

Implementación de redes de observación oceanográficas (físicas, geoquímicas y ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas a la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas del Golfo de México

Fondo Sectorial SENER – CONACYT – Hidrocarburos

Proyecto 201441

LINEA DE ACCIÓN 3

Modelos numéricos de circulación y biogeoquímica

Subproyecto 3.2.

Modelo de circulación oceánica y dispersión de hidrocarburos

Informe técnico parcial de actividad 224

Simulaciones con modelos de alta resolución de mallas estructuradas y no estructuradas, con su implementación para regiones de interés específico dentro del Golfo de México

Participantes:

Dr. Jorge Zavala Hidalgo

M.C. Ovel Díaz García

M.C. Oscar Esli Jurado de Larios

Grupo Interacción Océano – Atmósfera

Centro de Ciencias de la Atmósfera – U.N.A.M

JUNIO 2017



Índice

1 Adaptación del módulo de derrame de petróleo desarrollado en el Grupo de Interacción Océano-Atmósfera (IOA) para utilizar las salidas del modelo ADCIRC.....	3
Introducción.....	3
Requerimientos.....	3
Modelos de mallas no estructuradas.....	4
Características de las salidas del modelo ADCIRC.....	4
- Modificaciones al módulo de derrame de petróleo.....	5
VectorFieldsADCIRC.m.....	5
advectParticlesADCIRC.m.....	6
interpTRI1init.m y interpTRI1p.m.....	6
insideDomain.m.....	7
findTRIParticleIni2.m.....	7
Visualización.....	7
2 Simulación de derrame de petróleo en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) usando el módulo de derrame de petróleo y las salidas del modelo ADCIRC.....	8
Características del área de estudio.....	8
Simulación realizada.....	9
Resultados.....	12
Conclusiones.....	15
Trabajos futuros.....	15
Referencias.....	16

1. Adaptación del módulo de derrame de petróleo desarrollado en el Grupo de Interacción Océano-Atmósfera (IOA) para utilizar las salidas del modelo ADCIRC.

Introducción

Para el presente trabajo tomamos como base el módulo de derrame de petróleo OilSpill v.2, desarrollado en el Grupo IOA, del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA). Este módulo forma parte del trabajo realizado en la Actividad 79 de la Etapa I del proyecto. El objetivo del mismo es simular eventos de derrame de petróleo en el Golfo de México.

El módulo emplea un algoritmo Lagrangiano de rastreo de partículas, el cual requiere campos de velocidad de las corrientes oceánicas y del viento. El modelo Lagrangiano usa un paso de tiempo a elección del usuario y un esquema Runge-Kutta de segundo orden. Al viento se le añade un ángulo de deflexión para considerar el efecto Coriolis (Samuels *et al.*, 1982). También se añade un desplazamiento aleatorio para considerar el efecto de difusión. La simulación del derrame se puede realizar a nivel de superficie y a distintas profundidades preestablecidas. Además, el modelo considera ocho componentes del petróleo en función de su densidad (Le Hénaff *et al.* 2012), y puede incluir distintos tipos de decaimiento (evaporación, biodegradación, quema y recolección).

Para mayor referencia acerca del módulo, referirse al Reporte Final de la Actividad 79 de la Etapa I del proyecto.

Requerimientos

El módulo OilSpill v.2 está escrito en MATLAB por lo que puede ser ejecutado en cualquier sistema operativo con una licencia de MATLAB. El software se probó en las versiones de MATLAB 2014b - 2016b para Windows y Linux. Las modificaciones agregadas a este módulo en el presente trabajo no cambian los requerimientos, solo señalar que la función utilizada para la interpolación de los campos de vientos y de corrientes fue añadida a MATLAB a partir de la versión 2013a.

Modelos de mallas no estructuradas

Como parte del Reporte entregado para la Actividad 82 al cierre de la primera Etapa del proyecto, se describió la implementación de dos modelos de mallas no estructuradas para el estudio de procesos en la

zona costera del Golfo de México. Estos modelos son el ADvanced CIRCulation ocean model (ADCIRC) y el Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM). Estos modelos han sido muy utilizados para los estudios de inundación por marea de tormenta.

Al ser mallas no estructuradas, en este caso conformadas por triángulos, las mismas pueden describirse como una serie de puntos o **nodos**, y los triángulos o **elementos** que los unen.

Existen diferencias importantes en las salidas de ambos modelos. La que más nos interesa para el módulo de derrame de petróleo son las relativas a los campos de velocidad de las corrientes. En el caso del modelo ADCIRC, todas las variables de salida son calculadas en los **nodos** de la malla. Pero en el modelo FVCOM, algunas variables son calculadas en los nodos y otras, como las velocidades, son calculadas en el centro del **elemento**.

Por este motivo, y por el hecho de contar con muchas más simulaciones realizadas con el modelo ADCIRC que con el modelo FVCOM, es que decidimos adaptar el módulo de derrame de petróleo para que utilice las salidas del modelo ADCIRC. Sin embargo, después de todo el trabajo realizado, la adaptación del módulo para que utilice las salidas del modelo FVCOM será mucho más sencilla.

