

Caracterización y Análisis de Metales Pesados para el Adecuado Manejo del Sargazo que Arriba a las Costas del Estado de Quintana Roo

Alberto Pereira Corona
Patricia Fragoso Servón
Benito Prezas Hernández
Carlos Alberto Niño Torres
Joshua Sérvulo Baeza

Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

María del Pilar Blanco Parra
Cátedra CONACYT, México

Approved: 08 June 2026
Posted: 10 June 2026

Copyright 2026 Author(s)
Under Creative Commons CC-BY 4.0
OPEN ACCESS

Cite As:

Pereira Corona, A., Fragoso Servón, P., Prezas Hernández, B., Niño Torres, C.A., Sérvulo Baeza, J., & Blanco Parra, M.P. (2026). *Caracterización y Análisis de Metales Pesados para el Adecuado Manejo del Sargazo que Arriba a las Costas del Estado de Quintana Roo*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.6.2026.p104>

Resumen

Se presentan resultados del análisis de metales pesados en muestras de *S. fluitans* y *S. natans* colectadas vivas en mar abierto frente a Quintana Roo, México. La disponibilidad, entendida como cantidades de sargazo que arriban a la costa, su temporalidad y variación espacial son grandes. Se detectaron altas concentraciones de arsénico, cromo, cadmio, plomo y níquel, entre otros metales, a lo largo de los dos años de muestreo. Los resultados muestran amplias variaciones interanuales y escasas variaciones espaciales. Las dos especies de sargazo muestran diferencias significativas en su capacidad para absorber y retener metales pesados. *S. fluitans* aparenta una mayor capacidad de absorción de metales pesados que *S. natans*. Las variaciones brutas en la concentración de metales pesados de las masas de sargazo están relacionadas con la composición relativa por especies de dichas comunidades. Las concentraciones de metales pesados en todos los casos están por encima de los máximos admitidos por normas nacionales e internacionales para consumo humano o contacto. Se recomienda limitar los

usos de este material hasta tener estudios más precisos sobre el comportamiento de las arribazones y sobre el contenido de metales pesados que transportan. Se recomienda la realización de estudios tendientes a evaluar la posibilidad de remoción de los metales pesados contaminantes antes del uso del material para procesos o usos que pudieran transferir estos contaminantes a otros ecosistemas y sitios en la geografía de Quintana Roo.

Palabras clave: México; manejo ambiental; contaminación; metales pesados; Sargassum spp.

Characterization and Analysis of Heavy Metals for the Proper Management of Sargassum Arriving on the Coasts of the State of Quintana Roo

Alberto Pereira Corona
Patricia Fragoso Servón
Benito Prezas Hernández
Carlos Alberto Niño Torres
Joshua Sérvulo Baeza

Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

María del Pilar Blanco Parra
Cátedra CONACYT, México

Abstract

Results of the analysis of heavy metals in samples of *S. fluitans* and *S. natans* collected alive in the open sea off Quintana Roo, Mexico, are presented. The availability, understood as quantities of sargassum that arrive at the coast, its temporality, and spatial variation are great. High concentrations of arsenic, chromium, cadmium, lead, and nickel, among other metals, were detected throughout the two years of sampling. The results show wide interannual variations and few spatial variations. The two species of Sargassum show significant differences in their ability to absorb and retain heavy metals. *S. fluitans* appears to have a higher absorption capacity for heavy metals than *S. natans*. The gross variations in the concentration of heavy metals in the masses of sargassum are related to the relative composition by species of said communities. The concentrations of heavy metals in all cases are above the maximum allowed by national and international standards for human consumption or contact. It is recommended to limit the use of this material until more precise studies have been made on the behavior of the banquettes and on the content of heavy

metals they transport. Studies are recommended to evaluate the possibility of removing contaminating heavy metals before using the material for processes or uses that could transfer these contaminants to other ecosystems and sites in the geography of Quintana Roo.

Keywords: Mexico; environmental management; pollution; heavy metals; *Sargassum* spp.

Introduction

Normalmente en las costas del mar Caribe se presentan recales de diferentes materiales vegetales tanto de origen marino como terrestre. Las arribazones masivas de sargazo (*Sargassum spp.*) que se han venido manifestando en todo el mar Caribe, son un fenómeno relativamente reciente y sin precedentes (Franks et al., 2011; Gower et al., 2013), ya que las cantidades en las cuales se han venido presentando desde 2011 han sido particularmente elevadas.

La acumulación de grandes cantidades de estos materiales en las playas ha afectado las actividades de toda la población costera del mar Caribe, particularmente aquella que depende de las actividades turísticas (Rodríguez-Martínez et al., 2020, 2016), las cuales se ven impactadas no solamente desde el punto de vista estético de los recursos costeros, sino incluso sanitario ya que no conocemos con exactitud la composición y naturaleza de los materiales que se están acumulando en las playas (Langin, 2018) Y su efecto a largo plazo sobre la población y los ecosistemas.

El sargazo que está llegando a las playas presenta varias incógnitas relacionadas con las características fisiológicas de los organismos que conforman estas masas. Se ha reportado por diferentes autores que las distintas especies de sargazo tienen capacidades diferentes de fijación de metales pesados y absorción de otros contaminantes (Leyte-Vidal et al., 2019; Fernández et al., 2017; Rodríguez-Martínez and van Tussenbroek, 2017; Marinho-Soriano et al., 2006; Davis et al., 2003).

Las masas de sargazo que llegan a las costas del estado de Quintana Roo se componen principalmente de dos especies *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* (Rodríguez-Martínez and van Tussenbroek, 2017), acompañadas de otras algas verdes, rojas y pardas que se desarrollan como epífitas sobre las especies principales.

La proporción particular de estas dos especies es variable sin embargo el conocimiento de la afinidad y contenido de diversos metales pesados permitiría con una evaluación de la proporción de estas especies en futuras arribazones, determinar con un grado aceptable de certidumbre la cantidad y proporción aproximada de los metales pesados contaminantes que

estarán recalando en la playa para así, inferir sus efectos tanto en el ecosistema como en la población que habita sitios cercanos a la playa.

Desde el punto de vista de la salud de la población, el sargazo puede ocasionar daños como enfermedades respiratorias, lesiones cardiovasculares y problemas neurológicos principalmente por el ácido sulfhídrico que se desprende al descomponerse de manera anaerobia en las cantidades que se acumulan en las playas (Resiere et al., 2018), las concentraciones de metales pesados que se han registrado pueden causar una variedad de efectos perniciosos sobre la salud de la población y los ecosistemas (Volesky and Holan, 1995).

El sargazo que está llegando a las playas, además del efecto visual en el paisaje, puede amenazar especies en peligro como las tortugas marinas (Maurer, A.S. et al., 2015) o causar daños importantes o incluso erradicar las praderas de pastos marinos en la zona costera (Rodríguez-Martínez et al., 2019).

Se asume que las aportaciones de metales pesados a las aguas oceánicas provienen principalmente de polvos del Sahara y aportes de los ríos Congo, Amazonas y Orinoco y escorrentías de la porción norte de Sudamérica y Centroamérica.

El objetivo de este trabajo realizado fue cuantificar el contenido de algunos metales pesados y metaloides en las especies *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* de las arribazones de algas que recalán en las costas de Quintana Roo para la elaboración de criterios para el manejo seguro de estos materiales.

Materiales y Métodos

Las metodología para la determinación del contenido de metales pesados en este material de origen orgánico puede separarse en cuatro aspectos fundamentales:

- Muestreo
- Análisis de composición
- Procesamiento
- Análisis elementales

En el caso particular del sargazo que arriba a las costas de Quintana Roo se tomó en cuenta que estas masas flotantes están compuestas por dos especies principalmente, pero cuentan con gran cantidad de epibiontes y especies asociadas. Por lo tanto, para nuestro caso, se derivan dos muestras una por cada especie que interesa caracterizar, así como un número variable de submuestras constituidas por diferentes especies de algas y otros organismos asociados. Los muestreos se realizaron en cinco campañas a lo largo de dos años.

Muestreo

Para efectos del diseño de muestra se tomaron en cuenta la necesidad de caracterizar las masas de sargazo que arriban a zonas de la costa que se encuentran cercanas a sitios de importancia turística como primer elemento; subordinados a este elemento se consideraron entre otros, el comportamiento de la corriente marina del Gran Caribe, las características batimétricas de la costa en los puntos que rodean estos sitios de interés turístico, las denominadas corrientes alineadas a la costa (de la Lanza-Espino, 2001) así como aspectos de logística involucrados en la toma de muestras y su transporte hasta el laboratorio.

Se consideraron 11 sitios de trabajo que coinciden parcialmente con las zonas donde la Secretaría de Medio Ambiente de Quintana Roo (SEMA), lleva a cabo limpieza de estos materiales en las playas, en la Tabla 1 se muestran los sitios de trabajo y el número de transectos requeridos de acuerdo con los datos del volumen de recogida del material en las playas.

