

Diagnóstico de calidad del agua y caracterización de las dos especies de sargazo que arriban a las costas de Cancún, Puerto Morelos y Playa del Carmen

COORDINACIÓN DE TRATAMIENTO Y CALIDAD DEL AGUA
SUBCOORDINACIÓN DE HIDROBIOLOGÍA Y EVALUACIÓN AMBIENTAL

TC1907.1



JEFE DE PROYECTO
DRA. MARÍA DEL PILAR SALDAÑA FABELA

PARTICIPANTES
MI. JORGE IZURIETA DÁVILA
BIÓL. JAVIER SÁNCHEZ CHÁVEZ
MC. JUAN GARCÍA ROJAS
DRA. MARÍA ANTONIETA GÓMEZ BALANDRA
DRA. MARICELA MARTÍNEZ JIMÉNEZ
MC. LUIS BRAVO INCLÁN
MC. CAMILO VAZQUEZ BUSTOS
BIÓL. RUBÉN HUERTO DELGADILLO

DICIEMBRE DE 2019

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Antecedentes de los arribos de Sargazo	5
1.2. Problemática en el Caribe Mexicano.....	7
1.3. Evaluación de impactos	10
1.4. Acciones que se han realizado en la zona	11
2. METODOLOGÍA.....	14
2.1. Preparación de material	16
2.2. Equipo.....	17
2.3. Procedimiento para Toma de Muestra	18
2.3.1. Enjuague de recipientes y material auxiliar de muestreo	18
2.3.2. Recolecta de la muestra	18
2.4. Conservación y preservación de las muestras.....	19
2.5. Identificación y Control de Muestras	20
2.6. Embalaje, transporte y almacenamiento de muestras	20
2.7. Determinación de la especie de sargazo	20
2.8. Aislamiento, selección e identificación de enterobacterias y Medición de gas metano y ácido sulfhídrico.	21
3. RESULTADOS.....	21
3.1. Resultados campo de Agosto (2019).....	22
3.2. Resultados campo de Noviembre (2019).....	23
3.3. Resultados de nutrientes en agosto.....	27
3.4. Resultados Metales	33
3.5. Determinación de la especie de sargazo	37
3.6. Medición de Metano y ácido sulfhídrico en el sargazo en descomposición.....	43
4. CONCLUSIONES	45
I. ANEXO I.....	48
“AISLAMIENTO, SELECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE ENTEROBACTERIAS Y DETERMINACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI), EN MUESTRAS DE SARGAZO DE LA ZONA COSTERA DE QUINTANA ROO”.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pronósticos de arribo de Sargazo, Sur de Quintana Roo	8
Figura 2. Pronósticos de arribo de Sargazo, Tulum	8
Figura 3. Sitios de seguimiento	9
Figura 4. Ubicación de las estaciones de monitoreo de agua y sargazo en las playas (círculos rojos).	15
Figura 5. Recolecta de sargazo en charola y pesado en Puerto Morelos (agosto, 2019)	18
Figura 6. Recolecta de agua y sargazo en la playa de Punta Nizuc (noviembre, 2019)	19
Figura 7. Manejo de las muestras para su almacenamiento y transporte.	19
Figura 8. Identificación y control de las muestras.	20
Figura 9. Barrera en Puerto Morelos (izquierda) y Mahahual (derecha).	21
Figura 10. Parámetros de campo que representan los valores mínimos, máximos y promedio de las mediciones realizadas en agosto, 2019.	23
Figura 11. Parámetros de campo que representan los valores mínimos, máximos y promedio de las mediciones realizadas en noviembre, 2019.	25
Figura 12. Ubicación de las estaciones de muestreo en Punta Nizuc.	26
Figura 13. Variaciones en los parámetros de campo temperatura, pH, salinidad,	26
Figura 14. Concentración de nitrógeno total y orgánico en agua (agosto, 2019).	28
Figura 15. Concentración de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos en agua.	29
Figura 16. Concentración de fósforo total en agosto	30
Figura 17. Sargazo en Mahahual. A agosto y B noviembre de 2019.	31
Figura 18. Concentración de NT y PT en agosto y noviembre 2019.	31
Figura 19. Concentraciones de Arsénico y Cadmio en muestras de sargazo en descomposición. Mínimos, máximos, promedios.	34
Figura 20. Concentraciones de Cobre y Mercurio en muestras de sargazo en descomposición. Mínimos, máximos, promedios.	34
Figura 21. Concentraciones de Níquel y Zinc en muestras de sargazo en descomposición. Mínimos, máximos, promedios.	35
Figura 22. Concentraciones de metales pesados en sargazo y agua de mar colectado en noviembre de 2019.	36
Figura 23. Características de la <i>Sargassum natans</i> . Esquema tomada y modificada de OO Oyesiku y A Egunyomi. 2014. Identificación y estudios químicos de masas pelágicas de <i>Sargassum natans</i> (Linnaeus) Gaillon y <i>S. fluitans</i> (Borgessen) Borgesen (algas pardas), que se	39
Figura 24. Características observadas en el Laboratorio del IMTA de <i>Sargassum natans</i> colectadas en agosto de 2019.	40
Figura 25. Características de la <i>Sargassum fluitans</i> .	41
Figura 26. Características observadas en el Laboratorio del IMTA de <i>Sargassum fluitans</i> colectadas en agosto de 2019.	43
Figura 27. Concentración de metano y ácido sulfhídrico en sargazo en descomposición.	45

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tipo de contenedor y preservación por parámetro para su análisis.</i>	16
<i>Tabla 2. Características del equipo EXO 2 para la medición en campo.</i>	17
<i>Tabla 3. Nombre de la estación y clave que se utilizará para los resultados de campo.</i>	22
<i>Tabla 4. Estadística descriptiva de los parámetros de campo y sus unidades de medición. (agosto, 2019)</i>	22
<i>Tabla 5. Nombre y clave de las estaciones de muestreo en noviembre, 2019.</i>	24
<i>Tabla 6. Estadística descriptiva de los parámetros de campo y sus unidades de medición. (noviembre, 2019)</i>	24
<i>Tabla 7. Estaciones y concentraciones de nutrientes que variaron entre los meses de muestreo (Agosto y Noviembre de 2019)</i>	32
<i>Tabla 8. Concentración de metales pesados en sargazo colectado en playa y en el mar del Caribe Mexicano (2019) y la comparación con las concentraciones del estudio de Fernández et. al., 2017 de República Dominicana.</i>	33
<i>Tabla 9. Características morfológicas de S. natans de S. fluitans.</i>	38
<i>Tabla 10. Estimaciones de las principales fuentes naturales y antropogénicas de metano a nivel global (millones de Ton/año).</i>	44
<i>Tabla 11. Geoposición de puntos de colecta y calendarización de los sitios de colecta de sargazo y agua.</i>	51



1. INTRODUCCIÓN

En 2009 se detectaron los primeros varamientos de sargazo en las costas de África, y de 2011 a 2015 se presentaron en México. La biomasa de sargazo que llegó en 2015 a México se consideró un evento masivo, y el evento que se registró en 2018 en el Caribe mexicano fue 5 veces más grande. Este fenómeno de arribazón del sargazo plantea graves problemas para los ecosistemas locales e industrias importantes, como el turismo y la pesca. Ante esta problemática SEMARNAT planteo 9 ejes rectores, siendo abordados en el proyecto los correspondientes a dos ejes. El de monitoreo de la zona costera y la investigación sobre las dos especies de macroalgas que llegan al Mar Caribe, planteándose el siguiente objetivo: Evaluar la calidad del agua de la zona costera, así como caracterizar los aspectos fenológicos del sargazo en las playas donde existe varamiento de la macroalga.

1.1. Antecedentes de los arribos de Sargazo

A nivel internacional se ha reportado que los arribos de macroalgas a la zona del Caribe a partir de 2011 son cada vez más comunes y están aumentando en volumen y duración (Smetacek and Zingone 2013; Schell et al. 2015). University of Southern Mississippi <http://gcrl.usm.edu/sargassum/index.php>. Como ejemplo en la costa del Caribe Mexicano se recibieron cantidades que se consideraron masivas atípicas de las macroalgas pardas pelágicas *Sargassum fluitans* y *S. natans* en 2011 y desde el verano de 2014 hasta el invierno de 2015 (Doyle and Franks 2015, Wang et al. 2019) y más recientemente de 2017 a 2019.

El sargazo que está llegando al Caribe en los últimos años es pelágico y se torna perjudicial únicamente cuando llegan a la costa de manera masiva, ya que pequeñas cantidades en las playas, pueden servir como hábitat para invertebrados, para la red trófica y para estabilizar playas y dunas (Colombini, I., Chelazzi, L., Gibson, R. N., & Atkinson 2003).

Históricamente, la distribución del sargazo pelágico, compuesto de las especies *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*, se ha ubicado en el Mar de los Sargazos, en el medio del Giro Subtropical del Atlántico Norte (Gower et al. 2013). En esa región se considera que las corrientes dominantes crean un vórtice que acumula grandes cantidades de sargazo (Maurer et al. 2015). Ocasionalmente, las masas de sargazo flotan a través de los pasos que hay al norte del Caribe (Windward, Mona y Anegada) y migran hacia el oeste (Frazier et al. 2013), y algunas algas, en cantidad menor, llegan a las islas localizadas al este y oeste del Caribe y a la parte este de la península de Yucatán.

En el verano de 2011, sin embargo, ocurrió una afluencia masiva de sargazo pelágico en el Caribe oriental, desde Trinidad hasta la República Dominicana, y en la costa oeste de África, desde Sierra Leona hasta Ghana (Smetacek and Zingone 2013). A nivel regional, la biomasa de sargazo registrada durante los meses de mayor afluencia fue 200 veces mayor a la biomasa promedio durante los ocho años anteriores (Gower et al. 2013). En 2012, se reportó una llegada atípica de sargazo pelágico a la costa sur de Cuba (Moreira and Alfonso 2014). A partir de mediados de 2014, muchas otras islas y países del Caribe comenzaron a ser afectados (Gavio et al. 2014). En el caso del Caribe Mexicano, las estimaciones de la combinación de formas de Sargazo en el otoño de 2014 en el



Atlántico tropical fueron diez veces mayores que las de los eventos de 2011/2012 y 300 veces mayores que las de cualquier otro otoño durante las últimas dos décadas.

En 2015 por las características morfológicas se reconoció al sargazo del caribe preliminarmente como *S. natans* VIII Parr basado en su consistencia, tallo liso, cuchillas anchas y vejiga rara pero los análisis genéticos determinarán la taxonomía de subespecies (Schell et al. 2015). En la práctica, puede ser confundido con *S. fluitans*, este último tiene cuchillas significativamente más pequeñas y este tipo de estructura física puede influir en el papel ecológico de cada forma. Estas diferencias morfológicas de *S. natans* VIII, la región de origen y extensión geográfica pueden ser rastreados a resoluciones espaciales más finas que por percepción remota.

La ocurrencia y el dominio de una forma rara anterior de Sargazo pelágico tiene consecuencias ecológicas significativas, las observaciones preliminares comparativas de la fauna residente en *S. natans* VIII revelan baja riqueza y abundancia de especies. En consecuencia, en comparación con otros sargazos pelágicos tiene menor valor de forrajeo y hábitat de peces, tortugas (Coston-Clements et al. 1991), y aves marinas (Moser and Lee 2012).

Las observaciones satelitales de las masas de sargazo pelágico (Gower et al. 2013), en conjunto con modelos de información retrospectiva de sitios de arribazón de sargazo (Johnson et al. 2013), sugieren que una área localizada al norte del estuario del río Amazonas, frente a la costa brasileña, fue el posible punto de origen de las afluencias del sargazo al Caribe desde 2011. Se piensa que esta área fue colonizada por sargazo proveniente de la Región de Recirculación del Atlántico Norte. Schell et al. (2015) encontraron que la morfología de la especie dominante difería entre el Caribe Oriental, la corriente de las Antillas y el sur del Mar de los Sargazos.

Debido a que el Mar de los Sargazos es oligotrófico, y a que en el Atlántico Norte y Brasil la condición es de alto contenido de nutrientes, el sargazo pelágico del Caribe se ha atribuido al alto contenido de nutrientes de esta agua, y posiblemente la eutrofización de aguas costeras y descargas del acuífero hacia el mar (Carruthers et al. 2005; Baker et al. 2010; Metcalfe et al. 2011). En aguas enriquecidas con nutrientes, las dos especies duplican su biomasa en aproximadamente 11 días, en comparación con ≥ 50 días en aguas oceánicas del Mar de los Sargazos (Lapointe et al. 2014). Un aumento en la temperatura de la superficie del océano también podría haber jugado un papel en el aumento de sargazo, dado que en 2015 se registraron las temperaturas más altas a nivel global en los últimos 135 años (NOAA 2016) caribeñas.

Los datos aportados por la Secretaria de Medio Ambiente (SEMA) de Quintana Roo indican que, durante el tiempo de mayor afluencia de sargazo, en agosto de 2015, el volumen total de sargazo removido en playas seleccionadas de cinco municipios fue de 71,353 m³, con valores entre 1,484 m³ en Cozumel y 37,859 m³ en Tulum. En promedio, se removieron 318.9 m³ de sargazo por cada km de playa en agosto de 2015. Los datos aportados por seis hoteles dentro del polígono del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos indican que la afluencia de sargazo (estandarizada a 1 km de playa) alcanzó el máximo valor (19,603 m³ /km) en septiembre de 2015, y posteriormente disminuyó hasta llegar a 681 m³ /km en febrero de 2016. Los hoteles se esforzaban por mantener sus playas libres de sargazo por lo que estos valores pueden utilizarse como una medida indirecta de la afluencia de sargazo a esta área para el período agosto 2015 a febrero del 2016.

La acumulación y descomposición de algas en playas y aguas litorales ha afectado a los ecosistemas costeros, la salud humana y la industria turística (Rodríguez-Martínez and Van Tussenbroek 2017). Ya que además de los fuertes olores durante su putrefacción, colmatan las playas con las algas, tanto de forma superficial como cuando se practica su enterramiento. También se ha incrementado la necesidad de acarrearlo y se han saturado los rellenos y sitios potenciales de disposición.



1.2. Problemática en el Caribe Mexicano

Los florecimientos de macroalgas tienen una gama de efectos ecológicos más amplios ya que suelen durar más tiempo que los de microalgas (años o décadas; Valiela et al. 1997)

Durante 2015, en más de 90% de las playas de Quintana Roo el sargazo no se removió y su descomposición produjo olores fétidos, presumiblemente debido a la producción de ácido sulfhídrico (H₂S) y otros compuestos orgánicos. El mal olor evitó que los turistas y locales utilizaran las playas y consumieran en los restaurantes cercanos a éstas. Se publicaron varias notas en la prensa nacional e internacional anunciando el mal aspecto y olor de las masas en descomposición, aconsejando al turista de evitar este destino para vacacionar.

A mediados de 2015, cuando la playa se encontraba saturada de sargazo en descomposición, continuó llegando sargazo “fresco” a la línea de costa. En este periodo la acumulación del sargazo fue tal, que el material en descomposición provocó que el agua de mar cercana a las costas se tornara de color café. En algunas zonas, se observaron animales muertos entremezclados con el sargazo en descomposición, incluyendo peces, tortugas, pepinos de mar, poliquetos y langostas, los cuales se considera murieron por anoxia. En el fondo marino, debajo del agua color café, se observó mortandad de pastos marinos, posiblemente debido a la reducción de luz, a la acumulación de materia orgánica y al crecimiento prolífico de epífitas. En algunas playas, durante periodos de alto oleaje (durante tormentas) el sargazo en descomposición en la playa fue regresado al mar, aumentando la coloración café del agua por decenas de metros durante varios días.

Se ha estimado además que durante los meses de mayor afluencia de sargazo a la costa de Quintana Roo, la afluencia de nitrógeno al mar fue entre 3.8 y 11.6 veces mayor que la que llega proveniente de tierra durante un año. No todo el nitrógeno aportado por el sargazo permanecerá en el sistema y será remineralizado; sin embargo, esta sencilla estimación indica que la llegada masiva de sargazo puede contribuir de manera importante a la eutrofización de ambientes oligotróficos. De esta manera podrá contribuir al deterioro de los arrecifes coralinos que soportan una alta biodiversidad y tienen gran importancia para la protección costera, soportan pesca comercial y de subsistencia, y son contribuyentes vitales a la economía del estado, basada en el turismo.

El Sistema de Alerta Temprana del Sargazo (SEAS por sus siglas en inglés) se creó en Galveston en 2013 para ayudar a pronosticar grandes arribos a Texas. A partir de 2017, el programa SEAS ha realizado pronósticos para toda la Costa del Golfo, México, Gran Caimán, Jamaica, Haití, República Dominicana, Puerto Rico y varias islas del Caribe. También ha trabajado con varias entidades gubernamentales y organizaciones privadas para conocer la naturaleza y ciclos del Sargazo.

El programa SEAS pudo idear un sistema para localizar, pronosticar arribos a partir de una resolución para Landsat 7 & 8 de 30 m (Moderados y grandes arribos de sargazo) (Figuras 1 y 2). Las predicciones solo alcanzan ocho días para 36 puntos en el Caribe de Texas a Dominicana. Se han colocado tres estaciones en Quintana Roo, Norte, Sur y Tulum, <http://seas-forecast.com/Page%20Forecast/Quints.jpg>, donde pueden consultarse como sigue:

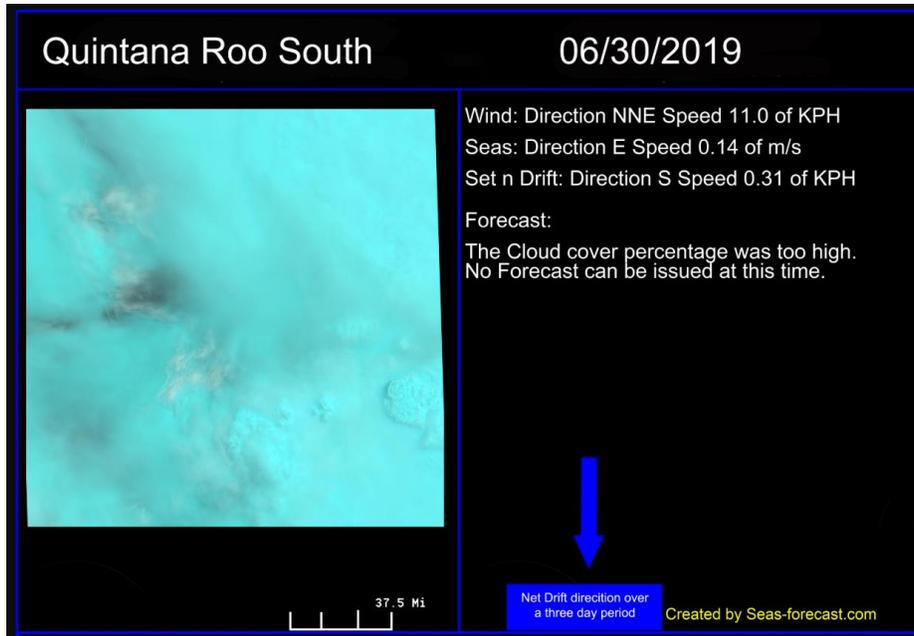


Figura 1. Pronósticos de arribo de Sargazo, Sur de Quintana Roo

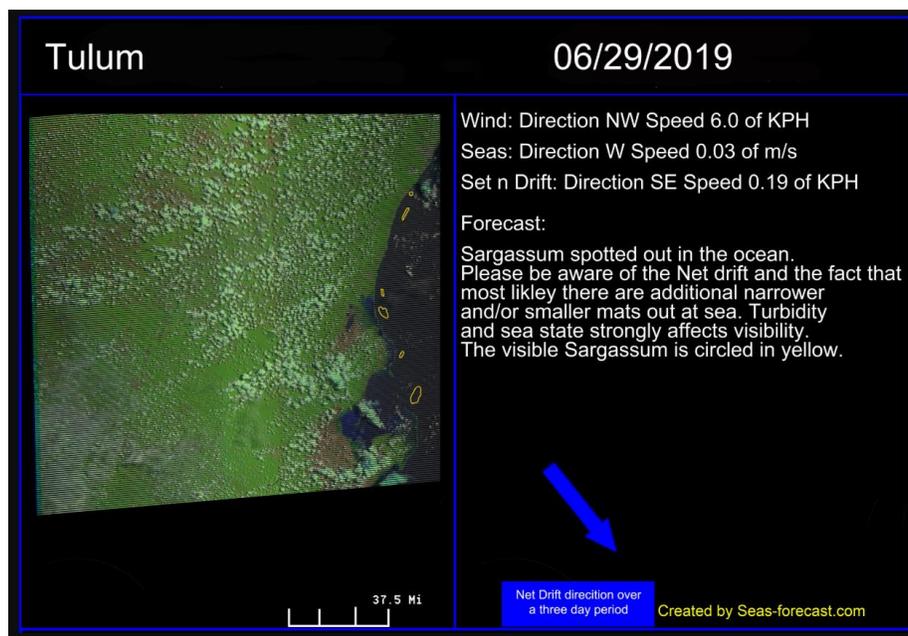


Figura 2. Pronósticos de arribo de Sargazo, Tulum

Los tres componentes del SEAS para las predicciones incluyen: Imágenes satelitales, el sistema Sargazo Loop en el Golfo de México, y tendencias de datos históricos. Las imágenes son monitoreadas durante la temporada de Sargazo, que dura desde enero hasta agosto. Una vez que se identifican manchas flotantes, SEAS mantiene la información sobre la velocidad y la dirección de la corriente de superficie y la velocidad del viento para después determinar la dirección y velocidad del Sargazo. El modelo predictivo calcula la distancia a la orilla para pronosticar una estimación inicial de arribo, mientras el modelo continúa monitoreando los cambios en todas las variables.