Características de las salidas del modelo ADCIRC

Al ejecutar el modelo ADCIRC se puede establecer los ficheros de salida que se quiere generar. Los principales ficheros de salida, tal y como los describe la documentación del modelo, son:

- Elevation Time Series at All Nodes in the Model Grid (fort.63)
- Depth-averaged Velocity Time Series at All Nodes in the Model Grid (fort.64)
- Atmospheric Pressure Time Series at All Nodes in the Model Grid (fort.73)
- Wind Stress or Velocity Time Series at All Nodes in the Model Grid (fort.74)

De estos ficheros, usamos el de corriente promediada en la vertical (fort.64), y el de velocidad del viento (fort.74). Ambos ficheros contienen las salidas horarias de sus respectivas variables. Estos ficheros están en formato ASCII, aunque también se le puede pedir al modelo que la salida sea directamente en formato NetCDF o utilizar un programa escrito en FORTRAN que convierte las salidas en formato ASCII a NetCDF. Para el módulo de derrame usamos las salidas en formato NetCDF. Los ficheros NetCDF fueron separados en ficheros diarios mediante el uso de la utilidad NCO, con lo que se obtuvieron ficheros con 24 datos cada uno.

El fichero de velocidad del viento (fort.74) contiene los valores de las componentes del viento que se utilizaron para forzar cada nodo de la malla, con la frecuencia temporal con la que se haya decidido guardarlos. Esto es muy útil, pues el ADCIRC admite muchos formatos iniciales de forzamiento meteorológico, que pueden ser: en cada nodo, en formato de matriz regular, o en formato de trayectoria de huracán (*best-track*). Tanto cuando recibe una matriz regular o un archivo de trayectoria de huracán, el modelo utiliza funciones internas para interpolar o crear en tiempo real los forzamientos meteorológicos en cada nodo.

Una de las características particulares de las salidas de estos modelos es que las variables son principalmente vectores, y no matrices como es el caso de las salidas de los modelos de mallas estructuradas. Esto agrega una dificultad adicional al momento de procesarlas, pues se necesitan softwares que permitan graficar a través de contornos variables que se encuentran en puntos dispersos o *scatters*. Hasta el momento hemos encontrado que tanto MATLAB como NCL son adecuados para este trabajo, siendo este último el que más facilita el trabajo para cuestiones de automatización en clústers y por el tema de las licencias, al ser un software libre desarrollado por NCAR.

- Modificaciones al módulo de derrame de petróleo

Se realizaron diversas modificaciones al módulo de derrame de petróleo OilSpill v.2 con el fin de que se pudieran utilizar las salidas del modelo ADCIRC. A continuación aparece la descripción y justificación de las mismas.

VectorFieldsADCIRC.m

Se modificó la clase *VectorFields.m*, la cual tiene como función leer datos de velocidad de corrientes oceánicas y velocidad del viento de los ficheros de salida del modelo HYCOM (las cuales se encuentran en una malla estructurada), para posteriormente interpolar estos datos temporal y espacialmente para cada partícula. La clase modificada fue nombrada *VectorFieldsADCIRC.m*, la cual realiza la misma función que la clase *VectorFields* original, pero leyendo datos de una malla no estructurada, en este caso particular, de salidas del modelo ADCIRC.

La primer modificación fue el cambio de lectura de una malla regular de latitudes y longitudes a la lectura de tres vectores: el primero incluye los 3 números de nodos correspondientes a cada elemento, y los restantes incluyen la longitud y latitud correspondiente a cada nodo. Tanto los nodos de cada elemento como sus lat/lon asociados son atributos de instancia de la clase *VectorFieldsADCIRC*.

Ya que las salidas de HYCOM tienen una frecuencia de corrientes diaria, y de vientos cada 3 horas mientras que las salidas de ADCIRC tienen frecuencia horaria tanto para corrientes como para vientos, fue necesario modificar el método de interpolación temporal, quedando uno donde se toma en cuenta el paso de tiempo para la elección de los archivos a leer.

Los métodos de la clase *VectorFieldsADCIRC* fueron modificados para realizar adicionalmente la lectura de los nodos que componen a la costa del dominio, así como de una tabla de vecinos para cada elemento. Se inicializa también una triangulación del dominio necesaria para realizar la interpolación espacial de los nodos a las partículas.

advectParticlesADCIRC.m

Se modificó la función *advectParticles.m*, la cual toma la posición de cada partícula, los campos de velocidad y la configuración temporal del modelo para realizar una interpolación espacial de los campos de vientos a las posiciones de las partículas, y mediante un esquema Runge Kutta mover las partículas a una nueva posición. La función modificada fue nombrada *advectParticlesADCIRC.m*, la cual realiza el mismo procedimiento que la función original, pero con una manera diferente de interpolación espacial que es compatible con la malla no estructurada.

