



Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ciencias Marinas

**Variabilidad temporal en la dispersión de partículas en la costa
norte de la Península de Yucatán**

Tesis

que para obtener el título de Oceanóloga

Presenta:

Katherine Daza

Ensenada, Baja California, México
2024



Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ciencias Marinas

Variabilidad temporal en la dispersión de partículas en la costa norte de la Península de Yucatán

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Oceanóloga

presenta

Katherine Daza

Ensenada, Baja California a 5 de abril de 2024

Dr. Braulio Juárez Araiza y Dr. Jorge Alejandro Kurczyn Robledo
Directores de tesis

Dr. Jorge Manuel López Calderón
Sinodal

Dr. Mauro Wilfrido Santiago García
Sinodal



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
CAMPUS ENSENADA**

“Variabilidad temporal en la dispersión de partículas en la costa norte de la Península de Yucatán”

TESIS

PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
OCEANOLOGÍA

PRESENTA:

**Katherine Daza
357447**

A quien el Comité de Tesis autoriza el trabajo terminal, después de haber efectuado una revisión minuciosa del mismo y de acuerdo con el Art. 19 del R.G.E.P.E.P, las y los señores profesores emiten los siguientes votos aprobatorios mediante rúbrica:

**Dr. Braulio Juárez Araiza
DIRECTOR**

**Dr. Jorge Alejandro Kurczyn Robledo
CODIRECTOR**

**Dr. Mauro Wilfrido Santiago García
SINODAL**

**Dr. Jorge Manuel López Calderón
SECRETARIO**

“Por la Realización Plena del Ser”



Resumen

La llegada de macroalgas a las costas mexicanas en la Península de Yucatán se ha agudizado en los últimos años, generando problemas en el sector económico, turístico y de salud. Esto ha promovido oportunidades de estudio enfocadas en la hidrodinámica costera que contribuyen o pueden dar explicación a estos arribos. En esta tesis se simuló la trayectoria de partículas sintéticas considerando ocho eventos destacables de Nortes para el Golfo de México de 2019 a 2022. Las partículas fueron situadas dentro de la isóbata de 200 m de la costa norte de la Península de Yucatán para representar las trayectorias de macroalgas suspendidas en la superficie del agua. Se analizó la dispersión que tuvieron las partículas para visualizar su ruta en época de Nortes y sus periodos de arribo al Puerto de Sisal. Los resultados sugieren que la zona con mayor aporte al Polígono Sisal la comprenden los polígonos más costeros (Progreso In, Dzilam In y Cuyo In). Asimismo, para seis de los ocho eventos de Norte, hubo aporte de partículas al Polígono Sisal. Este trabajo contribuye al conocimiento de los impulsores del arribo de macroalgas en una región poco estudiada.

Palabras clave: *Dispersión de partículas, modelación lagrangiana, sargazo, Península de Yucatán.*



Dedicatoria

Para mis distintas versiones a lo largo de la carrera, cada canción representa una de mis etapas.

*"Catch a wave and take in the sweetness
Think about it, the darkness, the deepness
All the things that make me who I am"*

*"Somewhere beyond the sea
She's there watching for me
If I could fly like birds on high
Then straight to her arms I'd go sailing"*

*"Haz que tu cuento valga la pena
Haz de tus sueños la ilusión
Y que se asome la primavera
En las calles de tu corazón"*



Agradecimientos

Con el corazón le agradezco a mi mamá, papá, nana, nino y tíos por su apoyo a mi persona y a mi carrera. Ustedes significan mucho.

Agradezco a mis directores de tesis el Dr. Braulio Juárez y el Dr. Jorge Kurczyn por apoyar mi interés en la Oceanografía Física y desarrollar este proyecto conmigo.

Al Dr. Jorge López quien ha sido uno de los académicos más importantes de mi carrera por aceptarme en sus líneas de trabajo en la Facultad de Ciencias Marinas y también, por abrirme las puertas del estimado Herbario Ficológico CMMEX (inspiración para la elección de mi tema de tesis).

A la Dra. Karina Lugo por inspirarme a ser una mejor persona e investigadora, siempre considerando un bien común.

A mi mejor amiga la C.D. Liliana Gallardo por su apoyo y cariño en los momentos altos y bajos de mi vida. Te quiero mucho Lili.

A mis toninos por ser parte de mi corazón y por todo el camino que nos queda por delante a compartir.

A Benny, Lili y Hugo Sánchez, mis mascotas que desde el cielo de los conejos me cuidan. A Peluches, Cookie, Plankton, Bella y Caballito, mis compañeros cuadrúpedos que me quieren siempre.

Finalmente, agradezco y reconozco mi fuerza de voluntad para seguir trabajando en superarme y salir adelante. Te quiero mucho pequeña Kathy, ya eres Oceanóloga.



Contenido

- I. Introducción
- II. Descripción del área de estudio
- III. Justificación del estudio
- IV. Objetivos
- V. Hipótesis
- VI. Metodología
- VII. Resultados
- VIII. Discusión
- IX. Conclusiones
- X. Literatura citada



Índice de figuras

Figura 1. *Halymenia sp.* y *Grateloupia sp.* recolectadas en Sisal en agosto de 2023 (21°9'59'' N 90°2'57'' O).

Figura 2. Localización espacial de Puerto Sisal, Yucatán y ADCP (ubicación aproximada).

Figura 3. 3. Sitio de partida de las partículas (6 prototipos de polígonos ideales) y el polígono que representa a la costa de Sisal (sitio de llegada). Fotografía aérea del Puerto de Sisal tomada de Garza-Pérez e Ize-Lema (2017).

Figura 4. a. Posición inicial de las partículas sembradas en cada polígono (cobertura real). b. Aproximación del área de cobertura de las partículas sembradas.

Figura 5. Simulación realizada en el periodo del 25 al 28 de febrero de 2020 (una simulación de trayectoria). Nota: Cada par de imágenes horizontales representa una captura de la hora 24 y hora 48 de una simulación de cuatro días.

Figura 6. Simulaciones realizadas en el periodo del 23 al 27 de enero de 2019 (dos simulaciones de trayectorias).

Figura 7. Simulaciones realizadas en el periodo del 20 al 26 de diciembre de 2022 (cuatro simulaciones de trayectorias).

Figura 8. Simulaciones realizadas en el periodo del 28 de septiembre al 4 de octubre de 2020 (tres de cuatro simulaciones de trayectorias).

Figura 9. Simulaciones realizadas en el periodo del 14 al 19 de marzo de 2019 (tres simulaciones de trayectorias).

Figura 10. Simulaciones realizadas en el periodo del 11 al 22 de noviembre de 2022 (seis de nueve simulaciones de trayectorias).

Figura 11. Simulaciones realizadas en el periodo del 22 al 29 de noviembre de 2021 (cuatro de siete simulaciones de trayectorias).

Figura 12. Simulaciones realizadas en el periodo del 11 al 20 de febrero de 2021 (siete simulaciones de trayectorias).



Índice de tablas

- I.** Descripción de los polígonos y punto de partida de las partículas en cada uno.
- II.** Eventos nortes usados en las simulaciones.
- III.** Ejemplo de las simulaciones realizadas para un evento contemplado de Norte con duración de 9 días.
- IV.** Análisis cualitativo de la interacción de partículas con el Polígono Sisal. PB: Progreso In; PC: Progreso Out; PD: Dzilam In; PE: Dzilam Out; PF: Cuyo In; PG: Cuyo Out.
- V.** Noticias de arribazón de sargazo al Puerto de Sisal.
- VI.** Correlaciones entre datos de correntímetro local en Sisal y HYCOM



I. Introducción

La hidrodinámica de la zona costera influye en la dispersión y transporte de cualquier partícula en la columna de agua como larvas de peces, sedimento, contaminantes o macroalgas que flotan a la deriva (Contreras y Castilla 1992, Montante-Sánchez 2004). Cualquier partícula u organismo que presente flotabilidad puede conceptualizarse como una partícula en dispersión en la superficie del océano modificada por forzantes internos, atmosféricos y la interacción entre estos.

El concepto de dispersión de partículas se aplica a estudios de arribazón de macroalgas, como las del clase Phaeophyceae, que presentan un movimiento en la columna de agua debido a estructuras de flotación conocidas como neumatocistos. Los neumatocistos mantienen a las macroalgas en flotación cuando éstas se desprenden del fondo marino y/o son transportadas por las corrientes. Las trayectorias de las macroalgas desprendidas pueden ser simuladas virtualmente, utilizando modelos de dispersión superficial como en el trabajo de Kyungman y colaboradores (2019).

Actualmente se presentan arribos masivos de macroalgas catalogadas como 'Sargazo' en la región sureste del Golfo de México (GM), particularmente en la Península de Yucatán y el Caribe. Estos arribos generan problemas estéticos y de salud pública debido a la disminución en la calidad del aire por emisión de gases (por descomposición) como ácido sulfhídrico y metano (Oyesiku y Egunyomi, 2014; Suárez y Martínez-Daranas, 2018; SEMARNAT, 2021), afectando el turismo en zonas más concurridas (SEMARNAT, 2021).



Los arribazones también traen problemáticas económicas al afectar la entrada a puertos de embarcaciones menores. El monitoreo *in situ* por medio de campañas de muestreo del arribo del sargazo brinda una escala fina de su comportamiento a cambio de un alto consumo de tiempo limitado a periodos establecidos (Rutten et al. 2021). La frecuencia e intensidad de eventos de arribazón en playas se puede estimar mediante el monitoreo de variables físicas y modelos de dispersión para ayudar a generar medidas de mitigación eficientes.

¿Qué sabemos del “sargazo” que llega a las costas de Yucatán y el Caribe?

La palabra *Sargassum* se le atribuye al género de macroalgas de la clase Phaeophyceae. *Sargassum fluitans* y *S. natans* son las especies (holopelágicas) que arriban a la costa del Caribe de manera masiva (Brooks et al. 2018) y se caracterizan por presentar coloración oscura con tonos cafés (generalmente). Sin embargo, también pueden acumularse parches de macroalgas del filo Rhodophyta con ramificaciones que presentan una mayor resistencia y con la capacidad de fijarse entre múltiples organismos formando cúmulos al ser desprendidos.

Los parches de macroalgas que arriban a la costa pueden variar de tamaño desde unos centímetros hasta kilómetros de extensión (Parr 1939, Stoner 1983, Lapointe 1995, Gower et al. 2006, Schell et al. 2015, Brooks et al. 2019), por lo que la variación de tamaño o concentración en peso es irrelevante en su nombramiento. A partir del 2011 existen registros del crecimiento excesivo de sargazo para la región tropical y subtropical del Océano Atlántico (Rosellón-Druker et al. 2022).



En el Caribe se ha registrado que su origen es pelágico al desprenderse del Mar del Sargazo debido, en parte, a la influencia de corrientes superficiales y al viento (López-Contreras et al. 2022). El Mar del Sargazo es una región en océano abierto dentro del giro subtropical del Atlántico Norte limitada en sus fronteras por el sentido anticiclónico que generan las principales corrientes oceánicas que la rodean: Corriente del Atlántico Norte al límite norte, Corriente del Golfo al límite oeste, Corriente de las Islas Canarias al límite este y Corriente Ecuatorial del Norte y Corriente de las Antillas al límite sur (Laffoley et al. 2011). Este se caracteriza por ser el único mar sin fronteras y que se encuentra flotando al constituirse por *Sargassum*; siendo el albergue de diversas comunidades, zona de crianza y alimentación, así como ruta en la migración de diversas especies (Laffoley et al. 2011).



II. Antecedentes

Arribazones en la costa nor-oeste de Yucatán

Durante invierno en la costa norte de Yucatán, los frentes fríos modifican las condiciones de viento, oleaje, y las corrientes litorales; mecanismos clave en el desplazamiento y arribazón de sargazo (Ortegón-Aznar y Ávila-Mosqueda 2020). Los parches de sargazo que arriban a la costa norte de Yucatán provienen de dos regiones ubicadas dentro del Golfo de México (Brooks et al. 2019). La primera está delimitada por la costa este y se extiende hasta el centro del Golfo de México. Mientras que la segunda parte proviene del centro del Golfo de México y se delimita por la región que comprende las costas de Florida y Cuba (Brooks et al. 2019). Existen dos sistemas de pronóstico de la llegada de sargazo que abarcan el territorio del Golfo de México: el Sargassum Early Advisory System (SEAS) y el Sargassum Inundation Report (SIR). El segundo trabaja con el Alternative Floating Algae Index (AFAI) el cual toma las proximidades de píxeles costeros en valores de reflectancia y compara dichos valores con una línea base de un conjunto de días (López-Contreras et al. 2022).

El enfoque de este trabajo es presentar un análisis de las condiciones atmosféricas y oceánicas que influyen en el arribo de sargazo al Puerto de Sisal ubicado en la costa noroeste de Yucatán. La economía del Puerto de Sisal se basa en la actividad pesquera de flotas menores, por lo que el arribo de sargazo que se concentra en la entrada del puerto principal afecta maniobras de navegación, impactando las actividades pesqueras.



Los ejemplares de macroalgas contenidas en los parches de sargazo que llegan a la costa norte de Yucatán son distintos a los que llegan al Caribe Mexicano (Ortegón-Aznar y Ávila-Mosqueda 2020). Los ejemplares que llegan a la región caribeña provienen de proliferaciones producto de la eutrofización en la conexión entre el océano y el Río Amazonas en las costas de Brasil (Ortegón-Aznar y Ávila-Mosqueda 2020). Los organismos que llegan a la costa norte de Yucatán son principalmente locales y bentónicos y comprenden macroalgas *Rhodophytas* (algas rojas) de los géneros *Alsidium sp.*, *Digenea sp.*, *Laurencia sp.* (Ortegón-Aznar y Aguilar-Perera, 2014; Ortegón-Aznar y Ávila-Mosqueda 2020), así como *Halymenia sp.* y *Grateloupia sp.* (Fig. 1). Las algas rojas pueden habitar adheridas a un sustrato, ej. rocas, ser epífitas, permanecer en la arena o encontrarse flotando y su reproducción puede ser asexual por medio de la liberación de esporas (mitosis) o sexual (León-Álvarez et al. 2017).