Tabla 1. Zonas de trabajo de recogida en playa por parte de SEMA y número de transectos para cada una de ellas.			
Sección	Municipio	Localidad	Transectos
1	Othón P. Blanco	Xcalak	2
		Mahahual	3
2	Tulum	Tulum	4
3	Solidaridad	Akumal	1
4	Solidaridad	Puerto aventuras	1
5	Solidaridad	Playacar	2
6	Solidaridad	Playa del Carmen entre muelles	1
7	Solidaridad	Playa del Carmen de muelle Ultramar a Punta Maroma	2
8	Puerto Morelos	Playa la Ceiba a playa Pescadores	3
9	Benito Juárez	Punta Nizuc-Punta Cancún	3
10	Cozumel	de Playa Mezcalito - Playa Rasta	4
11	Isla Mujeres	Isla Mujeres	3
Total			29

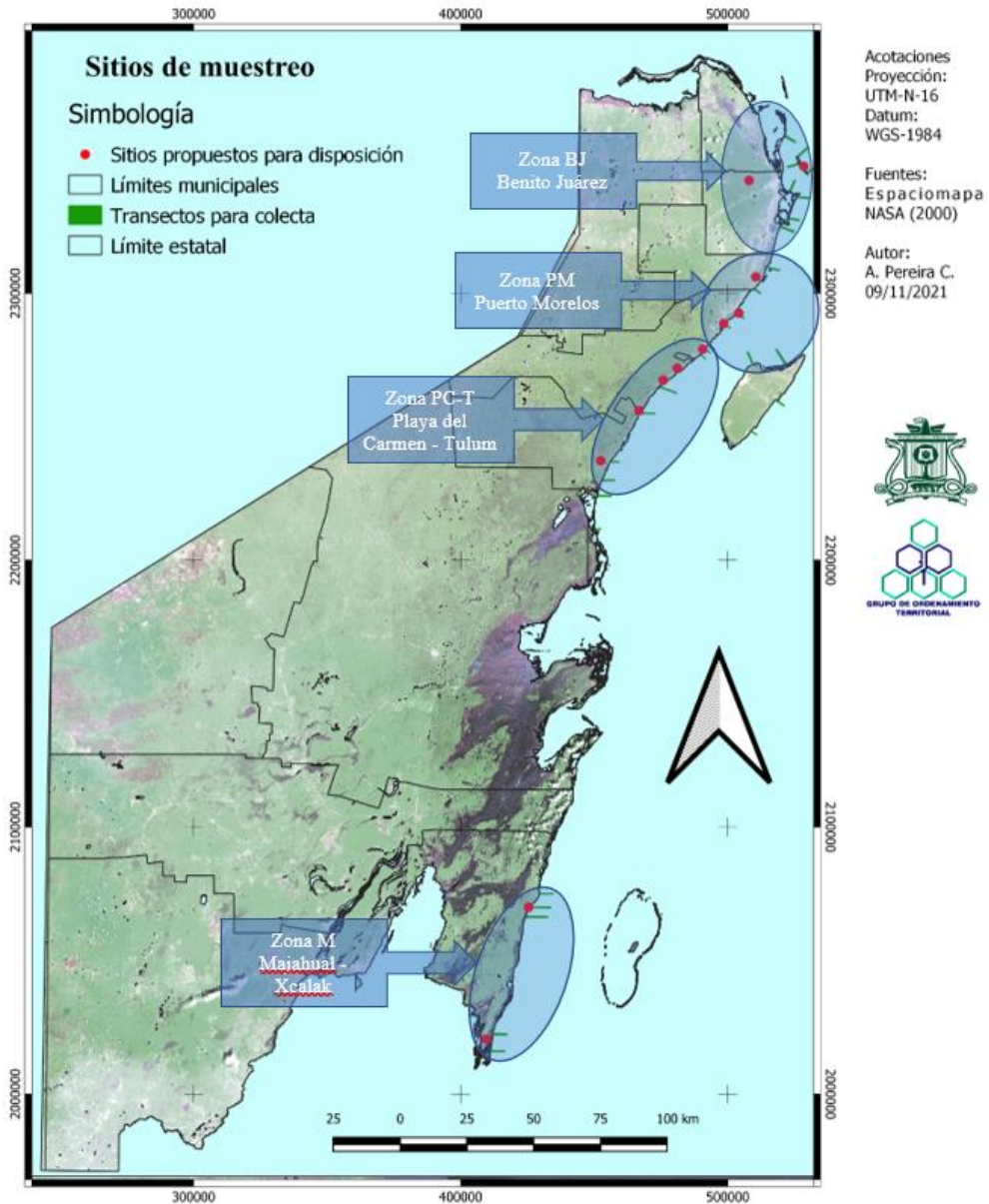


Figura 1: Sitios de muestreo

En la figura uno se muestran los sitios utilizados por la SEMA para el acopio y disposición de los materiales colectados tanto en mar abierto como en las playas, así como la ubicación aproximada de los transectos que sirvieron como eje para las zonas de muestreo (**BJ** - Zona Benito Juárez, **PM** - Zona Puerto Morelos, **PC-T** – Zona Playa del Carmen a Tulum y **M** – Zona Majahual a Xcalak), por la naturaleza dinámica del ambiente las locaciones son aproximadas, los sitios específicos se vieron influidos por factores como

las corrientes, viento, y estado del mar en las fechas en las que se hizo la colecta.

Se tomaron muestras compuestas en cada sitio de colecta, es decir, cada una compuesta por alícuotas colectadas en al menos cinco puntos alrededor de cada transecto en cada sitio, de modo que cada muestra es representativa del volumen total del material circundante al punto específico de colecta.

Cada alícuota puede considerarse como réplica de una sola muestra. Estas alícuotas son tomadas en mar abierto a distancias de la costa superiores a los 1.5 km. Las muestras fueron tomadas usando instrumentos libres de metales para evitar contaminaciones por muestreo.

De la muestra compuesta resultante se tomaron cinco kilogramos (5.0 kg) que fueron guardados en una bolsa plástica gruesa procurando eliminar el aire y sellada para ser transportada en obscuridad para evitar alteración de la muestra por efecto de la luz.

Las bolsas fueron etiquetadas usando marcador permanente con la localidad exacta de colecta (coordenadas geográficas con GPS) hora de colecta, estado de la mar y otras observaciones pertinentes, así como los datos del colector. Cada muestra se documentó con al menos una fotografía del sitio de colecta y otra del manchón del cual fue tomada la alícuota.

Las muestras fueron transportadas al laboratorio conservadas en hielo o en refrigeración, no congelación, para su procesamiento y análisis.

Se hizo un muestreo con la menor diferencia temporal posible en todos los sitios de muestreo y una repetición una semana (siete días) después para replicar la muestra y reducir la variabilidad de los resultados por cambios en la composición del material que arriba.

Una vez en el laboratorio las muestras fueron preparadas en contenedores y sometidos a un proceso de refrigeración que permitiera bajar su temperatura hasta 2 °C para garantizar su conservación hasta el momento de ser procesadas.

Análisis de composición específica

Las muestras fueron separadas manualmente en sus componentes macroscópicos para poder analizar por separado las dos especies de sargazo *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* principalmente, y posteriormente la flora y fauna acompañante.

Para llevar a cabo esta separación se dio la capacitación específica al personal para la identificación de estas especies en fresco, se capacitaron cinco profesores y cuatro alumnos de licenciatura.

Como resultado de la separación de estas masas de sargazo en sus especies componentes se obtuvo un total de 808 muestras de las dos especies de sargazo.

Procesamiento

El procesamiento de cada una de las muestras una vez separadas las especies que la forman se hizo en condiciones de baja temperatura para evitar su deterioro. Las submuestras de sargazo y flora y fauna acompañantes fueron pesados en una balanza granataria con precisión de 0.1 gramos previamente al proceso de secado.

Para el secado se usó una corriente de aire frío y seco para reducir al mínimo los cambios en composición. El secado de los materiales tomó alrededor de 180 horas, obteniéndose una masa libre de humedad a temperatura ambiente. Este material fue pesado para obtener el porcentaje de humedad que pierden estos materiales durante su secado al aire en condiciones naturales.

Se procedió al secado final en una estufa a 70 °C por 24 h. Este material fue nuevamente pesado en una balanza con exactitud de 0.01 gramos, para reportar la humedad total de acuerdo con los estándares para análisis bromatológicos.

El material así obtenido fue desmenuzado mecánicamente hasta partículas de tamaño menor a 0.5 mm con el fin de prepararlo para los análisis posteriores.

Análisis elementales

Todos los análisis de cada una de las submuestras fueron realizados por triplicado, los datos que se presentan son los valores promedio y sus desviaciones estándar agrupados por campaña y especie.

Los análisis se hicieron con métodos estandarizados de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC) INTERNATIONAL y mantienen los estándares de la Environmental Pollution Agency (EPA) y de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) para la determinación de metales pesados y metaloides en materiales orgánicos de diferente naturaleza.

Las muestras fueron procesadas para determinar la presencia de metales pesados u otros componentes elementales que pudieran representar un riesgo sanitario durante el manejo del material. Las determinaciones incluyeron Cobre (Cu), Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Arsénico (As), Cromo (Cr), Cadmio (Cd) y Níquel (Ni) y en lo posible Fósforo (P) y Boro (B).

La detección y cuantificación de los metales se llevó a cabo en un extracto producido por digestión ácida en 10 ml de agua regia (HNO₃-HCl) en proporción 9:1 y acelerada en un digestor de microondas MARSX-6 A 160 libras/pulgada de presión y 180°C. La especificación de la marcha fue una rampa de calentamiento de 20 minutos, sostenimiento de 20 minutos y rampa de enfriamiento de 30 minutos.

Posteriormente los digestos fueron diluidos a 50 ml con agua desionizada de conductividad menor a 0.01 microsiemens equivalente a una resistividad de 20-22 Megaohms.

Las determinaciones de contenido de metales se hicieron con un espectrómetro de absorción atómica Thermo-Scientific ICE-3500 con capacidad para técnicas de flama y de horno de grafito con sensibilidad máxima de 0.1 partes por billón usando lámparas de cátodo hueco monoelementales para evitar la interferencia de armónicas entre los elementos.

Resultados

Los resultados obtenidos se presentan para la determinación de la composición por especies, los contenidos de humedad de las muestras colectadas y las concentraciones de metales pesados medidas en cada caso.

Análisis de composición específica

Con la finalidad de obtener la composición global promedio de la masa de sargazo se determinaron las proporciones entre las dos especies de sargazo, tanto en peso húmedo como en peso seco; los resultados se presentan en la tabla 2.

Proporciones	Muestra inicial			Campaña 1			Campaña 2			Campaña 3			Campaña 4		
	<i>natans</i>	<i>fluitans</i>	<i>fluitans</i> / <i>natans</i>	<i>natans</i>	<i>fluitans</i>	<i>fluitans</i> / <i>natans</i>	<i>natans</i>	<i>fluitans</i>	<i>fluitans</i> / <i>natans</i>	<i>natans</i>	<i>fluitans</i>	<i>fluitans</i> / <i>natans</i>	<i>natans</i>	<i>fluitans</i>	<i>fluitans</i> / <i>natans</i>
Húmedo	2030	14828	1:0.14	39545	2938	1:13.46	38901	14393	1:2.70	110000	14840	1:7.41	76662	11645	1:6.58
Seco	419	2758	1:0.15	5885	499	1:11.79	24152	9419	1:2.56	14613	939	1:15.56	14557	2014	1:7.23
Estufa	402	2637	1:0.15	5841	490	1:11.92	23994	9369	1:2.56	14607	931	1:15.69	13714	2007	1:6.83

Fuente: Elaboración propia con datos generados y obtenidos en este trabajo

La relación de composición como se puede apreciar de la tabla es variable y depende en apariencia de la época del año, de las condiciones del tiempo atmosférico, así como de otros factores que pueden estar modificando las tasas de reproducción de las especies en condiciones naturales, aunque en general se aprecia que hay dominancia de *S. natans* sobre *S. fluitans* en la composición global de las masas.