Para poder usar esta función con una malla no estructurada fue necesario cambiar la manera de interpolar espacialmente los campos de velocidad a cada una de las posiciones de las partículas. Para esto se generaron una serie de funciones de interpolación que son llamadas dentro de esta función, las cuales toman la posición de las partículas y los campos de velocidad originales y regresan la velocidad interpolada a la posición de cada partícula.

interpTRI1init.m y interpTRI1p.m

Se desarrollaron dos funciones para la interpolación espacial de campos de velocidad en mallas no estructuradas necesaria para la función *advectParticlesADCIRC.m*. La primer función, *interpTRI1init.m*, recibe las posiciones lat/lon de cada nodo de la malla no estructurada y los utiliza para crear una triangulación de la malla. La segunda función, *interpTRI1p.m*, recibe la triangulación generada por *interpTRI1init.m*, la posición de las partículas y el campo de velocidades a interpolar y realiza la interpolación espacial a cada una de las posiciones de las partículas haciendo uso de la función interna de MATLAB *scatteredInterpolant*.

Por cuestiones de optimización, la función *interpTRI1init.m* es llamada únicamente una vez (al iniciar una simulación con el módulo), mientras que la función *interpTRI1p.m* es llamada cada vez que se necesita interpolar el campo de velocidades a las posiciones de las partículas.

insideDomain.m

Se desarrolló una función (*insideDomain.m*) que permite discernir si una partícula después de ser movida se encuentra fuera del dominio válido de la simulación de ADCIRC. El dominio válido se definió como el dominio en donde los 3 nodos de cada elemento tienen corrientes válidas. Lo anterior fue necesario para tomar en cuenta que pueden existir elementos no necesariamente mojados en una parte del dominio, sobre todo en donde se colocaron elementos en tierra para ver una posible inundación por marea de tormenta.

La función *insideDomain.m* primero revisa si las nuevas posiciones dadas por la función *advectParticlesADCIRC.m* de las partículas caen dentro del polígono que comprende al dominio de la simulación ADCIRC. De no cumplirse esta condición la función no permite que las partículas avancen a la nueva posición, sino que se quedan en la posición original. Posteriormente se hace uso de la función *findTRIParticleIni2.m* para encontrar los elementos que contienen a cada partícula para revisar que los

nodos de estos elementos contengan corrientes válidas. En caso de que no se cumpla esta condición, tampoco se permite moverse a la partícula.

findTRIParticleIni2.m

Se desarrolló una función que encuentra en que elemento está cada partícula soltada por la simulación. Esta función, llamada *findTRIParticleIni2.m*, recibe la triangulación generada en *VectorFieldsADCIRC* y la posición de las partículas haciendo uso de la función interna de MATLAB *pointLocation* da como resultado el número del elemento que contiene a la partícula.

Visualización

Para complementar el trabajo de visualización en 3D y 2D existentes en el módulo de dispersión de petróleo, se desarrolló un método en la clase *VisualizeParticles.m* que permite realizar una visualización de las partículas relativas a la línea de costa con los vectores de corriente y de viento superpuestos. Esta visualización permite discernir mejor la interacción entre las partículas con los campos de viento y de corrientes oceánicas. Para solucionar el problema de visualizar campos de una malla no estructurada como vectores, primero se interpolan los datos de corriente y viento a una malla regular de intervalo definido (en este caso 0.5 grados) y posteriormente se hace la visualización de los vectores usando este nuevo campo interpolado.

2. Simulación de derrame de petróleo en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) usando el módulo de derrame de petróleo y las salidas del modelo ADCIRC.

Características del área de estudio

El Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) es el sistema arrecifal de mayor tamaño en la región central del Golfo de México (Tunnell, 1992). Este sistema está ubicado en la zona frente a los municipios de Veracruz, Boca del Río y Alvarado, dentro del estado de Veracruz (Figura 1). El SAV no solo alberga la mayor biodiversidad de especies arrecifales en la zona oeste del GM, sino que varias especies protegidas únicas en el mundo residen en este sistema (Horta-Puga y J.L. Tello-Mussi, 2009). Este sistema es también la base ecológica en la que se cimientan las actividades pesqueras, de buceo deportivo y de turismo de playa a lo largo de la costa del estado de Veracruz. Los servicios ecológicos y ambientales que proporciona este sistema son tan importantes que se estima que el valor económico de estos asciende a los US \$290,500,000 estimada para el año 2009. (CEMDA, 2011).

Debido a la cercanía del SAV con el puerto de Veracruz, este presenta una serie de problemas ambientales que ponen en riesgo de degradación el arrecife. En 2012, Ortiz-Lozano determinó que existen por lo menos 17 problemas ambientales en el SAV, siendo uno de estos la contaminación generada por productos derivados de aceites y petróleo. Este estudio encontró 3 diferentes causas de este problema: Derrames accidentales de petróleo dentro del SAV, transporte de petróleo por corrientes oceánicas y manejo erróneo de combustible por barcos locales.

La gran actividad de buques petroleros que transportan petróleo y sus productos al puerto de Veracruz hace que un derrame accidental de petróleo sea un riesgo latente dentro del SAV. Un ejemplo de un accidente que podría llevar a un derrame petrolero ocurrió el 24 de septiembre del año 2016, cuando el buque Burgos, propiedad de PEMEX, se incendió frente a las costas de Boca del Río, a 7 millas del puerto de Veracruz. Esta embarcación transportaba más de cien mil barriles de combustible, los cuales no se derramaron en el océano (Excelsior, 2016).