El equipo ha integrado una base de datos detallada de referencias de Sargazo en las islas de barlovento o del Mar Caribe para lograr la predicción estacional, conjuntos de datos clave con los arribos históricos de Sargazo y la Oscilación de las Azores de alta presión se analiza, además de la conexión con la oscilación atlántica (NAO) para mejorar las predicciones de desembarques arribos de sargazo a la Costa del Golfo de Texas.

En conclusión la primera fase de este sistema, estimó una alerta de dos semanas de arribos inminentes a través del uso de imágenes Landsat y el monitoreo del viento y corrientes, con una exactitud de 98%.

Por otro lado, durante la Conferencia de Alerta Temprana para Multiamenazas llevada a cabo en Cancún, México, en mayo de 2017, investigadores de Trinidad y Tobago presentaron su Sistema de Alerta Temprana Sargazo del Servicio Meteorológico que comprende tres áreas principales; detección, análisis de trayectoria y participación. El primer componente utiliza los datos satelitales de la banda X de MODIS para identificar placas importantes de Sargazo que luego se envían a un sistema de análisis de trayectoria con el objetivo de proporcionar un pronóstico de cinco días de la deriva esperada de Sargazo. Dada la confianza en la información derivada del satélite y sus limitaciones en presencia de la nube, los usuarios también pueden contribuir y crear informes de avistamientos a partir de aplicación de celular, que luego pueden complementar el sistema de alerta temprana. Este Geoportal basado en la web ha sido probado como un medio para alertar a los pescadores sobre el peligro de las algas marinas y sus impactos en sus redes y seguridad, y ha tenido éxito en las contribuciones de los buques que operan en alta mar en la plataforma de Guayana. Aun no se había lanzado formalmente, pero se esperaba que se pueda adoptar a escala regional y proporcione la orientación necesaria para minimizar el impacto de las algas Sargazo en la economía del Caribe.

Otros sistemas de advertencia a visitantes y turistas mantienen información reciente sobre la presencia de sargazo en las distintas playas, tal como el sitio [sargassum monitoring http://sargassumonitoring.com/](http://sargassumonitoring.com/) con un número importante de sitios de seguimiento, el cual despliega fotografías de voluntarios, indicando las fechas como la que se muestra para Puerto Morelos (Figura 3).

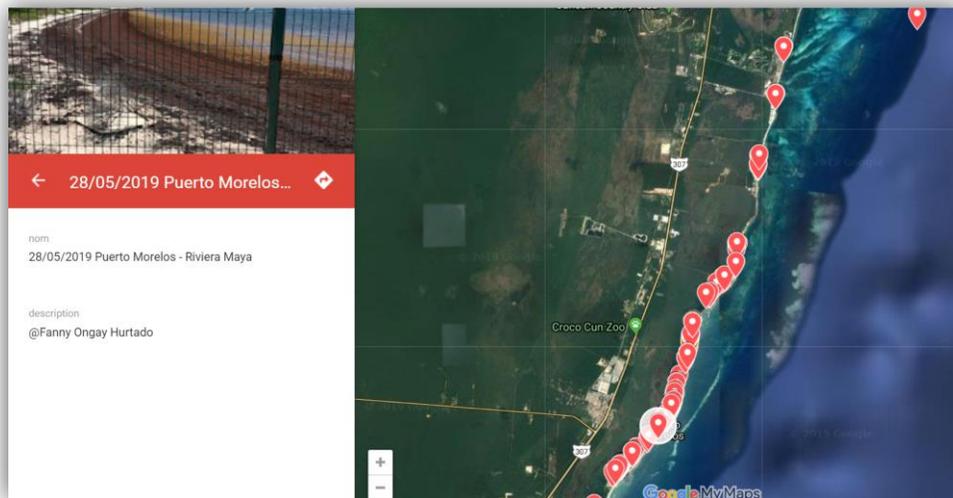


Figura 3. Sitios de seguimiento



1.3. Evaluación de impactos

El arribo de sargazo está teniendo impactos significativos sobre los recursos acuáticos, las pesquerías, líneas de costa, cursos de agua y turismo en más de 17 países del Caribe.

En México el arribo de sargazo no es generalizado en todas las costas, ni se presenta todos los días ni en todas las playas, así que pueden consultarse los reportes de las playas que se encuentran libres de sargazo, aunque en algunas ha persistido por su volumen y retiro como es Puerto Morelos.

Las afectaciones potenciales al turismo son de gran magnitud ya que el caribe mexicano es un destino internacional que cuenta con más de 1,075 hoteles y 102,890 cuartos de hotel en todo Quintana Roo, además de grandes parques temáticos, diversas opciones de entretenimiento y 13 zonas arqueológicas abiertas al público, entre otros atractivos. Conjuntamente con la iniciativa privada, genera alrededor de 400,000 empleos.

Sin embargo a la fecha se ha reportado un crecimiento de visitantes de 1.8% a Cancún y de 5 al 15% a Cozumel con respecto al primer trimestre de 2018, incluyendo alzas en la ocupación hotelera.

Por primera vez se estimó que el daño económico generado en 2018 por el alga ascendió a más de 5 mil 286 millones de pesos, según un informe de la Comisión Presidencial para la Atención al Arribo del Sargazo en el Caribe Mexicano. <https://www.milenio.com/negocios/calculan-caida-30-llegada-turistas-cancun> (01/07/2019).

van Tussenbroeka et al 2017, han denominado a las aguas de color marrón oscuro que resultan de la descomposición del sargazo en las playas Sbt (Sargassum-brown-tides) y han descrito sus efectos como: la reducción de la luz, oxígeno (hipoxia o anoxia) y pH, además han estimado el flujo mensual de nitrógeno, y fósforo (entre 2014 y 2015) por la deriva Sargassum spp en 6150 y 61 kg km⁻¹ respectivamente, por lo que concluyen en un efecto de eutrofización cerca de la costa con repercusiones sobre otras algas marinas como *Thalassia testudinum* y algas rizofíticas y algas a la deriva y/o epifitas, que representaron una pérdida del 61.6-99.5% de biomasa del lecho marino. Por su parte, los corales cercanos a la costa sufrieron mortalidad total o parcial. Las recuperaciones de estos sistemas afectados estiman que se puede llevar años o incluso décadas, o los cambios podrían ser permanentes si continua el arribo masivo de Sargassum spp.

La cantidad de sargazo que se ha acumulado en las playas ha sido de gran impacto para turistas, lugareños, gobierno, científicos, prensa, etc., no se había observado un arribo de tales proporciones, por lo que la primera reacción fue eliminarlo, pero rápidamente se reconoció como tarea titánica, además de que debido a la fragilidad del ambiente costero, debería hacerse a mano. Sin poderlo abatir por el constante arribo.

Además de que la marea café que se provoca por su degradación (Sbt Sargassum-Brown tides) tiene grandes efectos en la calidad del agua. Entre estos, altas cargas agudas de material orgánico, mayor turbidez, que reduce la transparencia. Se han comparado datos en cuatro puntos de monitoreo y los efectos han sido distintos (van Tussenbroek et al. 2017). Después de Sbt, el contenido de materia orgánica de los sedimentos ha aumentado entre 15 y 35 veces, la concentración de oxígeno varió de 0,67 a 7.05 mg/L con las concentraciones más bajas cerca de la costa y más altas en puntos alejados. Así como también varió el N en el tejido de los pastos. El pH varió de 6.9 to 9.1 y Redox de -398 to 151, distinguiéndose tres zonas, incluida la de sin efecto de la Sbt.



1.4. Acciones que se han realizado en la zona

Durante 2014 a 2015 se establecieron comités en los cuales participaron instancias gubernamentales, científicas y empresariales. Se elaboraron reglamentos para remover el sargazo de playas y aguas litorales. El gobierno federal asignó 60 millones de pesos para contrarrestar el impacto, y se contrataron maquinaria y 4,404 empleados para remover el sargazo. A pesar de estos esfuerzos, el alto volumen que recaló superó la capacidad de remoción. La remoción de sargazo, además, causó daños al medio ambiente porque las reglas para removerlo, transportarlo y disponer de él no siempre se respetaron y la vigilancia fue insuficiente. La mayor parte del sargazo fue tratado como basura, aunque algunas personas locales establecieron iniciativas privadas para procesar el sargazo como fertilizante complementario. La respuesta para enfrentar el evento fue insuficiente debido a la carencia de un programa robusto de monitoreo que permitiera obtener indicadores estadísticamente confiables para estimar y mitigar el impacto de la afluencia masiva de sargazo para la industria turística, así como para la salud de los ecosistemas y del hombre.

La SEMA Secretaría de Medio Ambiente, creó la Comisión Técnica-Científica del estado de Quintana Roo, en julio de 2015 para atender los problemas originados por el arribazón masiva de sargazo, revisar propuestas sobre tecnologías para contener, limpiar, transportar, disponer y usar el sargazo, así como propuestas de reglamentos.

Además, se creó un grupo nacional inter-institucional para compartir conocimiento sobre el evento atípico de la llegada masiva de sargazo y discutir sobre acciones para reducir su impacto ecológico y económico. El grupo incluyó a científicos de varias universidades (Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Politécnico Nacional, El Colegio de la Frontera Sur), institutos (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), instancias gubernamentales (Secretarías de Marina, de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Agricultura y Desarrollo Rural, de Turismo, de Comunicaciones y Transportes, de Medio Ambiente del estado de Quintana Roo, Procuraduría Federal de Protección al Ambiente) y comisiones (de Áreas Naturales Protegidas, Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Nacional de Acuicultura y Pesca), Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris), Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura (Conapesca) Conacyt, Comisión de Protección Civil, la Comisión Nacional de Investigación Oceanográfica y Gobierno del Estado de Quintana Roo.

El Plan de Acción de este grupo presentado en febrero de 2019, contempla medidas a corto, mediano y largo plazo. Contiene nueve ejes estratégicos, de los cuales, cuatro se enfocan a la atención inmediata del problema: 1) detección; 2) contención; 3) colecta y 4) monitoreo.

En lo que respecta a la detección, un grupo integrado por IMTA, Conagua, INECC, Conanp, Conabio, Agencia Espacial Mexicana e instituciones académicas, trabaja en la implementación de un sistema de observación en tiempo real apoyado en mejores herramientas tecnológicas. Esto permitirá conocer la trayectoria de las macroalgas a través de un indicador potencial de arribo de sargazo (IPAS) y tener mayor precisión de dónde están los riesgos de que llegue a las costas, lo que ayudará a la toma de decisiones informada y para su colecta previa a su arribo a las costas.

El segundo eje se refiere a la contención de manera preventiva en altamar y en áreas cercanas a las costas mediante buques, barcazas y barreras con capacidad probada. Se trata de evitar que el sargazo llegue a la playa,



ya que está ocasionado severos estragos en las costas, daños a los sitios de anidación de tortugas, generación de lixiviados y acumulación excesiva de nutrientes, entre otros.

El tercer eje es la colecta en playa, transporte y disposición final y/o aprovechamiento sustentable; y el cuarto se enfoca al monitoreo de la calidad del agua costera y del aire.

Los cinco ejes restantes de mediano y largo plazo son: 5) impactos sociales y económicos; 6) manejo y aprovechamiento sustentable; 7) restauración; 8) investigación, desarrollo tecnológico y planeación territorial; y 9) relación internacional y transfronteriza.

Finalmente, el Grupo Interinstitucional dará seguimiento al análisis y retroalimentación del Plan de Acción en sus particularidades, a fin de contar con un documento que permitirá dar atención integral al arribo de sargazo, ya que se trata de un fenómeno que se seguirá presentando de forma recurrente en el Caribe Mexicano.

Por su parte, la Dirección General de Vida Silvestre de la SEMARNAT, elaboró en 2015 dos reglamentos: uno para remover el sargazo de la orilla del mar y otro de la playa. En las áreas naturales protegidas se prohibió el uso de maquinaria para remover el sargazo de las playas; sin embargo, dado que la remoción manual era imposible debido al alto volumen del sargazo, la regla no fue respetada, resultando en la erosión y compactación de varias playas, con consecuencias nocivas para la anidación de tortugas. La autoridad también asignó sitios dentro de los diferentes municipios para la disposición final del sargazo. Desafortunadamente, la falta de vigilancia resultó en que el sargazo se depositara en muchas ocasiones en otros sitios.

Durante Conferencia de alerta temprana para multiamenazas llevada a cabo en Cancún, México, en mayo de 2017, investigadores de Trinidad y Tobago presentaron su Sistema de Alerta Temprana Sargazo del Servicio Meteorológico de Trinidad y Tobago comprende tres áreas principales; Detección, análisis de trayectoria y participación. El primer componente utiliza los datos satelitales de la banda X de MODIS para identificar placas importantes de Sargazo que luego se envían a un sistema de análisis de trayectoria con el objetivo de proporcionar un pronóstico de cinco días de la deriva esperada de Sargazo. Dada la confianza en la información derivada del satélite y sus limitaciones en presencia de la nube, los usuarios también pueden contribuir y crear informes de avistamientos que luego pueden complementar el sistema de alerta temprana. Este Geoportal basado en la web ha sido probado como un medio para alertar a los pescadores sobre el peligro de las algas marinas y sus impactos en sus redes y seguridad, y ha tenido éxito en las contribuciones de los buques que operan en alta mar en la plataforma de Guayana. A través de un lanzamiento formal, se espera que este sistema se pueda adoptar a escala regional y proporcione la orientación necesaria para minimizar el impacto de las algas Sargazo en la economía del Caribe.

El sargazo se ha utilizado como fertilizante de jardines y campos de golf por algunas compañías pequeñas y hoteles. Las algas marinas por lo general no contienen nitrógeno y fósforo en cantidades suficientes como para ser usadas como fertilizantes, pero contienen minerales traza y hormonas que estimulan el crecimiento, florecencia y germinación de las semillas en plantas, e incrementan la resistencia de éstas a las enfermedades (Zodape 2001). Aunque el sargazo, como todas las algas cafés, contiene alginatos como constituyentes de la pared celular, no está presente en cantidad, ni en calidad, suficiente para su extracción comercial para ser utilizados como estabilizadores o emulsificadores de alimentos y de la industria textil, aunque puede servir para remover metales pesados tóxicos de aguas contaminadas (Davis et al. 2003). El sargazo también tiene usos potenciales para elaborar suplementos alimenticios para ganado, caballos, ovejas y posiblemente el humano (Holdt and Kraan 2011). En gran volumen, el sargazo también puede usarse para producir biogás, como metano (Yokoyama et al. 2007) y podría servir para la industria bioquímica. En todos estos casos, sin embargo, el sargazo tendría que ser colectado antes de mezclarse con arena.



Por otro lado, para desarrollar una estrategia de manejo integral de sargazo en el estado de Quintana Roo, el gobierno federal financió a una organización no gubernamental local (Centro de Innovación e Investigación para el Desarrollo Sustentable A. C.) con quince millones de pesos para desarrollar un programa piloto que sería implementado dentro del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. El programa incluye la construcción e instalación de una barrera de tres kilómetros para impedir que el sargazo llegue a la playa, la construcción de dos catamaranes, con una pala al frente, con capacidad para remover 3.5 y 10 m³ de sargazo respectivamente, la compra de dos bandas para transportar el alga de la playa a camiones y un tractor que arrastra una máquina para remover el sargazo que no haya sido retenido por las barreras y alcanzara a llegar a la playa. El estudio piloto, sin embargo, no ha sido implementado porque, para cuando el equipo se compró, la afluencia masiva de sargazo se detuvo.

En 2018, más de 17,000 habitantes participaron de manera voluntaria en la labor de recolección de sargazo y, bajo la coordinación de la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente, fueron retirados 528,000 toneladas de sargazo de playas y zonas costeras en siete municipios. Además, se colocaron 27 kilómetros de barreras antisargazo en varios municipios. En total se invirtieron 240 millones de pesos, de los cuales, el Gobierno Federal apoyó con 62 millones de pesos del Fondo de Desastres Naturales (Fonden).

A pesar de la presencia de sargazo en algunas de las costas de Quintana Roo, en 2018, la entidad recibió más de 20 millones 320,000 visitantes, de los cuales, 14 millones 279,000 corresponden a turistas, un crecimiento de 5.5% respecto del 2017.

Quintana Roo registró 6 millones 764,898 pasajeros de crucero de acuerdo con la Unidad de Política Migratoria de la Secretaría de Gobernación.

En enero de 2019, México en su calidad de presidente de la Comisión Interamericana de Turismo de la Organización de Estados Americanos (OEA) convocaron a una reunión internacional para analizar y acordar, de manera conjunta, las acciones que lleven a una solución al problema que representa la creciente presencia de sargazo en playas de varios países que forman parte de la cuenca del Mar Caribe.

Actualmente, la Secretaría de Marina-Armada de México implementó a partir del 16 de mayo lanzó la "Operación Sargazo 2019", desplegando diferentes tipos de barrera de contención y redes. En dos días recolectaron 10 toneladas de este material entre Punta Cancún y Punta Nizuc, Puerto Morelos, Playa del Carmen, Puerto Aventuras y Tulum. También se realiza una inspección al Sargazo para aplicar el procedimiento de acuerdo a la norma 059 de SEMARNAT y con esto verificar presencia de peces y moluscos.

También se inició la manufactura de una banda transportadora para la recolección, para su almacenaje en costales o contenedores, con material de reaprovechamiento. Otra de las acciones para contener este fenómeno ha sido dar conferencias al personal que participa en esas funciones por parte de biólogos de la dependencia, con la finalidad de que sepan las características, origen e impacto, así como las medidas de seguridad para su manipulación. Además, se realizan sobrevuelos con un helicóptero tipo Panther con el fin de reconocer y recabar información sobre las áreas con mayor afectación por este fenómeno (Noticias de la Industria Turística Mayo 19, 2019). <https://www.nitu.mx/index.php/2019/05/19/recolectan-en-playas-del-caribe-mexicano-10-toneladas-de-sargazo/>

A partir de junio de 2019 se asignó a la Secretaría de Marina (SEMAR) la coordinación en la estrategia de atención del sargazo y habrá acciones de los tres niveles de gobierno.



A nivel estatal se cuenta con el Protocolo Emergente para la Atención del Sargazo, se invierten recursos en las 9 zonas y dos islas, en las que se acordó dividir el litoral costero: Mahahual-Xcalak, Tulum, Akumal-Puerto Aventuras, Puerto Aventuras-Hard Rock, Playacar, zona entre muelles Playa del Carmen, muelle Ultramar- Punta Maroma, Punta Nizuc-Punta Cancún, Puerto Morelos, Cozumel e Isla Mujeres.

Este Protocolo busca evitar la llegada del sargazo a la playa, mantener limpias las playas y darle un uso sustentable al sargazo al recolectarlo para ser aprovechado en productos sustentables.

Los hoteleros y concesionarios de zonas de playa reciben la información del protocolo estatal, a fin de articular de manera conjunta estrategias para la contención de sargazo, desde barreras de contención cercanas a la playa y todo lo que represente la recolección y disposición final de la macroalga.

En próximas fechas se tendrán instaladas una gran cantidad de barreras de contención con sistemas de limpieza permanente y se llevará a cabo la contención en aguas someras. A esto se suma la limpieza en playas durante las 24 horas del día en las que participan servidores públicos y trabajadores temporales, pescadores y voluntarios.

El 27 de junio se llevó a cabo en el hotel Moon Palace, Cancún, el Encuentro de Alto Nivel para la Atención del Sargazo en el Gran Caribe, cuyo objetivo es desarrollar una agenda de cooperación regional para el Gran Caribe en torno a la contención y control del arribo de sargazo y la mitigación de sus efectos socio ambientales.

En estos últimos tiempos, se han desarrollado nuevos usos para el sargazo recolectado de las playas– por ejemplo bio-combustible, fertilizante y alimento de ganado o alimento para peces.

La secretaria de Turismo de Quintana Roo, el 25 de junio de 2019 señaló que “Es un tema que urge seguir atendiendo” y que el presidente EPN gastó 800 mdp para combatir sargazo, sin resultados positivos. Por otro lado Semar señaló que “son arribos atípicos de sargazo. Indicó que hay una gran capacidad en el estado para su recolección”. “Nos parece que es un tema muy grave. Van a colocar barreras de contención”, destacó la secretaria de Turismo de Quintana Roo. Nota de MVS Noticias: <https://mvsnoticias.com/podcasts/mesa-para-todos/sargazo-un-tema-muy-grave-secretaria-de-turismo-de-quintana-roo/>

2. METODOLOGÍA

El Protocolo Emergente para la Atención del Sargazo, divide el litoral costero en 9 zonas y dos islas, que son: 1) Mahahual-Xcalak, 2) Tulum, 3) Akumal-Puerto Aventuras, 4) Puerto Aventuras-Hard Rock, 5) Playacar, 6) zona entre muelles Playa del Carmen, 7) muelle Ultramar- Punta Maroma, 8) Punta Nizuc-Punta Cancún, 9) Puerto Morelos, Cozumel e Isla Mujeres; de estas 9 zonas se seleccionaron para llevar a cabo el proyecto y realizar el monitoreo de agua y sargazo las siguientes:

Mahahual-Xcalak, Tulum, Playa del Carmen, Puerto Morelos y Punta Nizuc-Punta Cancún (Figura 4).

