

Modelación numérica de la trayectoria del sargazo pelágico utilizando ecuaciones Brownianas con aplicación a las aguas de la Península de Yucatán, México

Numerical modeling of pelagic sargassum trajectory using Brownian equations with application to the waters of Yucatan Peninsula, Mexico

José María Aguilera-Méndez ^{1a*}, Carlos Juárez-Toledo ^{1b1}, José Luis Tapia-Fabela ^{1b2}, Irma Martínez-Carrillo ^{1b3} y Raúl Vladimir Hernández-Grajales ^{1c}

^aUAP Tianguistenco, Universidad Autónoma Estado de México, Paraje el Tejocote, Tlaltizapán, 52640, Tianguistenco, México.

^bDepartamento de Investigación, UAPT, Universidad Autónoma Estado de México, el Tejocote, Tlaltizapán, 52640, Tianguistenco, México.

^cDirección de Meteorología, Secretaría de Marina-Armada de México, Heroica Escuela Naval Militar 861, 04830, CDMX, México.

E-mail: ^{a1}jaguileram001@alumno.uaemex.mx, ^{b1}cjuarez@uaemex.mx, ^{b2}jltapiaf@uaemex.mx, ^{b3}imartinezca@uaemex.mx, ^cgrajales2@hotmail.com.

*Autor para correspondencia

Recibido: 04/11/2022

Aceptado: 15/01/2023

Publicado: 31/01/2023

Citar como: Aguilera-Méndez, J.M., Juárez-Toledo, C., Tapia-Fabela, J.L., Martínez-Carrillo, I., Hernández-Grajales, R.V. 2023. Numerical modeling of pelagic sargassum trajectory using Brownian equations with application to the waters of Yucatan Peninsula, Mexico. *Ingeniería del agua*, 27(1), 45-58. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.18700>

RESUMEN

El objetivo del estudio es desarrollar una metodología, basada en la aplicación de modelos numéricos, para pronosticar las rutas de transporte del sargazo y favorecer la toma de decisiones de recolección en costas. El trabajo presenta el comportamiento de la trayectoria del sargazo como un fenómeno dependiente de las variables metoceanicas, mientras los métodos numéricos se utilizan como herramientas de modelado que retienen la información más relevante, y la visión sistémica permite el análisis de los resultados parciales a través de un entendimiento segmentado del problema para llegar a una solución completa. En esta investigación se consideran dos respuestas de salidas numéricas que se implementan en un modelo de olas basado en ecuaciones Lagrangianas para obtener el pronóstico de oleaje. Finalmente, los resultados son procesados aplicando un sistema Browniano para calcular el movimiento de partículas de libre flotación a través de la velocidad y dirección de difusividad representados en un software de animación.

Palabras clave | modelos numéricos; movimiento Browniano; Sargazo; modelo SWAN; Alavai.

ABSTRACT

The study objective is to develop a methodology, based on the application of numerical models, to forecast the transport routes of sargassum and favor decision-making for collecting on coasts. The work presents the behavior of the sargassum trajectory as a phenomenon dependent on the metoceanic variables, while the numerical methods are used as modeling tools that retain the most relevant information, and the systemic vision allows the analysis of the partial results through a segmented understanding of the problem to arrive at a full solution. In this research, two numerical output responses are considered that are implemented in a wave model based on Lagrangian equations to obtain the wave forecast. Finally, the results are processed by applying a Brownian system to calculate the movement of free-floating particles through the speed and diffusivity direction presented by an animation software.

Key words | numerical models; Brownian movement; Sargassum; SWAN model; Alavai.

INTRODUCCIÓN

El sargazo pelágico es un vegetal o alga marina que habita en el océano Atlántico, cuya proliferación y abundancia lo han convertido en un problema mayúsculo tanto para las personas, la fauna marina que en él encuentra su hábitat y a las actividades económicas que se desarrollan tanto en playa como mar adentro (Suárez y Martínez-Daranas, 2018). Esta alga bajo condiciones ideales de temperatura y nutrientes puede duplicar su biomasa en lapsos de 18 días (Chávez *et al.*, 2020). Estudios recientes han demostrado que la gran cantidad de fertilizante no aprovechado y escurrido de las zonas de cultivo y el aumento en la temperatura de los océanos, debido al cambio climático, han sido factores decisivos en la proliferación del alga (Johns *et al.*, 2020).

Es a finales del siglo xx cuando se incorpora la tecnología satelital como soporte en el esfuerzo de contar un dimensionamiento global y regional de la problemática ocasionada por la cantidad de alga que se encuentra flotando libremente en mar abierto y la que llega a las costas (Binding *et al.*, 2018; Chávez *et al.*, 2020; Johns *et al.*, 2020; Kwon *et al.*, 2019; Putman *et al.*, 2020).

Los modelos de transporte Lagrangianos permiten complementar la información satelital. Algunos de estos modelos han sido desarrollados utilizando objetivos y problemáticas distintas a las del estudio, como lo son los modelos de predicción de trayectoria de hidrocarburos, entre otros el Entorno de Modelado Operativo General de la NOAA (General NOAA Operational Modeling Environment, 2022) y la solución Consulta de Datos Automatizada para Derrames de Petróleo (Automated Data Inquiry for Oil Spills, 2017) además de los distintos trabajos de Otero (Marta-Almeida *et al.*, 2011; Otero *et al.*, 2015) que han puesto especial interés en el desplazamiento de objetos de libre flotación en el mar. Un tópico muy parecido es la flotación y arrastre de desechos en áreas cerradas como los estuarios (Núñez *et al.*, 2019) en dónde la situación podría ser muy aproximada al tema de la presente investigación.

El modelado de objetos flotantes en mares y océanos depende directamente de la dirección y velocidad de las olas, que son el resultado de la acción combinada de la marea y el viento. Investigaciones previas han utilizado ecuaciones Brownianas para describir trayectorias de partículas (Banas *et al.*, 2004; Banas y Hickey, 2005; Fyrrillas y Nomura, 2007; Lin *et al.*, 2011; Schwartz y Brustein, 1988). El objetivo del estudio será desarrollar una metodología, basada en la aplicación de modelos numéricos, para pronosticar las rutas de transporte del sargazo. Para ello se ha diseñado un experimento que se encuentra dividido en dos etapas: la primera consiste en la obtención de las variables meteoceánicas a través de un downscaling de los datos de los modelos de mesoescala. En la segunda etapa se aplicarán ecuaciones Brownianas de movimiento de partículas sobre los resultados obtenidos del downscaling. El resultado de haber aplicado a los datos las ecuaciones de movimiento de partículas será introducido a un software de animación que permite el trazado de las trayectorias o pronóstico. Para validar los resultados se utilizarán las imágenes satelitales que indican la ubicación de bancos del vegetal; así como datos de hidrodinámica en la zona que facilitará el proceso de descarte si se encuentran variaciones superiores a $\pm 20\%$ con respecto a la medición de los modelos.