Procesamiento

Cada una de las submuestras fue separada con la finalidad de llevar a cabo el resto de los análisis sobre material relativamente homogéneo, separando ambas especies de sargazo, flora y fauna acompañante para su posterior procesamiento.

Todas las fracciones de sargazo fueron procesadas como se indica en la metodología y se presentan los resultados promedio de contenido de humedad con sus respectivas desviaciones estándar en la tabla 3, en la cual se puede apreciar que *S. natans* tiene un contenido de humedad total ligeramente menor que *S. fluitans* en todas las muestras tomadas para este trabajo.

De los resultados es posible afirmar que con un proceso de secado al aire independientemente del volumen se pierde aproximadamente el 80% de la masa total en agua que es lixiviada o evaporada, resultando en un material con escasamente un dos o 3% del total de su masa constituido por agua estructural.

Tabla 3. Análisis de humedad total.												
Humedad		Muestra inicial		Campaña 1		Campaña 2		Campaña 3		Campaña 4		
		<i>S. natans</i>	<i>S. fluitans</i>	<i>S. natans</i>	<i>S. fluitans</i>	<i>S. natans</i>	<i>S. fluitans</i>	<i>S. natans</i>	<i>S. fluitans</i>	<i>S. natans</i>	<i>S. fluitans</i>	
	n	9	9	30	30	55	55	100	100	70	70	
Humedad	Aire	X	79.36%	81.33%	79.77%	80.88%	80.49%	80.84%	86.48%	85.53%	81.22%	80.80%
		□	0.45%	1.13%	25.14%	27.61%	0.73%	0.04%	9.44%	6.43%	2.98%	18.72%
	Estufa 70 °C	X	82.65%	85.05%	80.36%	82.24%	81.02%	81.27%	86.51%	86.21%	81.96%	81.05%
		□	0.12%	1.03%	23.15%	24.10%	1.02%	0.57%	8.96%	6.07%	2.51%	14.25%
Fuente: Elaboración propia con datos generados y obtenidos en este trabajo												

Análisis elementales

La selección de los elementos a medir se centró en algunos de los metales pesados y metaloides que pudieran tener efectos nocivos sobre la salud, el conjunto de elementos analizados no es exhaustivo, pero representa un aporte significativo para definir inicialmente la inocuidad o toxicidad de este material para diferentes usos. La tabla 4 muestra las cantidades de metales pesados y metaloides registradas en promedio con base en el total de muestras tomadas a lo largo de toda la costa de Quintana Roo en cada una de las cinco campañas, para cada uno de los 10 elementos cuantificados.

Tabla 4. Contenido promedio de metales pesados y metaloides en *S.natans* y *S. fluitans* total de muestras en todo Quintana Roo.

		<i>Sargassum fluitans</i>					<i>Sargassum natans</i>					<i>Turbinaria</i>
		2019	2020		2021		2019	2020		2021		<i>sp.</i>
		Octubre	Mayo	Septiembre	Junio	Septiembre	Octubre	Mayo	Septiembre	Junio	Septiembre	Junio
	Campaña	Inicial	I	II	III	IV	Inicial	I	II	III	IV	III
	Muestras	9	35	55	100	70	9	35	55	100	70	100
	N	3	25	52	55	69	3	35	58	100	71	13
Zn	X	14.89	10.27	6.64	9.23	3.27	18.07	10.04	7.45	8.05	3.94	26.59
mg/kg	s	0.79	7.97	6.58	3.14	1.57	7.24	2.81	3.88	3.03	1.69	26.08
Pb	X	7.7367	30.00	14.90	1.19	0.95	7.96	24.25	15.07	0.69	2.34	DLD
mg/kg	s	7.03	33.87	27.62	0.82	0.69	5.35	10.25	13.85	1.31	4.49	DLD
B	X	37.95	271.52	247.04			64.43	192.09	182.68			
mg/kg	s	27.91	149.70	264.89			10.96	87.90	92.20			
P	X	1904.76	1305.76	1298.73	1752.02		1172.05	1478.04	1073.13	1305.62		15842.60
mg/kg	s	451.38	471.46	438.16	1151.10		428.57	468.65	454.66	925.92		25271.93
Ni	X	134.52	13.84	12.42	16.10	11.90	204.19	12.50	11.29	13.96	9.97	163.06
mg/kg	s	141.02	9.70	6.96	12.03	1.85	151.34	3.63	3.21	16.37	2.47	185.57
Mn	X	14.99	26.93	28.49	22.94	30.31	17.37	33.56	32.52	16.79	30.27	39.67
mg/kg	s	1.20	7.27	5.46	10.69	5.90	3.78	8.91	7.32	5.99	7.34	35.35
Cu	X	1.16	8.09	6.08	7.62	3.87	3.81	8.23	6.77	6.38	5.01	82.54
mg/kg	s	1.65	10.59	7.62	7.85	0.84	2.30	2.95	2.95	3.72	1.30	93.43
Cr	X	2.26	46.22	23.27	4.87	2.52	1.86	37.23	23.04	3.82	2.01	62.36
mg/kg	s	0.80	44.04	37.70	3.66	2.08	1.01	12.85	20.15	3.42	0.75	76.74
Cd	X	1.17	4.39	2.84	1.35	1.48	1.25	3.86	2.96	1.22	1.79	12.95
mg/kg	s	0.49	3.87	3.07	0.62	0.24	0.14	1.15	1.44	0.31	0.35	15.89
As	X	222.38	809.41	454.31	186.00	138.64	183.05	697.79	471.38	141.67	175.13	2191.41
mg/kg	s	59.65	265.67	587.23	197.51	85.22	14.26	168.52	315.10	56.33	86.45	2534.19

Nota: DLD= Debajo del Límite de Detección de la técnica empleada.

Fuente: Elaboración propia con datos generados y obtenidos en este trabajo

Resalta la gran variabilidad en contenido de metales pesados entre muestreos y la escasa variabilidad en cada muestreo, el primero representado por los valores promedio de cada uno de los elementos en las distintas fechas de muestreo a lo largo de dos años y medio y el segundo evidenciado por la pequeña desviación estándar para cada uno de los datos.

En las tablas 5a y 5b se muestran los contenidos de metales pesados y metaloides por campaña y zona de muestreo para *S. fluitans* y *S. natans* (5a y 5b respectivamente), se puede apreciar el mismo comportamiento general descrito a partir de la Tabla 4 manifestando igualmente una gran variabilidad de una campaña de muestreo a otra y una escasa variabilidad dentro de la misma campaña o entre sitios.

Tabla 5a. Contenido promedio de metales pesados y metaloides en *S. fluitans* por campaña y por zona de muestreo. Total de muestras en todo Quintana Roo.

<i>Sargassum fluitans</i>																					
		2019					2020					2021									
		Octubre					Septiembre					Junio					Septiembre				
Campaña		Inicial					II					III					IV				
Muestras		9					55					100					70				
N		3					52					55					69				
Zona		PM					Estado BJ PM PC-T					Estado BJ PM PC-T M					Estado BJ PM PC-T M				
Zn mg/kg	X	14.9	10.3	9.3	7.5	16.3	6.6	9.3	7.5	10.4	4.8	9.2	10.3	7.6	9.5	8.7	3.3	4.6	2.3	2.1	3.2
	s	0.8	8.0	4.3	2.8	13.2	6.6	4.3	2.8	1.2	7.9	3.1	2.0	0.9	2.2	5.0	1.6	1.9	0.4	0.5	1.1
Pb mg/kg	X	7.7	30.0	26.8	17.3	55.9	14.9	26.8	17.3	31.4	7.3	1.2	1.1	1.5	0.9	1.2	1.0	1.2	1.1	0.8	0.6
	s	7.0	33.9	19.4	10.5	55.4	27.6	19.4	10.5	7.7	33.0	0.8	0.7	0.7	0.9	0.9	0.7	0.8	0.8	0.4	0.4
B mg/kg	X	38.0	271.5	229.0	147.7	541.7	247.0	229.0	147.7	288.3	281.0										
	s	27.9	149.7	204.5	52.3	575.6	264.9	204.5	52.3	111.0	329.6										
P mg/kg	X	1904.8	1305.8	1584.3	1297.5	1511.2	1298.7	1634.2	1095.6	1342.0	1247.5	1752.0	1333.3	1871.8	2223.8	2135.1					
	s	451.4	471.5	354.2	436.1	247.7	438.2	297.1	415.7	341.1	523.5	1151.1	653.5	907.2	725.4	1740.8					
Ni mg/kg	X	134.5	13.8	14.0	9.8	20.3	12.4	14.0	9.8	13.5	12.6	16.1	13.9	14.5	14.8	21.6	11.9	11.3	13.5	12.7	11.1
	s	141.0	9.7	7.1	3.0	15.3	7.0	7.1	3.0	1.5	8.2	12.0	1.5	3.4	7.1	22.2	1.9	1.7	1.4	0.5	1.7
Mn mg/kg	X	15.0	26.9	23.9	28.4	29.1	28.5	23.9	28.4	24.9	30.7	22.9	20.3	20.3	21.8	30.1	30.3	25.6	34.4	34.7	30.1
	s	1.2	7.3	4.7	5.6	10.6	5.5	4.7	5.6	5.2	4.3	10.7	2.1	4.6	4.6	18.6	5.9	7.8	3.5	1.8	2.0
Cu mg/kg	X	1.2	8.1	6.6	5.9	16.6	6.1	6.6	4.3	9.2	6.0	7.6	7.6	6.0	6.2	9.7	3.9	4.2	3.6	2.8	4.2
	s	1.7	10.6	3.4	4.4	16.7	7.6	3.4	6.5	2.3	9.2	7.9	9.2	2.0	1.9	9.6	0.8	0.8	0.5	0.5	0.8
Cr mg/kg	X	2.3	46.2	43.4	30.0	77.4	23.3	43.4	30.0	45.8	10.3	4.9	3.6	4.3	4.8	7.2	2.5	3.1	2.7	2.4	2.0
	s	0.8	44.0	30.8	10.7	71.1	37.7	30.8	10.7	8.9	43.3	3.7	0.8	1.4	2.5	6.2	2.1	3.5	0.5	0.4	1.2
Cd mg/kg	X	1.2	4.4	4.1	3.1	7.0	2.8	4.1	3.1	4.2	2.1	1.4	1.1	1.4	1.3	1.7	1.5	1.4	1.7	1.6	1.4
	s	0.5	3.9	2.4	1.1	6.4	3.1	2.4	1.1	0.7	3.7	0.6	0.2	0.5	0.7	0.9	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2
As mg/kg	X	222.4	809.4	664.1	632.5	1322.3	454.3	664.1	632.5	810.6	259.6	186.0	162.0	167.3	172.0	247.5	138.6	100.7	200.9	188.9	113.6
	s	59.7	265.7	375.2	135.5	1153.9	587.2	375.2	135.5	163.4	705.5	197.5	52.7	52.4	79.3	372.2	85.2	73.3	48.7	48.7	91.9

Fuente: Elaboración propia con datos generados y obtenidos en este trabajo

Usando como referencia los reportes existentes de contenidos de metales pesados en el sargazo y la muestra inicial tomada en 2019 se puede observar que para 2020 hay en general un incremento en los contenidos de metales pesados, en particular algunos especialmente nocivos como el plomo, el cromo y el arsénico, mismos que se encuentran ya para 2021 en concentraciones menores, aunque aún por encima de los valores permitidos por las NOM o las normas internacionales para materiales que tengan contacto con la población (Tabla 6).