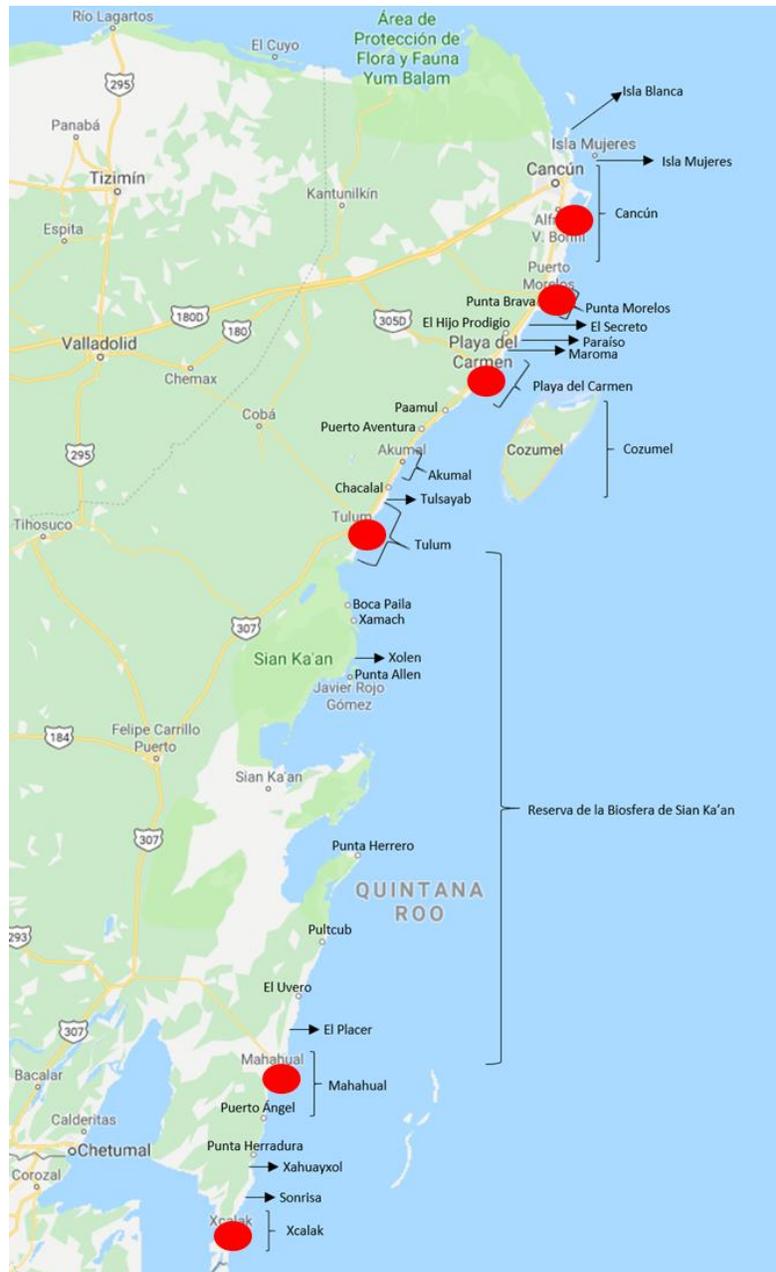


Figura 4. Ubicación de las estaciones de monitoreo de agua y sargazo en las playas (círculos rojos).

El proceso de muestreo comprende la realización de la visita previa, la elaboración del plan de muestreo, la medición de parámetros de calidad del agua en campo, la recolección de las muestras, su conservación, preservación, embalaje, transporte y entrega al laboratorio para su posterior análisis de los parámetros seleccionados.

Es importante mencionar que existe la norma NMX-AA-014-1980 cuerpos receptores. – muestreo, que establece los lineamientos generales y recomendaciones para el muestreo en cuerpos receptores de aguas superficiales, con el fin de determinar sus características físicas, químicas y bacteriológicas.



El muestreo fue realizado por personal del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) acreditado ante la entidad mexicana de acreditación, a.c. (ema) con No. AG-177-032/09, y aprobación por CONAGUA con número CNA-GCA-1928, en cumplimiento de los requisitos de la Norma ISO/IEC 17025:2017, significa que el laboratorio y su personal cumple tanto los requisitos de competencia técnica como los requisitos del sistema de gestión necesarios para que pueda entregar de forma consistente resultados de ensayos y calibraciones técnicamente válidas. Los análisis de los parámetros de calidad del agua fueron realizados por el Laboratorio Intertek + ABC Analytic química investigación y análisis, S.A. de C.V. No. de Acreditación: AG-188-051/11.

Todo programa de muestreo conlleva una serie de actividades que deben ser debidamente documentadas, vigiladas y evidenciadas. Las actividades van desde la preparación de material y preservadores, calibración de equipo, procedimiento de muestreo, así como la identificación, manejo, transporte y entrega de muestras.

2.1. Preparación de material

Existen condiciones particulares para cada uno de los contenedores, esto va de acuerdo a las características fisicoquímicas de los parámetros a muestrear, debido a esta naturaleza se utilizan contenedores de diferente material y en algunos casos se adicionan preservadores con el objetivo de mantener las condiciones iniciales de las muestras de cada uno de los parámetros. En la tabla 1, se muestra los parámetros que se analizaron, así como el tipo de contenedor usado y su preservación.

Tabla 1. Tipo de contenedor y preservación por parámetro para su análisis.

Parámetro	Tipo de contenedor	Volumen (mL.)	Preservación
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Plástico	250 mL.	Hielo a 4°C ± 2°C
Fosfato total	Plástico	2000 mL.	Hielo a 4°C ± 2°C
Fosfato orto			
Fósforo reactivo			
Fósforo orgánico			
Nitrógeno de nitratos			
Nitrógeno de nitritos			
Fosforo inorgánico	Plástico	250 mL.	H ₂ SO ₄ , 4°C
Nitrógeno orgánico	Plástico	500 mL.	H ₂ SO ₄ , 4°C ± 2°C
Nitrógeno amoniacal			
Nitrógeno total			
Sólidos suspendidos totales	Plástico	500 mL.	Hielo a 4°C ± 2°C
Turbiedad	Plástico	250 mL.	Hielo a 4°C ± 2°C
Clorofila a	V. ámbar	1000 mL.	Hielo a 4°C ± 2°C
Coliformes fecales	Bolsa estéril	250 mL	Hielo a 4°C ± 2°C
Enterococos fecales	Bolsa estéril	250 mL	Hielo a 4°C ± 2°C
Barrido de compuestos orgánicos	V. ámbar	1000 mL.	Hielo a 4°C ± 2°C
Sargazo fresco y en descomposición	Bolsas de plástico	3 kg	Hielo a 4°C ± 2°C
Metales (As, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn)	Plástico	1000 mL	HNO ₃ , 4°C ± 2°C

Los volúmenes y tipo de contenedor están en función de los requerimientos del laboratorio que realizara los análisis. Para ello se debe seguir los procedimientos del Sistema de Gestión de Calidad que el laboratorio tenga implementado.

2.2. Equipo

Los equipos para la medición de parámetros de calidad del agua en campo se calibraron y verificaron previamente, conforme a las recomendaciones del fabricante. En cada uno de los sitios se verificó el buen funcionamiento de los equipos, así como su calibración en caso necesario.

Para la medición de los parámetros de campo de este estudio se utilizó un multiparamétrico con compensador de temperatura con las características descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del equipo EXO 2 para la medición en campo.

EXO2 SONDA MULTIPARAMÉTRICA	INTERVALO DE MEDICIÓN	PRECISIÓN
	Temperatura (C°) -5 a 50	± 0,05 ° C
	Conductividad (mS/cm) 0 a 200	± 0,5 %
	Salinidad (ppt) 0 a 70	± 1,0 %
	pH 0.00 – 14.00	±0.02
	Sólidos Disueltos Totales (SDT) (ppt) 0.0 a 10.00	±1
	Clorofila “a” 0 a 400 mg/L Chl	Linealidad: R ² > 0,999 para la dilución en serie de la solución de rodamina WT.
	Algas verde – azules 0 a 100 g/L	
	Presión barométrica 375 a 825 mm Hg	± 1,5 mm Hg de 0 a 50 ° C
	El oxígeno disuelto, la saturación del aire % (0 a 500%)	± 1%
	El oxígeno disuelto (0 a 50 mg/L)	± 0,1 mg/L
	ORP (-999 a 999 mV)	±20 mV del estándar REDOX
	FDOM 0 a 300 ppb equivalentes de sulfato de quinina (QSU)	Linealidad: R ² > 0,999 para la dilución en serie de 300 ppb QS solución

2.3. Procedimiento para Toma de Muestra

2.3.1. Enjuague de recipientes y material auxiliar de muestreo

Previo a la recolección de la muestra, los recipientes de muestreo y el material auxiliar de muestreo que se utiliza, deben ser enjuagados de dos a tres veces con el agua de mar, solo para aquellos parámetros que aplique. Para el enjuague de los recipientes de muestreo estos se llenan a un tercio de su volumen, se tapan, se agitan suavemente, se destapan y el agua de mar se vierte en dirección hacia la playa para evitar que interfiera con punto de recolección de la muestra.

2.3.2. Recolección de la muestra

El punto de recolección de la muestra se ubica con la lancha a contracorriente de la marea, y una vez localizado el tapete de sargazo que todavía no llega a la playa se procede a tomar las muestras de agua, así como del sargazo, éste último se colecta en una charola y se procede a transferirlo en la bolsa de plástico para realizar el peso del sargazo colectado (Figura 5).



Figura 5. Recolección de sargazo en charola y pesado en Puerto Morelos (agosto, 2019)

La recolección de la muestra se realizó de forma directa a 20 cm del espejo del agua, con el recipiente de muestreo en la mano, desde la embarcación.

Se trató siempre de que la embarcación estuviera estacionada en el punto de muestreo y la recolección de la muestra siempre se realizó en la proa, para evitar posible contaminación por el motor de la embarcación.

La recolección en la playa en donde el sargazo ya está en descomposición se obtuvo en algunos casos de los montículos en donde era acumulado por personal de limpieza o directo de la playa (Figura 6).



Figura 6. Recolecta de agua y sargazo en la playa de Punta Nizuc (noviembre, 2019)

2.4. Conservación y preservación de las muestras

Durante la recolecta de las muestras, conforme se fueron llenando cada uno de los recipientes, éstos se colocaron en la hielera, la cual previamente contiene el hielo suficiente para conservar las muestras a una temperatura de $4\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Una vez terminada la recolecta de las muestras se procede a preservar aquellas que lo requieran Figura 7.

En aquellas muestras donde la preservación se hizo con disoluciones ácidas o básicas, se verificó que la muestra haya alcanzado el pH indicado por lo general pH menor a 2.



Figura 7. Manejo de las muestras para su almacenamiento y transporte.

2.5. Identificación y Control de Muestras

Para la identificación de las muestras, los contenedores fueron etiquetados con la fecha de muestreo, hora, nombre del muestreador, parámetro a analizar, preservación de la muestra e identificación de la misma (Figura 8).



Figura 8. Identificación y control de las muestras.

2.6. Embalaje, transporte y almacenamiento de muestras

Para el envío de las muestras al laboratorio, fueron embaladas adecuadamente en las hieleras, de tal forma que se evite que los recipientes sufran ruptura o fugas que provoquen la pérdida de las muestras y/o su contaminación. Así mismo, las muestras contenidas en la hielera se acompañaron con geles para conservar a $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta su entrega.

El transporte de las muestras del sitio de muestreo al laboratorio fue vía aérea, ya que fueron considerados los tiempos máximos de conservación de las muestras para que éstas no rebasen el tiempo límite para su medición.

2.7. Determinación de la especie de sargazo

Para la determinación de las especies de Sargassum se realizó lo siguiente:

1.- En playas de Quinta Roo, se establecieron 9 puntos de muestreo. La colecta de las plantas fue realizada mar adentro, a una distancia de 500 m de la playa, En cada punto se tomaron tres muestras de plantas: una a la derecha, otra a la izquierda y otra al frente de la lancha. Nota: Cada muestra contenía por lo menos 3 manojos de plantas. Los manojos colectados deberían de presentar dimensiones similares y contener zonas apicales y zonas maduras. Cada manojito fue colocado en recipientes de plástico a los cuales se les colocó un poco de agua de mar y se sellaron herméticamente. Cada contenedor fue etiquetado con el número de sitio de colecta y coordenadas geográficas. Para su traslado al IMTA, los contenedores fueron colocados en hieleras con refrigerantes.

2.- Cada contenedor fue inspeccionado inmediatamente que llegó al IMTA. Para esto se observó al microscopio cada planta colectada. Se tomaron fotografías de cada parte de la planta y con éstas se procedió a diferenciar cada especie. La ubicación taxonómica fue realizada de acuerdo a Taylor (1960), Schneider y Searles (1991), Littler y Littler (2000), Dawes y Mathieson (2008), Maria Teresa et al., (2012).

2.8. Aislamiento, selección e identificación de enterobacterias y Medición de gas metano y ácido sulfhídrico.

La metodología detallada de la actividad y análisis de resultados obtenidos para el aislamiento de enterobacterias en el sargazo en descomposición y las mediciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) se presentan a detalle en el ANEXO 1.

3. RESULTADOS

Es importante especificar antes del análisis de los resultados que en el mes de agosto el sargazo era abundante y llegaba a las playas en donde trabajadores de los municipios hacían la limpieza de las mismas y un camión lo recolectaba. En otros casos se encontraban sargaceras en el mar para disminuir el arribazón del sargazo hacia la playa (Playa del Carmen), o se encontraban bandas cerca del mar para recolectar y disponerlo en camiones (Puerto Morelos y Tulum).

Para evitar que el sargazo llegara a la playa se colocaron barreras fijas en la zona turística de Puerto Morelos y Playa del Carmen, mientras que en Mahahual se colocaron barreras hechas por los proveedores turísticos (pescadores, restaurants, etc.) (Figura 9).



Figura 9. Barrera en Puerto Morelos (izquierda) y Mahahual (derecha).

El muestreo en agosto que realizamos se conformó por dos brigadas: 1) en lancha se trasladó a la zona en donde el sargazo fresco todavía no llegaba a la playa y se recolectaron muestras de agua y sargazo; 2) en la playa en donde el sargazo ya estaba en descomposición y acumulado, se tomaron muestras del sargazo en descomposición y para el muestreo de agua, en la zona de playa cercana al sargazo en descomposición en donde se observaba la marea marrón y el olor a descomposición era característico.

En el muestreo de noviembre las condiciones cambiaron drásticamente y el sargazo disminuyó considerablemente, ya que se observaba muy poca macroalga en la playa, la cual fue colectada, y en el mar no se observaron tapetes de sargazo, por lo que las muestras de agua se recolectaron en la playa.



3.1. Resultados campo de Agosto (2019).

Las claves y nombre de las estaciones de monitoreo se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Nombre de la estación y clave que se utilizará para los resultados de campo.

ESTACIÓN	CLAVE AGOSTO
Xcalak mar	XS1
Xcalak-descomposición-cerca playa	XSD1
Mahahual mar	MS
Mahahual sargazo descomposición	MSD1
Tulum mar	TS4
Tulum-orilla playa sargazo descomposición	TDS2
Tulum-orilla playa sargazo descomposición acumulado	TDS1
Playa del Carme-mar	PCS3
Playa del Carme-mar	PCS4
Playa del Carmen- sargazo descomposición acumulado	PCSD1
Playa del Carmen-orilla playa sargazo descomposición	PCSD2
Puerto Morelos-mar	PMS3
Puerto Morelos-mar (confinado barreras)	PMS4
Puerto Morelos-orilla playa	PMSD1
Playa Cancún-playa delfines izquierda	CSD1
Playa Cancún-playa delfines centro	CSD2

La estadística descriptiva de los datos obtenidos de las mediciones de los parámetros de campo (temperatura T; potencial de hidrógeno pH; salinidad S%; oxígeno disuelto OD; potencial redox ORP y turbidez Tur) de todas las estaciones de muestreo se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Estadística descriptiva de los parámetros de campo y sus unidades de medición. (agosto, 2019)

Estadística	Mínimo	Máximo	1st Quartile (25)	Mediana	3rd Quartile (75)	Promedio (50)	Desviación Estandar
T°C	28.340	34.860	30.700	31.480	32.620	31.567	1.644
pH	6.870	8.200	7.815	7.900	7.990	7.793	0.385
S ‰	30.180	37.340	34.805	36.540	36.920	35.409	2.166
OD mg/L	0.520	9.940	5.255	5.830	6.140	5.681	1.985
ORP mV	102.400	228.800	165.100	188.100	213.100	184.020	38.078

La temperatura del agua osciló de 28.34 hasta 34.86°C con promedio de 31.56, presentándose el mínimo en Xcalak (XS1) y la máxima en la zona de descomposición de Mahahual (MSD1), el pH con un intervalo de 6.87 a 8.2 y un promedio de 7.793, se detectó el mínimo en MSD1 y el máximo en Mahahual mar (MS). La concentración mínima y máxima de oxígeno disuelto se determinaron en las mismas estaciones que el pH con valores de 0.52 mg/l a 9.94 mg/L y un promedio de 5.681 mg/L, siendo la zona de descomposición en Mahahual en donde el OD estuvo en condiciones anóxicas. El potencial Redox presentó valores de 102.4 mV hasta 228.8 mV en las estaciones Xcalak con sargazo en descomposición (XSD1) la mínima y en playa delfines (CSD1) la máxima. La salinidad osciló de 30.18 ‰ en Playa del Carmen con sargazo en descomposición acumulado (PCSD2), hasta 37.34 ‰ en Xcalak mar (XS1) y un promedio de 35.409 ‰. La figura 10 presenta los parámetros descritos.

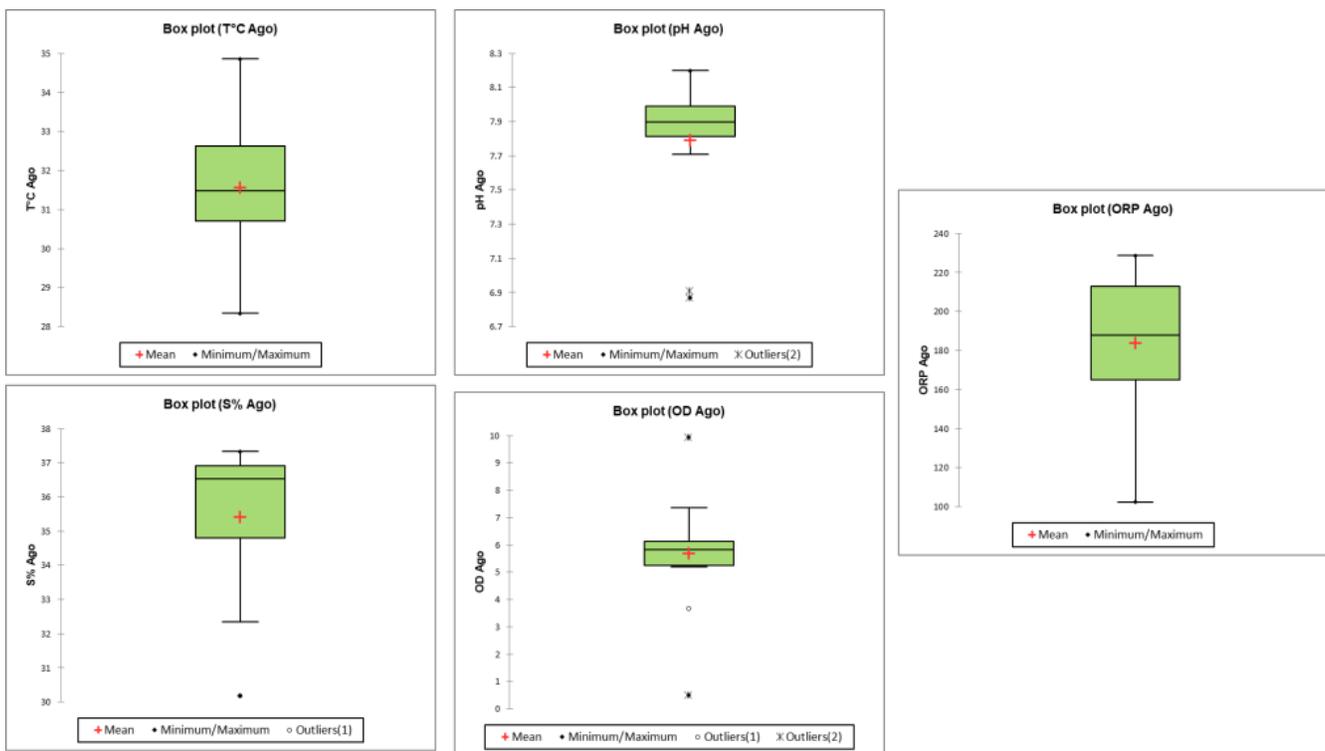


Figura 10. Parámetros de campo que representan los valores mínimos, máximos y promedio de las mediciones realizadas en agosto, 2019.

3.2. Resultados campo de Noviembre (2019).

En noviembre el sargazo disminuyó considerablemente en las playas y en el mar, por lo que disminuyó también en número de estaciones de muestreo, coincidiendo algunas estaciones e incrementando nuevas estaciones, como las de Punta Nizuc que por comunicación personal la Dra. Brigit van Tussenbroek nos informó que había sargazo en descomposición, las claves y nombre de las estaciones se presenta en la tabla 5.

Los análisis estadísticos de todos los datos para los parámetros de campo determinados se presentan en la tabla 6.



Tabla 5. Nombre y clave de las estaciones de muestreo en noviembre, 2019.

ESTACIÓN	CLAVE
Xcalak mar	XS1
Xcalak-descomposición-cerca playa	XSD1
Mahahual mar	MS
Mahahual sargazo descomposición	MSD1
Tulum mar	TS4
Playa del Carme-mar	PCS3
Playa del Carmen-orilla playa sargazo descomposición	PCSD2
Puerto Morelos-mar	PMS3
Puerto Morelos-orilla playa	PMSD1
Punta Nizuc-orilla playa (café marrón)	PNSD1
Punta Nizuc-orilla playa(café medio claro)	PNSD2
Punta Nizuc-mar (azul claro)	PNSD3

Tabla 6. Estadística descriptiva de los parámetros de campo y sus unidades de medición. (noviembre, 2019)

	Mínimo	Máximo	1st Quartile (25)	Mediana	3rd Quartile (75)	Promedio (50)	Desviación estándar
T°C	28.750	32.480	29.490	29.900	30.923	30.157	1.051
pH	7.350	8.280	7.765	7.985	8.003	7.888	0.256
S‰	30.310	37.270	35.003	36.240	36.498	35.328	2.039
OD mg/L	1.290	8.010	4.998	6.190	6.378	5.566	1.795
ORP mV	-220.000	431.000	96.475	177.650	310.750	178.225	197.639

La temperatura del agua en el mes de noviembre estuvo en un intervalo de 28.75°C como mínima en la estación Puerto Morelos mar (PMS3) hasta 32.48°C en Mahahual sargazo descomposición (MSD1) y un promedio de 30.157°C. El potencial de hidrógeno osciló de 7.35 hasta 8.28, registrándose el mínimo en la estación Punta Nizuc-orilla playa (PNSD1) y el máximo en Mahahual mar (MS) con un promedio de 7.888. La salinidad mínimo fue de 30.310‰ en (PNSD1) y la máxima de 37.27 en Puerto Morelos-mar (PMS3). Por lo que respecta al oxígeno disuelto, la mínima concentración fue de 1.29 mg/L en PNSD1 y la máxima de 8.01 mg/L en MS con un promedio de 5.566 mg/L. El potencial redox (ORP) osciló de -220 mV en PNSD1 y la máxima de 431 mV en Playa del Carmen (PCSD2) con un promedio de 178.22 mV. En la estación de Punta Nizuc PNSD1 fue en donde se presentaron los mínimos valores para temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y potencial redox, atribuibles a la descomposición del sargazo en la zona de playa y en donde el olor y color fue característico de la marea marrón.