El estudio se considerará exitoso si los resultados obtenidos para una fecha y hora determinada, al ser comparados con las lecturas satelitales de la misma fecha y hora, presentan una variación máxima de $\pm 20.0^\circ$; debido principalmente a la desviación implícita o error acumulado que se genera en las simulaciones mayores a las 48 horas.

Para el experimento se ubicó un lapso de días que contó con diversos fenómenos naturales con suficiente cantidad de sargazo identificado. La información meteorológica y de oleaje requerida por los modelos y su configuración se realizó para el periodo comprendido entre el 01 y el 05 de Julio del año 2021 coincidente con el paso del huracán Elsa en el mar Caribe.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de Estudio

Para el estudio se seleccionó el área de la península de Yucatán que se encuentra ubicada en el caribe mexicano. Considerada de alto impacto económico y de seguridad debido al constante tráfico de embarcaciones de diferentes esloras tanto de recreo, de transporte de mercancías, así como pesca; con responsabilidades en las tareas de resguardo territorial y protección civil. Una característica importante de la zona es el fenómeno de corriente marina que se observa entre la isla de Cuba y la península de Yucatán,

conocido como canal de Yucatán que comunica el mar caribe con el golfo de México, generando tal fuerza que prácticamente arroja al sargazo pelágico a las playas de Quintana Roo y en ocasiones llega a la península de la Florida. Una característica que hace especial al área es que se encuentra ubicada en un paso de huracanes y tormentas tropicales, las cuales cambian constantemente las condiciones atmosféricas y oceánicas, teniendo como consecuencia variaciones en el arrastre del sargazo.

El polígono se localiza entre las coordenadas (18.0° N, 86.0° W) y (22.5° N, 89.0° W) que comprenden parte de los estados mexicanos de Quintana Roo y Yucatán, así como una franja del mar caribe mexicano como lo muestra la figura 1. Se seleccionó esta zona debido también a que casi todo del año la dirección con que se desplaza el sargazo pelágico va de este a oeste y de sur a norte como consecuencia de las corrientes existentes en la zona del Caribe y los vientos que provienen del Atlántico.



Figura 1 | Localización del área de estudio. Fuente: Google Maps 2022.

Datos de partida

Los datos meteorológicos que sirven como datos de partida se obtienen del servidor público de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), n.d.-a) para 120 horas de pronóstico con una resolución de tiempo de cada 3 horas con una resolución de 0.5°; los datos de oleaje se descargan de los datos publicados igualmente por la NOAA de su servicio NOMADS para 120 horas de pronóstico con una resolución de tiempo de cada 3 horas con una resolución de 0.16° (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), n.d.-b).

Los datos meteorológicos se ingresaron tanto en el modelo PSU/NCAR *mesoscale model* (MM5) (MM5 Homepage, 2004) y en el Weather Research and Forecasting Model (WRF) (Skamarock WC, 2008). Se comprobó que los modelos contaran con información válida para el área de estudio, es decir, que los datos que los alimentaban no tuvieran valores nulos de acuerdo con el estándar de NOAA y la Organización Meteorológica Mundial (WMO). Una vez que concluyó el proceso, se procede a extraer las variables de velocidad y dirección del viento a 10 metros sobre el nivel del mar para las coordenadas del área de estudio para 120 horas de pronóstico en periodos de 3 horas en la resolución 0.5° con una rutina escrita en un software que permite el acceso, la manipulación y la visualización de datos de ciencias de la tierra llamado Grid Analysis and Display System (GrADS) (George Mason University (GMU) & National Space Agency (NASA), n.d.) y ser escritas en archivos tipo ASCII.

En el caso de la marea, se recurrió a la ejecución del modelo de micro escala WaveWatch III (WW3) (The WAVEWATCH Development Group (WW3DG), 2019); este modelo se configuró para que los productos se generaran estudio para 120 horas de pronóstico en periodos de 3 horas en una resolución de 0.16° debido al impacto del fenómeno del canal de Yucatán sobre la dirección de las olas en la zona y, por ende, a alteración en la trayectoria del sargazo pelágico. Una vez obtenidos los resultados se extrajeron los datos referentes a las variables de velocidad y dirección de marea para el área de estudio con una rutina también escrita en GrADS y ser escritas en archivos tipo ASCII.

La siguiente etapa es introducir los datos que se han generado al modelo *Simulating Waves Nearshore* (SWAN) (Booij *et al.*, 1999); este modelo tiene como requerimiento inicial la declaración de una malla no estructurada generada a partir de triángulos de Delaunay. Al momento de crearla se puso especial énfasis en las áreas costeras para obtener una mayor precisión al momento de generar los triángulos. Después de las ejecuciones se generaron en total 776 triángulos, de los cuales 244 triángulos se encuentran en la parte limítrofe y costas; los restantes 532 triángulos para formar parte de la representación del cuerpo de agua. El área máxima de los triángulos se propuso en 100 km^2 con una mínima de 10 km^2 como lo muestra la figura 2. Otro dato de relevancia para el modelo SWAN es la batimetría de la zona. De acuerdo a la resolución de la batimetría, ésta cuenta con una resolución de 15 segundos de arco, o un punto aproximadamente por cada 450 metros, obteniendo un área aproximada por cuadrado de $202\,500 \text{ m}^2$ o 0.2025 km^2 (GEBCO Compilation Group, 2021); con una representación digital que se muestra en la figura 4 y que fue considerada con el detalle suficiente para ser la base de la modelación propuesta.

Se realizaron diferentes ajustes a las condiciones de física iniciales que contempla el modelo numérico SWAN debido principalmente a las características propias de del mar en esa región (Booij *et al.*, 1999), entre ellos la variable de FRIC (fricción) que se estableció en 0.019, RHO o la densidad del agua que se estableció en 1023 y LEVEL que se fijó en 0.5 de acuerdo con lo registrado por los mareógrafos en playa; sobre todo en aquellas que hacen particular al área de estudio. Una vez configurado el experimento, comenzaron a ejecutarse las diferentes simulaciones bajo la premisa de un continuo en el tiempo y no recurrir a varios inicios en frío o con interrupción de datos.

El modelo SWAN será ejecutado para seis valores propuestos del coeficiente de resistencia al viento. Por lo que después de ejecutar el modelo SWAN, se cuenta con los datos de 120 horas de pronóstico de la corriente a micro escala para la zona de estudio por cada valor del coeficiente. Posteriormente a los datos se les aplica la ecuación Browniana de desplazamiento de objetos de libre flotación obteniendo un archivo matricial en el formato NCAR que reconoce Alavai (Banas *et al.*, 2009; Otero *et al.*, 2015), que es un software de representación de trayectorias y se procede a su interpretación.

