

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD XOCHIMILCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO EL HOMBRE Y SU AMBIENTE
LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

INFORME FINAL DE SERVICIO SOCIAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGA

**Análisis espacio-temporal de la distribución de sargazo
(*Sargassum natans* y *S. fluitans*) en la costa de
Quintana Roo, México.**

QUE PRESENTA

Aurea Aleida Guzmán Ramírez

Matrícula
2122031905

ASESORES:

Dr. Luis Amado Ayala Pérez
Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco
Departamento El Hombre y su Ambiente No. Eco. 18075

Dr. Eduardo Amir Cuevas Flores
CONACYT - Universidad Autónoma del Carmen
Centro de Investigación de Ciencias Ambientales (CICA)

Ciudad de México

30 de octubre de 2019

Resumen

El evidente e incidente crecimiento de las balsas de sargazo que son detectadas en las costas del Caribe Mexicano han provocado desajustes en procesos ecológicos de importancia para la salud y buen funcionamiento de los ecosistemas, como el desarrollo de ciclos de vida de diversas especies marinas, el desarrollo de actividades humanas como la pesca, y en la economía del sector turístico en general. Lejos de tener una solución tangible a este creciente problema de arribazón de sargazo a las playas y pese a que el estudio de las dinámicas de dispersión de estas algas han arrojado diversas suposiciones sobre su ciclo de vida y la ubicación espacial y temporal de su origen, es importante resaltar que para entender la complejidad del desplazamiento de agregaciones de sargazo pelágico, se requieren estudios que aborden escalas de percepción espacial y temporal de diversas variables, para un acercamiento más completo del comportamiento de estas algas en diferentes regiones geográficas, así como un conocimiento de las condiciones atmosféricas y oceanográficas que rigen a este proceso, sin mencionar el conocimiento de las condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de éstas especies. El objetivo del presente trabajo fue interpretar la presencia de sargazo detectada en una región clave del Caribe Mexicano a través de dos años, mediante el uso de imágenes satelitales que facilitaron la detección de balsas de sargazo y brindaron una percepción adecuada de lo que sucedió con el sargazo en fechas determinadas. Tomando en cuenta la combinación de diversas dimensiones espaciales y temporales y comparándola con otros trabajos de teledetección de *Sargassum*, se pudieron establecer generalidades en los retos para su detección, así como en la conectividad que las balsas de *Sargassum* llegan a tener, interpretando que la distribución algal obedece a las dinámicas de flujo y temporalidad de corrientes marinas superficiales. El principal producto de esta investigación fue la generación de cartografía del sargazo en la zona de estudio a través del tiempo, donde se concluyó que las escenas inferiores correspondientes a Tulum y Playa del Carmen son las más afectadas por la llegada de sargazo, siendo el tercer trimestre (Julio, Agosto y Septiembre) el que presentó las mayores cantidades.

Palabras clave: Sargassum, Teledetección, Caribe Mexicano, Corrientes marinas superficiales.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	4
REVISIÓN DE LITERATURA	6
Sargazo	6
Biología del sargazo	6
Distribución	6
El sargazo como un trazador de corrientes	8
Corrientes marinas superficiales	10
Corriente de Yucatán, remolinos y giros predominantes	10
Herramientas de detección	11
Teledetección de sargazo	11
Sistemas de observación y seguimiento de agregaciones de sargazo	15
OBJETIVO	17
MÉTODO	18
Área de estudio	18
Detección de <i>Sargassum</i>	18
- Obtención de imágenes Landsat	19
- Corrección atmosférica	20
- Preparación de archivos y sitios de entrenamiento	21
- Clasificación supervisada y limpieza	22
Cálculo de coberturas	23
Cartografía	24
Análisis estadístico	24
Escalas evaluadas	25
Determinación y aplicación de la prueba estadística	26
RESULTADOS	28
Nubes y detección de sargazo	30
Descripción cronológica	32
Abundancia e incidencia	38
Análisis espacial	40
DISCUSIÓN	44
Nubes y detección de <i>Sargassum</i>	44
Interpretación cronológica	45
Conectividad entre las balsas algales del Caribe Mexicano.	47
Conectividad con el flujo Atlántico-Caribe-GdM	48
Asociación con las condiciones atmosféricas	50
CONCLUSIONES	52
REFERENCIAS	53

INTRODUCCIÓN

Desde sus primeros registros, inmersas en una constante deriva a escala continental por el Atlántico noroeste, Golfo de México y Mar Caribe, la llegada o arribazón de algas pardas del género *Sargassum* a las costas se había considerado un fenómeno de ocurrencia ocasional. Sin embargo, desde 2011, inusuales y extensas cantidades de estas algas en las playas, como las ocurridas en el Golfo de México, al sur del Mar Caribe, al oeste de África y al norte de Brasil, despertaron la preocupación por conocer el origen, la distribución y la estacionalidad de estos fenómenos (Gower et al. 2013).

Para el 2015, una nueva, atípica y aun mayor arribazón de sargazo en prácticamente toda la costa del Caribe y Atlántico Oeste perjudicó a los sectores ambiental, turístico y económico de las localidades afectadas, aumentando la urgencia por conocer más acerca de su distribución (SEMARNAT, 2015). Las anomalías en la magnitud y extensión de los eventos de arribazón de sargazo que se han dado desde 2011 hasta la fecha en las Antillas Menores y la región del Mar Caribe, desde las Islas Vírgenes hasta Barbados y Trinidad y Tobago, e incluso en el Atlántico este, en la costa africana de Sierra Leona, aumentan la urgencia por el entendimiento e identificación de estos fenómenos (Széchy et al. 2012; Smetacek y Zingone, 2013; Maréchal et al. 2017).

En el Caribe Mexicano, los arribazones de sargazo que ocurren en el litoral del estado de Quintana Roo son considerados de los más diversos y abundantes, donde en respuesta a la gran cantidad de éste se han establecido lineamientos que incluyen programas para la remoción y manejo del sargazo de las playas, así como planes de monitoreo de su arribazón (Dreckmann y Senties, 2013; SEMARNAT, 2015). Sin embargo, retirar la inmensa cantidad de algas que llega a las costas no es tarea fácil, requiriéndose el uso de herramientas y maquinarias pesadas que repercuten ampliamente en la integridad de las playas (alteración del perfil de playa, pérdida de sedimentos, compactación del suelo, pérdida de vegetación, repercusión a dunas costeras, erosión, etc.) y en el bienestar de especies de importancia ecológica, principalmente las tortugas marinas (Maurer et al. 2015; Azanza y Pérez, 2016).

Además, al recolectarse en playa el peso del sargazo llega a incrementar hasta 42% debido a la arena adherida, haciendo el proceso de obtención algal aún más difícil y costoso, y contribuyendo a la pérdida de sedimento de las playas (SEMARNAT, 2015). Por lo anterior, debido a los impactos económicos y ambientales ocasionados por los arribazones, el abordaje de esta problemática desde una visión precautoria parece lo más adecuado. Hoy en día, el enfoque espacial y temporal amplio y dinámico de los Sistemas de Información Geográfica es una herramienta eficaz para apoyar y dirigir la solución de problemáticas de esta índole, aunado a su capacidad de automatizar y agilizar los procesos de análisis (Roldan et al. 2003).

La información para el entendimiento de la distribución y magnitud de las agregaciones de sargazo generada por análisis de percepción remota, pueden contribuir al diseño e implementación de programas de monitoreo, alerta temprana y de predicción de movimientos de estas comunidades flotantes, con una relación costo-efectividad mayor, a partir de los cuales se puedan generar medidas efectivas de control y prevención para mitigar el impacto al turismo y a las playas.

Si bien ya se han realizado algunos esfuerzos para la evaluación de la dinámica espacial y temporal de sargazo en el Caribe Mexicano (Uribe-Martínez et al. 2016); se requiere dar continuidad y actualizar la información existente en zonas clave de monitoreo del sargazo. En este contexto, el presente estudio contribuyó a generar un panorama espacialmente explícito de la distribución de *Sargassum* spp. flotante en el Caribe mexicano, con lo cual se asientan bases de referencia para la evaluación de largo plazo de las tendencias medias y variaciones de ocurrencia de estas comunidades en la región.

REVISIÓN DE LITERATURA

Sargazo

Biología del sargazo

Las macroalgas que conforman la comunidad conocida coloquialmente como sargazo, pertenecen a la división Phaeophyta o Algas Pardas y corresponden al género *Sargassum*, en particular a las especies *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillonson cuyas hojas poseen una estructura fina, y *Sargassum fluitans*, Børgensen, con hojas lanceoladas y grandes, ambas especies endémicas del Mar de los Sargazos (Butler et al. 1983). Estas algas se reproducen únicamente por fragmentación, lo cual facilita su proliferación y carecen de estructuras de fijación al fondo marino, por el contrario, presentan vejigas flotantes llenas de gas llamadas pneumatóforos, las cuales funcionan como boyas que les permiten mantenerse a flote y a la deriva, cumpliendo su ciclo de vida bajo hábitos pelágicos, arrastradas por las corrientes superficiales. Las algas de *Sargassum* son conocidas por formar extensas masas en la superficie marina, cuyas longitudes van desde 50 cm hasta kilómetros. Permanecen alineadas en dirección del viento y arriban en las costas del litoral Atlántico y del Caribe (Butler et al. 1983; Laffoley et al. 2011; Dreckmann y Sentíes, 2013).

Distribución

Mar de los Sargazos

El Mar de los Sargazos, una región nórdica del océano Atlántico en un área variante según el clima (coordenadas 28°20'08"N - 66°10'30"O), representa hasta hoy el mayor depósito y ecosistema persistente de *Sargassum*, con una estimación de dos millones de millas cuadradas de extensión, una profundidad del manto algal no mayor a 50 cm y una biomasa calculada entre 4 y 11 millones de toneladas de peso húmedo (Gower y King, 2011; Dreckmann y Sentíes, 2013). Debido a las características pelágicas del sargazo, esta gran biomasa acumulada es contenida por diversos flujos de corrientes oceánicas circundantes: por el suroeste la corriente ascendente del Golfo, de noroeste hacia el sur el giro Nor-

Atlántico, ambas corren hacia el este por arriba de los 40º de latitud norte; y por el sureste la corriente descendiente de Canarias y la Deriva Norecuatorial, que corre hacia el oeste por debajo de los 20º de latitud norte. La interacción de estas corrientes crea en conjunto un efecto de circuito a favor de las manecillas del reloj (anticiclónico), permitiendo la aglomeración de este Mar de los Sargazos (Dreckmann y Senties, 2013). Sin embargo, pese a estar contenido en este sistema de corrientes, se ha demostrado que cambios en el sistema de alta presión de las Azores, (en el noreste del Atlántico) pueden conceder la energía inicial requerida para que el sargazo se desprenda, enviando “pulsos” de *Sargassum* impulsados por la Deriva Norecuatorial, la Corriente ecuatorial del sur y la Corriente derivada del Caribe, condición que dio sustento a las hipótesis iniciales de los arribazones en el Caribe, la cual posteriormente fue fuertemente cuestionada.

Sistema de Bucle de sargazo (Circulación hacia el Caribe Mexicano)

Con el objetivo de conocer más acerca de las dinámicas de distribución del sargazo, fue realizado en 2011 el primer mapeo satelital de la distribución de *Sargassum* por Gower y King. Los autores establecieron que el sargazo comienza su travesía en primavera (marzo - junio) al noroeste del Golfo de México, se dirige a Cabo Hatteras en julio y continúa flotando ayudado por la corriente estacional subtropical del Atlántico Norte y el anticiclón de las Azores, hasta concentrarse en el Mar de los Sargazos (Gower y King, 2011). Cuando un parche algal se desprende del Mar de los Sargazos, éste puede seguir diversas rutas de circulación hacia las latitudes del Mar Caribe, regidos principalmente por la Corriente del Caribe y a su vez por corrientes de viento provenientes del norte.

Observaciones históricas y modelos numéricos oceanográficos, han indicado que a medida que la Corriente del Caribe fluye e ingresar al Mar Caribe, la mayoría de las aguas superficiales ingresan a través de los Pasajes de las Islas de Barlovento del sur de Granada, San Vicente y Santa Lucía, continuando hacia el oeste. Al encontrarse con la Corriente de Yucatán (extensión de la Corriente del Caribe), el sargazo fluye directamente hacia el Golfo de México atravesando el Canal de Yucatán e integrándose a la Corriente de Lazo. Ubicada al noreste del Golfo de México, la Corriente de Lazo posee un flujo de corriente variable, la

cual puede conducir al sargazo directamente con la corriente de Florida o incluso extenderse más al norte, cerca del delta del río Mississippi, donde puede formar un gran remolino cálido con dirección al oeste.

La fuerza de este remolino es la que permite la propagación de *Sargassum* en las costas del Golfo de México y el litoral del Este de Estados Unidos (Stoner y Greening 1984; Laffoley et al. 2011; Gyory et al. 2013; Dreckmann y Senties, 2013; Webster y Linton, 2013; CIT-SSC, 2015). A este flujo de sargazo fuertemente marcado por las corrientes marinas superficiales, donde el sargazo fluye desde el Mar de los Sargazo hacia el Mar Caribe y el Golfo de México, se le conoce como Sistema de Bucle de Sargazo, teoría inicial del flujo conocido del sargazo pelágico (Webster y Linton, 2013).

Nuevas rutas de distribución

Tras un nuevo análisis realizado por Gower y colaboradores (2013), en imágenes MERIS Y MODIS del 2011 al 2015, se detectó en el año 2011 una nueva área de origen de *Sargassum* no registrada anteriormente. El evento se había originado al norte de la desembocadura del Río Amazonas, presentando una concentración significativa de *Sargassum* en abril. Para el mes de julio el sargazo se había extendido en una gran parte del Atlántico tropical, hacia el este en la región de África, y al resto de las Antillas y el Mar Caribe en el oeste (Gower et al. 2013) Dicho suceso fue atribuido a la influencia de nutrientes de la pluma del Amazonas, asociada a su vez con las lluvias anómalas registradas durante el fenómeno de La Niña ocurrido en ese mismo año (Franks et al. 2011; Johnson et al. 2014).

El sargazo como un trazador de corrientes

La “ruta clásica” original de distribución que siguen las balsas de sargazo a través del Atlántico, Caribe y Golfo de México (GoM) señalada en un inicio por Gower y King (2011) es bien conocida y ha permitido el entendimiento de sus patrones de movimiento general. Sin embargo, la gran escala espacial bajo la cual los autores la han descrito y estudiado (GoM - Atlántico Norte - Mar Caribe - GoM) está más asociada con la ruta de las grandes corrientes marinas que rigen este sistema. Es importante señalar que los procesos oceanográficos y

los recursos marinos poseen fuertes relaciones, las cuales pueden ser más evidentes o intensificarse bajo determinadas circunstancias (Athié et al. 2011). Un acercamiento espacial en determinadas regiones como es el Caribe Mexicano puede brindar información más característica de la zona, y contribuir al conocimiento de la dinámica de flujo de sargazo propuesta por Gower y King (2011).

Particularmente con el sargazo, al ser especies holopelágicas y de una amplia escala geográfica de movimiento, sus dinámicas de desplazamiento están regidas por las características físicas y oceanográficas presentes en cada zona, por lo cual el conocimiento preciso de su distribución y comportamiento en algunas áreas aún es incierto. Debido a que la circulación y la dinámica de corrientes en las costas no son las mismas que en el océano (Carrillo et al. 2017), cuando se aborda el estudio de las migraciones de *Sargassum* bajo una escala espacial más pequeña, la asociación con las corrientes oceánicas no es suficiente. Las corrientes superficiales desempeñan un papel fundamental en el desplazamiento del sargazo, y éstas se manejan a su vez por la circulación oceánica y la influencia del viento, y dichas dinámicas en conjunto con la fisiología propia de *Sargassum* determinarán su distribución. Por lo anterior, estudiar la peculiaridad de estos factores permite reproducir la distribución estacional de la biomasa del sargazo (Xu 1997; Gower y King, 2011; Athié et al. 2011; Carrillo et al. 2017; Brooks et al. 2018)

En el Caribe Mexicano, las corrientes sobre la plataforma de Yucatán se modulan e influyen principalmente por el viento y por el impulso recibido de la Corriente de Yucatán (CY), donde se ha confirmado que la trayectoria, intensidad y proximidad del jet de la Corriente de Yucatán con la península de Yucatán, influye fuertemente en el transporte y circulación de los parches de sargazo (Enríquez et al. 2009). Dado lo anterior, el conocimiento de la topografía y oceanografía de la zona es importante para la interpretación de la distribución del sargazo.