Al comparar *S. fluitans* y *S. natans*, de acuerdo con los resultados obtenidos, hay una diferenciación en las capacidades intrínsecas a cada especie para la absorción de los diferentes metales pesados, *S. fluitans* muestra en casi todos los sitios y todas las campañas una concentración mayor de arsénico que la exhibida por *S. natans*, lo mismo se puede observar para plomo y cromo.

El comportamiento a lo largo del tiempo de los diferentes elementos respecto a los valores iniciales de referencia medidos en muestras de 2019, 2020 presenta un incremento en los contenidos de metales pesados en las masas de sargazo que arribaron a la zona costera de Quintana Roo, en tanto que 2021 representa un año con contenidos de estos mismos metales en menor cuantía para la mayoría de ellos. No obstante, los incrementos de los metales en la masa de sargazo son diferenciados.

Tabla 5b. Contenido promedio de metales pesados y metaloides en *S. natans* por campaña y por zona de muestreo. Total de muestras en todo Quintana Roo.

<i>Sargassum natans</i>																															
		2019					2020					2021																			
		Octubre					Mayo					Septiembre																			
Campaña		Inicial					I					II					III					IV									
Muestras		9					35					55					100					70									
N		3					35					9					10					15					24				
Zona		PM					Estado					BJ					PM					PC-T					M				
		Estado					BJ					PM					PC-T					M									
Zn mg/kg	X	18.1	10.0	9.1	8.3	11.6	7.5	9.1	8.3	12.2	3.5	8.0	9.6	7.6	9.8	6.1	3.9	4.8	3.8	3.4	3.5										
	s	7.2	2.8	1.4	1.9	3.1	3.9	1.4	1.9	2.3	0.4	3.0	2.2	4.5	1.9	1.3	1.7	2.4	1.3	1.5	0.4										
Pb mg/kg	X	8.0	24.2	21.5	16.8	30.4	15.1	21.5	16.8	32.2	1.3	0.7	1.1	0.7	0.7	0.8	2.3	3.2	0.9	4.3	0.9										
	s	5.4	10.2	5.7	8.1	9.6	13.8	5.7	8.1	7.2	1.1	1.3	0.8	0.6	0.4	0.7	4.5	4.1	0.7	7.6	1.0										
B mg/kg	X	64.4	192.1	166.4	104.7	261.2	182.7	166.4	104.7	272.3	165.3																				
	s	11.0	87.9	31.7	31.9	76.1	92.2	31.7	31.9	64.7	95.8																				
P mg/kg	X	1172.1	1478.0	1567.2	1386.2	1511.0	1073.1	1395.2	954.8	1145.4	1068.3	1305.6	1359.3	1312.6	1183.6	1306.4															
	s	428.6	468.7	309.5	402.7	436.0	454.7	254.7	214.8	357.6	402.2	925.9	638.9	1720.7	635.3	469.5															
Ni mg/kg	X	204.2	12.5	13.1	9.5	14.0	11.3	13.1	9.5	14.7	9.2	14.0	12.4	20.6	12.1	12.3	10.0	10.6	10.2	9.7	9.4										
	s	151.3	3.6	2.3	2.5	3.7	3.2	2.3	2.5	2.8	1.2	16.4	0.9	35.8	1.0	1.0	2.5	3.7	2.2	1.6	0.5										
Mn mg/kg	X	17.4	33.6	30.6	36.6	33.3	32.5	30.6	36.6	34.2	30.5	16.8	17.7	13.0	15.5	18.8	30.3	26.9	33.3	34.2	29.8										
	s	3.8	8.9	6.0	10.3	8.8	7.3	6.0	10.3	8.3	3.8	6.0	5.6	5.8	4.0	6.0	7.3	10.1	6.9	3.5	3.0										
Cu mg/kg	X	3.8	8.2	7.9	6.5	9.5	6.8	7.9	6.5	10.0	4.5	6.4	5.7	7.9	6.2	6.2	5.0	4.8	6.1	5.1	4.5										
	s	2.3	3.0	1.4	3.5	2.6	2.9	1.4	3.5	1.9	0.8	3.7	0.9	7.9	0.6	1.0	1.3	1.4	1.2	1.3	0.7										
Cr mg/kg	X	1.9	37.2	37.2	27.2	43.5	23.0	37.2	27.2	45.4	2.1	3.8	3.6	5.1	3.9	3.2	2.0	2.3	2.2	2.1	1.6										
	s	1.0	12.8	9.3	9.8	12.3	20.2	9.3	9.8	10.3	3.0	3.4	0.9	7.0	2.4	0.9	0.8	0.6	0.3	0.3	1.0										
Cd mg/kg	X	1.3	3.9	3.9	3.0	4.4	3.0	3.9	3.0	4.6	1.6	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2	1.8	1.9	1.9	1.9	1.6										
	s	0.1	1.1	0.9	0.8	1.1	1.4	0.9	0.8	0.9	0.3	0.3	0.2	0.5	0.2	0.3	0.4	0.4	0.1	0.3	0.3										
As mg/kg	X	183.1	697.8	608.7	611.7	801.7	471.4	608.7	611.7	816.8	145.5	141.7	137.8	183.2	138.7	122.2	175.1	183.7	213.6	194.5	135.2										
	s	14.3	168.5	153.0	114.4	144.5	315.1	153.0	114.4	136.4	134.3	56.3	40.9	90.6	41.6	28.4	86.5	93.8	17.3	59.0	98.4										

Fuente: Elaboración propia con datos generados y obtenidos en este trabajo

Discusión Generales

Se trata de un fenómeno con gran variabilidad en términos de la distribución espacial y temporal de las masas de sargazo que derivan con la corriente del Mar Caribe y las aguas alineadas a la costa (de la Lanza-Espino, 2001), así como las características de la carga de metales pesados de estas poblaciones de sargazo.

Con relación a la composición de las masas de sargazo se puede sintetizar diciendo que la variabilidad en la composición por especies hace que la masa general de sargazo se deba entender como heterogénea, tanto en la proporción de las especies que la componen como en todos los aspectos ligados a las diferencias que se han encontrado entre ambas especies en cuanto a contenido de metales pesados.

Metales pesados

En la Figura 2 se presentan los comportamientos diferenciados que ha sido posible detectar en las muestras procesadas en este proyecto y en ambas especies, por un lado la tendencia al incremento en los niveles de fósforo total en las masas de sargazo pueden estar asociados a los aportes terrígenos, no solo en la zona de origen del sargazo sino también a lo largo de toda la costa centroamericana del Mar Caribe, en particular para 2020 se registraron cuantiosas precipitaciones en esa región y podrían ser la fuente extraordinaria de fósforo vertido al Mar Caribe por ríos y otros escurrimientos.

Posteriormente en 2021 vemos que el contenido de fósforo mantiene la tendencia a incrementarse en tanto que los contenidos de arsénico tienden a disminuir, indicando que posiblemente el origen del arsénico se encuentra fuera de la cuenca del Mar Caribe y sujeto a una dinámica diferente en sus variaciones multianuales. Nuevamente, *S. fluitans* tiende a mostrar una variación y un incremento mayor que el exhibido por *S. Natans*.

El arsénico es un elemento de uso frecuente en la minería para la extracción de algunos metales, lo que asociaría la presencia en cantidades elevadas a la existencia de sitios con actividades preponderantemente mineras, lo cual no es la condición registrada para los países centroamericanos confirmando la suposición basada en el comportamiento multianual de un origen externo a la cuenca del Mar Caribe.