Las macroalgas *Rhodophytas* constituyeron aproximadamente el 50% de las especies en los arribazones de sargazo en una playa localizada a 160 km de distancia de Sisal en el periodo de octubre de 2010 a febrero de 2011 en el municipio de Dzilam de Bravo (Rosado-Espinoza et al. 2012). Lo anterior significa que existe un registro considerable de macroalgas rojas en los parches de sargazo que arriban a la costa noroeste de Yucatán.



Figura 1. *Halymenia sp.* y *Grateloupia sp.* recolectadas en Sisal en agosto de 2023 (21°9'59'' N 90°2'57'' O). Referencia de tamaño: el largo del objeto blanco es de 2 cm.

Sobre esta tesis

En esta tesis, se señala que el sargazo que llega a Sisal es bentónico desprendido por las corrientes oceánicas, por lo que se considera que su origen es local. La hipótesis que plantea esta tesis considera que la influencia de corrientes y vientos en la dispersión de parches flotantes modela su movimiento hacia la costa. El trabajo de Brooks et al. (2019) servirá como base de estudio ya que en este analizan la conectividad entre sitios de partida de sargazo y sitios de llegada.



III. Justificación del estudio

En la costa norte de Yucatán se presentan arribazones de sargazo que causan problemas turísticos y en actividades productivas como la pesca. Los estudios de los arribazones de sargazo en la costa Norte de Yucatán son escasos comparado al Caribe Mexicano debido a que la actividad turística (base de la economía local) se ve gravemente afectada. Por ello, la relevancia de describir la llegada de sargazo a sitios locales como el Puerto de Sisal es un paso inicial importante para comenzar la ampliación de estudios de distribución y factores que aporten a la llegada de estas macroalgas a la costa.

IV. Objetivo

1.1. Objetivo general

Evaluar la dinámica regional de la dispersión de partículas en la costa norte de la Península de Yucatán, durante la temporada de nortes, utilizando modelación lagrangiana.

1.2. Objetivos específicos

1. Utilizar el campo de corrientes marinas de HYCOM para realizar simulaciones de la dispersión de partículas frente a la costa de Sisal, Yucatán.
2. Realizar una revisión bibliográfica de los arribazones de macroalgas al área de estudio y analizar su relación con la dispersión de las corrientes regionales y locales.



V. Hipótesis

La trayectoria de las partículas simuladas es modificada por el viento durante la presencia de frentes fríos (Nortes). Esta trayectoria recrea el movimiento lagrangiano que sigue el sargazo suspendido en la superficie oceánica, sobre la plataforma continental de la Península de Yucatán.

VI. Área de estudio

Ubicación geográfica

El área de estudio comprende la costa norte de la península de Yucatán, en particular la costa del puerto de Sisal (municipio de Hunucmá), el cuál se encuentra ubicado a 73 km de la ciudad de Mérida (Inegi, 2020). El puerto está situado a $21^{\circ} 09' 55''$ N, $90^{\circ} 01' 50''$ O y presenta una elevación de 1 m sobre el nivel del mar (Inegi, 2005; López-Maldonado, 2011).

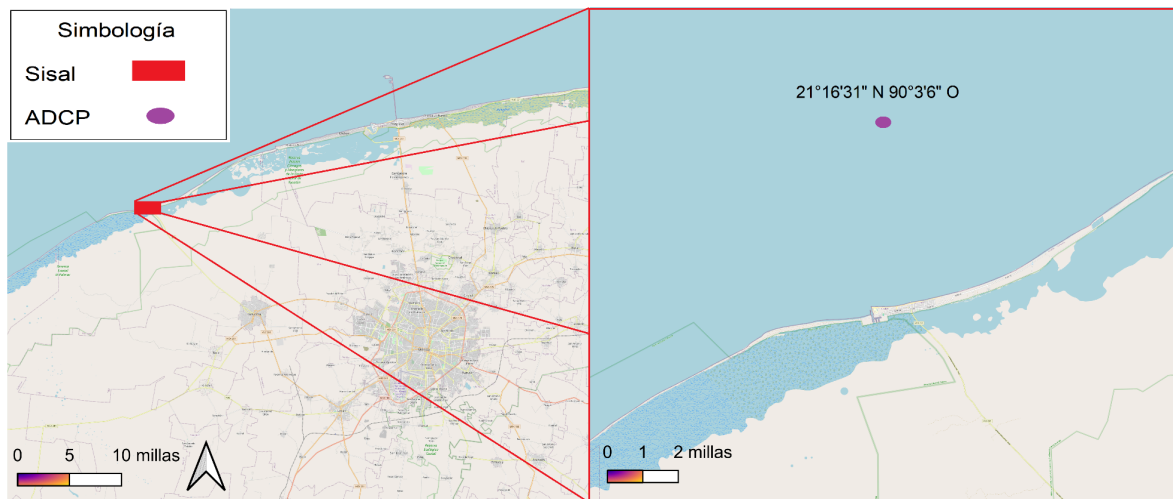


Figura 2. Localización espacial de Puerto Sisal, Yucatán y ADCP (ubicación aproximada).



Meteorología local

En la península de Yucatán se presentan tres estaciones anuales: secas (de marzo a junio), lluvias (de junio a octubre) e invierno (de octubre a febrero) (Garza-Pérez e Ize-Lema 2017). La región se caracteriza por un clima árido cálido con temperatura anual promedio máxima de 22°C y mínima de 18°C, con lluvias presentes todo el año (SEDATU 2015). El puerto de Sisal cuenta con una temperatura máxima de 36°C (mes de mayo) y en promedio se encuentra en 25.6°C (DIGAOHM S.f). Las temperaturas medias mínimas se registran en enero y febrero con 20.4°C (Meza-Cuellas 2013).

El viento en Sisal se caracteriza por provenir del sureste y noreste, siendo más común el primero y más intenso el segundo. La lluvia promedio es de menos de 600 mm por año; aunque puede aumentar si es temporada de huracanes y tormentas invernales hasta 900 mm (Garza-Pérez e Ize-Lema 2017).

Oleaje

A partir de tres años de mediciones, se han establecido dos temporadas en el oleaje de la región frente al área de estudio. La temporada de secas presenta un oleaje en dirección NNE con alturas máximas alrededor de los 0.5 m que aumenta progresivamente en ciclos de 24 horas. La temporada de invierno, que coincide con la temporada de Nortes, presenta un oleaje del NNO con alturas mayores a 1.75 m; alcanzando el máximo de energía durante los eventos de Nortes (Garza-Pérez e Ize-Lema 2017).



Corrientes

Las corrientes presentes frente a la costa de Sisal en la región interna de la plataforma de Yucatán están regidas por la corriente de Yucatán (Garza-Pérez e Ize-Lema 2017) y también, por el esfuerzo de vientos (presentes todo el año) provenientes del Este que dan lugar a una corriente interior con dirección al Oeste (Ruiz-Castillo et al. 2016). Teniendo así que la dirección de la corriente frente a la costa Norte de Yucatán sigue una dirección E-O paralela a la costa.

Surgencias

En la región de Cabo Catoche, al noroeste de la Península de Yucatán, los eventos de surgencia son comunes, transportando agua caribeña subsuperficial. Las surgencias costeras de Yucatán ocurren con mayor intensidad en los meses correspondientes a la temporada de secas. La surgencia yucateca es una surgencia topográfica que se da por interacción de la corriente de Yucatán con el borde del talud continental, a diferencia de las surgencias por viento ocurridas en los bordes oceánicos orientales, como la región de California-Baja California y Perú-Chile (Reyes-Mendoza et al. 2015). Los vientos alisios juegan un papel secundario advectando estas aguas a lo largo de la costa hasta la costa de Campeche; a 500 km de distancia de la zona de surgimiento de las aguas caribeñas (Reyes-Mendoza et al. 2015, Kurczyn et al. 2021).



Vientos Nortes

En la Península de Yucatán, entre octubre y marzo, se presentan frentes fríos que influyen en la costa, generando vientos conocidos localmente como Nortes (Ortegón-Aznar y Ávila-Mosqueda 2020). De manera general, los Nortes son frentes fríos intrusivos anticiclónicos asociados a sistemas de alta presión formados en el territorio montañoso de Estados Unidos (latitudes medias) (Schultz et al. 1997, Appendini et al. 2018). De otoño a primavera, en Sisal se presentan los Nortes, los cuales forman un gradiente notorio de temperatura al interactuar con las temperaturas más cálidas del GM (Garza-Pérez e Ize-Lema 2017). Estos vientos se caracterizan por presentar velocidades superiores a los 36 km/h (Romero-Arteaga et al. 2022) y duración superior a 24 horas (Appendini et al. 2013, Garza-Pérez e Ize-Lema 2017).

VII. Metodología

Modelo de dispersión de partículas lagrangianas

Para modelar la dispersión de partículas virtuales, se implementó el modelo lagrangiano bi-dimensional SimLaTS (Simple Lagrangian Trajectory Simulator), el cual estima el transporte lagrangiano de partículas sembradas virtualmente utilizando velocidades superficiales del océano (Kurczyn et al. Unpublished). En este modelo se colocaron partículas virtuales dentro del área de estudio (Fig. 3) y se forzó con base en: (1) los campos de corrientes superficiales descargados de HYCOM, los cuales tienen incluidos la marea y la influencia del esfuerzo del viento, y (2) una pequeña



contribución aleatoria que representa a la difusión turbulenta (Smagorinsky 1963; Visser 1997). La posición de las partículas se calcula usando las siguientes fórmulas:

$$X(t + dt) = X(t) + X_a(t) + R_x \sqrt{6A_h dt} \quad (1)$$

$$Y(t + dt) = Y(t) + Y_a(t) + R_y \sqrt{6A_h dt} \quad (2)$$

donde $X(t)$ y $Y(t)$ son las posiciones de las partículas en la dirección zonal y meridional, respectivamente; $X_a(t)$ y $Y_a(t)$ son los desplazamientos advectivos obtenidos al despejar el campo de velocidad en el tiempo t ; R_x y R_y son variables aleatorias uniformes con media = 0 y valores que varían entre 0 y 1; dt es el intervalo de tiempo de las velocidades (periodo de muestreo); $X(t + dt)$ y $Y(t + dt)$ son las posiciones finales después de considerar la suma de todas las contribuciones.

Los coeficientes de difusividad horizontal (A_h) se describen considerando el campo de velocidad superficial, y usando la fórmula propuesta por Smagorinsky (1963):

$$A_h = \gamma dx^2 \sqrt{u_x^2 + v_y^2 + \frac{1}{2}(u_y + v_x)^2}$$

donde A_h es el coeficiente de difusividad (en $\frac{m^2}{s}$); $\gamma = 0.1$ es el coeficiente de Smagorinsky; dx es el tamaño de la malla de velocidades en metros; u_x , u_y , v_x y v_y son las derivadas espaciales de las componentes horizontales de la velocidad u y v en la dirección x y y , respectivamente.



Posición inicial de partículas

Para estimar el transporte de partículas, se colocaron 5 partículas por sitio punto de malla en las regiones que comprenden los 6 polígonos planteados. El carácter caótico de las trayectorias y los pequeños errores que pueden surgir a partir de la interpolación de las velocidades a la posición de las partículas, se minimizan cuando se obtiene el transporte de un grupo de partículas, además esto refuerza los patrones de flujo descritos en las trayectorias lagrangianas (Visser 1997).

Se simularon las trayectorias de partículas partiendo de 6 posiciones centradas en 6 polígonos, “Progreso” In y Out, “Dzilam” In y Out, “Cuyo” In y Out, (Tabla I y Fig. 3). Los polígonos In se encuentran en el intervalo de profundidad de 0-40 m y los Out de 40-200 m, estas delimitaciones son en base a trabajos previos de caracterización de la plataforma de Yucatán como puede encontrarse en el trabajo de Ruiz-Castillo y colaboradores (2016). Las partículas fueron distribuidas en un radio de 25 km partiendo de las coordenadas centrales de los polígonos. Un séptimo polígono corresponde a la costa frente a Sisal, al que cualitativamente se analiza la llegada de partículas.



Tabla I. Descripción de los polígonos y punto de partida de las partículas en cada uno.

Nombre	Coordenadas núcleo de partida dentro de cada polígono		Localización	Color de las partículas en las simulaciones
Sisal (PS)	-89.95661	21.1992	Sisal	-
Progreso In (PB)	-89.3825	21.7286	< 40 m de profundidad	Rojo
Dzilam In (PD)	-88.7168	21.9039		Negro
Cuyo In (PF)	-87.9335	21.9696		Amarillo
Progreso Out (PC)	-89.5005	22.5487	> 40 m de profundidad	Azul
Dzilam Out (PE)	-88.7199	22.8915		Verde
Cuyo Out (PG)	-87.9303	22.9396		Naranja

Forzante del modelo

Las trayectorias de las partículas se simularon utilizando las ecuaciones 1 y 2 que dependen de campos de velocidades superficiales obtenidos del modelo Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) más un factor de difusividad añadido por SimLaTS. HYCOM toma como forzantes la marea astronómica y el esfuerzo del viento de superficie para estimar el campo horario de corrientes (Magar et al. 2020) en una malla con una resolución de $1/25^\circ$ (~ 4.4 km). Asimismo, requiere de forzantes atmosféricas y climatológicas oceánicas, condiciones iniciales y de frontera (forzantes diarias). La temperatura es producto de climatologías mensuales del WOA-Levitus (World Ocean Atlas), las forzantes en atmósfera provienen del modelo WRF (Weather Research and Forecasting) que incluye 10 variables (incluido el esfuerzo del viento en ambas componentes) con salidas horarias (González-Santamaría et al. 2018).



El factor de difusividad se incluye a través de una variable aleatoria que permite que el movimiento de dicha partícula presente mayor dinamismo para buscar simular fielmente el desplazamiento que tendría una partícula real. Las partículas se simularon como trazadores pasivos que presentan cambios de posición y no cuentan con forzantes propios que le brinden alguna tendencia de movimiento.

