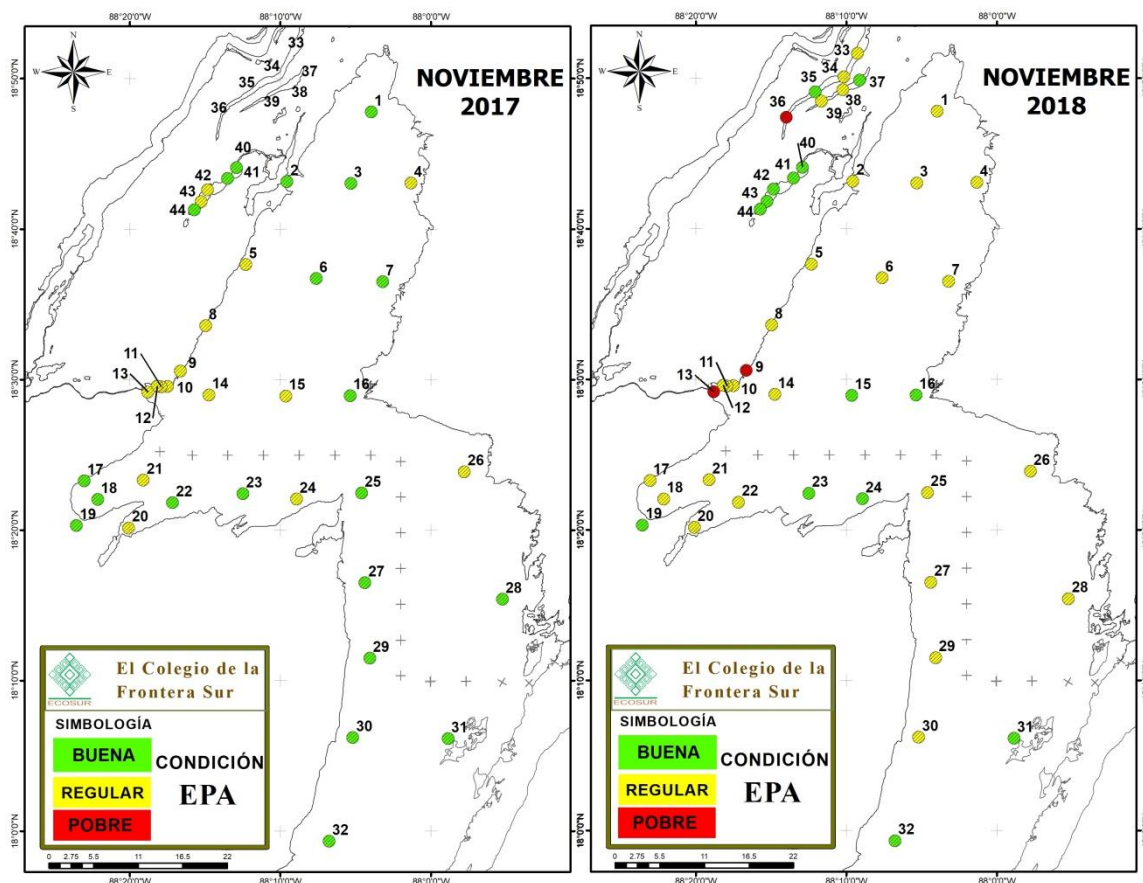


Fig. 10.- Comparación del comportamiento espacial del Índice de Condición de la EPA, en los 44 sitios de monitoreo que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH) y el Santuario de Vida Silvestre Bahía Corozal (CBWS, por sus siglas en inglés), durante la época de nortes (noviembre 2017 y 2018).



