



DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN SITIOS ESPECÍFICOS DE LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS: PN COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC Y EL APFF MANGLARES DE NICHUPTÉ



SEMARNAT
SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA

DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN SITIOS ESPECÍFICOS DE LAS
ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS: PN COSTA OCCIDENTAL DE ISLA
MUJERES, PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC Y EL APFF MANGLARES DE
NICHUPTÉ

Programa de Manejo de Áreas Naturales Protegidas (PROMANP)
Componente: Calidad del Agua

Responsables Técnicos:

M. en C. Alejandro López Tamayo
Dr. Eduardo Cejudo Espinosa

Colaboradores:

M. en C. Viridiana Margarita Nava Ruiz
M. en C. Elda Damaris Irola Sansores
Quím. Daniela Ortega Camacho
M. en C. Cinthya Denisse Grimaldo
Hernández

M. en C. Jorge Carlos Peniche
Dr. Gilberto Acosta Gonzalez
Ing. Juanis Itzel Castillo Badillo
Ing. Juan Carlos González Vergara
Pas. Quím. Mauricio Millán

Con apoyo de:

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas



CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. MATERIALES Y MÉTODOS	6
2.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	6
2.2 DISEÑO DE MUESTREO	7
2.3 COLECTA DE MUESTRAS.....	8
2.3 ANÁLISIS DE MUESTRAS	9
2.4 ANÁLISIS DE DATOS.....	10
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
3.1 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS.....	12
3.2 NUTRIENTES.....	17
3.3 METALES	21
3.4 CLOROFILA-A.....	21
3.5 CALIDAD BACTERIOLÓGICA	22
4. CONSIDERACIONES FINALES	24
5. REFERENCIAS	25
ANEXO 1	27

RESUMEN EJECUTIVO

La cercanía e interacción entre las Áreas Naturales Protegidas: Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún, Punta Nizuc y el APFF Manglares de Nichupté, representan una oportunidad única para realizar el estudio de la calidad del agua de estos ecosistemas acuáticos y actualizar el conocimiento sobre las condiciones del ecosistema, y así asegurar que los procesos naturales de los ambientes lagunar y marino se mantengan dentro de los límites establecidos para ecosistemas en contacto con el uso recreativo. Por ello, en este informe se presentan los resultados obtenidos del Acuerdo de Colaboración Científica entre Centinelas del Agua A.C. y el Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. en su componente “calidad del agua”; este informe incluye el análisis de las muestras de agua e interpretación de las campañas de calidad del agua correspondientes a los años 2018 a 2020.

De este análisis se detectó que uno o varios sitios de los diferentes polígonos estudiados incumplen con los criterios establecidos por la CE-CCA-001/89 o por la Secretaría de Salud (SS) y la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS); sobre todo durante los años 2018 y 2019. En el caso particular del monitoreo realizado en el año 2020, se pudo apreciar una disminución en la concentración de los nutrientes debido al cese en las actividades turísticas y comerciales que se realizan en los márgenes o al interior de las ANPs de estudio

1. INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral, pastizales marinos y vegetación acuática, así como los humedales, manglares y petenes son objeto de conservación debido a que en ellos se realizan procesos ecológicos y fenómenos oceanográficos tales como la conectividad hidrológica y la recarga del acuífero. Es por ello, que el presente proyecto de Centinelas del Agua A.C. se enfocó en la determinación de la calidad del agua en sitios específicos de las Áreas Naturales Protegidas: Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres (IM), Punta Cancún (PC) y Punta Nizuc (PN) y el Área de protección de Flora y Fauna Manglares de Nichupté (SLMN) en colaboración con el Centro de Investigación Científica de Yucatán y la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas; todo ello acorde al Subprograma de Restauración en su componente de conservación del agua del Parque Nacional IM, PC y PN, así como al Subprograma de Manejo en su componente de conservación de agua y suelos del APFF Manglares de Nichupté.

Para cumplir con ello es fundamental conocer la calidad del agua en Áreas Naturales Protegidas (ANPs) con el fin de identificar las posibles modificaciones en el ecosistema acuático, y de ser necesario, implementar acciones preventivas o correctivas para preservar el hábitat de especies de importancia ecológica o económica.

La cercanía e interacción entre las ANPs Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún, Punta Nizuc y el APFF Manglares de Nichupté, representan una oportunidad única para dar continuidad al estudio de la calidad del agua de estos ecosistemas acuáticos y actualizar el conocimiento sobre las condiciones del ecosistema, y así asegurar que los procesos naturales de los ambientes lagunar y marino se mantengan dentro de los límites establecidos para ecosistemas en contacto con el uso recreativo. Por otra parte, la reproducción y crecimiento de numerosas especies también depende de las condiciones óptimas del agua en los sistemas lagunar y arrecifal, ya que de ello depende el éxito de los estadíos juveniles de las especies que habitan en estos sitios o bien que buscan refugio y/o alimento ellos.

Por lo tanto, la realización de este proyecto contribuye a la generación de información cualitativa y cuantitativa sobre los factores fisicoquímicos de la calidad de agua y el estado de conservación de los ecosistemas lagunares y marino-costeros. Satisfaciendo plenamente a las demandas específicas de las ANPs respecto a la evaluación cualitativa de las acciones de manejo y conservación, como a la cobertura y diversidad de vegetación acuática, lo anterior con el propósito de cumplir íntegramente con los objetivos de los planes de manejo, fortaleciendo así, la toma de decisiones.

Antecedentes

Entre los objetivos del Área Natural Protegida Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (CONANP, 2016) se enlistan los siguientes:

- Conservar los arrecifes ubicados en la Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, porque constituyen un recurso natural de gran importancia para la economía regional, representando un tipo particular de hábitat donde ocurren procesos ecológicos, comunidades biológicas y características fisiográficas particulares, por su importancia regional, nacional e internacional.
- Favorecer la realización de investigaciones y estudios que contribuyan a plantear métodos de manejo y alternativas de uso sustentable.
- Salvaguardar la diversidad de las especies silvestres de las que depende la continuidad evolutiva, así como asegurar la preservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional, en particular preservar las especies que está en peligro de extinción, las amenazadas, las endémicas, las raras y las que se encuentran sujetas a protección especial.

Siendo algunos de los objetivos del Área Natural Protegida Área de Protección de Flora y Fauna Manglares de Nichupté (CONANP, 2014):

- Promover la conservación de la diversidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres, incluyendo selva baja caducifolia, manglar, tular y petenes, donde además se encuentran cuerpos de aguas nacionales, como las lagunas del Amor y Río Inglés, y diversos manantiales.
- Conservar el ecosistema de manglar y su sistema asociado: el Sistema Lagunar Nichupté, ya que es necesaria su protección de manera integral a fin de garantizar la continuidad de los procesos ecológicos que se desarrollen en la zona, mediante la promoción de la mejora en la calidad de su agua, que es la que sustenta los ecosistemas de manglar.
- Favorecer la realización de investigaciones y estudios que amplíen y profundicen el conocimiento de los recursos que se encuentran del Área de Protección de Flora y Fauna y que contribuyan a plantear métodos de manejo.

Considerando el Diagnóstico y Problemática del ANP enunciada dentro del Programa de Manejo del APFF Manglares de Nichupté (2014), se identificó que la cercanía de esta ANP con el centro de población de Cancún y la comunidad de Alfredo V. Bonfil, genera impactos ambientales negativos a distancia. El principal es la contaminación del acuífero por las aguas residuales que se vierten en fosas sépticas y sumideros que, debido a la hidrodinámica subterránea, afloran por piezometría en la zona de humedales SLN y directamente en el mar.

Dentro de Programa de Manejo del PNCOIM, PC y PN en el apartado de Diagnóstico y Problemática, se menciona que en los últimos 20 años los ecosistemas costeros sufren diferentes problemas ambientales, como consecuencia de una compleja cadena de eventos que varían de un sitio a otro y que pueden, en parte, ser atribuidos al enriquecimiento de los nutrientes, nitrógeno y fósforo, que provienen de descargas de aguas residuales. Asimismo, se resalta que en los polígonos del ANP mencionada, las zonas con mayor influencia terrestre y donde se desarrollan la mayor parte de las actividades recreativas, presentan condiciones promedio de calidad de agua de regular a mala, de acuerdo con su estado trófico, lo cual tiene implicaciones directas a la vida acuática y los ecosistemas. Resalta también, la importancia de tener presente la conectividad ecosistémica que hay principalmente entre los ambientes lagunares y los ecosistemas costeros, incluido los arrecifes de coral.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El Área de Protección de Flora y Fauna Manglares de Nichupté se encuentra localizado al noroeste de la Península de Yucatán en el estado de Quintana Roo entre los 86° 46' y 86° 50' longitud Oeste y los 21° 02' y 21° 06' latitud Norte y comprende una superficie aproximada de 9,832 ha (Fig. 1).

El SLMN interacciona con el Mar Caribe a través de dos bocas; la boca en Punta Cancún ubicada al norte del complejo y la boca en Punta Nizuc en el sur (Carbajal-Pérez, 2009). Ambas puntas, junto con Isla Mujeres son considerados polígonos independientes y forman parte del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, que se localiza al noreste del estado de Quintana Roo, frente a las costas de los municipios de Isla Mujeres y Benito Juárez (SEMARNAT y CONANP, 2016) (Fig. 1).

La temperatura media anual en la zona es superior a los 29 °C, los meses con mayor temperatura son julio y agosto y el mes más frío es enero. La precipitación total anual es de 1,337 mm para los municipios de Benito Juárez e Isla Mujeres, siendo septiembre el mes más lluvioso y abril el más seco (SMN, 2014).