En la figura 11 se presentan los parámetros descritos.

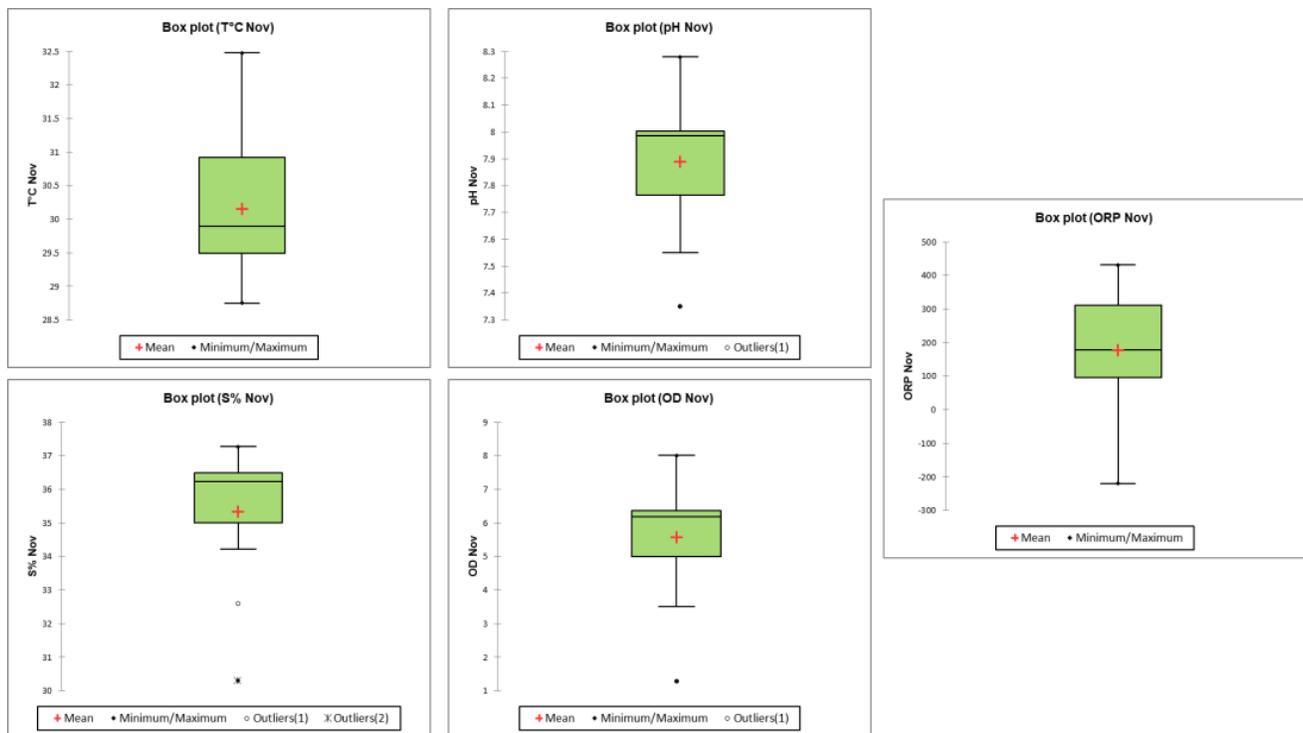


Figura 11. Parámetros de campo que representan los valores mínimos, máximos y promedio de las mediciones realizadas en noviembre, 2019.

La comparación de los parámetros de campo medidos en agosto y noviembre indicaron una ligera disminución en noviembre para temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y potencial redox de 1.41°C, 0.081‰, 0.115 mg/L y 5.79 mV, respectivamente, solo el pH incremento en 0.095 unidades, cambios que probablemente se presenten cada temporada y que sería conveniente dar seguimiento para tener un mejor conocimiento espacio-temporal en las playas evaluadas.

Por otro lado, en Playa Nizuc las estaciones ubicadas en noviembre presentaron sargazo en un estado de descomposición avanzado y fue posible determinar los parámetros de campo, ya que las condiciones de la playa lo permitieron, esto es, poca marea y movimiento del agua; por lo que se ubicaron tres estaciones: una en donde estaba el sargazo acumulado y el color del agua era marrón (PNSD1), la segunda a 5 metros de distancia de la primera en donde el color del agua era café clara (PNSD2) y la tercera a 10 metros de la primera en donde el color del agua era azul claro y se podía ver el fondo (PNSD3) (Figura 12).

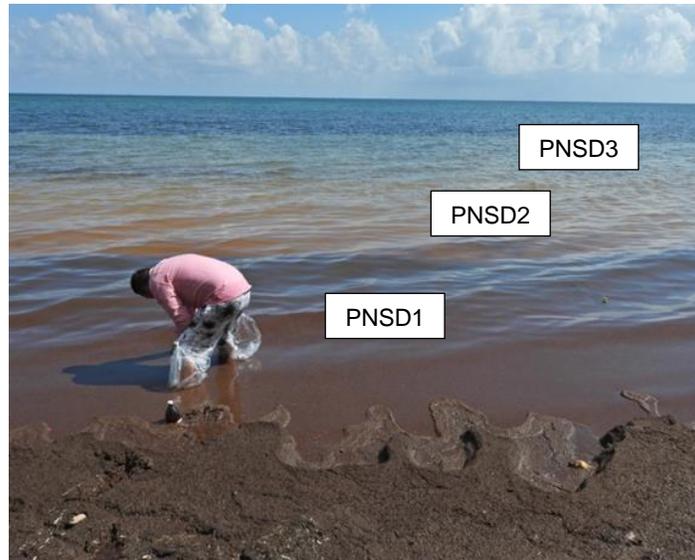


Figura 12. Ubicación de las estaciones de muestreo en Punta Nizuc.

Los resultados de temperatura, pH, salinidad, oxígeno disuelto y potencial redox (ORP) se muestran en la figura 13, en donde se observa que en el gradiente de PNSD1 a PNSD3 la temperatura disminuyó 1.15°C, el pH incremento en 0.64 unidades de pH de neutro a alcalino, la salinidad incremento 6.16‰, el oxígeno disuelto incremento en 5.14 mg/L y el potencial redox paso de un valor negativo a uno positivo.

El potencial redox está relacionado con el pH y el contenido de oxígeno, y los valores positivos indican una oxidación, mientras que valores negativos producen una reducción. En ambientes naturales el potencial redox con valores negativos indican la reducción del sulfato a ácido sulfúrico (-221 mV) y del CO₂ a metano CH₄ a valores de -244 mV; para la Playa Nizuc la reducción del sulfato a ácido sulfúrico se identificó con el valor de ORP negativo, así como por el olor en la playa.

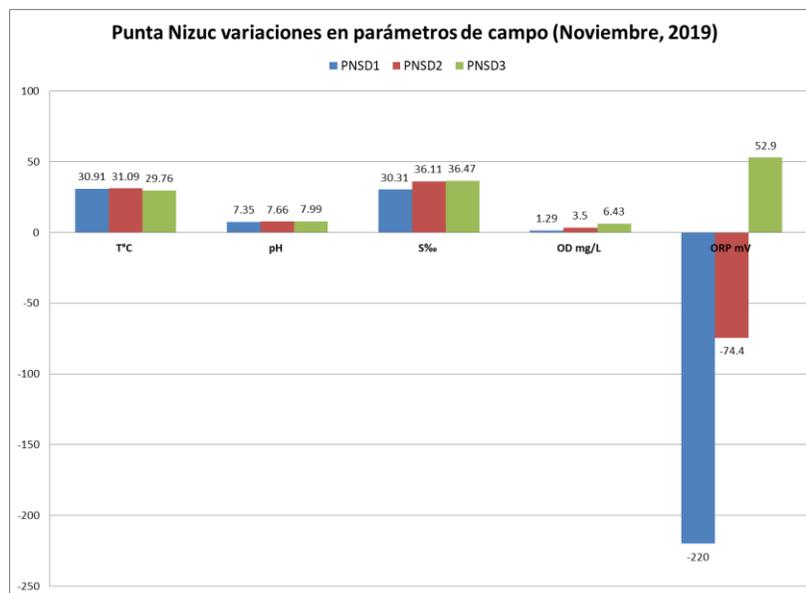


Figura 13. Variaciones en los parámetros de campo temperatura, pH, salinidad,



Estos resultados comparados con los obtenidos por B.I. van Tussenbroek y colaboradores en 2017 en la playa de Xcalak, siguieron el mismo comportamiento en cuanto a que, en la zona de mayor a menor descomposición del sargazo en Punta Nizuc las variaciones de la temperatura disminuyeron, y el pH, S, OD y ORP incrementaron mejorando la calidad del agua de la zona cercana a la playa a una distancia de 15 metros de la playa donde la marea marrón ya no era aparente.

3.3. Resultados de nutrientes en agosto

Los resultados de nitrógeno total y fósforo total se analizan por mes, siendo estos nutrientes importantes para las macroalgas, ya que ayudan a su crecimiento, al brindan comida y un hábitat a peces, moluscos y organismos más pequeños que viven en el agua. El exceso de nitrógeno y fósforo en el agua hace que el alga crezca tan rápido que los ecosistemas no pueden soportar esa cantidad deteriorando el hábitat. Un aumento significativo en la cantidad de macroalga deteriora la calidad del agua, los alimentos y los hábitats, y reduce el oxígeno que los peces y otras especies acuáticas necesitan para vivir. Las proliferaciones de alga son llamadas florecimientos y pueden reducir en gran medida o eliminar el oxígeno presente en el agua (EPA, 2010). Altas concentraciones de nutrientes en las zonas costeras son resultado de lo aportado por las aguas de surgencias, el transporte de corrientes y la ocurrencia de procesos biogeoquímicos de regeneración y/o consumo de nutrientes en la capa eufótica o en el sedimento, así como del aporte de aguas residuales no tratadas (Lorena Marcela et. al., 2010).

Las concentraciones de nitrógeno total en agosto siguieron un comportamiento de aumento en las estaciones con presencia de sargazo en un grado de descomposición; por ejemplo en X3 (Xcalak mar) la concentración fue de 1.823 mgN/L; en XSD1 (sargazo en descomposición cerca de la playa) 2.353 mgN/L, y en XSD2 (lixiviado de sargazo en descomposición) fue de 9.474 mg N/L.

La concentración más alta se presentó en Playa del Carmen en donde estaba acumulado el sargazo en la playa y liberaba lixiviado hacia el mar (PCSD1) con 17.8327 mg N/L, predominando la forma de nitrógeno orgánico en todas las playas, ya que está asociado a las proteínas, ácidos nucleicos y metabolitos de las macroalgas en su proceso de descomposición (Figura 14). Los límites de nitrógeno total de la EPA de Estados Unidos y de Suiza (1.54 mg/L y 0.440 mg/L respectivamente) en la mayoría de las playas sobrepasa las concentraciones y puede ser un factor causal de eutrofización en el ecosistema costero (EPA, 2001; Swedish EPA, 2000).

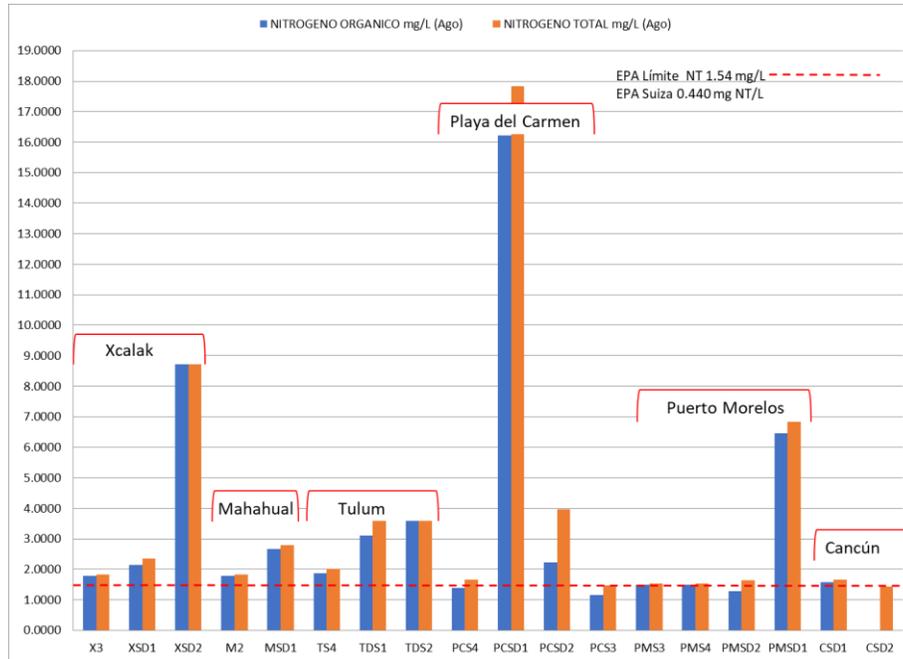


Figura 14. Concentración de nitrógeno total y orgánico en agua (agosto, 2019).

Otro estado del nitrógeno es el nitrógeno presente en forma de amoniaco que se denomina nitrógeno amoniacal. Una característica particular es que su comportamiento depende del pH: a pH ácido permanece disuelto en el agua como ion amonio mientras a pH alcalino se transforma en gas amoniaco el cual es susceptible de volatilizarse al ambiente, siendo éste último el predominante en las playa evaluadas. El nitrógeno amoniacal es la forma preferida de nitrógeno para el fitoplancton por no requerir una reducción química para ser usado en la síntesis de proteínas y demandar menor consumo de energía celular, para el sargazo esto no ha sido evaluado (Figura 15).

El nitrito es la forma de nitrógeno que resulta de la oxidación biológica del nitrógeno amoniacal. Este proceso, denominado nitrificación, es llevado a cabo por un grupo selecto de bacterias (Nitrosomonas) cuyo crecimiento y metabolismo es relativamente lento, por lo que una alteración súbita de las condiciones de operación de un ecosistema o una planta tratadora que afecte a estas bacterias ocasiona un pico en la concentración del nitrógeno amoniacal, como se observa en la figura 15. El nitrito no se volatiliza y se oxida rápidamente a nitrato por acción microbiológica.

El nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno y a diferencia de las formas anteriores es mucho menos tóxico, y es asimilado por plantas, algas y macroalgas, que pueden tomar tanto amoniaco como nitrato del ambiente, de manera que ingresa nuevamente a la cadena trófica; o es transformado nuevamente en gas nitrógeno que regresa a la atmósfera.

Las altas concentraciones de las formas de nitrógeno como el NT y N-orgánico en las playas de mayor a menor concentración fueron:

Playa del Carmen>Xcalak>Puerto Morelos>Tulum>Mahahual>Cancún.

Mientras que para las formas de NH₃, NO₂ y NO₃ fue:

Playa del Carmen>Cancún>Puerto Morelos>Tulum>Xcalak>Mahahual.

La descomposición del sargazo en las playas y el aporte de nitrógeno en sus diversas formas y su asimilación promueven el mantenimiento y proliferación del crecimiento y reproducción vegetativa del sargazo, que conlleva a cambios en el hábitat como disminución de la luz y transparencia en la columna de agua, aumento de materia orgánica en los sedimentos.

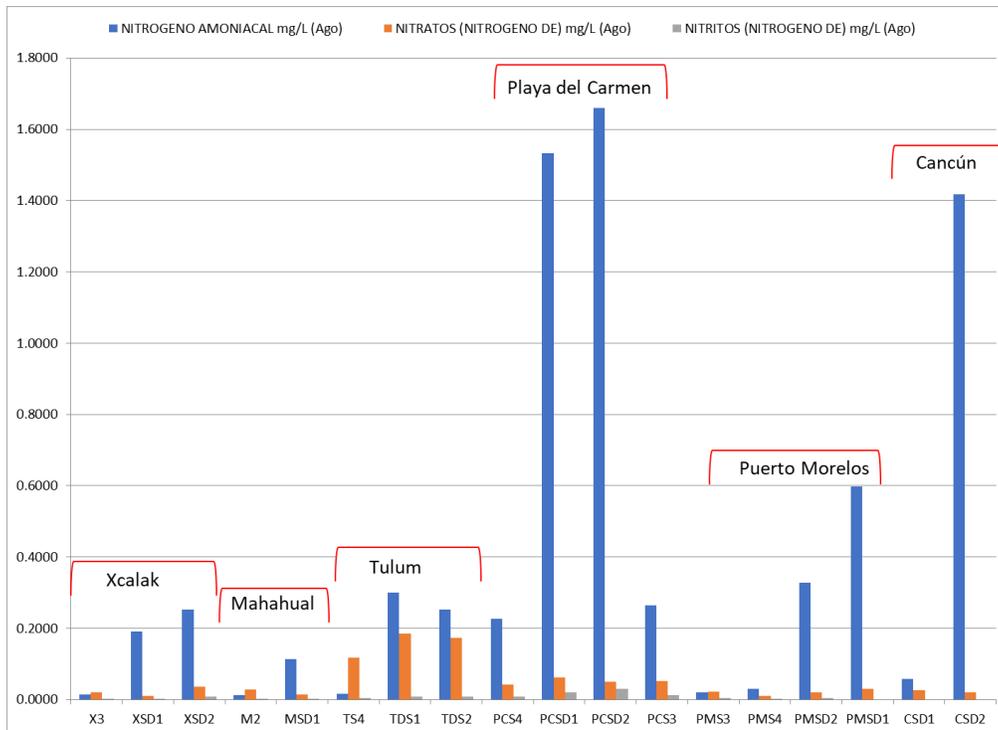


Figura 15. Concentración de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos en agua.

Por lo que respecta al fósforo que es indispensable para el crecimiento de plantas y animales, siendo importante para la productividad primaria de ambientes acuáticos; la concentración de fósforo total mide la cantidad de fósforo disponible en forma orgánica e inorgánica, disuelta y particulada en los sistemas acuáticos. En las zonas costeras el nitrógeno es el factor limitante para el crecimiento de fitoplancton y macrolagas, cuando entran altas concentraciones de nitrógeno, el fósforo pasa a ser el factor limitante (Carmargo y Alonso, 2006).

El fósforo que ingresa al mar es principalmente ortofosfato, PO_4^{-3} . En las aguas costeras cercanas a la costa, el fósforo está presente en forma inorgánica disuelta, así como en forma orgánica disuelta y en partículas. Alguna fracción de P puede estar fuertemente incrustada en una matriz mineral, y esto hace que esa fracción sea relativamente inerte a la utilización biológica.

Los ortofosfatos generalmente son preferidos por el fitoplancton autotrófico, aunque puede ocurrir cierta asimilación del fósforo orgánico, especialmente durante los períodos de deficiencia de P. Cuando las plantas mueren, o son comidas, el fósforo orgánico se convierte rápidamente en ortofosfatos a través de la acción de



fosforilasas dentro del material fecal en las células de las plantas y finalmente por bacterias es degradada (EPA, 2001).

Las concentraciones más altas de fósforo total en agosto se presentaron en las playas del Carmen, Xcalak, Puerto Morelos y Tulum en las zonas de degradación del sargazo (Figura 16).

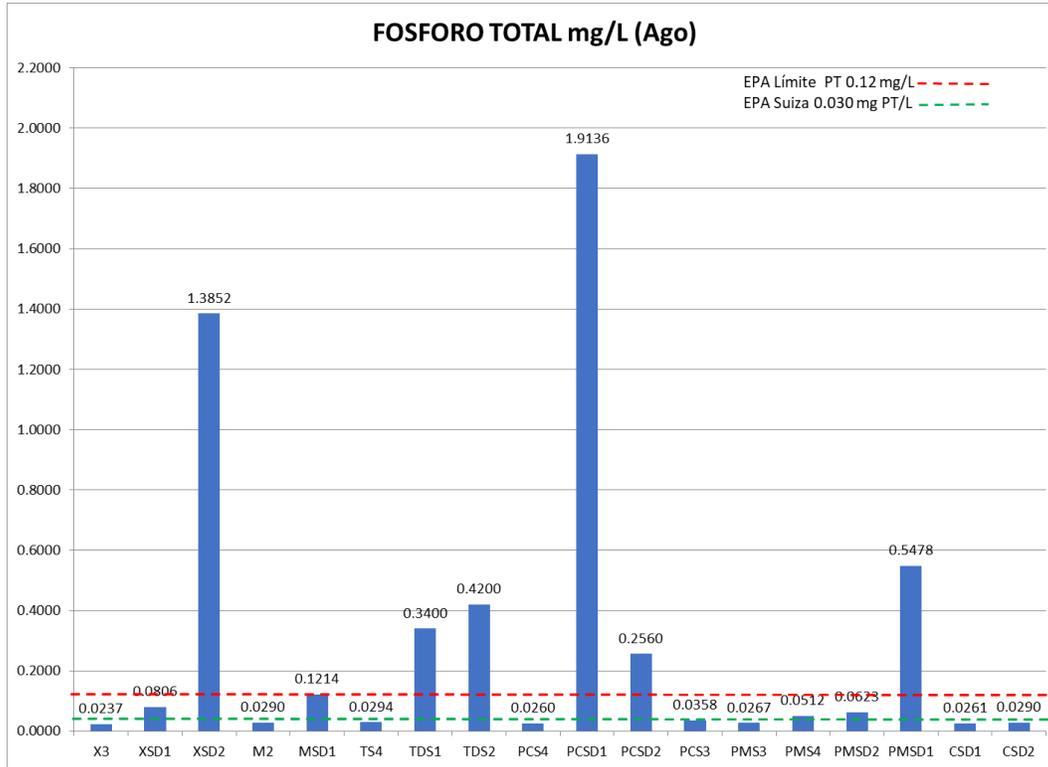


Figura 16. Concentración de fósforo total en agosto

Observándose que los límites para el fósforo total establecidos por la EPA de Estados Unidos y Suiza se sobrepasan (0.12 mg/L y 0.030 mg/L, respectivamente), lo que puede implicar que la zona costera sea eutrófica por las altas concentraciones liberadas por el sargazo en descomposición al agua.