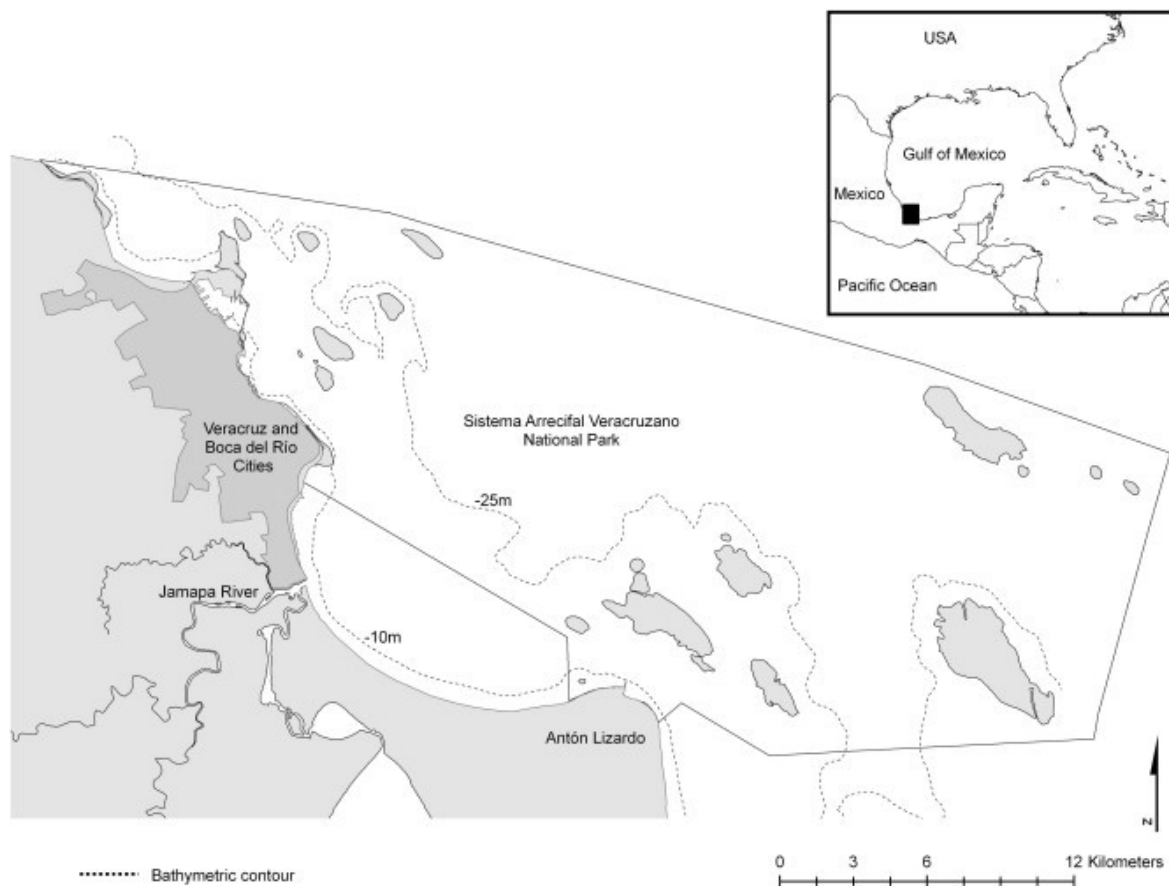


Figura 1. Localización del Sistema Arrecifal Veracruzano en el Golfo de México. (Tomado de Ortiz-Lozano 2012).

Simulación realizada

Para probar las modificaciones del módulo OilSpill, se trabajó en un escenario en donde primero un incidente similar al del buque Burgos resulte en un derrame catastrófico de petróleo y después un ciclón tropical categoría 3 golpee la costa de Veracruz, amplificando el transporte del petróleo derramado. Para el derrame se utilizó la misma base de datos del derrame de BP usado en las simulaciones de la primera versión del módulo OilSpill (véase Reporte de la Actividad 80, Etapa I). El uso de ADCIRC para modelar las corrientes en este escenario es preferible al uso de HYCOM, debido a la mayor resolución de la malla usada por el modelo ADCIRC en el área de estudio, con resoluciones variables en el SAV de 50 a 1000 metros.

Se utilizaron algunas de las salidas de las simulaciones realizadas para el artículo en preparación de Díaz-García *et al.*, 2017. En el informe entregado en Enero de 2017 de la Actividad 82 de este proyecto se dan detalles de estas simulaciones. En ese estudio se creó una malla del Sur del Golfo de México con alta

resolución en la zona de la ciudad de Veracruz y el SAV (Figuras 2 y 3). Para las simulaciones se crearon huracanes hipotéticos que varían en cuanto a su trayectoria, intensidad, velocidad de desplazamiento y punto de arribo a tierra. En estas simulaciones no se incluyó marea, ni aportes de ríos, ni flujos en la frontera abierta, ni ningún otro forzamiento que no fuera el efecto directo del huracán (campo de vientos en superficie y presión atmosférica). Este forzamiento se obtiene transformando la información tipo best-track en un vórtice simétrico a través de formulaciones internas en el modelo ADCIRC.