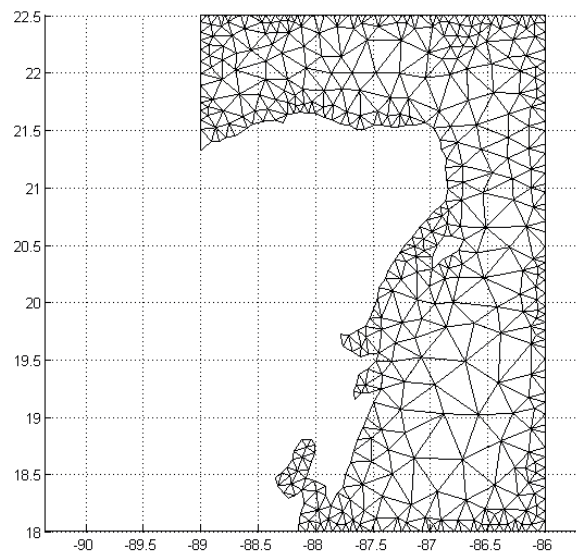


Figura 2 | Malla de cálculo del modelo numérico utilizado en donde se muestran los triángulos de Delaunay. Fuente: elaboración propia.

La modelación será validada a través de la comparación de las trayectorias contra la información pública generada por parte de organismos que se han encargado de identificar y monitorear las colonias de sargazo pelágico que se encuentran flotando libremente en el océano; tal es el caso de la División de Química Oceánica y Ecosistemas (OCED) de la NOAA que a través del diseño y uso de sistemas inteligentes aplicados a las imágenes satelitales han desarrollado una técnica de detección de sargazo pelágico basado en el máximo índice de clorofila (MCI) (Binding *et al.*, 2013, 2018; Signoret *et al.*, 1998), generando mapas de ubicación como se muestra en la figura 3; que serán utilizados para determinar la trayectoria de algunos cuerpos o áreas con alta densidad de sargazo pelágico para ser comparadas contra la modelación generada.

Los MCI tienen como unidades los Instrumentos de Color de Océano y Tierra (OLCI) mejorados a través de las diferentes misiones Sentinel-3 Copernicus de observación y monitoreo terrestre. El instrumento OLCI se desarrolló en parte para proporcionar continuidad con las mediciones realizadas por el instrumento espectrómetro de imágenes de resolución media (MERIS). OLCI es un radiómetro de barrido de imágenes visibles con cinco módulos de cámara que adquieren datos en 21 bandas espectrales que van desde 400 a 1200 nm. El campo de visión de las cinco cámaras está dispuesto en forma de abanico en el plano vertical, perpendicular a la velocidad de la plataforma. Cada cámara tiene un campo de visión individual de 14.2° y una superposición de 0.6° con la cámara vecina. Todo el campo de visión se desplaza a lo largo de la pista en 12.6° alejándose del Sol para minimizar el impacto del destello solar (National Space Agency (NASA), n.d.). Esta resolución de adquisición “nativa” de aproximadamente 300 m es la que se utiliza para calcular la cuadrícula del producto de resolución completa (Agencia Espacial Europea (ESA), n.d.).

Se consideró como banco de sargazo pelágico a la región donde las tres lecturas de *MCI OLCI* de 1.61T, 1.615T y 1.62T arrojen mediciones constantes mayor o iguales a 0.05 *MCI*; medidas inferiores podrían suponer bancos de algas, plásticos e incluso basura de cualquier tipo incluyendo fauna marina en descomposición. De esta forma se tendrán que almacenar los datos que dan origen a la modelación en periodos de cinco días de 24 horas cada uno hasta obtener los mismos días de mapas satelitales. La información generada por la modelación permitirá realizar 120 comparaciones, (una imagen generada por hora nos arroja 24 imágenes por día, por 5 días de modelado nos resultan 120 imágenes) para un solo banco identificado.



Figura 3 | Mapa que indica el índice máximo de clorofila (MCI) para la zona noroeste del Caribe mexicano; se observa en el norte de la península una acumulación excesiva de material orgánico. Fuente: OCED NOAA, mayo 2022.

Por último, los datos de ubicación generados por el SWAN para cada valor del coeficiente, son comparados contra los datos satelitales de ubicación del banco. En la comparación se obtendrá por diferencia numérica los valores que se encuentren dentro del rango de aceptación o lo excedan.

Primera fase

Modelos numéricos

Los datos meteorológicos iniciales son generados por el modelo Global Forecast System (GFS) (Global Forecast System, n.d.), una vez descargados son post-procesados tanto por el modelo MM5, que es un modelo de mesoescala regional utilizado para crear pronósticos meteorológicos y proyecciones climáticas y por el WRF, reconocido por ser la nueva generación de sistemas de

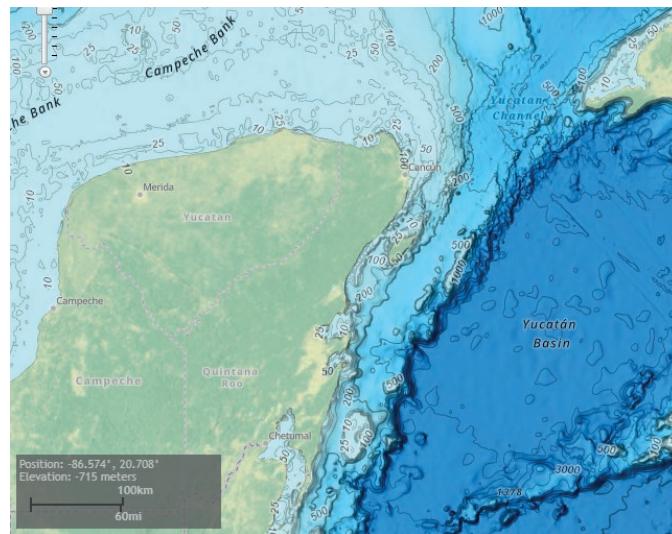


Figura 4 | Imagen digital de la batimetría del área de estudio, las líneas de contorno indican la profundidad en metros. Fuente: Bathymetric Data Viewer, NOAA (2023).

predicción meteorológica diseñado para la investigación atmosférica así como pronósticos operativos. Ambos modelos se encuentran parametrizados para poner especial atención a las condiciones presentadas en costas de la república mexicana y mar caribe.

Los datos del oleaje inicial son generados por el modelo de macro escala *WaveWatch III Global Wave Model* (WaveWatch III (WW3-GW) Global Wave Model, 2019) descrito como un modelo de olas de tercera generación, para posteriormente obtener una reducción de escala y resolver los fenómenos locales son procesados en equipos locales a través del modelo de micro escala WW3 también descrito como un modelo de olas de tercera generación con énfasis en los eventos de fricción y desarrollo de olas. Los modelos MM5, WRF y WW3 se ejecutan con los módulos de adquisición de datos de distintas fuentes como radiosondas y estaciones meteorológicas. Con la actualización de los valores de las variables de los fenómenos el resultado del modelado será más certero al fenómeno presentado.