En el mes de noviembre el sargazo disminuyó considerablemente en las playas y en el mar, observándose que la coloración del agua dejó de ser marrón, ya que el arribazón de la macroalga fue mínimo, por lo que en los meses de septiembre y octubre el sargazo se degradó y el material vegetal pudo incorporarse al sedimento, lo que ocasionó el cambio en la coloración del mar (Figura 17).

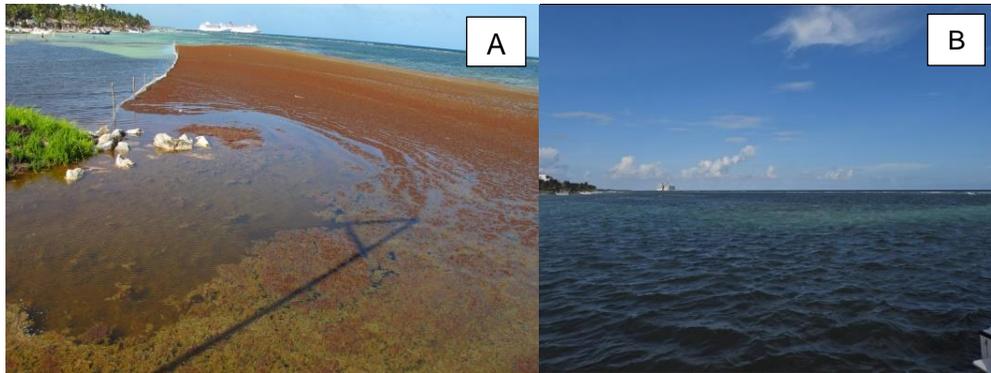


Figura 17. Sargazo en Mahahual. A agosto y B noviembre de 2019.

Los resultados de nitrógeno total y fósforo total de agosto y noviembre de presentan en la figura 18.

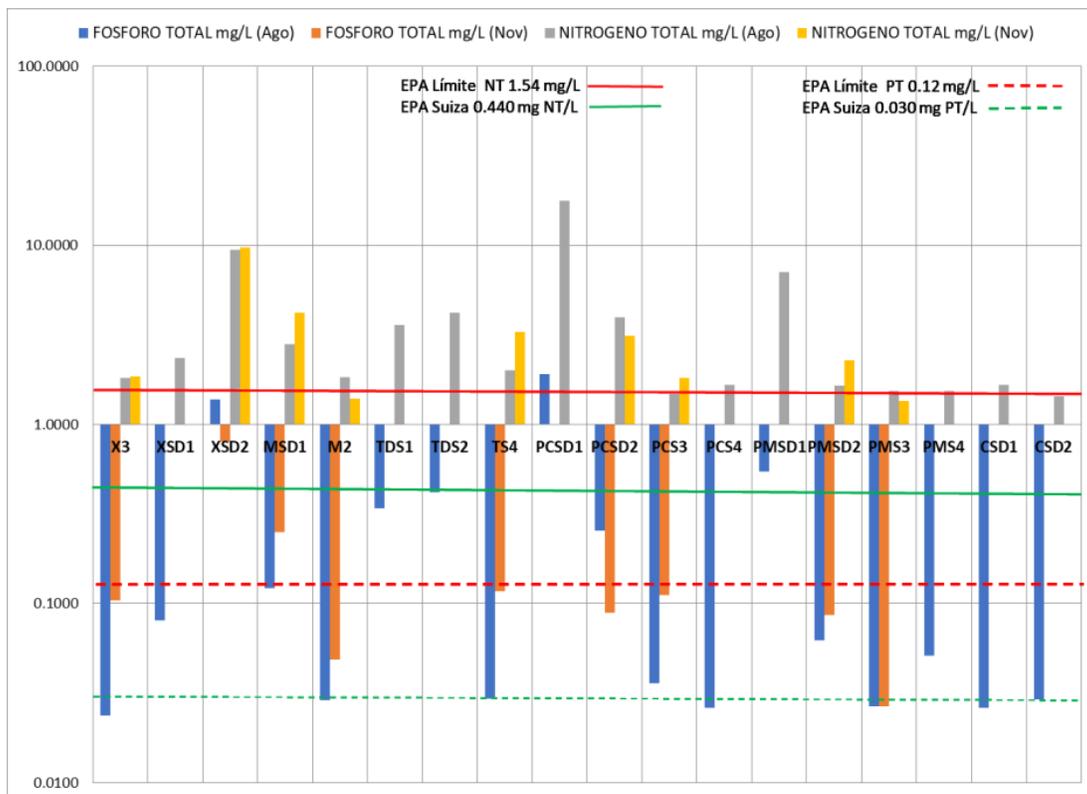


Figura 18. Concentración de NT y PT en agosto y noviembre 2019.

En el análisis espaciotemporal de las concentraciones de los nutrientes (NT y PT) y comparando los resultados de agosto con los de noviembre en nueve estaciones de las playas y/o mar de Xcalak, Mahahual, Tulum, Playa del Carmen y Puerto Morelos, se observó un aumento en la concentración de los nutrientes que va desde 0.0249



mg/L hasta 1.4024 mg/L de nitrógeno total en Xcalak mar (X3) y Mahahual sargazo en descomposición (MSD1) respectivamente; y de 0.0001 mg/L hasta 0.1291 mg/L de fósforo total en Puerto Morelos-mar (PMS3) y Mahahual sargazo en descomposición (MSD1) respectivamente, siendo la playa de Mahahual la que incremento la concentración de ambos nutrientes debido a la descomposición del sargazo y su incorporación al agua.

En las playas en donde hubo disminución en la concentración de NT y PT fueron: Mahahual mar (M2, 0.4365 mg NT/L), Playa del Carmen orilla (PCSD2, 0.8431 mg NT/L), Puerto Morelos Mar (PMS3, 0.1799 mg NT/L), Xcalak (XSD2, 0.5817 mg PT/L) y Playa del Carmen orilla (PCSD2, 0.167 mg PT/L) Tabla 7.

Tabla 7, Estaciones y concentraciones de nutrientes que variaron entre los meses de muestreo (Agosto y Noviembre de 2019)

Estación	Clave	NT aumento mg/L	PT aumento mg/L	NT disminuyo mg/L	PT disminuyo mg/L
Xcalak mar	XS1	0.0249	0.0800		
Xcalak-descomposición-cerca playa	XSD2	0.2602			0.5871
Mahahual descompos	MSD1	1.4024	0.1291		
Mahahual mar	M2		0.0195	0.4365	
Tulum mar	TS4	1.2793	0.0872		
Playa del Carmen-orilla sargazo descomposición	PCSD2			0.8431	0.1670
Playa del Carme-mar	PCS3	0.3481	0.0761		
Puerto Morelos (Junto a la Banda)	PMSD2	0.6383	0.0243		
Puerto Morelos-mar	PMS3		0.0001	0.1799	

Lo anterior denota la posible incorporación de los nutrientes al agua por el proceso de descomposición del sargazo, hecho que es necesario confirmar con el análisis de otros muestreos para que se corrobore que los nutrientes son incorporados por el sargazo en descomposición al agua.

De acuerdo a van Tussenbroek, 2017, en el periodo de afluencia masiva del sargazo en 2015 se incrementó el Nitrógeno y Fósforo en aproximadamente 30 veces y de 3 a 10 veces respectivamente la entrada habitual al mar. La eutrofización no es apreciable en Puerto Morelos después de un año del arribazón del sargazo en 2015.



3.4. Resultados Metales

El análisis de metales pesados en el sargazo colectado en las playas con algún proceso de descomposición y el colectado en el mar en condiciones de buen estado y fresco en agosto, se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Concentración de metales pesados en sargazo colectado en playa y en el mar del Caribe Mexicano (2019) y la comparación con las concentraciones del estudio de Fernández et. al., 2017 de República Dominicana.

ESTACIONES	As mg/kg	Cd mg/kg	Cu mg/kg	Hg mg/kg	Ni mg/kg	Zn mg/kg
X(mar- Fresco)	0.39	2.308	3.365	0.11	13.56	6.827
X1 (sargazo descomposición playa)	0.78	1.885	4.24	0.13	18	5.089
M2(mar- Fresco)	0.73	1.322	2.833	0.15	15.01	4.249
TS4 (mar-Fresco)	0.7700	1.746	5.1400	0.1200	18.9100	8.0490
PCS3 (mar-Fresco acumulado en barrera)	5.13	1.672	3.622	0.16	17.18	7.894
PCS4 (mar-Fresco)	4.82	0.592	1.578	0.1	10.65	4.141
PMS3 (mar-Fresco)	0.84	1.593	4.081	0.1	18.81	5.574
PMS4 (mar-fresco confinado barrera)	3.93	2.277	3.069	0.12	16.23	4.851
CSD1 (playa-sargazo descomposición)	2.92	3.04	4.02	0.08	29.21	6.4
CSD2 (playa-sargazo descomposición)	0.53	3.45	6.71	0.07	31.25	9.202
PNSD1 sargazo descomposición	0.23	ND	4.823	0.150	5.709	6.102
Boca Chica *	42.3	0.313	8.702	0.545	32.5	20.63
Guayacanes *	31.73	0.28	11.86	1.445	11.22	12.74
Ojeda *	13.68	0.127	1.64	4.43	9.95	15.66
Rango Geoquímico normal **	<5 -40	<1 - 2	60	10	2 - 100	25 -200

* Republica dominicana

** Fernández et. al, 2017

Los resultados muestran que en las playas donde se colecto el sargazo en descomposición el Arsénico osciló de 0.2327 mg/kg en Playa Nizuc (PNSD1) hasta 5.13 mg/kg en Playa del Carmen (PCS3, acumulado en barrera) y un promedio de 1.9157 mg/kg (Figura 19). El Cadmio presentó concentraciones de 0.592 mg/kg hasta 3.45 mg/kg en Playa del Carmen (PCS4, mar-Fresco) y Playa Delfines (CSD1, sargazo descomposición) respetivamente con un promedio de 1.988 mg/kg (Figura 20). El Cobre con un mínimo de 1.578 mg/kg y un máximo de 6.71 mg/kg determinados en Playa del Carmen (PCS4, mar-fresco) y Playa Delfines (CSD2, sargazo descomposición) respectivamente con un promedio de 3.9528 mg/kg (Figura 20).

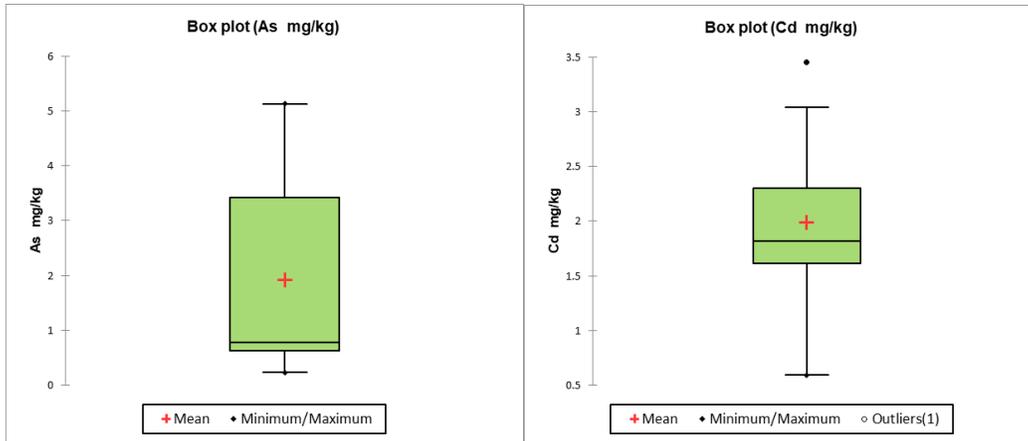


Figura 19. Concentraciones de Arsénico y Cadmio en muestras de sargazo en descomposición. Mínimos, máximos, promedios.

Por lo que respecta al Mercurio la mínima concentración fue de 0.070 mg/kg determinada en Playa Delfines (CSD2), la máxima de 0.160 mg/kg en Playa del Carmen (PCS3, acumulado en barrera) y un promedio de 0.1173 mg/kg (Figura 21).

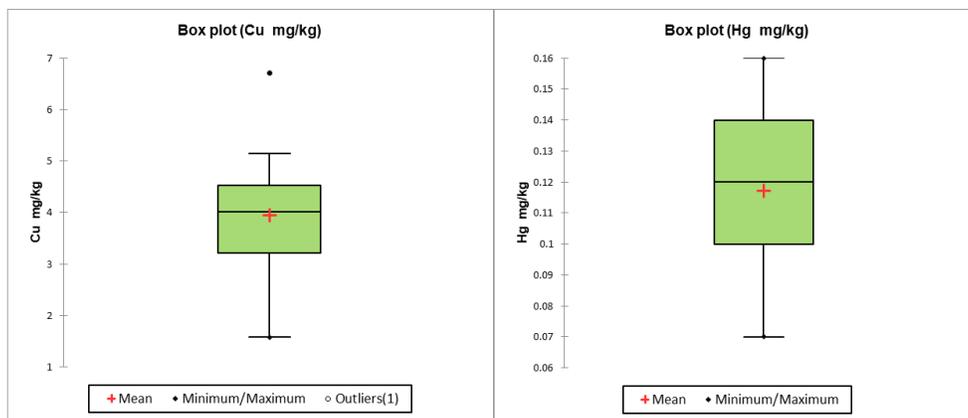


Figura 20. Concentraciones de Cobre y Mercurio en muestras de sargazo en descomposición. Mínimos, máximos, promedios.

El Níquel presentó concentraciones de 5.7087 mg/kg en Punta Nizuc (PNSD1), un máximo de 31.25 mg/kg en Playa Delfines (CSD2) y un promedio de 17.6835 mg/kg. Por último las concentraciones de Zinc variaron de 4.141 mg/kg la mínima en Playa del Carmen (PCS4 mar fresco) y la máxima de 9.202 mg/kg en Playa Delfines (CSD2) con un promedio de 6.2162 mg/kg (Figura 21).

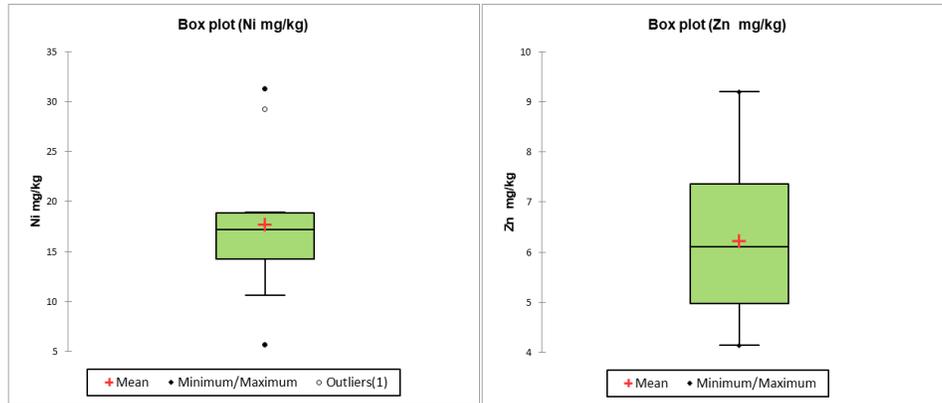


Figura 21. Concentraciones de Níquel y Zinc en muestras de sargazo en descomposición. Mínimos, máximos, promedios.

En el estudio realizado por Fernández et. al., 2017 en donde analizaron metales pesados en sargazo colectado en las playas de República Dominicana (Tabla 9), las concentraciones obtenidas y comparadas con nuestros resultados indican que para el As, Hg y el Zn son altas, mientras que el Cd determinado en las playas del mar Caribe las concentraciones son ligeramente altas. Para el Cu y Ni, las concentraciones fueron similares.

Al comparar las concentraciones del rango geoquímico normal, únicamente el Cadmio en las muestras de sargazo del Mar Caribe sobrepasa los valores de rango normal en cuatro estaciones de $< 1 - 2$ mg/kg, por lo que es importante que se realicen más análisis de metales en el sargazo, ya que uno de los ejes de SEMARNAT es el uso de la macroalga para diversos materiales, por lo que se debe asegurar que la biomasa a utilizar este libre de metales pesados.

Uno de los usos industriales que se ha planteado para las algas pardas es el empleo como biosorbente de los metales, ya que el sargazo de la especie *S. fluitans* tiene una buena capacidad de secuestro de metales por lo que la biosorción de metales como Cd y Cu han sido demostrados por Davis, et. al., 2000.

Los resultados de metales en agua y sargazo colectados en noviembre se presentan en la figura 22.

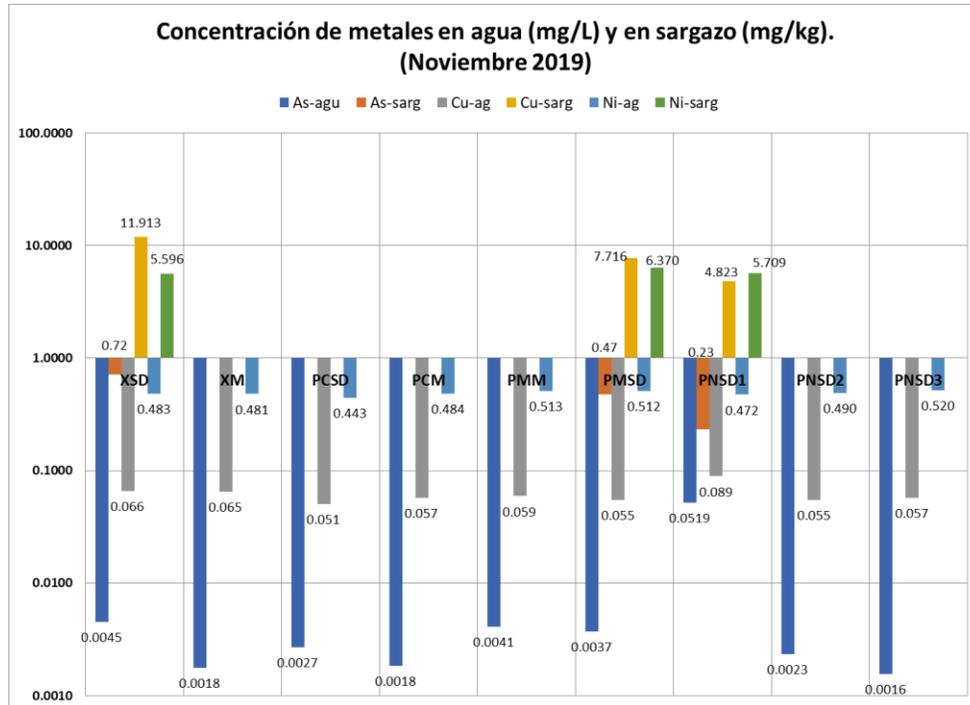


Figura 22. Concentraciones de metales pesados en sargazo y agua de mar colectado en noviembre de 2019.

Se observa una posible biosorción de los metales, ya que en el agua se presentan bajas concentraciones y en el sargazo aumenta la concentración, siendo importante seguir realizando las mediciones para confirmar la capacidad de concentrarlos como lo descrito por Davis et. al., 2000 para el cadmio y cobre.

Lo anterior resulta importante ya que, como lo menciona Plaza Cazón, 2012, la biosorción resulta ser una de las tecnologías más prometedoras, no solamente por su bajo costo, sino porque se trata de un proceso rápido que permite tratar grandes volúmenes de agua con bajas concentraciones de metal en forma eficaz. Además la posibilidad de emplear biomasa muerta o productos derivados de su metabolismo, supera problemas de toxicidad e incluso permite la regeneración y reutilización del biomaterial por varios ciclos de adsorción/desorción.



3.5. Determinación de la especie de sargazo

El *Sargassum* es un género de macroalgas planctónicas unicelulares características de áreas costeras tropicales. Se han reportado 358 diferentes especies de *Sargassum* de las cuales 14 no han sido corroborado su estatus taxonómico (MD Guiry, 2019). La mayoría de las especies son bentónicas y solo dos son holopelágicas: *S. natans* y *S. fluitans* (Dawes y Mathieson, 2008). La caracterización genética de las diferentes especies de *Sargassum* ha sido difícil debido a la baja variabilidad genética entre algunos clados y la falta de genes marcadores capaces de distinguir entre taxones. A través de la comparación de genomas mitocondriales completos y cloroplastos parciales Amaral-Zettler et al., 2015 caracterizó las especies holopelágicas del *Sargassum*. La recolección de las muestras se realizó por medio de redes de neuston remolcadas durante 4 cruceros en el 2012, 2014, 2015 y 2016 en el océano atlántico norte y de manera manual en el año 2014 y 2016. Paralelamente, la identificación morfológica se llevó a cabo en base a las características establecidas por Parr (1939). Los resultados obtenidos en el análisis filogenético en datos de secuencia mitocondrial, muestran tres formas genéticamente distintas de *Sargassum* holopelágico (*S. natans* I, *S. natans* VIII y *S. fluitans* III) las cuales son responsables de la marea dorada en el caribe. Por otra parte, *S. natans* I y *S. fluitans* III son genéticamente distintos. Sin embargo, los genes fueron idénticos entre *S. natans* I y *S. fluitans* III (Amaral-Zettler et al, 2017)

A partir de 2014, una severa proliferación de esta especie es detectada en el Atlántico en diversas costas de Estados Unidos hasta Brasil (Schell et al, 2015). La llegada masiva de esta especie a zonas costeras provoca que las playas destinadas al turismo se vean seriamente afectadas por imposibilitar nadar y la destrucción de arenas blanquecinas que caracterizan el caribe. El crecimiento, reproducción y aumento de biomasa de esta especie probablemente esta intrínsecamente ligado al aumento de nutrientes provenientes de las aguas residuales urbanas. De acuerdo a la Estrategia Nacional de Especies Invasoras, es importante no darle un valor agregado a una especie que pone en riesgo la salud, el medio ambiente y la economía de una región, y más bien investigar las causas que origina el problema y encontrar soluciones que ataquen dichas causas.