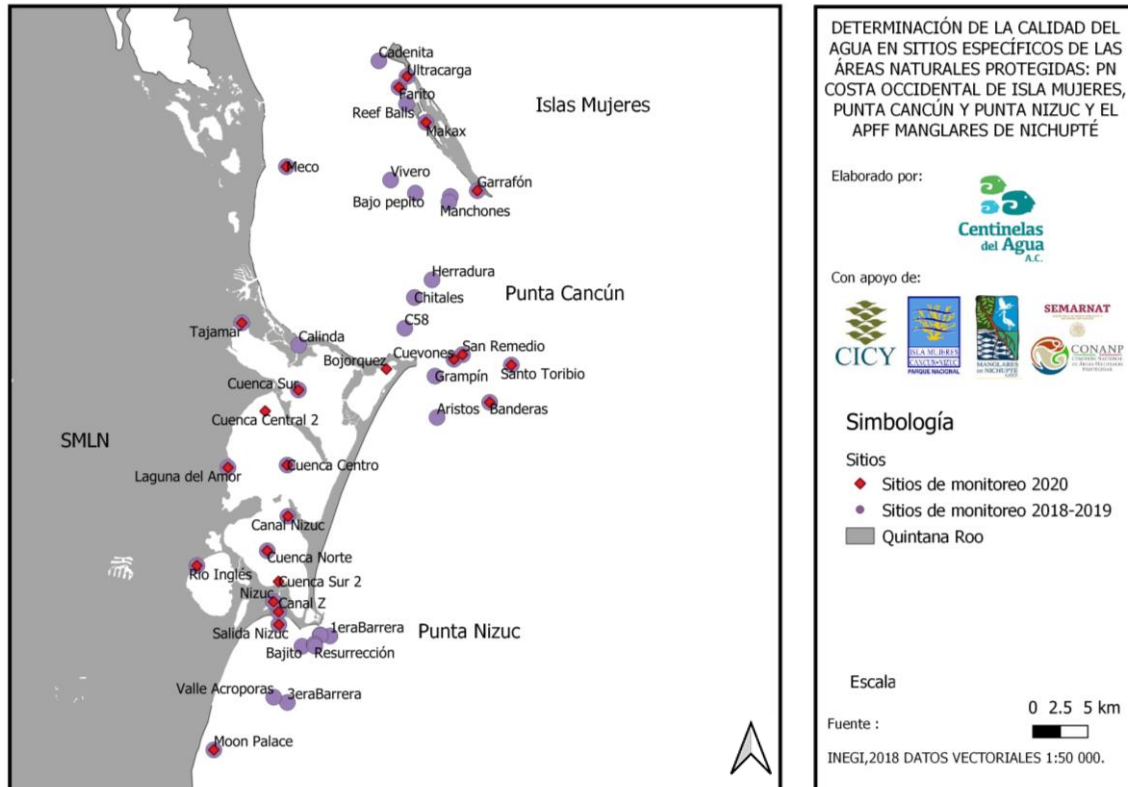


Figura 1. Ubicación de los sitios de colecta en cuatro polígonos de las Áreas Naturales Protegidas: Sistema Lagunar Manglares de Nichupté (SLMN), Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc durante los años 2018 a 2020.

2.2 Diseño de muestreo

Se diseñó e implementó un muestreo simple dirigido para coleccionar muestras superficiales de agua marina en 40 sitios específicos con mayor actividad turística en cuatro polígonos de las Áreas Naturales Protegidas: Sistema Lagunar Manglares de Nichupté (SLMN), Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (Tabla 1). Se realizaron tres campañas de muestreo durante la temporada de lluvias del año 2018 (septiembre), nortes en 2019 (enero) y secas en 2020 (mayo). Es importante mencionar que la última campaña se realizó durante la Jornada Nacional de Sana Distancia en la que se restringió la realización de actividades no esenciales (entre ellas la actividad turística) del 23 de marzo al 30 de mayo a causa de la crisis sanitaria derivada de la pandemia de COVID-19, siendo únicamente 23 sitios monitoreados en esta campaña. La ejecución de las campañas se realizó en coordinación con la Dirección del Complejo de ANP, personal del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), personal de Centinelas del Agua A.C y personal del laboratorio Kipmen S.A. de C.V.

Tabla 1. Sitios de colecta en cuatro polígonos de las Áreas Naturales Protegidas: Sistema Lagunar Manglares de Nichupté (SLMN), Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

Polígono	Sitio	Oeste (X)	Norte (Y)	Polígono	Sitio	Oeste (X)	Norte (Y)
Isla Mujeres	Banqueros	-86.7274	21.2020	Punta Nizuc	1era Barrera	-86.7752	21.0276
	Cadenita	-86.7558	21.2558		3era Barrera	-86.7921	21.0012
	Farito	-86.7478	21.2453		Bajito	-86.7863	21.0235
	Garrafón	-86.7167	21.2043		Herencia	-86.7791	21.0280
	Macax	-86.7371	21.2314		Moon Palace	-86.8213	20.9824
	Manchones	-86.7280	21.1997		Oyente	-86.7790	21.0278
	Meco	-86.7925	21.2138		Resurrección	-86.7814	21.0244
	Reef balls	-86.7448	21.2387		Rompehielos	-86.7812	21.0236
	Ultracarga	-86.7446	21.2496		Salida Nizuc	-86.7955	21.0321
	Vivero	-86.7511	21.2085		Valle Acroporas	-86.7975	21.0033
Punta Cancún	Aristos	-86.7327	21.1143	SLMN	Calinda	-86.7876	21.1430
	Bajo pepito	-86.7413	21.2033		Canal Nizuc	-86.7919	21.0751
	Banderas	-86.7118	21.1203		Canal Z	-86.7956	21.0372
	C58	-86.7455	21.1497		Cuenca Norte	-86.8001	21.0614
	Chitales	-86.7417	21.1619		Cuenca Centro	-86.7922	21.0954
	Cuevones	-86.7260	21.1374		Cuenca Sur	-86.7877	21.1252
	Grampín	-86.7335	21.1307		Laguna del Amor	-86.8157	21.0944
	Herradura	-86.7347	21.1689		Nizuc	-86.7976	21.0412
	Sn.Toribio	-86.7032	21.1351		Rio inglés	-86.8280	21.0555
	Sto.Remedio	-86.7226	21.1392		Tajamar	-86.8102	21.1518

2.3 Colecta de muestras

Para las campañas de 2018 y 2019, se tomaron mediciones “*in situ*” de los parámetros fisicoquímicos como temperatura (°C), conductividad eléctrica (mS/cm), salinidad (ppt), pH, oxígeno disuelto (mg O₂/l) y potencial de oxidación-reducción (mV) con una sonda multiparamétrica Hydrolab DS5, previamente calibrada en laboratorio. En cada sitio se tomaron entre 12 y 20 muestras para obtener promedios y desviación estándar de un número de muestras mayor a 5. Para determinar la concentración de los nutrientes (nitritos, nitratos, amonio, fosfatos, silicatos) y metales pesados (Cadmio, Plomo, Hierro) se colectaron muestras de agua de manera directa en la columna de agua, a 10 cm de profundidad. Las muestras se colectaron en contenedores de HDPE de volumen variable y recipientes estériles para enterococos. Las muestras fueron almacenadas y transportadas en refrigeración hasta su posterior análisis en los laboratorios del CICY.

En el caso de las muestras tomadas en la campaña de 2020 (Tabla 2), se efectuó un muestreo simple con apoyo de personal del APFF Manglares de Nichupté y dos colectores especializados en la toma y análisis de muestras ambientales (Laboratorio Kimpen). Las muestras fueron colectadas y preservadas siguiendo los protocolos recomendados por la normatividad mexicana (NMX-AA-003-1980) (Fig. 2).

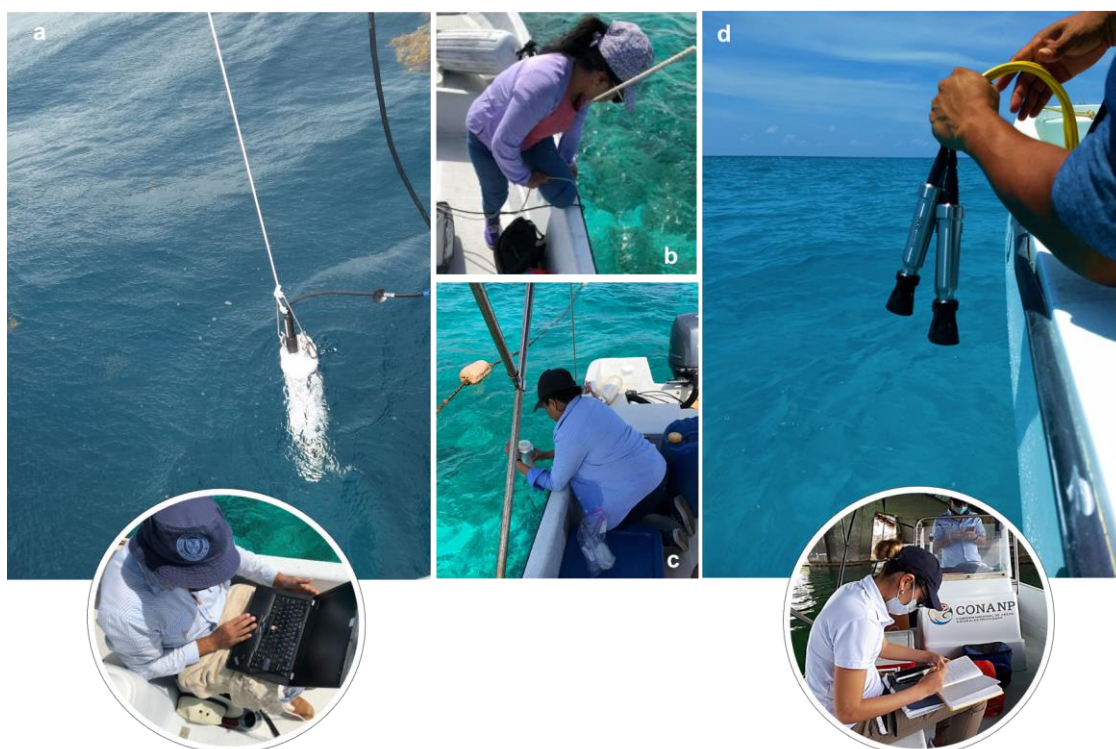


Figura 2. Colecta de muestras de agua para determinar la calidad del agua de las ANPs: APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. **a-c)** años 2018 y 2019; **d)** año 2020 durante contingencia sanitaria por COVID-19

3.3 Análisis de muestras

La cuantificación de Nitritos (NO_2^-), amonio (NH_4^+) y ortofosfatos (PO_4^{3-}) se realizó mediante técnicas colorimétricas con espectrofotometría de luz UV-Vis. La cuantificación de los iones nitrito se efectuó mediante la reacción con sulfanilamida, mientras que el amonio se cuantificó con el método del fenato (Strickland y Parsons 1972). La concentración de fósforo en agua se determinó con el método propuesto para cuantificación de ortofosfatos (EPA 365.3). Los iones nitrato (NO_3^-), cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^{2-}) se cuantificaron mediante cromatografía iónica en un equipo 882 IC Metrohm, un detector de conductividad eléctrica (IC Conductivity Detector) y un detector UV-Vis (887 Professional UV-Vis Detector). La sílice se cuantificó mediante método colorimétrico NMX-AA-75-1982 (Fig. 3).

Los metales pesados (Fe, Cd y Pd) se cuantificaron únicamente para los muestreos de 2018 y 2019 en un espectrómetro ICP-Plasma óptico Perkin Elmer Optima 8000.