Simulaciones de escenarios durante eventos Nortes

Se analizó la dispersión de partículas durante los rangos de tiempo de 8 eventos de Nortes reportados por el Sistema Meteorológico Nacional (2023) y Kurczyn (2020) de 2019 a 2022 (Tabla II). Se caracterizaron los eventos como 'Nortes muy fuertes' a los que presentaron vientos con velocidades máximas en el intervalo de 62-88 km/h; 'Nortes fuertes' a los que presentaron mínimo una velocidad máxima de viento dentro del rango de 39-61 km/h y 'Nortes moderados' a los que presentaron mínimo una velocidad máxima de viento dentro del rango de 20-38 km/h; siguiendo la clasificación que plantea el Sistema Meteorológico Nacional (2023). Se revisaron los datos de la Estación Meteorológica de Sisal ubicada en 21°9'52" N y 90°2'54" W, provenientes de la Red Universitaria de Observadores Atmosféricos (<https://www.ruoa.unam.mx/>), para identificar las velocidades máximas de viento durante los periodos de Nortes.



Tabla II. Eventos nortes usados en las simulaciones.

#	Mes	Fecha de inicio	Fecha final	Duración (días)	Velocidad máxima (VM) de viento registrada (km/hora)	Clasificación de "Norte" en base a la VM de viento	Clasificación en este trabajo
1	Febrero	25/02/2020	28/02/2020	4	70.52	Muy fuerte	Intenso
2	Enero	23/01/2019	27/01/2019	5	65.12	Muy fuerte	
3	Diciembre	20/12/2022	26/12/2022	7	62.31	Muy fuerte	
4	Septiembre - Octubre	28/09/2020	4/10/2020	7	61.77	Fuerte	Fuerte
5	Marzo	14/03/2019	19/03/2019	6	43.86	Fuerte	
6	Noviembre	11/11/2022	22/11/2022	12	43.85	Fuerte	
7	Noviembre	22/11/2021	29/11/2021	8	36.21	Moderado	Moderado
8	Febrero	11/02/2021	20/02/2021	10	S/D	-	

Fuente: Kurczyn (2020), RUOA (2023) y SMN (2023).

Los eventos se eligieron con base en la disponibilidad de descarga de datos de HYCOM, principalmente. El rango temporal de las simulaciones es de octubre a marzo (temporada de nortes) y la duración de los eventos considerados fue dentro del rango de 4 a los 12 días.

Cada simulación contempla 4 días de datos horarios de HYCOM, siendo que un evento de 4 días solo tiene 1 simulación. Los eventos superiores a 4 días (de 5 a 12), presentan un mínimo de 2 simulaciones ya que estas son consecutivas, es decir, se realizan a partir del día después de la primera simulación.



En la Tabla III se observa el ejemplo del número de simulaciones realizadas para un evento de 9 días de duración. Esta metodología se implementó basándose en la confiabilidad de los resultados al realizar las simulaciones en repetidas ocasiones dentro de un periodo establecido (*Norte*) con una duración mínima de 4 días, pronosticando resultados similares para las simulaciones correspondientes a un mismo periodo.

Tabla III. Ejemplo de las simulaciones realizadas para un evento contemplado de Norte con duración de 9 días.

Días del evento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1era simulación	■								
2da simulación		■							
3ra simulación			■						
4ta simulación				■					
5ta simulación					■				
6ta simulación						■			

Por otro lado, el conjunto de partículas sembradas para cada simulación fue el mismo y en algunos casos, al transcurrir más de 48 horas las partículas se volvieron a posicionar en la posición inicial; no alterando los resultados finales dado que no se realizó un análisis cuantitativo. El recolocamiento de partículas a su posición inicial dentro de una simulación agrega una interacción continua de las partículas al tener un factor dinámico que en un escenario real, pudiera presentarse (ej. adición de macroalgas a los polígonos de estudio por desprendimiento).



Análisis de trayectorias: matriz de conectividad

Para cada evento de Norte se simularon las trayectorias de partículas partiendo de 6 posiciones radiales iniciales dentro de seis polígonos: “Progreso” In y Out, “Dzilam” In y Out, “Cuyo” In y Out (Tabla I y Fig. 3). Las partículas fueron distribuidas en un radio de 25 km partiendo de las coordenadas centrales de los polígonos. Un séptimo polígono corresponde a la costa frente a Sisal. Del conjunto de simulaciones se obtuvo la matriz de conectividad, que expresa con gráficos la intensidad (porcentaje) de partículas que salen de cada uno de los 6 polígonos y su aportación de partículas entre sí y al Polígono Sisal. Esta matriz considera el total de partículas sembradas en cada polígono y cuantifica la proporción del total de partículas que llegan a los demás polígonos. Para este trabajo sólo se consideró la matriz de conectividad como un valor cualitativo, con el objetivo de identificar cuáles polígonos y con qué regularidad aportaron partículas al Polígono Sisal.

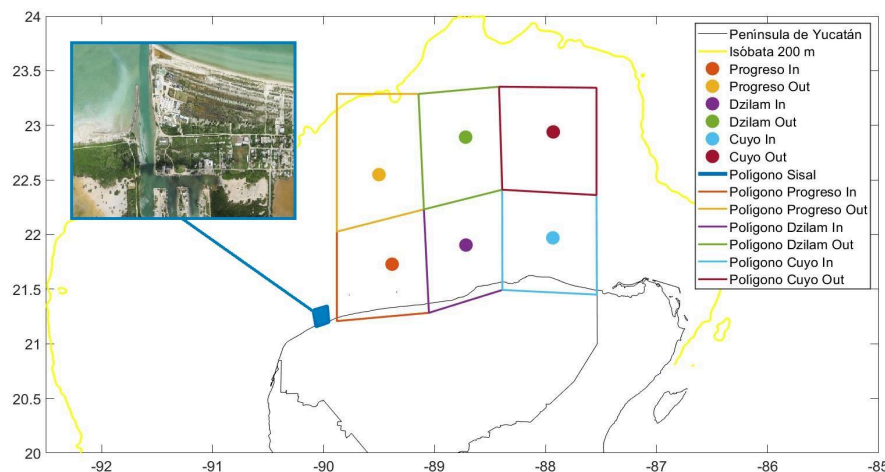


Figura 3. Sitio de partida de las partículas (6 prototipos de polígonos ideales) y el polígono que representa a la costa de Sisal (sitio de llegada). Fotografía aérea del Puerto de Sisal tomada de Garza-Pérez e Ize-Lema (2017).

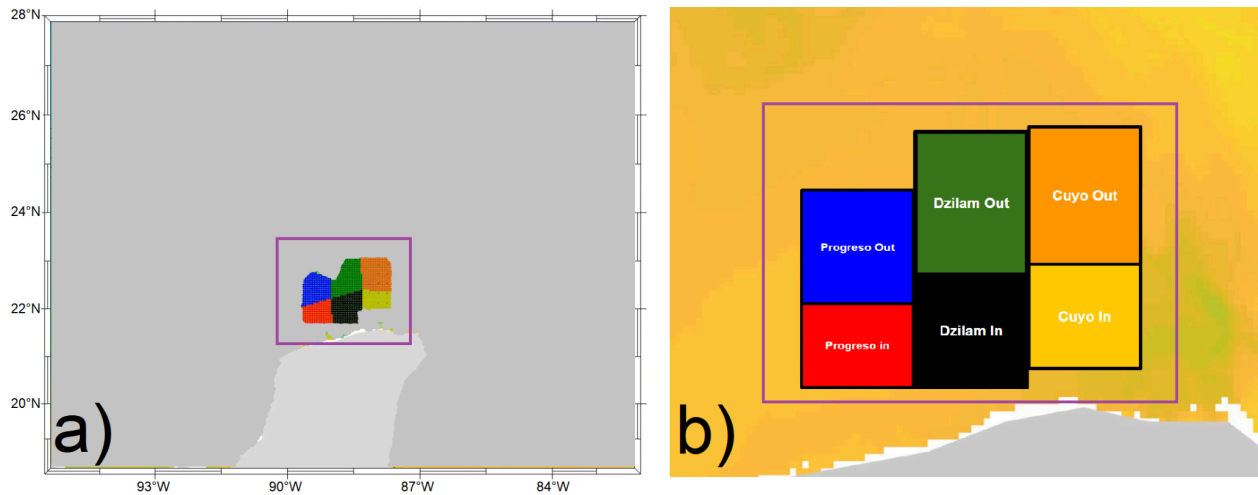


Figura 4 (a y b). a. Posición inicial de las partículas sembradas en cada polígono (cobertura real). b. Aproximación del área de cobertura de las partículas sembradas.

Contraste entre datos de HYCOM y observaciones in situ

Se obtuvieron datos horarios de corrientes y oleaje, usando un perfilador acústico Doppler de corrientes (ADCP) instalado a 11 m de profundidad y localizado a 10 km de la costa de Sisal, Yucatán ($21^{\circ}16'31''$ N, $90^{\circ}3'6''$ O) (Figura 1). Estos datos se usaron para contrastar los datos de velocidad superficial de HYCOM vs. las velocidades más superficiales del ADCP (registradas a 2 m de profundidad).

Un análisis de correlación de Pearson se realizó para comparar el componente dominante de la velocidad (u) entre ambos grupos de datos. El proceso para comparar los datos de HYCOM fue encontrar el punto de malla del modelo HYCOM más cercano a la posición del ADCP. Las correlaciones (encontradas en Anexos) demuestran que los datos horarios de HYCOM en la región del perfilador no son significativos, por lo que los resultados de corrientes de HYCOM deben considerarse con cautela en la región del ADCP.



VIII. Resultados

A continuación, se presentan resultados de las simulaciones de trayectorias de partículas durante periodos de Nortes. Para cada simulación se muestran dos tiempos: 24 y 48 horas. Las coloraciones presentes (Tabla I) son alusivas al polígono de origen de las partículas y la paleta de color, representa valores de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) superficial del agua durante el periodo de simulación.

Los resultados se reportan divididos en secciones correspondientes al tipo de Norte. Primero, los resultados durante periodos de Nortes “intensos” donde se presentan las trayectorias simuladas durante tres eventos de Norte con una intensidad de vientos mayores a 62 km/h. Después, se muestran resultados de las trayectorias simuladas para tres eventos de Norte “fuerte” que consisten en vientos con una intensidad mayor a 43 km/h. Por último, se reportó un evento de Norte “moderado” con vientos reportados con una intensidad de 36.21 km/h. Se menciona además un evento sin clasificación debido a la falta de datos.

Evento Norte “intenso”

El primer evento bajo condiciones de Norte intenso duró 4 días, del 25 al 28 de febrero de 2020 (Fig. 5). Durante las primeras 24 h (Fig. 5a), las partículas mostraron una trayectoria hacia el Norte siendo influenciado su movimiento por un remolino ciclónico. A las 48 h de simulación (Fig. 5b), una gran proporción de partículas, principalmente del Polígono Cuyo Out (color naranja) siguió su trayectoria hacia el Este, mientras que partículas de los Polígonos Progreso In (color rojo), Progreso Out



(color azul) y Dzilam In (color negro), se dirigieron al Suroeste donde se tuvo llegada de partículas al Puerto de Sisal (Tabla IV). Las partículas mostraron una trayectoria que describió un remolino anticiclónico durante las primeras 24 h influenciado por una recirculación frente a la península de Yucatán entre los 23° y 27°N. A las 48 horas transcurridas de simulación, la trayectoria cambió hacia el Noroeste. También se visualiza una disminución de temperatura en el remolino mencionado y una aglomeración de las partículas cerca de Puerto Rico. Además, durante este periodo la temperatura superficial muestra una variación entre los 20 y 30°C en el territorio donde las partículas circulan. Esto puede deberse a que las temperaturas más cálidas presentes al costado este de la Península de Yucatán (Corriente de Yucatán) entran en mezcla con temperaturas menos cálidas formando remolinos que también son visibles en las rutas de dispersión de las partículas.

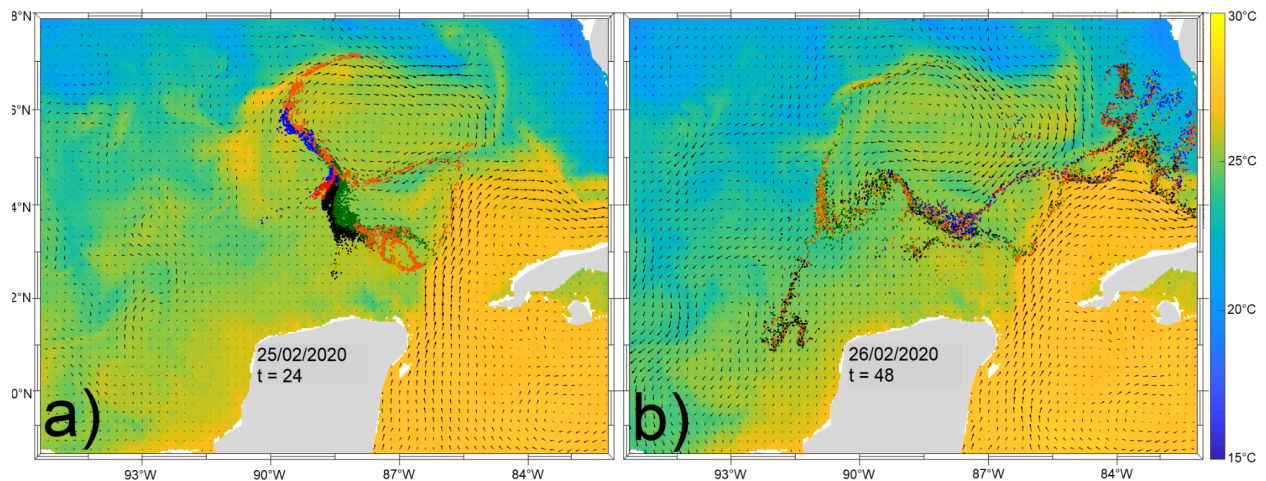


Figura 5 (a y b). Simulación realizada en el periodo del 25 al 28 de febrero de 2020 (una simulación de trayectoria). **Nota:** Cada par de imágenes horizontales representa una captura de la hora 24 y hora 48 de una simulación de cuatro días.



El segundo *Norte intenso* tuvo una duración de 5 días, del 23 al 27 de enero de 2019, por lo tanto, se realizaron dos simulaciones (Fig. 6). En la primera simulación (23-26 de enero) las partículas sembradas en los polígonos Progreso Out y Cuyo Out siguieron trayectoria influenciada por dos remolinos (localizados entre los 23° y 27°N): anticiclónico y ciclónico, respectivamente. Transcurridas las primeras 24 h, hubo llegada de partículas a la Costa Norte de Yucatán (Fig. 6b). En su mayoría, las partículas naranjas se disiparon hacia el Noroeste y para la segunda simulación (24-27 de enero) (Fig. 6c), los polígonos Progreso In, Dzilam In y Cuyo Out aportaron la mayor cantidad de partículas al Polígono de Sisal. Después de 48 h (Fig. 6d), las partículas que arribaron al Polígono de Sisal migraron hacia el Oeste siguiendo la línea de costa y en algunos casos arribaron a la costa de Campeche.