**SEMA**  
SECRETARÍA DE ECOLOGÍA  
Y MEDIO AMBIENTE



**IBANQROO**  
INSTITUTO DE BIODIVERSIDAD Y ÁREAS NATURALES  
PROTEGIDAS DEL ESTADO DE QUINTANA ROO



**pro  
natura**  
promoviendo de yucatán, s. c.



FONDO MEXICANO  
PARA LA CONSERVACIÓN  
DE LA NATURALEZA, A.C.  
20 INSTITUCIÓN PRIVADA  
AÑOS



KFW



La Laguna Guerrero mejoró su condición anual de 2017 a 2018, pasando de una condición regular en el 100% de los sitios durante primer año, a una condición buena en el 60% de los sitios para el segundo año. A escala temporal, la época de secas (abril) presentó la condición más baja, debido a que en 2017 el 100% de los sitios registraron una pobre condición, mientras que en 2018 el 80% de los sitios cambió a una condición regular (Tabla 15, Fig. 8). Para las épocas de lluvias (agosto) y nortes (noviembre) la condición mejoró significativamente, debido a que más del 60% de los sitios presentó una buena condición (Tabla 15, Fig. 9 y 10).

### 3.4.- Principales fuentes de contaminación a los cuerpos de agua.

El ingreso de contaminantes a los cuerpos de agua superficiales puede provenir de fuentes puntuales y no puntuales. Las puntuales se relacionan con fuentes de contaminación que son fácilmente identificadas debido a que su descarga se puede ubicar en un punto exacto y puede medirse, como ejemplo se tienen las tuberías de una planta de tratamiento o los canales de descargas pluviales. Por el contrario, las fuentes no puntuales son resultado de diversas actividades en superficies extensas del territorio, que pueden depositar los contaminantes en el agua vía escorrentías, filtraciones al acuífero y partículas de la atmósfera; por lo que estas fuentes son difíciles de medir y regular, a diferencia de las puntuales.

Debido al volumen y extensión de la descarga de contaminantes, así como a la dificultad de su control, actualmente las fuentes no puntuales son consideradas como la principal fuente de contaminación de ríos, lagos, humedales, estuarios y océanos (NAS, 2003; Brown y Froemke, 2012).

En la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía Chetumal (RESMBCH) y el Santuario de Vida Silvestre Bahía Corozal (CBWS, por sus siglas en inglés), las fuentes de contaminación por nitrógeno y fósforo que provocan procesos de enriquecimiento orgánico, son principalmente no puntuales y se describen a continuación.

#### *Bahía de Chetumal/Corozal*

En este sistema se identifican solo dos fuentes puntuales de contaminación:

- A) Descargas de aguas pluviales potencialmente mezcladas con aguas residuales crudas, ubicadas en diferentes puntos de la línea de costa de las ciudades de Chetumal y Corozal; y
- B) Descargas de agua de los ríos Hondo y New River, con un alto contenido de nitrógeno y fósforo por el uso de fertilizantes en las zonas agrícolas de las riberas de México y Belice, así como por las filtraciones de fosas sépticas de los asentamientos humanos a lo largo de su curso.

Las fuentes no puntuales de contaminación se encuentran en todo el sistema y son de tres tipos:

- A) Escorrentías superficiales a lo largo de la línea de costa, que son predominantes durante las temporadas de lluvias y nortes, que provienen de los extensos humedales en el sur de Belice, de las zonas agrícolas con alto uso de fertilizantes y de granjas con cría de animales en dónde se generan residuos de alimentos y estiércol, ubicadas principalmente en las riberas de río Hondo y New River; así como de zonas urbanas y semiurbanas en dónde el agua de lluvia arrastra desechos y contaminantes de calles y construcciones, como ocurre en las ciudades de Chetumal y Corozal y los poblados de Calderitas y Sarteneja.
  
- 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. Los datos que apoyan la importancia de esta fuente de contaminación se relacionan con la baja cobertura de saneamiento para la ciudad de Chetumal que es de 45% (CAPA, 2019), lo que significa que el 55% restante de las aguas residuales se depositan en fosas sépticas; en tanto que en la ciudad de Corozal todas sus aguas residuales se encuentran en letrinas y fosas sépticas (Silva, 2015). En cuanto a la disposición de los residuos sólidos, ambos países cuentan con rellenos sanitarios que por su deficiente manejo que incluye la falta de membranas que retengan los lixiviados, es más apropiado referirse a los mismos como vertederos controlados (Mojica, 2015). El suelo kárstico de la región que es altamente permeable, facilita la infiltración al manto freático de los lixiviados de fosas sépticas que presenten fugas y de los tiraderos de basura de las ciudades principales y de los poblados más pequeños, localizados a lo largo de todo el sistema.
  