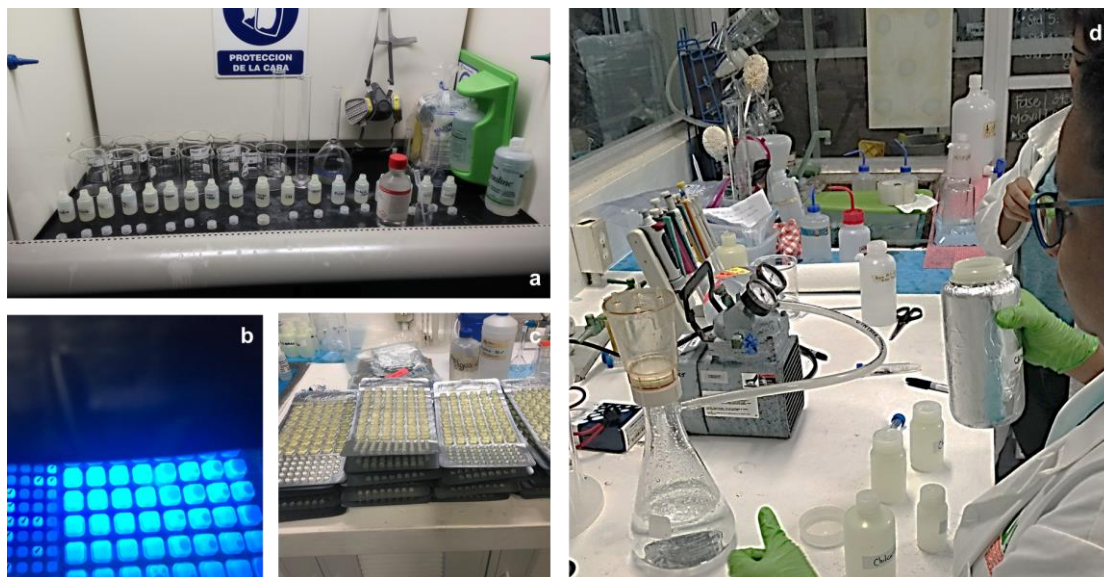


Figura 3. Análisis de muestras para determinar la calidad del agua de las ANPs. **a)** análisis de nutrientes; **b-** **c)** análisis bacteriológico y **d)** filtración para la determinación de clorofila-a.

La clorofila-a (Cl-a) se cuantificó para los mismos años con el método monocromático de Lorenzen (1967) en extractos acidificados y no acidificados de clorofila con acetona al 90%. Los extractos se analizan en un espectrofotómetro UV-Vis a 665 y 750 nm de longitud de onda, y las concentraciones se calcularon con la fórmula:

$$\text{Clorofila a} = 11 \times K \times ((E_{665o} - E_{750o}) - (E_{665a} - E_{750a})) \times \frac{V_e}{L} \times V_f$$

La demanda química de oxígeno (DQO) se cuantificó con el método colorimétrico con tubos de DQO de bajo rango (0-150 mg DQO/L) marca Chemetrix®. La cuantificación de la concentración de enterococos se realizó con Método del número más probable (NMP)

utilizando el sistema Enterolert (IDEXX®) (Fig. 3). El análisis de las muestras colectadas durante la contingencia sanitaria se analizó por personal del laboratorio analítico Kipmen, siguiendo las metodologías que se mencionan en la Tabla 2.

Tabla 2. Métodos empleados para el análisis de muestras de calidad del agua durante la contingencia sanitaria por COVID-19 en las ANPs APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

Parámetro	Norma	Método
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016	Electrométrico
Salinidad (ups)	SM.2520A	Electrométrico
Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	NMX-AA-093-SCFI-2018	Electrométrico
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	NMX-AA-007-SCFI-2013	Directo
Oxígeno Disuelto (mg/L)	NMX-AA-SCFI-012-2001	Electrométrico
NH_4	NMX-AA-026-SCFI-2001	
NO_2^- (mg/L)	SM-4500- NO_3D	Diazoación
NO_3^- (mg/L)	SM-4500- NO_3D	Sulfato de Brucina
PO_4 (mg/L)	Factor de conversión P- PO_4 a PO_4	Cálculos por factor de conversión P- PO_4 a PO_4
Enterococos (NMP/100 ml)	NMX-AA-120-SCFI-2006	Apéndice Normativo B, tomado del apéndice E NOM-210-SSA
Cadmio (mg/L)	EPA-2007	

2.4 Análisis de datos

A partir de los resultados obtenidos del laboratorio, se realizaron mapas en los que se muestra la concentración de cada parámetro analizado utilizando el programa Qgis 3.83 con Grass 7.61 Zanzibar (Fig. 4). Además, los parámetros fueron comparados con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales); NOM-127-SSA1-1994 (agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad), NMX-AA-120-SCFI-2016 (requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas) y el acuerdo CE-CCA-001/89 (Criterios Ecológicos de Calidad del Agua); así como las directrices para ambientes seguros en aguas recreativas de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

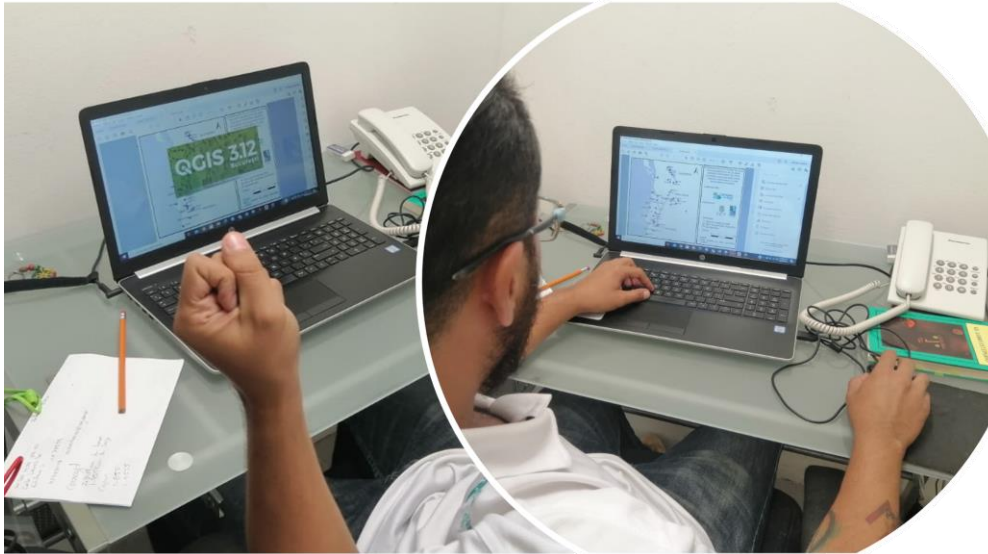


Figura 4. Análisis y manejo de datos para determinar la distribución de los distintos parámetros de calidad del agua de las ANPs.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Parámetros físico-químicos

El pH en los polígonos Isla Mujeres (IM), Punta Cancún (PC) Punta Nizuc (PN) y SLMN osciló de 7.9 ± 0.04 a 8.5 ± 0.04 , con un promedio de 8.1 ± 0.18 . El valor promedio mínimo (7.9) se registró en el año 2020 en el polígono IM, mientras que el valor máximo (8.5) se registró en el año 2018 dentro del mismo polígono (Fig. 5). Estos valores se encuentran dentro del rango reportado en otras zonas costeras de la Península de Yucatán (7.6 - 9.0) en los que el pH es amortiguado por el sistema de CO_2 -carbonatos (Broecker, 1974; Valdés et al., 1985). El potencial de oxidación – reducción indicó condiciones moderadamente reductoras tendientes a oxidantes en 2018 (+90 a +300 mV) pero claramente oxidantes en 2019 (> 300 mV), no se tiene registro de dicho parámetro para el año 2020 (Fig. 6).

Todos los valores de pH reportados en este trabajo se encuentran dentro del límite permisible (5 a 10 unidades de pH) establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

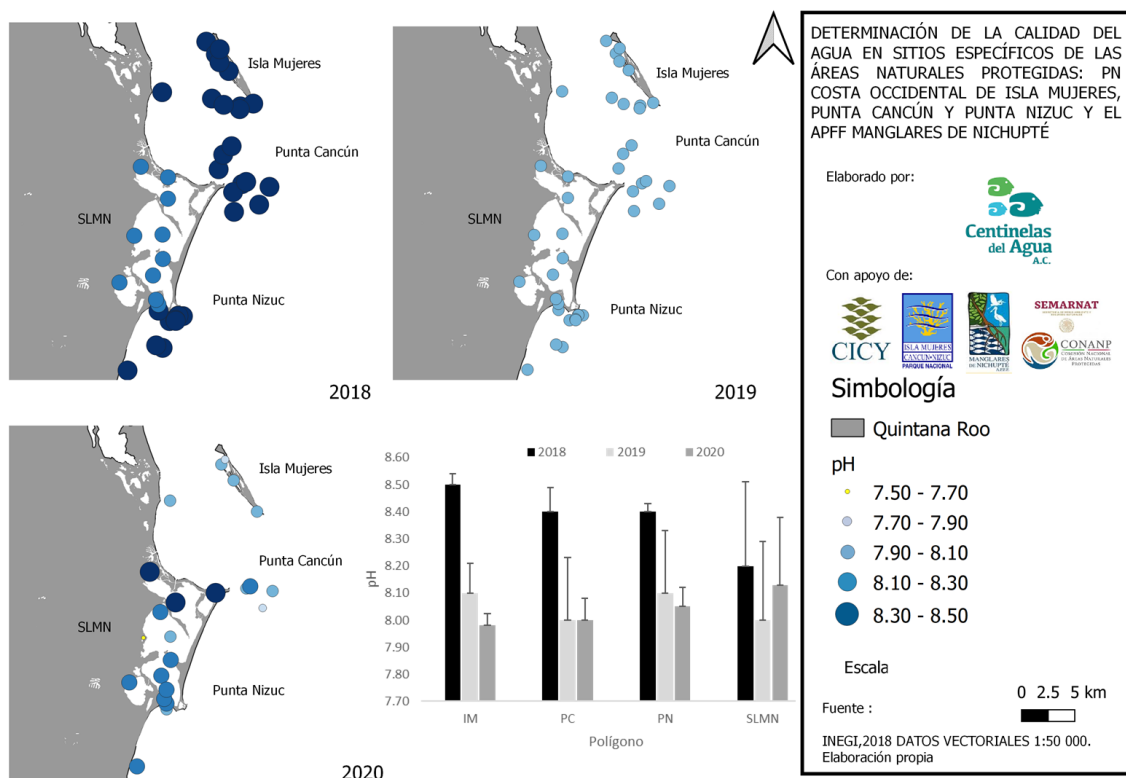


Figura 5. Distribución superficial y variación temporal del pH en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