Corrientes marinas superficiales

Corriente de Yucatán, remolinos y giros predominantes

Al abarcar largas distancias a través de diferentes regiones geográficas, la Corriente del Caribe es nombrada dependiendo el lugar por donde pase. Cuando atraviesa por la Cuenca Caimán es conocida como la Corriente Caimán (CC) y cuando la CC atraviesa la costa de la Península de Yucatán se vuelve la Corriente de Yucatán (CY), dirigiéndose hacia el Golfo de México. La estructura básica de las corrientes medias a través del canal de Yucatán, se ve influida por el flujo de la Corriente de Yucatán (del Mar Caribe hacia el Golfo de México), las capas superiores occidentales del canal y por la contracorriente suroccidental de Yucatán debajo de él, mientras que del lado cubano los flujos del sur están presentes tanto en la superficie como en la profundidad, siendo la Corriente de Yucatán uno de los agentes forzantes más influyentes que controlan la circulación general del Golfo de México (Athié et al. 2011; Chávez et al. 2013).

A su vez, la direccionalidad de la Corriente de Yucatán a través del Canal de Yucatán puede ser variable, pudiendo viajar al noroeste, al norte o al noreste. Ésta variación dependerá de las características de la circulación general en el este del Golfo de México, particularmente influenciada por los giros a gran escala ubicados cerca del área del Canal de Yucatán (Martínez-López y Parés-Sierra 1998; Sheinbaum et al. 2002; Enríquez et al. 2009).

En su estudio sobre la estructura de la CY en los canales de Cozumel y Yucatán, Athié y colaboradores (2011) concluyeron que la intensidad de la corriente en el canal de Cozumel depende de la ubicación del núcleo de la corriente de Yucatán. Cuando la corriente se intensificaba en el canal de Cozumel, la posición de máxima velocidad de la corriente de Yucatán se mueve hacia el este y cuando ésta se debilitaba se movía hacia el oeste, indicando un comportamiento dominado por la inercia en lugar del control topográfico (Athié et al. 2011).

De igual manera, la corriente en ambos canales también puede atribuirse a fenómenos de mesoescala que los afecta de forma simultánea y podría relacionarse con el paso de

remolinos a través de la cuenca del Caribe, asociándose con la variabilidad en ambos canales (Athié et al. 2011). Tomando como factores clave la trayectoria del jet de la Corriente de Yucatán y su cercanía a la Península de Yucatán, Enríquez y colaboradores (2009) definieron dos supuestos: 1) Cuando la CY está bloqueada por remolinos en el norte de Cuba, ésta se mueve hacia el oeste sobre la plataforma de Yucatán, dominando los procesos de dispersión de las balsas algales. En estos casos, la tensión ejercida por el viento sólo modula el comportamiento de la dispersión, teniendo un efecto casi nulo en comparación con la influencia de la CY. 2).

Por otro lado, en ausencia del bloqueo la CY viaja hacia el noreste, hacia el estrecho de Florida, disminuyendo sus efectos en la Plataforma de Yucatán, y dándole más peso a las características locales de viento y batimétricas en la dispersión de parches (Enríquez et al. 2009). Dado lo anterior, la influencia de la Corriente de Yucatán no solo determinará la entrada de sargazo al Golfo de México, también determina su distribución dentro del mismo. En consecuencia, los procesos de dispersión de *Sargassum*, se rigen por dinámicas similares.

Herramientas de detección

Teledetección de sargazo

Conocida como "*la ciencia de la observación a distancia*", la percepción remota o teledetección, es el conjunto de conocimientos dedicados al estudio y descripción de fenómenos y objetos presentes en el universo físico, colectados sin que exista un contacto directo con ellos (Roldan et al. 2003). Los productos de estos sensores remotos pueden ser fotografías aéreas, videografía o imágenes de satélite, donde su aplicación más común es la de proveer información de fondo para el manejo, planeación y detección de cambio de recursos costeros (Green et al. 2000; Roldan et al. 2003). La Radiación Electromagnética (REM) es el medio utilizado por la percepción remota y hace referencia a todas las formas de onda que viajan a la velocidad de la luz y que pueden ser definidas en términos de su

longitud de onda (distancia entre los picos de onda) o de su frecuencia (Hertz (Hz)) (Green et al. 2000).

La producción de las imágenes satelitales involucra la medición de la REM, por parte de sensores presentes en una plataforma satelital, los cuales actúan como 'scanners' multiespectrales que recorren la superficie de la tierra midiendo las intensidades de energía reflejadas en diferentes longitudes de onda, agrupando las mediciones en unidades básicas (píxeles) de cada imagen. Estas lecturas se registran como números digitales (DN), con los que se puede definir objetivamente las características espectrales de diferentes hábitats y procesar las imágenes en una computadora (Green et al. 2000).

Dado que la intensidad y la longitud de onda de la REM están en función de la superficie en cuestión, cada superficie posee una firma espectral característica por lo cual es factible detectar y diferenciar de su contexto oceánico, agregaciones de macroalgas en la superficie del mar con imágenes (Green et al. 2000; Roldan et al. 2003).

Las macroalgas de *Sargassum* presentan una curvatura de reflectancia de ~ 630 nm debido a sus pigmentos de clorofila c, lo cual emite una firma espectral única al combinarse con la relación de reflectividad entre las longitudes de onda marrón (~ 650 nm) y verde (~ 555 nm) (Hu et al. 2015). Esta característica permite una distinción confiable, cuando se tiene un porcentaje mínimo de cobertura de sargazo de 20 a 30% por píxel para mantener la viabilidad en la detección (Hu et al. 2015).

Sin embargo, el sargazo no es el único organismo marino que causa una reflectancia elevada en el infrarrojo cercano. Debido a la similitud espectral que tiene con otros materiales flotantes, la detección del sargazo puede caer en confusiones con otro tipo de vegetación algal o planctónica (coccolitóforos o cianobacterias *Trichodesimum*) e incluso con aceites, plásticos y otros surfactantes. Por lo tanto, la detección efectiva de *Sargassum* puede verse obstaculizada si únicamente se utiliza la reflectancia mejorada del infrarrojo cercano o NIR (entre 700 y 730 nm). (Gower et al. 2006; Hu et al. 2015).

Sensores e índices de vegetación empleados

Con el objetivo de comparar la capacidad remota para detectar y diferenciar *Sargassum* pelágico de los sensores satelitales en el Atlántico y Golfo de México, diversos autores se han dado a la tarea de perfeccionar y facilitar esta práctica de teledetección. Durante el verano del 2005, Gower et al. (2006) analizaron imágenes de los sensores MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) y MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, Aqua y Terra). Ambos sensores proporcionan imágenes casi diarias al cubrir amplias franjas y presentan bandas espectrales ópticas en el rango de 670 a 750 nm, que detectan la característica de borde rojo de la clorofila de la vegetación terrestre y marina, pero solo MERIS tiene una banda a 709 nm muy efectiva para la detección de sargazo (Gower et al. 2006).

En 2015 Hu y colaboradores, evaluaron las resoluciones espaciales y espectrales de sensores satelitales multiespectrales: MODIS, LANDSAT y WorldView-2 o Wv-2, así como de sensores satelitales hiperespectrales: Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean o HICO y Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer o AVIRIS. También utilizaron diversos índices y métodos de detección: Flotaed Algae Index (FAI), NDVI, Maximum chlorophyll index (MCI), Sargassum Index (SI), Line Depth (LD) y red/green band ratio (RGR), comparando la precisión de las detecciones con fotos digitales desde aviones. Conociendo los requerimientos espectrales para la detección de sargazo, los autores determinaron cuáles fueron los anchos de banda óptimos, así como la resolución espacial mínima para la detección y cuantificación efectiva de *Sargassum* con productos satelitales, concluyendo que los índices NDVI y FAI pueden diferenciar *Sargassum* de *Syringodium* y *Trichodesmium* en un ambiente libre de aceite emulsionado y basura (Hu et al. 2015).

La resolución espacial también representa un factor limitante e importante en la detección de *Sargassum*. En sensores con datos de resolución de 1,200 m (MODIS y MERIS) para que el sargazo pueda ser detectado debe ser lo suficientemente denso y cubrir un área lo suficientemente grande como para afectar el color promedio (reflectancia espectral de la superficie visible) de un área de la superficie del océano de 1,200 m de ancho. Incluso la

detección de sargazo muy pequeño o fragmentado también puede ser una limitante para los sensores de mayor resolución espacial como Landsat e HypIRI (Gower y King 2011; Hu et al. 2015).

En 2016, ante la evidencia del incremento de *Sargassum* y la ampliación de su distribución, Wang y Hu, mapearon y cuantificaron la distribución y la cobertura de sargazo en la región central del Atlántico Oeste, aplicando el Índice Alternativo de Algas Flotantes (AFAI) a imágenes MODIS durante los años 2000 a 2015. Siendo uno de los primeros trabajos en estimar el área de cobertura de sargazo por percepción remota aplicando un índice de vegetación, los autores calcularon un área mínima de 59.6 km² en los años con menor cobertura (2000-2009), hasta un área máxima de 856.2 km² en 2015 (Wang y Hu, 2016).

Ese mismo año, en un intento por conocer el área de sargazo que había estado en contacto con el derrame de petróleo de Deepwater Horizon, al noreste del Golfo de México en 2010, Hu y colaboradores (2016) aplicaron el índice FAI a imágenes Landsat y AVIRIS, y en conjunto con fotografías digitales aéreas de baja altitud, calcularon un rango de 843 a 1749 km² de sargazo, cubierto con más de 5% de petróleo (Hu et al., 2016).

Ampliando los enfoques metodológicos existentes, Cuevas y colaboradores (2018) implementaron un enfoque para la detección de *Sargassum* y lo probaron en una zona al noreste de la Península de Yucatán, con un proceso cuantitativo, robusto y semiautomatizado, y que además fuera de bajo costo, replicable y con una demanda informática relativamente baja. Basados en la alta resolución espacial, utilizaron imágenes Landsat 8 OLI (Nivel 1) para evaluar la exactitud de detección de 5 índices de vegetación de forma conjunta: Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de vegetación resistente a la atmósfera (ARVI), Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), Índice de vegetación mejorado (EVI) e Índice de algas flotantes (FAI). Esta aplicación metodológica mostró resultados con una exactitud mayor al 90% en la detección de sargazo, definiendo al índice NDVI y la banda 2 como los más importantes.

Por lo anterior, el uso de herramientas de percepción remota junto con los sistemas de información geográfica son un instrumento práctico para el estudio y análisis de amplias regiones considerando grandes escalas espaciales y temporales, agilizando la detección efectiva de sargazo y ofreciendo buenos resultados en cuanto a la predicción de sus dimensiones y su magnitud.

Detección de Sargassum con imágenes Landsat

Debido a su alta resolución espacial, los sensores Landsat han sido utilizados por su factibilidad en la teledetección de balsas de *Sargassum* (Hu, 2009).

La misión LANDSAT fue el primer satélite enviado por Estados Unidos para el monitoreo desde el espacio de recursos terrestres, encontrándose activos en la actualidad las misiones LANDSAT 5, 7 y 8, administradas por la NASA (National Space and Space Administration), mientras que la producción y comercialización de estas imágenes satelitales depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y su acceso es gratuito. El sensor LANDSAT alcanza una cobertura de toda la superficie terrestre en un lapso de tiempo de 16 días (resolución espacial), y aunque las imágenes solo se encuentran disponibles dos veces por mes, su alta resolución espacial (medida en unidades de distancia del área de tierra cubierta por unidad de muestra del sensor (pixel)) de 30m permite la observación de agregaciones de sargazo de medianas a pequeñas, lo cual es también favorecido por su resolución espectral de entre 7 y 8 bandas espectrales dependiendo del sensor, y las cuales al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan sus aplicaciones (Webster y Linton, 2013; INEGI, 2017).

Sistemas de observación y seguimiento de agregaciones de sargazo

El análisis diario de productos satelitales permite el conocimiento de la dispersión y dimensiones del sargazo, así como la implementación de una detección lo suficientemente temprana para alertar a autoridades a escala regional sobre la próxima presencia de agregaciones de sargazo con lo cual se busque disminuir los riesgos y costos por este fenómeno (Maréchal et al. 2017). Cabe resaltar que la implementación de un balance entre

la resolución espacial y la resolución temporal dependerá de los objetivos de cada plan de acción que se desee implementar.

El entendimiento de la realidad sobre la distribución del sargazo se hace más cercano conforme la complejidad de su estudio aumenta, por lo cual el diseño de trabajos más precisos sobre teledetección de sargazo que integren modelos basados en el flujo de corrientes superficiales, velocidad y dirección del viento, flotabilidad del sargazo, entre otras variables de su ciclo de vida, han arrojado nueva información sobre su distribución e incluso respecto a las “áreas de crianza” del sargazo y su ubicación (Brooks et al. 2018).

Un seguimiento de sargazo bastante considerable fue el realizado por Webster y Linton (2013), quienes desde 1999 a 2007 registraron entre imágenes Landsat y noticias de periódicos locales, los fenómenos de arribazón de sargazo en las costas del Golfo de Texas. En sus inicios, los autores reportaron un periodo de tiempo de 12 a 15 días de diferencia entre la detección satelital y el arribo a 30 millas de la costa. Fue en 2012, con la información recolectada y después de dos episodios significativos de arribazón, que diseñaron un sistema de detección de alerta temprana de sargazo (SEAS), utilizando datos de las corrientes superficiales y de velocidad y dirección del viento. Una vez que las imágenes satelitales sugieren probables avistamientos, el monitoreo de las corrientes de viento y superficiales, pueden aproximar los lugares de su llegada. Con la aplicación de este sistema de detección, lograron notificar arribazones con una anticipación de 14 días bajo una precisión de tiempo de 10 horas. Los autores concluyeron que el modelo predictivo de arribazón de sargazo brinda el tiempo necesario para la preparación en tierra, aunque, con la probabilidad de que no todos los avistamientos arriben.

Basados en imágenes MODIS en la región de las Antillas Menores y corrientes de superficie modeladas numéricamente (HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model)), Maréchal et al. (2017) diseñaron un sistema de avistamiento temprano de sargazo: Sargassum Watch System (SaWS), el cual permite un seguimiento casi en tiempo real de algas flotantes en el Atlántico central, permitiendo predecir su posible arribazón, en función de la distancia desde la costa y la dirección y velocidad de las corrientes superficiales, obtenidas a través

del modelo HYCOM. Según los autores, cuando el sargazo se detecta a una distancia menor a 150 km de la costa el arribazón de *Sargassum* es muy probable. Uno de los principales aportes de su trabajo, fue la generación de productos en línea en formato KML (Keyhole Markup Language) disponibles para los usuarios para cargar en Google Earth.

También Wang y Hu (2017) diseñaron mapas de probabilidad de flotación de sargazo basados en un pronóstico posterior de 2000–2016 de observaciones de imágenes MODIS. Los autores identificaron una conectividad cronológica entre las regiones del Mar Caribe y Atlántico Central, donde los florecimientos algales ocurridos en el Mar Caribe en los meses de mayo a agosto estaban relacionadas con las del Atlántico Central durante febrero, mostrando una alta fidelidad en las predicciones de los florecimientos de *Sargassum*, con una precisión del 80%.

OBJETIVOS

General

Evaluar y analizar la dinámica intra e interanual de agregaciones de *Sargassum* spp. flotantes en el Caribe Mexicano durante el período 2016-2017.

Particulares

- Evaluar la distribución espaciotemporal de las agregaciones de sargazo frente a la costa de Quintana Roo durante los años 2016 y 2017.
- Cuantificar las diferencias espaciotemporales en la cobertura de *Sargassum* entre las cuatro escenas que cubren el Caribe Mexicano (4).

MÉTODO

Área de estudio

El Caribe occidental, una subárea perteneciente al Mar Caribe, se caracteriza por ser la región donde el sistema de circulación del Caribe se conecta con el Golfo de México a través del Canal de Yucatán. Dicha área engloba lo que es el Sistema Arrecifal de coral Mesoamericano, la Cuenca de Yucatán, la Cuenca Caimán y el Canal de Yucatán, por lo cual posee características y procesos oceanográficos que a diversas escalas conducen a una gran variabilidad en los principales sistemas de corrientes oceánicas (Sheinbaum et al. 2002; Carrillo et al. 2017).

Localizado en la porción oriental de la Península de Yucatán, el Caribe Mexicano abarca la zona marina del estado de Quintana Roo limitando al norte con el Golfo de México y al este con el Mar Caribe. Dicha región costera representa una zona estratégica para el monitoreo del sargazo pelágico por las características oceanográficas particulares que provocan las corrientes del Caribe y de Yucatán, así como la dinámica que imprime en la región el canal de Yucatán (Pozo et al. 2011; Cuevas et al. 2018). El área específica del presente estudio, abarcó cuatro escenas o path-rows de la misión Landsat 8 OLI (USGS, 2019a) alineadas a la costa quintanarroense. Con un área total de franja de 40 000 km² aproximadamente (Figura 1).