- C) Deposición atmosférica de nitrógeno y fósforo que puede provenir de gases liberados de suelos agrícolas fertilizados, así como de la quema de carbón

y gasolinas (ESA, 1998). Aunque es un flujo no medido en la zona, se ha reportado la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos de río Hondo y Bahía Chetumal, que provienen de la quema de caña de azúcar de las riberas de México y Belice y que se transportan por las corrientes de aire (Alvarez-Legorreta, 2014; Alvarez-Legorreta y Sáenz-Morales, 2005).

### Lagunas Chile Verde y Salada

En estos cuerpos de agua las fuentes de contaminación identificadas son de naturaleza no puntual:

- A) Filtraciones de agua subterránea combinada con lixiviados de las actividades agrícolas y de cría de animales, dispersas en las zonas aledañas al sistema; y
- B) Escorrentías superficiales que son predominantes durante las temporadas de lluvias y nortes, que provienen de pequeñas áreas agrícolas con uso de fertilizantes y de la cría de animales en dónde se generan residuos de alimentos y estiércol.

### Laguna Guerrero

Las fuentes de contaminación orgánica identificadas en este cuerpo de agua son no puntuales:

- A) Filtraciones de agua subterránea combinada con lixiviados de aguas residuales de fosas sépticas de los poblados de Raudales y Luis Echeverría.
- B) Filtraciones de agua subterránea combinada con lixiviados de las actividades agrícolas en el sur del sistema.
- C) Escorrentías superficiales que son predominantes durante las temporadas de lluvias y nortes, que provienen de áreas agrícolas con uso de fertilizantes y de la cría de animales en dónde se generan residuos de alimentos y estiércol.

## 4.- CONCLUSIONES

Se presentan las conclusiones por cuerpo de agua para un mejor entendimiento:

### Sistema Bahía Chetumal/Corozal

- 1.- Mejoró la calidad del agua de 2017 a 2018, debido principalmente a una disminución en la concentración de nitratos y amonio. Sin embargo, el aumento en la concentración de fosfatos y clorofila *a*, mantuvo al cuerpo de agua en condición regular y un estado mesotrófico; en dónde los niveles de amonio y fosfatos fueron superiores al límite máximo permisible establecido en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para la protección de vida acuática de ambientes salobres.
- 2.- En la época de secas (abril) se presentó la menor calidad del agua, debido a las más elevadas concentraciones de todos los nutrientes. Por el contrario, la época de nortes (noviembre) mantuvo la mejor calidad del agua, con los niveles más bajos de todos los nutrientes.
- 3.- La mala calidad del agua se registró principalmente en los sitios cercanos a las ciudades de Chetumal y Corozal, los poblados de Calderitas y Sarteneja, así como en la desembocadura de los ríos Hondo y New River.
- 4.- Las fuentes de contaminación más importantes por su extensión, alcance dentro del sistema y su dificultad para ser controladas, son de tipo no puntuales: escorrentías superficiales, filtraciones de agua subterránea combinada con lixiviados de diversos tipos, así como deposición atmosférica de contaminantes generados en áreas agrícolas y urbanas. Sin embargo, las fuentes puntuales como son las descargas pluviales combinadas con aguas residuales de las ciudades de Chetumal y Corozal, así como las descargas de los ríos Hondo y New River, también tienen influencia aunque con un alcance más acotado a la zona de emisión.

### Laguna Chile Verde

- 1.- Disminuyó la calidad del agua de 2017 a 2018, debido a que aumentó la concentración de todos los nutrientes. Esto ocasionó que el cuerpo de agua cambiara de un estado oligotrófico a uno mesotrófico y presentara una condición



regular; en dónde los niveles de amonio fueron superiores al límite máximo permisible establecido en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para la protección de vida acuática de agua dulce.

2.- En la época de secas (abril) se presentó la menor calidad del agua, debido a las más elevadas concentraciones de todos los nutrientes. En tanto que la época de nortes (noviembre) mantuvo la mejor calidad del agua, con los niveles más bajos de todos los nutrientes.