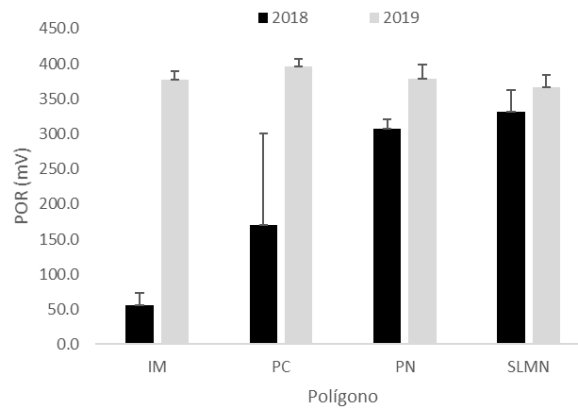


Figura 6. Variación temporal de potencial de oxidación – reducción en los polígonos APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

Durante el periodo de estudio se observó una variación espacial y temporal de la temperatura, alcanzando un valor promedio de 28.26 ± 1.17 °C. La mayor temperatura se registró en el año 2018 (periodo de lluvias), particularmente en los polígonos SLMN y PN (29.70 °C), posteriormente en el año 2019 (nortes) se registró un descenso en la temperatura registrando los valores mínimos para este estudio (25.70 °C) al interior del sistema lagunar Nichupté. Finalmente, para el año 2020 (temporada de secas) la temperatura incrementó en todos los polígonos hasta alcanzar un promedio general de 28.43 ± 0.49 °C, con picos de temperatura (hasta 30°) en sitios de muestreo ubicados en el SLMN como Tajamar, Bojórquez y Cuenca Centro (Fig. 7).

La temperatura superficial del agua reportada en este estudio para el periodo 2018 a 2020 son valores típicos de las temporadas de lluvias o verano (28 °C) y nortes o invierno (24 °C) registradas para el mar Caribe (SEMARNAT y CONANP, 2016). Mientras que la temperatura registrada en el SLMN fue más alta que lo reportado en las zonas marinas adyacentes, debido a las altas tasas de evaporación producidas por la radiación solar y a lo somero de sus cuencas (Carbajal-Pérez, 2009). Además, los valores de temperatura registrados en este estudio se encuentran dentro del límite permisible (40 °C) establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

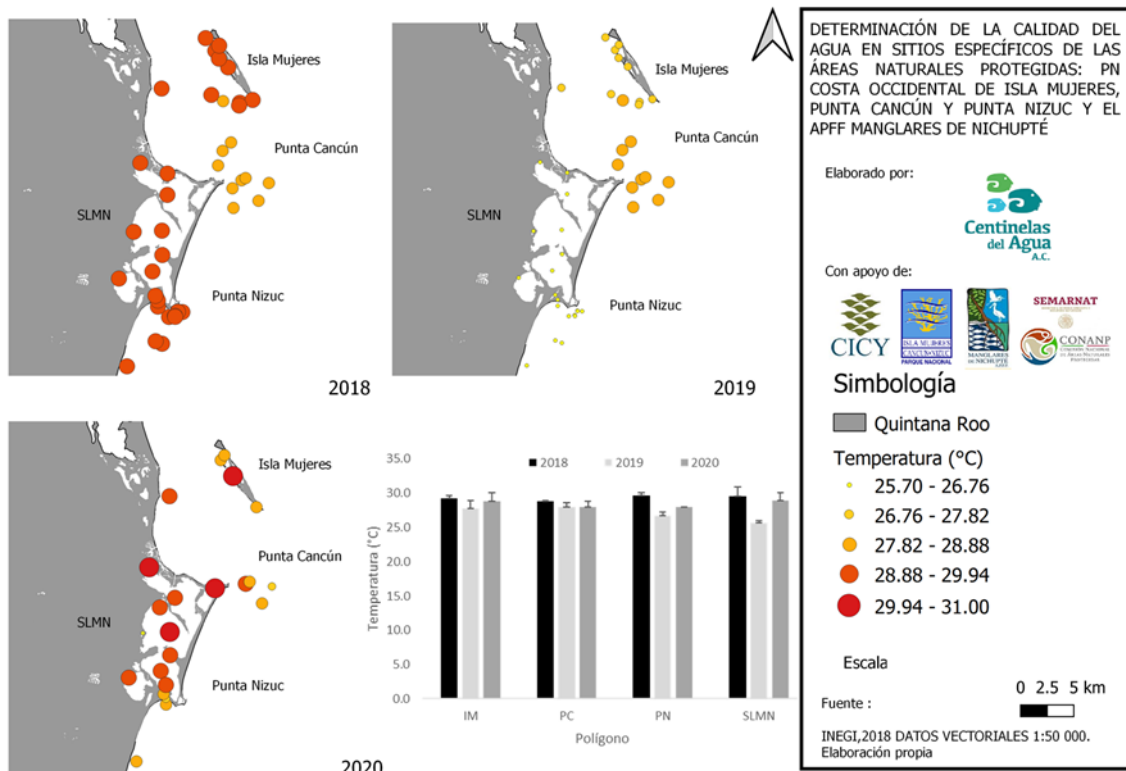


Figura 7. Distribución superficial y variación temporal de la temperatura en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

En promedio la salinidad fue de 34.53 ± 5.23 ppt, mientras que la conductividad eléctrica (C.E.) fue de 53.37 ± 7.65 mS/cm. Para el periodo de 2018 a 2019 estos parámetros fueron uniformes en los polígonos marinos de IM, PC, PN (entre 34.80 ppt y 51.56 mS/cm) y siempre menores dentro del SLMN por tratarse de una laguna costera con descarga de agua subterránea (21.80 a 27.20 ppt; 34 a 42 mS/cm) la cual se registró principalmente en los sitios Río Inglés y Laguna del Amor. En el año 2020 la salinidad y conductividad incrementaron en todos los polígonos estudiados, sin embargo, continuaron siendo ligeramente inferiores al interior del SLMN (Figs. 8-9), esto debido a los procesos propios de lagunas costeras como la estacionalidad, el intercambio marino, aportes pluviales, evaporación (Romero-Sierra, 2016) y en el caso del sistema lagunar, al drenaje de agua dulce proveniente de los manantiales ubicados al interior de la laguna (Carbajal-Pérez, 2009).

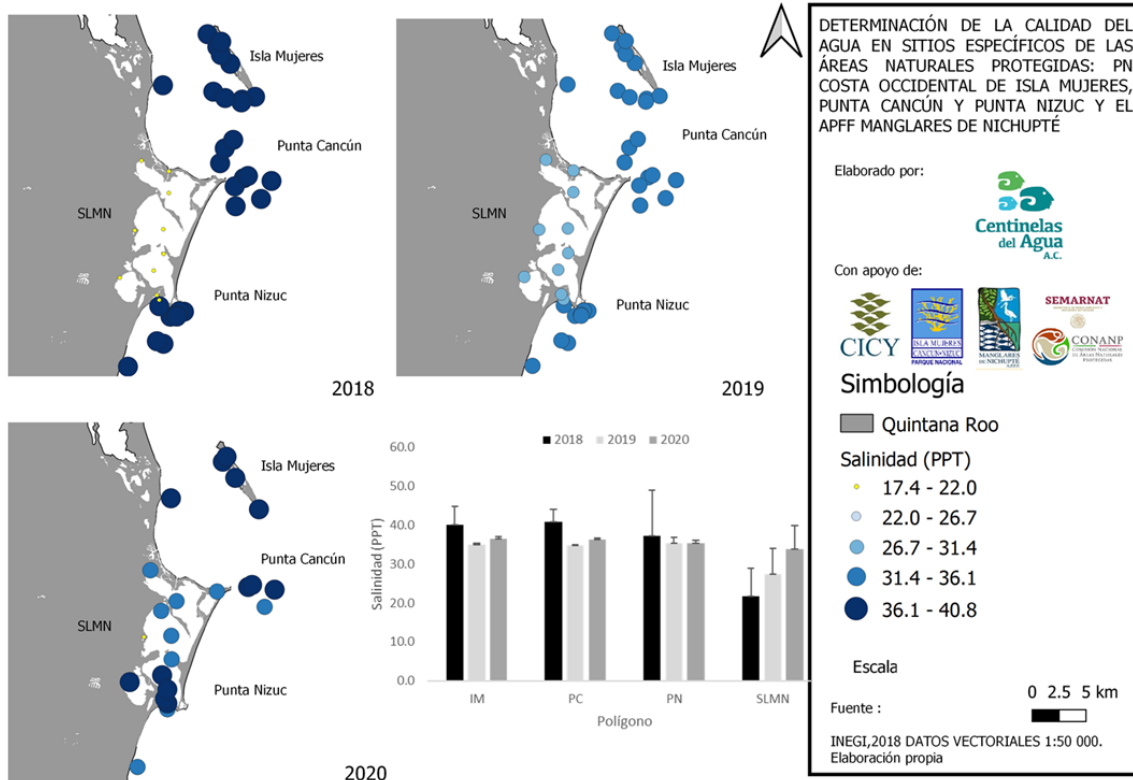


Figura 8. Variación temporal de la salinidad en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

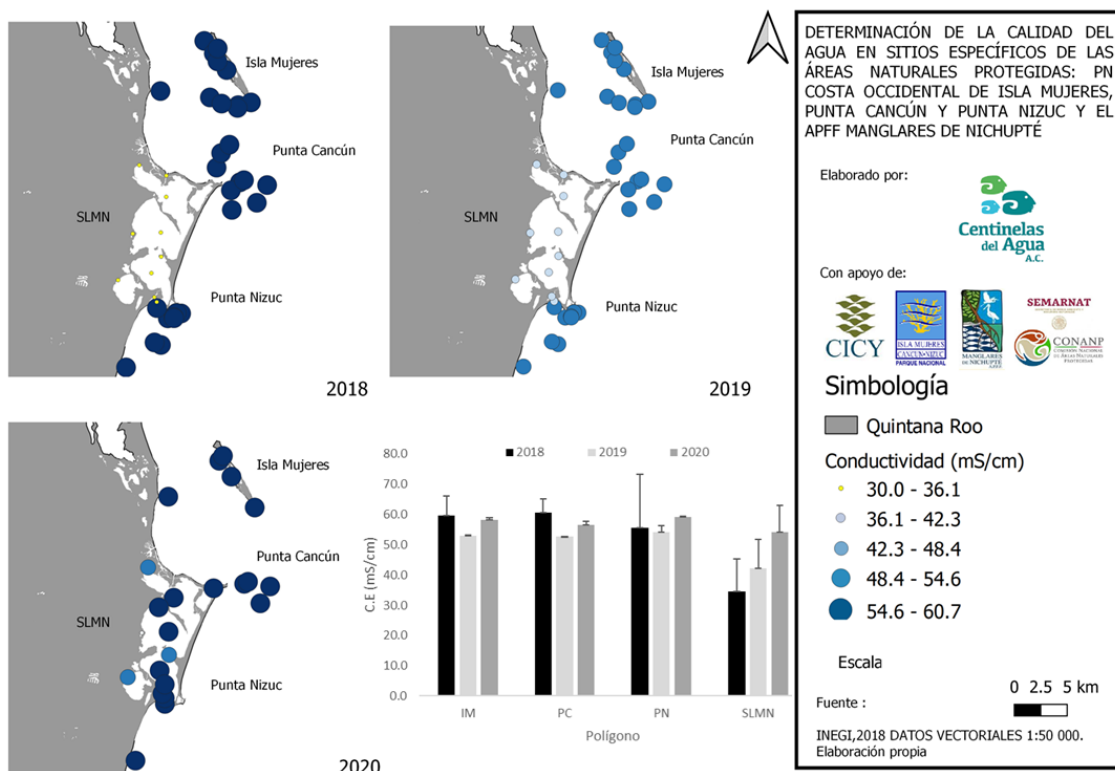


Figura 9. Variación temporal de la conductividad eléctrica en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