Detección de *Sargassum*

El protocolo para la detección de *Sargassum* en imágenes satelitales se resume en la Figura 2, y derivó de la aproximación propuesta por Uribe-Martínez et al. (2016) y Cuevas et al. (2018). En un proceso que incluyó intervenciones del usuario en diferentes momentos y aplicación de algoritmos estandarizados para la identificación de las agregaciones de la macroalga.

- Obtención de imágenes Landsat

Para el estudio de la distribución espaciotemporal del sargazo se trabajó con cuatro escenas de 100 x 100 km de imágenes satelitales Landsat 8 OLI Nivel 1, con una resolución espacial (tamaño del pixel) de 30 x 30 m. Dichas escenas se encuentran coincidentemente alineadas de forma paralela a la línea de costa del estado de Quintana Roo que va en sentido norte - sur (Figura 1). De acuerdo con la nomenclatura de las escenas obtenidas por la misión Landsat, el área de estudio se cubre con las escenas del 'path' 018, 'rows' 044, 045, 046 y 047. Las imágenes fueron descargadas del Sitio Web Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (USGS, 2019b) Para cada mes del año 2016 y 2017 se seleccionó una imagen de cada escena, siendo un total de 96 imágenes (24 imágenes por escena).



Figura 1. Localización del área de estudio en el Oeste del Mar Caribe, en la zona nombrada como Caribe mexicano abarcado por las cuatro escenas o sitios de estudio.

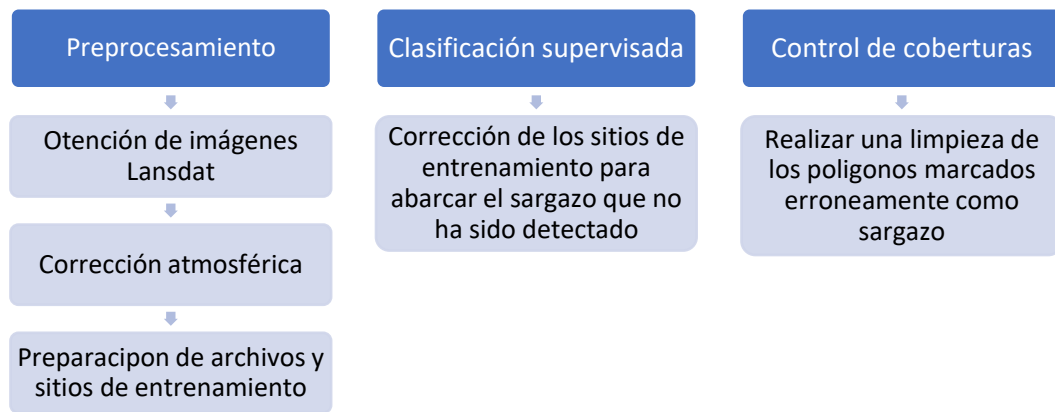


Figura 2. Resumen del protocolo para el procesamiento de las imágenes satelitales propuesto por Uribe-Martínez et al. (2016) y Cuevas et al. (2018).

- Corrección atmosférica

Debido a que la radiación solar que pasa a través de la atmósfera es absorbida y dispersada, la señal recibida por el sensor será una versión distorsionada de la señal verdadera (Green et al. 2000; Lira, 2011). Esta absorción y dispersión atmosférica es de longitud de onda específica e incrementa y varía con la concentración de ciertos gases y aerosoles atmosféricos. Por lo tanto, aunque la REM (radiación electromagnética) visible atraviesa la atmósfera en días nublados las moléculas de vapor de agua, dióxido de carbono y ozono, pueden absorber estas radiaciones, particularmente en la parte infrarroja del espectro, haciendo que la atmósfera opaque ciertas longitudes de onda y ocasionando factores de distorsión radiométrica o errores que influyen en la radiación del pixel, las cuales pueden interferir en los valores de radiancia recibidos por el sensor, por lo cual la corrección atmosférica de las imágenes satelitales es necesaria (Uribe-Martínez et al. 2016).

La corrección atmosférica de las imágenes utilizadas en este estudio se realizó mediante un complemento de clasificación semiautomática (SCP) (Congedo, 2016) en el programa QGIS Desktop v.2.18.15 "Las Palmas", (QGIS Development Team, 2018) aplicando el método 'Dark Object Subtraction' (DOS) o sustracción de objeto oscuro, una familia de correcciones atmosféricas basadas en imagen que disminuye el efecto de dispersión molecular (Rayleigh) para obtener imágenes de reflectancia corregidas.

- Preparación de archivos y sitios de entrenamiento

Una vez corregidas las imágenes, la detección del sargazo se realizó con una modificación del protocolo de detección semi-automático propuesto por Uribe-Martínez et al. (2016) y Cuevas et al. (2018) (Figura 2).

Enmascaramiento y creación de 'stacks'. Entre las modificaciones principales al protocolo de detección de Cuevas et al. (2018), en este análisis se utilizó un método distinto de corrección atmosférica y se emplearon índices de vegetación distintos a los publicados originalmente para este protocolo. A partir de estas modificaciones, la preparación de los insumos para la clasificación de los subproductos de las imágenes Landsat fueron realizados utilizando un 'script' (serie de comandos para programación) de automatización con el programa R (versión 3.4.4 - 2018) y R studio (Versión 1.1.423 - 2018) desarrollado por Uribe-Martínez (2018).

En este procedimiento se enmascararon las zonas de tierra firme y las nubes (disminución del área no requerida para facilitar la detección algal), se creó un conjunto de imágenes agrupadas en un solo archivo ('stack') con las imágenes Landsat 8 corregidas previamente, incluyendo una composición de falso color con las bandas 5 (infrarrojo cercano (0.851-0.879)), 2 (azul (0.452 – 0.512)), 1 (azul costero (0.435 - 0.451)), y un stack con los índices de vegetación: FAI (índice para la detección específica de algas flotantes) utilizado para la detección de algas flotantes en ambientes acuáticos (Hu, 2009), NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) empleado para la estimación de vegetación (Guyot y Gu, 1994) y SAVI (índice de vegetación ajustado por suelo) útil para realzar el contraste de sitios con vegetación (Huete, 1988). Para la obtención de los índices de vegetación se utilizaron las bandas 2 (azul (0.452 – 0.512)), 4 (rojo (0.636-0.673)), 5 (infrarrojo cercano (0.851-0.879)) y 6, infrarrojo de onda corta (SWIR) (1.566-1.651)) (Barsi et al. 2014).

Tabla 1. Descripción de los índices de vegetación utilizados, tomado de Cuevas et al. (2018).

Índice de vegetación	Fórmula	Parámetros	Autor
FAI	$FAI = \rho_{rc,NIR} - \rho'_{rc,NIR}$ Donde $\rho'_{rc,NIR} = \rho_{rc,R} + (\rho_{rc,SWIR} - \rho_{rc,R}) \frac{(\lambda_{NIR} - \lambda_R)}{(\lambda_{SWIR} - \lambda_R)}$	ρ = Banda de reflectividad corregida atmosféricamente; $\rho'_{rc,NIR}$ = Reflectancia baseen la banda NIR; NIR = Banda infrarrojo cercano; R = Banda roja; B = Banda azul; SWIR = Banda infrarrojo de onda corta; L = 0.5, factor de ajuste	Hu 2009
NDVI	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$		Guyot y Gu 1994
SAVI	$SAVI = [(\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R + L)] (1 + L)$		Huete 1988

Sitios de entrenamiento. Como procesos intermedios para la clasificación de imágenes y detección de sargazo, se creó un archivo vectorial (tipo ESRI) con sitios de entrenamiento para cada una de las imágenes evaluadas, todo dentro de áreas de estudio definidas en las imágenes y que podían o no cubrir la totalidad de la imagen por clasificar. Este proceso se realizó en el programa QGIS Desktop v.2.18.15 “Las Palmas”, (QGIS Development Team, 2018). En el primer archivo vectorial de sitios de entrenamiento se dibujaron polígonos que encerraron píxeles representativos de zonas donde visualmente se detectó sargazo, a partir de las composiciones de falso color y de los índices de vegetación. Los sitios de entrenamiento consideraron las siguientes coberturas: (1) sargazo, (2) nubes, (3) mar, (4) mar con brillo y (5) sombras de nubes. Cabe resaltar que las semillas debían abarcar la mayor cantidad de tonalidades de pixel referentes a las coberturas, principalmente las de sargazo, pero evitando muestrear píxeles “ambiguos” o de coberturas mixtas (míxels).

- Clasificación supervisada y limpieza

Una clasificación supervisada es una técnica de procesamiento de imágenes que permite la identificación de objetos en una imagen a partir de sus firmas espectrales (Green et al. 2000). Existen varios tipos de algoritmos de clasificación, pero el propósito general es producir un mapa temático de la cobertura del área de interés. Las imágenes de insumo para esta clasificación fueron los stacks de bandas, así como el stack de los índices de vegetación realizados anteriormente.

Una vez generadas las semillas o sitios de entrenamiento, se utilizó el algoritmo de aprendizaje de máquinas ('Machine learning') de Random Forest (Liaw and Wiener 2002), utilizando el script "Proceso semi automatizado de detección de sargazo flotante con imágenes satelitales", desarrollado por Uribe-Martínez (2018) para R y ejecutado desde R Studio. Con esto se generó un modelo de clasificación para cada imagen, generando rasters binarios recategorizados donde los píxeles con presencia de sargazo tienen el valor de 1 y el resto de los píxeles sin sargazo el valor 0 (cero).

Este tipo de clasificaciones se ve influenciado en buena medida por los rangos de valores definidos con los sitios de entrenamiento. Adicionalmente, como medida cualitativa se verificó que las omisiones de píxeles visualmente identificados como sargazo en la imagen binaria obtenida fueran las menos. En caso de que el nivel de error y/o la revisión visual cualitativa no fueran satisfactorios, se mejoró la definición de los sitios de entrenamiento en términos de la representatividad de estos en toda la imagen analizada. Cada vez que las semillas eran modificadas, se volvía a aplicar la clasificación supervisada hasta lograr la menor cantidad de errores de comisión y omisión.

Finalmente, una vez que se obtuvo la imagen binaria de 'sargazo' y 'no sargazo' se generó un nuevo archivo vectorial (ESRI shapefile) donde los píxeles clasificados erróneamente como sargazo (errores por comisión) por el algoritmo, se eliminaron mediante un control de calidad visual comparativo. Con esta aproximación metodológica los errores de omisión son minimizados con el proceso interactivo de mejora de la clasificación de las imágenes al momento de la clasificación, y los de comisión son eliminados por la supervisión visual.

Cálculo de coberturas

La cobertura de sargazo se cuantificó a partir de las áreas de los polígonos de sargazo detectados en cada imagen (mensual) para cada año y para cada escena, los cuales fueron compilados en una hoja de cálculo de Excel para su análisis estadístico. Debido al tamaño de las cifras obtenidas en metros cuadrados y para fines de poder realizar comparaciones

con otros estudios previos (Uribe-Martínez et al. 2016, Cuevas et al. 2018), las áreas de sargazo fueron convertidas a hectáreas.

Para fines de interpretabilidad y control de calidad de los datos de cobertura de sargazo detectados, se tomó en consideración la condición natural de la presencia de nubes que puede limitar significativamente la detección satelital del sargazo (Maréchal et al. 2017). Por esto, se realizó una estandarización que permitió obtener el porcentaje de cobertura de sargazo en el área marina sin nubes (% de sargazo en área efectivamente clasificada) para cada imagen. Los valores de porcentaje de cobertura por nubes en cada imagen satelital se obtuvieron de sus metadatos. La estandarización numérica se realizó de la siguiente forma:

$$\text{Área efectiva} = 1\,000\,000 - (\% \text{ nubes}) * (10\,000)$$

Lo anterior toma en consideración que el área total (100%) de cada imagen es de 1,000,000 ha (10 000 km²), por lo que el área efectiva es equivalente al área total menos las hectáreas correspondientes al porcentaje de nubes presente en cada imagen.

Una vez obtenida el área efectiva en función del porcentaje de nubes, se determinó el porcentaje de cobertura de sargazo en área efectiva utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ sargazo en Área efectiva} = (\text{Área de sargazo} / \text{Área efectiva}) * 100$$

Cartografía

Una vez generados y corregidos los 96 archivos vectoriales de la cobertura de sargazo, se utilizó el programa ArcGIS (versión 10.3.0.4322; Licencia UNACAR 2018) para crear los mapas que comprendieron la cartografía del proyecto.

Análisis estadístico

Se realizó un resumen general de los datos obtenidos mediante estadística descriptiva básica y se crearon gráficos de los porcentajes de nubes presentes en cada escena/mes en función del porcentaje de cobertura de sargazo (en área efectiva). También se crearon

gráficos de dispersión que plasmaron diferencias entre la cantidad y la continuidad de sargazo presente en cada supuesto: escena, mes o trimestre (Figura 4). Para entender la dinámica de distribución algal se aplicó estadística inferencial con el fin de evaluar diferencias estadísticas entre las cantidades de sargazo en los espacios y tiempos estudiados, así como para la posterior comparación con los resultados de otros autores.

Escalas evaluadas

Dado que el uso de herramientas como la percepción remota en los sistemas de información geográfica (SIG) permiten abarcar diferentes escalas espaciales y temporales, en la evaluación cuantitativa se abarcaron diferentes escalas espaciales y temporales (Figura 3).

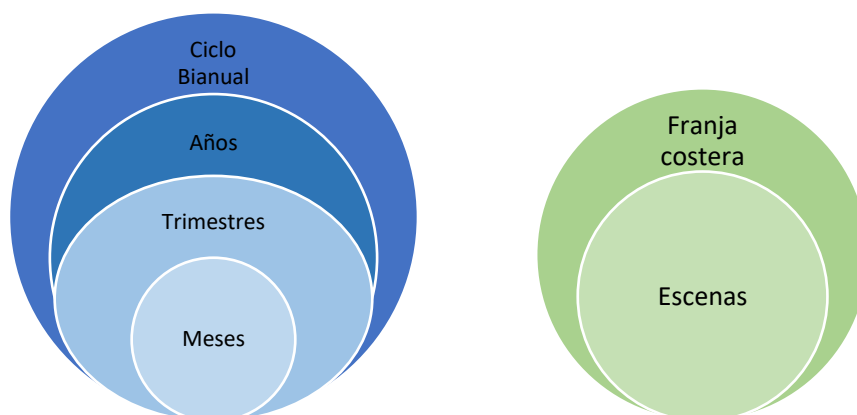


Figura 3. Esquematización y composición de las escalas, en verde se observan las escalas espaciales, las escenas como áreas de estudio individuales y la franja costera como una composición de estas, a su vez, dichas escalas espaciales están inmersas en la dinámica temporal del estudio, el cual puede ser percibido en escalas de meses, trimestres, años o incluso un ciclo bianual.

Con las escalas espaciales y temporales ya establecidas se prosiguió al análisis de los datos, bajo las siguientes aproximaciones (Figura 4):

Dinámica espacial. Se comparó el comportamiento de las coberturas de sargazo entre las cuatro escenas estudiadas. El objetivo fue conocer en dónde (en qué escenas) se presentaron las mayores y menores cantidades de coberturas de sargazo, cuál fue la

variabilidad de estos valores intra e inter-escenas. El análisis estadístico se rigió bajo las particiones trimestrales, anuales y bianual.

Dinámica temporal. Para responder al 'cuándo', se analizaron los datos tomando en cuenta las 4 escenas estudiadas como un solo conjunto, denominado en este trabajo como franja costera. La comparación entre las dinámicas temporales mensual, trimestral y anual buscó evaluar las diferencias en el tiempo para todo el Caribe mexicano, así como identificar los momentos cuando se presentaron las mínimas y máximas agregaciones de sargazo, así como su variabilidad.

Determinación y aplicación de la prueba estadística

Los análisis de pruebas estadísticas se realizaron utilizando el programa Infostat versión 2008 (Di Renzo et al. 2008). Primeramente, se evaluó la distribución de los datos de porcentaje de cobertura de sargazo obtenidos, con la aplicación de pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y homocedasticidad y prueba de Fisher para igualdad de varianzas. Para la prueba de normalidad, el valor obtenido de p fue menor a 0.05, indicando una distribución no normal de los datos, de igual forma la prueba de F también arrojó un valor de $p < 0.05$, haciendo referencia a una desigualdad en las varianzas. Dado lo anterior, se definió el uso de la prueba estadística no paramétrica de Kruskal y Wallis, la cual permite comparar las esperanzas de dos o más distribuciones sin que los términos de error se distribuyan normalmente (Balzarini et al. 2008).