En cuanto a la temperatura superficial para este evento, se aprecian claramente dos regiones: una entre los 26 y 30° C y la otra, entre los 21 y 25°C. La región más cálida la comprende la Corriente de Yucatán, que se disipa y pierde calor al entrar en contacto con la Corriente de Lazo. Por otro lado, la región menos cálida presenta los valores más altos en cercanía al Golfo de México.

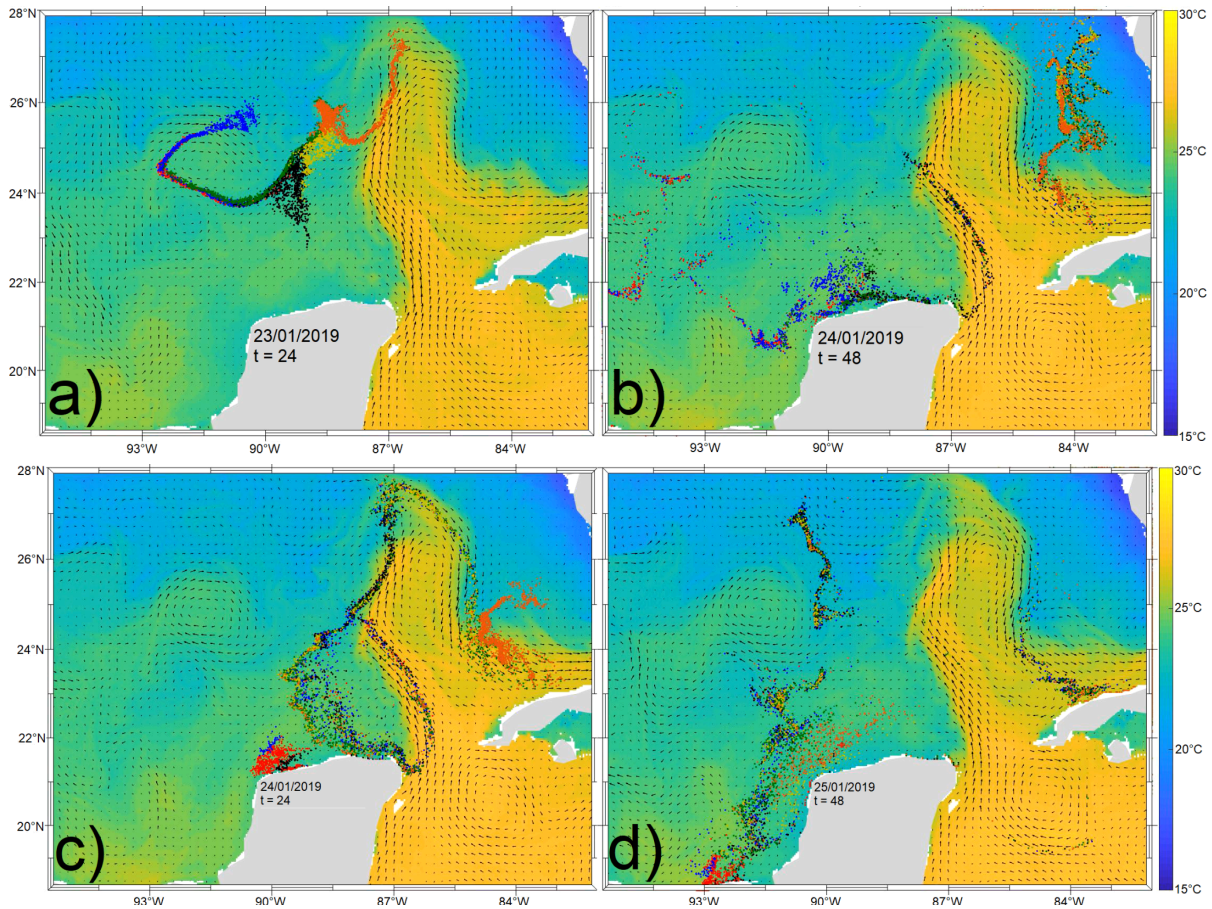


Figura 6 (a-d). Simulaciones realizadas en el periodo del 23 al 27 de enero de 2019 (dos simulaciones de trayectorias).



El tercer evento de *Norte intenso* (Fig. 7) tuvo la mayor duración, 7 días, para esta categoría. En el primer par de simulaciones (20-23 y 21-24 de diciembre) (Fig. 7a, b, c y d), la tendencia de dirección de las partículas fue hacia el Noroeste (con sólo las partículas del Polígono Cuyo Out dirigiéndose al Norte). Para la tercera simulación (22-25 de diciembre) (Fig. 7e y f), las partículas mostraron una mayor dispersión en el mismo rango de tiempo (24 y 48 h). En la última simulación (23-26 de diciembre) (Fig. 7g y h), durante el cuarto día del evento, se observó la llegada de partículas a la costa en el Polígono Sisal y posteriormente, las partículas ingresaron al Golfo de México.

La temperatura superficial en las primeras tres simulaciones fue más cálida respecto a la última. Se observa que la superficie por la cual se dispersaron las partículas coincide con los valores más altos de temperatura.

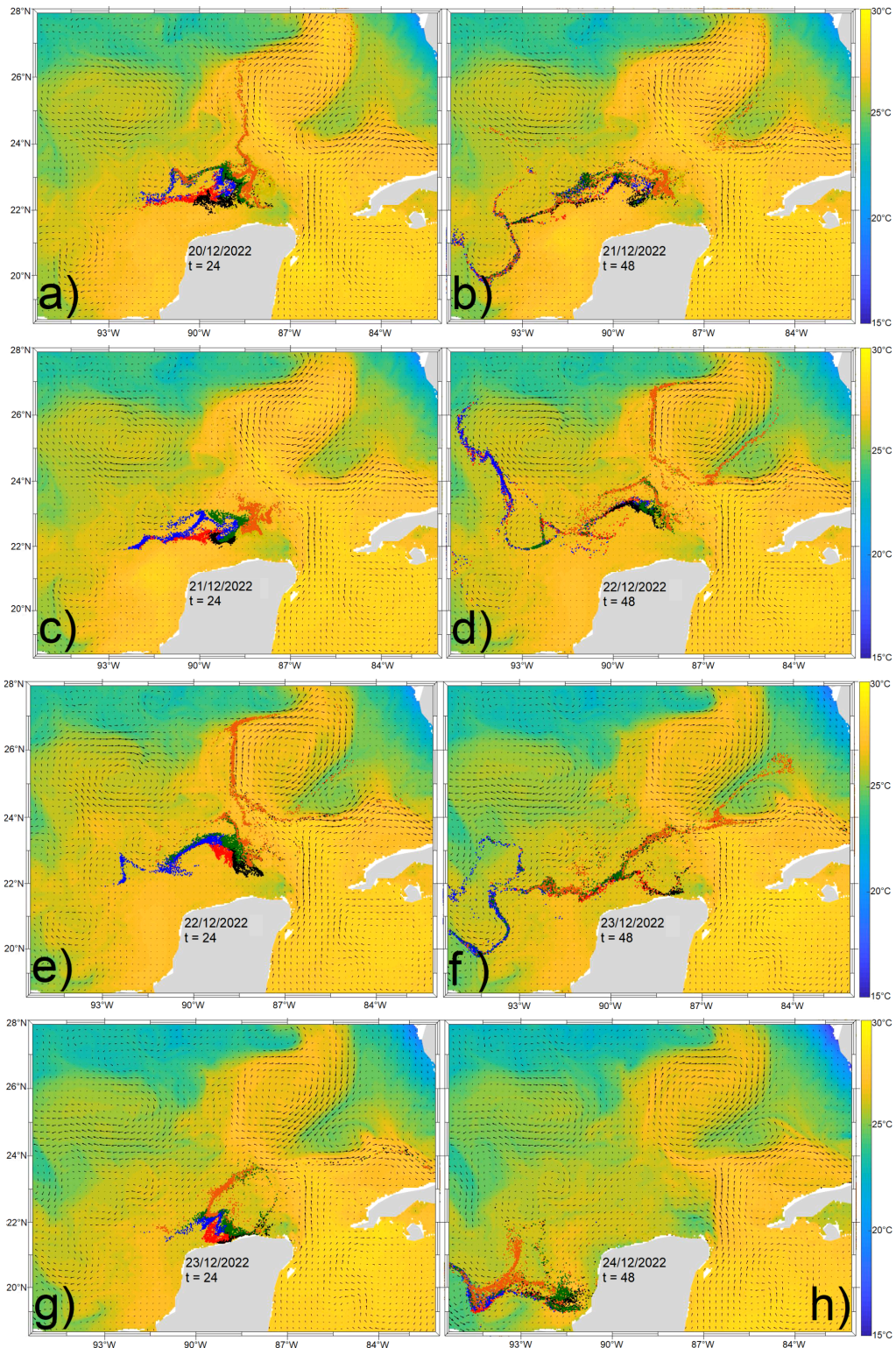


Figura 7 (a-h). Simulaciones realizadas en el periodo del 20 al 26 de diciembre de 2022 (cuatro simulaciones de trayectorias).



Evento Norte “fuerte”

El primer evento catalogado como *Norte fuerte* (Fig. 8) duró 7 días, del 28 de septiembre al 4 de octubre del 2020. Se registró el segundo mayor aporte de un polígono al Polígono Sisal (Tabla IV), siendo Dzilam In quien aportó una mayor cantidad de partículas, seguido por los polígonos Progreso In, Progreso Out y Dzilam Out (color verde), donde los polígonos dentro de la isóbata de 40 m fueron los que más aportaron partículas al Polígono Sisal. En la primera simulación (28-31 de septiembre) (Fig. 8a), las partículas en los polígonos más orientales mostraron una trayectoria hacia el Norte, después de 48 h (Fig. 8b) la trayectoria se modificó hacia el suroeste; transitando cerca del Polígono Sisal. Para la segunda simulación (29 de septiembre al 1 de octubre) (Fig. 8b y c), las partículas se agruparon en la línea de costa e ingresaron al Golfo de México. Finalmente, en la tercera simulación (30 de septiembre al 2 de octubre) (Fig. 8d y e) ingresaron partículas de los Polígonos Progreso In, Dzilam In y Progreso Out al Polígono Sisal, posteriormente (31 de septiembre al 3 de octubre y 1-4 de octubre) se dispersaron siguiendo remolinos locales.

Respecto a la temperatura superficial, en este evento se presentaron los valores más altos identificados respecto al total de eventos, alcanzando los 30°C. Se aprecia en todas las simulaciones casi una homogeneidad total en el espacio por el cuál transitaron las partículas sembradas.

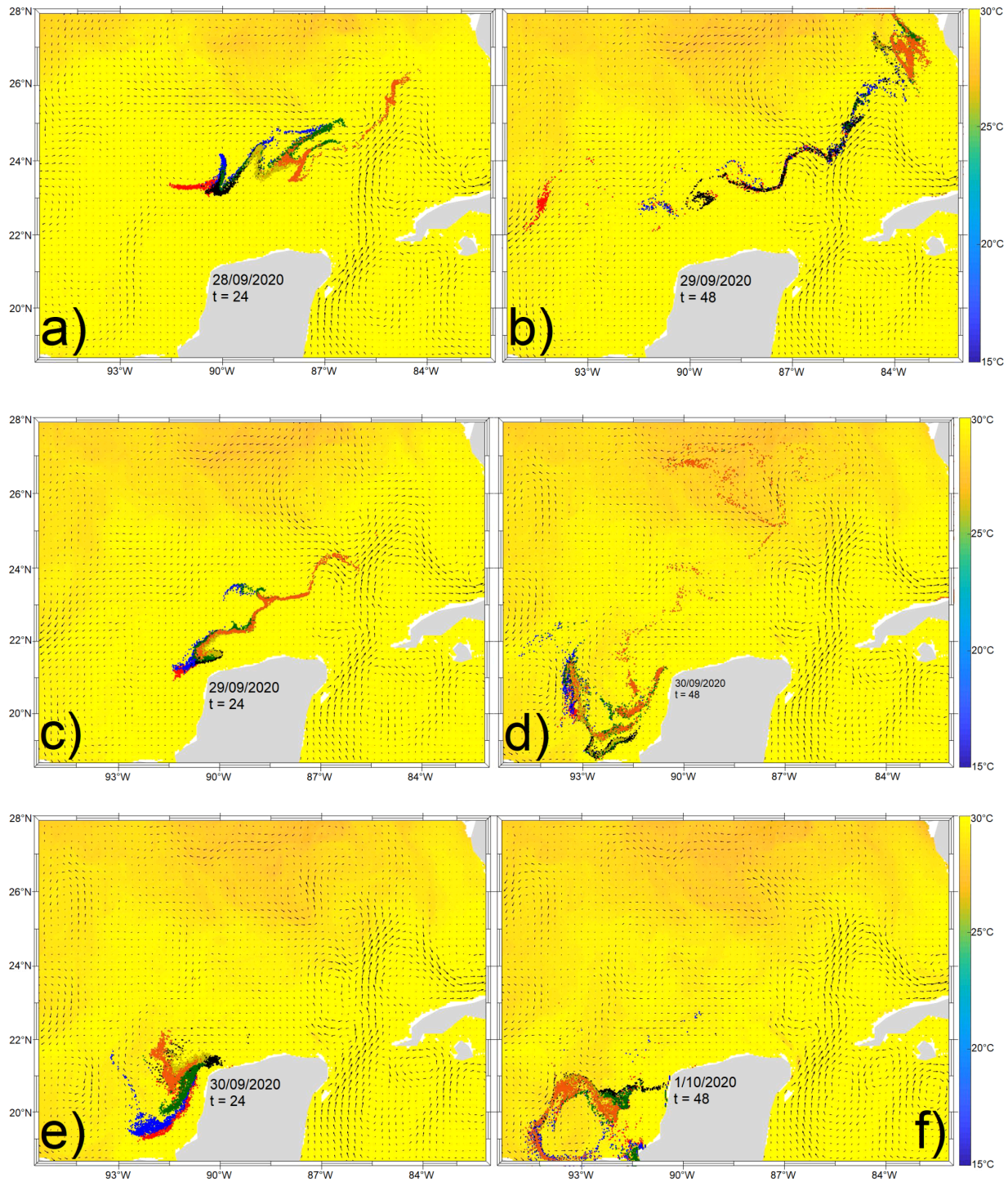


Figura 8 (a-f). Simulaciones realizadas en el periodo del 28 de septiembre al 4 de octubre de 2020 (tres de cuatro simulaciones de trayectorias).