Durante los tres años de estudio se observaron condiciones aeróbicas en todos los polígonos con una concentración promedio de oxígeno disuelto de 5.36 ± 0.64 mg O₂/l. La concentración de oxígeno disuelto en los polígonos marinos (IM, PC, PN) estuvo dentro de un rango de 4.70 a 6.5 mg O₂/l, estos valores concuerdan con los reportados por González-López (1989) para el mar Caribe. En el año 2019, algunas estaciones del polígono SLMN tuvieron una concentración de oxígeno disuelto ligeramente menor al resto de los sitios (3.90 ± 1.0 mg O₂/l) (Fig. 11), estos valores se encuentran dentro del rango reportado por otros autores al interior del complejo lagunar (3 a 8 mg O₂/l) (González-López, 1989; Herrera y Morales, 2010 y Espinosa-Bouchot 2011).

En 2019 todos los sitios del SLMN registraron valores de oxígeno disuelto por debajo del límite mínimo establecido (5 mg/l) en los criterios ecológicos para la protección de la vida acuática en aguas marinas o ambientes costeros (CE-CCA-001/89).

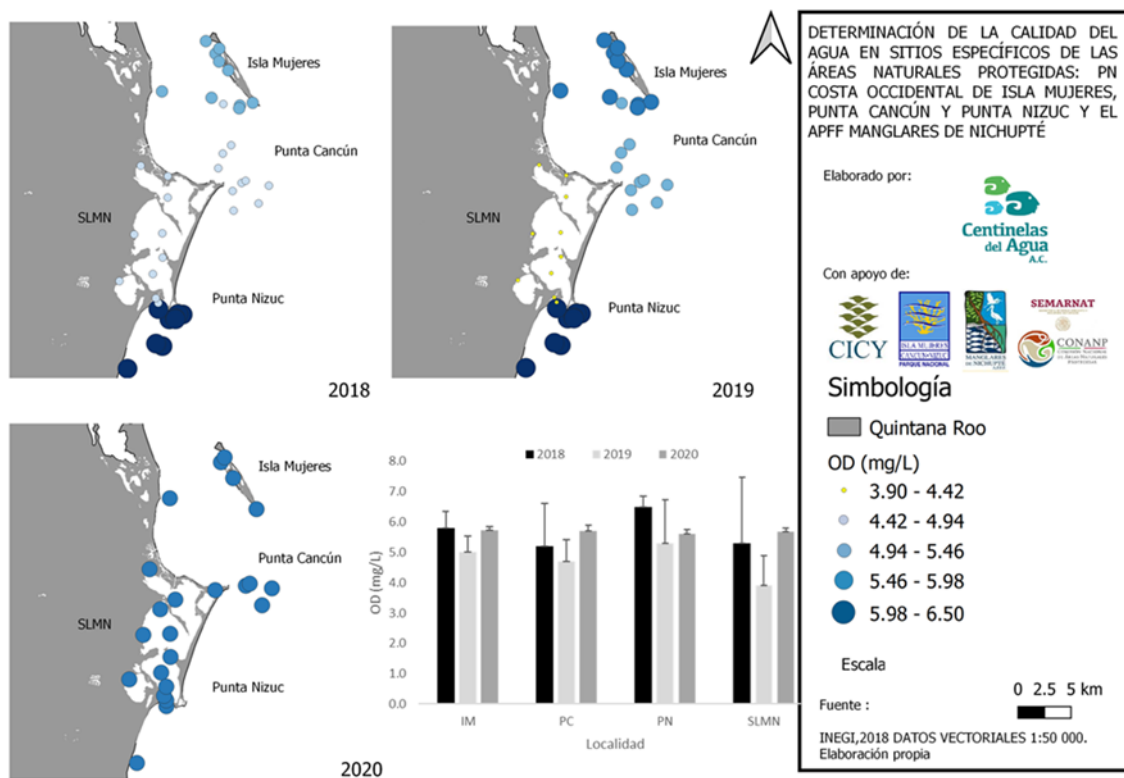


Figura 11. Variación temporal del oxígeno disuelto en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

La cuantificación de los aniones cloruros y sulfatos mediante cromatografía iónica obtuvo los valores mostrados en la tabla 4. Las menores concentraciones de cloruros corresponden a sitios interiores del SLMN (p.ej. Laguna del Amor, Cuenca Norte) y se observa efecto de agua marina en Calinda y Nizuc. Todas las muestras tienen valores de la relación SO₄: Cl de 0.12 (± 0.003), cercana al valor 0.14 del agua de mar a nivel mundial (Fig. 12; Anexo 1).

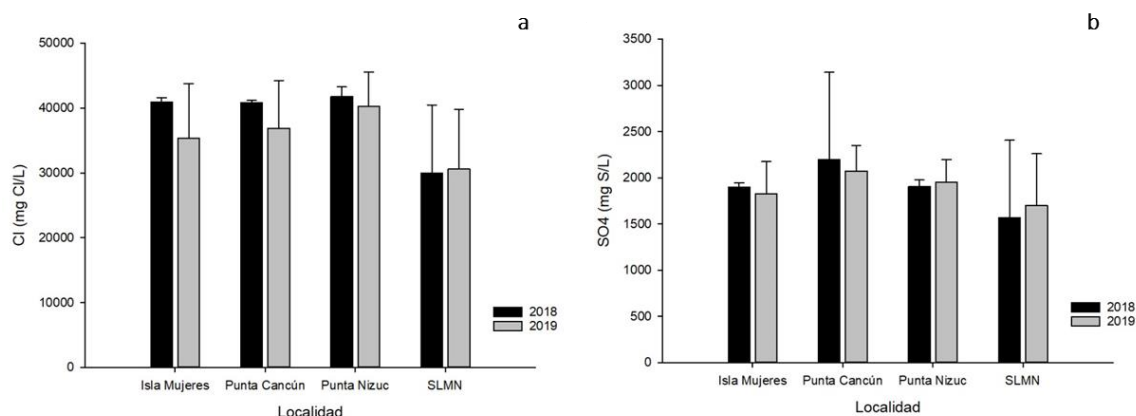


Figura 12. Variación temporal de **a)** Cloruros y **b)** sulfatos en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

3.2 Nutrientes

Nitritos

La concentración promedio nitritos fue de 0.013 ± 0.007 mg/l, con un valor mínimo de 0.007 ± 0.005 y un máximo de 0.02 ± 0.02 mg/l. La mayor concentración se reportó en el año 2018 dentro del SLMN y la mínima en el año 2019 dentro del polígono de PC, mientras que el año 2020 no se tuvo registro de la presencia de este nutriente en alguno de los polígonos de estudio (Fig. 13).

La concentración de nitritos observada en la zona marina (> 0.01 mg/l) es superior a lo registrado por Herrera-Silveira et al (2015) para la Costa del Caribe (0.002 mg/l) que incluye los polígonos IM, PC y PN. Por otra parte, los resultados obtenidos para el SLMN en este trabajo (0.26 mg/l) concuerdan con los valores reportados por Herrera-Silveira (2006). Además, estos valores se encuentran por encima del límite máximo establecido (0.002 mg/l) en los criterios ecológicos para la protección de la vida acuática en aguas marinas o ambientes costeros (CE-CCA-001/89).

Debido a que los nitritos en aguas naturales son poco abundantes, su presencia y altas concentraciones en aguas marino-costeras son un indicador de la presencia de aguas residuales derivadas posiblemente de la infraestructura turística (Herrera-Silveira, 2006; Carbajal-Pérez, 2009; Hernández-Terrones et al. 2013). Un indicio de ello es la ubicación de los sitios con mayor concentración de este nutriente (Moon Palace y SLMN), así como su nula presencia (límite de detección 3.4 mg/l) durante el periodo de inactividad turística derivada de la crisis sanitaria de COVID-19 en la que la ocupación hotelera fue del 5.7% (SEDETUR, 2020).

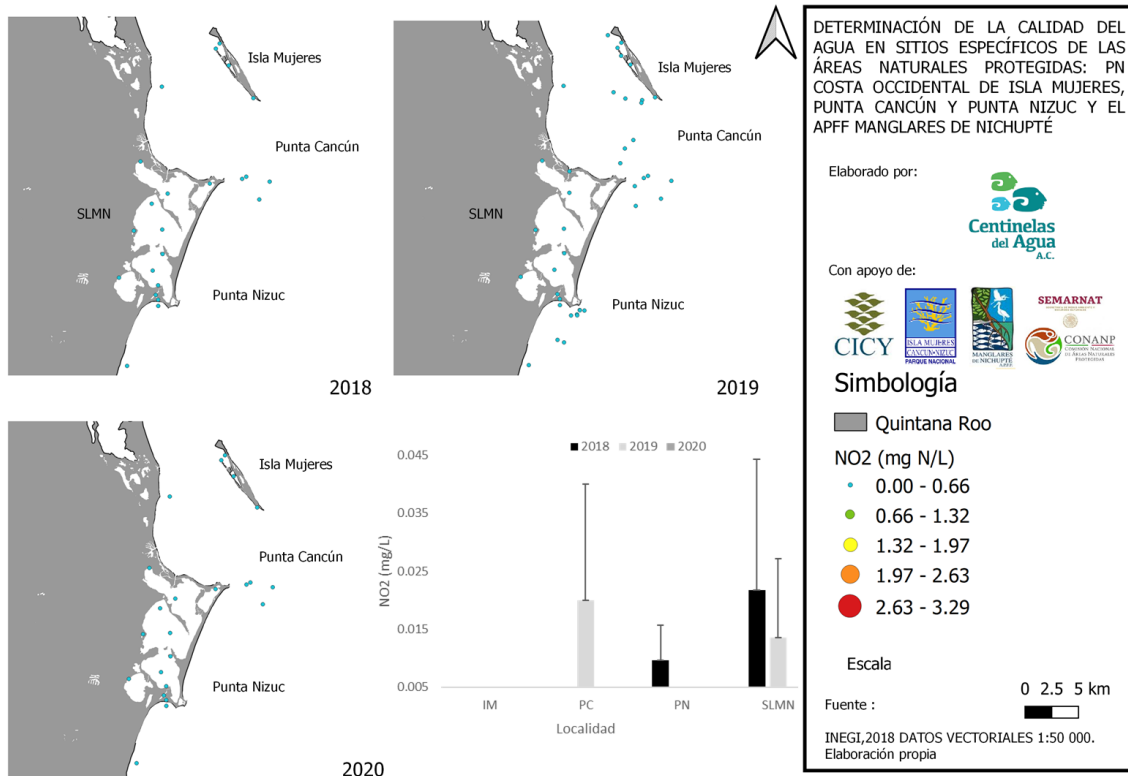


Figura 13. Variación temporal de los nitritos en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