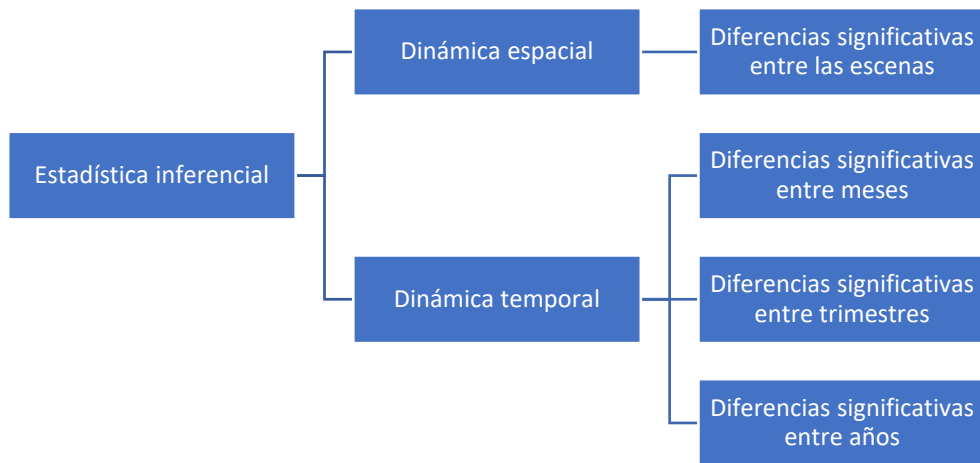


Figura 4. Criterios de clasificación para la aplicación de la estadística inferencial.

RESULTADOS

Se procesaron un total de 96 imágenes satelitales Landsat 8 OLI-L1 con las cuales se generaron 12 mapas de la distribución y porcentaje de cobertura mensual de *Sargassum* pelágico para la costa de Quintana Roo durante el periodo 2016-2017 (Figuras 5 a 8). De las 96 imágenes procesadas, en 16 no se detectó sargazo.

Debido a las grandes cantidades de sargazo que se presentaron en el Caribe Mexicano durante el 2015, se aprecia un remanente evidente de este fenómeno en el mes de enero del 2016 con altos porcentajes de cobertura de sargazo (mayores a 0.2%) en la parte sur y centro de Quintana Roo (escenas 018-047 y 018-046), en comparación con los demás datos obtenidos en los meses siguientes (Figura 9). Dadas las magnitudes de los registros de estas lecturas, ambos datos fueron tratados de forma especial en las representaciones gráficas y estadísticas siguientes.

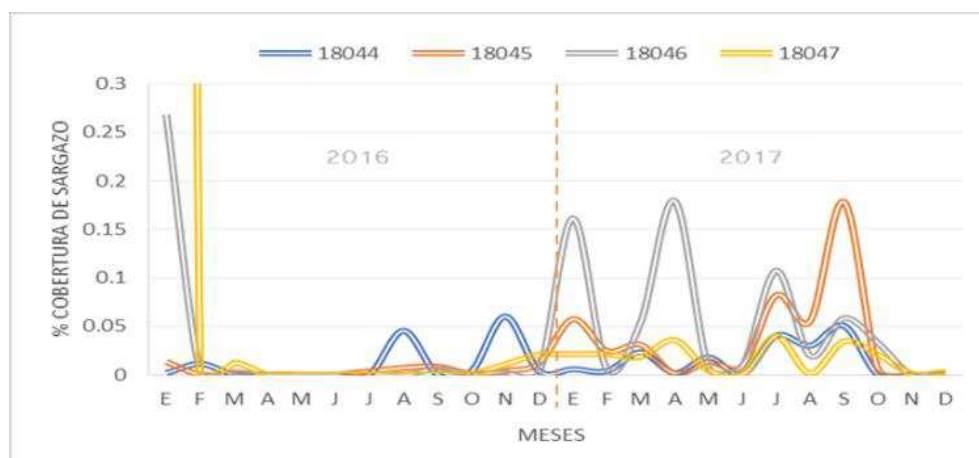


Figura 9. Porcentaje de cobertura de sargazo en el área de estudio a través del tiempo.

Como un ejemplo de las grandes diferencias que los valores inusuales ocasionan en el análisis de los resultados, cuando estos valores extremos se tomaron en cuenta, la escena

018-047 presentó el mayor porcentaje de cobertura con 0.68%, mientras que el menor lo obtuvo la escena 018-045 con 0.04% (Figura 10a). Cuando se eliminaron estos valores extremos, la escena 018-044 fue la que presentó el mayor porcentaje con 0.12%, mientras que la escena 018-046 pasó a tener el menor valor con 0.01% (Figura 10b). De igual forma, enero fue el mes con mayor porcentaje de cobertura con 0.91% y en junio no se presentó sargazo. Cuando se eliminaron estos valores, noviembre pasó a ser el mes con mayor porcentaje con 0.07%, una diferencia bastante notoria.

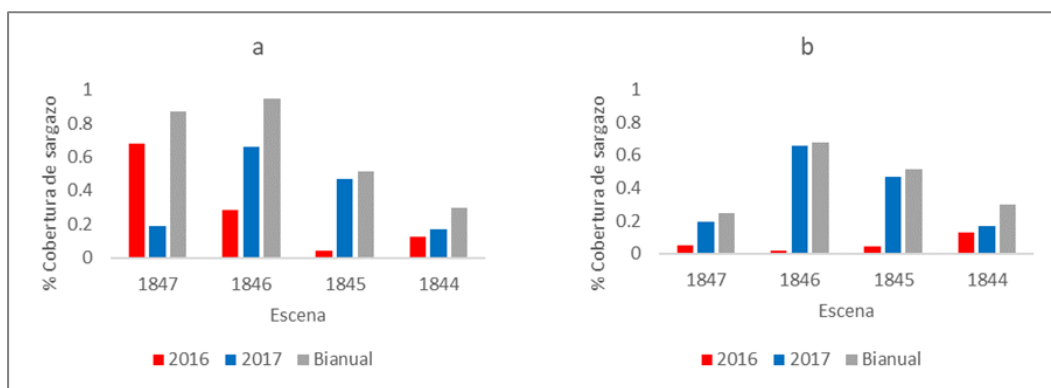


Figura 10. Porcentaje de cobertura de sargazo total: a) Por escena con los datos extremos de Enero 2016 (escenas 018047 y 018046); b) Por escena sin los datos extremos de Enero del 2016.

Para el año 2017 los datos se presentaron de una forma más uniforme que el año anterior, por lo que todos los valores fueron tomados en cuenta. La escena 018-046 obtuvo el mayor porcentaje de cobertura con 0.65%, el menor porcentaje fue para la escena 018-044 con 0.16%. En términos de meses, septiembre presentó las mayores coberturas con 0.31%, noviembre la mínima cantidad con 0.001%.

Sin tomar en cuenta los datos extremos para la suma de coberturas de ambos años, la escena 018-046 obtuvo el mayor porcentaje de cobertura de sargazo con 0.67% (la contribución del 2016 a esta escena fue sólo de 0.02%) mientras que la menor cobertura de

0.29% fue para la escena 018-044. En cuanto a los meses, septiembre siguió ocupando la mayor cobertura, con 0.33% (la contribución de 2016 a esta escena fue solo de 0.02%).

Nubes y detección de sargazo

El promedio total del porcentaje de nubes fue de 25%, 13 imágenes presentaron un porcentaje mayor a 50% y 60 imágenes uno menor a 25%. enero fue el mes con mayor promedio de porcentaje de nubes y marzo el de menor porcentaje en el 2016, para el año siguiente junio fue el de mayor promedio de % de nubes mientras que en marzo se presentó el menor % (Figura 11). En cuanto a las escenas, para el 2016 la escena 018-044 presentó el mayor promedio de nubes, mientras que la 018-047 el menor, en 2017 la escena 018-045 presentó el mayor promedio y 018-047 el menor valor de promedio.

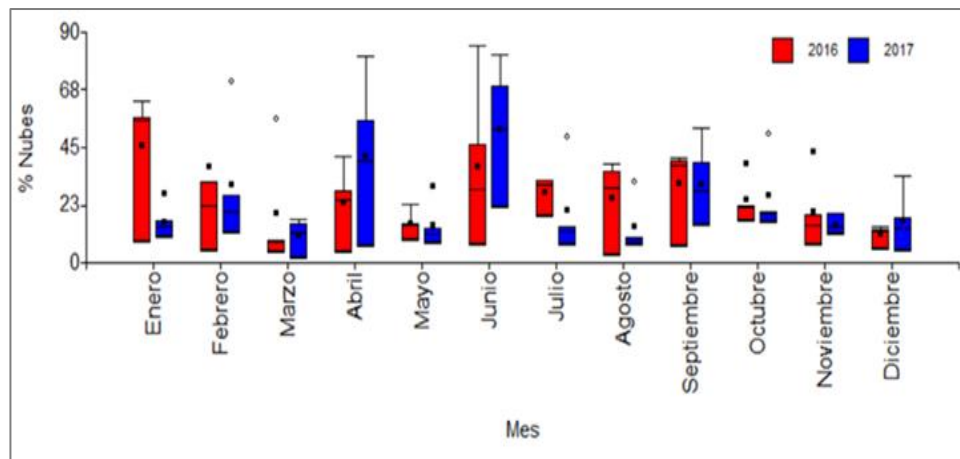


Figura 11. Promedio mensual del porcentaje de nubes.

Para describir la influencia del porcentaje de nubes presente en cada imagen en la detección del sargazo, la figura 12 se enfoca en presentar cuáles fueron los porcentajes de nubes para las 16 imágenes donde no se detectó sargazo, con la finalidad de deducir en cuáles imágenes el sargazo pudo no ser detectado por la presencia de nubes y en cuales se aprecia una ausencia de sargazo de tipo estacional. Los meses de abril y mayo del 2016 mostraron

claramente cómo el sargazo se ausentó de las tres escenas inferiores (018-047, 018-046 y 018-045) y se mantuvo presente, aunque en una mínima cantidad, únicamente en la escena 018-044, y no es hasta el mes de junio cuando se ausenta por completo de todas las escenas.

Para el año siguiente (2017), la ausencia de sargazo solo se dio en tres imágenes, en el caso de junio de la escena 018-047 el porcentaje de nubes registrado para esa fecha fue mayor al 75% por lo cual es muy probable que sea la causa de su no identificación. La figura 13, presenta un gráfico con las coberturas de sargazo detectadas durante los meses de estudio y el promedio de los porcentajes de nubes registrado.

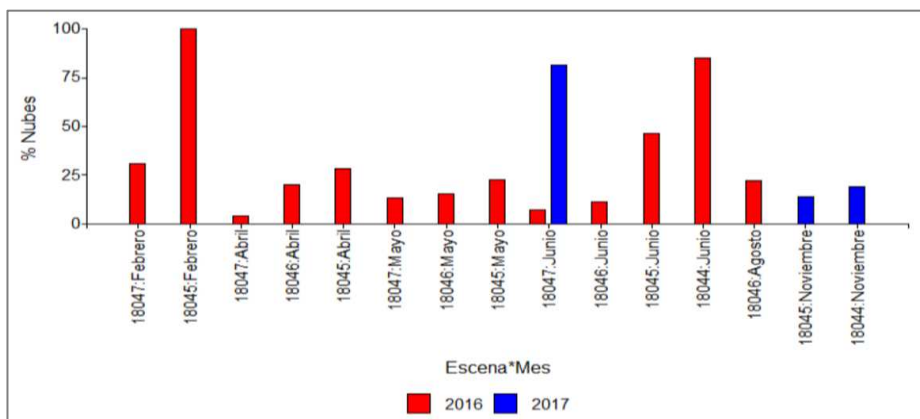


Figura 12. Porcentaje de nubes presente en las imágenes donde no se detecto sargazo, 2016- 2017.

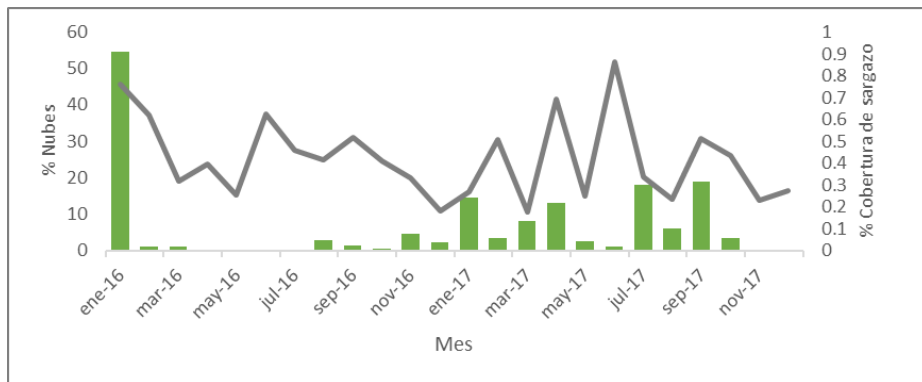


Figura 13. Promedio del porcentaje de nubes mensual en contraste con los porcentajes de cobertura de sargazo, durante los años 2016 y 2017.

Descripción cronológica

Los mapas presentes en las imágenes (14 a 17) son el principal producto de este trabajo, ya que nos ofrecen una representación gráfica que ilustra lo sucedido en el área de estudio durante los dos años. Partiendo cronológicamente, en enero del 2016 hubo una gran influencia del florecimiento algal de sargazo que se dio en el 2015 (0.24%), presente en las escenas 018-047 principalmente y al sur de la escena 018-046; sin embargo, en los meses posteriores la cantidad de sargazo disminuyó drásticamente, siendo baja en febrero y marzo, y llegando a ser casi imperceptible en abril, mayo y junio.

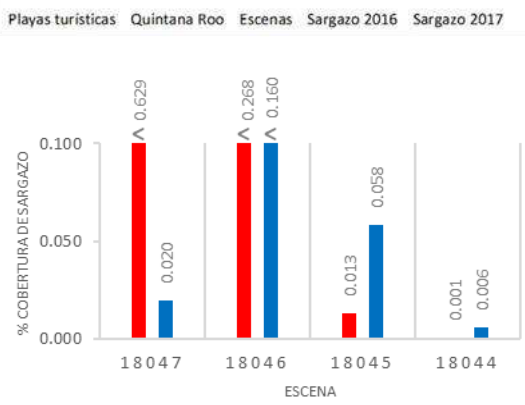
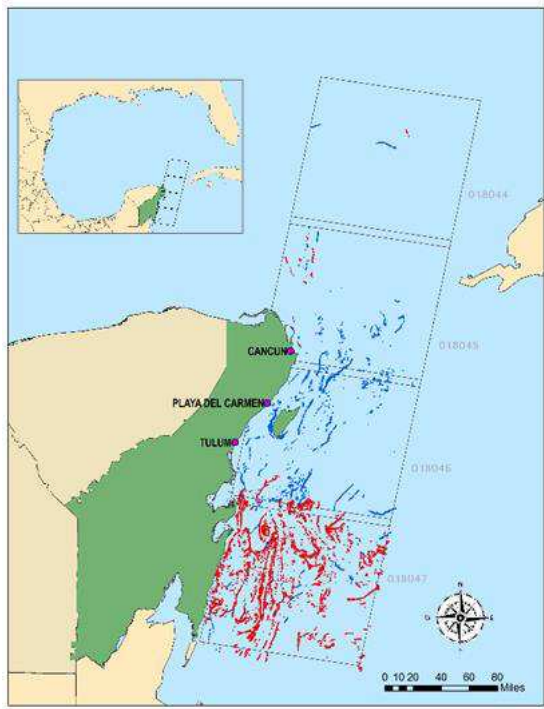
Para el mes de julio los porcentajes de cobertura de sargazo se volvieron a incrementar (0.29%) y en el mes de septiembre se observó una alta concentración de sargazo (0.31%) más cercano a la costa en las escenas 018-046 y 018-045. En octubre volvió a disminuir el sargazo y en noviembre se localizó sargazo nuevamente, esta vez al norte en la escena 018-044. En diciembre el sargazo se presentó mayormente en las dos escenas superiores, además en la escena 018-045 se observó una inusual forma de agrupación de sargazo la cual al no haber sido verificada en campo, queda incierta su veracidad.