Tanto los datos de viento como de corrientes sirven de entrada al modelo SWAN, que es un modelo numérico de dos dimensiones para la simulación de fenómenos oceánicos; como requisito, éste modelo necesita una malla del tipo estructurada o no estructurada que describirá, junto con la batimetría, la geografía del área y su correlación con el océano (García *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2013). Como base del área de estudio generada a partir de triángulos de Delaunay, que se fabricó a partir de mapas de costa con algoritmos de implementación del método de elementos finitos (Key, 2010; Shewchuk, 2002). La malla del tipo no estructurada se utilizará en la simulación para obtener información sobre los fenómenos de oleaje (Aguilera-Méndez *et al.*, 2021; García *et al.*, 2009; Legrand *et al.*, 2000).

Una vez calculadas las variables metoceanicas requeridas como punto de inicio para el SWAN, inicia la etapa del experimento que se refiere a obtener los pronósticos de desplazamiento horizontal de organismos flotantes (Aguilera-Méndez *et al.*, 2022; Dagestad *et al.*, 2018; Lett *et al.*, 2008) y considerar su posible afectación a las costas.

Segunda fase

Modelo de transporte

Basados en el modelo de transporte de material de libre flotación de Banas (Banas *et al.*, 2009) y en la ecuación (1) descrita por Otero para derrame de hidrocarburos (Otero *et al.*, 2015) se propone que, para un banco de sargazo con posición x_i para cualquier tiempo i , u_{sea} es la velocidad de advección de la superficie del mar en x_i , u_{wind} es la velocidad del viento a 10 metros sobre el nivel del mar en x_i , C_D es el coeficiente de resistencia al viento, K_h es la difusión de turbulencia horizontal (ajustada a $1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$),

M_{sar} indica la fricción de la masa del sargazo contra el agua ajustado a 0.1 que indica el libre movimiento y R es un número aleatorio entre 0 y 1; se agregan los componentes de fricción causados por el peso mismo del alga tanto para el escenario donde solo se aplica la hidrodinámica, Ecuación (2), y para los efectos donde se aplique el coeficiente del viento, representados en la ecuación (3). El efecto de la fricción derivada del sargazo se aplica en la fórmula de manera negativa ya que impide el libre movimiento, resultando la ecuación (4). Esta ecuación será la utilizada para el cálculo final de desplazamiento.

El coeficiente de resistencia al viento (C_D) es un coeficiente que mide de forma simplificada la resistencia al viento y al aire de un objeto; se entiende que cuanto menor es el valor del coeficiente el efecto del aire o viento sobre el objeto es mayor. En elementos que flotan libremente a nivel de mar este coeficiente se considera prácticamente nulo. Para el estudio se considera la resistencia debido a que existen partes del sargazo que se encuentran sobre el nivel del mar que pueden ofrecer ya sea resistencia o fricción a las olas debido a la acción del viento en contra o pueden acelerar su transporte si tanto la ola como el viento coinciden en dirección (Amorocho y DeVries, 1980; Zheng *et al.*, 2018). Otra variable relacionada con el objeto del estudio fue la fricción del alga (M_{sar}), ya que considerando su resistencia al movimiento del viento o las olas, la masa del vegetal ejerce junto con la gravedad, un freno a su libre traslado tornándolo en una fricción o resistencia al movimiento (Suzuki, 2011; Suzuki & Arikawa, 2011).

Debido a la variedad de condiciones y edades del alga no hay un peso exacto que la defina, mediciones recientes ubican si peso aproximado en 200 kilogramos por m^3 en condiciones de ausencia de contaminantes o metales pesados (Chávez *et al.*, 2020; Putman *et al.*, 2020; Staff, 2019); que será el valor utilizado para éste estudio, que a su vez será ajustado a la escala de la malla del visualizador y cumpliendo las condiciones de las Ecuaciones (5) y (6) debido a que no sería posible un movimiento generado por el peso en sentido opuesto mayor al de la corriente.

$$\frac{d\vec{x}_i}{dt} = \vec{u}_{sea}(x_i, t) + C_D \vec{u}_{wind}(x_i, t) + R(2K_h dt^{-1})^{1/2} \quad (1)$$

$$RM_{sar} \vec{u}_{sea}(x_i, t) \quad (2)$$

$$RM_{sar} C_D \vec{u}_{wind}(x_i, t) \quad (3)$$

$$\frac{d\vec{x}_i}{dt} = \vec{u}_{sea}(x_i, t) - RM_{sar} \vec{u}_{sea}(x_i, t) + C_D \vec{u}_{wind}(x_i, t) - RM_{sar} C_D \vec{u}_{wind}(x_i, t) + R(2K_h dt^{-1})^{1/2} \quad (4)$$

$$\vec{u}_{sea}(x_i, t) \geq RM_{sar} \vec{u}_{sea}(x_i, t) \quad (5)$$

$$C_D \vec{u}_{wind}(x_i, t) \geq RM_{sar} C_D \vec{u}_{wind}(x_i, t) \quad (6)$$

Una forma de representar un conjunto de trayectorias es utilizando el diagrama tipo espagueti, debido a que en una imagen se muestran las posibles rutas que podría seguir un cuerpo en los tiempos $t, t+1, t+2, \dots, t+n$; por lo que los datos generados después de aplicar la ecuación (4) serán introducidos al visualizador Alavai. El software cuenta con la opción de mostrar el recorrido de las diferentes trayectorias en un diagrama de espagueti o a través de una animación que transcurre en el tiempo $t, t+1, t+2, \dots, t+n'$ (donde $n' \leq n$) de los gráficos generados e indica los diferentes desplazamientos de los cuerpos flotantes dependiendo de cómo se espera que se comporte la corriente en el tiempo t .

Aplicación de la ecuación

La información de dirección y velocidad de la corriente que fue generada por el modelo SWAN con una resolución de 0.16° se utiliza para alimentar la ecuación (4) y validada por las Ecuaciones (5) y (6) que representan las restricciones de movimiento en

dirección contraria a la corriente. Por último, el resultado del proceso fue descargado en archivos con formato NcarGraphics que requiere el visualizador de trayectorias Alavai.

La ecuación (4) se evaluó para $C_D = 0.05, 0.04, 0.03, 0.02, 0.01$ y 0.0 , valores que principalmente dependen de la salinidad, viscosidad y resistencia con la superficie. Como resultado se generaron 120 matrices para cada valor de C_D en un formato de malla estructurada conteniendo la información de dirección y velocidad tanto del oleaje marino como del viento.

A manera de control para evitar errores de aplicación y de cómputo, el conjunto de pruebas para cada valor del coeficiente de fricción, fue ejecutada al menos cinco ocasiones y con ello mostrar consistencia en los resultados.