Nitratos

A diferencia de los nitritos, la presencia de los nitratos se reportó en los tres años de estudio, con una concentración promedio de 0.31 ± 0.23 mg/l. En 2018 este parámetro se mantuvo alrededor de 0.20 mg/l en los polígonos marinos (IM, PC, PN) y cercano a 0.40 dentro del SLMN. En el año 2019, se registró la concentración máxima (0.73 ± 0.03 mg/l) en PC, seguido de IM (0.61 ± 0.07 mg/l), mientras que la menor concentración en los tres años de estudio fue de 0.02 ± 0.01 mg/l y se registró para el año 2020 dentro del SLMN (Fig. 14).

Los valores registrados en 2018 en el SLMN, así como lo registrado en 2019 en IM y PC se encuentran por encima del límite máximo establecido (0.04 mg/l) en los criterios ecológicos para la protección de la vida acuática en aguas marinas o ambientes costeros (CE-CCA-001/89). Sin embargo, en el monitoreo realizado durante el periodo de contingencia sanitaria por COVID-19 y durante el cese a las actividades turísticas y recreativas, la concentración de este nutriente decreció en todos los polígonos encontrándose por debajo del límite de detección, de tal manera que en 2020 se cumplió con los criterios de la CE-CCA-001/89.

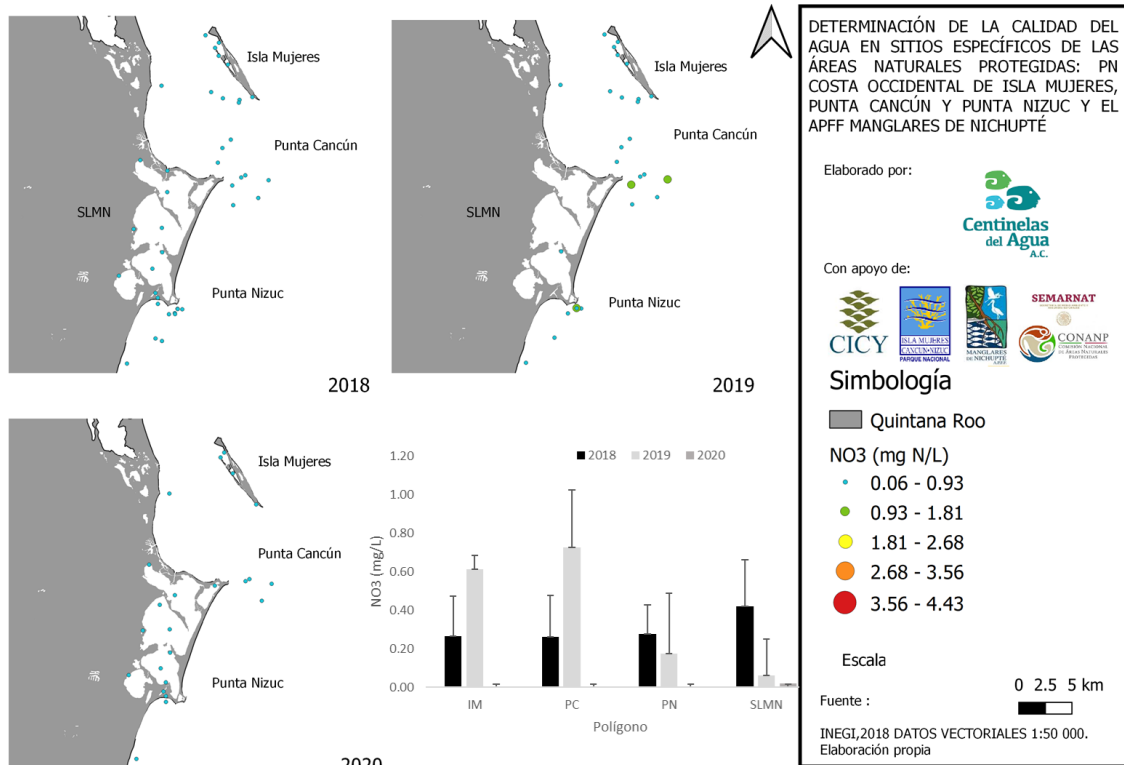


Figura 14. Variación temporal de los nitratos en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

Fosfatos

La concentración promedio de los fosfatos durante los tres años de estudio fue de 0.13 ± 0.16 mg/l con un valor mínimo de 0.03 ± 0.00 mg/l reportado en el polígono PC en 2019 y un valor máximo de 0.60 ± 0.073 mg/l dentro del SLMN en el mismo año, es importante mencionar que en éste polígono se registró un pico en la concentración de fosfatos en la Laguna del Amor (hasta 2.45 mg/l) y concentraciones superiores a los 0.50 mg/ en la Cuenca Norte, Calinda, Nizuc y Tajamar. En el año 2020 la concentración de este nutriente disminuyó (0.12 ± 0.08) dentro de todos los polígonos, pero siguió siendo más abundantes al interior del Sistema Lagunar Nichupté (0.21 mg/l) (Fig. 15).

La concentración de fosfatos en los tres años de estudio rebasó el límite máximo permisible de la calidad del agua para aguas marinas (0.002 mg/l) establecido por la CE-CCA-001/89. Sin embargo, es importante destacar que durante el año 2019 los valores estuvieron por muy por encima de dicho límite (2.45 mg/l), sobretodo dentro del SLMN (Laguna del Amor) lo cual es un indicador de la descarga de aguas subterráneas contaminadas con aguas residuales. Cabe destacar que a pesar de que la actividad turística disminuyó durante el año 2020, la concentración de fosfatos se mantuvo por arriba del límite establecido por la CE-CCA-001/89, tanto en la zona marina (IM, PC y PN) como dentro del complejo lagunar (SLMN); por lo tanto, es importante monitorear este

parámetro de manera continua, considerando que las elevadas concentraciones se han reportado desde 2014 (en el SLMN) por otros autores (Hernández-Terrones et al., 2014).

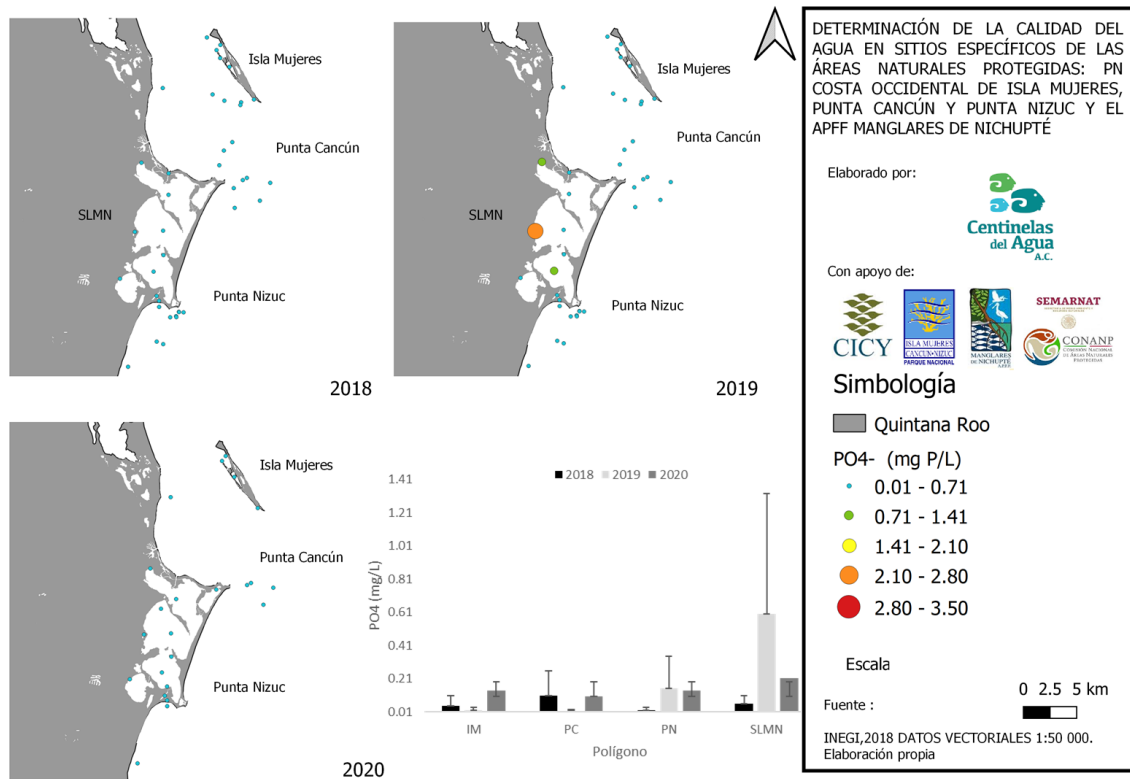


Figura 15. Variación temporal de los fosfatos en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

Sílice

En promedio, la concentración de sílice para los años 2018 y 2019 fue de 2.83 ± 1.87 mg/l, siendo más abundante al interior del SLMN. En el año 2018 se reportaron concentraciones promedio superiores a los 4 mg/l de sílice en todos los polígonos de estudio. La máxima concentración promedio de 2018 (5.61 ± 1.95 mg/l) se reportó dentro del Sistema Lagunar Manglares de Nichupté. En este año, además se registraron estaciones cuyas con concentraciones fueron >7.5 mg/l de sílice, tal es el caso de Aristos (PC), Canal Z y Laguna del Amor (SLMN). El valor mínimo de este parámetro se registró en el año 2019 en Punta Nizuc (0.92 ± 0.25 mg/l) (Fig. 16).