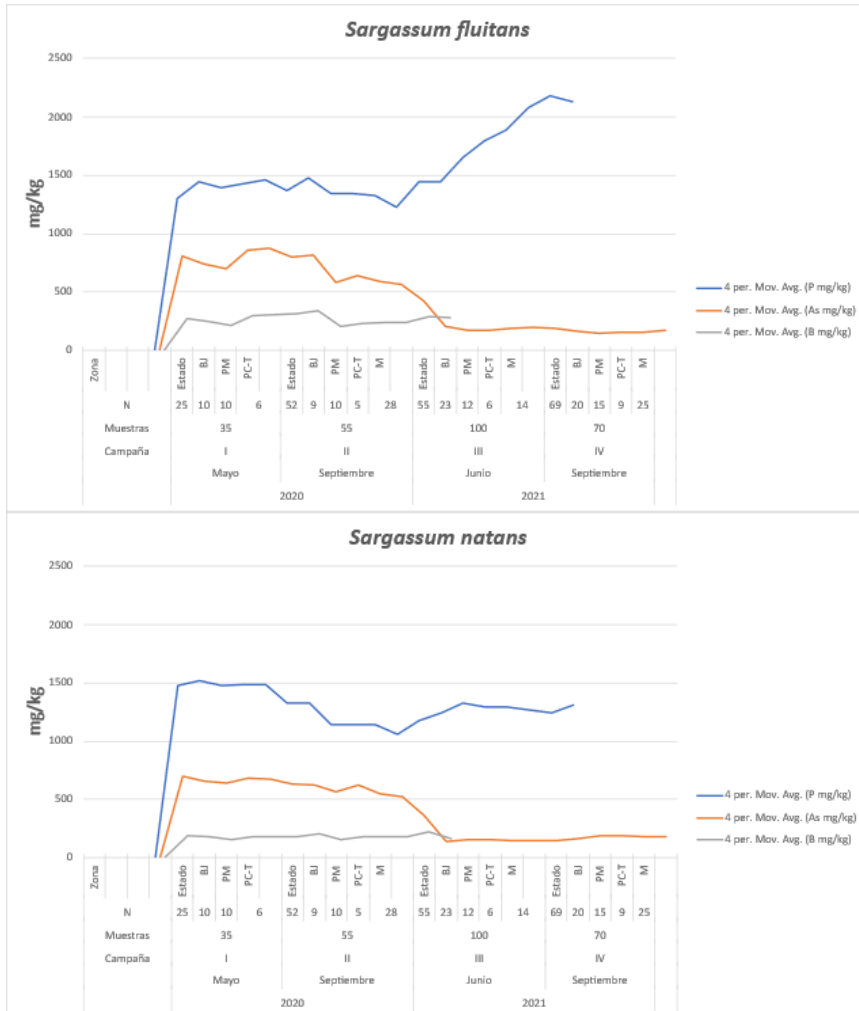


Figura 1 : Contenido de Fósforo, Boro y Arsénico por campaña y sitio para *S. fluitans* y *S. natans*.

En la Figura 3 se presenta la comparación entre *S. fluitans* y *S. natans* para varios de los metales pesados de interés como se puede observar de las curvas de tendencia desplegadas en las gráficas, el zinc, manganeso y plomo siguen un comportamiento similar al expuesto para el fósforo en la figura 2, correspondiendo a aportaciones terrígenas a lo largo de toda la parte continental de la cuenca del Mar Caribe.

En tanto que como el arsénico en la figura 2, los otros metales, cromo, cadmio y níquel tienen un comportamiento relativamente homogéneo que indica que no hay un aporte significativo de estos materiales a lo largo del periodo de desarrollo de las poblaciones de sargazo al interior de la cuenca del Mar Caribe indicando un origen exógeno a la cuenca.

Un análisis más fino basado en el comportamiento de elementos individuales nos permite ver algunos aspectos de la posible dinámica del sistema y sus transferencias.

Es de particular interés hacer notar que el incremento en los niveles de manganeso durante la segunda parte de 2021 se puede asociar con la temporada de lluvias en la zona de Centroamérica, además de hecho de que el manganeso es un aporte terrígeno típico ya que se encuentra asociado al arrastre de materiales de los suelos que limitan la cuenca.

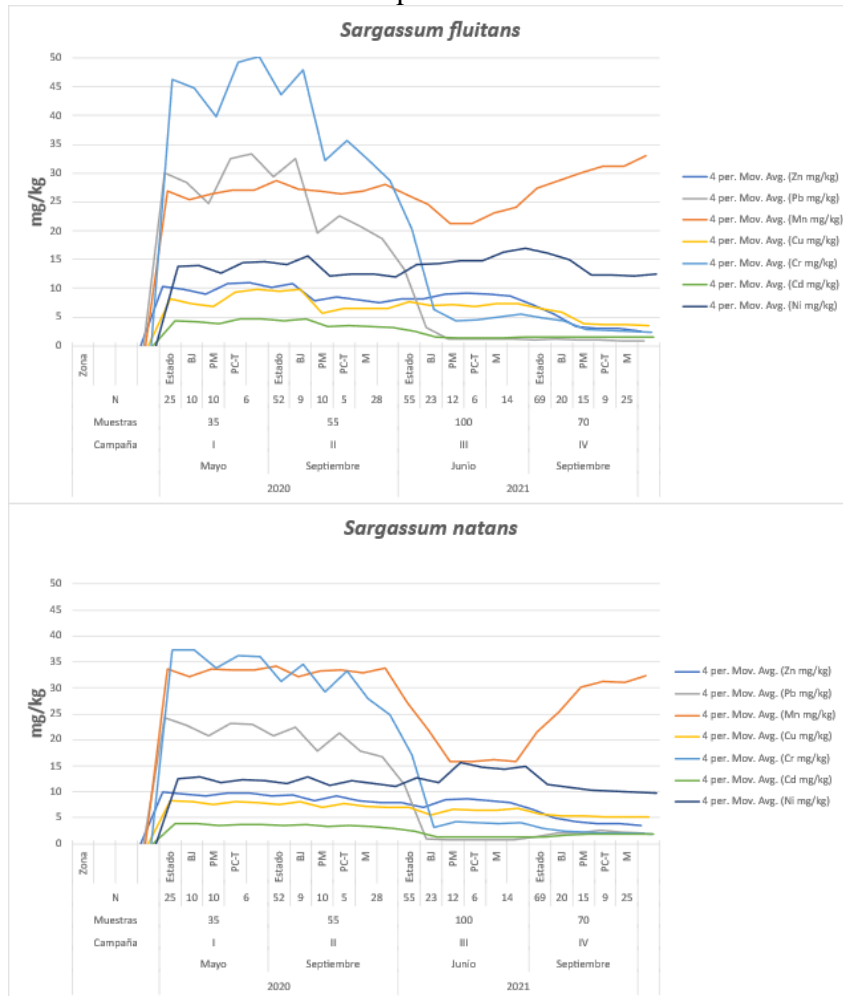


Figura 2: Contenido de Zinc, Plomo, Manganeso, Cobre, Cromo, Cadmio y Níquel por campaña y sitio para *S. fluitans* y *S. natans*

En la Figura 4 se puede ver el comportamiento comparativo del arsénico, en el cual destaca nuevamente la tendencia de *S. fluitans* a absorber o retener una mayor cantidad de metales pesados respecto a *S. natans*.

Se aprecia que la zona de Playa del Carmen presenta concentraciones mayores que el resto del norte del Estado, lo que corresponde con las mayores acumulaciones registradas durante 2020, indicando que una parte del material vertido a la columna de agua durante el proceso de descomposición es asimilada por el sargazo que aún se encuentra vivo y fisiológicamente funcional al acercarse a la costa del Estado.

Para el caso del plomo en la Figura 5 tenemos básicamente el mismo comportamiento que para el arsénico, lo que en primera instancia corroboraría el origen exógeno respecto a la cuenca para ambos elementos.

Ha lugar al comentario de que las pequeñas variaciones en el comportamiento del plomo respecto al del arsénico pueden deberse en parte a algunos aportes menores derivados del uso de algunos combustibles con plomo y otros productos que en los países centroamericanos no han sido prohibidos, es decir, a la aportación principalmente desde la costa centroamericana.

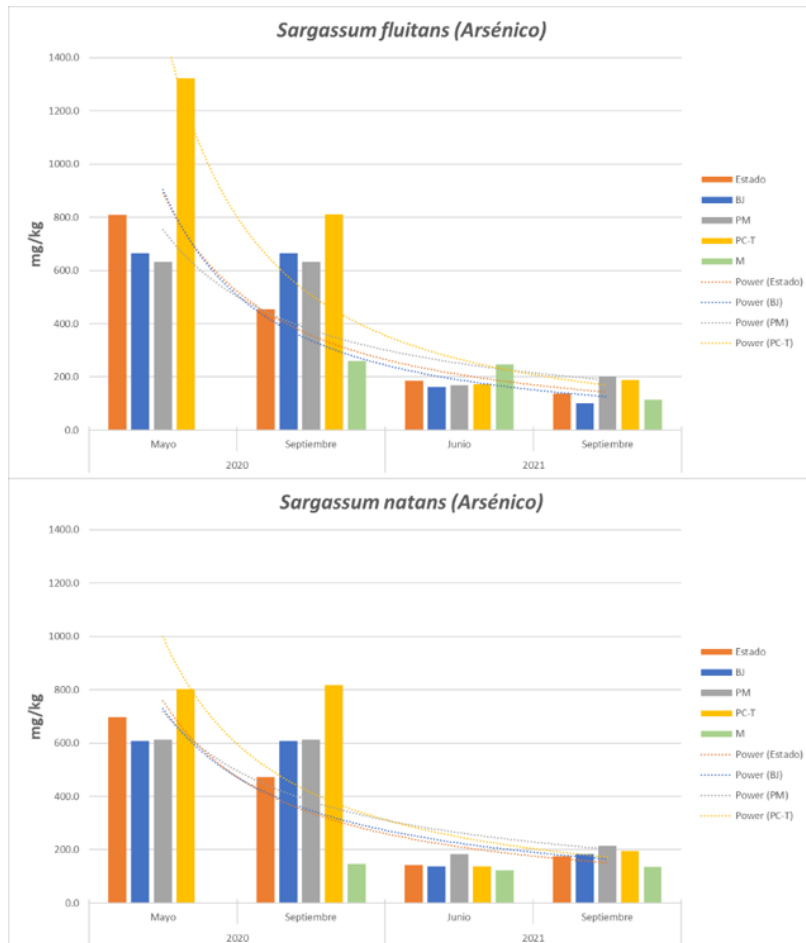


Figura 3: Comparación de los contenidos de arsénico por campaña y sitio para *S. fluitans* y *S. natans*.

