

Informe Final.  
Proyecto de Investigación Interno

Diagnóstico de las condiciones atmosféricas asociadas  
al arribo de sargazo a costas de Quintana Roo.

Área temática:  
Sistema de alerta Sargazo

José Antonio Salinas P.  
María Eugenia Maya Magaña  
Constantina Hernández Martínez

5 de diciembre 2019

# Contenido

<b>Resumen</b> .....	5
<b>Introducción</b> .....	6
<b>Objetivo</b> .....	9
<b>Metodología</b> .....	9
<b>Resultados</b> .....	11
<b>Discusiones finales</b> .....	36

## Lista de figuras

Fig. 1 . Sargazo en el mar Caribe y el océano Atlántico. (Tomado de Wang. et. al 2019) .....	7
Fig. 2 . Sargazo para los años 2011 al 2018 en el mes de julio. (Tomado de Wang. et. al. 2019).....	7
Fig. 3 Esquema conceptual de la construcción de un sistema de alerta temprana ante sargazo.....	8
Fig. 4 Niveles de alertamiento que relacionan el grado de peligro y colores que serán desplegados en un mapa. ....	9
Fig. 5 Niveles de alertamiento que relacionan el grado de peligro y colores que serán desplegados en un mapa. ....	9
Fig. 6 Área de estudio y subregiones analizadas.....	10
Fig. 7 Viento a 10m, invierno 1989-2018. ....	11
Fig. 8 Percentil 10 de magnitud de viento invierno 1989-2018. ....	12
Fig. 9 Percentil 10 de magnitud de viento invierno 1989-2018.....	12
Fig. 10 Viento a 10m, verano 1989-2018 .....	13
Fig. 11 Percentil 10 de magnitud de viento verano. 1989-2018.....	13
Fig. 12 Percentil 90 de magnitud de viento invierno 1989-2018.....	14
Fig. 13 Magnitud de viento a 10m. 1989-2018 .....	14
Fig. 14 Percentil 10 de magnitud de viento a 10m. 1989-2018.....	15
Fig. 15 Percentil 90 de magnitud de viento a 10m. 1989-2018.....	16
Fig. 16 Índice NAO y magnitud de viento anual a 10 m. ....	16
Fig. 17 ) Promedio mensual de área cubierta (km <sup>2</sup> ) en el Caribe y Atlántico Central. ....	17
Fig. 18 Biomasa promedio. (Wang et al., Science 365, 83–87 , 2019) .....	17
Fig. 19 Densidad de sargazo para julio (% de área cubierta ). (Wang et al., Science 365, 83–87, 2019) .....	18
Fig. 20 Magnitud del mes de julio 2013. m/s .....	18
Fig. 21 Percentil 10 de magnitud. Julio 2013.....	19
Fig. 22 Percentil 90 de magnitud. Julio 2013.....	19
Fig. 23 Magnitud de julio 2018. m/s .....	20
Fig. 24 Percentil 10 de magnitud. Julio 2018.....	20
Fig. 25 Percentil 90 de magnitud. Julio 2018.....	21
Fig. 26 Procesos físicos de acumulamiento de sargazo.....	22
Fig. 27 Índice NAO y divergencia (s <sup>-1</sup> ) de viento anual .....	23
Fig. 28 Viento a 10m. Febrero 2013 .....	23
Fig. 29 Percentil 90 de viento a 10m. Febrero 2013 .....	24
Fig. 30. Febrero 2015, Viento a 10m .....	24
Fig. 31 Percentil 90 de viento a 10m. Febrero 2015 .....	25
Fig. 32, Viento a 10m. Julio 2015 .....	25
Fig. 33 Percentil 90 de viento a 10m. Julio 2015. ....	26
Fig. 34 Viento a 10m. Febrero 2018 .....	26
Fig. 35 Percentil 90 de viento a 10m. Febrero 2018.....	27
Fig. 36 Viento a 10m. de altura. Febrero 2019.....	27
Fig. 37 Percentil 90 de viento a 10m. Febrero 2019.....	28
Fig. 38 Ciclo mensual de magnitud de vientos Febrero área 1.....	29
Fig. 39 Ciclo mensual de magnitud de vientos Julio área 1 .....	29

<i>Fig. 40 Ciclo mensual de magnitud de viento Área 2. Febrero</i> .....	30
<i>Fig. 41 Ciclo mensual de magnitud de viento Área 2. Julio</i> .....	31
<i>Fig. 42 Ciclo mensual de magnitud de viento Área 3. Febrero</i> .....	31
<i>Fig. 43 Ciclo mensual de magnitud de viento Área 3. Julio</i> .....	32
<i>Fig. 44 Presión superficial. Febrero 2015</i> .....	33
<i>Fig. 45 Presión superficial. Julio 2015</i> .....	33
<i>Fig. 46 Presión superficial. Febrero 2018</i> .....	34
<i>Fig. 47 Presión superficial. Julio 2018</i> .....	34
<i>Fig. 48 Temperatura superficial del mar. Julio 2013</i> .....	35
<i>Fig. 49 Temperatura superficial del mar. Julio 2018</i> .....	35

## Resumen

El arribo del sargazo en forma masiva genera impactos ambientales, sociales y económicos adversos. Se sabe poco de su origen y trayectoria, así como de las condiciones atmosféricas y oceánicas bajo las cuales arriba a costas de Quintana Roo. En este trabajo se presenta un diagnóstico de la variabilidad estacional, anual e interanual de las circulaciones atmosféricas en el Atlántico y Caribe identificando las condiciones atmosféricas bajo las cuales arriba de sargazo a costas de Quintana Roo. Se analizaron 30 años de datos de viento superficial de CFRS (Climate Forecast System Reanalysis) de NCAR sobre el Atlántico y Caribe, dividiendo la zona en seis áreas, para cada una se estimó su variabilidad estacional, anual e interanual, así como sus valores extremos del período 1989 a 2018, enfocándose el estudio tanto al Mar Caribe como a la costa Atlántica de Brasil.

Una vez diagnosticados los vientos medios, extremos (percentiles 10 y 90) y su correlación con la NAO (Oscilación del Atlántico Norte, por sus siglas en inglés) en forma interanual, se analizaron años particulares del período reciente: de 2010 a 2019 incorporando la convergencia de viento como un proceso físico asociado a la acumulación de sargazo, la presión superficial y la temperatura superficial del mar (SST) y correlacionándolo también con la NAO.

En los resultados se aprecia que las condiciones atmosféricas para transportar sargazo a costas de Quintana Roo son más favorables en verano que en invierno, adicionalmente, que los extremos mayores (percentil 90) en el Caribe favorecen el transporte de sargazo tanto en invierno como en verano, no obstante, la “conectividad” con otras regiones (Atlántico central) hace más favorable el verano, pero potencialmente viable el invierno. Se discuten las condiciones atmosféricas de años recientes extremos: 2013 (sin arribo de sargazo), mediano: 2015 y extremo 2018 (con sargazo abundante) tanto para verano como invierno.

## Introducción

El arribo del sargazo masivamente a costas de Quintana Roo se ha incrementado desde el año 2015, generando impactos ambientales, sociales y económicos adversos, existiendo por ello una demanda continua de la población y del sector turismo para atender este evento con afectaciones crecientes.

La atención de ello requiere la conjunción de esfuerzos multidisciplinarios. El IMTA puede contribuir a la mitigación de los efectos de este arribo mediante investigación científica y tecnológica en las diversas áreas de su competencia, aportando elementos clave para la generación de un sistema de alerta temprana basado en conocimiento y herramientas de vanguardia como datos satelitales y modelos numéricos.

En estudios recientes se han reportado observaciones de sargazo mediante sensores remotos instalados en satélites, así, Wang M. et. al. (2019) reportaron mayor arribo de sargazo a partir de 2011, identificando un “cinturón del sargazo” que se extiende desde África occidental hasta el Golfo de México. En junio de 2018 el cinturón contenía 20 millones de toneladas métricas de biomasa de sargazo. La distribución espacial está modulada por la circulación oceánica y atmosférica. Indican que la fuente de sargazo a partir de 2011 podría estar asociado a la descarga del río Amazonas en años anteriores, con incremento reciente. La variabilidad interanual después del 2011 parece estar impulsada por la surgencia de África occidental durante el invierno boreal y por la descarga del río Amazonas durante la primavera y el verano, indicando un posible cambio de régimen y planteando la posibilidad de que incremento de masa recurrente en el Atlántico Tropical y el mar Caribe. Una pregunta crítica es si un cambio en las condiciones climáticas u oceánicas han llevado a cambios recientes en el transporte de sargazo.

Observaciones de 19 años del satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer MODIS), revela un cinturón de sargazo reciente y recurrente que se extiende a través del mar Intra-americano y el Atlántico tropical. En los años del 2000 al 2010 el Atlántico central mostro muy baja abundancia de Sargazo. (Fig. 1), el Gran Cinturón de Sargazo (GASB) se forma en los meses de verano del hemisferio norte de 2011 a 2018 excepto en el 2013 (Fig. 2). En 2015 y 2018 el GASB mostró la mayor cobertura extendiéndose a más de 8,850 km y con una biomasa húmeda de mas de 9 millones de toneladas y mas de 20 millones de toneladas para junio de 2018.

Aunque múltiples fuentes de sargazo pueden existir, la forma del GASB es consistente con la advección de los patrones de circulación oceánica y atmosférica en el atlántico tropical, observándose poca conexión del sargazo de África occidental con el Norte del Atlántico o el mar Caribe.

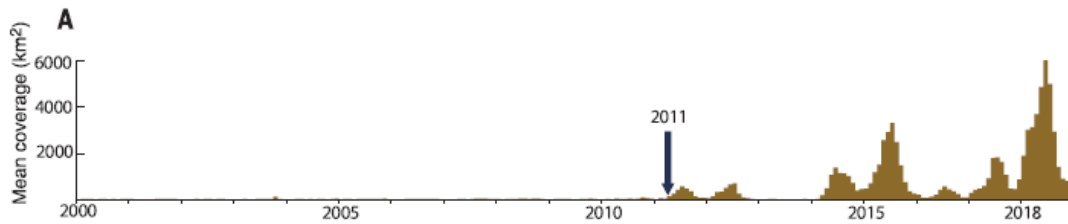


Fig. 1 . Sargazo en el mar Caribe y el océano Atlántico. (Tomado de Wang. et. al 2019)

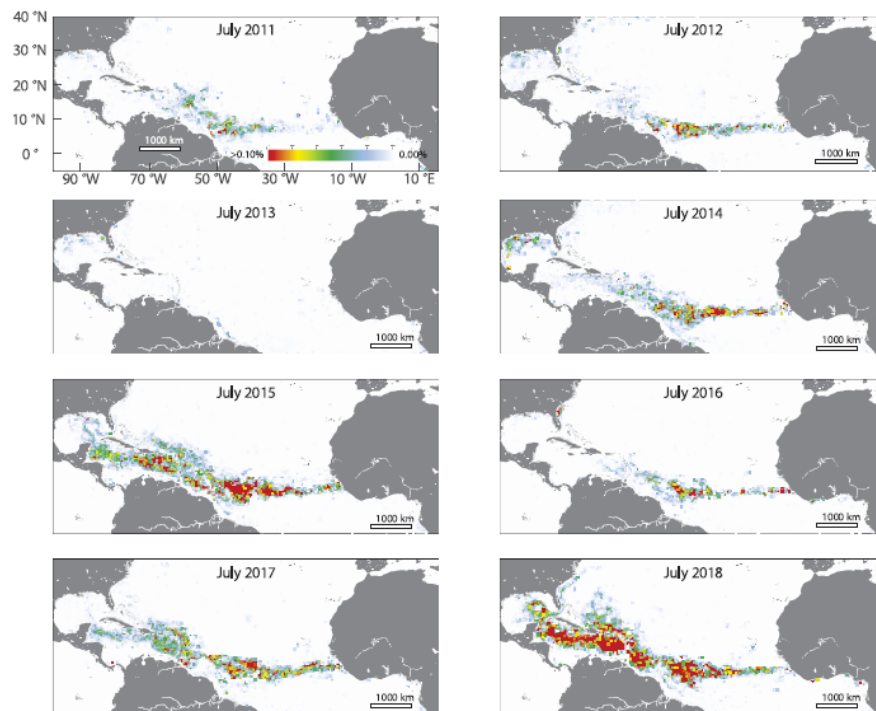


Fig. 2 . Sargazo para los años 2011 al 2018 en el mes de julio. (Tomado de Wang. et. al. 2019)

A pesar de que en trabajos de investigación previos se ha detectado sargazo mediante sensores remotos, se sabe poco de su origen, trayectoria, así como de las condiciones atmosféricas y oceánicas bajo las cuales arriba a costas de Quintana Roo, este proyecto aportará conocimiento al respecto y elementos fundamentales para elaborar el sistema de alerta ante el arribo de sargazo. Para generar este sistema, se requieren estudios previos que incluyan:

- a) Diagnóstico de patrones estacionales, anuales e interanuales de circulaciones atmosféricas y oceánicas en el Atlántico.
- b) Análisis del efecto combinado (océano y atmósfera) en la trayectoria del sargazo en el Caribe.

- c) Estimación de umbrales de viento, corrientes oceánicas y temperatura superficial del mar Caribe y su evolución temporal y espacial que detonen un semáforo dinámico de alerta temprana.
- d) Pronóstico numérico validado de circulaciones (atmosféricas y oceánicas) y su correlación con las trayectorias de sargazo.
- e) Sistema de alerta temprana automatizado basado en un semáforo dinámico de consulta e interpretación sencilla.

En este proyecto se abordó el tema a), la cual es la primera etapa para identificar condiciones atmosféricas en el Atlántico Central, identificando casos de estudio en los cuales arribó el Sargazo a costas de Quintana Roo.

Con esta información es posible generar un Sistema de Alerta Temprana ante el arribo de sargazo (SATSAR), cuya información se sintetizada en la Fig. 3, ello incluye la caracterización de corrientes oceánicas y atmosféricas, validación y calibración de modelos para generar un sistema de pronóstico que se utilice comparativamente en forma automática con umbrales que detonen un semáforo que detone colores y con ello acciones de acuerdo al nivel de alertamiento, detonando acciones de diversos actores locales.