El evento de marzo 2019 no aportó partículas al Polígono de Sisal y la tendencia de dispersión primero fue hacia el Norte (Fig. 9a y b) y después hacia el Suroeste (Fig. 9c, d, e y f). Las partículas de los polígonos Progreso In, Progreso Out y Dzilam In, siguieron una trayectoria hacia el Golfo de México. Mientras que las partículas de los polígonos Cuyo In, Dzilam Out y Cuyo Out, se movieron hacia el Norte.

A las 48 h de la tercera simulación (16-19 de marzo) (Fig. 9e y f), las partículas se encontraron distribuidas de forma irregular, con mayores concentraciones de partículas en presencia de remolinos. También, puede apreciarse una distribución superficial más cálida a comparación del evento del mes de enero para ese año (Fig. 6).

Aquí la temperatura superficial se mostró más cálida respecto al evento de enero para ese mismo año (Fig. 6), definiéndose más pobremente la Corriente de Yucatán.

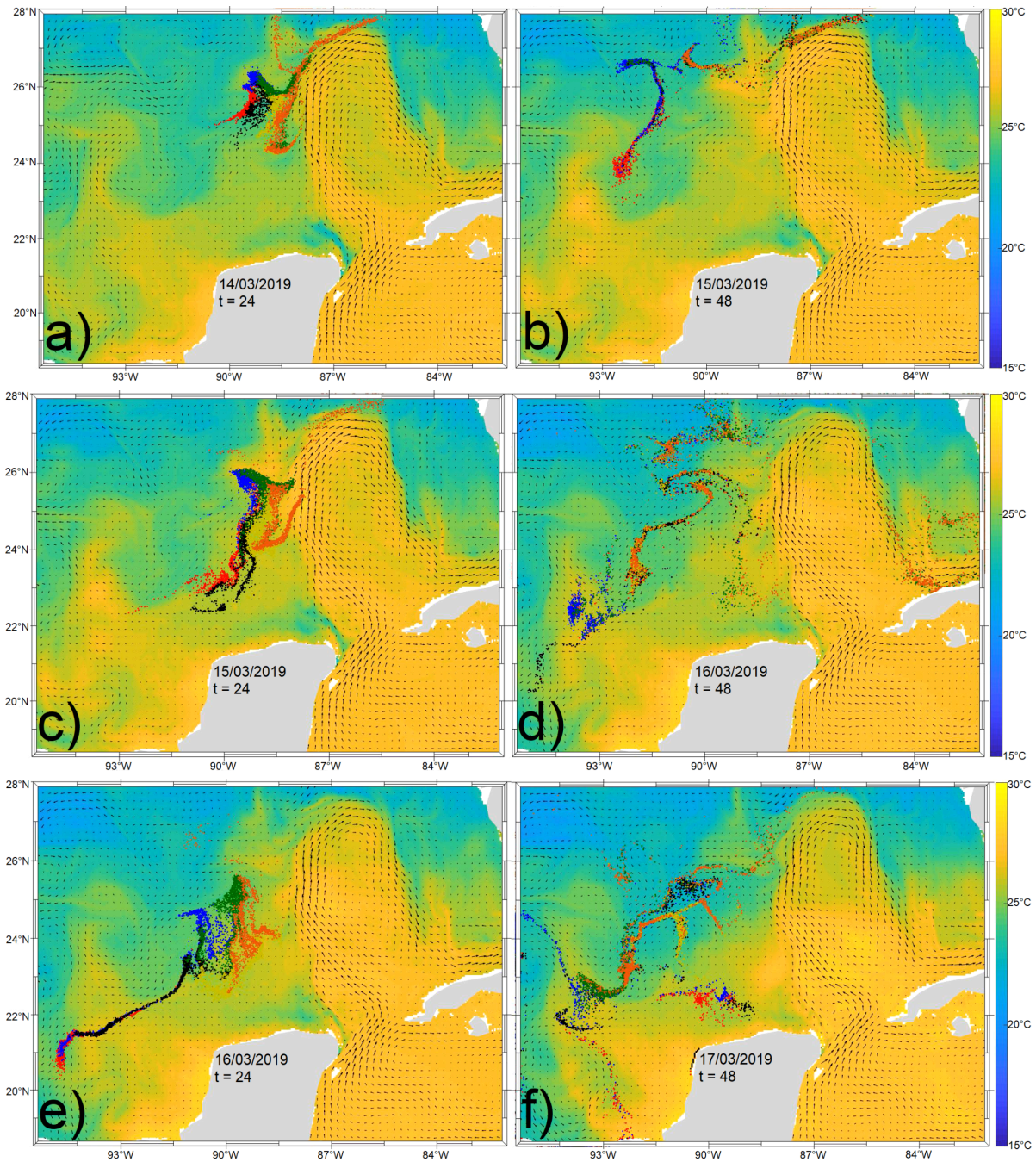
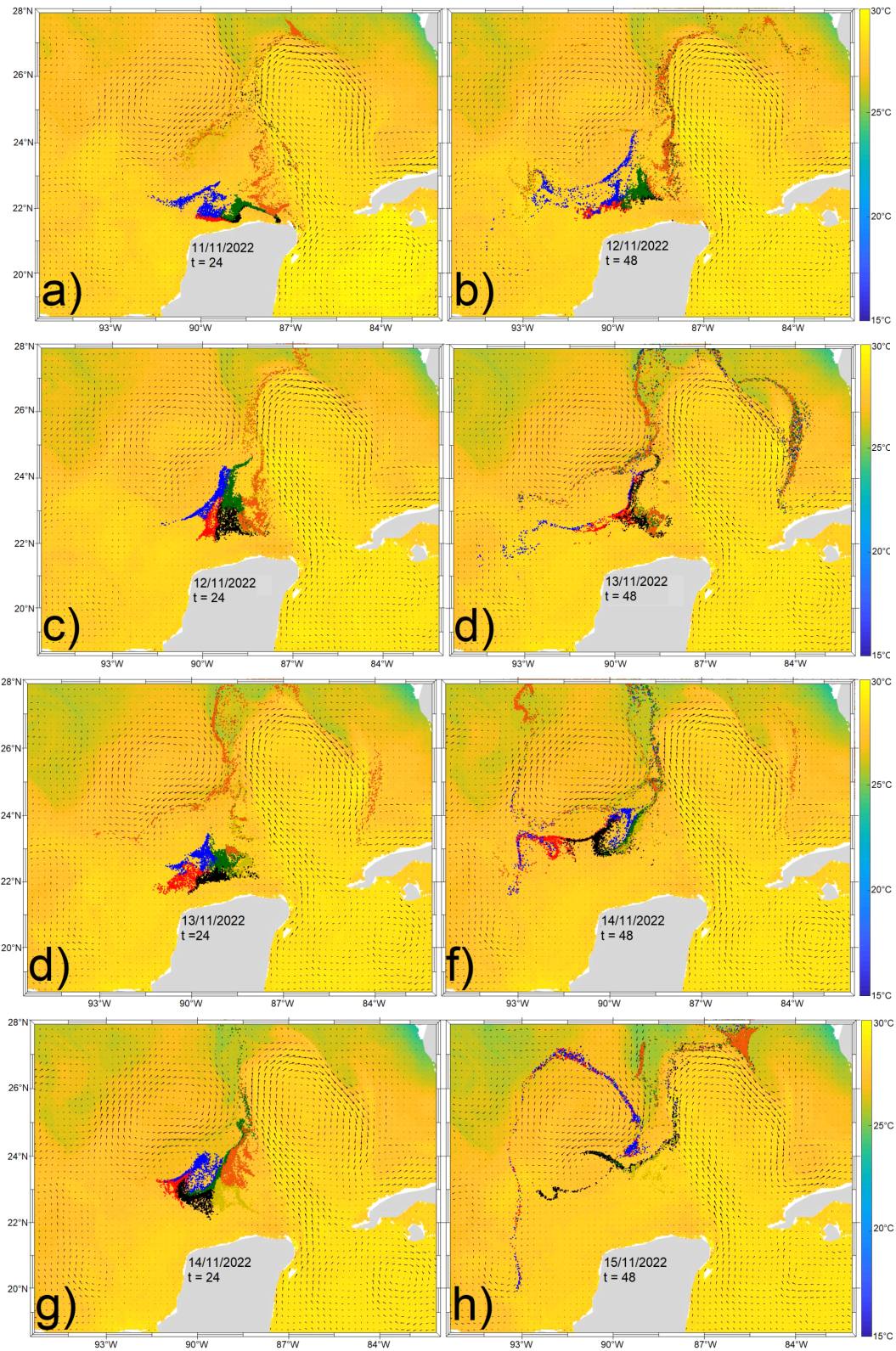


Figura 9 (a-f). Simulaciones realizadas en el periodo del 14 al 19 de marzo de 2019 (tres simulaciones de trayectorias).



El tercer evento registrado como un *Norte fuerte* del 11 al 22 de noviembre de 2022. La primera simulación (11-14 de noviembre) mostró una trayectoria de partículas hacia el Norte con una componente este, influenciada por corrientes en dirección horaria que distribuyeron las partículas hacia dentro del Caribe (Fig. 10a y b). Para la segunda simulación (12-15 de noviembre) (Fig. 10c y d), las partículas se agruparon en la región central del acomodo de polígonos y su movimiento fue hacia el Norte siguiendo la Corriente de Yucatán. En la tercera simulación (13-16 de noviembre) (Fig. 10e y f), las partículas no mostraron un cambio de posición significativa a excepción de las partículas del Cuyo Out que mostraron una trayectoria hacia el Noreste. En la cuarta (14-17 de noviembre) y quinta simulación (15-18 de noviembre) (Fig. 10d y e), las partículas se dividieron en dos grupos. Teniendo que cada grupo se transportó por la influencia de dos remolinos anticiclónicos. A partir de la sexta simulación (del 16-18, 17-19, 18-20, 18-21 y 19-22 de noviembre) (Fig. 10f, g y h) el movimiento de las partículas fue en dirección noroeste con segmentos dirigidos hacia dentro del Golfo de México. En todas las simulación hubo una ausencia de arribo de partículas al Polígono Sisal.

La temperatura superficial se mostró más cálida comparada al evento de diciembre para ese mismo año (Fig. 7). Donde las temperaturas menos cálidas se presentaron al final del evento y se apreciaron también, dos remolinos definidos por temperatura y el campo de velocidades.



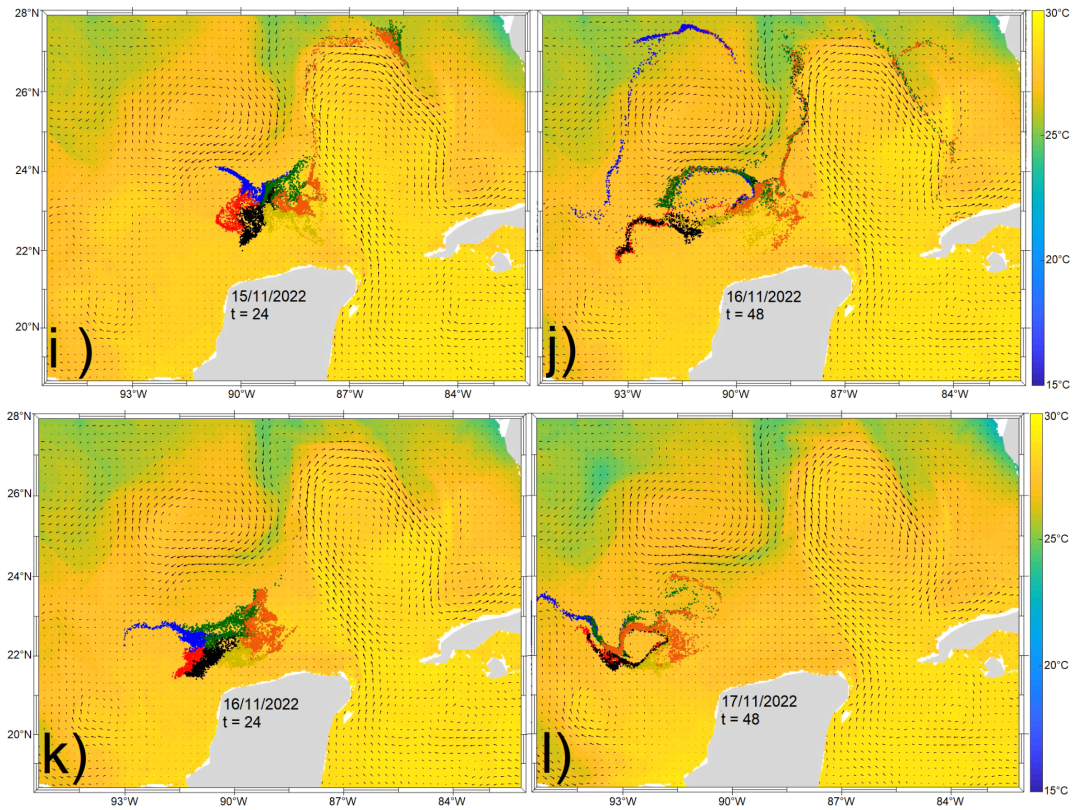


Figura 10 (a-l). Simulaciones realizadas en el periodo del 11 al 22 de noviembre de 2022 (seis de nuevas simulaciones de trayectorias).



Evento Norte “moderado”

Se realizaron siete simulaciones para el evento de la categoría de *Norte moderado* que fué del 22 al 29 de noviembre de 2021, y se registró la llegada de partículas al Polígono Sisal en todas las simulaciones. Entre las 24 y 48 h de la primera simulación (22-25 de noviembre) (Fig. 11a y b), las partículas llegaron a la costa y al Polígono Sisal. Siendo que posterior a su llegada a la costa, ingresaron al Golfo de México. En el resto de las simulaciones (23-26, 24-27, 25-28 y 26-29 de diciembre), la trayectoria de las partículas tendió al Noroeste con una aportación limitada al Golfo de México.