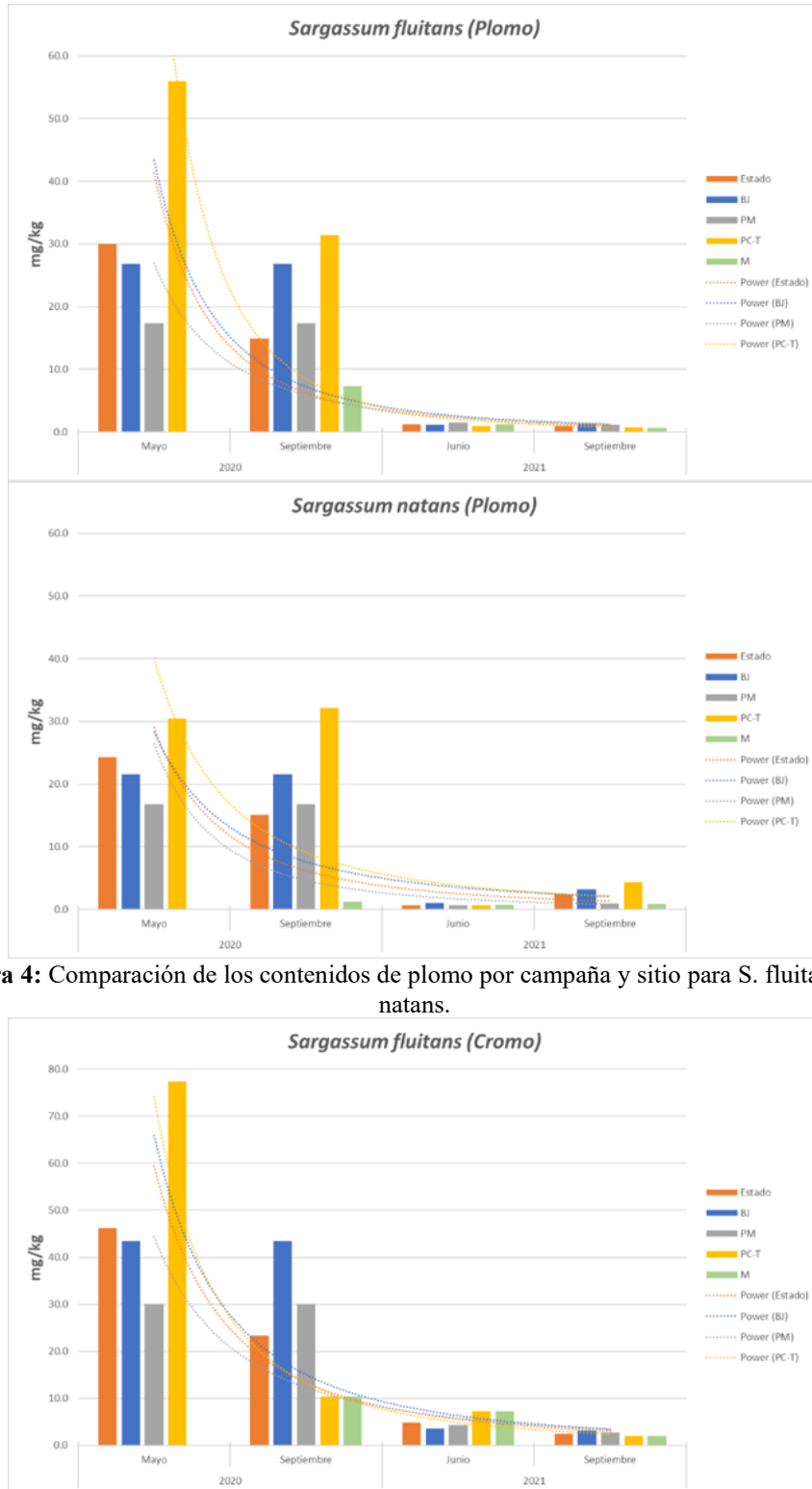


Figura 4: Comparación de los contenidos de plomo por campaña y sitio para *S. fluitans* y *S. natans*.

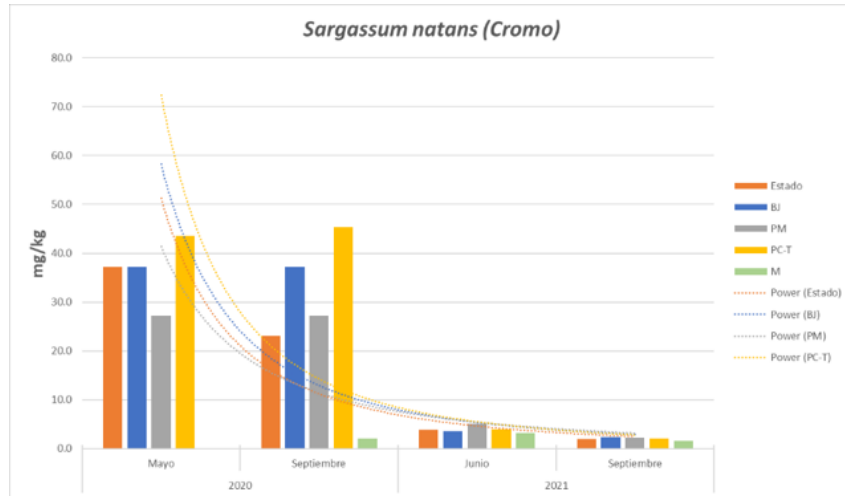


Figura 5: Comparación de los contenidos de cromo por campaña y sitio para *S. fluitans* y *S. natans*.

En el caso del cromo, el comportamiento general es semejante (Figura 6), sin embargo, las diferencias observadas en este caso pueden estar ligadas a que el cromo es un elemento con una mayor movilidad ambiental (Jiménez Verdesoto, 2012), algunas de sus formas movilizables son particularmente tóxicas y esa misma variabilidad en su comportamiento lo hace un elemento más permanente en el sistema en formas movilizables y por tanto contaminantes que pueden ser reabsorbidos desde la columna de agua conforme el sargazo se descompone.

El caso del cadmio y el níquel es ligeramente distinto ya que si bien muestran valores mínimos que apuntan a un origen exógeno, las variaciones en los contenidos promedio apuntan a un ligero efecto de los escurrimientos de la zona de la costa centroamericana y, dada la naturaleza y origen terrígeno de ambos elementos, podemos asociarlos con relativa certeza a residuos derivados de zonas urbanas, particularmente zonas costeras en el caso del níquel (Figura 8) o al uso de dispositivos electrónicos y baterías en el caso del cadmio (Figura 7).

En todos los casos analizados, el descenso en las concentraciones de los metales pesados en la masa de sargazo (medidos como fracción de biomasa seca) tiene un comportamiento similar en las concentraciones absolutas y concentraciones promedio, un comportamiento exponencial que corresponde a la disminución por la variación en las cantidades de sargazo que entran a la cuenca, descartando al menos en una primera instancia las variaciones en cuanto al crecimiento de la biomasa al interior de la cuenca.

Si bien la tendencia identificada hacia una reducción en la carga de metales pesados es significativa en las cantidades absolutas de varios de ellos, las concentraciones aún se encuentran en general por encima de los

valores máximos permitidos por las normas oficiales mexicanas y las normas internacionales para su uso en materiales con contacto humano (Tabla 6).

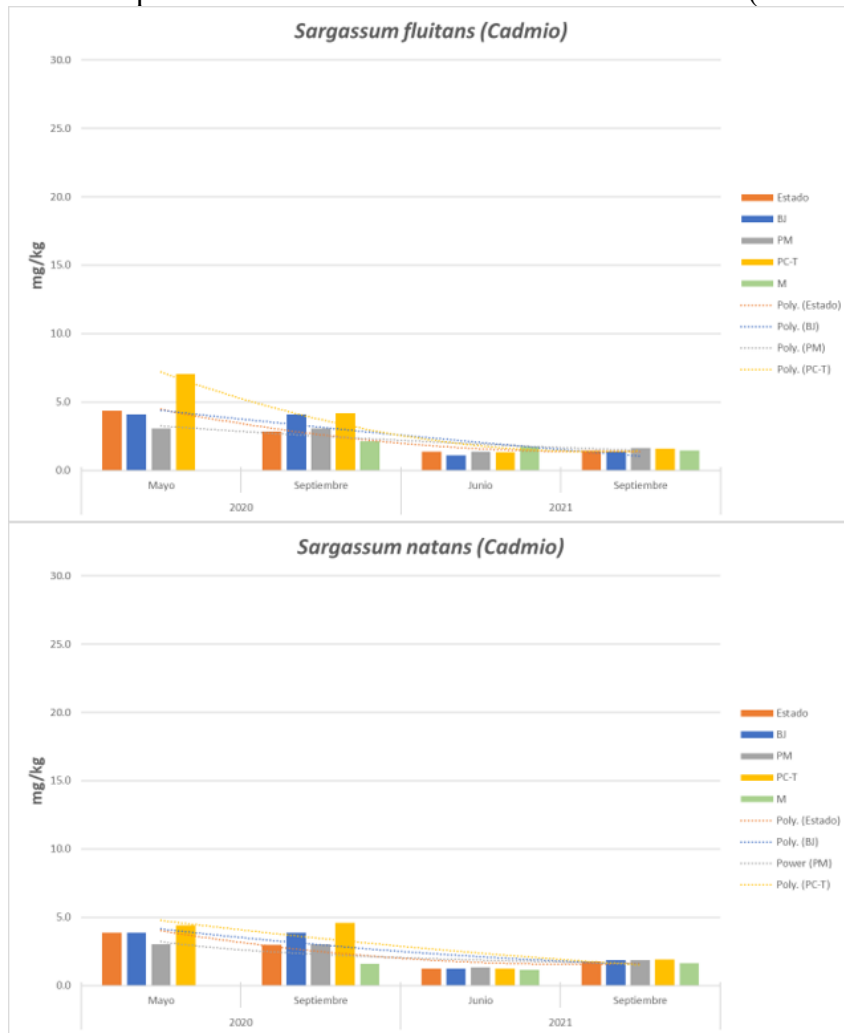


Figura 6: Comparación de los contenidos de cadmio por campaña y sitio para S. fluitans y S. natans.