Para el siguiente año en enero nuevamente se observó un incremento de sargazo (0.26%) ascendente desde las escenas inferiores, esta vez mayor en la 018-046, donde se aprecia muy cercano y concentrado en la costa al suroeste de la isla de Cozumel. Posteriormente el sargazo disminuyó, observándose en las escenas inferiores en marzo cuando la distribución de sargazo a lo largo de las escenas es más homogéneo. En abril ocurrió un drástico cambio visual, pues para este mes el sargazo solo se apreció concentrado en la escena 018-046 principalmente y un poco en la 018-047, mientras que en las demás escenas fue casi nulo. En este mes, se percibió el sargazo cercano a la costa de Quintana Roo, además de la formación de un giro al suroeste de la isla de Cozumel, en los meses siguientes el giro desapareció y el sargazo que se había concentrado pareció desplazarse hacia el norte, disminuyendo poco a poco.

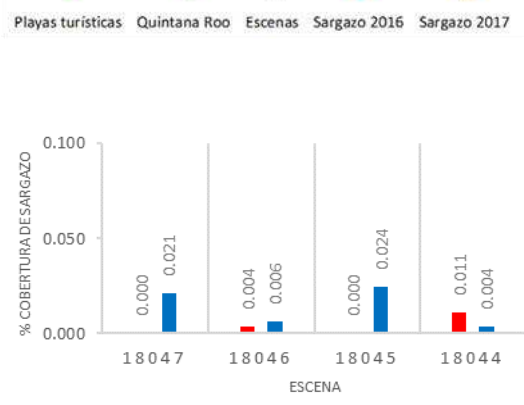
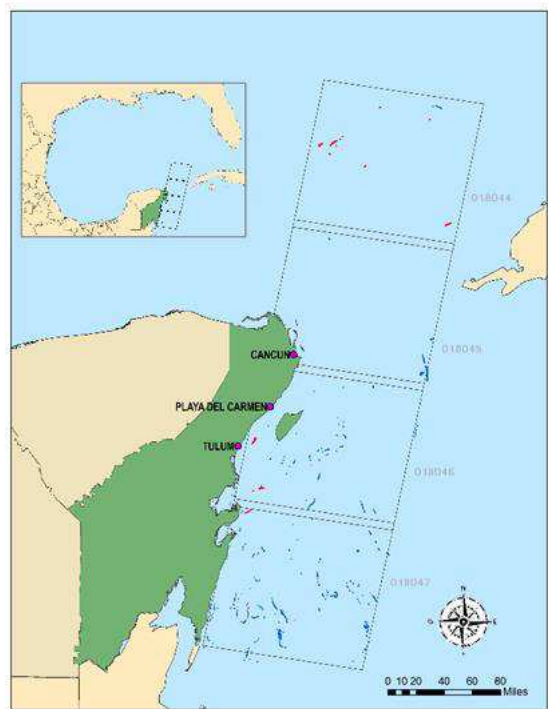
Para los siguientes tres meses (trimestre 3) se presentó nuevamente una rápida elevación en la cobertura de sargazo, los trazos realizados por el sargazo a lo largo de las escenas en estos meses son muy peculiares pues a diferencia de los otros meses, esta concentración algal es mayor en las escenas superiores. La escena 018-045 pareció tener un flujo abundante y constante de sargazo durante este trimestre. Además, en la escena 018-044 se observó un patrón de líneas bien definido en diagonal cuya conectividad de flujo es difícil de interpretar. El mes de septiembre particularmente tiene una alta concentración algal (0.31%) entre las escenas 018-045 y 018-044 del lado izquierdo, además se aprecia un pequeño cúmulo algal entre las escenas 018-047 y 018-046 al este. Para el resto del año volvió a ocurrir una gran disminución de cobertura algal, en octubre se volvió a formar el giro al suroeste de la isla Cozumel en la escena 018-046, más definido pero con menos sargazo.

Es notorio que para la mayoría de los meses, el sargazo parece llegar primero a las escenas inferiores (cercanas a Belice) y luego sube hacia las escenas posteriores, mas cercanas al canal de Yucatán, por lo cual, se infiere que obedece el flujo sur-norte de la Corriente de Yucatán. De igual forma, la detección de giros eventuales en las escenas inferiores, principalmente en la 018046 (referente al área de la Isla de Cozumel), coinciden con las dinámicas de flujo costero características de la zona, anteriormente reportadas por otros autores.

Distribución de *Sargassum* en la zona costera de Quintana Roo: Enero 2016-2017



Distribución de *Sargassum* en la zona costera de Quintana Roo: Febrero 2016-2017



Distribución de *Sargassum* en la zona costera de Quintana Roo: Marzo 2016-2017

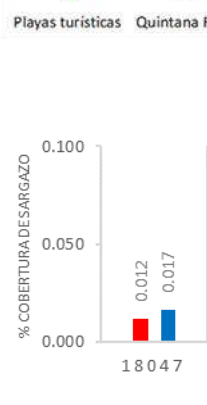
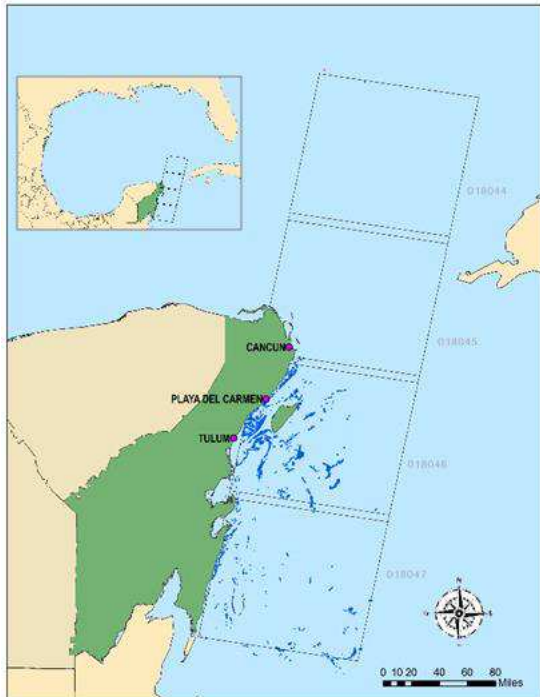
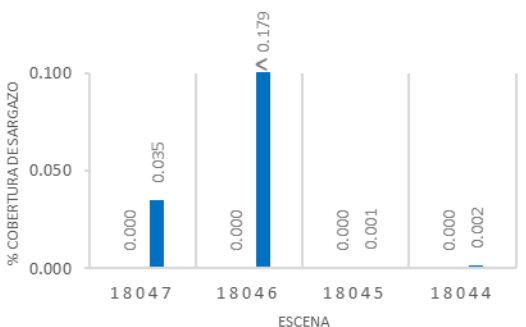


Figura 14. Porcentajes de cobertura de sargazo en la costa de Quintana roo, en el trimestre 1 (Enero, Febrero y Marzo) durante

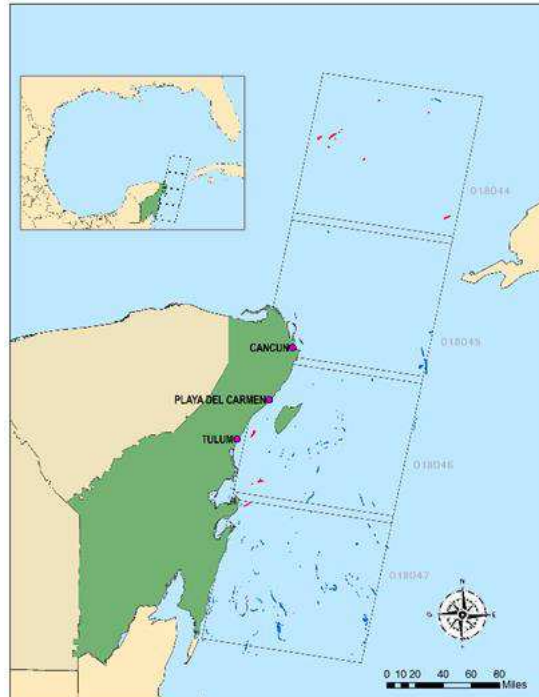
Distribución de *Sargassum* en la zona costera de Quintana Roo: Abril 2016–2017



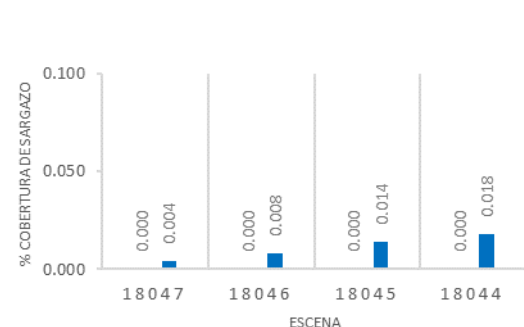
● Playas turísticas
 ■ Quintana Roo
 Escenas
 ■ Sargazo 2016
 ■ Sargazo 2017



Distribución de *Sargassum* en la zona costera de Quintana Roo: Mayo 2016–2017



● Playas turísticas
 ■ Quintana Roo
 Escenas
 ■ Sargazo 2016
 ■ Sargazo 2017



Distribución de *Sargassum* en la zona costera de Quintana Roo: Junio 2016–2017



● Playas turísticas
 ■ Quintana Roo
 Escenas
 ■ Sargazo 2016
 ■ Sargazo 2017

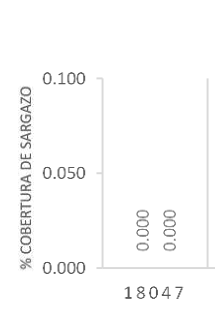
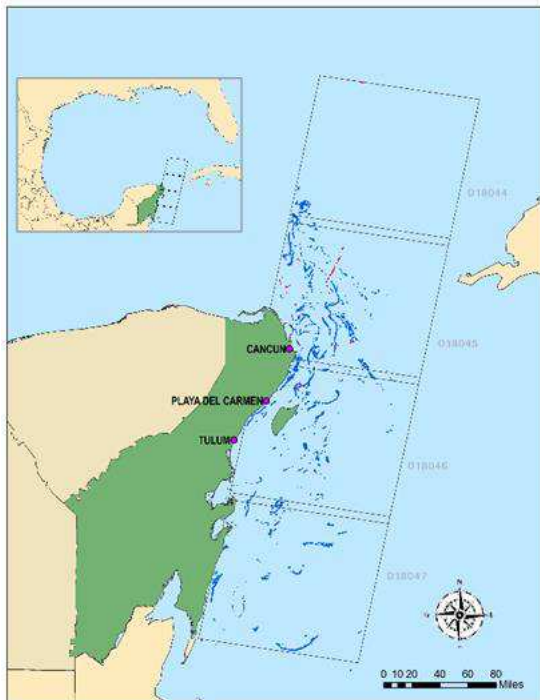
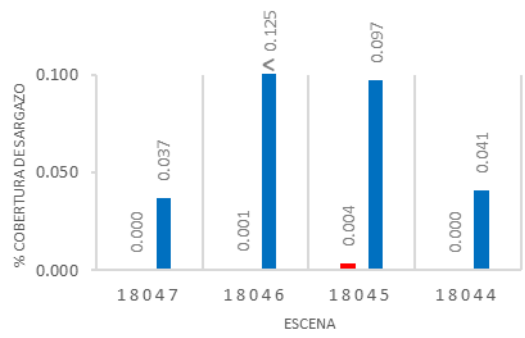


Figura 15. Porcentajes de cobertura de sargazo en la costa de Quintana Roo, en el trimestre 2 (Abril, Mayo y Junio) durante los años 2016 y 2017.

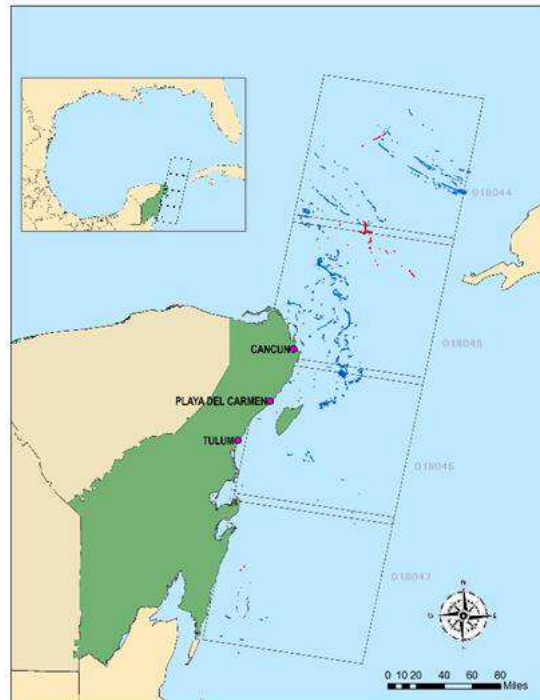
Distribución de *Sargassum* en la zona costera de Quintana Roo: Julio 2016-2017



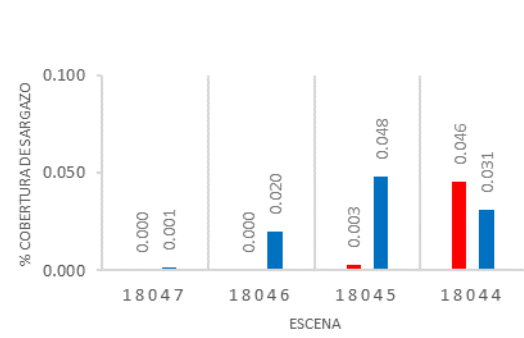
Playas turísticas Quintana Roo Escenas Sargazo 2016 Sargazo 2017



Distribución de *Sargassum* en la zona costera de Quintana Roo: Agosto 2016-2017



Playas turísticas Quintana Roo Escenas Sargazo 2016 Sargazo 2017



Distribución de *S* de Quintana Roo



Playas turísticas Quintana Roo Escenas Sargazo 2016 Sargazo 2017

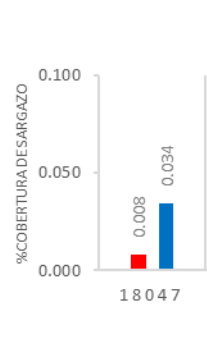
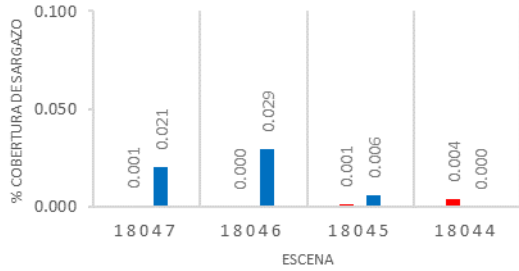
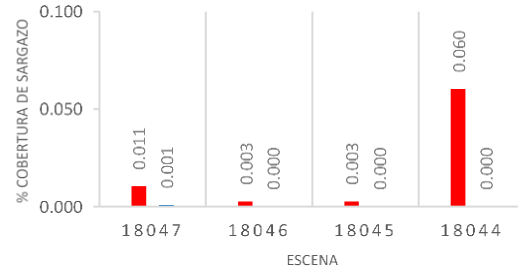
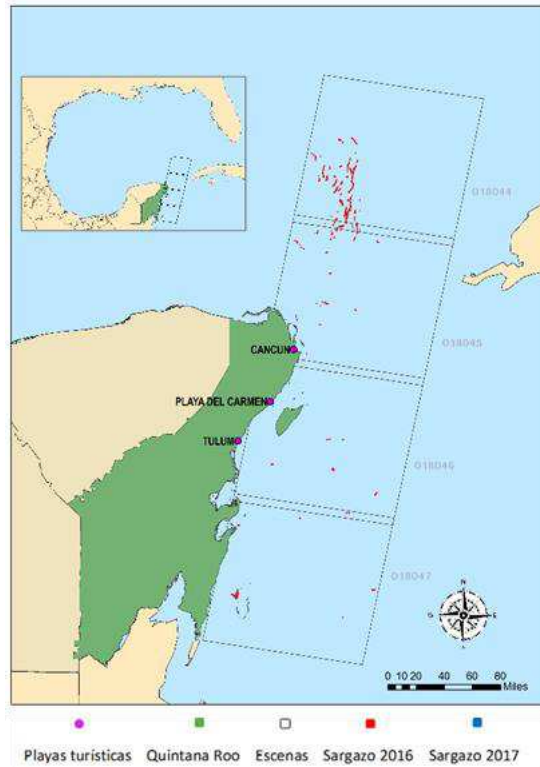


Figura 16. Porcentajes de cobertura de sargazo en la costa de Quintana Roo, en el trimestre 3 (Julio, Agosto y Septiembre) durante

Distribución de *Sargassum* en la zona costera de Quintana Roo: Octubre 2016-2017



Distribución de *Sargassum* en la zona costera de Quintana Roo: Noviembre 2016-2017



Distribución de *Sargassum* en la zona costera de Quintana Roo: Diciembre 2016-2017

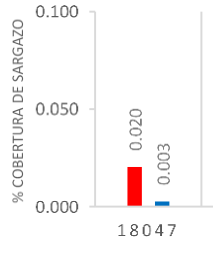


Figura 17. Porcentajes de cobertura de sargazo en la costa de Quintana Roo, en el trimestre 4 (Octubre, Noviembre y Diciembre) durante el periodo 2016-2017.