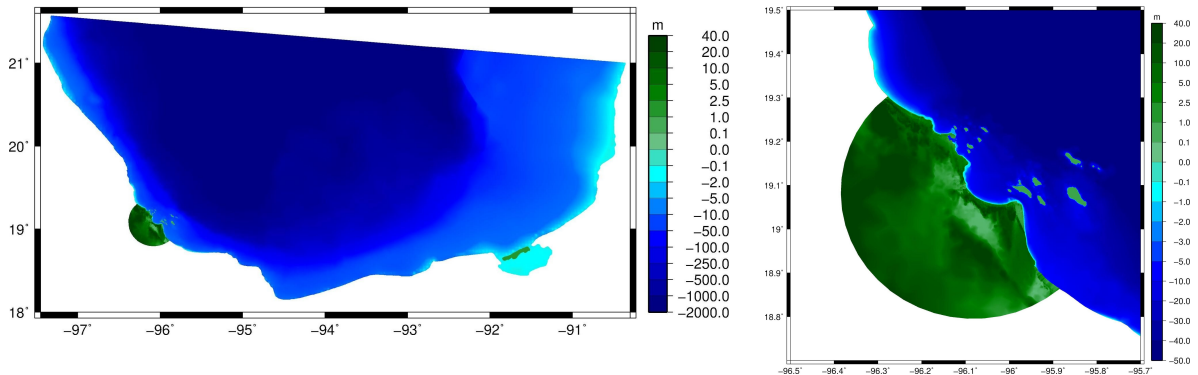


Figura 2. Batimetría y topografía de la malla no estructurada del Sur del Golfo de México usada para este estudio. El dominio completo (izquierda) y un acercamiento a la zona de mayor resolución (derecha).

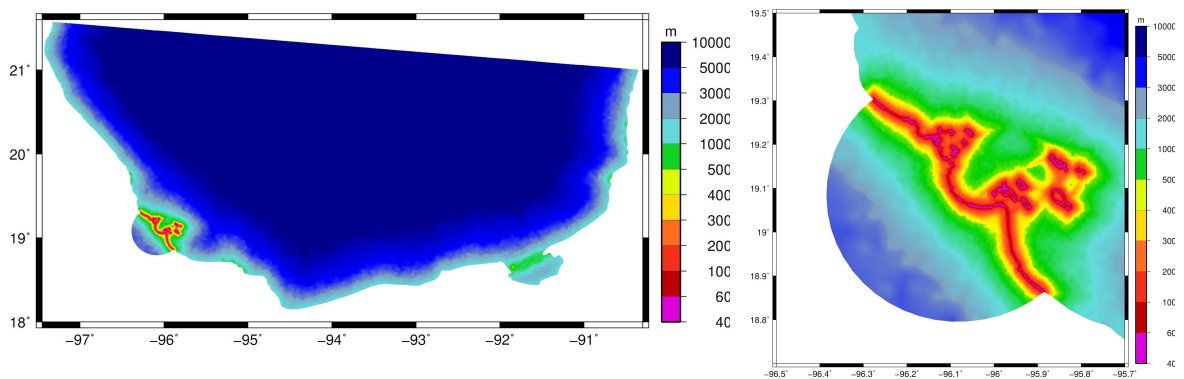


Figura 3. Espaciado de los nodos de la malla en metros. El dominio completo (izquierda) y un acercamiento a la zona de mayor resolución (derecha).

Para todas las simulaciones se utilizó la configuración del modelo ADCIRC 2DDI, que resuelve las ecuaciones de momento en dos dimensiones integradas en la vertical. La duración de estas simulaciones es de 7 días, 5 días antes y 2 días después de que el huracán toque tierra. El paso de tiempo utilizado es de 1 segundo. Las salidas se establecieron cada una hora. El tiempo real de cálculo varió entre 20 y 22 minutos usando los clúster Omoteotl (del CCA) y Miztli (de la UNAM), con 32 o 64 cores, según la disponibilidad.

Una vez obtenidos los ficheros fort.64 y fort.74 del modelo ADCIRC, se inició el módulo OilSpill v2 para realizar una simulación de 5 días de dispersión del petróleo. La localización del derrame dentro del SAV se puede observar en la Figura 4. La configuración utilizada para la simulación está detallada en la siguiente tabla:

Tabla 1: Configuración de la simulación de derrame de petróleo.		
Parámetro	Nombre de variable en <i>modelConfig</i>	Valor utilizado
Ubicación del derrame	lat,lon	19.1965 N, -96.08W
Fecha de inicio del derrame	startDate	23-04-2010
Fecha de fin del derrame	endDate	28-04-2010
Tipo de modelo de fichero de entrada	model	ADCIRC
Barriles por cada partícula	barrelsPerParticle	100
Paso de tiempo del módulo	timeStep	Variable (0.5, 1, 2 o 3 horas)
Niveles de profundidad de las partículas	depths	Superficial (0)
Número de componentes de petróleo	totComponents	8
Proporción de cada componente	components	C1=10%,C2=10%,C3=10%,C4=10%,C5=10%,C6=10%,C7=10%,C8=30%
Dispersión inicial de partículas	dispersion	0.05 (en grados)
Valor de difusión turbulenta	turbulentDiff	1
Factor de contribución del viento	windcontrib	0.035
Parámetro de decaimiento por evaporación	decay.evaporate	1
Parámetro de decaimiento por recolección	decay.collected	1
Parámetro de decaimiento por quema	decay.burned	1
Radio de quema en Km	decay.burned_radius	3
Parámetro de decaimiento por degradación	decay.exp_degradation	1