3.- La mala calidad del agua se registró principalmente en las zonas someras del sistema, localizadas en los extremos norte y sur.

4.- Las fuentes de contaminación son de tipo no puntuales: escorrentías superficiales y filtraciones de agua subterránea combinada con lixiviados de actividades agrícolas y de cría de animales.

### Laguna Salada

1.- Mejoró la calidad del agua de 2017 a 2018, debido principalmente a una disminución en la concentración de nitritos y amonio, que le permitió pasar de una condición mesotrófica a una oligotrófica. Sin embargo, el aumento en la concentración de nitratos y fosfatos, mantuvo al cuerpo de agua en condición regular. Además de que los niveles de amonio y fosfatos fueron superiores al límite máximo permisible establecido en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para la protección de vida acuática de ambientes salobres.

2.- En la época de secas (abril) se presentó la menor calidad del agua, debido a las más elevadas concentraciones de todos los nutrientes. En tanto que la época de nortes (noviembre) mantuvo la mejor calidad del agua, con los niveles más bajos de todos los nutrientes.

3.- La mala calidad del agua se registró principalmente en las zonas someras del sistema, localizadas en los extremos norte y sur.

4.- Las fuentes de contaminación son de tipo no puntuales: escorrentías superficiales y filtraciones de agua subterránea combinada con lixiviados de actividades agrícolas y de cría de animales.

## Laguna Guerrero

- 1.- Mejoró la calidad del agua de 2017 a 2018, debido a una disminución en la concentración de nitritos, nitratos y amonio, que le permitió pasar de una condición regular a una buena, y de un estado mesotrófico a uno oligotrófico. Sin embargo, los niveles de amonio fueron superiores al límite máximo permisible establecido en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para la protección de vida acuática de agua dulce.
- 2.- En la época de secas (abril) se presentó la menor calidad del agua, debido a las más elevadas concentraciones de la mayoría de los nutrientes. En tanto que la época de nortes (noviembre) mantuvo la mejor calidad del agua, con los niveles más bajos de todos los nutrientes.
- 3.- La mala calidad del agua se registró principalmente en las zonas del centro y sur del sistema, cercanas a los poblados de Laguna Guerrero y Raudales, y de la zona agrícola.
- 4.- Las fuentes de contaminación son de tipo no puntuales: escorrentías superficiales y filtraciones de agua subterránea combinada con lixiviados de fosas sépticas y de actividades agrícolas y de cría de animales.

## 5.- RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se plantean a continuación son de aplicación binacional, con el objetivo principal de mejorar y/o mantener la calidad del agua del Sistema Bahía Chetumal/Corozal (que en esta sección incluiría a las tres lagunas conectadas al norte de la RESMBCH):

1.- Debido a que las principales fuentes de contaminación al sistema son de naturaleza no puntual, las acciones de recuperación de vegetación costera y riparia (en el caso de los ríos Hondo y New River), favorecería la reducción del flujo de nutrientes a los cuerpos de agua; ya que los contaminantes y partículas de suelo de las zonas agrícolas que son arrastrados en las escorrentías superficiales, serían retenidos por la vegetación.

2.- Impulsar en la ciudad de Chetumal la conexión de usuarios al sistema de captación de aguas residuales que ya existe en diversas zonas de la ciudad, y en la medida de lo posible apoyar con los datos de calidad del agua de este estudio, a las autoridades de Belice para la búsqueda de financiamiento de sistemas de captación y tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Corozal. En poblaciones con menor número de habitantes como Calderitas, Luis Echeverría, Raudales y Sarteneja entre otras, favorecer programas para la instalación de sistemas de captación de aguas residuales con tecnologías apropiadas amigables con el ambiente y con menor costo de operación. Todas estas acciones ayudarían a reducir el uso de letrinas y fosas sépticas, y en consecuencia los lixiviados que contaminan el agua subterránea cuyo destino final es la Bahía de Chetumal/Corozal.