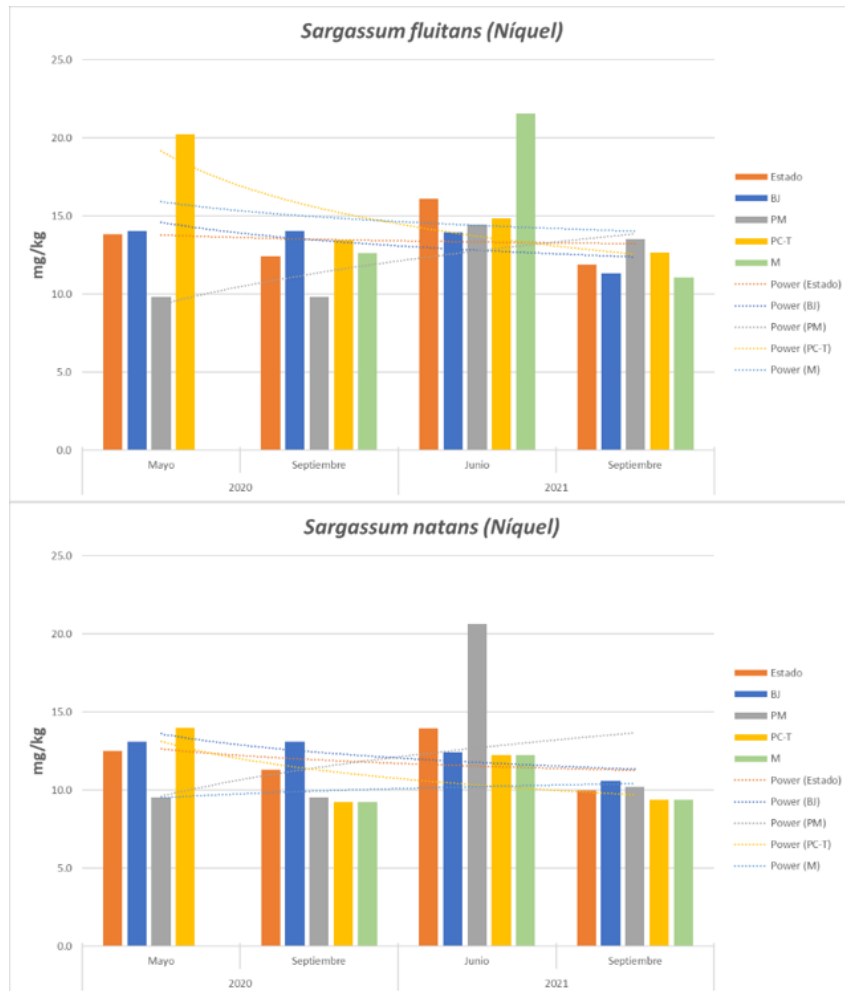


Figura 7: Comparación de los contenidos de níquel por campaña y sitio para *S. fluitans* y *S. natans*.

Con los elementos anteriores combinados se puede inferir cuáles elementos se encuentran asociados a un origen exógeno, es decir fuera de la cuenca y que por tanto no muestran variaciones significativas asociadas a las condiciones de las masas terrígenas asociadas a la cuenca separando de esta forma el arsénico, el cromo, el plomo y, el boro como elementos asociados a una absorción fuera de la cuenca, en tanto que el manganeso, el cobre, el zinc y el fósforo se asocian a una absorción influida por los escurrimientos hacia la cuenca del Mar Caribe.

De los resultados presentados con respecto a los metales pesados y metaloides, destaca particularmente el contenido de fósforo el cual para ambas especies excede los 200 mg por kilogramo de biomasa húmeda, resultan también llamativos los contenidos de arsénico, cromo, níquel y

plomo, los cuales corroboran los reportes existentes sobre la tendencia de estas especies de algas a la fijación de metales pesados y metaloides (Piña, J.J. et al., 2010).

Si bien el presente trabajo presenta los resultados de dos años y medio de muestreos y los resultados del análisis de más de 800 muestras, la variabilidad del comportamiento del fenómeno a lo largo del tiempo sugiere la necesidad de mantener un monitoreo permanente de la cantidad y la calidad del sargazo que arriba a las costas de Quintana Roo en cuanto a su contenido de metales pesados.

La comparación de los contenidos de metales pesados a lo largo del tiempo y en diferentes localidades permite establecer criterios de manejo para un material que tiene concentraciones altas de metales pesados como arsénico, plomo, cromo y cadmio (tabla 6).

Tabla 6. Comparación de los contenidos de metales pesados y metaloides respecto a los límites máximos permitidos por diferentes normas oficiales mexicanas.

Base Húmeda		Elemento											Observaciones						
Referencia	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	P (mg/kg)	B (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Ni (mg/kg)									
NOM 127-SSA2	2.00	0.15	ND	ND	0.01	5.00	0.03	0.05	0.01	ND		Agua potable							
NOM 130-SSA1	5.00	ND	ND	ND	1.00	5.00	1.00	ND	0.20	ND		Alimentos envasados herméticos							
NOM 131-SSA1	ND	ND	ND	ND	0.20	ND	0.10	ND	ND	ND		Fórmulas para lactantes							
NOM 201-SSA1	1.00	0.40	ND	ND	0.01	ND	0.01	0.05	0.00	0.02		Agua embotellada y hielo para consumo							
NOM 213-SSA1	ND	ND	ND	ND	1.00	ND	0.50	ND	0.10	ND		Cárnicos procesados							
NOM 242-SSA2	ND	ND	ND	ND	1.00	ND	80.00	ND	2.00	ND		Productos pesqueros							
NOM 247-SSA1	ND	ND	ND	ND	0.50	40.00	ND	ND	0.10	ND		Harinas y cereales							
NOM 001-SEMARNAT	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	Aguas residuales en aguas costeras para recreación promedio (D=diario; M=mensual)						
	4.0	6.0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.5	1.0	10	20		0.2	0.4	1.0	1.5	0.2	0.4
S. natans	X	0.7	3.4	248.2	12.6	1.4	3.6	36.9	0.3	0.2	40.7	Muestra inicial Octubre de 2019							
	□	0.5	0.7	90.1	2.2	1.0	1.5	2.9	0.2	0.1	29.8								
S. fluitans	X	0.2	2.7	300.6	7.5	1.4	2.8	44.1	0.5	0.2	28.8	Muestra inicial Octubre de 2019							
	□	0.3	0.2	90.7	5.1	1.4	0.2	11.3	0.2	0.1	28.6								
S. natans	X	8.2	33.6	1478.0	192.1	24.2	10.0	697.8	37.2	3.9	12.5	Campana I Mayo de 2020							
	□	3.0	8.9	468.7	87.9	10.2	2.8	168.5	12.8	1.1	3.6								
S. fluitans	X	8.1	26.9	1305.8	271.5	30.0	10.3	809.4	46.2	4.4	13.8	Campana I Mayo de 2020							
	□	10.6	7.3	471.5	149.7	33.9	8.0	265.7	44.0	3.9	9.7								
S. natans	X	6.8	32.5	1073.1	182.7	15.1	7.5	471.4	23.0	3.0	11.3	Campana II Septiembre de 2020							
	□	2.9	7.3	454.7	92.2	13.8	3.9	315.1	20.2	1.4	3.2								
S. fluitans	X	6.1	28.5	1298.7	247.0	14.9	6.6	454.3	23.3	2.8	12.4	Campana II Septiembre de 2020							
	□	7.6	5.5	438.2	264.9	27.6	6.6	587.2	37.7	3.1	7.0								
S. natans	X	6.4	16.8	1305.6	ND	0.7	8.0	141.7	3.8	1.2	14.0	Campana III Junio de 2021							
	□	3.7	6.0	925.9	ND	1.3	3.0	56.3	3.4	0.3	16.4								
S. fluitans	X	7.6	22.9	1752.0	ND	1.2	9.2	186.0	4.9	1.4	16.1	Campana III Junio de 2021							
	□	7.9	10.7	1151.1	ND	0.8	3.1	197.5	3.7	0.6	12.0								
S. natans	X	5.0	30.3	ND	ND	2.3	3.9	175.1	2.0	1.8	10.0	Campana IV Septiembre de 2021							
	□	1.3	7.3	ND	ND	4.5	1.7	86.5	0.8	0.4	2.5								
S. fluitans	X	3.9	30.3	ND	ND	1.0	3.3	138.6	2.5	1.5	11.9	Campana IV Septiembre de 2021							
	□	0.8	5.9	ND	ND	0.7	1.6	85.2	2.1	0.2	1.9								

ND= No Data.
 Digestión con agua regia N:Cl 3:1 9:3ml, Microondas 600W 20°-10°-15°, 190 PSI, 180°C

Nota: Los datos específicos empleados en esta tabla son promedios. El mismo análisis da resultados semejantes con los valores de cualquiera de las fechas consideradas en el trabajo o con los valores promedio de todo el periodo.
 Fuente: Elaboración propia con datos generados y obtenidos en este trabajo

Sin embargo, debe dejarse claro que la presencia de estos metales pesados, aún en las concentraciones registradas, no descalifican el uso de este sargazo para diferentes aplicaciones, salvo aquellos casos en los que el uso propuesto involucra alimentación de personas o animales destinados al consumo humano, productos farmacéuticos para ingesta o contacto, o algunos otros usos semejantes y no descarta su utilización en la elaboración de productos que no entran en contacto con la población o los animales

destinados al consumo como podría ser la elaboración de papel, cartón y otros derivados semejantes.

Se sabe de diferentes reacciones cutáneas y alérgicas en algunas de las personas que han participado en las colectas de sargazo tanto en la playa como en el mar, lo que se puede asociar más con la naturaleza misma del contacto con el alga y sus epibiontes o al contacto con los lixiviados, más que con la presencia de metales pesados en dicho material.

Sintetizando lo anterior es posible decir que el contenido de metales pesados en la muestras procesadas es suficientemente alto, aún en los casos de las concentraciones más bajas registradas como para establecer claramente la recomendación de no usar este material o sus derivados en productos para consumo humano, consumo de animales criados para consumo humano o en productos que deban entrar en contacto externo con la piel por tiempos prolongados.

Lo anterior no impide su uso para aplicaciones o productos fuera de las mencionadas como podría ser la extracción de celulosas para elaboración de papel y otros derivados.

En la tabla 6 se presentan los diferentes valores límite para algunos elementos de acuerdo con las NOM, destacando la mayor cantidad de información para los cuatro elementos mencionados

Dados los resultados y considerandos expuestos, la recomendación va en dirección a una profundización y sistematización de la investigación sobre las características de estas especies de sargazo desde los puntos de vista nutricional, farmacéutico, como bioconcentrador de contaminantes, etc. así como a la elaboración de métodos de prueba para su análisis y en su momento, normas oficiales para la colecta, manejo, control, aprovechamiento y disposición del sargazo pelágico que arriba a las costas de Quintana Roo.

A la vista de estos resultados, es clara la necesidad de recomendar que, hasta en tanto no se tengan estudios más profundos y exhaustivos, se debe evitar la exposición prolongada a estos materiales por contacto directo con la piel, y establecer restricciones para su uso en tanto no haya los estudios necesarios para validar o refutar la inocuidad del material mismo y de los productos derivados de este.