Durante este evento la temperatura superficial presentó valores más elevados respecto al evento de febrero de ese mismo año (Fig. 12). Las temperaturas más cálidas se presentaron en la costa este de la Península de Yucatán y para la costa norte, se aprecian regiones menos cálidas cercanas a los 25°C.

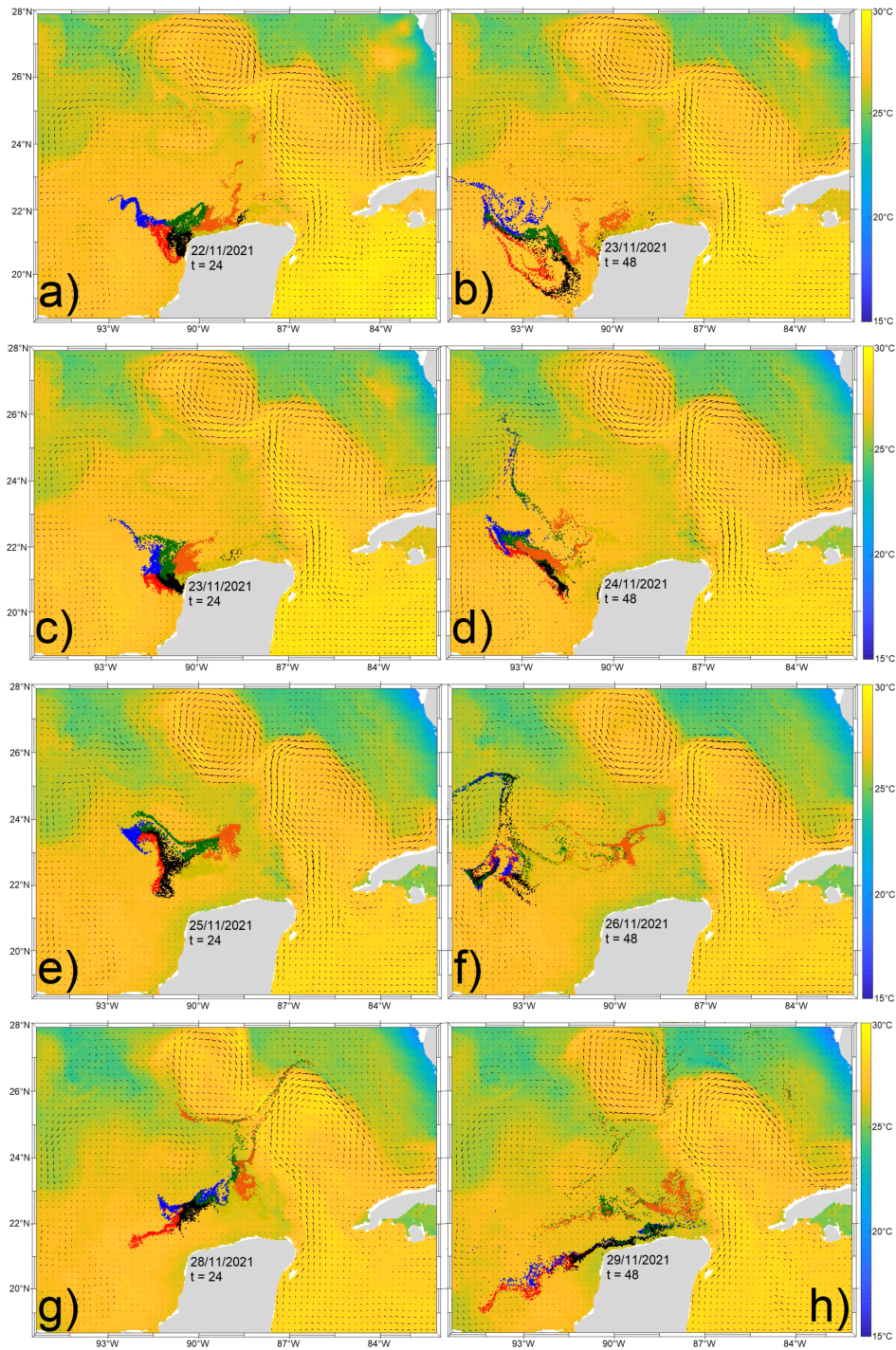


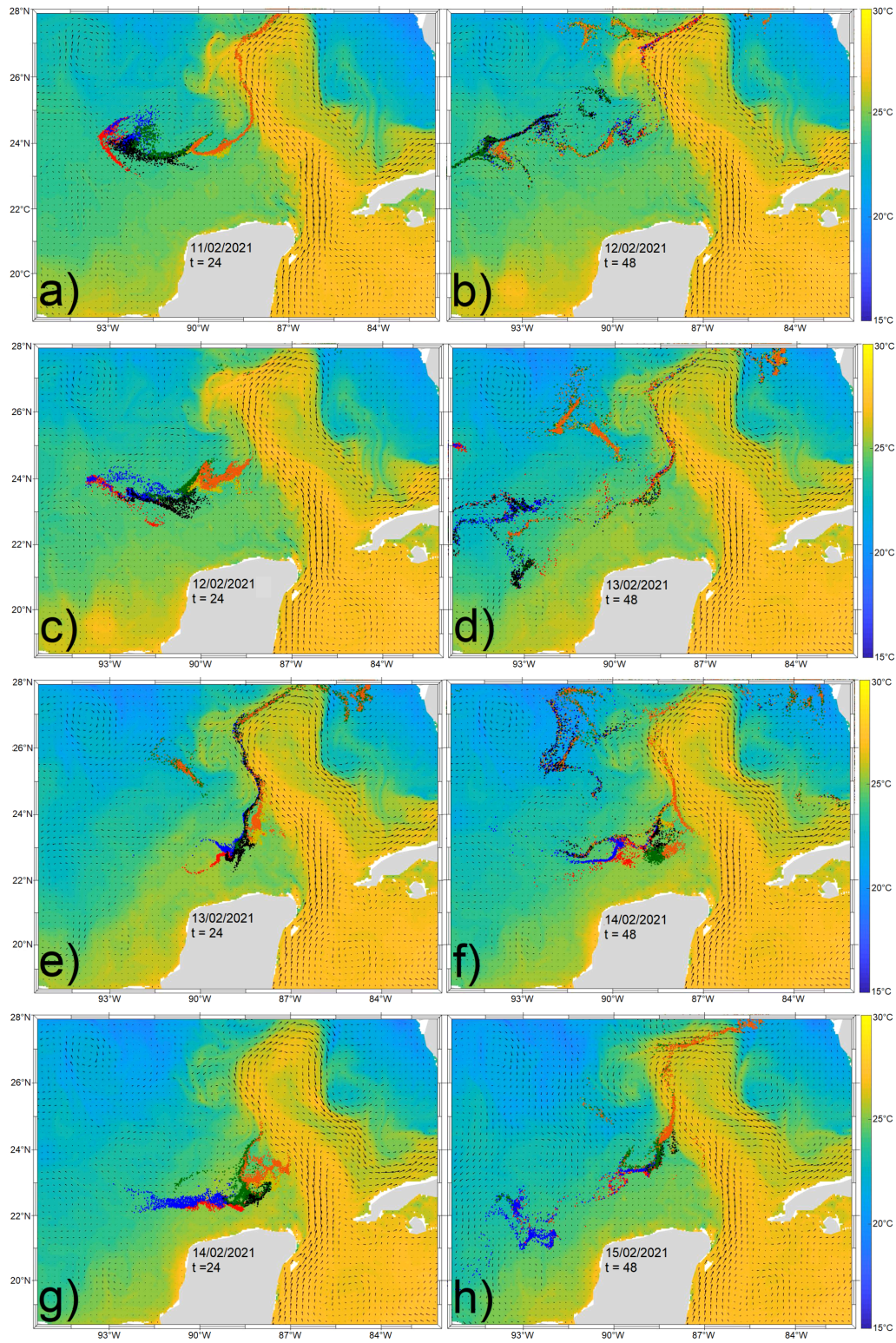
Figura 11 (a-h). Simulaciones realizadas en el periodo del 22 al 29 de noviembre de 2021 (cuatro de siete simulaciones de trayectorias).



Norte sin clasificar

El último evento de Norte fue del 11 al 20 de febrero de 2021, sin categoría (debido a la falta de datos de velocidad de viento de la RUOA para esas fechas), la dirección de las partículas en el primer par de simulaciones (11-14 y 12-15 de febrero) fue hacia el Oeste (Fig. 12 a, b, c y d). Mientras que en la tercera simulación (13-16 de febrero), cambió la dirección perdiendo el componente Oeste y dirigiéndose solo hacia el Norte. En la cuarta (14-17 de febrero) y quinta simulación (15-18 de febrero) la dirección de trayectoria cambió hacia el Oeste y en la penúltima (16-19 de febrero), las partículas se dirigieron hacia el Sur llegando a la costa y entrando al Polígono Sisal. Finalmente, en la última simulación (17-20 de febrero) las partículas se dirigieron hacia el Norte (Fig. 12 m y n).

Se definen dos regiones tomando como base la temperatura superficial. Siendo que la Corriente de Yucatán presenta los valores más altos ($\sim 30^{\circ}\text{C}$) durante todo el evento así como algunas zonas en la costa Oeste y Norte de la Península de Yucatán. El resto del territorio donde circularon las partículas, presentó temperaturas cercanas a los 20°C .



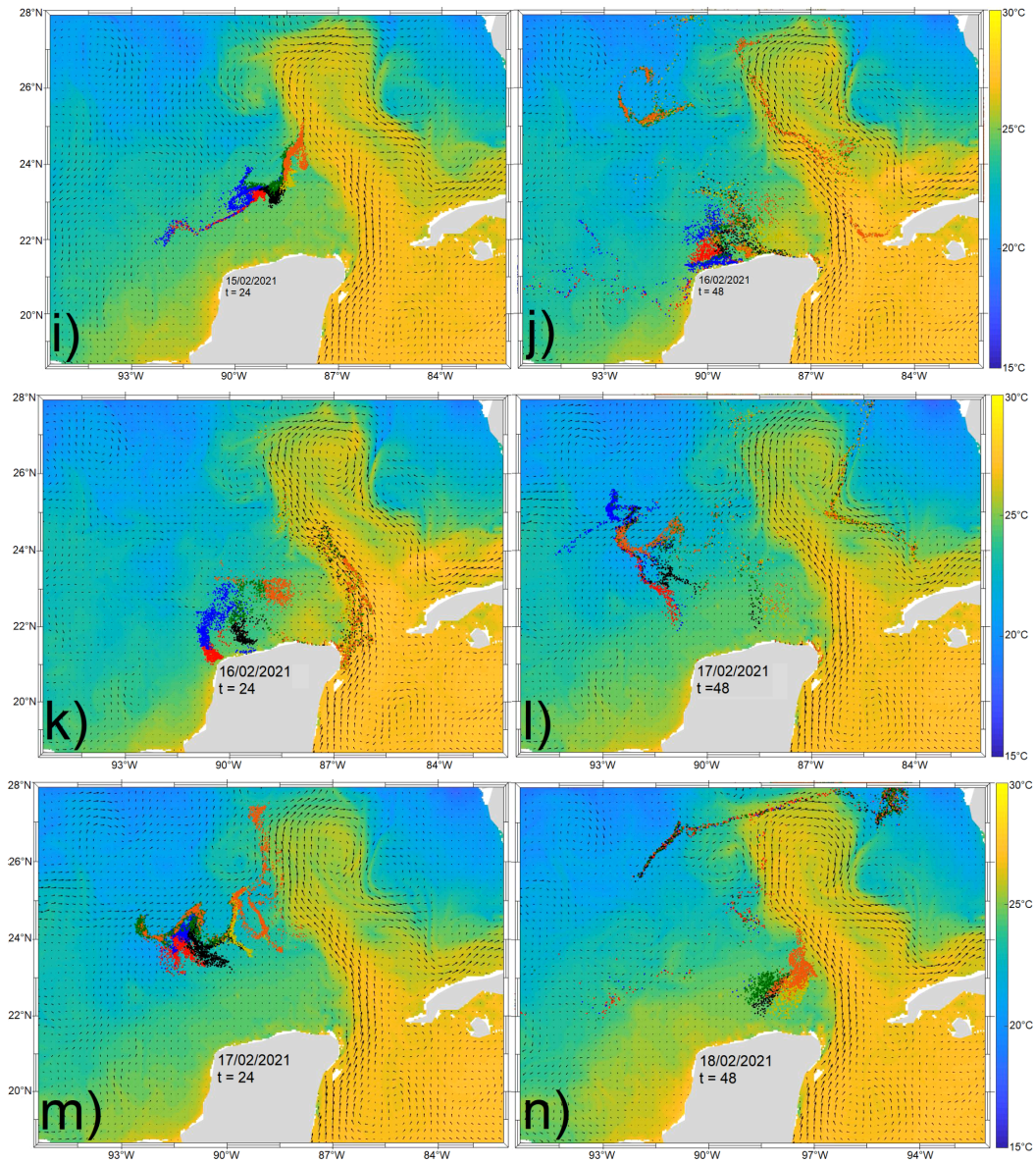


Figura 12 (a-n). Simulaciones realizadas en el periodo del 11 al 20 de febrero de 2021 (siete simulaciones de trayectorias).



Matriz de conectividad

Como resultado de cada simulación de trayectoria, SimLaTS generó un archivo que contiene la matriz de conectividad entre los polígonos. En este archivo se aprecia cualitativamente el aporte de partículas de cada polígono hacia sí mismo y hacia el resto de los polígonos.

Se analizó el aporte de los 6 polígonos hacia el polígono en el área de interés, Polígono Sisal, y se presentan los aportes en la Tabla IV. En la Tabla IV se considera como rojo al mayor aporte que recibió el polígono de Sisal y con azul fuerte, el mínimo aporte recibido. Además de la escala de colores, cabe resaltar que es más relevante para este trabajo el que haya habido aporte de partículas (lo cual sucedió en 6 de los 8 eventos) a la intensidad del aporte. En color blanco se señalan eventos donde el Polígono Sisal no recibió partículas.