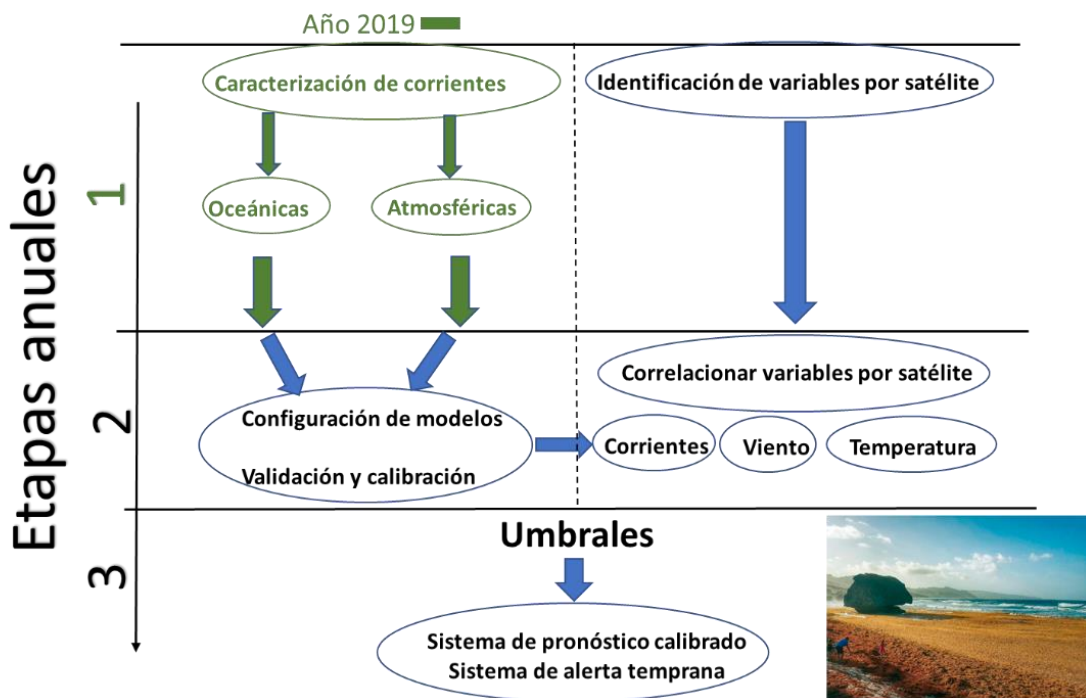


Fig. 3 Esquema conceptual de la construcción de un sistema de alerta temprana ante sargazo.

Este semáforo de alerta temprana estará conformado por colores asociados al nivel de peligro (de mínimo a máximo) para las variables: velocidad de viento, temperatura superficial del mar, velocidad de corrientes, distancia al punto de interés y masa de sargazo estimado, ello desde 0 horas hasta 8 días antes de la llegada del sargazo (Figs. 4 y 5)



NIVEL Y COLOR DE ALERTAMIENTO Y RECOMENDACIONES GENERALES			
<b>AZUL</b>	PELIGRO MÍNIMO. ALERTAMIENTO	Condiciones actores y acciones.	
<b>VERDE</b>	PELIGRO BAJO. PREVENCIÓN	Condiciones actores y acciones.	
<b>AMARILLO</b>	PELIGRO MODERADO. PREPARACIÓN	Condiciones actores y acciones.	
<b>NARANJA</b>	PELIGRO ALTO. ALARMA	Condiciones actores y acciones.	
<b>ROJO</b>	MÁXIMO PELIGRO. AFECTACIÓN	Condiciones actores y acciones.	

Fig. 4 Niveles de alertamiento que relacionan el grado de peligro y colores que serán desplegados en un mapa.

Velocidad del viento(m/s)	Temperatura superficial del mar	Velocidad de corrientes oceánicas (m/s)	Distancia al punto de interés (m)	Masa o volumen de sargazo (tons o m <sup>3</sup> )	8 a 3 días	48 a 42 hrs	42 a 36 hrs	36 a 30 hrs	30 a 24 hrs	24 a 18 hrs	18 a 12 hrs	6 a 0 hrs

Fig. 5 Niveles de alertamiento que relacionan el grado de peligro y colores que serán desplegados en un mapa.

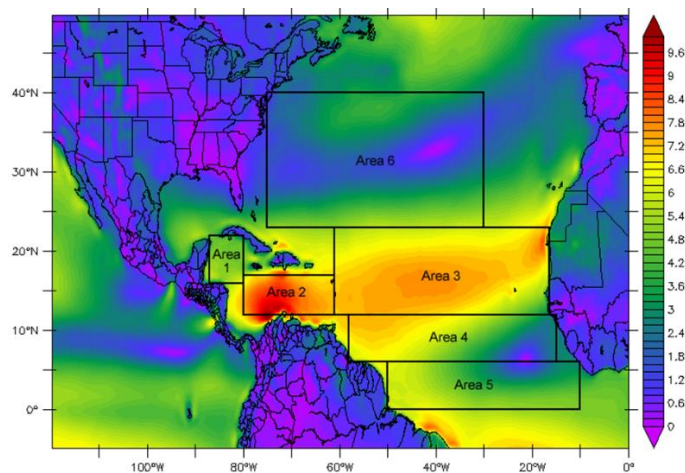
## Objetivo

Calcular, analizar y describir la variabilidad espacio-temporal de la circulación atmosférica superficial sobre el Océano Atlántico y sus efectos en el arribo masivo de sargazo a costas de Quintana Roo.

## Metodología

Los datos atmosféricos utilizados son de reanálisis de CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) de NCAR (National Center for Atmospheric Research), con una resolución temporal de 6 hrs. y espacial de 0.31° (40 Kms. aprox.), ello para el período de 1989 a 2018,

utilizando las variables: viento a 10m. (componente zonal y meridional), para la presión superficial y temperatura superficial del mar (SST) se utilizaron los datos de ERA5, con una resolución espacial de 0.25°, la región analizada es una malla sobre el Atlántico Central, Caribe y Golfo de México. La zona de estudio se dividió en 6 áreas. área 1: Caribe colindante a Península de Yucatán, área 2: Caribe central, área 3: Atlántico central, área 4: Noreste de Venezuela, área 5: Norte de Brasil, área 6: Mar de los Sargazos (Fig. 1).



*Fig. 6 Área de estudio y subregiones analizadas.*

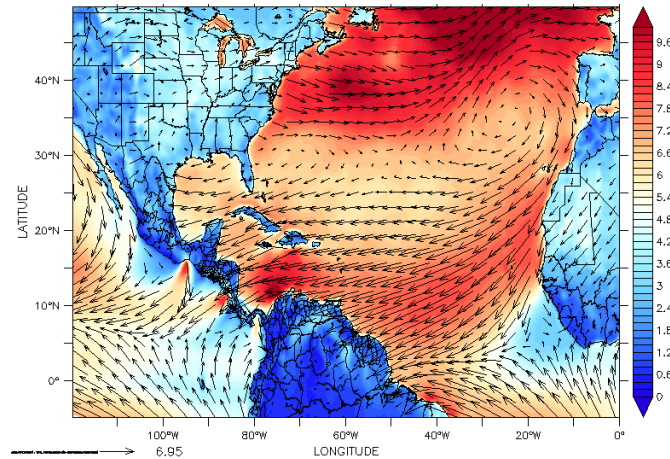
La estimación de la variabilidad atmosférica en el Atlántico y Caribe se realizó mediante 4 actividades principalmente:

1. Análisis de la circulación atmosférica superficial sobre el Atlántico y Caribe. Para el período de 1989 a 2018, de datos con resolución temporal de 6 horas se estimaron promedios diarios, calculando su convergencia, desaceleración y variabilidad estacional, anual e interanual de sus valores extremos (percentil 10 y 90) con datos atmosféricos de reanálisis de CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) de NCAR (National Center for Atmospheric Research).
2. Correlación del índice anual de la NAO (Oscilación del Atlántico Norte, por sus siglas en inglés) del período de 1989 a 2018 y establecer su correspondencia con la intensidad y dirección de vientos en la costa Atlántica de Brasil y con la CCC (Corriente en Chorro del Caribe) como un indicador de baja frecuencia.
3. Identificación de estudios de caso para entender las condiciones atmosféricas bajo las cuales se aproximó el sargazo a costas de Quintana Roo.
4. Visitas de trabajo al IINGEN-UNAM, campus Sisal, donde se solicitará la participación de investigadores de la Universidad Autónoma de Campeche (EPOMEX) y del Colegio de la Frontera Sur (Chetumal) para analizar conjuntamente información, conocimiento y procedimientos que conlleven a metodologías de generación de un Sistema de alerta temprana.
5. Participación en la organización y realización de seminarios y reuniones periódicas, con colaboradores de otros proyectos internos IMTA en el área temática: “Sistema de alerta sargazo” para analizar avances y el estado del arte consolidando un grupo de

trabajo multidisciplinario en atención a la problemática que se proyecte para obtener financiamiento externo.

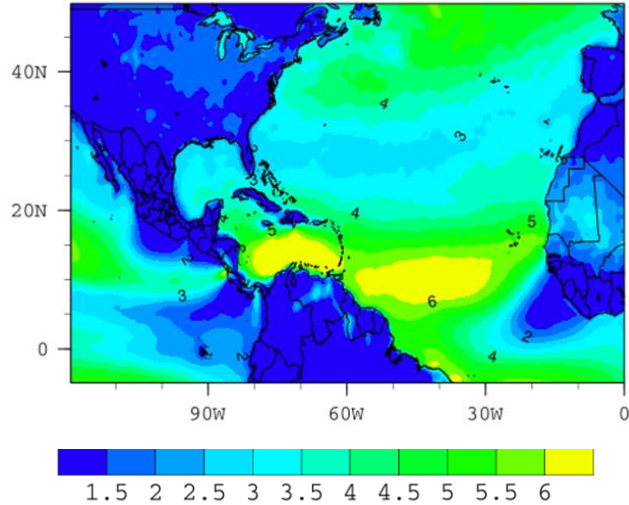
## Resultados

Debido al alta semipermanente de la Azores, ajustando los vientos a un balance geostrófico, éstos son perpendiculares a su gradiente, así, el gradiente de presión norte-sur genera viento de componente este-oeste y el gradiente este-oeste genera viento de componente norte-sur, esto se observa en los vientos de la Fig. 7, los cuales giran en torno a la alta presión del Atlántico en forma anticiclónica (hemisferio norte) en el sentido de las manecillas del reloj, en el Atlántico, al norte de 30°N los vientos predominantes son del oeste y sus magnitudes son mayores de 10m/s en el Atlántico norte, en invierno estos vientos propagan tormentas hacia Europa, adquiriendo componente norte-sur al rodear el centro de la alta presión y al sur de 25°N adquieren componente del este, dominando estos vientos del este a la región del Atlántico Tropical, (vientos alisios), los cuales tienen magnitudes de aproximadamente de 7 a 9 m/s (entre 10°N y 20°N), intensificándose en el Caribe al alcanzar magnitudes de 10 m/s, (corriente en chorro de niveles bajos del Caribe), ubicada al este de las costas de Nicaragua. Debido a dos interrupciones de orografía: Istmo de Tehuantepec y Golfo de Papagayo (Centroamérica) se observan vientos superficiales que cruzan al Océano Pacífico en ambos sitios, en el caso de Tehuantepec generando vientos del norte con intensidades de hasta 8 m/s, de magnitud similar en Papagayo, pero del noreste (Fig. 7). En costas del suroeste de Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco los vientos promedio de invierno son débiles, con magnitudes menores de 2 m/s.



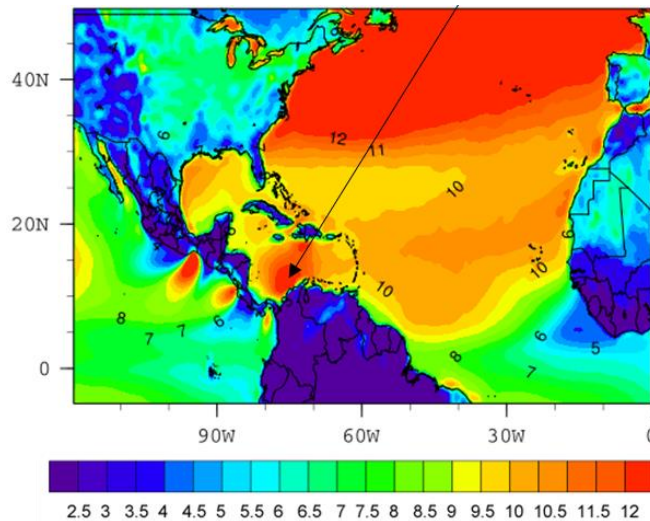
*Fig. 7 Viento a 10m, invierno 1989-2018.*

El percentil 10 de viento a 10m. en invierno tiene dos máximos de 6 m/s en la región tropical, (Fig. 8), el primero en el Atlántico central tropical, zona de los vientos alisios y el segundo en el Mar Caribe, éste asociado a la corriente en chorro del Caribe (CCC), ambos máximos cubren el área de vientos del este que contribuyen al transporte de sargazo a las costas de Quintana Roo.



*Fig. 8 Percentil 10 de magnitud de viento invierno 1989-2018.*

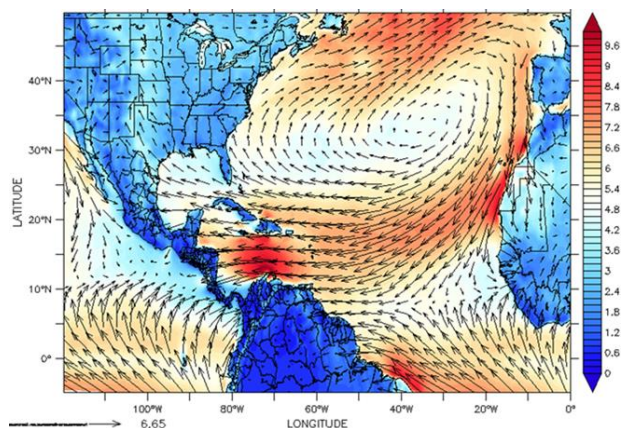
Por otro lado, los valores de percentil 90 mayores a 12 m/s se localizan en la zona extra tropical (Atlántico Norte), mientras que en la zona tropical se observa en el Caribe se localiza un máximo de 12 m/s, el cual está asociado a la CCC (Fig. 9).