RESULTADOS

Los datos obtenidos de la aplicación de la ecuación (4) fueron introducidos en el software Alavai para representar las rutas pronosticadas para el sargazo pelágico. En la figura 5a se muestra la interpretación de Alavai, a través de un diagrama de espagueti, de la trayectoria generada en la modelación sin agregar acción del viento, es decir $C_D = 0.0$. Para los diagramas se consideró la ubicación (21.51° N, 85.55° W) como punto de inicio de la trayectoria de acuerdo con el banco de sargazo pelágico identificado; también se muestra en la figura 5b la representación del diagrama de espagueti considerando un valor para $C_D = 0.04$ o contemplando la acción del viento sobre el movimiento causado por la hidrodinámica. Como se observa la acción del viento sobre el material proporciona un empuje mayor teniendo como consecuencia un mayor arrastre además de cambios en la trayectoria del objeto flotante. Una forma adicional de visualizar la información con la que cuenta el Alavai es la que permite la creación de colonias de partículas que indicarán de forma autónoma las posibles rutas que podrían tomar cada una de las integrantes como se muestra en la figura 5c. Las partículas cambian de posición para los diferentes tiempos $t, t+1, t+2+\dots, t+n$ con la posibilidad de generar una imagen por cada Δt como se muestra en la figura 5d.

Como se mencionó, la herramienta que auxilió en la validación del estudio fue la tecnología satelital; entonces utilizando OCED se ubicó un banco de sargazo para el 01 de Julio 12:00(Z) y es mostrado en la figura 6; sus mediciones en las diferentes *MCI OLCI* fueron mayormente positivas y en ocasiones superiores a 0.1 *MCI OLCI* por lo que se consideró válido para calcular su trayectoria. Se descargaron las imágenes satelitales para realizar la comparación de las trayectorias además se tomó la información de la dirección de la marea de la ubicación y proceder a compararla con la generado por los modelos. Se encontraron bancos de sargazo circundantes a las posiciones marcadas en los diagramas de espagueti. Las imágenes satelitales en la figura 7 muestran en dónde se localizaron los bancos de sargazo pelágico. La figura 7a muestra la situación del banco de sargazo para el 3 de Julio de 2021 12:00(Z). El 5 de Julio de 2021 fue la última fecha del experimento de control, contando la imagen satelital de la figura 7b que muestra una acumulación de material.

El resultado de la comparación de los datos de las ejecuciones contra los obtenidos por la imagen satelital se presenta en la tabla 1. Como se puede observar, el valor del coeficiente de resistencia al viento que contó con un mayor número de impactos dentro del margen establecido fue de 0.04 . Es posible observar en la gráfica 1, que a mayor tiempo de modelado mayor variación en el resultado de la comparación.

Tabla 1 | Puntos de evaluación para la variable de coeficiente de resistencia al viento.

Valor C_D	Puntos a evaluar	Puntos dentro del margen $\pm 20.0^\circ$
0.05	40	26
0.04	40	34
0.03	40	30
0.02	40	31
0.01	40	26
0.0	40	33

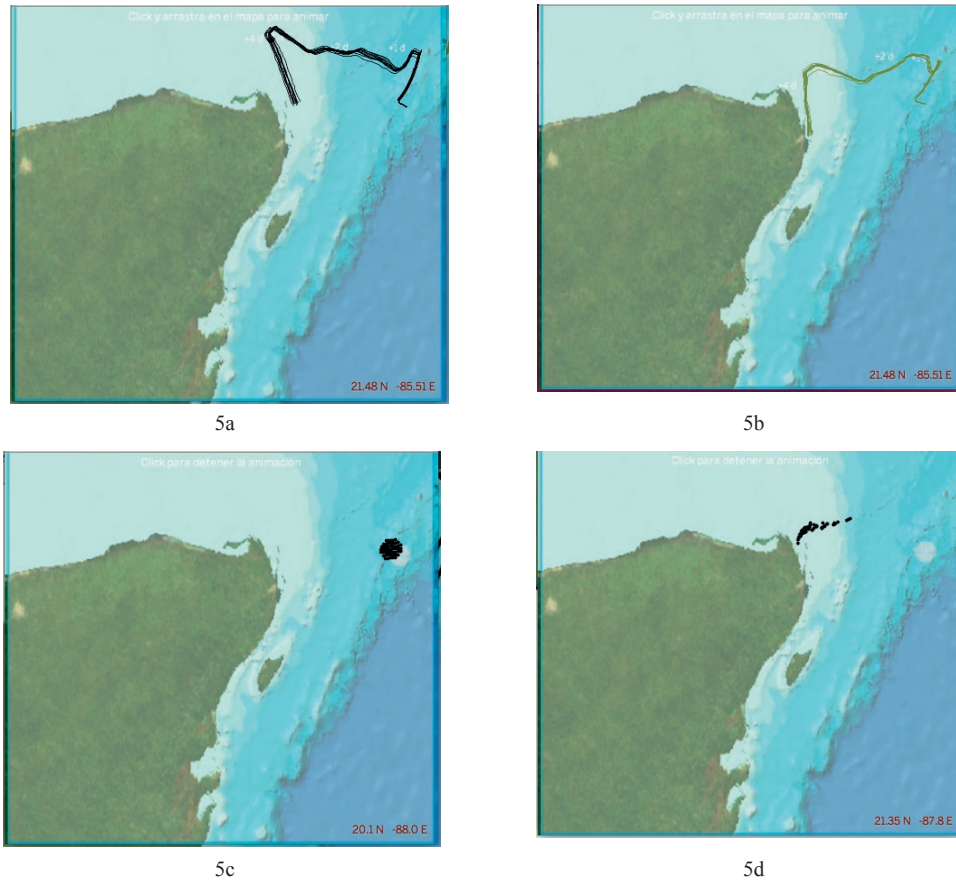
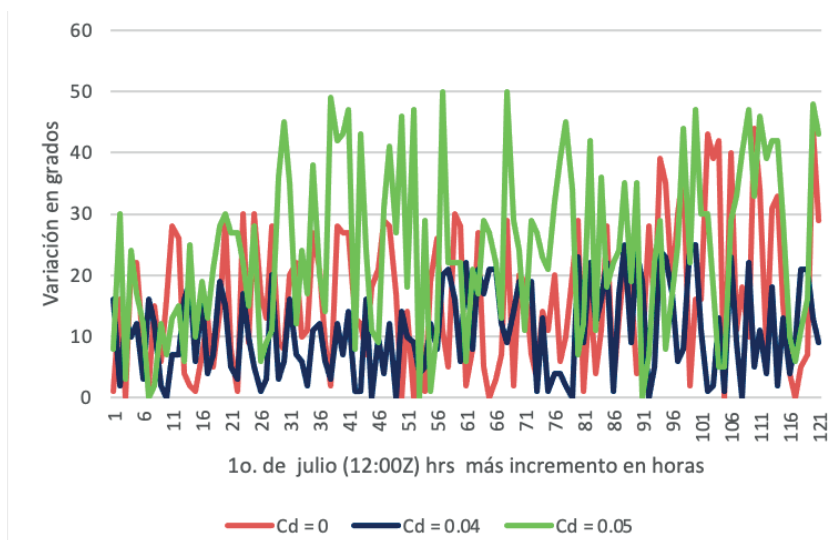