El grupo de polígonos ubicados entre la costa y los 40 m de profundidad fueron los que aportaron una mayor cantidad de partículas al Polígono Sisal (Tabla IV). Particularmente, fueron los Polígonos Dzilam In y Cuyo In los que brindaron un mayor aporte de partículas.

Los polígonos Progreso Out, Dzilam Out y Cuyo Out también aportaron partículas pero son notoriamente más bajos sus aportes.



Tabla IV. Análisis cualitativo de la interacción de partículas con el Polígono Sisal. PB: Progreso In; PC: Progreso Out; PD: Dzilam In; PE: Dzilam Out; PF: Cuyo In; PG: Cuyo Out.

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> 1 0.8 0.45 0.27 0.13 0.1 0.07 0.05 0.027 0.013 </div>									
Evento Norte	Polígonos						Aporte de partículas al Polígono Sisal		
	< 40 m*			> 40 m*					
#	PB	PD	PF	PC	PE	PG			
1							NO		
2							SI		
3							SI		
4							SI		
5							SI		
6							NO		
7							SI		
8							SI		

*Profundidad de la plataforma en la que se encuentran situados los polígonos



Noticias locales de arribazón de sargazo en el Puerto de Sisal durante Nortes

Se realizó la búsqueda en Google Noticias de los periodos de cada Norte analizado para obtener evidencia del arribazón de Sargazo en el Puerto de Sisal. En la Tabla V se recopilan las fuentes que publicaron noticias referentes al arribo del sargazo y también se distinguen los eventos de Nortes analizados en los cuales se presentó el arribo de acuerdo al rango de días que duró.

Tabla V. Noticias de arribazón de sargazo al Puerto de Sisal.

Evento Norte	Fecha	Fecha de publicación de la noticia	Fuentes
4	28/09/2020 al 4/10/2020	5/10/2020	Por Esto!
3	20/12/2022 al 26/12/2022	29/12/2022	Diario de Yucatán



IX. Discusión

A. Descripción de las trayectorias simuladas

En dos de los tres eventos catalogados como *Nortes intenso* (62 a 70 km/h) el polígono Sisal recibió aportes de partículas y la tendencia de dirección de las trayectorias fue hacia el suroeste en los últimos días de cada evento. Esto indica que el aporte de partículas al Polígono de Sisal pudiera ser mayor cuando las condiciones Norte terminan. Por ejemplo, en el evento del 20 al 26 de diciembre, en las noticias locales (Tabla V) se reportó la llegada de sargazo 3 días después de que las condiciones de *Norte* terminaran.

Dos eventos catalogados como *Nortes fuertes* (43 a 61 km/h), mostraron llegada de partículas al Polígono Sisal. El cuarto evento, del 28 de septiembre al 4 del 2020, contribuyó con la mayor cantidad de partículas provenientes del Polígono Dzilam In (dentro de la isóbata de 40 m). Este evento también contó con registro en las noticias locales de la llegada de sargazo a las playas de Sisal el día 18 de diciembre (Tabla V). Los que presentaron aporte de partículas coinciden en la tendencia de dirección de las trayectorias; en ambos eventos las partículas comenzaron con una dirección hacia el Noreste y en el transcurso del día 1, se invirtió hacia el Suroeste llegando a la costa y a ingresar al Golfo de México.



El evento del 22 al 29 de noviembre de 2021, catalogado como *Norte moderado* (36.21 km/h) fue el que registró un mayor aporte de partículas hacia el polígono Sisal. El Polígono Cuyo In presentó el mayor aporte de todos los polígonos en todas las simulaciones. Este evento generó un aporte de partículas al Polígono Sisal desde el inicio y hasta el final de la simulación. La dirección predominante fue hacia el Oeste con una componente fuerte hacia el Sur.

Dos de las trayectorias simuladas que indicaron un arribo de partículas al Polígono de Sisal coincidieron con arribazones en la playa de Sisal reportadas en noticieros locales durante dos eventos de Nortes. El evento 8, del 11 al 20 de febrero de 2021, no fue categorizado; sin embargo, hay registro de la llegada de sargazo a las playas de Sisal (Tabla V) para el día después de haber terminado el evento.

En las simulaciones se observó que dos polígonos dentro de la isóbata de los 40 m aportaron partículas al Polígono de Sisal. Las trayectorias en su mayoría fueron hacia el Oeste con un componente hacia el Noreste que las alejó de la Costa Norte de la Península de Yucatán. Esta coincidencia de arribazones reportados con las arribazones de partículas sintéticas dan una validación cualitativa de que el modelo, aun con sus limitaciones, es capaz de reproducir la trayectoria de material suspendido en la superficie del mar.



Las partículas sembradas dentro de la isóbata de 40 m (Tabla I) siguieron una trayectoria con dirección predominante al Oeste, llegando primero a la costa de Sisal y posteriormente, al oeste del Golfo de México. Esto se puede explicar debido a que, durante los *Nortes*, las corrientes cercanas a la costa de Sisal (fuera de la zona de rompiente) son con dirección al oeste (Garza-Pérez e Ize-Lema 2017).

Siguiendo con el factor de corrientes, la circulación promedio de la corriente sobre la región profunda de la plataforma continental de Yucatán para el mes de julio (previo a la temporada de Nortes) en el año 2009 se registró con velocidades máximas de 0.3 m/s (Ruiz-Castillo 2014). Siendo que la velocidad promedio del núcleo de dicha corriente es superior a 0.6 m/s (Badan et al. 2005, Athié et al. 2011). Esto puede inferir que, fuera de la temporada de Nortes, la intensidad de la corriente de la plataforma de Yucatán es menor. Siendo que pudiese tener influencia la presencia de los Nortes en la advección de las partículas simuladas en este trabajo.

Cabe resaltar que las estructuras de mesoescala presentes en esta región del Golfo de México tuvieron una influencia considerable en la advección de las partículas depositadas en la superficie. En cinco eventos (Febrero-2020, Enero-2019, Septiembre-Octubre 2020, Marzo-2019 y Noviembre-2022) la advección más norteña de las partículas se observó regida por remolinos ciclónicos y anticiclónicos. Zavala-Sansón, Pérez-Brunius y Sheinbaum (2017) mencionan que la dispersión de drifters (boyas) superficiales en el lado oriental del Golfo de México se ve fuertemente afectada por remolinos anticiclónicos que desprende la Corriente de Lazo.



Estudios previos señalan que el sargazo que llega a Sisal es bentónico y regional (Ortegón-Aznar y Ávila-Mosqueda 2020). Sin embargo, los resultados de este trabajo muestran que si llegara a presentarse sargazo pelágico inclusive en los polígonos más lejanos al polígono Sisal (Cuyo In y Out), este pudiera también arribar a la Costa Norte de Yucatán. Indicando que el sargazo bentónico que hipotéticamente se desprenda dentro del área de salida (polígonos planteados) permanezca en la Costa Norte de la Península de Yucatán o que tienda a desplazarse hacia el Golfo de México; dado que se registró la llegada de partículas de todos los polígonos de siembra al Polígono Sisal.

Tomando como referencia el estudio de los arribazones de sargazo en el Caribe -el cual se ha abordado haciendo uso de distintas disciplinas-, se tiene el análisis por medio de instrumentos remotos. El cual con base en imágenes satelitales generan patrones espaciales y estacionales de cobertura de sargazo (Uribe-Martínez et al. 2022).

El Laboratorio de Oceanografía Óptica de la Universidad del Sur de Florida ha desarrollado el Satellite-based Sargassum Watch System (SaWS); el cual combina datos satelitales con modelación numérica para rastrear el sargazo pelágico. También se han utilizado distintas herramientas multiespectrales para extraer características y cuantificar la densidad de biomasa o cobertura de área que ocupan los parches de sargazo (Wang y Hu 2021).

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua hace uso de un modelo lagrangiano de partículas para simular el pronóstico de arribo de sargazo en las costas



del Caribe con énfasis en el Caribe Mexicano. El modelo parte de ubicaciones iniciales de parches de sargazo con base en el índice alternativo de algas flotantes. Siguiendo el campo de velocidades superficiales de HYCOM y pronóstico de vientos del Environmental Modeling Center, estiman la trayectoria que seguirá el sargazo (Morales et al. S.f).

Por último, el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Illinois (Urbana Champaign) está experimentando con parches artificiales flotantes (FTIs, Artificial floating treatment islands) para caracterizar el efecto de la densidad, frondas hipotéticas de vegetación y profundidad del flujo en su movimiento en la superficie. Con el objetivo de aplicación a los parches de sargazo presentes en el Atlántico tropical, se pretende predecir el movimiento en escenarios naturales (Prasad y Tinoco 2023).



B. ¿De dónde provienen las algas que arriban a la Costa Norte de la Península de Yucatán?

Durante condiciones de Norte donde las corrientes costeras se intensifican por acción del viento desprendiendo las algas rojas fijas en el sustrato y transportarlas hacia la línea de costa de la Península de Yucatán (Ortegón-Aznar y León-Tejera 2022). Una vez que llegan a profundidades someras y al estar en suspensión o en la superficie del agua, el empuje que ejercen los *Nortes* con dirección al sur pueden contribuir a los arribazones que se observan en las playas. En la superficie del agua, los materiales en flotación se pueden ver más influenciados por el viento y el oleaje que por las corrientes. Siendo que el viento al ser forzante en la generación de olas promueve la acumulación de material, quedaría a merced del oleaje la suspensión de macroalgas y su llegada a la costa (Carrillo y Sheinbaum 2020, Rutten et al. 2021, Lara-Hernández et al. 2023).

Además de la intervención de los *Nortes* en el transporte de partículas en flotación, es importante considerar a la *Surada*. La *Surada* son vientos intensos (60 km/h) provenientes del Sur y Sureste (CENAPRED 2019). Estos pudieran tener influencia en las simulaciones planteadas dado que estos vientos se presentan a lo largo del año y dentro de un periodo de *Nortes*, pudiera tener efecto significativo. Donde su componente de dirección hacia el Noroeste, coincida con la tendencia que siguen las partículas de migrar hacia una componente Oeste.



Los arribos de sargazo en el Caribe Mexicano se han catalogado como un problema costero desde 2014 (van Tussenbroek et al. 2017, Chávez et al. 2020, Fraga y Robledo 2022, Lara-Hernández et al. 2023). En el noroeste del Caribe Mexicano, el origen de la mayoría del sargazo proviene del suroeste (Lara-Hernández et al. 2023). Debido a la dirección de vientos *Nortes* (Sur) y corrientes (corriente Cayman) que van en dirección Oeste, la Península de Yucatán (posición perpendicular respecto a las corrientes y viento) actúa como una barrera que recibe el efecto de estos fenómenos a lo largo del año (García-Sánchez et al. 2020, Rutten et al. 2021, Lara-Hernández et al. 2023). Por ello, es que funge como un receptor ante las masivas llegadas de sargazo provenientes del Atlántico Ecuatorial (Oeste de África) (Wang et al. 2019, Lara-Hernández et al. 2023).

Comparado con la Costa Norte de la Península de Yucatán, la costa Oeste comparte parcialmente el rango temporal de la llegada de sargazo. Siendo que comúnmente los arribos de sargazo más notables ocurren entre septiembre y abril (Chávez et al. 2020; Uribe-Martínez et al. 2022; Lara-Hernández et al. 2023) para el Caribe Mexicano y entre octubre y marzo (temporada de *Nortes*) para la Costa Norte de la Península de Yucatán (Ortegón-Aznar y Ávila-Mosqueda 2020).



C. Fiabilidad de HYCOM y otras aplicaciones del modelo

Los datos de HYCOM cerca de la costa no parecen ser fiables. Por ello, se advierte que las correlaciones no fueron las esperadas y los resultados deben tomarse con cautela. No sería el caso para las regiones donde se realizaron las simulaciones dado que son regiones más lejanas de la costa. Se requiere mejorar la información espacial de las corrientes superficiales, con mediciones directas con radares de alta frecuencia por ejemplo, para generar resultados numéricos confiables para la región. Por otro lado, si la comparación no fuera con datos horarios sino una resolución temporal mayor (ej. serie diaria o mensual), puede que HYCOM demuestre mejor efectividad.

Dado que el modelo no considera características propias de algún objeto u organismo específico, estas simulaciones de trayectorias pueden asociarse a la dispersión de macroplásticos, dispersión de larvas (Ramos et al. 2017) y/o también, puede contribuir a la caracterización regional de la dinámica de corrientes superficiales frente a la Costa Norte de la Península de Yucatán.



X. Conclusiones

Se lograron simular trayectorias de partículas sintéticas sembradas en seis polígonos frente a la costa norte de la Península de Yucatán para estudiar sus patrones de movimiento durante condiciones de eventos Norte. Las partículas sembradas dentro de la región delimitada por la isóbata de 40 m llegan a tener contacto con el Polígono Sisal debido a que siguen una dirección predominante al Oeste. El mayor aporte de partículas al Polígono Sisal fue de los polígonos Dizlam In y Cuyo In, localizados en la región somera (< 40 m) de la plataforma.

Dos de los eventos simulados que indicaron arribo de partículas al Polígono Sisal fueron corroborados con reportes de arribazones de sargazo en las Playas de Sisal por noticias locales. Los resultados de esta tesis tienen relevancia debido a que se sugieren respuestas a la llegada de sargazo bentónico y pelágico a las playas de la costa norte de la Península de Yucatán. Siendo que se propone que el transporte de sargazo inicia localmente y se distribuye por la influencia del arrastre por viento en superficie.

Se sugiere que en ejercicios similares se consideran datos más precisos, así como considerar el efecto del fondo en el transporte de las algas bentónicas y la morfología que presentan estos organismos. Aunque, si se parte del supuesto de que las macroalgas que llegan a Sisal también tienen un factor de flotación o suspensión, podrían llegar a ser consideradas precisas las trayectorias simuladas.