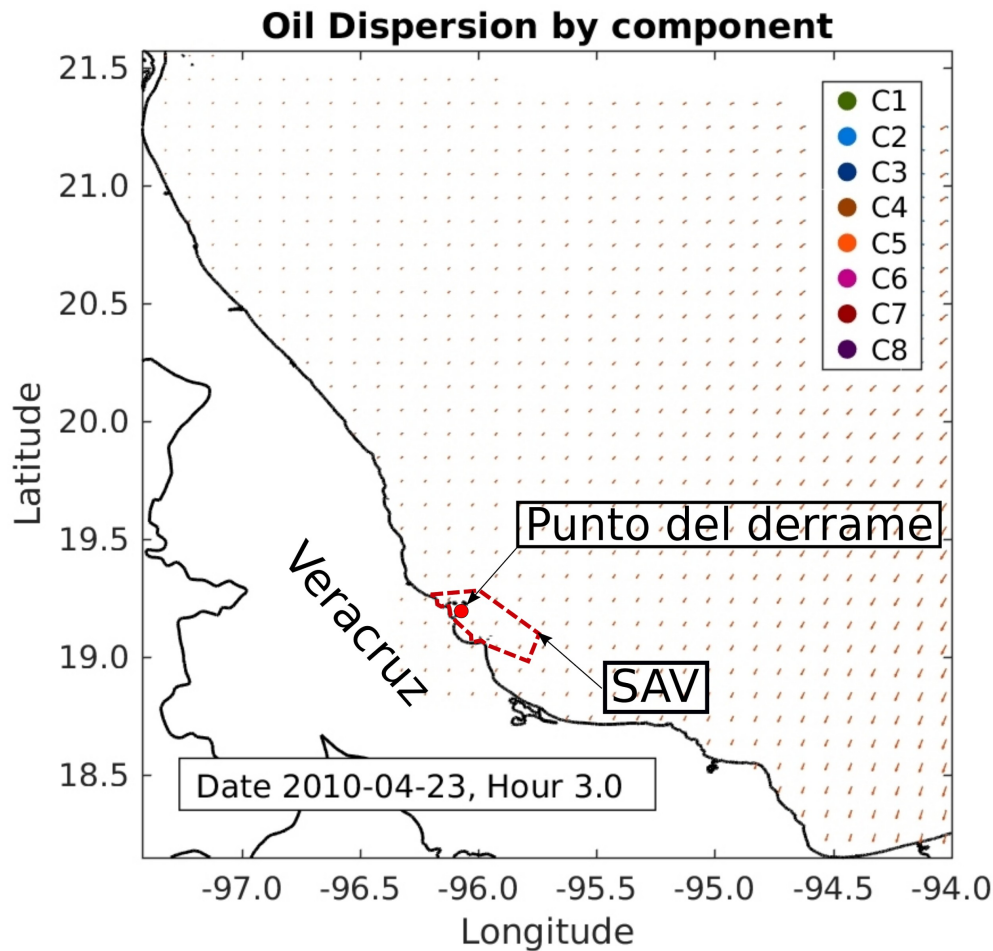


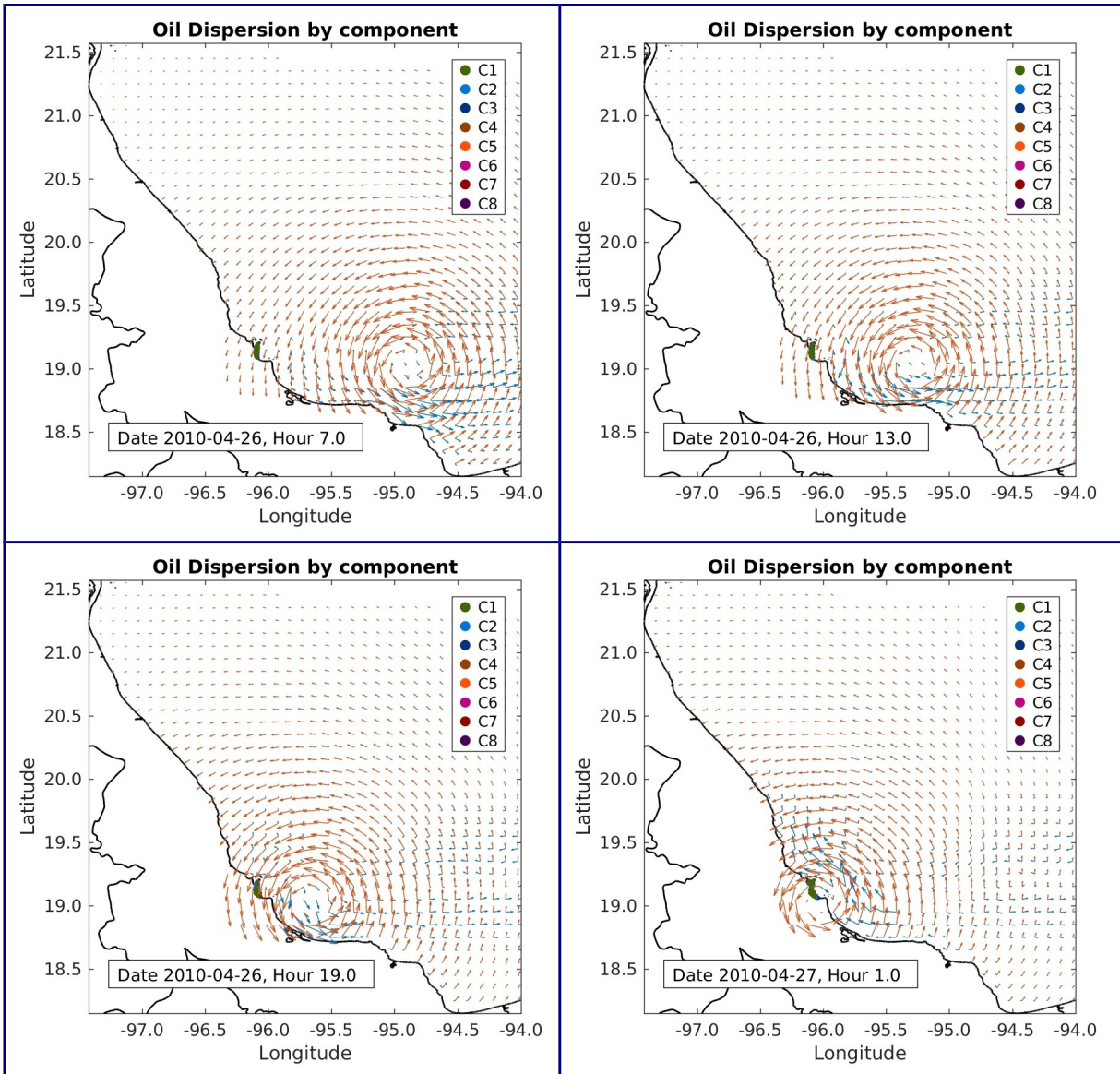
Figura 4: Ubicación del derrame de petróleo dentro del Sistema Arrecifal Veracruzano.

Resultados

La figura 5 muestra el resultado de la simulación del módulo de derrame de petróleo. Los resultados muestran que al principio de la simulación, cuando no ha llegado la señal del huracán, las partículas se mantienen cercanas a la zona del derrame. Conforme el centro del huracán se acerca a la zona del derrame el flujo hacia el sur del huracán comienza a forzar a las partículas a moverse hacia el sur a lo largo de la costa. Al llegar el centro del huracán a la zona de derrame las partículas comienzan a dispersarse horizontalmente, alejándose de la costa y generando un abanico más amplio de dispersión. Cuando la parte trasera del huracán llega a la zona del derrame las corrientes hacia el norte generan un movimiento sostenido de las partículas hacia el norte, pero debido a la dispersión horizontal de las partículas, estas ya no se mantienen restringidas en la vecindad de la zona costera, sino que se genera una pluma de aproximadamente 50 km de extensión horizontal que se desplaza hacia el norte.

Para la representación visual de los campos de corrientes y de vientos creamos una malla regular de 0.5 grados de resolución espacial, a la que interpolamos los datos que obtenemos de las salidas del modelo ADCIRC (ficheros fort.64 y fort.74).

Este resultado pronostica que para nuestro escenario de desastre, el SAV quedaría fuertemente contaminado por el derrame del petróleo, ya que las partículas se transportaron a gran parte del sur y el norte del SAV.