Abundancia e incidencia

La elaboración de gráficos de dispersión permitió reconocer la relación entre la cantidad de cobertura de sargazo registrada y la incidencia con la cual se presentaron dichos valores, de acuerdo con tres criterios de clasificación a evaluar: comparación entre las escenas, comparación entre los meses y comparación entre trimestres. Cabe mencionar que para la interpretación de datos, los años se analizaron de manera individual y en conjunto (bianual).

De acuerdo a una sencilla relación entre la desviación estándar (eje Y) y la media de los valores obtenidos (eje X) se identificaron cuatro diferentes escenarios: 1) A mayor desviación estándar y menor media, se tiene una baja incidencia de los datos y una baja abundancia; 2) a mayor desviación estándar y mayor media, es una baja incidencia pero una alta abundancia; 3) a menor desviación estándar y menor media, se tiene una alta incidencia de sargazo pero una baja abundancia; y finalmente 4) a menor desviación estándar una media alta, habrá una alta incidencia y una gran abundancia.

Para la dispersión por escenas, se puede apreciar que la escena 018-047 del año 2016 y bianual tuvo las mayores coberturas; sin embargo, no fueron constantes, mientras que la escena 018-045 en el año 2017 se mantuvo con un bajo nivel de cobertura, pero fue constante (Figura 18).

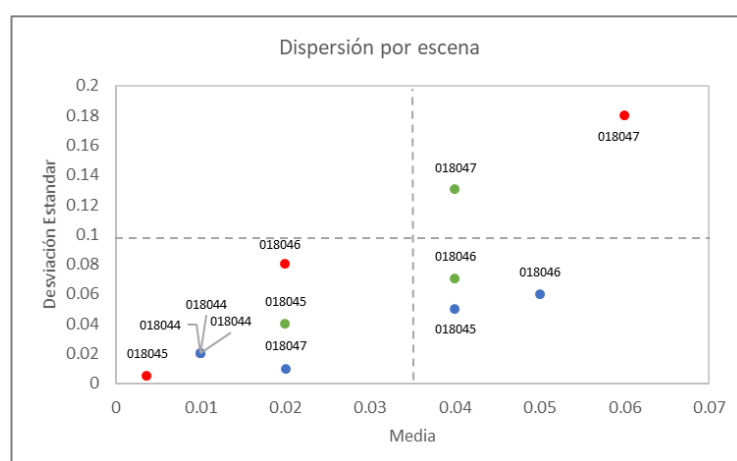


Figura 18. Dispersión de los valores de cobertura de sargazo por escena. En rojo 2016, en azul 2017 y en verde los años en conjunto (bianual).

En cuanto a la dispersión de coberturas de sargazo por meses, se observa que abril, septiembre y enero del 2017 fueron los meses de mayor cobertura y constancia, julio del 2017 tuvo baja cobertura, pero fue el mes más constante, para la clasificación bianual (verde) abril, septiembre y julio presentaron las mayores coberturas, pero pocas constancias; sin embargo, la mayoría de los meses, principalmente los del año 2016, presentaron bajas coberturas constantemente. (Figura 19)

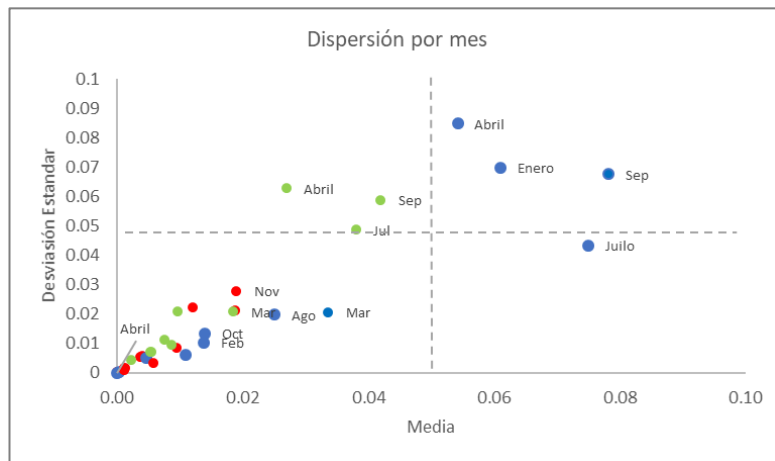


Figura 19. Dispersión de los valores de cobertura de sargazo por mes. En rojo 2016, en azul 2017 y en verde los años en conjunto (bianual).

Finalmente, en la clasificación por trimestres, el trimestre 1 del año 2016 presentó las mayores coberturas y la mayor constancia, el trimestre 3 de año 2017 tuvo bajas coberturas, pero la mayor constancia, mientras que los demás trimestres presentaron bajas coberturas y constancias (figura 20).

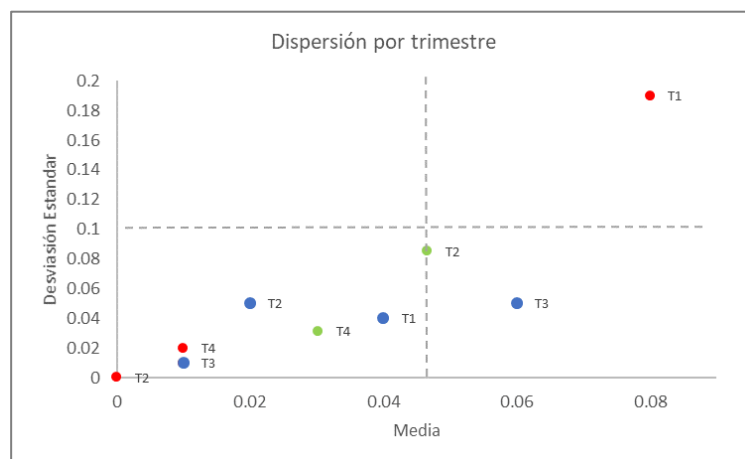


Figura 20. Dispersión de los valores de cobertura de sargazo por trimestre. En rojo 2016, en azul 2017 y en verde los años en conjunto (bianual).

Análisis espacial

En el 2016 no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los valores presentes en las cuatro escenas ($p = 0.70$) para el siguiente año tampoco existieron diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes de cobertura de sargazo presentes en cada escena ($p = 0.26$). Tomando en cuenta los años 2016 y 2017 como un sólo ciclo, la prueba estadística arrojó que a esta escala de tiempo mayor no se mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las escenas ($p = 0.92$). En la figura 21 se muestra la comparación de la distribución de los datos mensuales entre las escenas.

Para el 2016, 2017 y en la escala bianual, ninguna escena presentó diferencias estadísticas en la comparación de sus trimestres ($H > p$). Sin embargo, en todas las escenas se observa una evidente disminución de las coberturas de sargazo en el trimestre 2 (valores más bajos), seguido de un aumento en el tercer trimestre (valores más altos), y posteriormente una nueva disminución (Figura 22). Si bien para cada año no hay una diferencia significativa entre las escenas, las densidades de sargazo dadas en el 2017 son evidentemente mayores a las presentes en 2016.

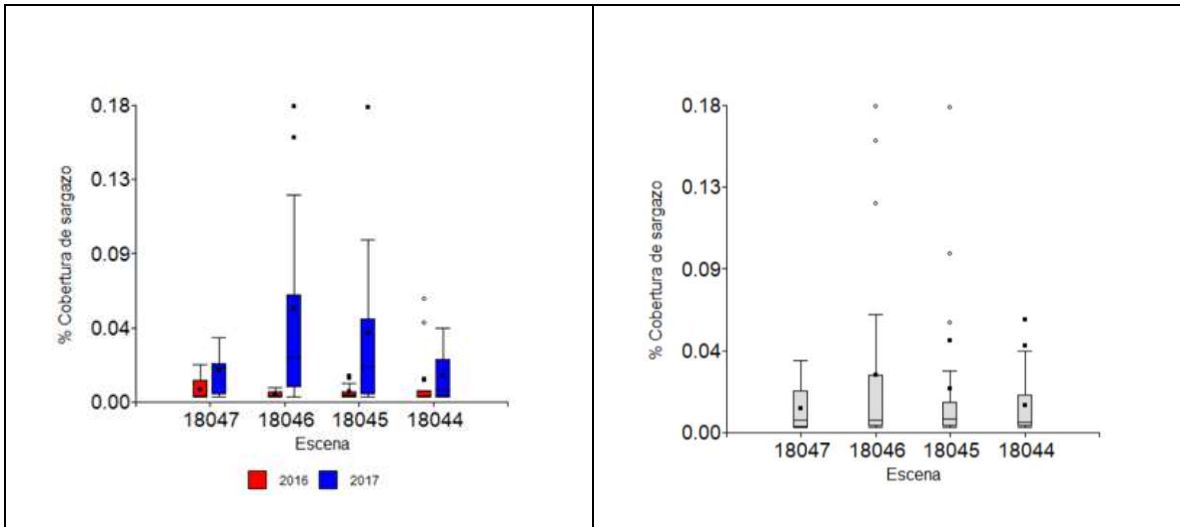


Figura 21. Comparación de la distribución de datos entre las escenas, para los años 2016 y 2017 (izq.) y los dos años en conjunto (der.).

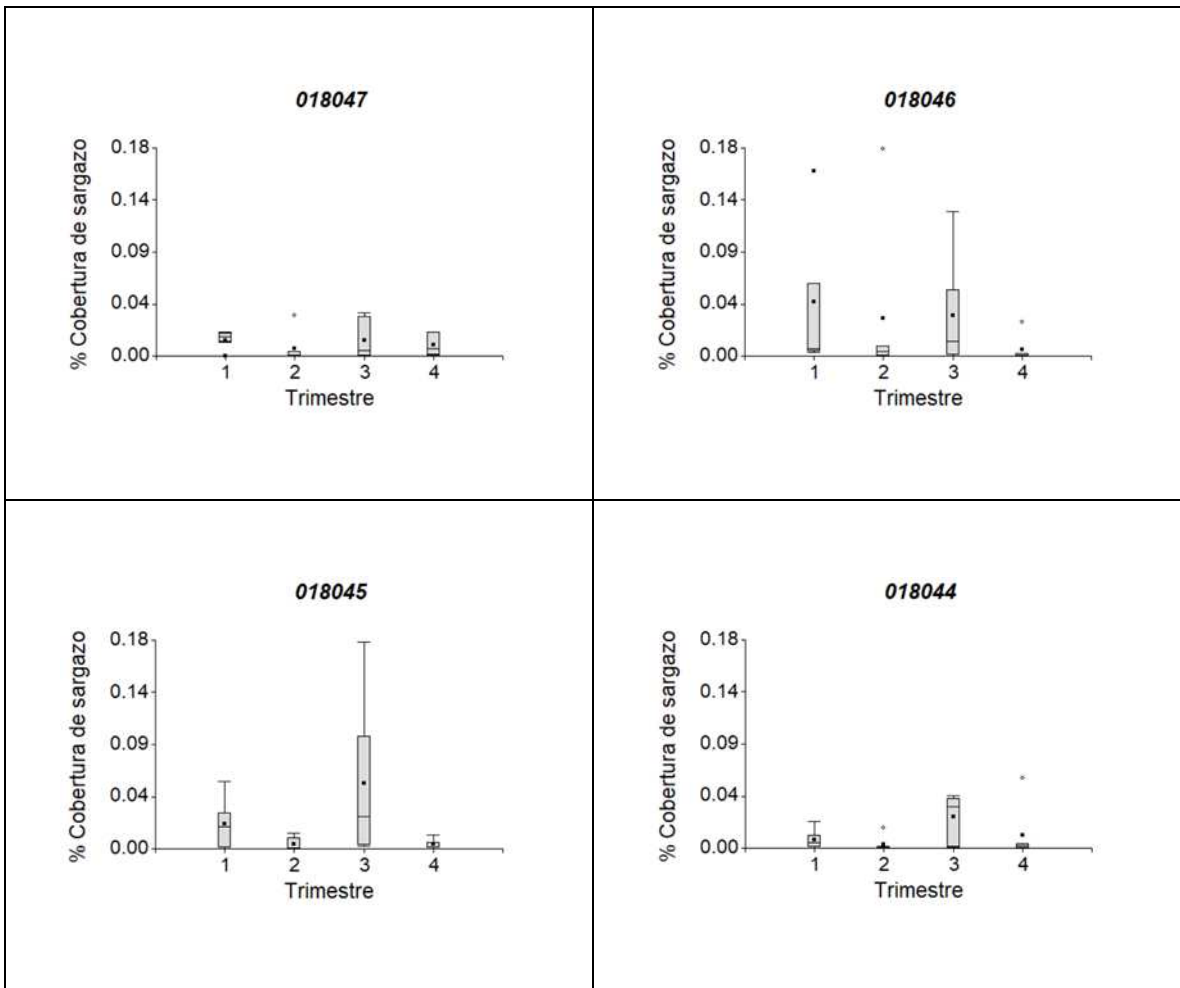


Figura 22. Distribuciones de Sargassum en las diferentes escenas en cada trimestres

Análisis temporal

Al visualizar la presencia de sargazo en una gran porción de la costa, con la unión de las cuatro escenas, se puede observar que sí existieron diferencias significativas entre los meses, tanto para 2016 ($p = 0.004$) como para 2017 ($p = 0.001$). Al juntar los dos años, el valor observado para esta escala temporal fue de ($p = 0.03$) por lo tanto, también existieron diferencias estadísticas entre los meses. La figura 23 muestra la distribución de los valores mensuales, donde se aprecian las variaciones a lo largo del tiempo.

Los trimestres mostraron ser estadísticamente diferentes entre sí tanto para el 2016 y 2017 ($p = 0.0001$) como para los dos años en conjunto ($p = 0.0005$), en este último se apreció la formación de dos grupos, siendo los trimestres 2 y 4 más semejantes entre sí, así como los trimestres 1 y 3 (Figura 24). Finalmente, en la comparación de los años la prueba estadística mostró un valor $p = 0.0001$, mostrando diferencias significativas estadísticas en los valores de porcentaje de sargazo presentes en cada año.

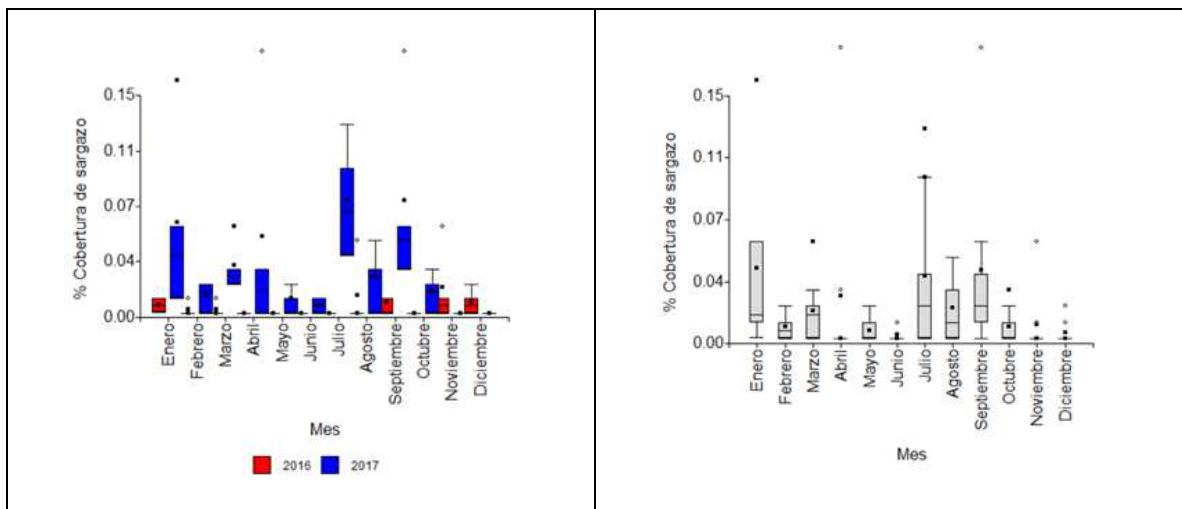


Figura 23. Comparación de la distribución de datos entre los meses, para los años 2016 y 2017 (izq.) y los dos años en conjunto (der.)