Figura 5 | Visualización del pronóstico a 120 horas de la trayectoria del sargazo a partir del 1° de Julio de 2021 utilizando Alavai, a) Diagrama tipo espagueti considerando el arrastre ocasionado por marea y oleaje; b) Diagrama tipo espagueti considerando un 0.04 de efecto de viento sobre el arrastre; c) inicio del recorrido de partículas de libre flotación que representan el movimiento del alga; d) etapa final del recorrido de acuerdo a la libre flotación. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 1 | Representación del valor de las diferencias entre el resultado del modelo contra el dato obtenido por satélite para tres coeficientes de fricción; las 120 horas representan los 5 días de modelado. Puede observarse que, pasadas las 50 horas de modelado, la gráfica comienza a mostrar una tendencia a subir la variación en grados. Fuente: elaboración propia.

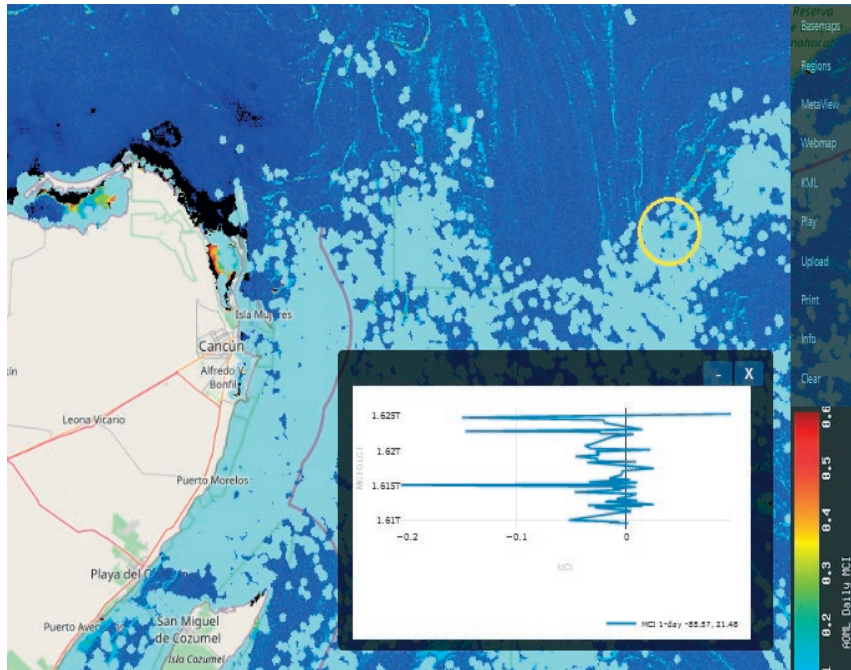


Figura 6 | Ubicación (21.51° N, 85.55° W) en imagen satelital para el 1° de Julio de 2021 del banco de sargazo seleccionado para la ejecución de los modelos de trayectoria. Para facilitar su localización, ésta se encuentra indicada en un círculo amarillo. Fuente: Archivo histórico OCED NOAA, mayo 2022.

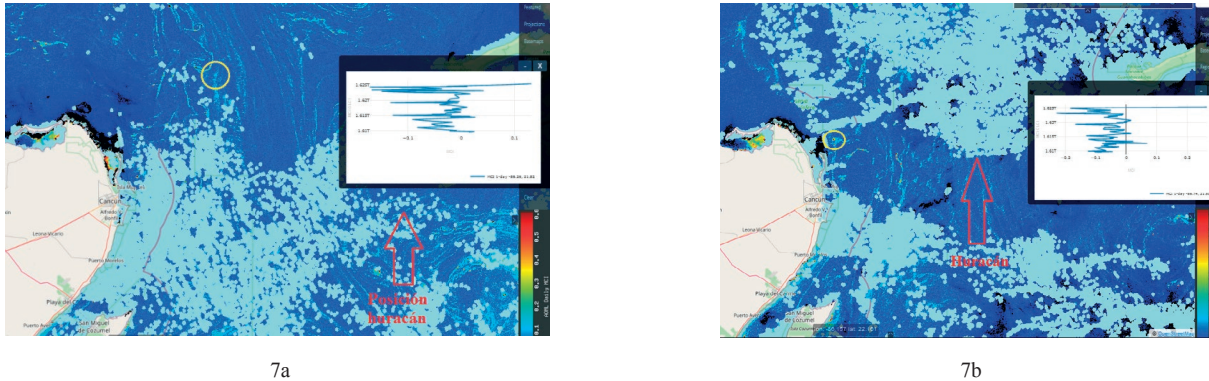


Figura 7 | Visualización en imágenes satelitales de los bancos con mayor índice MCI asociado al sargazo en diferentes fechas, a) Para el 3 de Julio, en círculo amarillo se indica la posición del banco de sargazo; b) Posición del banco de sargazo (en círculo amarillo) para el 5 de Julio. Fuente: Archivo histórico OCED NOAA, mayo 2022.

DISCUSIÓN

Es en las últimas décadas, que los estudios sobre el sargazo y el transporte de materiales de libre flotación ha llamado la atención de investigadores. Existen varios enfoques para solucionar los problemas, así tenemos que para el seguimiento del sargazo en el río Amarillo se utiliza un modelo Laplaciano completado con tecnología satelital (Kwon *et al.*, 2019); para derrames de hidrocarburos se han utilizado modelos Brownianos (Automated Data Inquiry for Oil Spills, 2017; Otero *et al.*, 2015) así como en modelos de la acuicultura (Banas *et al.*, 2009); en la aglomeración de basura plástica ha habido enfoques probabilísticos (Núñez *et al.*, 2019). En nuestro enfoque se han utilizado modelos Laplacianos a nivel micro, llevándolos en *downsizing* a modelos Brownianos soportados por tecnología satelital. La aplicación de nuevas tecnologías aunado con el desarrollo de modelos numéricos

más rápidos y precisos, permite a los investigadores corregir en tiempos muy cortos las desviaciones que ocurren en los modelos e, incluso, tomar datos en tiempo real que mejorarían las predicciones y su aplicación.