*Fig. 9 Percentil 90 de magnitud de viento invierno 1989-2018.*

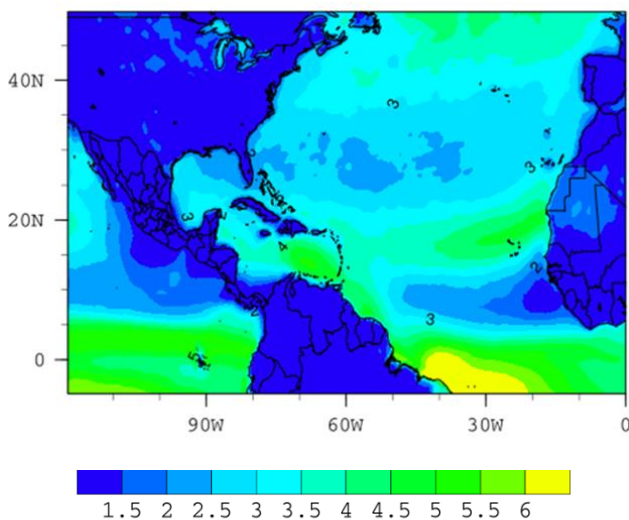
Como ya se mencionó, los gradientes de presión fuerzan movimientos perpendiculares con balance predominantemente geostrófico, en verano, al incrementarse los gradientes hacia las costas africanas, los vientos en esta zona se incrementan respecto al invierno entre 10°N y 25°N, de igual forma los vientos del este se intensifican (alisios) alcanzando magnitudes de más de 8 m/s, los cuales afectan al continente americano (Fig. 10), estos vientos son la porción sur del giro anticiclónico en torno a la alta presión del Atlántico, los vientos del oeste observados al norte de 35°N en el Atlántico son menores en verano, indicando ello una anisotropía (valores espaciales no homogéneos) de la distribución de gradientes de presión, es decir, la cantidad de momento del este en el trópico es mayor a la del oeste en el extra-

trópico, en el verano los alisios propagan tormentas hacia el continente americano. En el Caribe, la corriente en chorro de niveles bajos, alcanzan valores mayores a 10 m/s en julio (Fig. 10).



*Fig. 10 Viento a 10m, verano 1989-2018*

En invierno, el percentil 10 se concentra en los trópicos, particularmente en el Caribe del oeste, con valores de 5 m/s y de 4 m/s en la región de los alisios (Atlántico Tropical Central: Fig. 11).



*Fig. 11 Percentil 10 de magnitud de viento verano. 1989-2018*

Por otra parte, en el percentil 90 se observan valores mayores en el Caribe, de hasta 12 m/s y otro máximo al norte de Brasil, indicando ello la persistencia de valores extremos en estas dos regiones durante el invierno.

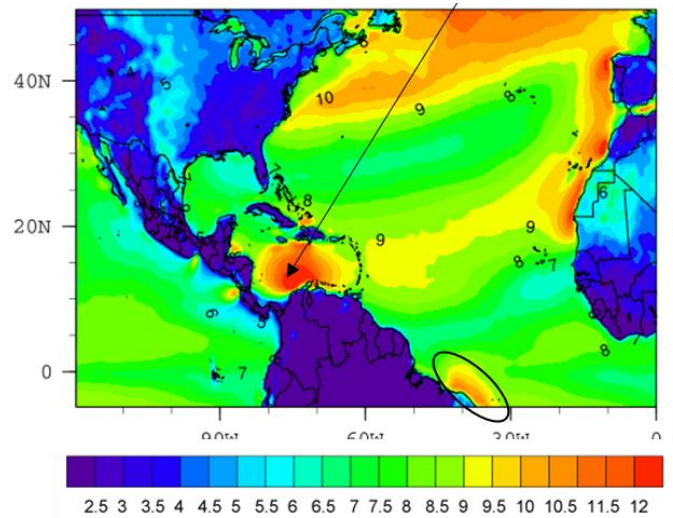


Fig. 12 Percentil 90 de magnitud de viento invierno 1989-2018

El ciclo anual de magnitud de viento para las seis áreas del estudio muestra que en el Área 1, Caribe del oeste colindante con costas de Quintana Roo tiene un comportamiento bimodal, con dos máximos: en junio-julio (de 6.5 m/s) y en nov-febrero, de 7 m/s, para el Caribe central (Área 2) se observan los máximos en junio y julio de hasta 9 m/s con un segundo máximo de igual valor entre diciembre y febrero (Fig. 13), el Área 3 tiene un comportamiento similar a la 2 pero con valores menores, el Área 4 tiene máximos de noviembre a abril y mínimos en julio (Fig. 13), ello refleja una mayor “conectividad temporal” entre las Áreas 1, 2 y 3, ello significa que en estas Áreas se observan máximos relativos durante los mismos meses del año, favoreciendo ello el transporte de objetos flotantes como el sargazo desde las costas Africanas hasta la mexicanas (Quintana Roo.)

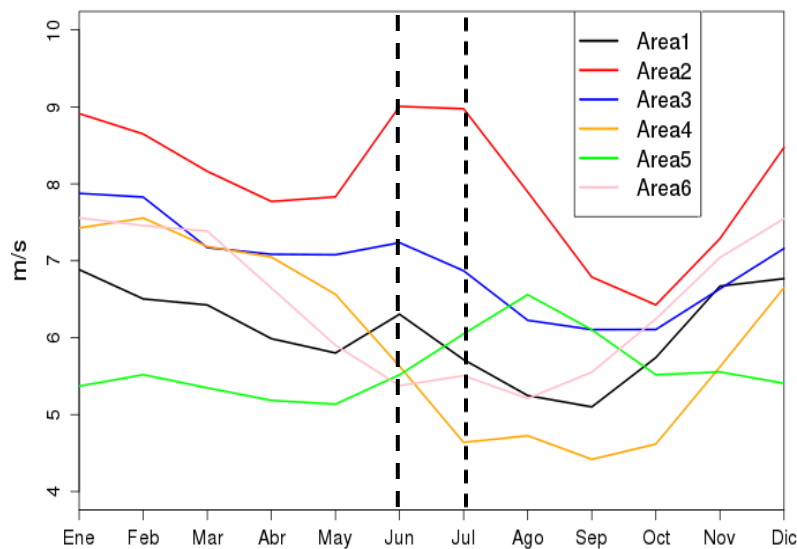


Fig. 13 Magnitud de viento a 10m. 1989-2018

Por otra parte, en el ciclo anual del percentil 10 de magnitud de viento, se observan valores menores a 8 m/s para todos los casos, así, para el Área 1, tiene dos máximos: en junio-julio y nov-febrero ambos de 4 m/s. Para el Área 2 los máximos se observan en junio y julio de 7 m/s y entre diciembre y febrero (Fig. 14), el Área 3 posee tiene un máximo en junio de 5 m/s, el Área 4 posee máximos de noviembre a abril y mínimos en julio (Fig. 14). Esto mantiene la “conectividad temporal” observada en los valores medios entre las Áreas 1, 2 y 3.

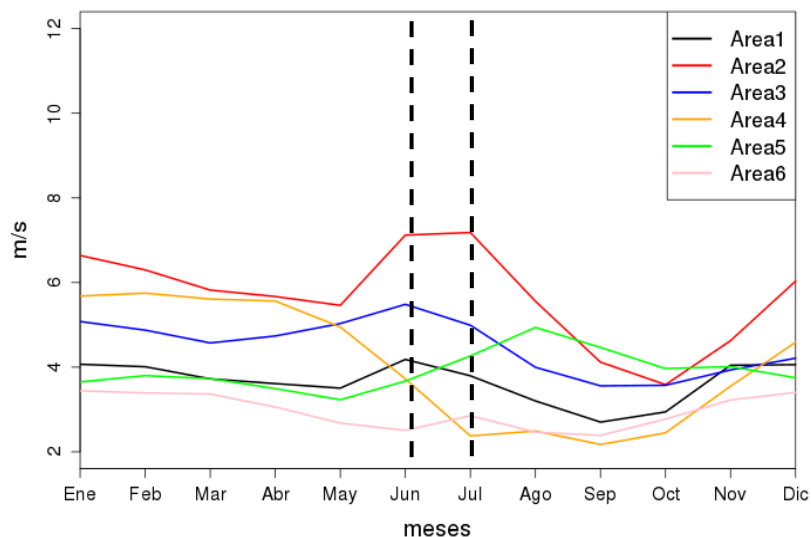


Fig. 14 Percentil 10 de magnitud de viento a 10m. 1989-2018

El ciclo anual del percentil 90 de magnitud de viento muestra una variabilidad mensual similar al percentil 10, con valores entre 6 y 12 m/s en todas las áreas. Los máximos del Área 1 se observan en junio-julio y en nov-febrero, entre 10 m/s y 11m/s respectivamente.

Para el Área 2 los máximos se observan en junio y julio de 11 m/s y entre diciembre y febrero (Fig. 15), el Área 3 tiene poca variabilidad temporal, oscilando entre 9 m/s y 11 m/s, al igual que el Área 4, manteniendo la “conectividad temporal” observada en los valores medios entre las Áreas 1, 2 y 3.

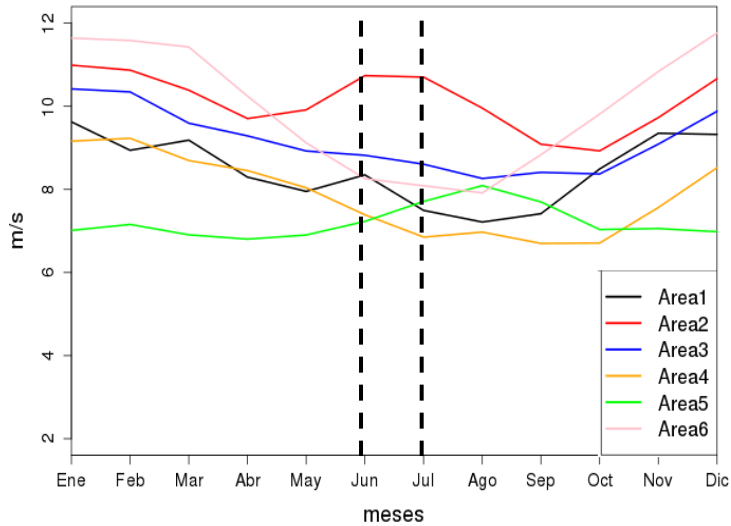


Fig. 15 Percentil 90 de magnitud de viento a 10m. 1989-2018

Un indicador de la variabilidad interanual de la intensidad de vientos en el Atlántico es la NAO (Oscilación del Atlántico Norte), la cual se base en la diferencia de presión estandarizada entre la Baja de Islandia y Alta de las Azores, esto indica tanto la posición como la intensidad de la circulación anticiclónica predominante en el Atlántico y Caribe (en contra de las manecillas del reloj), cuya porción sur los vientos alisios y la corriente en chorro del Caribe. Este índice tiene una correlación directa con procesos de transporte de sargazo asociado tanto a circulaciones de la atmósfera como del océano, así las estadísticas de largo plazo de 1989 a 2019, indican que a menor índice NAO, menor magnitud de viento en todas las áreas, el área más intensa es el Caribe, donde se observan dos años relevantes, con mayor índice NAO en años recientes: 2015 y 2018 (Fig. 16), en ambos casos la magnitud de viento promedio es mayor, el Área 2 (línea roja), con magnitudes son cercanas a 8.5 m/s, estas magnitudes de viento e índice NAO son de las más altas del registro analizado, ambos años son caracterizados por gran transporte de sargazo hacia costas de Quintana Roo. Se observan otros años de magnitudes mayores a 8 m/s pero con índice NAO menor.

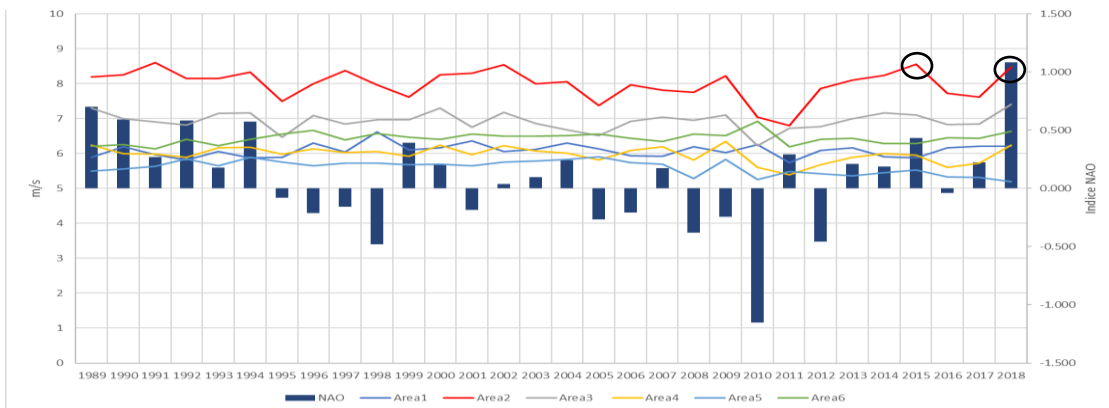


Fig. 16 Índice NAO y magnitud de viento anual a 10 m.



Por otra parte, de acuerdo con Wang (2019), a partir de 2011 inició el arribo de sargazo en forma masiva, siendo los años 2015 y 2018 con mayor cantidad (Fig. 17), mismos años en que la magnitud de viento en el Área 2 se registraron vientos mayores e índice NAO alto. Pretendiendo correlacionar estos registros, algunas de las preguntas abiertas que surgen son: Existió un detonante a partir del 2011 tanto en la disponibilidad de nutrientes, anomalías de temperatura superficial del mar o condiciones de transporte asociadas a la atmósfera y al océano, indicando alguna posible “conectividad con otras regiones”, es decir, que durante períodos particulares los vientos y las corrientes oceánicas superficiales generen mecanismos de transporte desde su origen: norte de Brasil o costas de África.

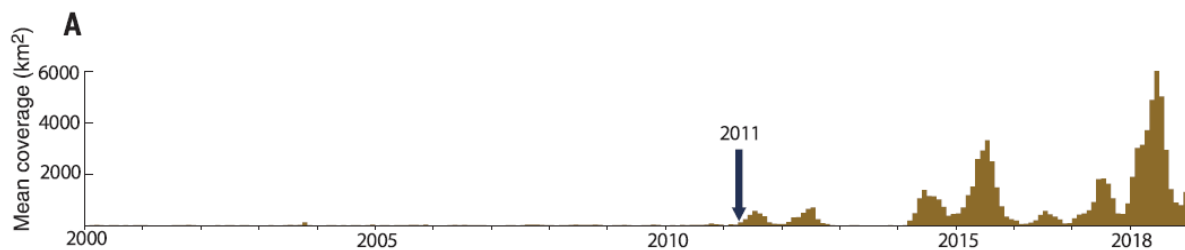


Fig. 17 ) Promedio mensual de área cubierta (km<sup>2</sup>) en el Caribe y Atlántico Central.

La biomasa transportada en el Atlántico y Caribe, en 2011, 2012 es menor de 2 millones de toneladas, a partir de 2014 se incrementa a 5 millones de toneladas, en 2015 a 10 millones de toneladas, 2015 con 5 millones de toneladas y 2018 más de 15 millones de toneladas (Fig. 18).