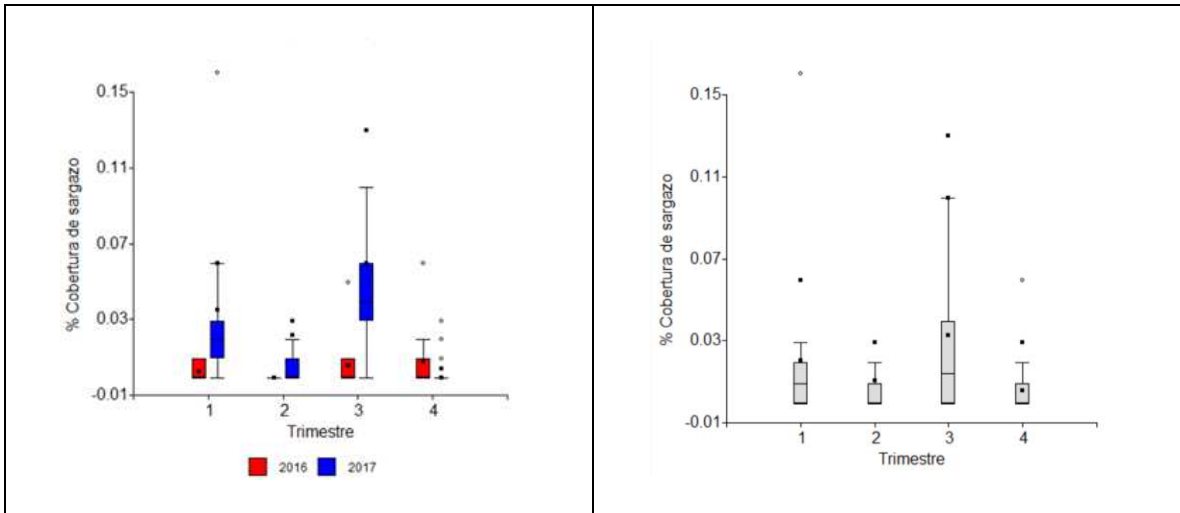


Figura 24. Comparación de la distribución de datos entre los trimestres, para los años 2016 y 2017 (izq.) y los dos años en conjunto (der.)

DISCUSIÓN

Nubes y detección de *Sargassum*

Durante el procedimiento para la detección del sargazo, se identificaron 2 factores que influyeron fuertemente en su identificación: la presencia de brillo y principalmente la presencia de nubes y sombra de nubes. De acuerdo con lo concluido por Gower y King en 2011, si bien las imágenes satelitales proporcionan claramente una cobertura de datos muy mejorada en comparación con las inspecciones de barcos de *Sargassum*, las limitaciones en su resolución espacial, la cubierta de nubes y el brillo del sol pueden omitir cantidades significativas de *Sargassum* si está distribuido de manera demasiado uniforme o mezclado debajo de la superficie por el viento. Incluso, aún con la buena resolución de las imágenes Landsat (30x30m) el cubrimiento de las nubes y su sombra es probablemente el problema más común en los trópicos húmedos y puede reducir significativamente el número de imágenes disponibles o las áreas de interés de cada imagen. Debido a que las nubes se forman cuando la humedad en el aire se condensa en pequeñas gotas de agua en el aire, cualquier factor influyente de la temperatura y la humedad del aire, afectará la formación de nubes (Green et al. 2000).

En cuanto al posible impedimento para la detección del sargazo por parte de las nubes, Green et al. (2000) mencionan que una imagen con más de 25% de cobertura de nubes es considerada inservible, con base en lo anterior, de las 96 imágenes procesadas, solo 36 presentaron porcentajes mayores a 25%, con los cuales se podría justificar la incapacidad de detectar parches algales, sin embargo, de esas 36 imágenes solo en 6 no fue posible la ubicación del sargazo. La descripción del porcentaje de cobertura de sargazo en función de la cantidad de nubes presentes indicó que de las 15 imágenes donde no se detectó sargazo, solo seis imágenes presentaron un porcentaje de nubes mayores al 25%, de las cuales solo en tres de ellas el porcentaje de nubes supero el 80% Por lo cual se puede asumir que en la mayoría de las imágenes donde no se detecto sargazo fue porque realmente se encontraba ausente. Al menos durante el año 2016, se observó un claro descenso en la

cobertura de sargazo hasta su ausencia total en las 4 escenas estudiadas, con una disminución gradual desde febrero, y ausente en abril, mayo y junio. La cantidad de nubes presentes durante febrero del 2016 en las escenas 018-047 y 018-045 (con ausencia de sargazo) llegan a ser mayores al 25% y 90%, lo que podría atribuirse a un impedimento de las mismas; sin embargo, los porcentajes de cobertura de sargazo que presentan las otras dos escenas (018-046 y 018-044) para ese mismo mes son bajas aún con pocas nubes, considerándose más probable que se haya tratado de un descenso en la cobertura de sargazo, posterior al florecimiento algal de diciembre del año pasado. La evidente disminución y ausencia de cobertura de sargazo en los meses posteriores respalda dicha suposición.

Esto demuestra la alta posibilidad de que, para esas fechas, la no detección del sargazo fuese por la ausencia de este y no por el impedimento de las nubes ya que con excepción del mes de junio en las escenas 018-045 y 018-044, el porcentaje de nubes registrado fue menor al 30%. Finalmente, la ausencia de sargazo en la escena 018-045 durante agosto no pareciera estar relacionada con el porcentaje de nubes, ya que éste fue menor al 25%, sugiriendo que dicha ausencia pudo estar regida por una dinámica de movimiento espacial y temporalmente más amplio. Asumir que tan influyente es la presencia de nubes respecto a la detección del sargazo dependerá no solo del porcentaje de nubes registrado, sino también de su ubicación en la escena y su densidad. Sin embargo, resulta más sencillo determinar esta probabilidad cuando se compara con una escala espacial mayor.

Interpretación cronológica

Debido a que los eventos de arribazón y las dinámicas de movimiento de las balsas de sargazo ocurren a niveles espaciales de mesoescala (Carrillo et al. 2017), la estadística inferencial no arrojó diferencias estadísticamente significativas entre las escenas, sin embargo, bajo un criterio de análisis más subjetivo es posible encontrar detalles más minuciosos. Las diferencias estadísticas entre las 3 escalas temporales propuestas (meses, trimestres y años) si fueron detectadas por el algoritmo. De acuerdo con Stoner y Greening (1984), las comunidades de sargazo varían según la estación climática, el área geográfica y

la edad de la balsa, por lo cual es factible pensar que la variación en el comportamiento de la distribución del sargazo es más evidente dependiendo de las condiciones climatológicas presentes en cada zona a lo largo del tiempo.

El análisis del movimiento de parches algales mediante una interpretación visual de su morfología puede significar una ventaja para la interpretación del comportamiento espacial de *Sargassum* en conjunto con análisis estadísticos y datos meteorológicos obtenidos en investigaciones dedicadas al estudio de su dinámica espacial y temporal. La representación visual de la cartografía del sargazo en el presente estudio no solo permitió un mayor acercamiento a las dinámicas de desplazamiento del alga, sino también una apreciación de diferentes patrones en las figuras que se formaban y de sus distintas magnitudes, coincidiendo con los registros de Gower et al. (2006), cuyas detecciones indicaron grandes mareas de *Sargassum*, yendo desde 100 hasta 1 000 m de ancho y hasta cientos de kilómetros de largo. Además, los diseños en las estructuras del sargazo detectadas parecieran “dibujadas” de acuerdo con la magnitud y direccionalidad del viento. Brooks et al. (2018), mencionan que en escalas de tiempo cortas menores a 2 meses, la advección del viento por si misma es responsable en un 60% del movimiento algal, sin embargo, a una escala de tiempo mayor, la advección no es suficiente para mantener el patrón estacional de *Sargassum* a través de múltiples años. Las dinámicas de flujo superficial ocurridas en la zona de estudio, fueron descritas por Enríquez et al. (2009), quienes mencionan que en un corto plazo bajo fuertes vientos y cuando la Corriente de Yucatán (CY) fluye lejos de la Península de Yucatán (hacia Cuba), el estrés del viento puede ser igual o más importante para la dispersión del sargazo que la misma corriente. Sin embargo, cabe resaltar que independientemente de la dirección tomada por la CY, el viento contribuye de manera importante en la dispersión de la floración de sargazo, en relación con su trayectoria, velocidad y forma, además de jugar un rol determinante para empujar los parches de marea roja hacia la costa.

Conectividad entre las balsas algales del Caribe Mexicano.

La detección de una gran cantidad de *Sargassum* en la escena inferior 018047, durante el mes de enero del 2016 fue de las mayores realizadas durante ese año. Al presentarse a inicios de año, ésta gran cantidad de sargazo es atribuida a los masivos arribazones reportados durante el 2015 en el Caribe mexicano (Azanza y Pérez, 2016; Rodríguez-Martínez et al. 2017). La drástica disminución de sargazo en todas las escenas en los meses posteriores a enero del 2016 puede deberse al rezago de las últimas balsas de sargazo del 2015 que llegaron a las costas, mayormente presentes en las playas dentro de las escenas 018047 y 018046 (escenas inferiores). El sargazo presente en el área de estudio durante el 2016 se mantuvo escaso durante todos los meses posteriores y fue hasta noviembre y diciembre que presentó un aumento en el porcentaje de cobertura, esta vez en las escenas superiores (018045 y 018044). Lo anterior concuerda con lo propuesto por Dreckmann y Senties (2013) quienes mencionan que los eventos de arribazón de sargazo en dos sitios importantes de la costa del Caribe mexicano, Punta Cancún y Puerto Morelos (zonas correspondientes a las escenas superiores) se presentan durante todo el año, con dos incrementos principales en los meses de julio-agosto y octubre-noviembre.

A diferencia del sargazo detectado en enero del 2016 más vinculado con los arribazones de diciembre del 2015, la presencia del sargazo que se detectó en noviembre y diciembre del 2016, pertenecen a una nueva y diferente deriva de sargazo. De igual forma se observa un patrón similar al observado en el año anterior, ya que muy probablemente esta grande y nueva deriva algal reportada a finales del 2016, esté relacionada con el sargazo detectado durante el mes de enero del año siguiente (2017). La cobertura de sargazo también disminuyó durante el primer trimestre (enero, febrero y marzo) pero más gradualmente. Con lo anterior se puede establecer una conectividad entre la llegada de grandes balsas de sargazo ocurridas a fin de año y las que se observan en los meses de enero del año próximo, renovándose nuevamente a mediados y finales de año.

En abril de 2017 se presentó una condición muy particular en la escena 018046, correspondiente a la playa de Puerto Morelos e Isla Cozumel. Una gran concentración de

sargazo se detectó “atrapada” en giros, en una pequeña zona entre la costa de Quintana Roo y el suroeste de la Isla de Cozumel. Al mes siguiente, el trazo de estos remolinos de sargazo desapareció, haciendo probable su arribo en las costas cercanas. Sin embargo, la aparente ausencia de los giros posterior a la detección no implica precisamente que hayan desaparecido, por el contrario, al fungir como trazadores de corrientes, si el sargazo se ausentó, la visibilidad de los giros pudo perderse, aunque todavía estuvieran ahí. De ser así, puede asumirse que se trata del sargazo “rezagado” que se originó desde finales del año anterior (ya antes descrito) y que quedó circulando en el giro formado. Ya sea que se tratara de una nueva y corta deriva de sargazo o de sargazo rezagado atrapado en los remolinos durante el segundo trimestre (abril, mayo y junio), su detección disminuyó.

En el tercer trimestre (julio, agosto y septiembre) del 2017, las coberturas de sargazo volvieron a elevarse notoriamente y cabe resaltar que, a diferencia de los meses anteriores, las concentraciones algales se distribuyeron mayormente en las escenas superiores (018045 y 018044) y del lado este de la Isla de Cozumel. Lo cual coincide con el aumento algal descrito por Dreckmann y Sentíes (2013) para esta zona (Cancún y Puerto Morelos), donde el sargazo ocurre en los meses de julio y agosto.

Conectividad con el flujo Atlántico-Caribe-GoM

Como se describió anteriormente, el Caribe Mexicano es enriquecido por la posición geográfica que ocupa dentro del gran sistema de circulación de las principales masas oceánicas que influyen en el ciclo de vida de *Sargassum*, totalmente pelágico y dependiente de las condiciones atmosféricas y oceánicas. El flujo de la corriente de Yucatán hacia el Golfo de México, a través del canal de Yucatán representa un sitio clave para el monitoreo de balsas de sargazo. De igual forma, los eventos de sargazo ocurridos en las regiones del Caribe (incluyendo Caribe Mexicano) y Ecuatorial estarían asociados entre sí.

Basándose en que enero y septiembre del 2017 fueron los meses donde más concentración de sargazo fue detectada en la zona de estudio para ese año, es probable relacionar estas grandes concentraciones con procesos ocurridos en otras regiones geográficas conectadas

entre sí. Por un lado, con los periodos de ausencia o imperceptibilidad de sargazo en el Golfo de México que ocurren durante el mes de enero, y por otro lado con la presencia de *Sargassum* en el Caribe y los trópicos centrales durante todo el año, siendo a finales de verano (septiembre) cuando ocurren las mayores densidades (Brooks et al. 2018). Trabajos de teledetección de sargazo realizados por Gower y King (2011) y Gower et al. (2013), han descrito una clara estacionalidad en los flujos algales, donde grandes abundancias en la primavera (marzo) que aumentan a principios del verano (julio-agosto), ocurren al noroeste del Golfo de México, siendo la mayor “área de cuidado/crianza” de sargazo, y que posteriormente para el mes de julio ocurre una inyección anual de éste cúmulo hacia el Atlántico, al norte y este de Cabo Hatteras, sugiriendo un ciclo de vida del sargazo no mayor a un año.

Hu y colaboradores, (2016), también mencionan que el sargazo presente en esta zona de crianza se dirige a la región de extensión de la Corriente del Golfo a fines del verano y principios del otoño, y al sur del Mar de los Sargazos en el invierno y principios de la primavera. Las altas concentraciones de sargazo que se registraron en la presente investigación pueden ser indicadores que confirmen que la entrada de sargazo hacia el Golfo de México ocurre de acuerdo con las temporadas anteriormente descritas por otros autores.

Si bien no es posible establecer de donde viene las balsas algales detectadas más allá de las cuatro escenas trabajadas en el presente estudio, hay dos supuestos que pueden ayudar a discernir la naturaleza del flujo algal. Ambas propuestas, están asociadas y relacionadas entre sí.

1) De acuerdo con las tres rutas de entrada de *Sargassum* antes descritas, podemos interpretar que no todo el sargazo detectado en las imágenes Landsat proviene de la misma ruta de origen. Sumado a que hubo diferencias estadísticas en las escalas temporales, se sugiere que la llegada del sargazo en meses alternos y en diferentes escenas puede deberse a diferencias en su origen. Según Gower et al. (2013), el surgimiento de un nuevo cúmulo de *Sargassum* al noreste de Brasil que llega a las costas del Mar Caribe, es finalmente

dirigida por la Corriente de Yucatán. Dicha corriente se mueve conforme a diversas condiciones a mesoescala, oceanográficas y topográficas las cuales dependen de la estacionalidad (Enríquez et al. 2009; Athié et al. 2011).

2) Por otro lado, Brooks et al. (2018), al encontrarse en regiones con condiciones de luz, temperatura y disponibilidad de nutrientes favorables para su crecimiento, bajas densidades de *Sargassum*, en un principio invisibles para los satélites, pueden contribuir a florecimientos algales. Los autores concluyen que el oeste del Golfo de México y el sur del ecuador, son regiones fuertemente asociadas con la generación del ciclo estacional de *Sargassum*, relacionadas a su vez con la descarga de los ríos Mississippi y Amazonas al océano Atlántico, donde la entrada de nutrientes permite el crecimiento local del alga. De igual forma, las aguas neríticas cercanas a la costa también están ligadas con las altas tasas de crecimiento de *Sargassum*, permitiendo la presencia de biomasa en lugares donde la baja circulación no lo permitiría. Coles et al. (2013) también plantean la posibilidad de una conectividad entre la pluma del Amazonas y el Mar Caribe, donde las aguas descargadas durante la primavera tienen altas probabilidades de enriquecerlo, sugiriendo la alta conectividad de los trópicos hacia el Caribe con el incremento en los reportes de arribazones de sargazo en playas caribeñas.