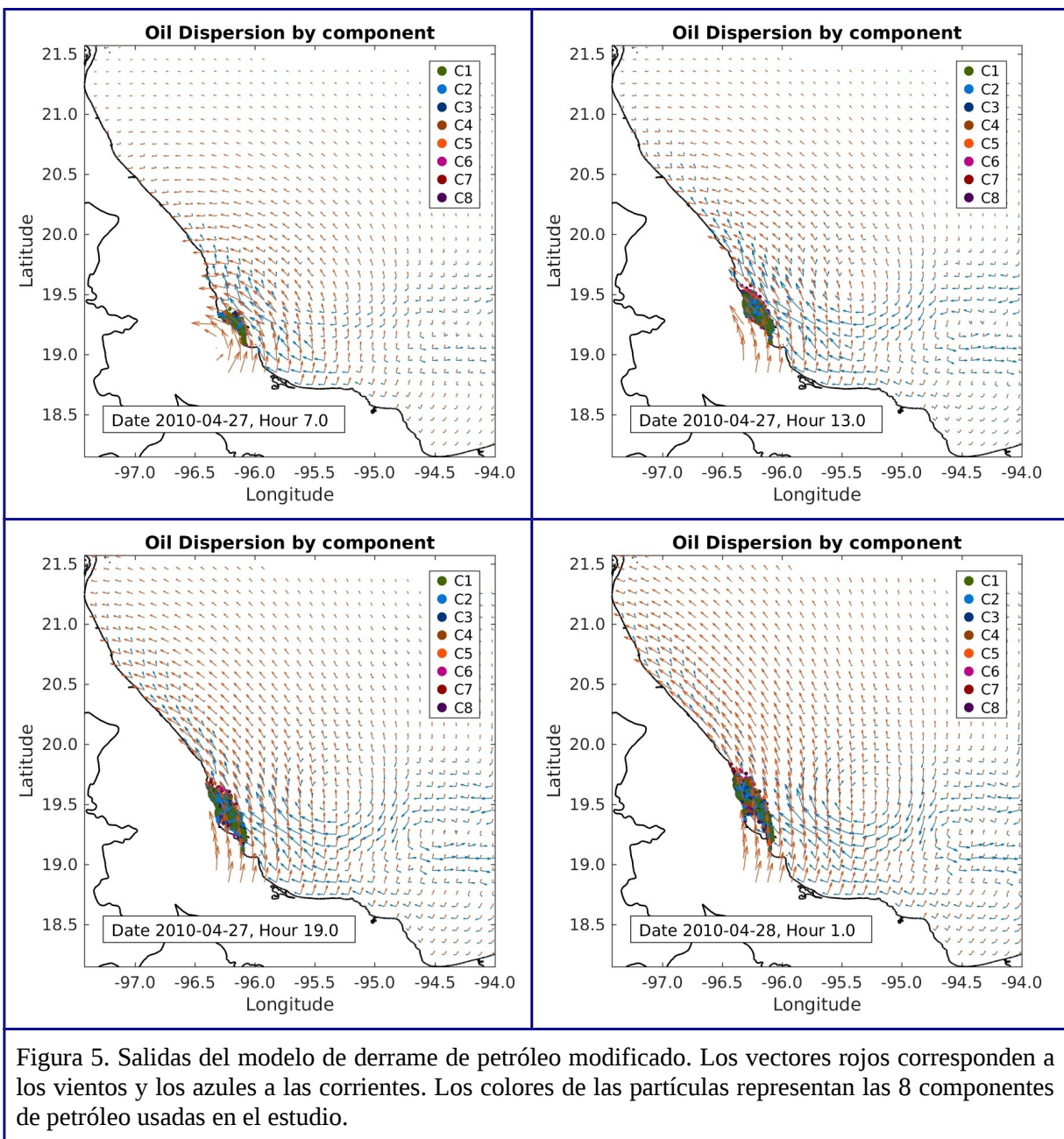


Figura 5. Salidas del modelo de derrame de petróleo modificado. Los vectores rojos corresponden a los vientos y los azules a las corrientes. Los colores de las partículas representan las 8 componentes de petróleo usadas en el estudio.

Conclusiones

El módulo de derrame de petróleo OilSpill v.2 ha resultado ser flexible y fácil de adaptar para utilizar salidas de otros modelos diferentes al que se usó cuando fue creado (en este caso HYCOM).

Las modificaciones realizadas al código del módulo permitieron utilizar las salidas de un modelo de mallas no estructuradas, el cual permite tener alta resolución en zonas de especial interés.

Las simulaciones realizadas para el área de estudio muestran el peligro al que está expuesta la zona, y en particular para el caso de la combinación de dos fenómenos, el de un derrame de petróleo y el paso de un huracán por el sitio del accidente.

Trabajos futuros

Implementar una rutina de conteo para mostrar las cantidades de petróleo total, en agua, en costa, evaporado, biodegradado, removido artificialmente (quema y recolección), y el que quedó fuera del dominio.

Desarrollar un algoritmo que permita contabilizar el número de partículas que entran y salen de un dominio definido por el usuario. Esto con fin de realizar estudios de contaminación en regiones delimitadas, por ejemplo en zonas denominadas como Área Natural Protegida.

Adaptar el módulo para que utilice las salidas del modelo FVCOM.

Referencias

- Aguirre, R. (24 de septiembre de 2016). "Se incendia buque petrolero en Veracruz". *Excelsior*. [Veracruz, Vz]. <<http://www.excelsior.com.mx/nacional/2016/09/24/1118783>>
- Centro Mexicano de Derecho Ambiental. (2011). El Sistema Arrecifal Veracruzano. Reporte de un área natural protegida amenazada. Recuperado de <<http://www.cemda.org.mx>>
- Díaz-García, O., Zavala-Hidalgo, J., Mott G., Douillet P. (2017). Inundation scenarios of hurricane storm surge in Veracruz, Mexico. *En preparación*.
- Horta-Puga, G., & Tello-Musi, J. L. (2009). Sistema Arrecifal Veracruzano: condición actual y programa permanente de monitoreo: Primera etapa. *México: Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Le Hénaff M, Kourafalou VH, Paris CB, Helgers J, Aman ZM, Hogan PJ, Srinivasan A (2012) Surface evolution of the Deepwater Horizon oil spill patch: combined effects of circulation and wind-induced drift. *Environ Sci Technol* 46: 7267-7273.
- Ortiz-Lozano, L. (2012). Identification of priority conservation actions in marine protected areas: Using a causal networks approach. *Ocean & coastal management*, 55, 74-83.
- Samuels WB, Huang NE, Amsiuz DE. (1982) An oilspill trajectory analysis model with a variable wind deflection angle. *Ocean Engng* 9: 347-360.
- Tunnell, J. W. (1988). Regional comparison of southwestern Gulf of Mexico to Caribbean Sea coral reefs. In *Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium* (Vol. 3, pp. 303-308).