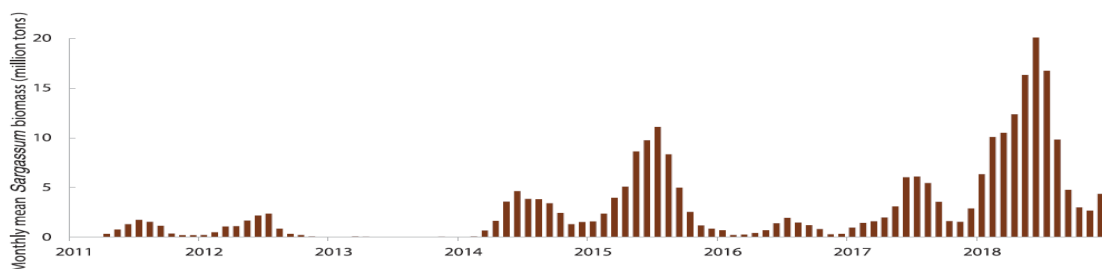
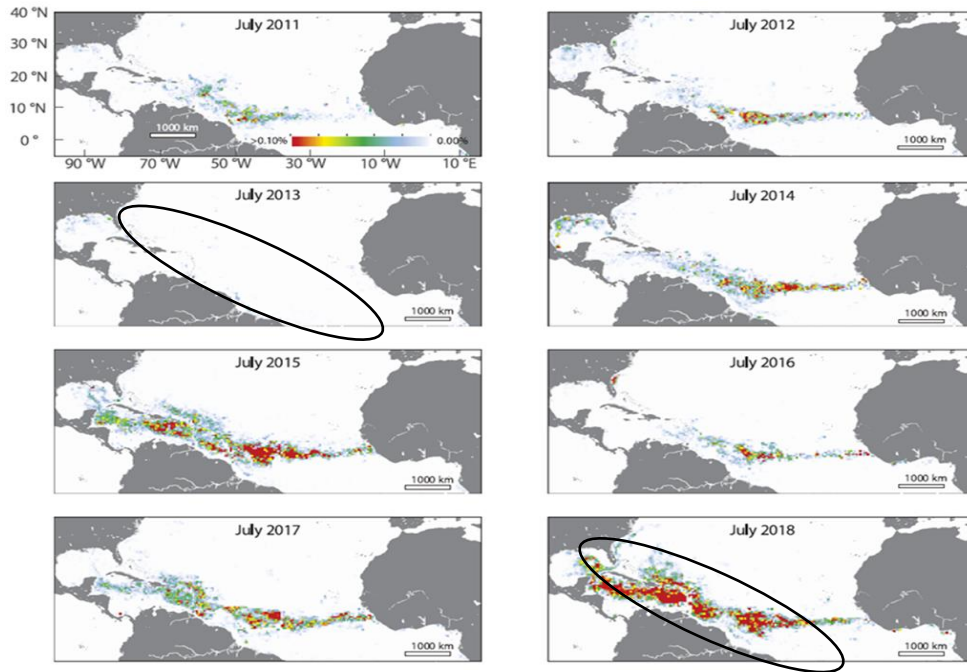


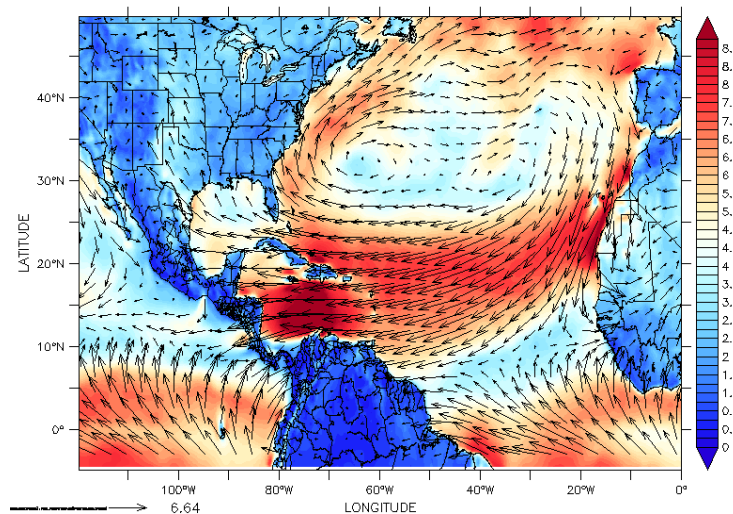
Fig. 18 Biomasa promedio. (Wang et al., Science 365, 83–87, 2019)

La distribución espacial del Sargazo durante los meses de julio de 2011 a 2018 muestra una alta variabilidad espacial y temporal, teniendo como valores extremos el año 2013 (sin sargazo) y 2018, con la mayor cantidad de sargazo y años intermedios, como el 2014, 2015 y 2017 y bajos, como 2011 y 2016.



*Fig. 19 Densidad de sargazo para julio (% de área cubierta). (Wang et al., Science 365, 83–87, 2019)*

Considerando los años con arribazón de sargazo (extremos, medios y nullos), se eligieron años como casos de estudio, en verano: julio 2013, julio 2015, julio 2018 y julio 2019 y en invierno: febrero 2013, febrero 2015, febrero 2018 y febrero 2019. Para julio de 2013, año y mes con ausencia de sargazo en costas de Quintana Roo, se observan vientos con valores promedio de 10 m/s en el Caribe, en el norte del Atlántico se incrementan nuevamente los vientos del oeste. En la zona tropical los vientos alisios son los más debilitados del año, a excepción del Caribe.



*Fig. 20 Magnitud del mes de julio 2013. m/s*

En el área donde se transporta sargazo los valores con percentil 10 son mayores a 6 m/s durante julio de 2013 y esto sucede en el Caribe, mientras que en el Atlántico Central sus valores son menores a 5 m/s (Fig. 21).

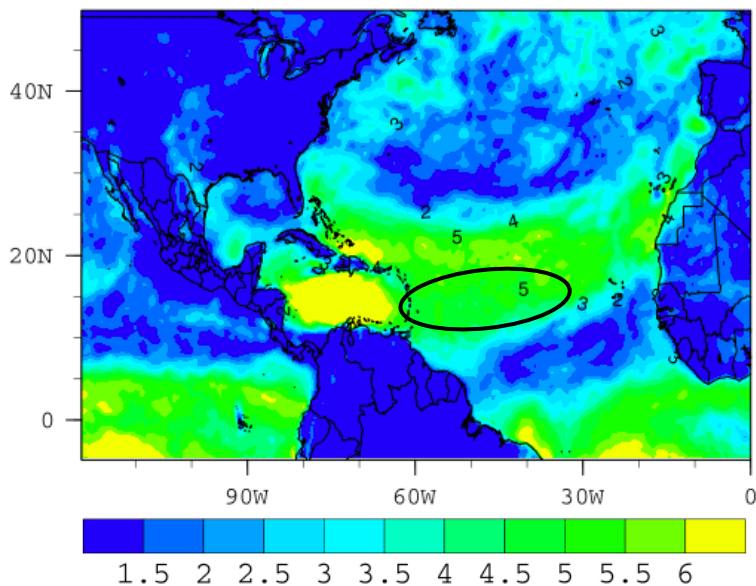


Fig. 21 Percentil 10 de magnitud. Julio 2013.

Para el caso del percentil 90, en el “cinturón” donde se transporta sargazo: Atlántico Central Tropical y Caribe, sus valores son mayores a 8 m/s (Fig. 22), siendo destacable el Caribe, con valores mayores a 10 m/s, los cuales, en “conectividad” con el Atlántico Central, significando ello un potencial de transporte desde costas africanas hasta el Caribe.

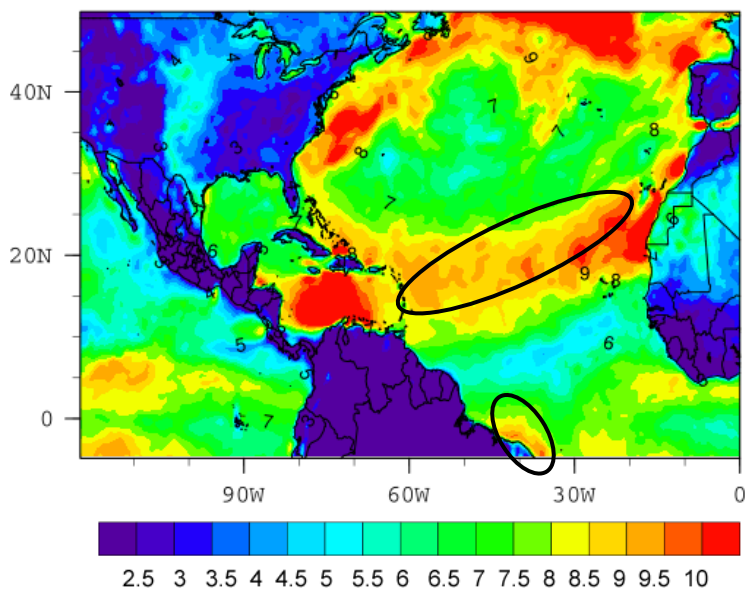


Fig. 22 Percentil 90 de magnitud. Julio 2013.

Para julio de 2018, año con gran cantidad de sargazo en el Atlántico y Caribe, (ver Fig. 19) se observan vientos mayores a 10 m/s en el Caribe. En la zona tropical del Atlántico, los vientos alisios son intensos, con mayor magnitud en el Caribe (Fig. 23).

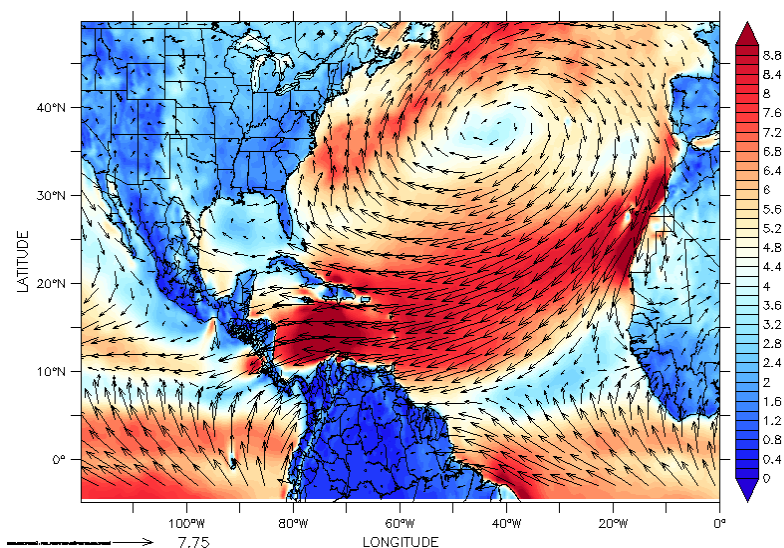


Fig. 23 Magnitud de julio 2018. m/s

Para el caso del percentil 10, de la zona tropical, Caribe, sus valores mayores a 6 m/s se extienden desde el Atlántico Central (Fig. 24). En este mes y este año se logra la mayor “conectividad” entre el Atlántico Central y el Caribe, transportando desde costas africanas hasta el Caribe sargazo en cantidades anómalamente altas.

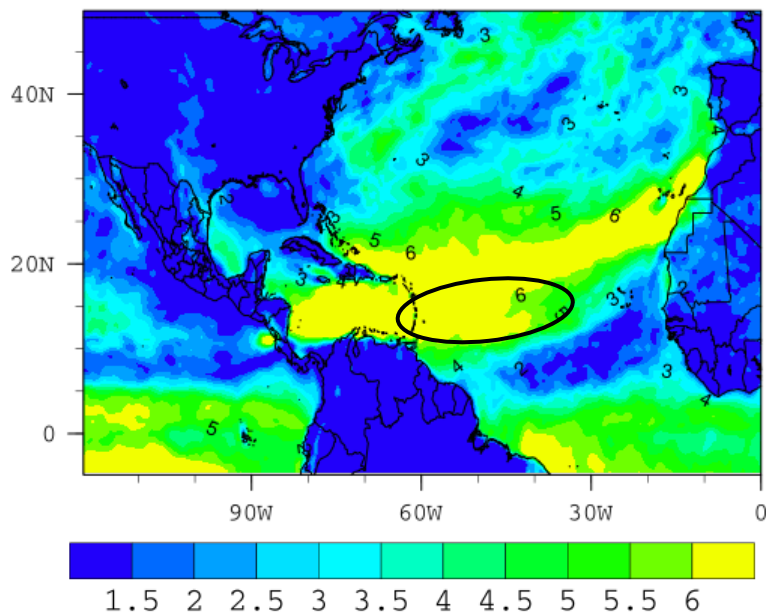
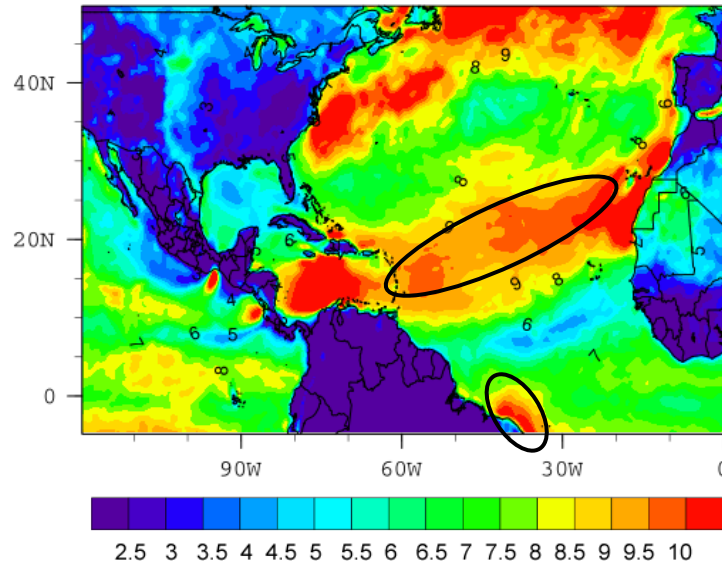


Fig. 24 Percentil 10 de magnitud. Julio 2018

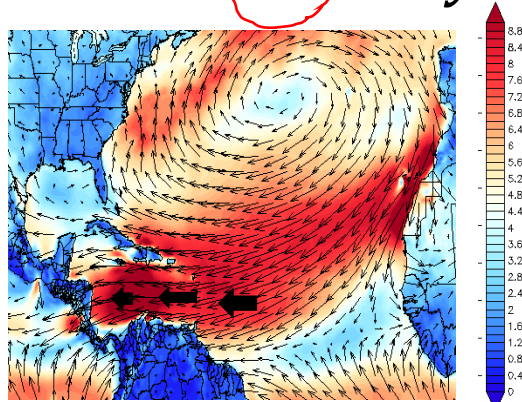
Para el mes y el año con mayor sargazo, en el percentil 90, el área de mayor transporte de sargazo: Atlántico Central Tropical y Caribe, sus valores son mayores a 8 m/s (Fig. 25), siendo destacable el Caribe, con valores mayores a 10 m/s, en “conectividad” con el Atlántico Central, significando ello un potencial de transporte.