En la tabla 9 se presentan las características de las dos especies de sargazo que llegan a las playas del Caribe Mexicano identificadas por varios autores.

Tabla 9. Características morfológicas de *S. natans* de *S. fluitans*.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE S. NATANS DE S. FLUITANS						
AUTOR		RAMAS LATERALES	HOJAS			VEJIGAS DE GAS
			FORMA	DIMENSIONES	MÁRGENES	APÉNDICES APICALES
Taylor (1960)	<i>S. fluitans</i>	Con muy pocas espinas	Lanceolada, con base asimétrica y obtusa a las puntas agudas	2-6 cm x 3-8 mm	Dientes anchos	Apiculado
	<i>S. natans</i>	Lisas	Lanceolada, con base asimétrica y obtusa a las puntas agudas	2.5- 10 cm X 2.0-3.5mm	Dientes afilados	Lisa, acúleo o con una proyección larga.
Schneider y Searles (1991)	<i>S. fluitans</i>	Escasamente espinosa	Estrecho a lanceolada	2-6 cm x 3-8mm	Dientes anchos	no apiculado y sin hoja terminal
	<i>S. natans</i>	Lisa	Muy lineal	2-10 cm x 2-4 mm	Dientes afilados	apiculado o con hoja terminal
Littler y Littler (2000)	<i>S. fluitans</i>	Lisa o con pocas espinas	Base estrecha, asimétrica y ápices puntiagudos	2-6 cm x 3-8 mm	Dentada	Sin espina
	<i>S. natans</i>	Lisa	Alargada	2-10 cm x 1-4 mm	Dentado grueso	----
Dawes y Mathieson (2008)	<i>S. fluitans</i>	Lisa o con pocas espinas	Lanceolada con puntas puntiagudas	2-6 cm x 3-8 mm	Dientes anchos	Usualmente sin espinas
	<i>S. natans</i>	Lisa	Lineal	2-10 cm x 1-4 mm	Dientes delgados	Algunas veces con espina

Tomada y modificada de Maria Teresa M. de Széchy, Patricia M. Guedes, Maria Helena Baeta Neves and Eduardo N. Olivera. (2012). Verification of *Sarassum natans* (Linnaeus) Gaillon (Heterokontophyta: Phaeophyceae) from the Sargasso Sea off the coast of Brazil, western Atlantic Ocean. Check List 8(4): 638-641. DOI: 10.15560 / 8.4.638

La revisión de literatura para la especie *S. natans* se presenta en la figura 23 y en la figura 24 la revisión de la especie en el laboratorio del IMTA.

Sargassum natans L, Gaillon
(Fucales: Sargassaceae)

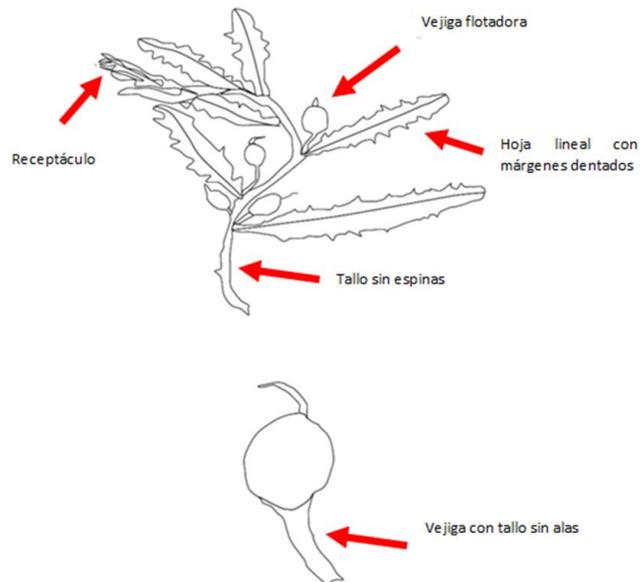


Figura 23. Características de la *Sargassum natans*. Esquema tomada y modificada de OO Oyesiku y A Egunyomi. 2014. Identificación y estudios químicos de masas pelágicas de *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon y *S. fluitans* (Borgesen) Borgesen (algas pardas), que se

Sargassum natans L, Gaillon
(Fucales: Sargassaceae)





Figura 24. Características observadas en el Laboratorio del IMTA de *Sargassum natans* colectadas en agosto de 2019.

Sargassum natans L, Gaillon (Fucales: Sargassaceae)

Nombres comunes: **Español:** Saragazo nadador I, Saragazo de frondas largas y delgadas **Inglés:** Sargasso Weed
Sinónimo: *Fucus natans* (Linnaeus, 1753), *Baccalaria natans* (Linnaeus) S:F: Gray 1821¹.

Clasificación taxonómica: **Reino:** Chromista **Filo:** Ochrophyta **Clase:** Phaeophyceae **Subclase:** Fucophycidae
Orden: Fucales **Familia:** Sargassaceae **Género:** *Sargassum* **Especie:** *natans*¹.

Lugar de Origen: Mar Norte Atlántico **Distribución en México:** Campeche, Quintana Roo, Veracruz y Yucatán, Tamaulipas². **Estatus:**

Descripción general: Planta flotante sin sistema radicular. Tallo sin espinas. Vejigas esféricas sin alas. Las vejigas contienen aire. Hoja lineal con márgenes dentados y bordes irregulares^{3,4}. Reproducción asexual por fragmentación⁵.

Importancia e impactos: El sargassum es considerado como hábitat primario, refugio temporal o zona de cría para fauna marina. Los impactos negativos de las grandes masas de sargassum es el estrés provocado a las plantas acuáticas y corales por la reducción de luz y oxígeno que provocan hipoxia o anoxia según sea el caso, también hay un aumento de crecimiento de plantas no nativas. El aumento de la materia orgánica en los sedimentos de sargassum causa pérdidas de praderas marinas cercanas a la costa y algunas colonias de coral aunado a esto las prácticas inadecuadas de remoción provoca compactación de playas⁶

Medidas de control: **Físico:** Remoción de manera manual o la utilización de maquinaria no pesada con base a los lineamientos establecidos por la SEMARNAT de Quintana Roo⁷

Químico: No se cuenta con información. **Biológico:** No se cuenta con información

Referencias:

- 1 M.D. Guiry in Guiry, M.D. & Guiry, G.M. 2019. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway http://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=826. Consultado 11 junio 2019.
- 2 Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. Enciclopedia <http://enciclovida.mx/especies/9651-sargassum-natans> Consultado 11 junio 2019
- 3 De Széchy, M. T. M., Guedes, P. M., Baeta-Neves, M. H., & Oliveira, E. N. 2012. Verification of *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon (Heterokontophyta: Phaeophyceae) from the Sargasso Sea off the coast of Brazil, western Atlantic Ocean. Check List, 8(4), 638-641.
- 4 OO Oyesiku y A Egunyomi. 2014. Identificación y estudios químicos de masas pelágicas de *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon y *S. fluitans* (Borgesen) Borgesen (algas pardas), que se encuentran en alta mar en el estado de Ondo, Nigeria. African Journal of Biotechnology, Vol. 13 (10), pp. 1188-1193 <http://dx.doi.org/10.5897/AJB2013.12335>
- 5 Kilar, J., Hanisak, T., and Yoshida, T. 1992. On the expression of phenotypic variability: why is *Sargassum* so taxonomically difficult? Taxonomy of Economic Seaweeds, California Sea Grant College, La Jolla, California, pp. 95- 118.
- 6 Van Tussenbroek, BI, Hernández Arana, HA, Rodríguez-Martínez, RE, Espinoza-Avalos, J., Canzales Flores, SM, González-Godoy, CE, Collado-Vides, L. (2017). Impactos severos de las mareas marrones causadas por *Sargassum* spp. en comunidades costeras de pastos marinos del Caribe. Boletín de contaminación marina, 122 (1-2), 272-281. DOI: 10.1016 / j.marpolbul.2017.06.057
- 7 Secretaría del Medio Ambiente <https://www.groo.gob.mx/sema>. Consultado 11 junio 2019

La revisión de literatura para la especie *S. fluitans* se presenta en la figura 25 y en la figura 26 la revisión de la especie en el laboratorio del IMTA.

***Sargassum fluitans* Borgessen**
(Fucales: Sargassaceae)

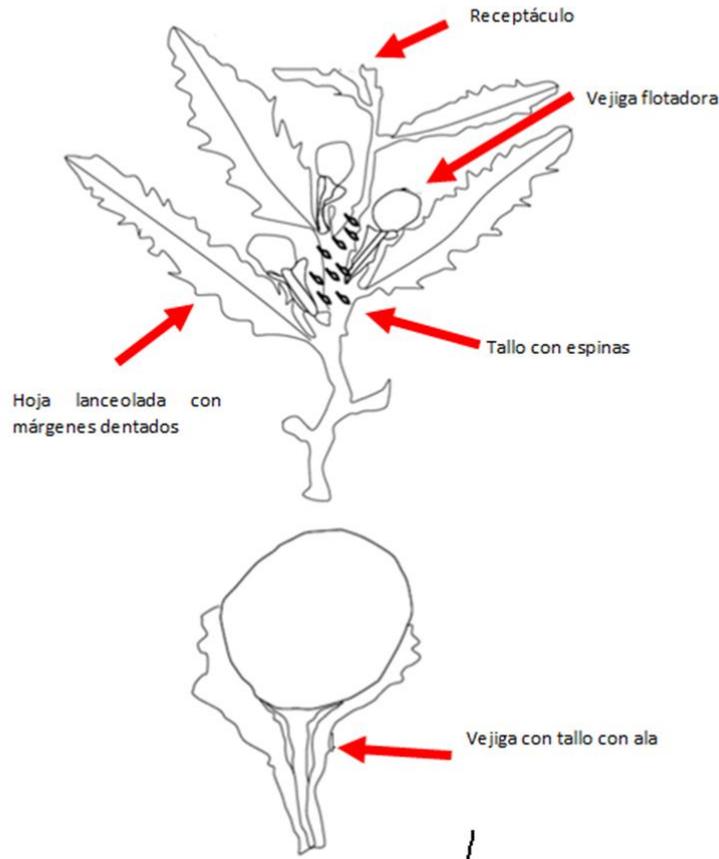


Figura 25. Características de la *Sargassum fluitans*.

***Sargassum fluitans* Borgessen**
(Fucales: Sargassaceae)

Nombres comunes: **Español:** Sargazo de frondas cortas y anchas, Sargazo flotante III **Inglés:** Gulf Weed, Sargassum Seaweed¹.



Clasificación taxonómica: **Reino:** Chromista **Filo:** Ochrophyta **Clase:** Phaeophyceae **Subclase:** Fucophycidae
Orden: Fucales **Familia:** Sargassaceae **Género:** Sargassum **Especie:** fluitans¹.

Lugar de Origen: Mar Norte Atlántico **Distribución en México:** Campeche, Quintana Roo, Veracruz y Yucatán, Tamaulipas². **Estatus:** Invasora. Reportada por Global Invasive Species Database como 1/100 peores especies invasoras en el mundo³.

Descripción general: Planta flotante sin sistema radicular. El tallo tiene espinas. Las vejigas con tallo con ala. Hoja lanceolada con márgenes dentados y con bordes irregulares^{4,5}. Reproducción asexual por fragmentación⁶. Se ramifica en todas las direcciones y sin un patrón.

Importancia e impactos: El sargassum es considerado como hábitat primario, refugio temporal o zona de cría para fauna marina. Los impactos negativos de las grandes masas de sargassum son el estrés provocado a las plantas acuáticas y corales por la reducción de luz y oxígeno que provocan hipoxia o anoxia según sea el caso, también hay un aumento de crecimiento de plantas no nativas. El aumento de la materia orgánica en los sedimentos de sargassum causa pérdidas de praderas marinas cercanas a la costa y algunas colonias de coral aunado a esto las prácticas inadecuadas de remoción provoca compactación de playas⁷

Medidas de control: **Físico:** Remoción de manera manual o la utilización de maquinaria no pesada con base a los lineamientos establecidos por la SEMARNAT de Quintana Roo⁸

Químico: No se cuenta con información. **Biológico:** No se cuenta con información

Referencias:

- 1 M.D. Guiry in Guiry, M.D. & Guiry, G.M. 2019. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway http://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=825. Consultado 11 junio 2019.
- 2 Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. Enciclovida <http://enciclovida.mx/especies/9648-sargassum-fluitans> Consultado 11 junio 2019.
- 3 Global Invasive Species Database (2018). Disponible en <http://www.iucngisd.org/gisd/search.php> Consultado: 30-11-2018.
- 4 De Széchy, M. T. M., Guedes, P. M., Baeta-Neves, M. H., & Oliveira, E. N. 2012. Verification of Sargassum natans (Linnaeus) Gaillon (Heterokontophyta: Phaeophyceae) from the Sargasso Sea off the coast of Brazil, western Atlantic Ocean. Check List, 8(4), 638-641.
- 5 OO Oyesiku y A Egunyomi. 2014. Identificación y estudios químicos de masas pelágicas de *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon y *S. fluitans* (Borgesen) Borgesen (algas pardas), que se encuentran en alta mar en el estado de Ondo, Nigeria. African Journal of Biotechnology, Vol. 13 (10), pp. 1188-1193 <http://dx.doi.org/10.5897/AJB2013.12335>
- 6 Kilar, J., Hanisak, T., and Yoshida, T. 1992. On the expression of phenotypic variability: why is Sargassum so taxonomically difficult? Taxonomy of Economic Seaweeds, California Sea Grant College, La Jolla, California, pp. 95- 118.
- 7 Van Tussenbroek, BI, Hernández Arana, HA, Rodríguez-Martínez, RE, Espinoza-Avalos, J., Canizales Flores, SM, González-Godoy, CE, Collado-Vides, L. (2017). Impactos severos de las mareas marrones causadas por Sargassum spp. en comunidades costeras de pastos marinos del Caribe. Boletín de contaminación marina, 122 (1-2), 272-281. DOI: 10.1016 / j.marpolbul.2017.06.057
- 8 Secretaría del Medio Ambiente <https://www.groo.gob.mx/sema>. Consultado 11 junio 2019

Sargassum fluitans Borgessen
(Fucales: Sargassaceae)

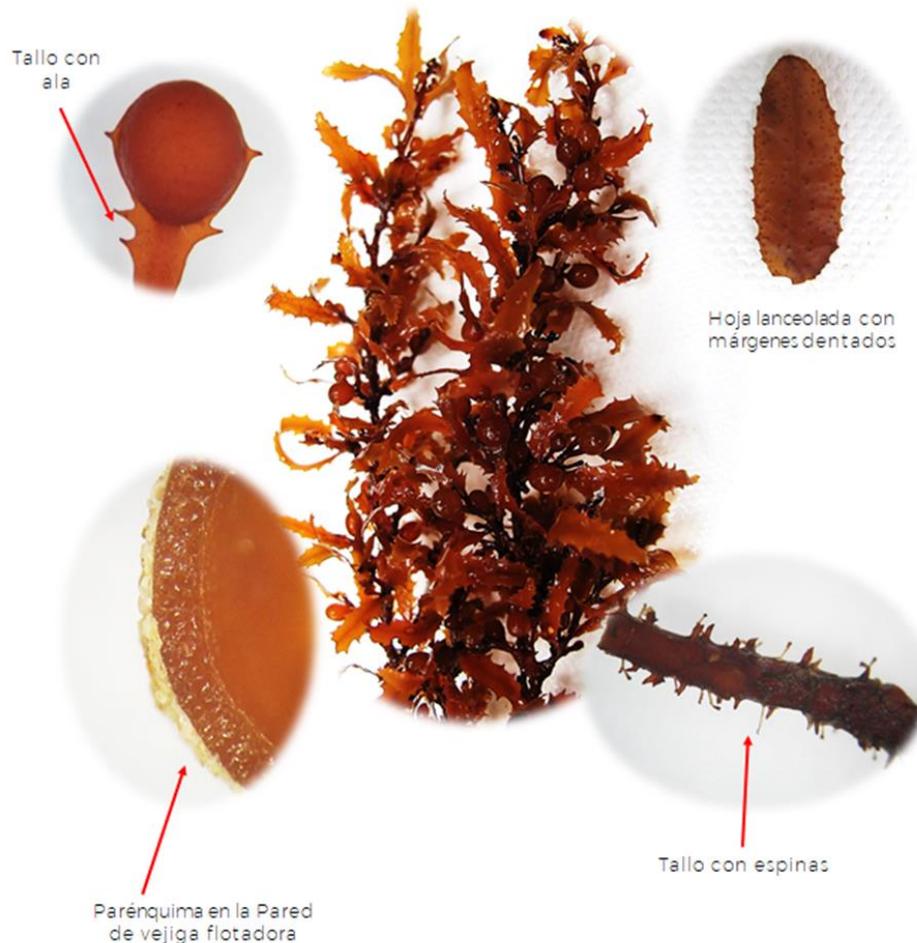


Figura 26. Características observadas en el Laboratorio del IMTA de *Sargassum fluitans* colectadas en agosto de 2019.

3.6. Medición de Metano y ácido sulfhídrico en el sargazo en descomposición.

Cerca de 500 millones de toneladas métricas por año de metano ingresan a la atmósfera debido a actividades antropogénicas y fenómenos naturales, Tabla 10 (Carmona, 2005). La acumulación de sargazo y su biomasa en descomposición en las playas del mar Caribe puede ser una importante fuente de emisión que es necesario medir para conocer las dimensiones del problema en las arribazones del alga parda a las playas.



Tabla 10. Estimaciones de las principales fuentes naturales y antropogénicas de metano a nivel global (millones de Ton/año).

NATURAL	ton/año	ENERGÍA/DESECHOS	ton/año	AGRICULTURA	ton/año
Pantanos	115	Gas y Petróleo	50	Cultivos de arroz	60
Océanos	15	Carbón mineral	40	Animales domésticos	80
Termitas	20	Carbón vegetal	10	Abono orgánico	10
Combustión	10	Rellenos sanitarios	30	Combustión	5
		Aguas residuales	25		
Total	160		155		155

Fuente: Johnson y Johnson en Carmona et. al, 2005

El metano se crea por la descomposición de la materia orgánica que procede en gran parte de los vertederos, el ganado bovino y el resto del sector ganadero (pollos y cerdos), así como del cultivo de arroz como se observa en la tabla 10.

En la figura 27 se presenta los resultados de las mediciones in situ con el equipo Testa 350 que se realizó en Agosto del 2019, en el sargazo en descomposición que era acumulado en montículos en la playa, o en la orilla de la playa.

La concentración más alta de metano se presentó en Xcalak en el sargazo acumulado en la playa (1154 ppm), mientras que la concentración del ácido sulfhídrico se determinó en Mahahul (213.8 ppm). Estos valores fueron puntuales

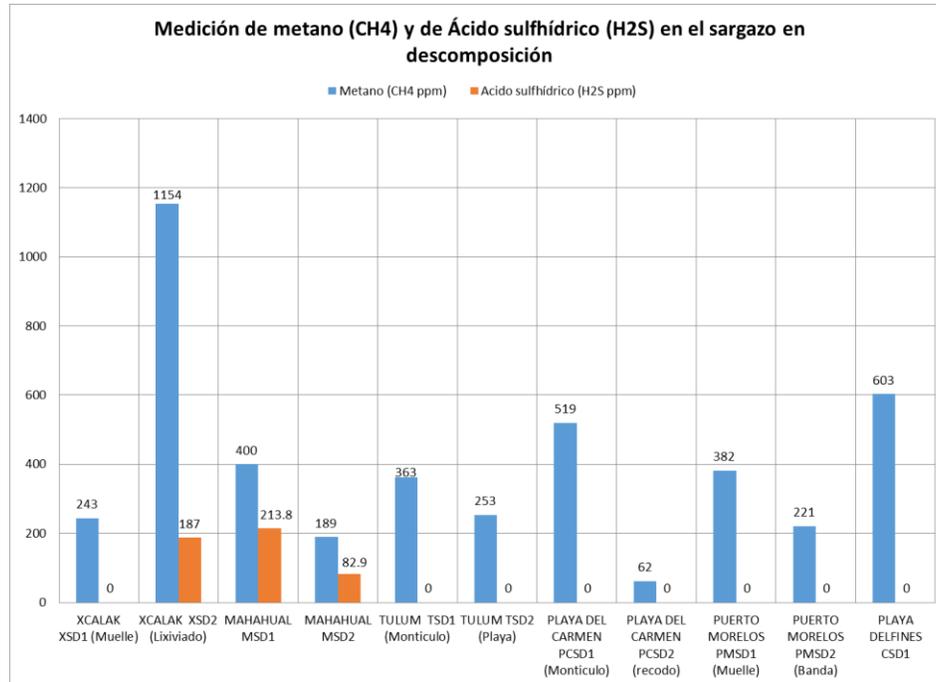


Figura 27. Concentración de metano y ácido sulfhídrico en sargazo en descomposición.