Asociación con las condiciones atmosféricas

Una tercera condición importante para tomar en cuenta es la temporalidad de huracanes y ciclones, según lo mencionado por Dreckmann y Senties (2013), quienes afirman que tanto la periodicidad como la cantidad de los arribazones de sargazo están relacionadas con los huracanes y ciclones característicos de la zona, haciendo la sugerencia de introducir esquemas de esta naturaleza a futuros modelos predictivos. Sin embargo, Murillo (2017) menciona que la falta de huracanes fuertes en los últimos diez años en la región del Caribe pudo crear la estabilidad necesaria para las condiciones que favorecen el crecimiento y reproducción de *Sargassum*. El territorio mexicano es ampliamente susceptible a la acción de los ciclones tropicales en ambos litorales (Pacífico y Golfo de México y Mar Caribe). De acuerdo con el Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales, desarrollado por la

Coordinación Estatal de Protección Civil, la temporada de ciclones tropicales inicia para el Atlántico, Golfo de México y mar Caribe el 1 de junio, concluyendo el 30 de noviembre (Dirección General de Protección Civil ,2019)

En el presente estudio, el trimestre cuatro, fue el que presentó la mayor cantidad de sargazo, principalmente los meses de julio y septiembre disminuyendo drásticamente en los meses posteriores. Dreckmann y Senties (2013) mencionan que en Punta Cancún, las arribazones se presentan entre agosto y noviembre, lo cual de acuerdo con los autores coincide con la temporada ciclónica, la cual termina justo cuando el sargazo llega a Puerto Morelos, donde ocurren en noviembre y disminuyen en febrero, en relación con la temporada de secas.

A pesar de la proximidad de los sitios, los autores asumen que dicha distancia temporal entre las arribazones puede atribuirse a dos causas que contribuyen ampliamente a los dos supuestos sobre la naturaleza de *Sargassum* antes mencionados: la complejidad del patrón general de corrientes superficiales (contracorrientes litorales), y a las corrientes oceánicas provenientes de las Antillas que llegan primero a Isla Mujeres, dispersando el sargazo hacia la sobresaliente Punta Cancún y posteriormente después de dos a tres meses hay una llegada hacia Isla Cozumel y Puerto Morelos, sugiriendo un origen algal diferente entre ambas localidades.

Si bien no es posible establecer con claridad cuando se trata de pulsos, entradas o derivas de sargazo estacionales u ocasionales, o de florecimientos que se dan porque las condiciones físicas y químicas de las costas las favorecen, el estudio de las características de dispersión de *Sargassum* a diferentes escalas espaciales y temporales permiten una visión amplia al ser abordadas bajo diversas perspectivas. Cabe resaltar que, para un estudio más completo, los efectos aditivos de la propagación vegetativa y las fuentes localizadas de nuevo sargazo son claves en la reproducción precisa del ciclo estacional de *Sargassum*, así como el conocimiento de su mortalidad, crecimiento y resiembra (Brooks et al. 2018).

CONCLUSIONES

De acuerdo con la interpretación visual de las imágenes, cuando son analizadas de forma individual, a manera de escenas, el alto porcentaje de nubes puede presentar un mayor impedimento en la interpretación cronológica de la presencia del sargazo, sin embargo, bajo una escala espacial mayor, es más probable asumir si la ausencia o baja presencia de sargazo se debe al porcentaje de nubes o si realmente su densidad es baja. La calidad metodológica en la generación de los sitios de entrenamiento es indispensable para la agilización del proceso de detección de sargazo. Una gran variedad de tonalidades del pixel en las muestras evita los errores por omisión, sin embargo, la selección de muestras con tonalidades “ambiguas” puede llegar a aumentar los errores por comisión, lejos de agilizar el procedimiento.

Con base en la interpretación de la presencia de balsas de sargazo en las diferentes escenas a lo largo del tiempo, se concluyen tres características:

- Existe una posible conectividad entre las balsas observadas a finales de un año y a principios del año siguiente.
- De acuerdo con la naturaleza del flujo de las corrientes que controlan la distribución del sargazo, hay una coincidencia entre los meses donde se detectó sargazo en diversas regiones del Atlántico, Caribe y Golfo de México y los meses donde el sargazo fue detectado en la presente investigación.
- El aumento en la complejidad con la cual se aborden los estudios sobre la distribución de *Sargassum* permitirá una mayor exactitud en futuros modelos predictivos.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se logró bajo la tutoría y participación esencial de la Doctora Abigail Uribe Martínez y mis asesores el Dr. Eduardo Cuevas Flores y el Dr. Luis Ayala Pérez a quienes agradezco por todo el conocimiento y apoyo brindado, siendo parte importante en mi formación académica y profesional. Agradezco a la Universidad Autónoma del Carmen, por acogerme y permitirme desarrollar mi investigación en su Centro de Investigación de Ciencias Ambientales. Al Jardín Botánico Regional del Carmen y al Laboratorio de Ecología Espacial y del Movimiento, donde aprendí muchas cosas y pase buenos momentos. A la Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco, mi casa abierta al tiempo. Finalmente, agradezco infinitamente a mi amada madre, Laura, por ser mi pilar, mi impulso y siempre creer en mí.

REFERENCIAS

- Athié, G., Candela, J., Sheinbaum, J., Badanf, A., y Ochoa-de-la-Torre, J., 2011. Estructura de la corriente de Yucatán en los canales de Cozumel y Yucatán, *Ciencias marinas*, 37(4), pp. 471-492. doi:10.7773/cm.v37i4A.1794
- Azanza, J., y Pérez, R., 2016. Impacto de la acumulación de sargazo del verano del 2015 sobre las tortugas marinas de Playa La Barca, Península de Guanahacabibes. *Revista Investigaciones Marinas*, 36(1), pp. 54-62.
- Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J.A., y Robledo C.W. (2008) *Manual del Usuario*. Argentina: Editorial Brujas.
- Barsi, J.A., Lee, K., Kvaran, G., Markham, B.L., y Pedelty, J.A., 2014. The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager. *Remote Sensing*, 6, pp. 10232-10251. doi:10.3390/rs61010232
- Brooks, M.T., Coles, V.J., Hood, R.R., y Gower, J.F., 2018. Factors controlling the seasonal distribution of pelagic *Sargassum*. *Marine Ecology Progress Series*, 599, pp. 1–18. doi:10.3354/meps12646
- Butler, J.N., Morris, B.F., Cadwallader, J., y Stoner, A.W. (1983) *Studies of Sargassum and the Sargassum community*. 1ª ed. Bermuda: Bermuda Biological Station for Research. No. 22.

- Carrillo, L., Lamkin, J.T., Johns, E.M., Vásquez-Yeomans, L., Sosa-Cordero, F., Malca, E., Smith, R. H., y Gerard, T., 2017. Linking oceanographic processes and marine resources in the western Caribbean Sea Large Marine Ecosystem Subarea. *Environmental Development*, 22, pp. 84-96. doi:10.1016/j.envdev.2017.01.004
- Chávez, G., Candela, J., y Ochoa, J., 2013. Subinertial flows and transports in Cozumel Channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(2), pp. 19-1. doi:10.1029/2002JC001456
- CIT-SSC, 2015. Nota Conceptual sobre la importancia de *Sargassum* y el Mar de los Sargazos para las Tortugas Marinas del Atlántico. CIT-CCE7-2014-Tec.9 - SSC/2014/1/Doc. 2.
- Coles, V.J., Brooks, M.T., Hopkins, J., Stukel, M.R., Yager, P.L., y Hood, R.R., 2013. The pathways and properties of the Amazon River plume in the tropical North Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(12), pp. 6894–6913. doi:10.1002/2013JC008981
- Congedo, L. (2016). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*. doi:10.13140/RG.2.2.29474.02242/1
- Cuevas, E.A., Uribe-Martínez A., y Liceaga-Correa M.A., 2018. A satellite remote-sensing multi-index approach to discriminate pelagic *Sargassum* in the waters of the Yucatan Peninsula, Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 39(11), pp. 3608-3627. doi:10.1080/01431161.2018.1447162
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, C.W. (2008). *InfoStat, versión 2008*, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Dirección General de Protección Civil (2019). *Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales*. Secretaria de Gobernación del Estado de Quintana Roo - Dirección de administración de emergencias. [Consultado en línea] <http://proteccioncivil.groo.gob.mx/portal/SIAT.pdf>, octubre 2019.
- Dreckmann, K.M., y Senties, A., 2013. Las arribazones de algas marinas en el Caribe Mexicano: evento biológico natural o basura en las playas. CONABIO. *Biodiversitas*, 107, pp. 7-11.
- Enríquez, C., Mariño-Tapia, I., y Silveira, J., 2010. Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Continental Shelf Research*, 30(2), pp. 127-137. doi:10.1016/j.csr.2009.10.005
- Franks, J.S., Johnson, D.R., Ko, D.-S., Sanchez-Rubio, G., Hendon, J.R., y Lay, M., 2011. Unprecedented influx of Pelagic *Sargassum* along Caribbean Island Coastlines during summer 2011. *Proceedings of the 64th Sixty Fourth annual Gulf Caribbean Fisheries Institute*. 64, pp. 6–8.
- Gower, J., Hu, C., Borstad, G., y King, S., 2006. Ocean color satellites show extensive lines of floating *Sargassum* in the Gulf of Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(12), pp. 3619-3625. doi:10.1109/TGRS.2006.882258

- Gower, J.F.R., y King, S.A., 2011. Distribution of floating *Sargassum* in the Gulf of Mexico and the Atlantic Ocean mapped using MERIS. *International Journal of Remote Sensing*, 32(7), pp. 1917–1929. doi:10.1080/01431161003639660
- Gower, J., Young, E., y King, S., 2013. Satellite images suggest a new *Sargassum* source region in 2011. *Remote Sensing Letters*, 4(8), pp. 764–773. doi:10.1080/2150704X.2013.796433
- Green, E. P., Mumby, P.J., Edwards, A. J., Clark, C. D., (Ed. A. J. Edwards), 2000. Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management. *Coastal Management Sourcebooks 3*, UNESCO, Paris. x + 316 pp.
- Guyot, G., y Gu, X.F. 1994. Effect of Radiometric Corrections on NDVI-Determined from SPOT-HRV and Landsat-TM Data. *Remote Sensing of the Environment*, 49(3), pp. 169–180. doi:10.1016/0034-4257(94)90012-4.
- Gyory, J., Mariano, A.J., y Ryan, E.H. 2013. *The loop current. Ocean Surface Currents*. Disponible en: <http://oceancurrents.rsmas.miami.edu/atlantic/loop-current.html>
- Hu, C. 2009. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113(10), pp. 2118–2129. doi:10.1016/j.rse.2009.05.012
- Hu, C., Hardy, R., Ruder, E., Geggel, A., Feng, L., Powers, S., Hernández, F., Graettinger, G. Bodnar, J., y McDonald, T., 2016. *Sargassum* coverage in the northeastern Gulf of Mexico during 2010 from Landsat and airborne observations: Implications for the Deepwater Horizon oil spill impact assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 107, pp. 15–21. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.04.045
- Hu, C., Feng, L., Hardy, R.F, y Hochberg, E.J., 2015. Spectral and spatial requirements of remote measurements of pelagic *Sargassum* macroalgae. *Remote Sensing of Environment*, 167, pp. 229–246. doi:10.1016/j.rse.2015.05.022
- Huete, A.R., 1988. A soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25(3), pp. 295–309. doi:10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- INEGI. 2017. Dirección general de geografía y medio ambiente. Aspectos técnicos de las imágenes Landsat. [Consultado en línea] http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_imagenes_landsat.pdf, noviembre 2017.
- Johnson, D.R., Ko, D.S., Franks, J.S., Moreno, P. y Sanchez-Rubio, G., 2014. The *Sargassum* invasion of the eastern Caribbean and dynamics of the equatorial North Atlantic. *Proceedings of the 65th Sixty Fifth annual Gulf Caribbean Fisheries Institute*. 65, 102–103.
- Laffoley, D.d'A., Roe, H.S.J., Angel, M.V., Ardron, J., Bates, N.R., Boyd, I.L., Brooke, S., Buck, K.N., Carlson, C.A., Causey, B., Conte, M.H., Christiansen, S., Cleary, J., Donnelly, J., Earle, S.A., Edwards, R., Gjerde, K.M., Giovannoni, S.J., Gulick, S., Gollock, M., Hallett, J., Halpin, P., Hanel, R., Hemphill, A., Johnson, R.J., Knap, A.H., Lomas, M.W., McKenna, S.A., Miller, M.J., Miller, P.I., Ming, F.W., Moffitt, R., Nelson, N.B., Parson,

- L., Peters, A.J., Pitt, J., Rouja, P., Roberts, J., Seigel, D.A., Siuda, A.N.S., Steinberg, D.K., Stevenson, A., Sumaila, V.R., Swartz, W., Thorrold, S., Trott, T.M., y Vats, V. (2011). The protection and management of the Sargasso Sea: The golden floating rainforest of the Atlantic Ocean. Summary Science and Supporting Evidence Case. Sargasso Sea Alliance, 44 pp.
- Liaw, A., y Wiener, M. 2002. Classification and Regression by randomForest. *R News*, 2/3, pp. 18-22. ISSN 1609-3631.
- Lira Chavez, J. (2011). *La Percepcion Remota*. 2a ed., Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maréchal, J.P., Hellio, C., y Hu, C., 2017. A simple, fast, and reliable method to predict *Sargassum* washing ashore in the Lesser Antilles. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 5, pp. 54–63. doi:10.1016/j.rsase.2017.01.001
- Martínez-López, B., y Parés-Sierra, A., 1998. Circulación del golfo de México inducida por mareas, viento y la corriente de Yucatán. *Ciencias Marinas*, 24(1), pp. 65-93.
- Murillo-García, M. (2017). *Proyecto de recolección de sargazo en las costas del Caribe Mexicano. Diseño y evaluación*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maurer, A.S., De Neef E., y Stapleton, S., 2015. *Sargassum* accumulation may spell trouble for nesting sea turtles. *Frontiers in Ecology*, 13(7), 394-396. doi:10.1890/1540-9295-13.7.394
- Pozo, C., Armijo-Canto, N., y Calmé, S. (Eds.) (2011). *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación*, Tomo I. Ciudad de México: El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur).
- QGIS Development Team (2018). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Rodríguez-Martínez, R., Van Tussenbroek, B.I., y Jordán-Dahlgren, E., 2016. Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa, En: García-Mendoza, E., Quijano-Scheggia, S.I., Olivos.Ortiz, A., Núñez-Vázquez, E. (Eds.), *Florecimientos Algales Nocivos En México*. CICESE, pp. 352–365.
- Roldan Aragón, I.E., Binnqüist Cervantes, G.S., Bernal Becerra, A., Cháves Cortés, M.M., y Ortega Hernández, M.S. (2003) *Sistemas de Información Geográfica aplicados al manejo de los Recursos Naturales*. Ed., Cuadernos. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2015). *Lineamientos generales para la remoción del sargazo de las playas del Caribe Mexicano*. Subsecretaría para la Protección Ambiental - Dirección general de vida Silvestre. Ciudad de México.

- Sheinbaum, J., Candela, J., Badan, A., y Ochoa, J., 2002. Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*, 29(3), pp. 10-1-10-4. doi:10.1029/2001GL013990.
- Smetacek, V., y Zingone, A., 2013. Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504(7478), pp. 84-88. doi:10.1038/nature12860
- Stoner, A., y Greening, H.S., 1984. Geographic-variation in the macrofaunal associates of Pelagic *Sargassum* and some biogeographic implications. *Marine Ecology Progress Series*, 20(1-2), pp. 185–192. doi: 10.3354/meps020185
- Széchy, M.T.Md, 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), pp. 638-641. doi:10.15560/8.4.638
- United States Geological Survey (2019a). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, versión 4.0*, Department of the Interior U.S. Geological Survey, EROS, South Dakota, E.U.A. [Consultado en línea] <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>, agosto 2019.
- United States Geological Survey (2019b). Earth Explorer Website. Base de datos disponible online: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Uribe-Martínez, A., Liceaga-Correa, M.A., Cuevas, E., Hernández-Núñez, H. y Espinoza-Punch, D. (2016) “Discriminación multi-índice de sargazo pelágico en el 2015 al noreste de la Península de Yucatán”, *Memorias del XIX Congreso Nacional de Oceanografía*. Ciudad de México, 21-23 septiembre 2016. Pp. 322-327.
- Uribe-Martínez, A. (2018) “Proceso semi automatizado de detección de sargazo flotante con imágenes satelitales” Folio Registro INDAUTOR 03-2019-062812505400-01.
- Webster, R.K., y Linton, T., 2013. Development and implementation of *Sargassum* Early Advisory System (SEAS). *Sore & Beach*. 81(3), pp.1-6.
- Wang, M., y Hu, C., 2016. Mapping and quantifying *Sargassum* distribution and coverage in the Central West Atlantic using MODIS observations. *Remote Sensing of Environment* 183, pp. 350-367. doi:10.1016/j.rse.2016.04.019
- Wang, M., y Hu, C., 2017. Predicting *Sargassum* blooms in the Caribbean Sea from MODIS observations. *Geophysical Research Letters*, 44, pp. 3265–3273. doi:10.1002/2017GL072932
- Xu, Z. (1997) *Flow near the sea surface: Steady currents and Langmuir circulations*. Tesis de doctorado. Universidad de Michigan.