*Fig. 25 Percentil 90 de magnitud. Julio 2018*

Uno de los procesos físicos asociados a la acumulación de sargazo es la divergencia negativa (convergencia) de viento,  $\nabla \cdot u = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ , la cual implica cambios zonales y meridionales de las componentes del viento superficial, en el caso del Trópico, los vientos son mayoritariamente zonales y de la zona de alisios hacia la corriente en chorro se llevan a cabo cambios en la dirección este-oeste (Fig. 26), esto es, una aceleración (divergencia) y en la región del Caribe del oeste una convergencia. Los vientos superficiales convergentes tienen el efecto de acumular objetos flotantes sobre el océano, en este caso el sargazo, el cual se transporta en forma de filamentos, ello es indicativo de la gran variabilidad espacial de los vientos del este (diferencia de magnitud entre los alisios y los vientos del Caribe: corriente en chorro) (Fig. 26).

$$\nabla \cdot u = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$



Vientos superficiales

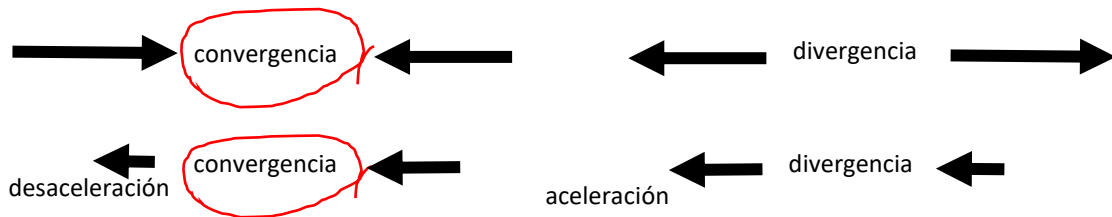


Fig. 26 Procesos físicos de acumulación de sargazo

Como se mencionó, la variabilidad interanual de la NAO está altamente correlacionada con la intensidad de los vientos alisios y de la corriente en chorro del Caribe (ver Fig. 16), sin embargo, el proceso físico que promueve la acumulación de sargazo por transporte es la convergencia, la cual por la gran variabilidad zonal del viento: desaceleración (aceleración) en la entrada (salida) de la corriente en chorro del Caribe (primer término de la divergencia: Fig. 27), así, el Área 5 es la única que tienen valores negativos de divergencia, indicando ello convergencia, en todos los años desde 1989 (Fig. 27) ello es porque se trata de la zona de convergencia intertropical sobre el Atlántico. En general, se observa una gran variabilidad interanual de la divergencia para las 6 áreas (Fig. 27), siendo particularmente destacados los años 2015 y 2018, cuando en el Área 1, 4 y 6 hubo menor divergencia. Una especulación fundamentada es que en 2015 y 2018 la convergencia de viento superficial en el Área 2 (Caribe) contribuyó a la acumulación de sargazo por transporte en el oeste del Caribe, este es: en las cercanías de costas de Quintana Roo.

$$\nabla \cdot u = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

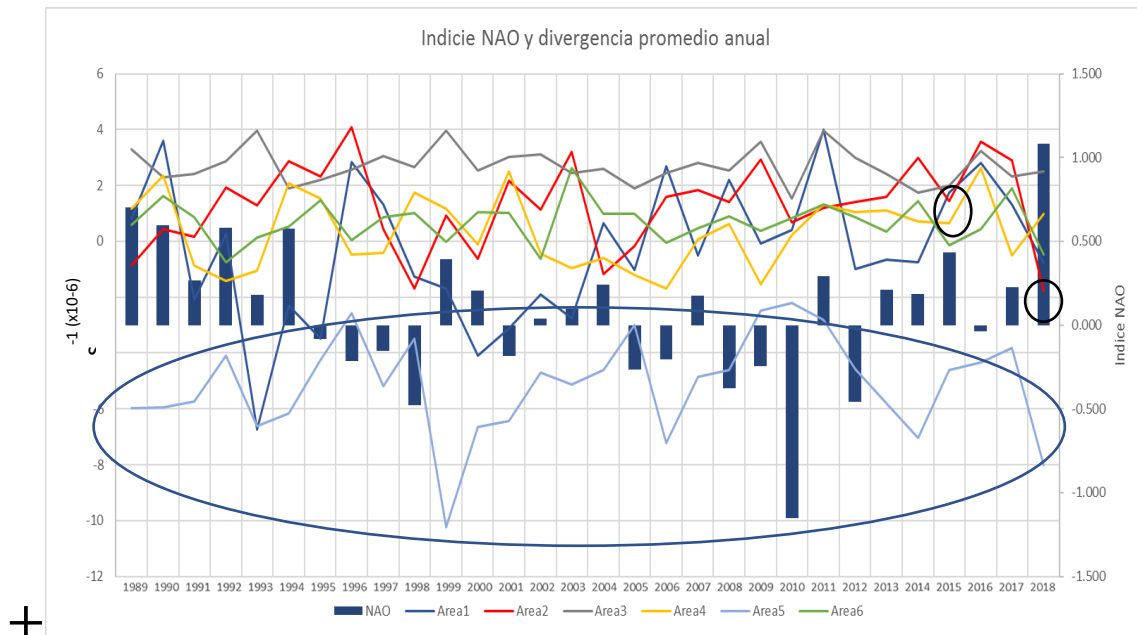


Fig. 27 Índice NAO y divergencia ( $s^{-1}$ ) de viento anual

Para febrero de 2018, asociada al alta semipermanente de la Azores ya mencionada, la circulación en el Atlántico y Caribe tienen una circulación anticiclónica, de igual forma, al norte de  $30^{\circ}N$  los vientos predominantes son del oeste y sus magnitudes son mayores de  $10\text{m/s}$  en el Atlántico norte, al sur de  $25^{\circ}N$  poseen componente del este (Fig. 28), dominando estos alisios, los cuales tienen magnitudes de aproximadamente de  $8$  a  $9\text{ m/s}$ , con un segundo máximo en el Caribe con magnitudes de  $10\text{ m/s}$ , correspondiendo esto a la corriente en chorro de niveles bajos del Caribe.

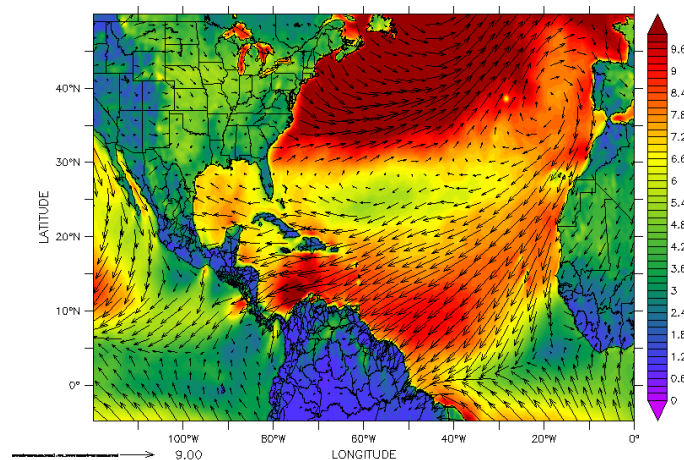
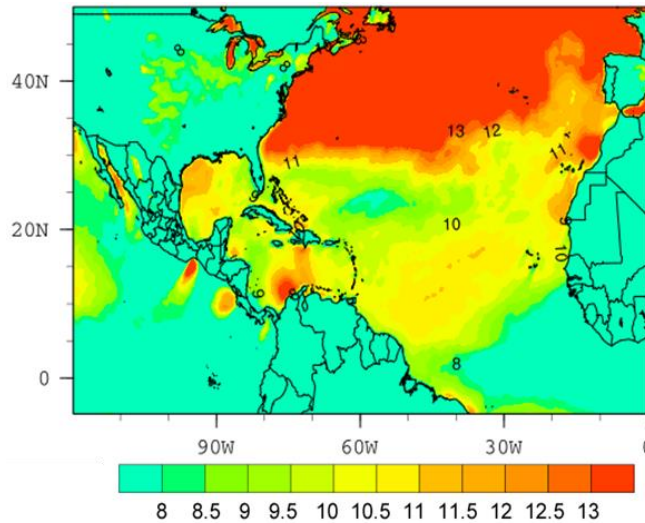


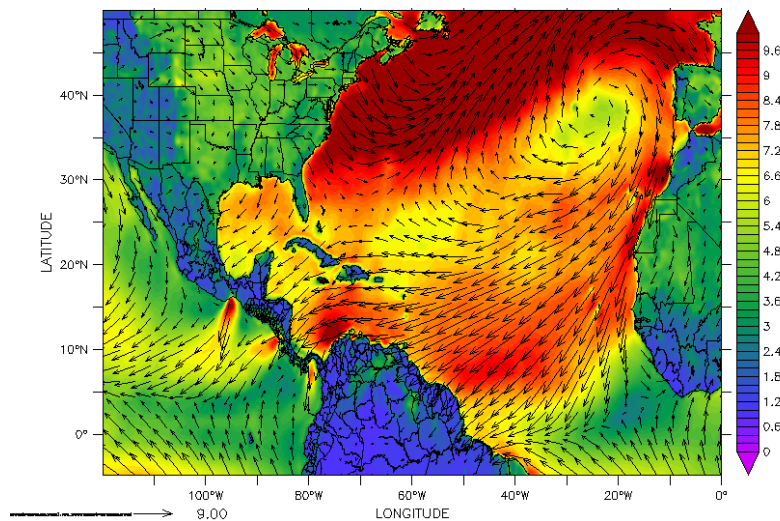
Fig. 28 Viento a  $10\text{m}$ . Febrero 2013

El percentil 90, de febrero de 2013 en el Atlántico Central Tropical es menor a 11 m/s, siendo el Caribe del sureste donde se observan valores mayores a 13 m/s (Fig. 29), la “conectividad” con el Atlántico Central, en este mes es baja ya que en el Atlántico Central se observa un percentil menor a 11 m/s, siendo desfavorable este escenario para el transporte de sargazo desde África o norte de Brasil hasta el Caribe.



*Fig. 29 Percentil 90 de viento a 10m. Febrero 2013*

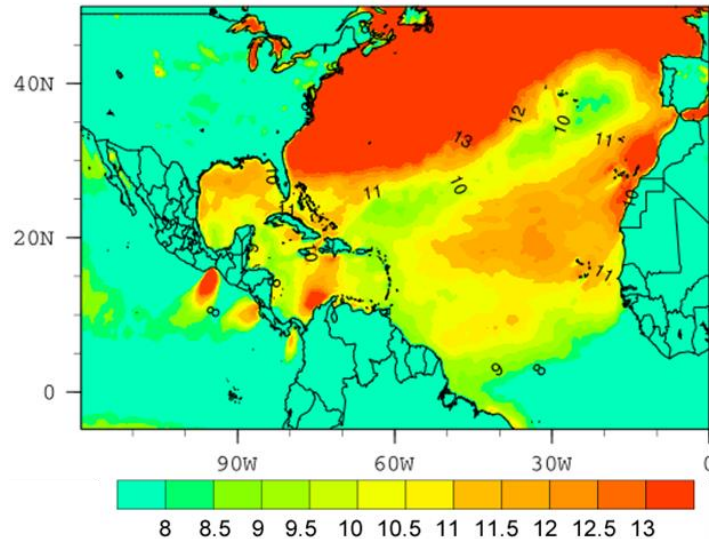
En febrero de 2015, se observan patrones espaciales similares a febrero de 2018, con circulaciones asociadas al alta semipermanente de la Azores, entre 5°N y 25°N los vientos son de componente del este (Fig. 30), con magnitudes mayores a 8 m/s, manteniendo el máximo en el Caribe con magnitudes de 10 m/s, la cual es la corriente en chorro de niveles bajos del Caribe.



*Fig. 30. Febrero 2015, Viento a 10m*

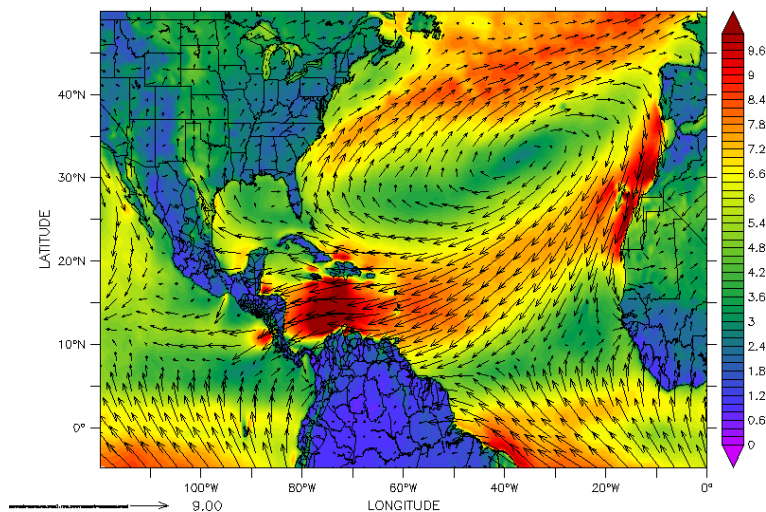


Por otra parte, en el percentil 90, de febrero de 2015 se observa que en el Caribe del este los valores son mayores a 13 m/s, así como en costas de Quintana Roo y Nicaragua (Fig. 31), en el Atlántico Central Tropical es entre 10 m/s y 12 m/s, la “conectividad” con el Atlántico Central, en este mes es mediana, a que en el Atlántico Central se observa un percentil mayor a 12.5 m/s, siendo favorable este escenario para el transporte de sargazo desde África o norte de Brasil hasta el Caribe.



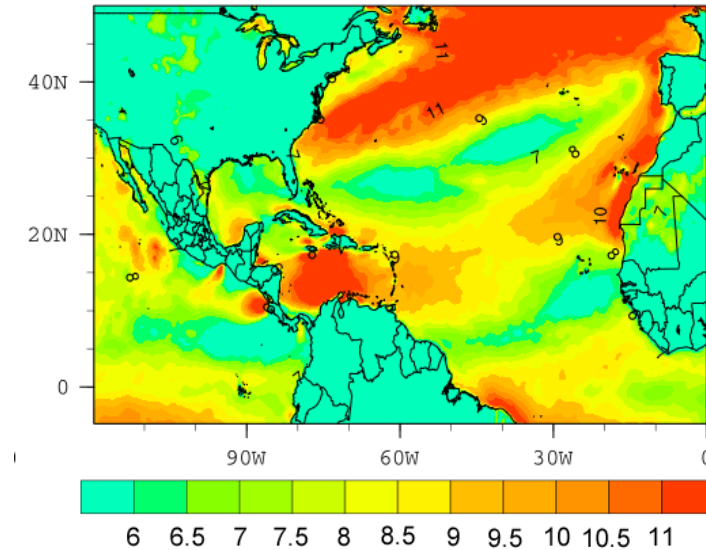
*Fig. 31 Percentil 90 de viento a 10m. Febrero 2015*

Para julio de 2015, año de arribo de sargazo a costas de Quintana Roo, la circulación atmosférica asociada al alta semipermanente de la Azores, tiene vientos predominantes del este (Fig. 32), dominando estos alisios, los cuales tienen magnitudes de aproximadamente de 7 a 8 m/s, en el Caribe, la corriente en chorro tiene magnitudes de 10 m/s.