3.- Es indispensable incluir el monitoreo de contaminantes orgánicos persistentes y de metales traza en los sedimentos, que permitan evaluar el riesgo potencial de exposición de las especies acuáticas de valor ecológico y comercial; ya que estudios que se han realizado en ECOSUR han detectado la presencia de plaguicidas organoclorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, mercurio y

cadmio, en sedimentos y diversas especies acuáticas que habitan en la bahía de Chetumal y el río Hondo. Las fuentes y mecanismos de transporte de estos contaminantes, son las mismas que se mencionan en este diagnóstico.

4.- Mantener un plan de monitoreo a largo plazo de los diversos indicadores de calidad del agua, que permita evaluar la efectividad de las acciones que se implementen para la eliminación de fuentes puntuales y no puntuales de contaminación.

5.- Los sitios que se recomienda mantener en el plan de monitoreo a largo plazo por cuerpo de agua son: A) Sistema Bahía Chetumal/Corozal: 8 a 13 y 17 a 24, B) Laguna Chile Verde: 35 y 36, C) Laguna Salada: 38, y D) Laguna Guerrero: 42 a 44.

## **6.- 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), Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C. (FMCN), PRONATURA Península de Yucatán A.C. (PPY), Santuario del Manatí perteneciente al Instituto de Biodiversidad y Áreas Naturales Protegidas del Estado de Quintana Roo (IBANQROO) y El Colegio de la Frontera Sur-Unidad Chetumal (ECOSUR).

## 7.- REFERENCIAS

- Alvarez-Legorreta, T. 2019. Continuación del Monitoreo de la calidad del agua en la Reserva Estatal Santuario del Manatí, Bahía de Chetumal. Informe final. IBANQROO, MAR FUND, Banco Alemán de Desarrollo (KFW) y ECOSUR. 142 p.
- Álvarez-Legorreta T. 2014. Presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en sedimentos del río Hondo, Quintana Roo, México. Alfonso V. Botello, Jaime Rendón von Osten, Jorge A. Benítez y Gerardo Gold-Bouchot editores. Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. VOL I. México. Universidad Autónoma de Campeche, Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México : Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología : Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-ipn Unidad Mérida. ISBN: 978-607-7887-71-3. pp. 425-436.
- Alvarez Legorreta T. y Sáenz Morales R. 2005. Hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos de la Bahía de Chetumal. En: Botello A.V., Rendón-von Osten J., Gold-Bouchot G. y Agraz-Hernández C. (Eds.). Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y Tendencias. 2a. Edición. Universidad Autónoma de Campeche, UNAM, INE. 696 p. pp. 299-310.
- Brown T.C. and P.Froemke. 2012. Nationwide Assessment of Nonpoint Source Threats to Water Quality. BioScience, Vol. 62 (2): 136-146.
- CAPA. 2019. Avances en la Comisión de Cuenca del Rio Hondo: Agua Potable, Drenaje Sanitario y Saneamiento. PPT.
- 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. 2004. National Condition report II. Office of Water. U.S.Environmental Protection Agency. EPA-620-R03/0002, December.
- ESA. 1998. Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. Issues in Ecology. No. 3. Ecological Society of America. 14 p.
- 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.
- Mojica., A. M. 2015. Evaluación Rápida de la Efectividad de Manejo en las cinco Áreas Protegidas del Proyecto - FASE II. Proyecto Proyecto Conservación de Recursos Marinos en Centroamérica. Fondo para el Sistema Arrecifal Mesoamericano. 243 pp.

- NAS. 2003. Clean coastal waters: understanding and reducing the effects of nutrient pollution. National Academy of Sciences. 310 p.
- SACD. 2009. Corozal Bay Wildlife Sanctuary Management Plan 2010 – 2014. Sarteneja Alliance for Conservation and Development. 106 p.
- 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.
- Silva, Homero. 2015. Baseline Assessment Study on Wastewater Management Belize. Caribbean Regional Fund for Wastewater Management. GEF. 172 p
- Stewart, MK., J. Melhorn and S. Elliott. 2007. Hydrometric and natural tracer (oxygen-18, silica, tritium and sulphur hexafluoride) evidence for a dominant groundwater contribution to Pukemanga Stream, New Zealand. Hydrol. Process. 21, 3340–3356
- Vollenweider RA, Giovanardi F, Montanari G, Rinaldi A. 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. Environmetrics, 9:329–57.