La problemática del aumento de la biomasa del sargazo no es sencilla; para dimensionar la problemática con la que se enfrentan los organismos que trabajan en la disposición del vegetal es posible calcular el peso aproximado del alga con alta concentración una vez que se ha obtenido el tamaño de la malla: considerando 450 metros en línea recta por cada lado del cuadrado se obtiene un área de 202 500 m², suponiendo una profundidad de 1 metro para el cuerpo del alga, obtendríamos 202 500 m³ que multiplicado por su peso promedio de 200 *kilogramos* por m³ obtenemos un total de 40 500 000 kilogramos. Entonces en una cuadrícula de malla se tendrá un peso de 40 500 toneladas de sargazo pelágico o el equivalente a 4050 camiones de desechos con una carga de 10 toneladas cada uno. Aquí la respuesta conlleva a nuevos problemas: solamente la capacidad para deshacerse de esa cantidad de material orgánico necesariamente generará altas cantidades de metano y bióxido de carbono, entre otros materiales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La cantidad de sargazo pelágico ubicado en el área acotada durante el periodo de estudio, acompañada por la formación del huracán generó hacia el final del periodo de estudio una acumulación mayor a la que se tenía contemplada. Si bien el modelo trazó la trayectoria a partir de una coordenada de interés, la acumulación y la dispersión del material por fenómenos de fuerza como en nuestro caso, el huracán, influyen en la trayectoria y tiempo de recorrido. Por lo que sería recomendable aumentar la resolución espacial de los resultados para obtener una mejor definición tanto de mapas como de valores de pronóstico.

Los resultados del experimento indicaron que cuando la variable $C_D=0.04$ se generaron resultados próximos a la trayectoria del objeto, que caían dentro del umbral definido. Para trabajos posteriores, cuando las condiciones del clima no contengan condiciones extraordinarias, este valor podría cambiar. Cabe destacar que el pronóstico de trayectoria que no contempla la acción directa del viento obtuvo resultados que se consideraron como buena alternativa, lo anterior se debe a que los resultados del modelo numérico consideran la acción del viento sobre la marea oceánica. En sistemas de modelación numérica complejos la estimación de valores de los diferentes parámetros se convierte en una tarea permanente debido a que las condiciones de cada ejecución varían en el tiempo; es esta variación lo que hace prioritario definir claramente el sistema que se quiere simular junto con todas las variables que participan del fenómeno.

La observación periódica del sargazo se realizó a través de monitoreo humano cuando las condiciones de navegación lo permitieron. Para obtener una mayor certeza se requiere del diseño y uso de una boya o estación transmisora que se “siembre” en el banco de sargazo que envíe constantemente su ubicación a través de cualquier sistema conocido de geolocalización, el cual permitiría contar con los datos necesarios para realizar ajustes a las variables de operación que permitan contar con modelos numéricos de mayor exactitud.

Los resultados del modelo entregaron pronósticos próximos al desarrollo del fenómeno. Si bien los factores de acumulación de material afectan directamente a la trayectoria, ésta se presentó consistente en las áreas donde la concentración de alga se mantuvo constante con respecto a su origen. Junto con la concentración del alga, se debe considerar la contaminación de la muestra con desechos plásticos u otro tipo de material de libre flotación, el cual considera un peso y masa distinto afectando directamente el posible valor de la variable de fricción. Considerando éstas observaciones, el resultado de la aplicación de las ecuaciones Brownianas al modelo de libre flotación del sargazo ha generado una muy buena expectativa para su uso en tareas de recuperación de material tanto en costas como en mar abierto.

AGRADECIMIENTOS

El autor principal del artículo agradece el apoyo económico recibido a través del programa de becas de posgrados del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), México. Con número de referencia 766292.

A la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México.

REFERENCIAS

- Agencia Espacial Europea (ESA). (n.d.). *Sentinel-3-olci*. Recuperado 5 de enero, 2023, de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-olci/olci-instrument>
- Aguilera-Méndez, J.M., Juárez-Toledo, C., Martínez-Carrillo, I., & Vera-Popoca, R.I. (2021). Generation of unstructured meshes using Delaunay triangles for tidal analysis of the port of Acapulco, Mexico. *Revista de Simulación y Laboratorio*, 8(24), 20–27. <https://doi.org/10.35429/JSL.2021.24.8.20.27>
- Aguilera-Méndez, J.M., Juárez-Toledo, C., Martínez-Carrillo, I., & Vera-Popoca, R.I. (2022). Use of unstructured meshes for wave height and particles horizontal displacement analysis in central zone Veracruz, Mexico. *ECORFAN Journal-Taiwan*, 6(11), 20–27.
- Amoroch, J., & DeVries, J.J. (1980). A new evaluation of the wind stress coefficient over water surfaces. *Journal of Geophysical Research*, 85(C1), 433. <https://doi.org/10.1029/JC085iC01p00433>
- Arango, D.H.G., & Shchepetkin, D.A.F. (n.d.). *Regional Ocean Modeling System*. Recuperado 9 de enero, 2023, de <https://www.myroms.org/>
- Automated Data Inquiry for Oil Spills. (2017). <https://response.restoration.noaa.gov/adios-desktop>
- Banas, N.S., & Hickey, B.M. (2005). Mapping exchange and residence time in a model of Willapa Bay, Washington, a branching, macrotidal estuary. *Journal of Geophysical Research*, 110(C11), C11011. <https://doi.org/10.1029/2005JC002950>
- Banas, N.S., Hickey, B.M., MacCready, P., & Newton, J.A. (2004). Dynamics of Willapa Bay, Washington: A Highly Unsteady, Partially Mixed Estuary. *Journal of Physical Oceanography*, 34(11), 2413–2427. <https://doi.org/10.1175/JPO2637.1>
- Banas, Neil S., McDonald, P.S., & Armstrong, D.A. (2009). Green Crab Larval Retention in Willapa Bay, Washington: An Intensive Lagrangian Modeling Approach. *Estuaries and Coasts*, 32(5), 893–905. <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9175-7>
- Binding, C.E., Greenberg, T.A., & Bukata, R.P. (2013). The MERIS Maximum Chlorophyll Index; its merits and limitations for inland water algal bloom monitoring. *Journal of Great Lakes Research*, 39, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2013.04.005>
- Binding, C.E., Greenberg, T.A., McCullough, G., Watson, S.B., & Page, E. (2018). An analysis of satellite-derived chlorophyll and algal bloom indices on Lake Winnipeg. *Journal of Great Lakes Research*, 44(3), 436–446. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.04.001>
- Booij, N., Ris, R.C., & Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R.E., van Tussenbroek, B.I., Francisco, V., Estévez, M., Celis, L.B., Monroy-Velázquez, L.V., Leal-Bautista, R., Álvarez-Filip, L., García-Sánchez, M., Masia, L., & Silva, R. (2020). Massive Influx of Pelagic Sargassum spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities. *Water*, 12(10), 2908. <https://doi.org/10.3390/w12102908>
- Dagestad, K.-F., Røhrs, J., Breivik, Ø., & Ådlandsvik, B. (2018). OpenDrift v1.0: a generic framework for trajectory modelling. *Geoscientific Model Development*, 11(4), 1405–1420. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018>
- ECMWF. (n.d.). *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. Recuperado 9 de enero, 2023, from <https://www.ecmwf.int>
- Fyrillas, M.M., & Nomura, K.K. (2007). Diffusion and Brownian motion in Lagrangian coordinates. *Journal of Chemical Physics*, 126(16), 1–9. <https://doi.org/10.1063/1.2717185>
- García, F., Palacio, C., & García, U. (2009). Unstructured Mesh Generation for Numeric Models Implementation. *Dyna*, 76(157), 17–25.
- GEBCO Compilation Group. (2021). *GEBCO*. <https://doi.org/10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f>