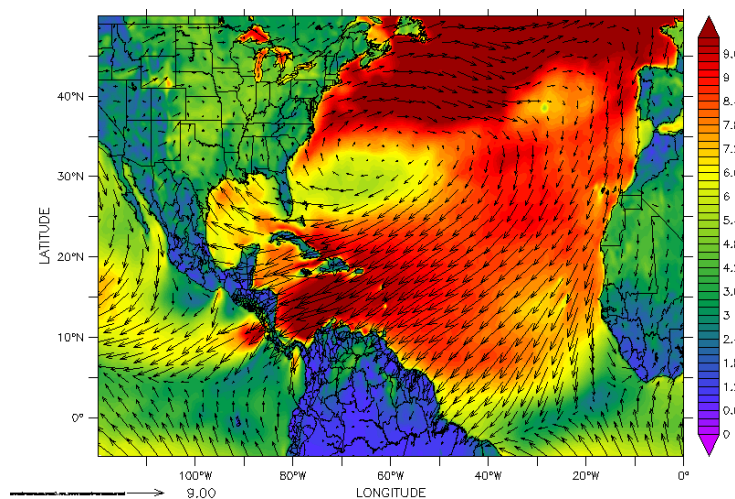
*Fig. 32, Viento a 10m. Julio 2015*

En julio de 2015, el percentil 90 posee un máximo extraordinario en todo el Mar Caribe, excediendo 12 m/s, así como en costas del oeste de Yucatán, Belice y Nicaragua (Fig. 33), en el Atlántico del oeste tropical es entre 10 m/s y 12 m/s, siendo alta la “conectividad” con el Caribe, siendo favorable este escenario para el transporte de sargazo zonalmente.



*Fig. 33 Percentil 90 de viento a 10m. Julio 2015.*

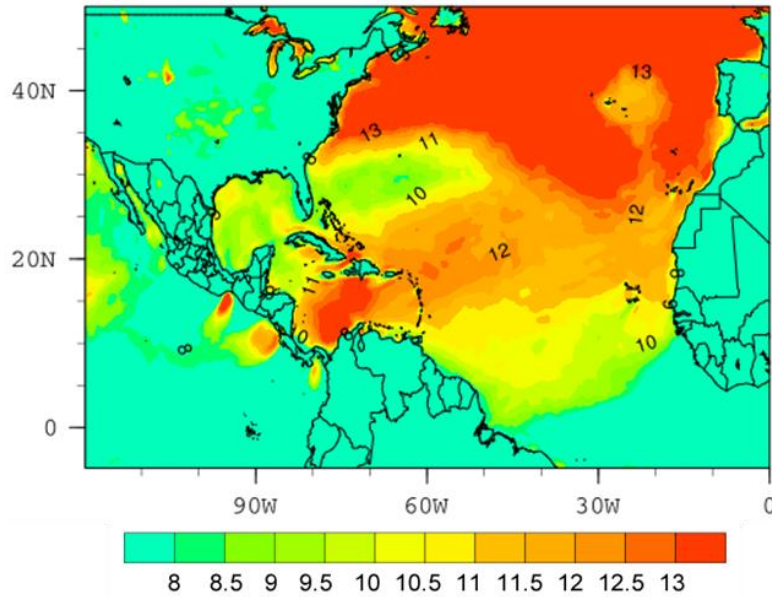
Para febrero de 2018, la circulación en el Atlántico y Caribe es de mayor intensidad, con valores mayores a 10m/s en el Atlántico norte, y en el Caribe, (Fig. 34). La magnitud de 9 m/s se mantiene desde el Atlántico Central siendo este un escenario favorable de transporte de sargazo con gran “conectividad” en la cuenca del Atlántico.



*Fig. 34 Viento a 10m. Febrero 2018*

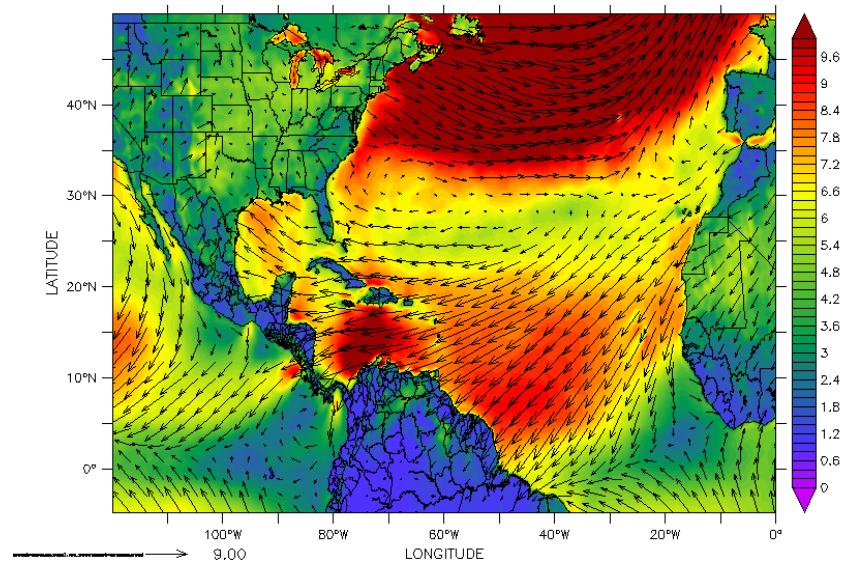
Por otra parte, en el percentil 90, de febrero de 2018, año con gran cantidad de sargazo, en la totalidad el Caribe se observaron valores mayores a 13 m/s, extendiéndose éstos tanto hacia costas de Centroamérica como hacia el Atlántico central en el área de vientos alisios

(Fig. 35), este escenario es favorable para el transporte de sargazo desde África o norte de Brasil hasta el Caribe, lo que propició la gran cantidad de sargazo de este período.



*Fig. 35 Percentil 90 de viento a 10m. Febrero 2018*

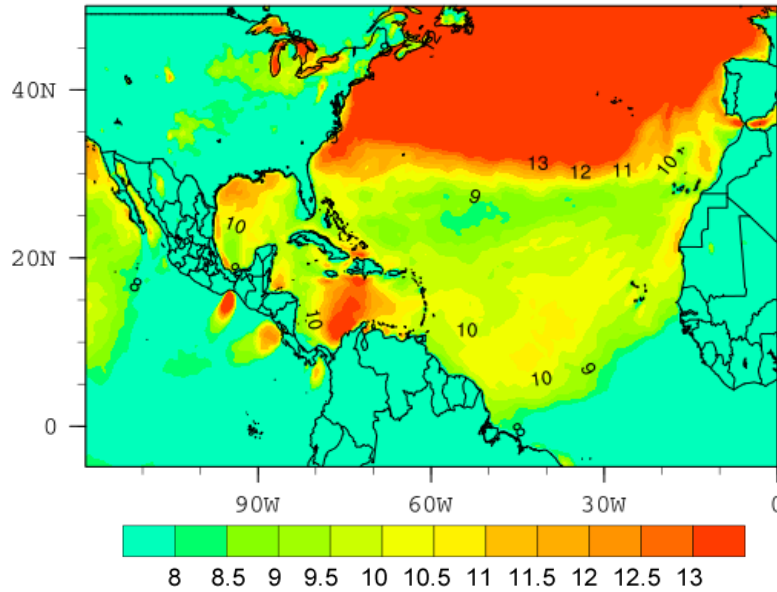
En el último año analizado: 2019, en febrero, mes de arribo de sargazo en forma moderada, la circulación en el Atlántico y Caribe mantienen los patrones ya analizados: vientos del este en la porción tropical y en el Caribe vientos mayores a 10 m/s (Fig. 36), correspondiente éste a la corriente en chorro descrita.



*Fig. 36 Viento a 10m. de altura. Febrero 2019*

Finalmente, el percentil 90, de febrero de 2019, mes con arribo moderado de sargazo, en la porción este del Caribe se observaron valores mayores a 13 m/s, extendiéndose siendo

estos limitados a esta área y a costas de Belice (Fig. 37), este escenario es favorable marginalmente, ya que en el resto del Atlántico el percentil 90 es menor a 10 m/s.



*Fig. 37 Percentil 90 de viento a 10m. Febrero 2019*

Una vez seleccionados los años 2013, 2015, 2018 y 2019, para el mes de febrero se observa un ciclo mensual con alta variabilidad diaria, oscilando entre 4 m/s y 10 m/s, en todos los años analizados a partir de la segunda quincena se observan los valores mayores (Fig. 38), destacando el año 2018, año con mayor sargazo, cuyo valor promedio es el mayor: 7.5m/s y su persistencia también es mayor, ya que gran parte del mes se mantiene con valores mayores a 7 m/s, sin poseer picos altos, como es el caso de los años 2015 y 2013, con promedios similares y tienen dos picos en la segunda quincena, estos vientos están asociados al arribo de frentes fríos, los cuales son de dirección del norte (no mostrado) pudiendo alterar la dirección del arribo del sargazo a costas de Quintana Roo en invierno.

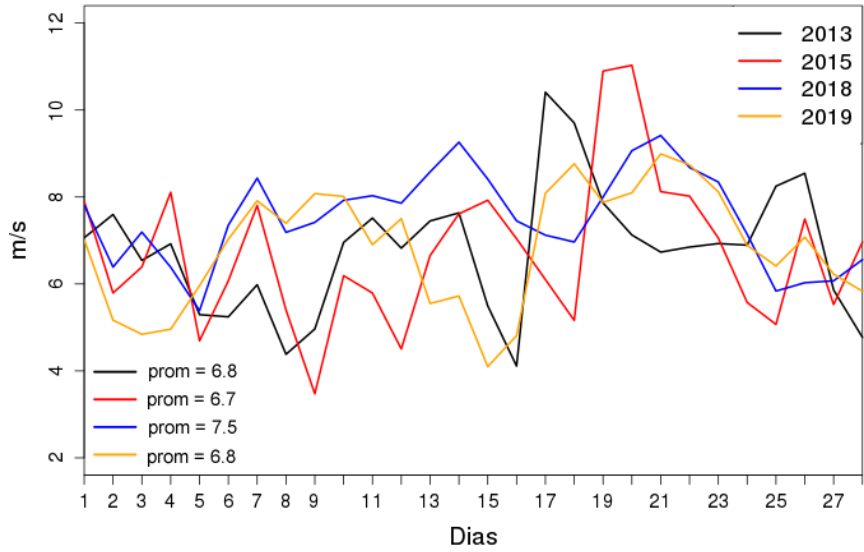


Fig. 38 Ciclo mensual de magnitud de vientos Febrero área 1

Por otra parte, para el mes de julio, el área 1 tiene valores menores que febrero, ya que tiene la influencia de frentes fríos, oscilando sus valores entre 3 m/s y 8 m/s, con tendencia a disminuir al avanzar el mes (Fig. 39). También se observa un ciclo mensual con gran variabilidad diaria. El año 2013, tiene el promedio mayor: 6.0m/s, seguido por el 2015: 5.5 m/s, el 2018 y 2019, éstos sin mayores picos, en este caso, los vientos están asociados a flujos del Caribe, con dirección del sureste (no mostrado).

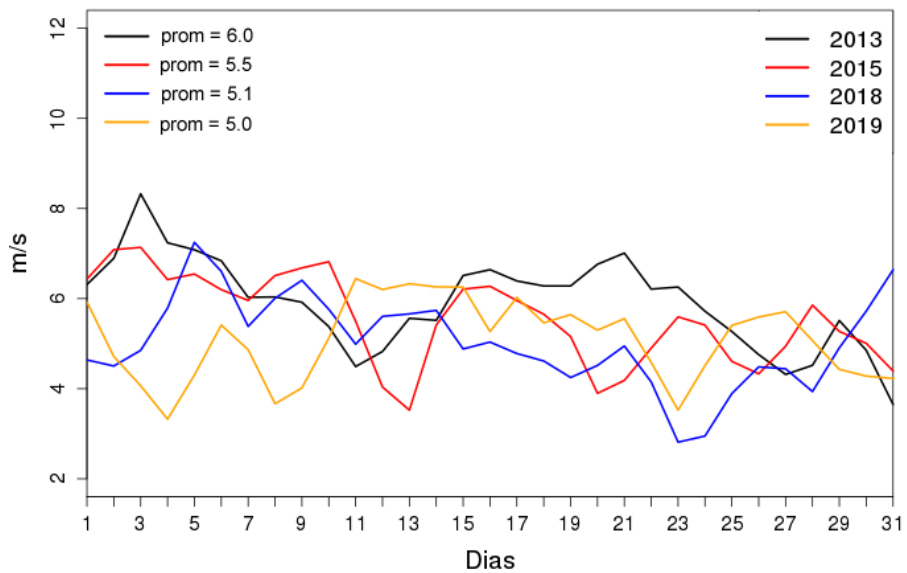


Fig. 39 Ciclo mensual de magnitud de vientos Julio área 1

Para febrero de los años seleccionados el ciclo mensual del área 2 es significativamente mayor al área 1, con variaciones entre 5 m/s y 12 m/s, (Fig. 40) esta zona corresponde a la corriente en chorro del Caribe, que en febrero tiene un máximo relativo. En febrero de 2018, con mayor sargazo de acuerdo a Wang et. al (2019), se observaron vientos significativamente mayores al resto de los años analizados, con promedio de 10.3 m/s, conservándose la mayoría del mes valores mayores a 10 m/s y con dos máximos de 12 m/s el 12 y 22 de julio respectivamente (Fig. 40). Éste 2018 tuvo, además de gran magnitud de vientos del este, gran cantidad de sargazo que transportar de acuerdo a Wang et. al (2019). El año 2013 tuvo el segundo lugar en magnitud de intensidad, sin embargo, ese año no hubo sargazo en el centro del Atlántico ni en el Caribe que transportar. El segundo año con mayor transporte de sargazo es 2015 y tuvo un tercer sitio entre los años seleccionados, con promedio mensual de 8.1.