Finalmente, es evidente de estos resultados que es necesario llevar a cabo estudios más extensos, profundos y exhaustivos tomando en cuenta la naturaleza de los materiales que conforman estas arribazones de sargazo en particular las dos especies que forman más del 95% de la biomasa total en ellas.

Conclusiones

Se trata de un fenómeno cuya variabilidad es muy grande en términos de la distribución espacial y temporal de las masas de sargazo que derivan con la corriente del Mar Caribe y aguas alineadas a la costa, así como las características de la carga de metales pesados de estas poblaciones de sargazo que arriban a la costa de Quintana Roo.

Sargassum fluitans y *Sargassum natans* manifiestan diferencias substanciales tanto en su dominancia relativa en las comunidades de algas que arriban con la corriente del Mar Caribe como en su composición proximal y contenido de metales pesados.

La variabilidad en la composición por especies hace que la masa general de sargazo se deba entender como heterogénea, tanto en la proporción de las especies que la componen como en el contenido de metales pesados.

Sargassum fluitans y *Sargassum natans* manifiestan diferencias substanciales en cuanto a la capacidad para absorber y retener metales pesados lo que hace que ambas especies sean diferentes y por tanto la carga de metales pesados que arriba a las costas de Quintana Roo en estas algas dependerá de la proporción entre estas especies en cada manchón en particular, haciendo de estas poblaciones comunidades heterogéneas en su composición y por tanto en su potencial toxicidad por la carga de metales pesados.

El contenido de metales pesados en las muestras procesadas es alto, aún en los casos de las concentraciones más bajas registradas y permite hacer la recomendación de no usar este material o sus derivados en productos para consumo humano, consumo de animales criados para consumo humano o en productos que deban entrar en contacto externo con la piel por tiempos prolongados.

Dados los resultados y considerandos antes expuestos, la más importante de las recomendaciones debe ir en dirección a una profundización y sistematización de la investigación sobre las características de estas especies de sargazo desde los puntos de vista nutricional, farmacéutico, como bioconcentrador de contaminantes, etc. así como a la elaboración de métodos de prueba para su análisis y en su momento, normas oficiales para la colecta, manejo, control, aprovechamiento y disposición del sargazo pelágico que arriba a las costas de Quintana Roo.

Se debe tomar en cuenta que para cualquier uso potencial se deberán elaborar los estudios de inocuidad necesarios para garantizar el uso seguro de los productos derivados del sargazo que arriba a las costas de Quintana Roo

Conflicto de intereses: Los autores no declararon ningún conflicto de intereses.

Disponibilidad de los datos: Todos los datos están incluidos en el contenido del artículo.

Declaración de financiación: Los autores no obtuvieron financiación para esta investigación.

References:

1. Casas-Valdez, M., Hernández-Contreras, H., Marín-Álvarez, A., Aguila-Ramírez, R.N., Hernández-Guerrero, C.J., Sánchez-Rodríguez, I., Carrillo-Domínguez, S., 2014. El alga marina *Sargassum* (Sargassaceae): una alternativa tropical para la alimentación de ganado caprino. RBT 54, 83. <https://doi.org/10.15517/rbt.v54i1.14002>
2. Castro-González, M.I., 1996. Chemical composition of the green alga *Ulva lactuca*. CiencMar 22, 205–213. <https://doi.org/10.7773/cm.v22i2.853>
3. Davis, T.A., 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 & technology 37, 261–267. <https://doi.org/10/bzz9x3>
4. Fernández, F., Boluda, C.J., Olivera, J., Guillermo, L.A., Gómez, B., Echavarría, E., Mendis Gómez, A., 2017. Análisis Elemental Prospectivo de la Biomasa algal acumulada en las costas de la República Dominicana durante 2015. Centro Azúcar 44, 11–22.
5. Hernández, I.T., Berruecos, J.M., n.d. Análisis bromatológico de alimentos empleados como ingredientes en nutrición animal.
6. Piña, J.J., Balbín, A.I., y Pérez-Cordovés, Ana, 2010. La Contaminación Por Metales Pesados En Sargazos Procedentes De La Costa Sur En La Península De Guanahacabibes, ¿Aún No Es Preocupante? Revista Cubana de Química XXII.
7. Roca, P., Oliver, J., Rodríguez, A.M., 2004. Bioquímica: técnicas y métodos. Editorial Hélice, Madrid. Davis, T.A., 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 & technology 37, 261–267. <https://doi.org/10/bzz9x3>
8. de la Lanza-Espino, G., 2001. Características físico-químicas de los mares de México. Plaza y Valdes.
9. Fernández, F., Boluda, C.J., Olivera, J., Guillermo, L.A., Gómez, B., Echavarría, E., Mendis Gómez, A., 2017. Análisis Elemental Prospectivo de la Biomasa algal acumulada en las costas de la República Dominicana durante 2015. Centro Azúcar 44, 11–22.

10. Franks, J.S., Johnson, D.R., Ko, D.-S., Sanchez-Rubio, G., Hendon, J.R., Lay, M., 2011. Afluencia sin Precedentes del Sargassum Pelágico a lo Largo de la Costa en Islas Caribeñas durante el Verano del 201, in: Proceedings of the 64th Gulf and Caribbean Fisheries Institute. p. 4.
11. Gower, J., Young, E., King, S., 2013. Satellite images suggest a new Sargassum source region in 2011. *Remote Sensing Letters* 4, 764–773. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2013.796433>
12. Jiménez Verdesoto, D.B., 2012. Cuantificación de metales pesados (Cadmio, Cromo, Níquel y Plomo) en agua superficial, sedimentos y organismos (*Crassostrea columbiensis*) Ostión de Mangle en el Puente Portete el Estero Salado Guayaquil. (B.S. thesis).
13. Langin, K., 2018. Seaweed masses assault Caribbean islands. *Science* 360, 1157–1158. <https://doi.org/10.1126/science.360.6394.1157>
14. Leyte-Vidal, J.J.P., González-Fernández, E.L.A., Gutiérrez-Artiles, L.O., Márquez-Llauger, L., Cristo, L.T.A.-D., 2019. Caracterización de tres bioindicadores de contaminación por metales pesados 17.
15. Marinho-Soriano, E., Fonseca, P.C., Carneiro, M.A.A., Moreira, W.S.C., 2006. Seasonal variation in the chemical composition of two tropical seaweeds. *Bioresource Technology* 97, 2402–2406. <https://doi.org/10/cpn7jf>
16. Maurer, A.S., Neef, E.De, Stapleton, S., 2015. Sargassum accumulation may spell trouble for nesting sea turtles. *Front. Ecol. Environ.* 13, 394–395.
17. Resiere, D., Valentino, R., Nevière, R., Banydeen, R., Gueye, P., Florentin, J., Cabié, A., Lebrun, T., Mégarbane, B., Guerrier, G., Mehdaoui, H., 2018. Sargassum seaweed on Caribbean islands: an international public health concern. *The Lancet* 392, 2691. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32777-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32777-6)
18. Rodríguez-Martínez, R.E., Medina-Valmaseda, A.E., Blanchon, P., Monroy-Velázquez, L.V., Almazán-Becerril, A., Delgado-Pech, B., Vásquez-Yeomans, L., Francisco, V., García-Rivas, M.C., 2019. Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic Sargassum. *Marine Pollution Bulletin* 146, 201–205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.015>
19. Rodríguez-Martínez, R.E., Roy, P.D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., García-Sánchez, M., van Tussenbroek, B.I., 2020. Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ* 8, e8667. <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>

20. Rodríguez-Martínez, R.E., van Tussenbroek, B., Jordán-Dahlgren, E., 2016. Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014–2015). *Florecimientos Algales Nocivos en México*. Ensenada: CICESE 352.
21. Rodríguez-Martínez, Rosa Elisa, van Tussenbroek, B., 2017. Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe Mexicano 15.
22. Volesky, B., Holan, Z.R., 1995. Biosorption of Heavy Metals. *Biotechnology Progress* 11, 235–250. <https://doi.org/10.1021/bp00033a001>
23. Silva Trejos, P., 2012. Digestión en horno de microondas para determinación de contenido de hierro y zinc totales en alimentos. *TM* 25. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i3.461>
24. Vioque, J., Sánchez-Vioque, R., Pedroche, J., n.d. Obtención y aplicaciones de concentrados y aislados proteicos. *Grasas y Aceites*.
25. Zumbado Fernández, H., 2000. *Análisis químico de los alimentos: métodos clásicos*. Editorial Universitaria.
26. NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
27. NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
28. MODIFICACION a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
29. NORMA Oficial Mexicana NOM-130-SSA1-1995, Bienes y servicios. Alimentos envasados en recipientes de cierre hermético y sometidos a tratamiento térmico. Disposiciones y especificaciones sanitarias.
30. NORMA Oficial Mexicana NOM-131-SSA1-2012, Productos y servicios. Fórmulas para lactantes, de continuación y para necesidades especiales de nutrición. Alimentos y bebidas no alcohólicas para lactantes y niños de corta edad. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Etiquetado y métodos de prueba
31. NORMA Oficial Mexicana NOM-201-SSA1-2015, Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias.

32. NORMA Oficial Mexicana PROY-NOM-213-SSA1-2000, Productos y servicios. Productos cárnicos procesados. Especificaciones sanitarias. Métodos de prueba.
33. NORMA Oficial Mexicana NOM 213-SSA1-2019, Productos y servicios. Productos cárnicos procesados. Especificaciones sanitarias. Métodos de prueba.
34. NORMA Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009, Productos y servicios. Productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados. Especificaciones sanitarias y métodos de prueba.
35. NORMA Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008, Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba.
36. Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL (2016) 19th Ed., AOAC INTERNATIONAL, Gaithersburg, MD, USA, Official Method 934.01
37. Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL (2016) 19th Ed., AOAC INTERNATIONAL, Gaithersburg, MD, USA, Official Method 942.05
38. Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL (2016) 19th Ed., AOAC INTERNATIONAL, Gaithersburg, MD, USA, Official Method 960.52
39. Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL (2016) 19th Ed., AOAC INTERNATIONAL, Gaithersburg, MD, USA, Official Method 920.39
40. Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL (2016) 19th Ed., AOAC INTERNATIONAL, Gaithersburg, MD, USA, Official Method 2011.14
41. Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL (2008) 13th Ed., AOAC INTERNATIONAL, Gaithersburg, MD, USA, APPROVED PROCEDURE ba 6a-05