Los resultados de las mediciones de gases de efecto invernadero realizados in situ en el sargazo en descomposición como biomasa productora de los gases se considera que el impacto de los gases efecto invernadero deben ser caracterizados con un seguimiento de mayor número de campañas de colecta para que estos resultados obtenidos puedan ser reafirmados, ya que parcialmente en un solo muestreo fueron medidos.

4. CONCLUSIONES

Los parámetros de campo en las zonas de degradación del sargazo presentaron cambios disminuyendo la concentración de oxígeno disuelto lo que afecta a la fauna al presentarse condiciones anóxicas.

Las altas concentraciones de las formas de nitrógeno como el NT y N-orgánico en las playas de mayor a menor concentración fueron:

Playa del Carmen>Xcalak>Puerto Morelos>Tulum>Mahahual>Cancún.

Mientras que para las formas de NH₃, NO₂ y NO₃ fue:

Playa del Carmen>Cancún>Puerto Morelos>Tulum>Xcalak>Mahahual.

La descomposición del sargazo en las playas y el aporte de nitrógeno en sus diversas formas y su asimilación promueven el mantenimiento y proliferación del crecimiento y reproducción vegetativa del sargazo, que conlleva a cambios en el hábitat como disminución de la luz y transparencia en la columna de agua, así como aumento de materia orgánica en los sedimentos.



Los límites para el fósforo total establecidos por la EPA de Estados Unidos y Suiza se sobrepasan (0.12 mg/L y 0.030 mg/L, respectivamente), lo que puede implicar que la zona costera sea eutrófica por las altas concentraciones liberadas por el sargazo en descomposición al agua.

En Xcalak, Mahahual, Tulum, Playa del Carmen y Puerto Morelos, se incrementó siendo la playa de Mahahual la que incremento la concentración de ambos nutrientes debido a la descomposición del sargazo y su incorporación al agua.

El incremento de los nutrientes denota el posible deterioro de la calidad del agua, por lo cual es importante dar seguimiento a las variaciones espacio temporales a través de un monitoreo estacional.

Al comparar las concentraciones de metales pesados con el rango geoquímico normal, únicamente el Cadmio en las muestras de sargazo del Mar Caribe sobrepasa los valores de en cuatro estaciones ($< 1 - 2$ mg Cd/kg), por lo que es importante que se realicen más análisis de metales en el sargazo, ya que uno de los ejes de SEMARNAT es el uso de la macroalga para diversos materiales, por lo que se debe asegurar que la biomasa a utilizar este libre de metales pesados.

Se observó una posible biosorción de los metales, ya que en el agua se presentan bajas concentraciones y en el sargazo aumenta la concentración, siendo importante seguir realizando las mediciones para confirmar la capacidad de concentrarlos como lo describe Davis et. al., 2000 para el cadmio y cobre.

La biosorción resulta ser una de las tecnologías más prometedoras que puede ser utilizada para la remoción de metales, por lo que es necesario probar y evaluar su eficiencia.

Aunque se determinaron las dos especies de sargazo (*Sargassum natans* y *S. fluitans*) en las playas, se requiere de más análisis y verificación en el laboratorio, para poder establecer la dominancia de las especies en cada playa

En las dos campañas de colecta solo fue posible encontrar en la primera *Pseudomonas aeruginosa* solo en un punto y en la mayoría de los casos en ambas campañas el aislamiento fue de *Shewanella putrefaciens*.

Lo anterior nos permite concluir que bajo las condiciones del presente estudio no se encontró gran diversidad bacteriana asociada al interior de las células de *Sargassum* sp.

En la segunda campaña de colecta se encontró una de las playas no apta para recreación debido a la presencia de 414 Enterococos NMP/100mL, la norma permite un límite máximo permisible de 100 Enterococos NMP/100mL.

En relación a la generación de gases de efecto invernadero fue evidente (figura 12), que el sitio en donde más metano se midió fue en Xcalak (1,154 ppm).

El segundo punto donde se observó un alto grado de generación de gases efecto invernadero (metano) fue en el punto de Playa delfines en Cancún (603 ppm).

El tercer sitio con generación de metano fue en uno de los puntos de Playa del Carmen (519 ppm).

Después de los anteriores puntos en los que se determinó desprendimiento de metano continúan en orden Mahahual (400 ppm), Puerto Morelos (382 ppm) y Tulum (363 ppm).

En cuanto a la generación de ácido sulfhídrico (H_2S), el mayor valor de generación fue encontrado en uno de los puntos de Mahahual (215 ppm).



Consideramos que el impacto de los gases efecto invernadero y la presencia de bacterias potencialmente riesgosas para la salud de los bañistas en estas zonas de gran afluencia, deben ser caracterizados con un seguimiento de mayor número de campañas de colecta para que estas conclusiones parciales puedan ser reafirmadas

I. ANEXO I

“AISLAMIENTO, SELECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE ENTEROBACTERIAS Y DETERMINACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI), EN MUESTRAS DE SARGAZO DE LA ZONA COSTERA DE QUINTANA ROO”

I. ANTECEDENTES

En el año de 2018 se pudieron cuantificar más de 20 millones de toneladas de algas flotantes alineadas en la zona tropical del Atlántico, Mar Caribe, Golfo de México y la zona este de la costa de la Florida. El primer antecedente fue reportado en el año 2011, aunque la mayoría del Sargazo marino flotante fue encontrado cerca del Golfo de México. En el mes de julio de 2018 la NASA reportó una gran mancha de algas naciendo en el oeste de África en dirección al Golfo de México. A partir del conocimiento de las corrientes marinas, empleando modelos de simulación en computadora, pudieron confirmar finalmente la dinámica que estaba siguiendo el sargazo desde su nacimiento en costas africanas (Figura 1).

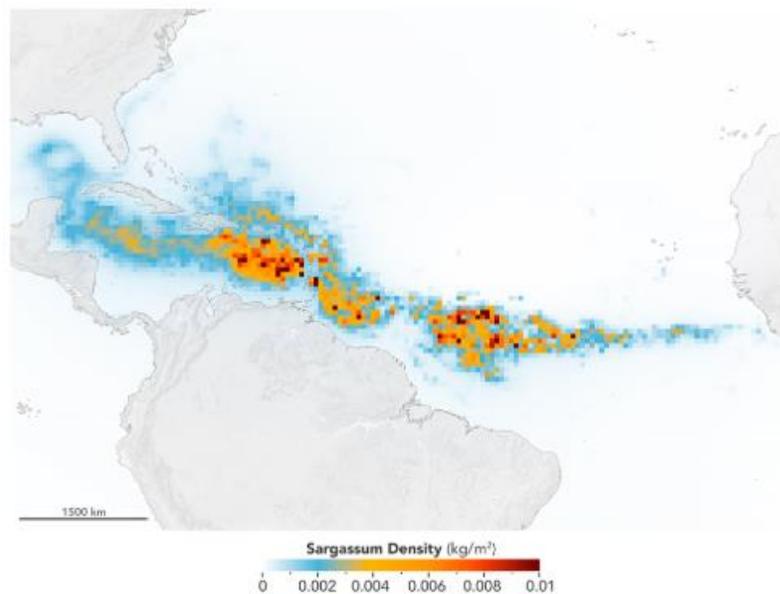


Figura 1. La gran mancha de Sargazo en julio de 2018. Imagen tomada por el observatorio de la NASA

El problema del sargazo continuó en aumento durante los meses de marzo a noviembre y los problemas en las costas del estado de Quintana Roo en el año 2019 impactaron la afluencia de turismo nacional e internacional. Como parte de las acciones en general para atacar la problemática varias instituciones del Gobierno Mexicano fueron alertadas para la toma de acciones inmediatas a esta problemática.

La biodegradación y por tanto su proceso de descomposición de las especies del género *Sargassum*, depende de la disolución y degradación del principal componente estructural de su pared celular (alginato). Sin lugar a dudas, la degradación biológica de las algas después de su arribo a las costas puede provocar efectos adversos a la salud de los ecosistemas circundantes y en alguna medida levanta sospechas de su probable efecto a la salud de los bañistas. En ambientes cercanos a la costa, e incluso en zonas más profundas, la velocidad de degradación está determinada por factores como la accesibilidad microbiana, condiciones de temperatura y pH.



Otro de los problemas asociados a su descomposición es la generación de gases (H_2S , CO_2 , CH_4), sólidos volátiles (materia orgánica) y una alta demanda química de oxígeno (DQO). Adicionalmente, diferentes compuestos disueltos como el manitol, ácidos grasos volátiles, alcoholes y polifenoles pueden ser liberados de sus tejidos. Las bacterias que se involucran en estos procesos generalmente usan los productos para mantener su propio metabolismo (Forro 1987), mientras que algunos otros nutrientes o iones liberados pueden provocar eutrofización. De igual forma, el proceso aeróbico que convierte la materia orgánica (carbohidratos, proteínas y lípidos) en CO_2 y H_2O a través del hidrólisis bacteriana, ocurre a expensas del consumo de O_2 originando zonas anóxicas. Adicionalmente, el metano, que deriva de la descomposición (principalmente del manitol y del alginato) también puede resultar perjudicial para el entorno.

Para atenuar el impacto del sargazo en costas de Quintana Roo, se implementaron algunas acciones en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, entre ellas, en la parte microbiológica, se planteó la necesidad de evaluar la presencia de Enterobacterias que significaran riesgo de enfermedad y que estuvieran asociadas a la llegada de sargazo, sobre todo a playas de alto impacto turístico como lo son las playas de la costa de Quintana Roo. Al mismo tiempo, debido al impacto de la descomposición del sargazo en las costas de esas playas del Estado de Quintana Roo, se tomó en consideración el tratar de saber si el sargazo en descomposición pudiera tener algún impacto en los gases de efecto invernadero que a su vez tuvieran alguna aportación al cambio climático a nivel mundial.

I.1. Objetivos

1. Realizar colecta de muestras de sargazo vivo y en descomposición para evaluar la presencia de Enterobacterias de riesgo a la salud que pudieran afectar a los bañistas que tuvieran contacto con el sargazo.
2. Medición de gases de efecto invernadero (GEI) asociados a la descomposición de sargazo en playas de la costa del Estado de Quintana Roo.

II. METODOLOGÍA

La metodología general para cumplir con los objetivos planteados se presenta en el diagrama de la figura 2.

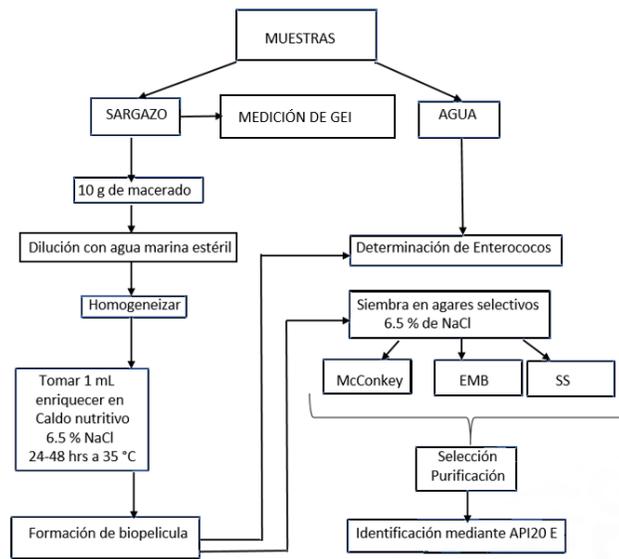


Figura 2. Diagrama general de la metodología general del proyecto.

II.1.- Puntos de colecta y programación de monitoreo en la costa del estado de Quintana Roo.

El recorrido durante las dos campañas de monitoreo para la colecta de sargazo y agua se observa en el mapa de la figura 3.

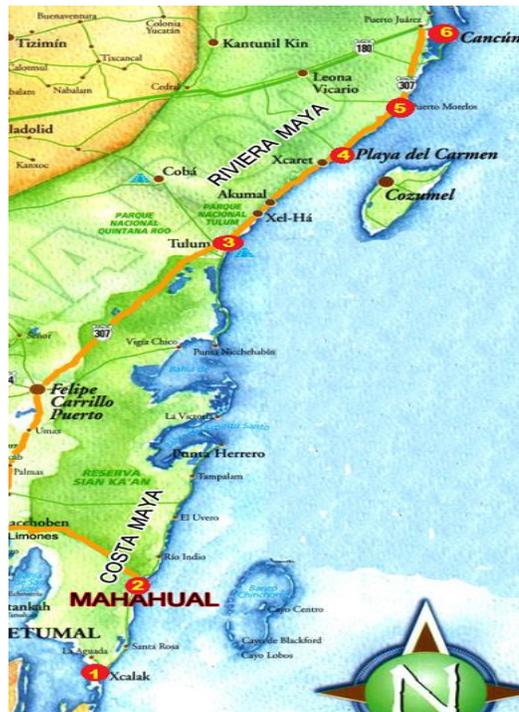


Figura 3. Puntos de colecta, 1. Xcalak, 2. Mahahual, 3. Tulum, 4. Playa del Carmen, 5. Puerto Morelos, y 6. Cancún

Se realizaron dos campañas de colecta de acuerdo a la tabla 1, la primera en agosto y la segunda en noviembre de 2019, durante las cuales se obtuvieron once muestras de agua y Sargazo en cada una de ellas.

Tabla 11. Geoposición de puntos de colecta y calendarización de los sitios de colecta de sargazo y agua.

Sitio de colecta	Geoposición de puntos de colecta	Agosto	Noviembre
		No. de muestras	No. de muestras
Xcalak	18°16'26.79"N 87°50'04.3"W 18°16'25.8"N 87°50'05.1"W	2	2
Mahahual	18°42'43.3"N 87°42'37.0"W 18°42'43.3"N 87°42'37.0"W	2	2
Tulum	20°12'35.7"N 87°25'48.8"W 20°12'35.64"N 87°25'49.08"W	2	2
Playa del Carmen	20°37'36.0"N 87°04'12.1"W 20°37'40.7"N 87°04'07.5"W	2	2
Puerto Morelos	20°50'51.8"N 86°52'29.9"W 20°50'58.3"N 86°52'25.4"W	2	2
Cancún	20°03'48.7"N 86°46'39.4"W	1	1

II.2. Toma de muestras de sargazo y agua

La metodología para la toma de muestras de agua y sargazo en los sitios previamente seleccionados, se realizó de acuerdo a la norma NOM-AA-003–1980. En las muestras de agua se determinaron los Enterococos fecales por el método de sustrato Cromogénico enmarcado en la normatividad en la NMX-AA-120-SCFI-2016. Para la búsqueda de enterobacterias presentes en sargazo se realizó por medio de agares selectivos adicionados con NaCl al 25 % para emular las condiciones de alta salinidad (figura 4).



Figura 4 Colecta de muestras de agua y sargazo

II.2.1.- Procedimiento para determinación de Enterococos en muestras de agua de los puntos de colecta de la costa de Quintana Roo.



II.2.2 CONDICIONES DE LA MUESTRA

Las muestras se ingresaron al laboratorio en frascos de vidrio de boca ancha color ámbar con tapón esmerilado o bolsas de plástico estéril debidamente etiquetadas y transportadas en hielo.

II. 2.2.3 INTERFERENCIAS

Si la muestra se incubaba accidentalmente durante más de 28 horas sin observación, rigen las siguientes pautas: la falta de fluorescencia al cabo de 28 horas es una prueba negativa válida; la presencia de fluorescencia al cabo de 28 horas constituye un resultado no válido.

II. 2.2.4 PRECAUCIONES

Se debe verificar que la muestra fue transportada al laboratorio de acuerdo a los procedimientos establecidos para los diferentes tipos de aguas.

Permitir que las muestras alcancen la temperatura ambiente antes del análisis.

Homogeneizar perfectamente las diluciones.

Agregar siempre el reactivo Enterolert al volumen correcto de muestra diluida después de hacer las diluciones.

Verifique que no se le formen burbujas en el dispositivo Quanti-Tray después de sellar la muestra.

Verifique que el equipo de incubación este a la temperatura adecuada.

Incubar antes de los 20 minutos de haber colocado el reactivo en las muestras.

Cuando se observen las muestras con lámpara de luz UV, apuntar el haz de luz en dirección contraria a los ojos y hacia la muestra.

II. 2.2.5 PROCEDIMIENTO

- Separar cuidadosamente un paquete del reactivo Enterolert.
- Golpear el paquete ligeramente para hacer que todo el polvo Enterolert se acumule en la parte inferior del paquete.
- Abrir el paquete y agregar el reactivo a una muestra de 100 mL de agua en un recipiente estéril.
- Cuando se trate de agua marina la muestra tiene que estar diluida por lo menos diez veces con agua dulce estéril. Por ejemplo, 10 mL de muestra con 90 mL de agua estéril.



- Para hacer las diluciones se utilizó agua estéril en lugar de agua tamponada. El Enterolert viene con su propio tampón.
- Agitar para disolver el reactivo junto con la muestra por completo
- Sostener en una mano el dispositivo Quanti – tray en posición vertical, con el lado de las celdas orientado hacia la palma.
- Apretar la parte superior del dispositivo a modo de doblarlo hacia la palma
- Abrir el dispositivo desprendiendo la lengüeta metálica del lado que contiene las celdas. Evite tocar el interior del metal o del dispositivo.
- Vierta la mezcla del reactivo y la muestra directamente dentro del dispositivo evitando tocar la lengüeta metálica. Golpear los pequeños pocillos 2 o 3 veces para eliminar posibles burbujas de aire. Dejar reposar la espuma.
- Colocar el dispositivo Quanti - tray lleno de muestra sobre el portadispositivo de goma del sellador Quanti - tray orientando el lado de las celdas (plásticas) del dispositivo hacia abajo de manera que quepa en el portadispositivo.
- Para el control de calidad en el laboratorio se incluyeron junto con la muestra un blanco (agua estéril), un control positivo y un control negativo con cepas tipificadas de ATCC (American Type Collection Culture), o de algún instituto de salud de referencia, así como un duplicado por cada lote de muestras a analizar.

Controles:	No ATCC	Resultado previsto
<i>Enterococcus faecium</i> (+)	29212	Fluorescencia
<i>Escherichia coli</i> (-)	25922	Ausencia de fluorescencia

Las muestras se incubaron por 24± 2 horas, a una temperatura de 41°C ± 0.5°C

Al cabo de las 24 ± 2 horas de incubación se leyeron los resultados colocando una lámpara con luz ultravioleta de 365 nm a una distancia de 5 pulgadas (13 cm) de la muestra, en un ambiente oscuro. La fluorescencia azul es indicio de la presencia de Enterococos. Ausencia de fluorescencia, negativo para la presencia de Enterococos.

Nota: El dispositivo de las charolas de cuantificación cuenta con 49 pozos grandes y 48 pozos pequeños.

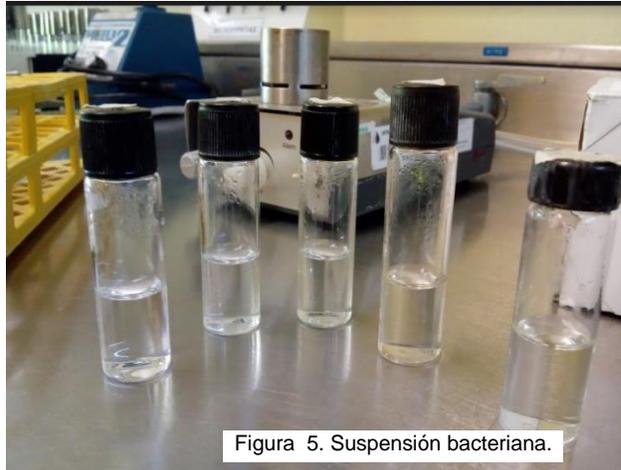
II.2.6 CÁLCULOS

Contar el número de celdas positivas que presenten fluorescencia azul y utilizar la tabla del NMP para obtener el número de Enterococos presentes y multiplicar por la dilución que corresponda.

III. IDENTIFICACIÓN DE ENTEROBACTERIAS MEDIANTE MINIGALERIAS API 20E.

Para proceder a realizar la identificación de las bacterias, mediante las pruebas bioquímicas miniaturizadas API 20E, se preparó una solución salina disolviendo 0.850 mg de NaCl en 100 mL de agua destilada. A partir de esta solución se prepararon suspensiones de 5 mL con una muestra de las colonias aisladas y puras (Figura 5).

Cada tubo o pocillo de las pruebas API 20E se inoculan con la suspensión bacteriana pura. Al agregar esta suspensión se rehidratan los medios y durante la incubación, las bacterias, mediante su metabolismo, producen cambios de color espontáneos o al añadir reactivos para revelar.



A continuación, se presentan los pasos a realizar para la preparación de la prueba API 20E:

- Con una pipeta Pasteur estéril, tomar una muestra de la suspensión de bacterias y llenar los tubos o pocillos de acuerdo a la prueba a realizar, ya sea Gram + o Gram - . Cabe aclarar que cada tubo o pocillo tiene un tubo y una cúpula, parte aerobia.
- Los tubos marcados con un recuadro, llenarlos hasta la cúpula (Ver figura 6).
- Los tubos subrayados, llenarlos hasta el borde del tubo y adicionar dos o tres gotas de aceite mineral.
- El resto de los tubos llenarlos antes del borde con la suspensión.
- Cubrir la charola e incubar a 35°C por 18 a 24°C. (Ver figura 6).



Figura 6. Inoculación con suspensión bacteriana y tiras de API en incubación



Tras la incubación, se anotan los resultados que no requieren ser revelados. Esto debido a que determinadas pruebas requieren ser reveladas mediante ciertos reactivos:

TDA: Añadir una gota de FeCl_3 10%

VP: Añadir una gota de reactivo 1 (KOH al 40%) y una gota del reactivo 2 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

IND: Añadir una gota de reactivo de Kovacs o de Dimetulamino-cinamaldehido.

Oxidasa: Añadir una gota del reactivo (tetrafenilendiamina).