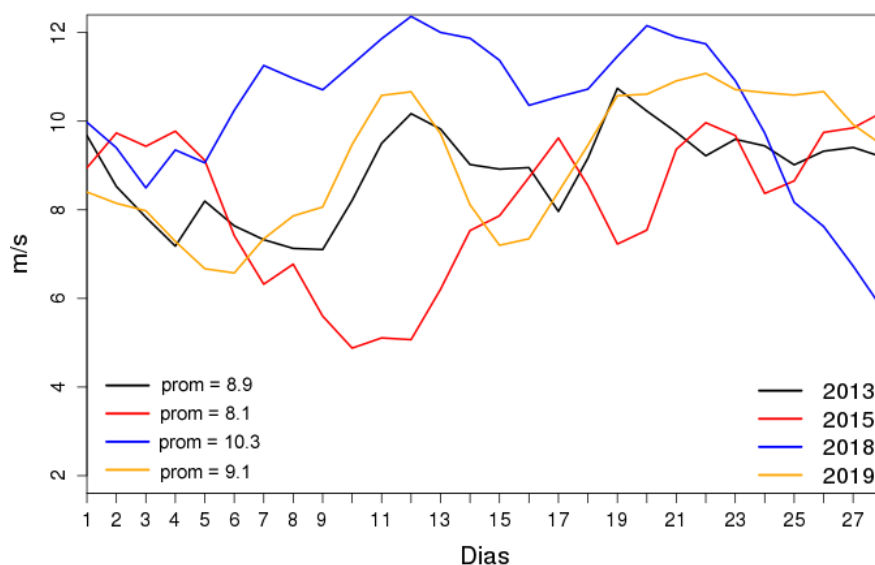


Fig. 40 Ciclo mensual de magnitud de viento Área 2. Febrero

En julio de los años analizados, el ciclo mensual del área 2, además de ser significativamente mayor al área 1 para el mismo mes, las diferencias entre éstos años son menores, esto identifica la persistencia de la corriente en chorro del Caribe, reflejándose en la poca variabilidad interanual (Fig. 41), con variaciones entre 7 m/s y 11 m/s, como se mencionó, este área corresponde a la corriente en chorro del Caribe, que en julio tiene su segundo máximo anual relativo. En julio de 2018, con mayor sargazo de acuerdo a Wang et. al (2019), el promedio calculado es de 9.2 m/s, sus valores oscilan muy cerca del promedio. El año 2015 posee mayor promedio (9.4 m/s), sin embargo, hay menor sargazo disponible

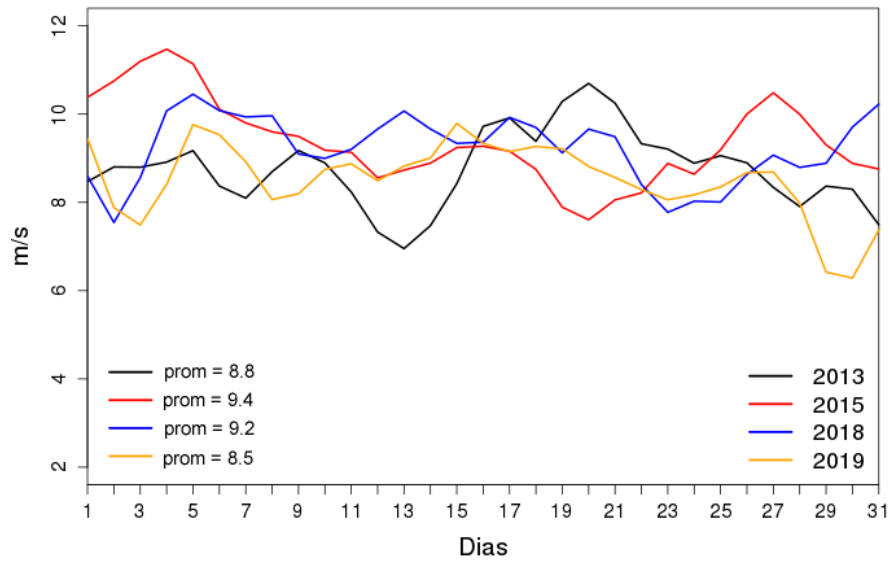


Fig. 41 Ciclo mensual de magnitud de viento Área 2. Julio

Para el área 3, en febrero de los años seleccionados, el ciclo mensual tiene variaciones entre 4 m/s y 19 m/s, (Fig. 42), estos corresponden a los vientos alisios y tienen mayor variabilidad interanual que el Caribe (ver Fig. 41), el 2018 que su promedio fue de 8.4 m/s, tuvo dos picos: el 9 y el 21 de febrero, mientras que el 2015, con promedio de 7.7 m/s tuvo una tendencia a incrementarse a partir del 11 de febrero.

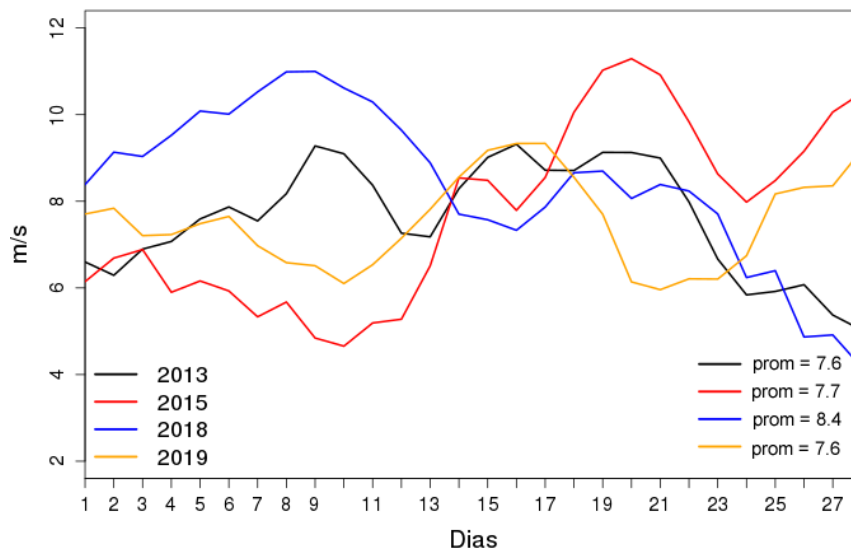


Fig. 42 Ciclo mensual de magnitud de viento Área 3. Febrero

Finalmente, en julio, en el área 3, que corresponde a los vientos alisios, se observa una baja variabilidad interanual y oscilaciones entre 6m/s y 8m/s (menores de 2m/s), el 2018 tiene mayor promedio (7.3 m/s), seguido por 2019, 2013 y 2015 (Fig. 43).

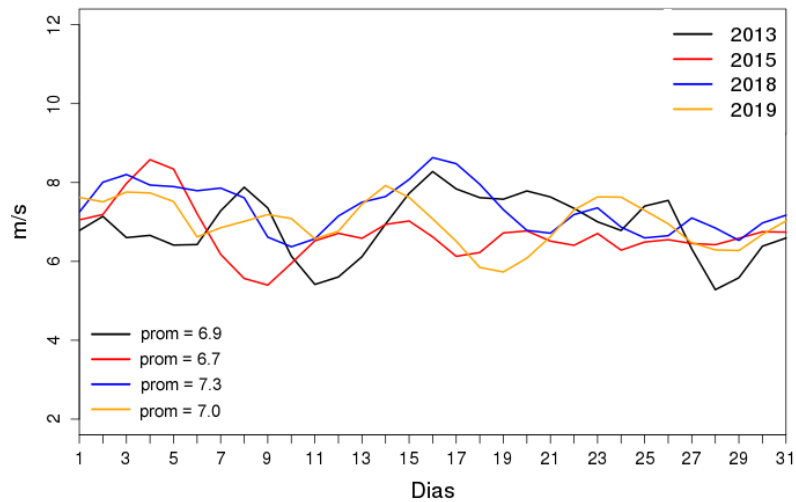
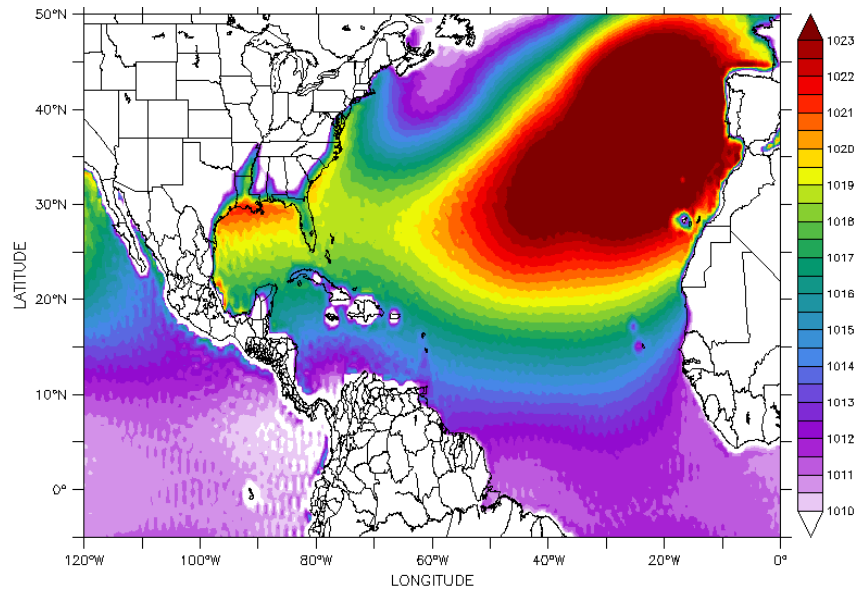


Fig. 43 Ciclo mensual de magnitud de viento Área 3. Julio

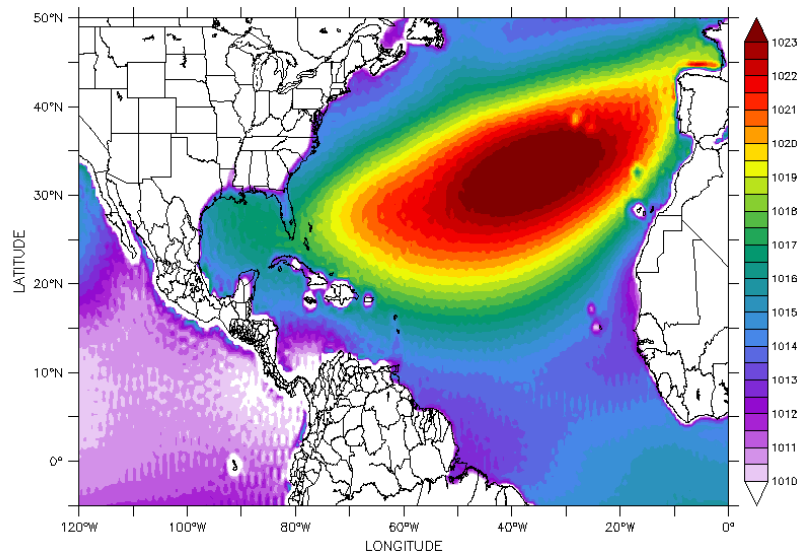
La intensidad del viento en el Atlántico Central está forzada por los gradientes de presión que tienen una clara estacionalidad, los vientos del este (alisios) en la porción sur (Atlántico tropical) están asociados al gradiente de presión norte-sur, los cuales tienen un alta semipermanente centrada aproximadamente en las islas Azores con valores en su núcleo entre 1020 y 1023 hPa en febrero de 2015 (Fig. 44), los gradientes meridionales (norte-sur) generan vientos zonales (oeste-este: alisios), los cuales tienen una gran componente geostrófica (balance entre gradientes de presión y el parámetro de Coriolis). Esto generó mayor índice NAO (ver Fig. 16) el efecto de los gradientes de presión referidos tiene menor impacto en el Mar Caribe, donde la corriente en chorro es generada por otros mecanismos como convergencia de momento tanto horizontal como vertical, el cual está asociado a perturbaciones.





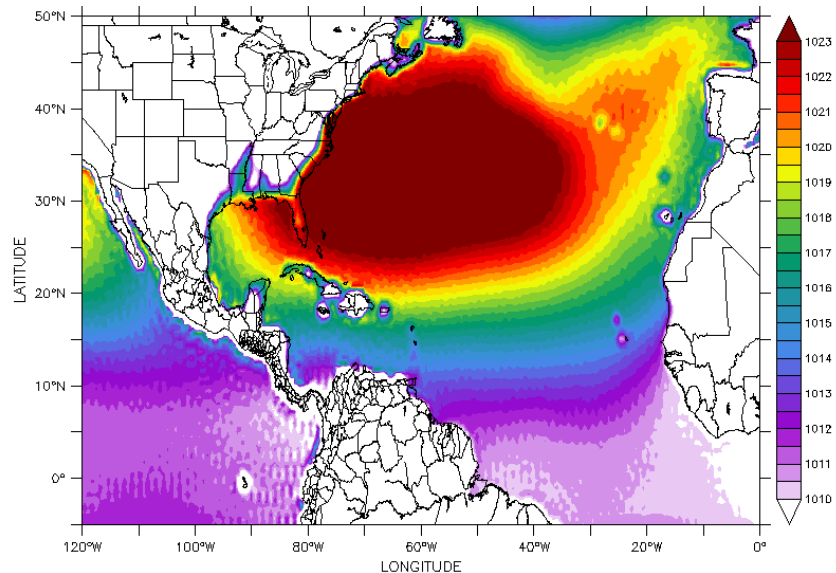
*Fig. 44 Presión superficial. Febrero 2015*

Para julio de 2015, los valores máximos de presión: entre 1021 hPa y 1023 hPa, asociados al alta semipermanente de las Azores están confinados a un área menor, con una clara elongación desde el suroeste del Atlántico (norte de las grandes Antillas) hacia el noreste (Península Ibérica: Fig. 45). Éste área menor genera mayores gradientes de presión y por ende mayores vientos, (mayor índice NAO: ver Fig. 16), en el caso de la porción tropical el Atlántico, los vientos alisios son mayores en julio que en febrero.