- General NOAA Operational Modeling Environment*. (2022). Recuperado 20 de enero, 2023, de <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/response-tools/gnome.html>
- George Mason University (GMU), & National Space Agency (NASA). (n.d.). *GrADS*. Recuperado 6 de enero, 2023, de <http://cola.gmu.edu/grads/>
- Global Forecast System*. (n.d.). Recuperado 30 de noviembre de 2022, de https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php
- Huang, Y., Weisberg, R.H., Zheng, L., & Zijlema, M. (2013). Gulf of Mexico hurricane wave simulations using SWAN: Bulk formula-based drag coefficient sensitivity for Hurricane Ike. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(8), 3916–3938. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20283>
- Johns, E.M., Lumpkin, R., Putman, N.F., Smith, R.H., Muller-Karger, F.E., T. Rueda-Roa, D., Hu, C., Wang, M., Brooks, M.T., Gramer, L.J., & Werner, F.E. (2020). The establishment of a pelagic Sargassum population in the tropical Atlantic: Biological consequences of a basin-scale long distance dispersal event. *Progress in Oceanography*, 182(September 2019), 102269. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102269>
- Key, K. (2010). *Triangle* (1.9). <http://marineemlab.ucsd.edu>
- Kwon, K., Choi, B.-J., Kim, K.Y., & Kim, 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(4), 315–326. <https://doi.org/10.4490/algae.2019.34.12.11>
- Legrand, S., Legat, V., & Deleersnijder, E. (2000). Delaunay mesh generation for an unstructured-grid ocean general circulation model. *Ocean Modelling*, 2(1–2), 17–28. [https://doi.org/10.1016/S1463-5003\(00\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S1463-5003(00)00005-6)
- Lett, C., Verley, P., Mullon, C., Parada, C., Brochier, T., Penven, P., & Blanke, B. (2008). A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. *Environmental Modelling & Software*, 23(9), 1210–1214. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.02.005>
- Lin, T., Pujos, C., Ou, C., Bi, W., Calvayrac, F., & Wang, Q.A. (2011). Path probability for a Brownian motion. *Chinese Science Bulletin*, 56(34), 3736–3740. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4803-6>
- Marta-Almeida, M., Ruiz-Villarreal, M., Otero, P., Cobas, M., Peliz, A., Nolasco, R., Cirano, M., & Pereira, J. (2011). OOF_E: A Python engine for automating regional and coastal ocean forecasts. *Environmental Modelling & Software*, 26(5), 680–682. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.11.015>
- MM5 Homepage. (2004). <https://a.atmos.washington.edu/~ovens/newwebpage/mm5-home.html>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (n.d.-a). *Global Forecast System (GFS) [0.5 Deg.]*. Recuperado 7 de enero, 2023 de <https://data.noaa.gov/dataset/dataset/global-forecast-system-gfs-0-5-deg>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (n.d.-b). *NOMADS*. Recuperado 7 de enero, 2023, de <https://nomads.ncep.noaa.gov/>
- National Space Agency (NASA). (n.d.). *OLCI*. Recuperado 5 de enero, 2023, de <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/olci>
- Núñez, P., García, A., Mazarrasa, I., Juanes, J.A., Abascal, A.J., Méndez, F., Castanedo, S., & Medina, R. (2019). A methodology to assess the probability of marine litter accumulation in estuaries. *Marine Pollution Bulletin*, 144, 309–324. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.077>
- Otero, P., Banas, N.S., & Ruiz-Villarreal, M. (2015). A surface ocean trajectories visualization tool and its initial application to the Galician coast. *Environmental Modelling & Software*, 66, 12–16. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.006>
- Putman, N.F., Lumpkin, R., Olascoaga, M.J., Trinanés, J., & Goni, G.J. (2020). Improving transport predictions of pelagic Sargassum. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 529, 151398. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2020.151398>

- Schwartz, M., & Brustein, R. (1988). From Lagrangian to Brownian motion. *Journal of Statistical Physics*, 51(3–4), 585–613. <https://doi.org/10.1007/BF01028474>
- Shewchuk, J.R. (2002). Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation. *Computational Geometry*, 22(1–3), 21–74. [https://doi.org/10.1016/S0925-7721\(01\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0925-7721(01)00047-5)
- Signoret, M., Bulit, C., & Pérez, R. (1998). Patrones de distribución de clorofila a y producción primaria en aguas del Golfo de México y del Mar Caribe. *Hidrobiológica*, 8(2), 81–88. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57880201>
- Skamarock WC, *et al.* (2008). A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-468+STR. *Natl. Cent. for Atmos. Res. Boulder, Colorado*.
- Staff. (2019, July 10). 10 cosas que sabemos del sargazo. *El Universal*, 1. <https://www.eluniversal.com.mx/destinos/13-cosas-que-sabemos-del-sargazo-en-las-playas-de-quintana-roo>
- Suárez, A.M., & Martínez-Daranas, B. (2018). La problemática del Sargazo en el caribe. In *La problemática del Sargazo en el caribe. Adaptación basada en Ecosistemas: alternativa para la gestión sostenible de los recursos marinos y costeros del Caribe* (Vol. 18, pp. 82–94). Instituto de Oceanología.
- Suzuki, T. (2011). *Wave dissipation over vegetation fields. PhD thesis*. TUDelft.
- Suzuki, T., & Arikawa, T. (2011). Numerical analysis of bulk drag coefficient in dense vegetation by immersed boundary method. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), 48. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.waves.48>
- The WAVEWATCH Development Group (WW3DG). (2019). User manual and system documentation of WAVEWATCH III R version 6.07. In *Tech. Note 333*.
- WaveWatch III (WW3-GW) Global Wave Model. (2019). <https://data.noaa.gov/dataset/dataset/wavewatch-iii-ww3-global-wave-model2>
- Zheng, X., Mayerle, R., Wang, Y., & Zhang, H. (2018). Study of the wind drag coefficient during the storm Xaver in the German Bight using data assimilation. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 83, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2018.06.001>