III.1 Interpretación

La lectura de los resultados se lleva a cabo mediante una comparación de los cambios de color en los pocillos, con la ayuda de las tablas de lectura y anotando el resultado como positivo o negativo Tabla 2.

Tabla 2. Sustrato y reacciones asociadas para la interpretación de resultados.

Tubo o Test	Sustrato	Reacciones/enzima	Resultados	
			Negativo	Positivo
ONPG	Ortonitrofenol-Galactosa	Beta-galactosidasa	Sin color	Amarillo (1)
ADH	Arginina	Arginina deshidrolasa	amarillo	Rojo o naranja(2)
LDC	Lisina	Lisina descarboxilasa	amarillo	naranja
ODC	Ornitina	Ornitina descarboxilasa	amarillo	Rojo o naranja (2)
CIT	Citrato Sódico	Uso de citrato	Verde pálido/amarillo	Azul-verde/azul (3)
H ₂ S	Tiosulfato Sódico	Produccion de H ₂ S	Sin precipitado negro	Precipitado negro
URE	Urea	Ureasa	amarillo	Rojo o naranja
TDA	Triptofano	Triptófano desaminasa	Amarillo	marrón oscuro
IND	Triptofano	Producción de indol	amarillo	Anillo rojo
VP	Piruvato Sodico	Producción de acetoina (Voges-Proskauer)	Sin color	Rosado/rojo
GEL	Gelatina de Kohn	Gelatinasa	Sin difusión	Difusión pigmento negro
GLU	Glucosa	Fermentación/oxidación de glucosa (4)	Azul/azul verdoso	amarillo
MAN	Manitol	Fermentación/oxidación de manitol (4)	Azul/azul verdoso	amarillo
INO	Inositol	Fermentación/oxidación de inositol (4)	Azul/azul verdoso	amarillo
SOR	Sorbitol	Fermentación/oxidación de sorbitol (4)	Azul/azul verdoso	amarillo
RHA	Ramnosa	Fermentación/oxidación de ramnosa (4)	Azul/azul verdoso	amarillo
SAC	Sacarosa	Fermentación/oxidación de sacarosa (4)	Azul/azul verdoso	amarillo
MEL	Melibiosa	Fermentación/oxidación de melibiosa (4)	Azul/azul verdoso	amarillo
AMY	Amigdalina	Fermentación/oxidación de amigdalina (4)	Azul/azul verdoso	amarillo
ARA	Arabinosa	Fermentación/oxidación de arabinosa (4)	Azul/azul verdoso	amarillo

- (1) Un amarillo muy pálido debe considerarse como positivo.
- (2) Un color naranja después de 24 horas de incubación debe considerarse como negativo.
- (3) La lectura debe hacerse en la cúpula (aerobiosis).
- (4) La fermentación empieza en la parte inferior de los tubos, la oxidación empieza en la cúpula.



Figura 7. Tiras API reveladas

Del conjunto de reacciones y resultados se obtienen un perfil numérico de 7 cifras (Ver figura 7 y 8) y para obtener este perfil, a cada pocillo se le dará el valor 0, 1, 2 o 4, de acuerdo a los siguientes criterios:

- Si la reacción es negativa se pone 0
- Si la reacción es positiva se pone 1: si el primer pocillo de un triplete, 2 si es el segundo, 4 si es el tercero.
- Se suman los valores de cada triplete, con las sumas de los siete tripletes se obtiene un código de 7 cifras.

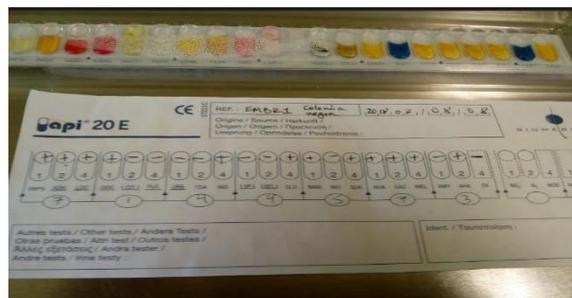


Figura 8. Código de siete dígitos resultante

Una vez obtenido este código, se busca en la tabla de identificación mediante el software informático apiweb™

IV. CUANTIFICACIÓN DE GASES EFECTO INVERNADERO

La determinación de gases efecto invernadero se realizó empleando el analizador de gases Testo 350 (figura 9).



Figura 9. Equipo Testo 350 para medición de gases efecto invernadero

El analizador de gases TESTO 350 es un equipo de muestreo portátil, calificado para el trabajo de campo así como para mediciones en fuentes fijas. Funciona mediante sensores electroquímicos los cuales poseen una membrana permeable del gas que se va a medir; una vez que atraviesa se dirige al electrodo en donde se produce una reacción química que origina la formación de iones, los mismos que migran a través de una solución electrolítica al electrodo contador produciendo una segunda reacción química, a la vez, esta segunda reacción provoca una corriente que es equivalente a la concentración del gas que se está midiendo (Carzola, 2013, en López Nata, 2017).

Los gases se determinaron empleando un recipiente de volumen de gas conocido el cual se colocó de manera fija en un área determinada del sargazo en descomposición y después de 15 minutos de atrapar los gases se introdujo la sonda de medición previo ajuste a cero y se determinó el valor de los gases durante 30 segundos (Figura 10).





Figura 10. Colecta de gases durante 15 min, introducción de la sonda y pantalla desplegada en el equipo Testo 350.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cumplir con el primer objetivo de este proyecto en el ámbito microbiológico asociado a sargazo en los puntos geoposicionados en cada sitio de playa de las costas de Quintana Roo, se llevó a cabo la metodología antes descrita de la cual se obtuvieron los siguientes resultados en la primera campaña (tabla 3) y en la segunda campaña (tabla 4):

Tabla 3. Bacterias aisladas al interior de las muestras de sargazo y Enterococos encontrados en al agua de mar en la primera campaña de colecta.

SITIO	PUNTO	PRIMERA CAMPAÑA	
		Bacterias aisladas al interior de sargazo	ENTEROCOCOS EN AGUA MARINA
Xcalak	XCALAK 1 XSD	<i>Shewanella putrefaciens</i>	<1
	XCALAK 2 XSD	<i>Shewanella putrefaciens</i>	<1
Mahahual	MAHAHUAL 1 MSD	ninguna	<1
	MAHAHUAL 2 MSD	ninguna	<1
Tulum	TULUM TSD1	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<1
	TULUM TSD2	ninguna	<1
Playa del Carmen	PLAYA DEL CARMEN PCSD1	<i>Shewanella putrefaciens</i>	<1
	PLAYA DEL CARMEN PCSD2	<i>Shewanella putrefaciens</i>	<1
Puerto Morelos	PUERTO MORELOS PMSD1	<i>Shewanella putrefaciens</i>	<1
	PUERTO MORELOS PMSD2	ninguna	<1
Cancún	PLAYA DELFINES	ninguna	<1

Tabla 4. Bacterias aisladas al interior de las muestras de sargazo y Enterococos encontrados en al agua de mar en la segunda campaña de colecta.

SITIO	PUNTO	SEGUNDA CAMPAÑA	
		Bacterias aisladas al interior de sargazo	ENTEROCOCOS EN AGUA MARINA
Xcalak	XCALAK 1 XSD	<i>Shewanella putrefaciens</i>	11
	XCALAK 2 XSD	<i>Shewanella putrefaciens</i>	<1
Mahahual	MAHAHUAL 1 MSD	ninguna	<1
	MAHAHUAL 2 MSD	ninguna	4,24 X 10 ²
Tulum	TULUM TSD1	<i>Shewanella putrefaciens</i>	1
	TULUM TSD2	ninguna	<1
Playa del Carmen	PLAYA DEL CARMEN PCSD1	<i>Shewanella putrefaciens</i>	3
	PLAYA DEL CARMEN PCSD2	<i>Shewanella putrefaciens</i>	12
Puerto Morelos	PUERTO MORELOS PMSD1	<i>Shewanella putrefaciens</i>	2
	PUERTO MORELOS PMSD2	ninguna	<1
Cancún	PLAYA DELFINES	ninguna	<1

Como puede apreciarse en la tabla 3, solamente en la primera campaña se aisló en el primer punto de Tulum la bacteria *Pseudomonas aeruginosa*, esta bacteria se ha encontrado que es una de las que demuestran una alta resistencia a los bioactivos antibacterianos que se encuentran en el Sargazo, lo cual puede explicar el porqué es la única bacteria potencialmente dañina por contacto o ingesta en bañistas.

La otra bacteria presente en casi todas las muestras de sargazo en descomposición tanto en la primera como en la segunda campaña, fue *Shewanella putrefaciens*, esta bacteria está asociada a la descomposición de peces en las aguas marinas. En dicha descomposición se pueden encontrar bacterias de los géneros: *Pseudomonas*, *Moraxella*, *Acinetobacter*, *Shewanella*, *Flavobacterium*, *Vibrionaceae*, *Clostridium*, *Lactobacillus* y *Corynebacterium*.

Este fenómeno (figura 11), pudo ser observado en algunos puntos de las zonas de descomposición de sargazo lo cual puede explicar la aparición de esta bacteria en los aislamientos de la mayoría de los puntos de colecta.



Figura 11. Peces muertos en las zonas de descomposición de sargazo.

En cuanto al análisis de los Enterococos como bioindicadores de contaminación de agua de uso recreativo (NMX-AA-120-SCFI-2016. Que establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas). Se analizaron las muestras de la primera campaña y aun cuando se encontró mayor concentración de sargazo en descomposición en todos los puntos de la primera campaña no hubo presencia de este género bacteriano.

Para la segunda campaña de colecta, aun cuando la presencia de sargazo fue menor en las playas monitoreadas, si fue posible detectar $4,24 \times 10^2$ Enterococos NMP/100mL. Si consideramos que el límite máximo permisible es de 100 Enterococos NMP/100 mL esta playa monitoreada en Mahahual no se consideraría apta para uso recreativo. Es importante mencionar que en éste punto hay una concentración de lanchas tanto de pescadores como de los que ofrecen el servicio de buceo.

En relación a la determinación de gases efecto invernadero, los cuales en un principio consideramos que quizá no pudiésemos medirlos (debido a su probable baja concentración). Sin embargo, lo que encontramos fue que

en todos los puntos existe desprendimiento de gases principalmente metano y en algunos puntos ácido sulfhídrico. En la siguiente figura 12 se presentan los resultados de los gases emitidos por el sargazo.

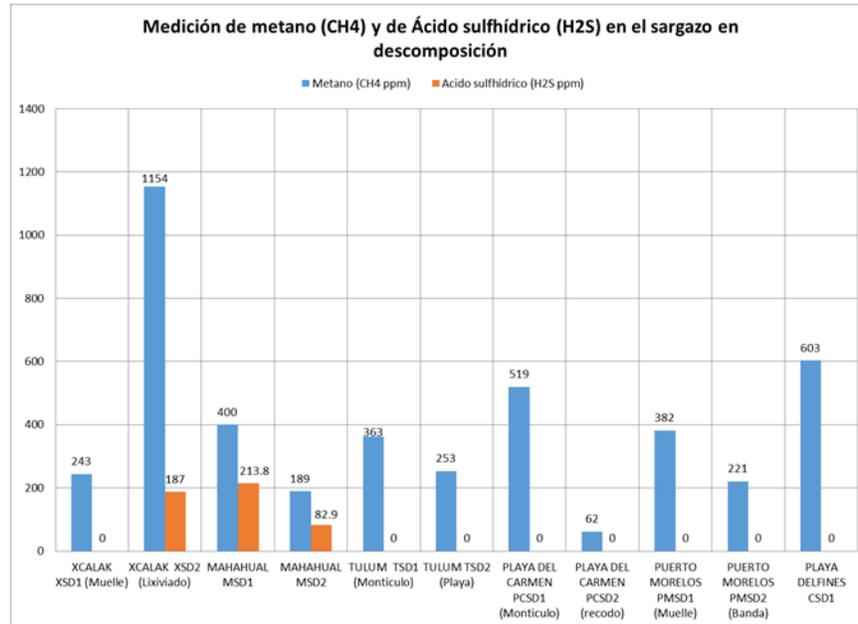


Figura 12. Concentración de metano y ácido sulfhídrico en sargazo en descomposición.

VI. CONCLUSIONES

En las dos campañas de colecta solo fue posible encontrar en la primera *Pseudomonas aeruginosa* solo en un punto y en la mayoría de los casos en ambas campañas el aislamiento fue de *Shewanella putrefaciens*.

Lo anterior nos permite concluir que bajo las condiciones del presente estudio no se encontró gran diversidad bacteriana asociada al interior de las células de *Sargassum sp.*

En la segunda campaña de colecta se encontró una de las playas no apta para recreación debido a la presencia de 414 Enterococos NMP/100mL, la norma permite un límite máximo permisible de 100 Enterococos NMP/100mL.

En relación a la generación de gases de efecto invernadero fue evidente (figura 12), que el sitio en donde más metano se midió fue en Xcalak (1,154 ppm).

- El segundo punto donde se observó un alto grado de generación de gases efecto invernadero (metano) fue en el punto de Playa delfines en Cancún (603 ppm).
- El tercer sitio con generación de metano fue en uno de los puntos de Playa del Carmen (519 ppm).
- Después de los anteriores puntos en los que se determinó desprendimiento de metano continúan en orden Mahahual (400 ppm), Puerto Morelos (382 ppm) y Tulum (363 ppm).



- En cuanto a la generación de ácido sulfhídrico (H₂S), el mayor valor de generación fue encontrado en uno de los puntos de Mahahual (215 ppm).
- Consideramos que el impacto de los gases efecto invernadero y la presencia de bacterias potencialmente riesgosas para la salud de los bañistas en estas zonas de gran afluencia, deben ser caracterizados con un seguimiento de mayor número de campañas de colecta para que estas conclusiones parciales puedan ser reafirmadas.

REFERENCIAS

- Baker DM, Jordán-Dahlgren E, Maldonado MA, Harvell CD (2010) Sea fan corals provide a stable isotope baseline for assessing sewage pollution in the Mexican Caribbean. *Limnology and Oceanography* 55:2139–2149. doi: 10.4319/lo.2010.55.5.2139
- Camargo A. Julio y Alvaro Alonso. (2006). Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environmental International* 32 (2006) 831 - 849.
- CARICOMP, Methods manual. 2001. Manual of methods for mapping and monitoring of physical and biological parameters in the coastal zone of the Caribbean. CARICOMP. Data Management Center Centre for Marine Sciences University of the West Indies Mona, Kingston Jamaica and Florida Institute of Oceanography University of South Florida St. Petersburg, Florida U.S.A.
- Carmona Juan C ., Diana M Bolívar, Luis A Giraldo. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* Vol. 18:1, pp. 49-63.
- Carruthers TJB, Van Tussenbroek BI, Dennison WC (2005) Influence of submarine springs and wastewater on nutrient dynamics of Caribbean seagrass meadows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64:191–199. doi: 10.1016/j.ecss.2005.01.015
- Colombini, I., Chelazzi, L., Gibson, R. N., & Atkinson RJA (2003) Influence of marine allochthonous input on sandy beach assemblages. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 115–159.
- Coston-Clements L, Center LR, Hoss D, Cross F (1991) Utilization of the Sargassum habitat by marine invertebrates and vertebrates: a review. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-296 32.
- Davis TA, B. Volesky and R.H.S.F. Vieira. (2000). Sargassum seaweed as biosorbent for heavy metals. *Water Research* Vol 34, No. 17, pp. 4270-4278.
- Davis TA, Llanes F, Volesky B, Mucci A (2003) Metal selectivity of Sargassum spp. and their alginates in relation to their α-L-guluronic acid content and conformation. *Environmental Science and Technology* 37:261–267. doi: 10.1021/es025781d
- Doyle E, Franks J (2015) Sargassum Fact Sheet. In: Gulf and Caribbean Fisheries Institute. pp 1–4
- Dawes, C.J. and A.C. Mathieson. (2008). The seaweeds of Florida. Gainesville: University Press of Florida. 592 p.
- EPA-822-B-01-003 October 2001. Nutrient criteria technical guidance manual. Estuarine and coastal marine water.
- Fernández Fernando, Carlos José Boluda, Jesús Olivera, Luis Alberto Guillermo, Bolivar Gómez, Emmanuel Echavarría y Aris Mendis Gómez. (2017). Prospective elemental analysis of algal biomass bcumulated at



- the Dominican Republic shores during 2015. *Revista Centro Azúcar* Vol 44, No.1, Enero-Marzo 2017 (pp 11-22)
- Frazier J, Webster R, Linton T, Hill BN (2013) The Use of Satellite Imagery in the Monitoring and Forecasting of Sargassum Seaweed in the Caribbean Phase II of the Sargassum Early Advisory System.
- Forro J. 1987. Microbial degradation of marine biomass. En Bird KT, Benson PH (eds) *Seaweed Cultivation for Renewable Resources*. Elsevier, Amsterdam: 305-325.
- Gavio B, Rincón-Díaz MN, Santos-Martínez A (2014) MASSIVE QUANTITIES OF PELAGIC Sargassum ON THE SHORES OF SAN ANDRES ISLAND, SOUTHWESTERN CARIBBEAN. *Acta Biológica Colombiana* 20:239–241. doi: 10.15446/abc.v20n1.46109
- Gower J, Young E, King S (2013) Satellite images suggest a new Sargassum source region in 2011. *Remote Sensing Letters* 4:764–773. doi: 10.1080/2150704X.2013.796433
- Holdt SL, Kraan S (2011) Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology* 23:543–597.
- Johnson DR, Ko DS, Franks JS, et al (2013) The Sargassum Invasion of the Eastern Caribbean and Dynamics of the Equatorial North Atlantic. *Proceed 65th GCFI* 102–103.
- Lorena Marcela García-Hoyos, Andrés Franco-Herrera, Jeimmy Samanta Ramírez-Barón y Diego Alejandro López-Cerón. (2010). Dinámica Océano-Atmósfera y su influencia en la biomasa fitoplanctónica, en la zona costera del departamento del Magdalena, Caribe Colombiano. *Boletín Investigaciones Marino Costeras* 39(2). 307-335. ISSN 0122-9761
- López Nata Elen Virginia. (2017). Caracterización de variables fisicoquímicas en lodos y emisiones gaseosas de un colector de camal en la comunidad Pato. Tesis de Licenciatura en Ciencias Químicas. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Littler, D.S. and M.M. Littler. (2000). *Caribbean reef plants*. Washington: OffShore Graphics. 542 p.
- Lapointe BE, West LE, Sutton TT, Hu C (2014) Ryther revisited: Nutrient excretions by fishes enhance productivity of pelagic Sargassum in the western North Atlantic Ocean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 458:46–56. doi: 10.1016/j.jembe.2014.05.002
- Maria Teresa M. de Széchy, Patrícia M. Guedes, Maria Helena Baeta-Neves and Eduardo N. Olivera. (2012). Verification of *Sarassum natans* (Linnaeus) Gaillon (Heterokontophyta: Phaeophyceae) from the Sargasso Sea off the coast of Brazil, western Atlantic Ocean. *Check List* 8(4): 638-641. DOI: 10.15560 / 8.4.638
- Maurer AS, De Neef E, Stapleton S (2015) Sargassum accumulation may spell trouble for nesting sea turtles. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13:394–395. doi: 10.1890/1540-9295-13.7.394
- Metcalfe CD, Beddows PA, Bouchot GG, et al (2011) Contaminants in the coastal karst aquifer system along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Environmental Pollution* 159:991–997. doi: 10.1016/j.envpol.2010.11.031
- Moreira Á, Alfonso G (2014) Inusual arribazón de Sargassum fluitans (Børgesen) Børgesen en la costa centro-sur de Cuba/Unusual drift of Sargassum fluitans (Børgesen) Børgesen in the southern-central coast of Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas* 33:17–20.



- Moser ML, Lee DS (2012) Foraging over Sargassum by Western North Atlantic Seabirds. *The Wilson Journal of Ornithology* 124:66–72. doi: 10.1676/11-067.1
- NOAA (2016) State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2015.
- Plaza Cazón Josefina. (2012). Remoción de metales pesados empleando algas marinas. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Ciencias Exactas. pp. 166.
- Rodríguez-Martínez R, Van Tussenbroek BI (2017) Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa. In: Floreciminetos Algales Nocivos en México. p 438
- Schell J, Goodwin D, Siuda A (2015) Recent Sargassum Inundation Events in the Caribbean: Shipboard Observations Reveal Dominance of a Previously Rare Form. *Oceanography* 28:8–10. doi: 10.5670/oceanog.2015.70
- Schneider, C.W. and R.B. Searles. (1991). *Seaweeds of the southeastern United States: Cape Hatteras to Cape Canaveral*. Durham: Duke University Press. 553 p.
- Smetacek V, Zingone A (2013) Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature* 504:84–88.
- Swedish EPA. Environmental quality criteria: coasts and seas. Report, vol. 5052. Stockholm, Sweden: Swedish Environmental Protection Agency; 2000
- Valiela I, McClelland J, Hauxwell J, et al (1997) Macroalgal blooms in shallow estuaries: Controls and ecophysiological and ecosystem consequences. *Limnology and Oceanography* 42:1105–1118. doi: 10.4319/lo.1997.42.5_part_2.1105
- Taylor, W.R. (1960). *Marine algae of the eastern tropical and subtropical coasts of the Americas*. Ann Arbor: The University of Michigan Press. 870 p.
- Van Tussenbroek BI, Hernández Arana HA, Rodríguez-Martínez RE, et al (2017) Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin* 122:272–281. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.06.057
- Wang M, Hu C, Barnes BB, et al (2019) The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science* 365:83–87. doi: 10.1126/science.aaw7912
- Yokoyama S, Jonouchi K, Imou K (2007) Energy Production from Marine Biomass : Fuel Cell Power Generation Driven by Methane Produced from Seaweed. *Engineering and Technology* 22:320–323.
- Zodape ST (2001) Seaweeds As a Biofertilizer. *Journal of Scientific and Industrial Research* 60:378–382.