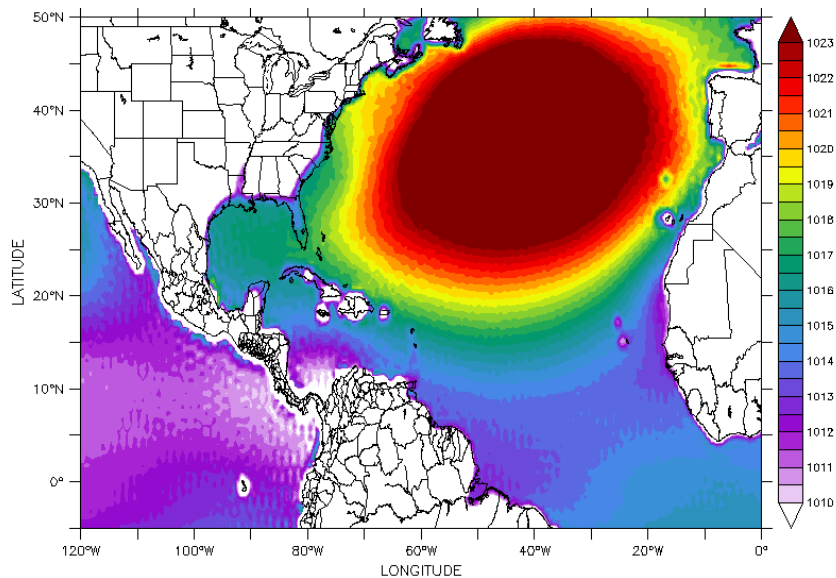
*Fig. 45 Presión superficial. Julio 2015*

En febrero de 2018, las máximas presiones del Atlántico (mayores a 1022 hPa), se desplazaron al oeste, acercándose a costas de Norteamérica (Fig. 46), esto generó vientos más intensos en el área del Atlántico Tropical (ver Fig. 34), con mayor índice NAO: ver Fig. 16), ello en combinación con gran cantidad de sargazo en el Atlántico central (Wang et. al, 2019) provocó la llegada masiva de éste a costas de Quintana Roo



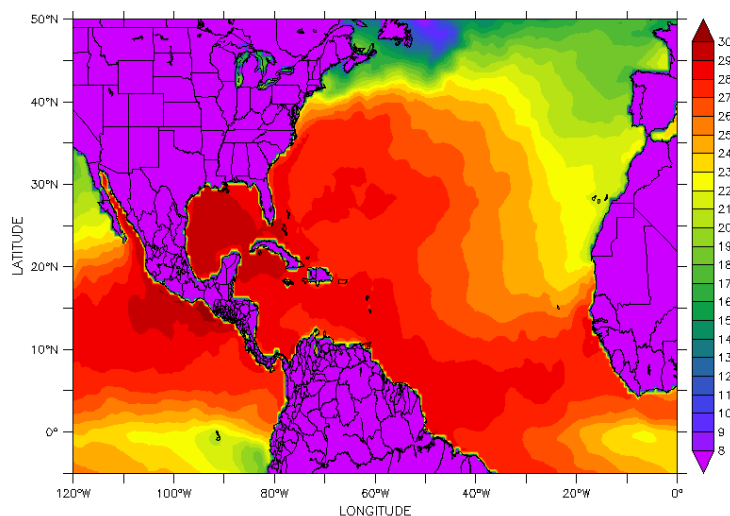
*Fig. 46 Presión superficial. Febrero 2018*

En julio de 2018, el alta semipermanente (valores mayores a 1021 hPa) mantuvo su extensión zonal, incrementando su extensión meridional hacia el Atlántico Norte (Fig. 47), provocando vientos intensos (ver Fig. 23), los mayores gradientes meridionales se acercaron al Atlántico Tropical, ello está asociado a un mayor índice NAO: ver Fig. 16.

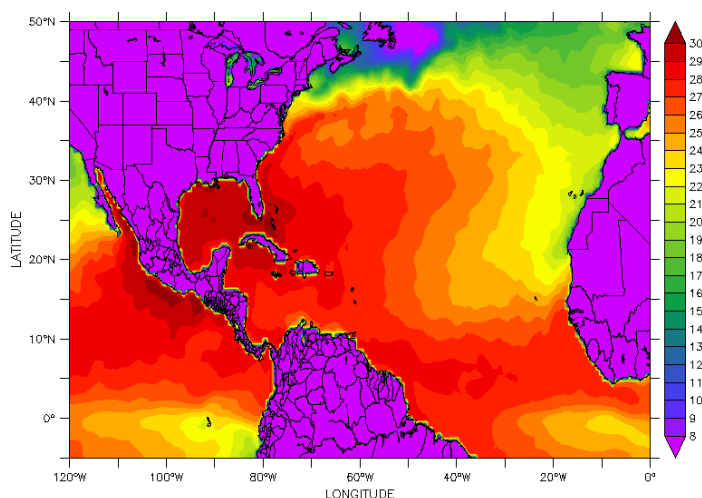


*Fig. 47 Presión superficial. Julio 2018*

Las temperaturas superficiales del mar (TSM) es un factor a considerar en las condiciones de crecimiento de sargazo, por ello se analizó esta variable para julio en los dos años extremos de sargazo: 2013: con ausencia de sargazo y 2018 con arribazón máxima a las costas del oeste del Caribe. Para ambos años se observan en latitudes extra-tropicales del Atlántico (entre 30°N y 40°N) que los valores mayores a 28°C se localizan al oeste de esta gran cuenca: costas de Norteamérica, con valores muy similares en ambos años (Figs. 48 y 49), la distribución espacial se observa también similar en ambos años. Considerando que ambos años representan los extremos del arribazón de sargazo (2013 con ausencia de sargazo y 2018 con abundancia), por este análisis se deduce que la TSM no es el factor detonante en el crecimiento masivo de sargazo que se observó en 2018.



*Fig. 48 Temperatura superficial del mar. Julio 2013*



*Fig. 49 Temperatura superficial del mar. Julio 2018*

## Discusiones finales

### Discusiones y conclusiones

Se analizaron las condiciones atmosféricas bajo las cuales arribó sargazo en forma masiva, para 30 años de datos de viento superficial, presión y temperatura superficial del mar en el Atlántico y Caribe, dividiendo la zona en seis áreas, para cada una se estimó su variabilidad estacional, anual e interanual, así como sus valores extremos del período 1989 a 2018.

Los vientos en el Atlántico giran en torno a la alta presión de las Azores en forma anticiclónica en el sentido de las manecillas del reloj, al norte de 30°N los vientos predominantes son del oeste, en invierno y verano, al sur de 25°N adquieren componente del este en ambas estaciones, dominando anualmente estos vientos alisios en el Atlántico Tropical. Estos vientos se intensifican en el Caribe convirtiéndose en la corriente en chorro de niveles bajos del Caribe, ubicada al este de las costas de Nicaragua, la cual posee dos máximos relativos: en febrero y en julio.

Los valores extremos: percentil 10 de viento a 10m. en invierno tiene dos máximos de 6 m/s en la región tropical, el primero en el Atlántico central tropical, zona de los vientos alisios y el segundo en el Mar Caribe, éste asociado a la corriente en chorro del Caribe (CCC), ambos máximos cubren el área de vientos del este que contribuyen al transporte de sargazo a las costas de Quintana Roo. Por otra parte, los valores máximos extremos: percentil 90 son mayores a 12 m/s se localizan en la zona extra tropical (Atlántico Norte), mientras que en la zona tropical se observa en el Caribe se localiza un máximo de 12 m/s, el cual está asociado a la CCC.

El ciclo anual de magnitud de viento para las seis áreas del estudio muestra que en el Área 1, Caribe del oeste colindante con costas de Quintana Roo tiene un comportamiento bimodal, con dos máximos: en junio-julio y en nov-febrero, para el Caribe central (Área 2) se observan los máximos en junio y julio, con un segundo máximo de igual valor entre diciembre y febrero, el Área 3 tiene un comportamiento similar a la 2 pero con valores menores, el Área 4 tiene máximos de noviembre a abril y mínimos en julio, ello refleja una mayor “conectividad temporal” entre las Áreas 1, 2 y 3, significando ello que en estas Áreas se observan máximos relativos durante los mismos meses del año, favoreciendo ello el transporte de objetos flotantes como el sargazo desde las costas Africanas hasta la mexicanas (Quintana Roo.)

Un indicador de la variabilidad interanual de la intensidad de vientos predominantes en el Atlántico es la NAO (Oscilación del Atlántico Norte). Este índice tiene una correlación positiva con procesos de transporte de sargazo asociado tanto a circulaciones de la atmósfera como del océano, así las estadísticas de largo plazo de 1989 a 2019, indican que a menor índice NAO, menor magnitud de viento en todas las áreas analizadas, el área más intensa es el Caribe (corriente en chorro), donde se identificaron dos años relevantes, con mayor índice NAO en años recientes: 2015 y 2018, en ambos casos la magnitud de viento

promedio es mayor, el Área 2, estas magnitudes de viento e índice NAO son de las más altas del registro analizado, ambos años son caracterizados por gran transporte de sargazo hacia costas de Quintana Roo.

De acuerdo a diversos reportes y publicaciones, a partir de 2011 inició el arribo de sargazo en forma masiva, siendo los años 2015 y 2018 con mayor cantidad, mismos años en que la magnitud de viento en el Área 2 se registraron vientos mayores e índice NAO alto, indicando una correlación positiva durante períodos particulares los vientos y las corrientes oceánicas superficiales que generaron mecanismos de transporte desde su origen: norte de Brasil o costas de África.

Considerando los años con arribazón de sargazo (extremos: 2018, medios: 2015 y nulos: 2013), se eligieron años como casos de estudio, en verano: julio 2013, julio 2015, julio 2018 y julio 2019 y en invierno: febrero 2013, febrero 2015, febrero 2018 y febrero 2019.

Uno de los procesos físicos asociados a la acumulación de sargazo es la divergencia negativa (convergencia) de viento, la cual implica cambios zonales y meridionales de las componentes del viento superficial, en el caso del Trópico, los vientos son mayoritariamente zonales y de la zona de alisios hacia la corriente en chorro se llevan a cabo cambios en la dirección este-oeste, esto es, una aceleración (divergencia) y en la región del Caribe del oeste una convergencia. Los vientos superficiales convergentes tienen el efecto de acumular objetos flotantes sobre el océano, en este caso el sargazo, el cual se transporta en forma de filamentos, ello es indicativo de la gran variabilidad espacial de los vientos del este (diferencia de magnitud entre los alisios y los vientos del Caribe: corriente en chorro).

El proceso físico que promueve la acumulación de sargazo por transporte es la convergencia, la cual por la gran variabilidad zonal del viento: desaceleración (aceleración) en la entrada (salida) de la corriente en chorro del Caribe, el Área 5 es la única que tienen valores negativos de divergencia, indicando ello convergencia, en todos los años analizados desde 1989, ello es porque se trata de la zona de convergencia intertropical sobre el Atlántico. Se observó una gran variabilidad interanual de la divergencia para las 6 áreas, siendo particularmente destacados los años 2015 y 2018, cuando en el Área 1, 4 y 6 se registró una menor divergencia. Una especulación fundamentada es que en 2015 y 2018 la convergencia de viento superficial en el Área 2 (Caribe) contribuyó a la acumulación de sargazo por transporte en el oeste del Caribe, este es: en las cercanías de costas de Quintana Roo.

Para los años seleccionados, se calculó el promedio espacial de presión, así: los gradientes meridionales (norte-sur) generan vientos zonales (oeste-este: alisios), los cuales tienen una gran componente geostrófica (balance entre gradientes de presión y el parámetro de Coriolis). Para estos años se observó un mayor índice NAO.

Para julio de 2015, los valores máximos de presión asociados al alta semipermanente de las Azores están confinados a un área menor, con una elongación desde el suroeste del Atlántico (norte de las grandes Antillas) hacia el noreste (Península Ibérica). Éste área menor genera mayores gradientes de presión y por ende mayores vientos, esto es, mayor índice NAO, en el caso de la porción tropical del Atlántico, los vientos alisios son mayores en julio que en febrero. En febrero de 2018, las máximas presiones del Atlántico, están desplazadas al oeste, acercándose a costas de Norteamérica, generando vientos más intensos en el área del Atlántico Tropical, con mayor índice NAO, que combinado con gran cantidad de sargazo en el Atlántico central, provocó la llegada masiva de éste a costas de Quintana Roo.

En julio de 2018, el alta semipermanente mantuvo su extensión zonal, incrementando su extensión meridional hacia el Atlántico Norte, provocando vientos intensos, los mayores gradientes meridionales se acercaron al Atlántico Tropical, ello está asociado a un mayor índice NAO.

Finalmente, se incluyeron en el análisis las temperaturas superficiales del mar (TSM) por ser un factor a considerar en las condiciones de crecimiento de sargazo. Para julio en los dos años extremos de sargazo: 2013: con ausencia de sargazo y 2018 con arribazón máximo a las costas del oeste del Caribe. Para ambos años se observaron en latitudes extra-tropicales del Atlántico (entre 30°N y 40°N) que los valores mayores se localizan al oeste de esta gran cuenca: costas de Norteamérica, con valores muy similares en ambos años, la distribución espacial se observa también similar en ambos años. Considerando que ambos casos representan los extremos del arribazón de sargazo (2013 con ausencia de sargazo y 2018 con abundancia), por este análisis se deduce que la TSM no es el factor detonante en el crecimiento masivo de sargazo observado.

Trabajo a futuro.

Esta información contribuirá a generar un sistema de alerta temprana, la segunda etapa consistiría en:

1. Realizar un análisis del efecto combinado (océano y atmósfera) en la trayectoria del sargazo en el Caribe.
2. Estimar umbrales de viento, corrientes oceánicas y temperatura superficial del mar Caribe y su evolución temporal y espacial que detonen un semáforo dinámico de alerta temprana.
3. Generar un sistema de pronóstico numérico validado de circulaciones (atmosféricas y oceánicas) y su correlación con las trayectorias de sargazo.
4. Generar y aplicar un sistema de alerta temprana automatizado basado en un semáforo dinámico de consulta e interpretación sencilla.

## **Bibliografía**

Mengqiu Wang, Chuanmin Hu, Brian B. Barnes, Gary Mitchum, Brian Lapointe, Joseph P. Montoya. The great Atlantic Sargassum belt. *Science*. 2019: Vol. 365, Issue 6448, pp. 83-87

DOI: 10.1126/science.aaw7912

C. Hu, B. Murch, B. Barnes, M. Wang, J.-P. Maréchal, J. Franks, D. Johnson, B. Lapointe, D. Goodwin, J. Schell, A. Siuda, Sargassum watch warns of incoming seaweed (*Eos*, 2016).

J. S. Franks, D. Johnson, D. S. Ko, Retention and growth of pelagic Sargassum in the north equatorial convergence region of the Atlantic Ocean: A hypothesis for examining recent mass strandings of pelagic Sargassum along Caribbean and West Africa shorelines, in *Proceedings of the 67th Annual Gulf and Caribbean Fisheries Institute (GCFI, 2014)*, p. 136.

L Zavala Sansón, P Pérez-Brunius and J Sheinbaum. Point source dispersion of surface drifters in the southern Gulf of Mexico. *Environ. Res. Lett.* 12 (2017) 024006.

Luis Zavala Sansón, Paula Pérez-Brunius, and Julio Sheinbaum. Surface Relative Dispersion in the Southwestern Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*. 2017. p-387-402  
DOI: 10.1175/JPO-D-16-0105.1