Del análisis de la concentración de sílice se puede apreciar una relación inversamente proporcional con la salinidad, es decir, los sitios con bajas salinidades tuvieron una mayor concentración de sílice, ya que este parámetro es un trazador de aguas subterráneas. Esto ha sido documentado por Herrera-Silveira (2006) y Hernández-Terrones et al. (2011) en lagunas costeras y ojos de agua con descarga de agua subterránea en la zona marina-costera de la Península de Yucatán.

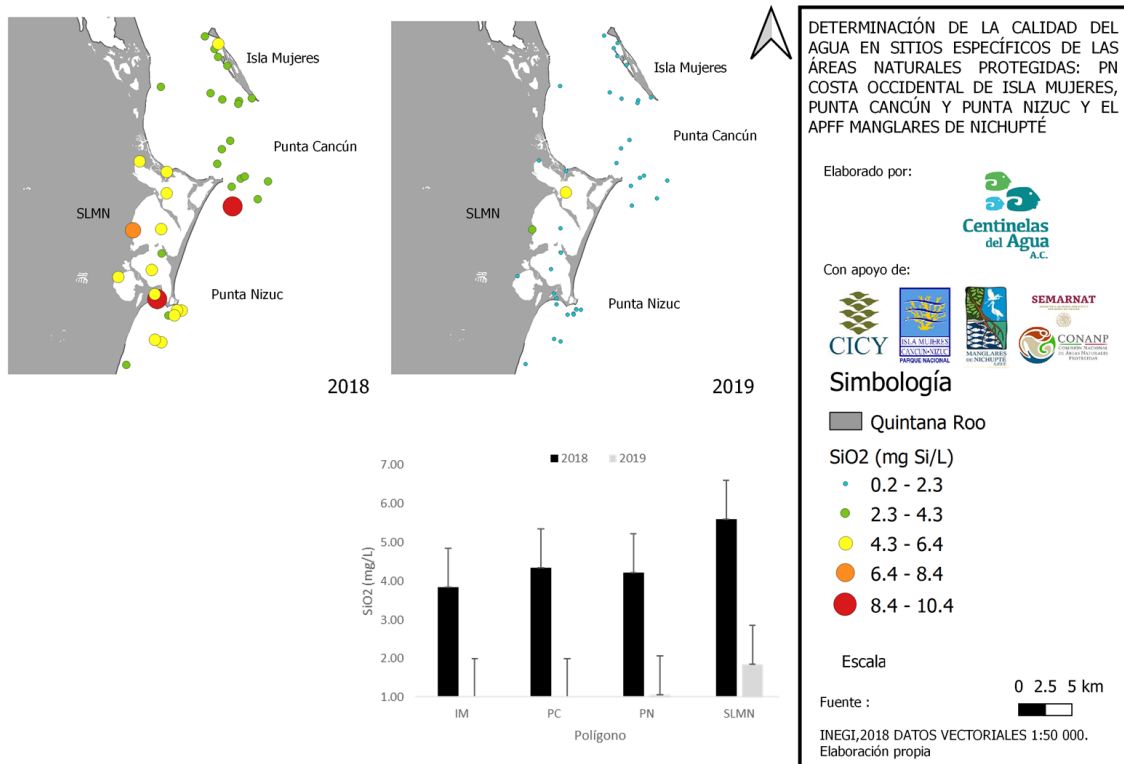


Figura 16. Variación temporal de los silicatos en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

3.3 Metales

Del análisis de la concentración de los metales hierro, cadmio y plomo durante los años 2018 y 2019, se detectó que el hierro fue el más prevalente y con mayor concentración en las muestras de agua (11.12 mg Fe/l en Río Inglés), esto puede deberse a la solubilidad del metal por procesos de naturales de óxido-reducción. Por otra parte, el plomo en agua estuvo por debajo del límite de detección analítico (<0.2 mg Pb/l) en todos los polígonos estudiados; mientras que el cadmio en agua se detectó en algunos sitios de Isla Mujeres (Meco); Punta Nizuc (Resurrección, Rompehielos), y el SLMN (Cuenca Norte) en concentraciones entre 0.016 hasta 0.25 mg/l.

La concentración de cadmio reportada en algunos sitios de estudio rebasó el límite máximo permisible de la calidad del agua para aguas marinas (0.0009 mg/l) establecido por la CE-CCA-001/89.

3.4 Clorofila-a

En promedio, la concentración de clorofila-a para los años 2018 y 2019 fue de 1.78 ± 1.61 mg/l, siendo más abundante durante el año 2018 alcanzando concentraciones promedio cercanas o superiores a los 3 mg/l en todos los polígonos de estudio. La concentración

máxima promedio (3.47 ± 2.75 mg/l) se reportó en PC. Sin embargo, se observó un pico en la concentración de este parámetro dentro del SLMN en la Laguna del Amor (hasta 15.23 mg/l). Posteriormente, para el año 2019 la concentración de la clorofila-*a* disminuyó y se mantuvo alrededor de los 0.30 mg/l dentro de todos los polígonos (Fig. 17). Mientras que, para el monitoreo realizado en el año 2020, no se tomaron muestras para cuantificar la concentración de clorofila.

El pico en la concentración de clorofila-*a* observada durante el año 2018, puede ser el resultado del incremento de nutrientes (nitritos, nitratos y fosfatos) que durante ese periodo sobrepasaron los límites establecidos en los criterios ecológicos para la protección de la vida acuática en aguas marinas o ambientes costeros (CE-CCA-001/89); este exceso en la concentración de nutrientes es asimilado por el fitoplancton propiciando un incremento en su biomasa (Sosa-Avalos et al., 2013). Ejemplo de ello se observó en el SLMN en donde alcanzó una concentración de clorofila *a* de 15.23 mg/l.

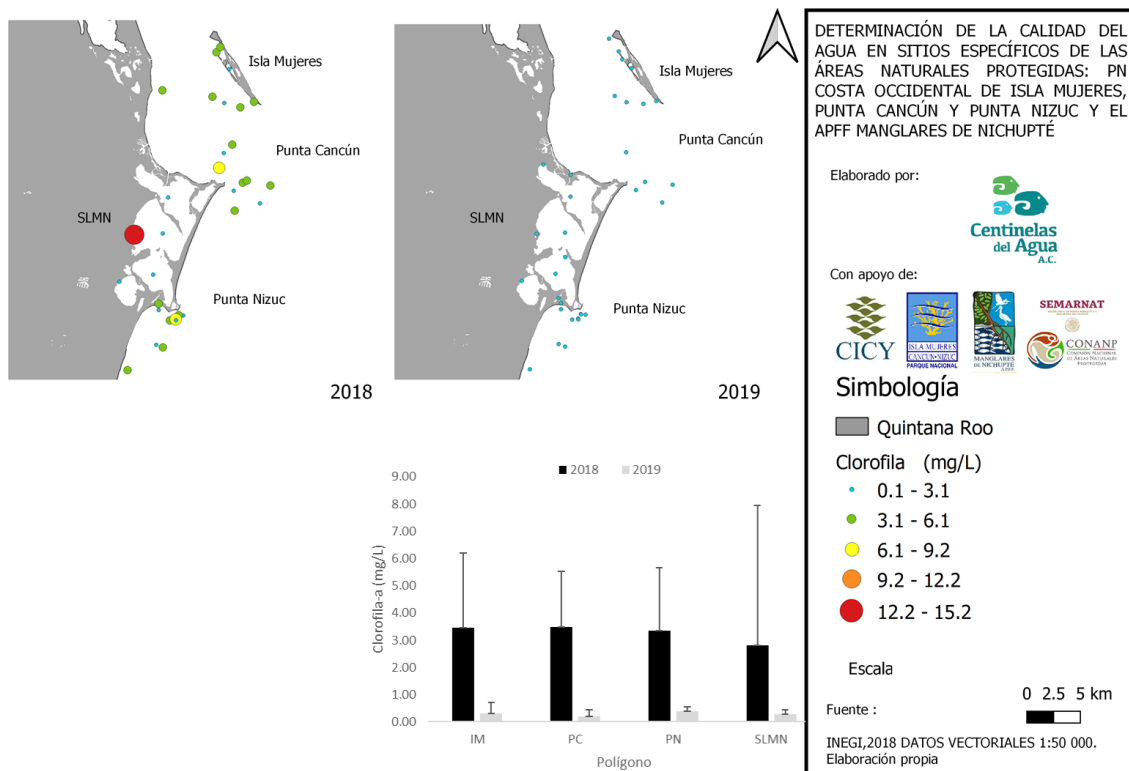


Figura 17. Variación temporal de la clorofila-*a* en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

3.5 Calidad bacteriológica

Del análisis de la calidad bacteriológica del agua en los polígonos de estudio se encontró una concentración promedio de enterococos de 23.41 ± 25.30 NMP/100. El polígono con

mayor presencia y abundancia de este parámetro bacteriológico fue IM, que en el año 2018 registró 173 y 164 NMP/100 ml de enterococos en los sitios Mecó y Ultracarga, respectivamente. Para el año 2019, se registró un sitio (Moon Palace) del polígono Punta Nizuc con una alta concentración de enterococos (280 NMP/100). Finalmente, en el año 2020 la concentración disminuyó al interior de todos los polígonos (< 30 NMP/100 ml) (Fig. 18).

Los valores de Enterococos reportados en este trabajo se encuentran muy cercanos o sobrepasan (Moon Palace) el límite permisible (200 NMP/100 ml) establecido por la Secretaría de Salud (SS) y la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) para aguas de contacto primario en playas y cuerpos de agua dulce (SS y COFEPRIS, 2015), es importante mantener la vigilancia de este y otros parámetros (p. ej. fosfatos) que son indicadores de la creciente vulnerabilidad y de la posible degradación de la calidad del agua sobre todo en sitios donde se han registrado altos niveles de enterococos.