XI. Literatura citada

1. Appendini CM, Hernández-Lasheras J, Meza-Padilla R, Kurczyn JA. 2018. Effect of climate change on wind waves generated by anticyclonic cold front intrusions in the Gulf of Mexico. *Clim Dyn.* 51. p. 3747–3763.
<https://doi.org/10.1007/s00382-018-4108-4>
2. Appendini CM, Torres-Freyermuth A, Oropeza F, Salles P, López J, Mendoza ET. 2013. Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: wind reanalyses assessment. *Applied Ocean Research.* 39. p. 20–30.
3. Athié G, Candela J, Sheinbaum J, Badanf A, Ochoa J. 2011. Estructura de la corriente de Yucatán en los canales de Cozumel y Yucatán. *Ciencias marinas.* 37(4a). p. 471–492.
4. Badan A, Candela J, Sheinbaum J, Ochoa J. 2005. Upper–layer circulation in the approaches to the Yucatan Channel. In: Sturges W, Lugo–Fernandez A (eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models.* Geophysical Monograph Series. 161. American Geophysical Union. Washington, DC. p. 57–69.
5. Brooks MT, Coles VJ, Coles WC. 2019. Inertia influences pelagic *Sargassum* advection and distribution. *Geophysical Research Letters.* 46. p. 2610–2618.
<https://doi.org/10.1029/2018GL081489>



6. Brooks MT, Coles VJ, Hood RR, Gower JFR. 2018. Factors controlling the seasonal distribution of pelagic *Sargassum*. *Mar Ecol Prog Ser.* 599. p. 1–18.
<https://doi.org/10.3354/meps12646>
7. Carrillo L, Sheinbaum-Pardo J. 2020. Sargazo en movimiento. *Revista de la Academia Mexicana de Ciencias; Aldana-Aranda, D., Ed.* p. 20–28.
8. CENAPRED. 2019. Vientos del sur, Surada. Recuperado de:
<https://www.gob.mx/cenapred/articulos/vientos-del-sur-surada#:~:text=La%20Surada%20es%20el%20viento.en%20cualquier%20%C3%A9poca%20del%20a%C3%B1o.>
9. Chávez V, Uribe-Martínez A, Cuevas E, Rodríguez-Martínez RE, van Tussenbroek BI, Francisco V, Estévez M, Celis LB, Monroy-Velázquez LV, Leal-Bautista R, et al. 2020. Massive Influx of Pelagic *Sargassum spp.* on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities. *Water.* 12(10). <https://doi.org/10.3390/w12102908>
10. Contreras EF, Castilla JR. 1992. Importancia del intercambio mareal en lagunas costeras. *Universidad y Ciencia.* 9(18). p. 22–27.
11. DIGAOHM (Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología). S.f. El Sisal, Yucatán. 10 p. Recuperado de:
<https://digaohm.semarn.gob.mx/cuestionarios/cnarioSisal.pdf>
12. Fraga J, Robledo D. 2022. Covid-19 and *Sargassum* blooms: impacts and social issues in a mass tourism destination (Mexican Caribbean). *Maritime Studies.* 21. p. 159–171. <https://doi.org/10.1007/s40152-022-00267-0>



13. García-Sánchez M, Graham C, Vera E, Escalante-Mancera E, Alvarez-Filip L, Tussenbroek B. 2020. Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic Sargassum species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany*.
14. Garza-Pérez JR, Ize-Lema IAR. 2017. *Caracterización Multidisciplinaria de la Zona Costera de Sisal, Yucatán*. LANRESC, Yucatán, México. 198 p.
15. González-Santamaría R, Calderón-Bustamante O, Zavala-Hidalgo J, Moreles E, Fragoso-Barreto C, Calva-Chávez A. 2018 (19-23 de marzo). El modelo HYCOM en el Golfo de México. [Póster]. Reunión Anual CIGoM 2018. Querétaro, Qro.
16. Gower J, Hu C, Borstad G, 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). p. 3619–3625.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.882258>
17. Inegi. 2020. División Municipal Yucatán. Fecha de consulta: 25 de junio de 2022. Recuperado de :
https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=31
18. Kurczyn JA, Duran R, Beier E and Souza AJ. 2021. On the Advection of Upwelled Water on the Western Yucatan Shelf. *Front. Mar. Sci.* 8.
19. Kurczyn JA. 2020. central_american_cold_surge_dates_2002-2022.5.csv. figshare. Dataset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12925505.v5>



20. Kyungman K, Byoung-Ju C, Young KK, Keunyong K. 2019. Tracing the trajectory of pelagic Sargassum using satellite monitoring and Lagrangian transport simulations in the East China Sea and Yellow Sea. *ALGAE*. 34. p. 315–326.
21. Laffoley D, Roe H, Angel MV, Ardrón J, Bates N, Boyd LL, Brooke S, Buck K, Carlson C, Causey B, Conte M, Christiansen S, Cleary J, Donnelly J, Earle SA, Edwards R, Gjerde K, Giovannoni SJ, Gulick, 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.
22. Lapointe BE. 1995. A comparison of nutrient-limited productivity in Sargassum natans from neritic vs. oceanic waters of the western North Atlantic Ocean. *Limnology and Oceanography*. 40(3). p. 625–633.
<https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.3.0625>
23. Lara-Hernández JA, Enriquez C, Zavala-Hidalgo J, Cuevas E, van Tussenbroek B, Uribe-Martínez A. 2023. Sargassum transport towards Mexican Caribbean shores: Numerical modeling for research and forecasting. *Journal of Marine Systems*. 241. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2023.103923>
24. León-Álvarez D, López-Gómez ME, Núñez-Resendiz ML, Candelaria-Silva C, Cruz-Rodríguez A, Rodríguez-Vargas D. 2017. Géneros de algas marinas tropicales de México: algas rojas. Primera edición. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias. 252 p.



25. López-Contreras AM, Núñez-Valenzuela P, Celis-García B, Driegen J, Huerta Lwanga E, Domin P, Polett-Gurrola M, Rosas-Luis R, Verde Gómez Y, de Vrije T. 2022. "Sargassum in Mexico: from environmental problem to valuable resource" WUR report 2319. <https://doi.org/10.18174/574423>
26. López-Maldonado YC. 2011. El interés de habitantes de Sisal Yucatán en el desarrollo de la comunidad como centro turístico a través del uso y manejo del patrimonio cultural y natural. Maestra en Ciencias. Departamento de Ecología Humana, Cinvestav. 123 p.
27. Magar V, Godínez VM, Gross MS, López-Mariscal M, Bermúdez-Romero A, Candela J, Zamudio L. 2020. In-Stream Energy by Tidal and Wind-Driven Currents: An Analysis for the Gulf of California. *Energies*. 13(5). 1095. <https://doi.org/10.3390/en13051095>
28. Meza-Cuellar NA. 2013. Diagnóstico de vulnerabilidad social frente a impactos de cambio climático en Puerto Sisal, Yucatán. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 140 p.
29. Montante-Sánchez O. 2004. Hidrodinámica y transporte de masa en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas, Baja California Sur, México: Modelación y experimentación. Doctor en Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional. 228 p.
30. Morales R, Valle-Levinson A, Martínez G et al. S.f. Seguimiento del Sargazo en el Mar Caribe. Recuperado de: <https://sargazo.imta.mx/sargazo/>



31. Ortegón-Aznar I, Ávila-Mosqueda V. 2020. Arribón de sargazo en la península de Yucatán: ¿Problema local, regional o mundial? *Bioagrobiencias*. 13(2). p. 28–37.
32. Ortegón-Aznar I, León-Tejera H. 2022. Diversidad de macroalgas y cianoprocariontes marinos de la costa norte de la Península de Yucatán, México. *Hidrobiológica* 32 (3). p. 309–317.
33. Oyesiku O, Egunyomi A. 2014. Identification and chemical studies of pelagic masses of *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon and *S. fluitans* (Borgesen) Borgesen (brown algae), found offshore in Ondo State, Nigeria. *African Journal of Biotechnology*. 13(10). p. 1188-1193.
34. Parr AE. 1939. Quantitative observations on the pelagic *Sargassum* vegetation of the western North Atlantic. *Bulletin of the Bingham Oceanography Collection*, 6. p. 1–94.
35. Prasad V, Tinoco RO. 2023 (10-12 de agosto). Hydrodynamics within and around floating vegetation patches [Póster]. 9th Young Coastal Scientist and Engineers - Americas. Madison, Wisconsin.
36. Ramos JE, Ramos-Rodríguez A, Bazzino-Ferreri G, Kurczyn JA, Rivas D, Salinas-Zavala, CA. 2017. Characterization of the northernmost spawning habitat of *Dosidicus gigas* with implications for its northwards range extension. *Mar Ecol Prog Ser*. 572. p. 179–192.
37. Reyes-Mendoza O, Mariño-Tapia I, Herrera-Silveira J, Ruiz-Martínez G, Enriquez C, Largier JL. 2015. The Effects of Wind on Upwelling off Cabo Catoche. *Journal of Coastal Research*. 319. p. 638–650.



38. RUOA (Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos). 2022. Observatorio Atmosférico Sisal. Recuperado de: <https://www.ruoa.unam.mx/index.php?page=estaciones&id=13>
39. Romero-Arteaga A, Ruiz de Alegría-Arzaburu A, Rivas D, Juárez B. 2022. Nearshore current variations during the passage of cold fronts in NW Gulf of Mexico. Continental Shelf Research. 238. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104697>
40. Rosado-Espinoza LA. 2012. Caracterización ficológica de comunidades bentónicas y de arribazón en Dzilam de Bravo, Yucatán. Maestro en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales Tropicales. Universidad Autónoma de Yucatán. 77 p.
41. Rosellón-Druker J, Calixto-Pérez E, Escobar-Briones E, González-Cano J, Masiá-Nebot L, Córdova-Tapia F. A Review of a Decade of Local Projects, Studies and Initiatives of Atypical Influxes of Pelagic Sargassum on Mexican Caribbean Coasts. Phycology. 2. p. 254–279. <https://doi.org/10.3390/phycolgy2030014>
42. Ruiz-Castillo E. 2014. Circulación en la plataforma continental de Yucatán. Maestro en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 84 p.
43. Ruiz-Castillo E, Gomez-Valdes J, Sheinbaum J, Rioja-Nieto R. 2016. Wind-driven coastal upwelling and westward circulation in the Yucatan shelf. Continental Shelf Research. 118. 63–76 pp.



44. Rutten J, Arriaga J, Montoya LD, Mariño-Tapia IJ, Escalante-Mancera E, Mendoza ET, van Tussenbroek BI, Appendini CM. 2021. Beaching and natural removal dynamics of pelagic sargassum in a Fringing-reef lagoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 16 p.
45. Schell JM, Goodwin DS, Siuda, ANS. 2015. Recent Sargassum inundation events in the Caribbean: Shipboard observations reveal dominance of a previously rare form. *Oceanography*. 28(3). p. 8–10.
<https://doi.org/https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.70>
46. Schultz DM, Bracken WE, Bosart LF, Hakim GJ, Bedrick MA, Dickinson MJ, Tyle KR. 1997. The 1993 superstorm cold surge: frontal structure, gap flow, and tropical impact. *Mon Weather Rev*. 125. p. 5–39.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<0005:TSCSFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<0005:TSCSFS>2.0.CO;2)
47. SEDATU (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano). 2015. Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Hunucmá. Recuperado de:
http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/31038_HUNUCMA.pdf
48. SEMARNAT. 2021. Lineamientos Técnicos y de Gestión para la Atención de la Contingencia ocasionada por Sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México. 45 p.
49. SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2023. Aviso de Sistemas Frontales y Evento de "Norte" en el Golfo de México. Recuperado de:
<https://smn.conagua.gob.mx/es/pronosticos/avisos/aviso-de-sistemas-frontales-y-evento-de-norte-en-el-golfo-de-mexico>



50. Smagorinsky J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment. *Mon Weather Rev.* 91. p. 99–152.
51. Stoner AW. 1983. Pelagic Sargassum: Evidence for a major decrease in biomass. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers.* 30(4). p. 469–474. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(83\)90079-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(83)90079-1)
52. Suarez A, Martínez-Daranas B. 2018. La problemática del Sargazo en el Caribe. En A. Hernández-Zanuy, *Adaptación basada en Ecosistemas: alternativa para la gestión sostenible de los recursos marinos y costeros del Caribe* (págs. 171 pp., ISBN: 978-959-298043-3). Instituto de Oceanología, La Habana.
53. Uribe-Martínez A, Berriel-Bueno D, Chavez V, Cuevas E, Almeida KL, Fontes JVH, van Tussenbroek BI, Mariño-Tapia I, Liceaga-Correa MA, Ojeda E, Castañeda-Ramírez DG, Silva R. 2022. Multiscale distribution patterns of pelagic rafts of sargasso (*Sargassum spp.*) in the Mexican Caribbean (2014–2020). *Front. Mar. Sci.*
54. van Tussenbroek BI, Hernández Arana HA, Rodríguez-Martínez RE, Espinoza-Avalos J, Canizales-Flores HM, González-Godoy CE, Barba-Santos MG, Vega-Zepeda A, Collado-Vides L. 2017. Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum spp.* on near-shore Caribbean seagrass communities. *Mar Pollut Bull.* 15. 122(1-2). p. 272–281.



55. Visser AW. 1997. Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column. *Mar Ecol Prog Ser.* 158. p. 275–281.
56. Wang M, Hu C. 2021. Satellite remote sensing of pelagic Sargassum macroalgae: The power of high resolution and deep learning. *Remote Sensing of Environment.* 264. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112631>
57. Wang, M, Hu C, Barnes BB, Mitchum G, Lapointe B, Montoya JP. 2019. The great Atlantic Sargassum belt. *Science.* 365. p. 83–87.
58. Zavala-Sansón L, Pérez-Brunius P, Sheinbaum J. 2017. Point source dispersion of surface drifters in the southern Gulf of Mexico. *Environ. Res. Lett.* 12. p. 11.



XII. Anexos

Tabla VI. Correlaciones entre datos de correntímetro local en Sisal y HYCOM.

Evento	Análisis de correlación	
	r	p
1	0.07	0.45
2	-0.21	0.01
3	-0.31	0.0001
4	0.15	0.047
5	0.61	0.0

- Descarga de datos de HYCOM:
https://tds.hycom.org/thredds/catalogs/GOMu0.04/expt_90.1m000.html
- Diario de Yucatán. 2022. Turismo en Sisal. Recuperado de:
<https://www.yucatan.com.mx/yucatan/2022/12/29/turismo-nacional-en-sisal-371985.html>
- PorEsto. 2020. Inusual recale masivo de sargazo en las costas de Yucatán. Recuperado de:
<https://www.poresto.net/yucatan/2020/10/5/inusual-recale-masivo-de-sargazo-en-las-costas-de-yucatan-216053.html#&gid=1&pid=1>