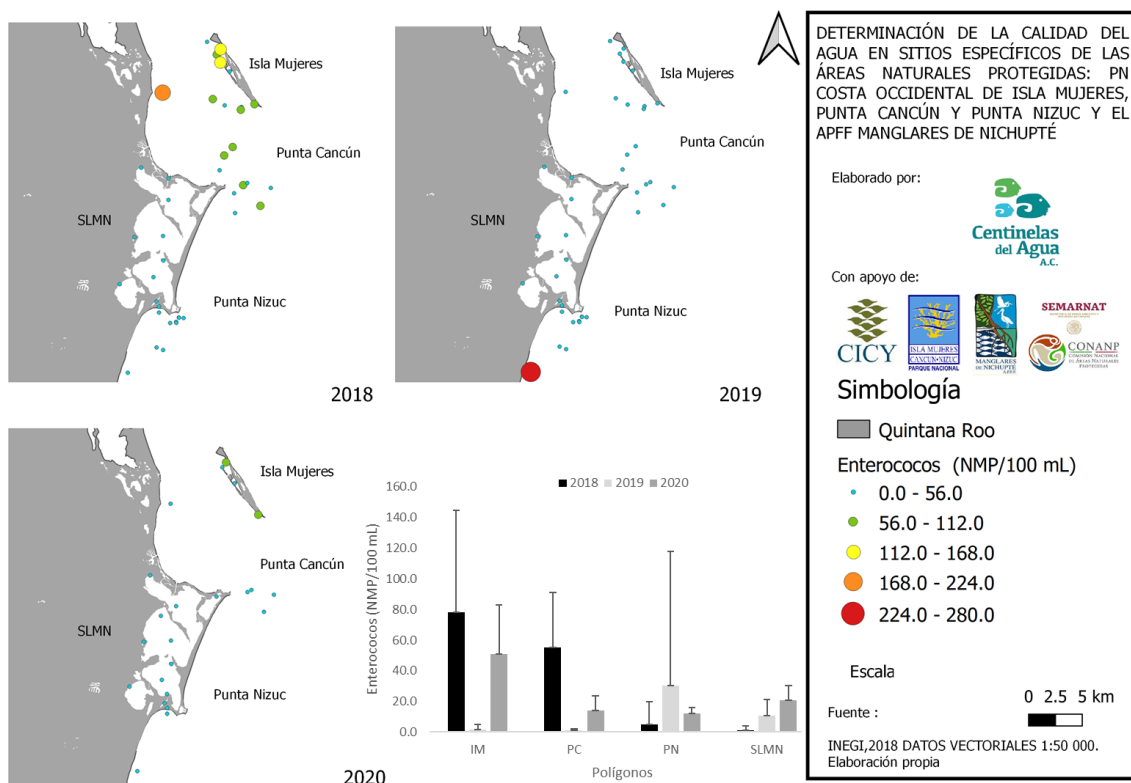


Figura 18. Variación temporal de los Enterococos en el APFF Manglares de Nichupté y PN Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.



4. Consideraciones Finales

El análisis de los distintos indicadores de la calidad del agua de las Áreas Naturales Protegidas: Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres (IM), Punta Cancún (PC) y Punta Nizuc (PN) y el Área de protección de Flora y Fauna Manglares de Nichupté (SLMN) realizado durante los años 2018 a 2020 nos permitió identificar aquellos sitios que, según diferentes indicadores, son vulnerables o se encuentran en un proceso de eutrofización.

De este análisis se detectó que uno o varios sitios de los diferentes polígonos incumplen con los criterios establecidos por la CE-CCA-001/89 o por la Secretaría de Salud (SS) y la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS); sobre todo durante los años 2018 y 2019. En el caso particular del monitoreo realizado en el año 2020, se pudo apreciar una disminución en la concentración de los nutrientes debido al cese en las actividades turísticas y comerciales que se realizan en los márgenes o interior de las ANPs de estudio.

- En el polígono de Isla Mujeres, los sitios que no cumplieron con los lineamientos establecidos por la CE-CCA-001/89 en cuanto a los valores de nitratos, fosfatos y cadmio fueron Macax, Candenita y el Meco; todos los sitios cumplieron con la calidad bacteriológica del agua establecido por la Secretaría de Salud (SS) y la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS).
- En Punta Nizuc y Punta Cancún los sitios Moon Palace, Bajito y Resurrección son sitios en los que se observaron concentraciones elevadas de dos o más nutrientes, mismos que sobrepasaron los límites establecidos en la CE-CCA-001/89, aunado a una elevada concentración de clorofila-a, que también es un indicador de aguas eutrofizadas o en proceso de eutrofización.
- En el caso del Sistema Lagunar Manglares de Nichupté se pudo apreciar el estado de vulnerabilidad a la contaminación por descarga de aguas residuales, sobre todo en aquellos sitios ubicados en la zona de manantiales. Un ejemplo de ello es el caso de la Laguna del Amor que muestra signos evidentes de un proceso de eutrofización, al registrar elevadas concentraciones de nutrientes, metales, parámetros bacteriológicos y elevada concentración de clorofila-a.

A pesar de que en año 2020 las concentraciones de varios contaminantes decrecieron en todos los polígonos estudiados, la persistencia de alguno de ellos (fosfatos) sugieren que la fuente de contaminación es la descarga de agua subterránea contaminada con aguas residuales. Por ello, es importante continuar con el monitoreo de estos parámetros para contar con datos y resultados que podrían ser la base para la implementación de medidas de saneamiento y/o recuperación, sobre todo en zonas prioritarias como el SLMN.

5. REFERENCIAS

- APHA. 2005. Standard methods for the examination of water and waste water, 21st edn. American Public Health Association, Washington, DC.
- Broecker, W.S. 1974. Chemical Oceanography, Harcourt Brace Jovanovich, Inc. USA, 214 pp.
- Carbajal-Pérez, N. 2009. Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Hoja de Cálculo SNIB-CONABIO proyecto No. CQ063. México, D.F.
- CE-CCA-001/89. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua.
- Espinosa-Bouchot, M. 2011. Plan para la recuperación ambiental de Laguna Bojórquez, Cancún, Quintana Roo. Proyecto FB1408/HC001/09. CONABIO. Informe Final.
- González-López, A. 1989. Hidrología y nutrientes en la Laguna Bojórquez, Cancún, Q. Roo. Tesis Maestría en Ciencias del Mar. UNAM-ICMyL. 120 pp.
- Hernández-Terrones L. 2013. Estudio de contaminantes en sitios específicos del Sistema Lagunar Nichupté. Reporte Final. Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C.
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A., & Monroy-Ríos, E. (2011). Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218(1-4), 517-528.
- Herrera-Silveira, J. A. 2006. Lagunas Costeras de Yucatán (SE, México) Investigación, Diagnóstico y Manejo. *ECOTROPICOS* 19 (2): 94-108 2006, 19(2), 94-108.
- Herrera-Silveira, J. A., Aranda, N., Troccoli-Ghinaglia, L., Comín, F. A., & Madden, C. 2005. Eutrofización costera en la Península de Yucatán.
- Herrera-Silveira, J., Morales-Ojeda, S. 2010. Coastal Lagoons: Critical habitats of environmental change. En: Kennish, M.J., Paerl, J. (Eds.) *Coastal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change*. CRC Press, Florida, pp. 307-334.
- Norma Oficial Mexicana NMX-AA-3-1980. Aguas residuales - Muestreo.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría del Medio Ambientes y Recursos Naturales.
- Romero-Sierra, P. 2016. Variabilidad hidroquímica del Sistema Lagunar Nichupté, Quintana Roo. Tesis de Maestría en Ciencias. Unidad de Ciencias del Agua, CICY. 107 pp.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional de Áreas Naturales. 2016. Programa de Manejo Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. 234 p.
- SEDETUR, 2020. Ocupación hotelera diaria de los principales destinos del Caribe Mexicano. Consultado el 18 de agosto de 2020 en: <http://sedetursys.groo.gob.mx/ocupacion/ocupacion2018.php>
- SEMARNAT, 2020. Sistema Nacional de información sobre calidad del agua. Consultado el 17 de agosto de 2020 en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/gob-mx/playas/destinos/destinos.html>.
- SEMARNAT-CONANP. 2019. Plan de manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam. SEMARNAT-CONANP, 292 p.
- Sosa-Ávalos, R., Gaxiola-Castro, G., Olivos-Órtiz, A., Silva-Iñiguez, L. 2013. Nutrientes inorgánicos y producción del fitoplancton en una laguna costera subtropical de México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. 48 (1), 143-154.
- Tran, K. C., Valdes, D., Euan, J., Real, E., Gil, E. 2002. Status of water quality at Holbox Island, Quintana Roo State, Mexico. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 5(2), 173-189.
- USGS. 2020. National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data. Recuperado de: <https://water.usgs.gov/owq/FieldManual/>.



Valdés, D. S., Trejo, J., Real, E. 1988. Estudio hidrológico de la laguna de Celestún, Yucatán, México durante 1985. *Ciencias Marinas*, 14(2), 45-6

ANEXO 1

Tabla 3. Cuantificación de los iones cloruro (Cl⁻), sulfato (SO₄⁻² mediante cromatografía iónica. Valor promedio

Polígono	Sitio	Mg Cl- /L	d.e	mg S- SO ₄ ⁻² /L	d.e.
Isla Mujeres	Banqueros	40864	875,0	1899	46,6
	Cadenita	41142	628,0	1926	32,1
	Farito	40859	75,2	1873	8,3
	Garrafón	41124	661,0	1891	31,8
	Macax	40984	452,0	1901	25,0
	Manchones	41135	808,0	1912	37,1
	Meco	40638	391,0	1979	14,1
	Reef Balls	39746	1.007,0	1815	47,3
	Ultracarga	40887	356,0	1868	16,0
	Vivero	42275	581,0	1934	29,9
Punta Cancun	Aristos	40872	425,0	1866	19,7
	Bajo Pepito	40356	593,0	1849	19,3
	Bandera	40790	569,0	1874	19,3
	C58	41312	126,0	1906	2,2
	Chitales	40445	735,0	1893	15,8
	Cuevones	41300	161,0	1926	11,6
	Grampín	41178	735,0	1900	25,7
	Herradura				
	San Toribio	41003	829,0	1905	33,9
	Santo Remedio	40406	383,0	1953	25,2
Punta Nizuc	Bajito	41509	1.837,0	1887	85,9
	Herencia	42512	1.854,0	1962	80,1
	Moon Palace	43703	917,0	1993	52,8
	Oyente	41675	695,0	1945	37,5
	Primer barrera	41400	1.476,0	1814	68,8
	Resurrección	43271	721,0	1978	36,7
	Rompehielos	41251	402,0	1897	29,2
	Salida Nizuc	38219	1.028,0	1841	46,2
	Tercer barrera sur	42548	1.928,0	1959	79,0
	Valle acroporas	41434	368,0	1806	18,8
Sistema Lagunar Manglares de Nichupté	Calinda	43566	2.185,0	1992	108,1
	Canal	29213	65,5	1239	1,8
	Canal Nizuc	41831	858,0	1949	47,3
	Cuenca centro	28049	268,0	1250	11,1
	Cuenca Norte	12706	82,2	578	10,0
	Cuenca sur				
	Laguna del amor	15368	156,0	686	5,4
	Nizuc	42312	1.485,0	1852	67,3
	Río Inglés	29493	1.181,0	1382	42,2
Tajamar	27909	83,0	1254	5,0	