



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA 3D EN EL GOLFO DE MÉXICO PARA LA
DETERMINACIÓN DE PATRONES DE DISPERSIÓN DE HIDROCARBUROS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSE RAFAEL MEZA PADILLA

TUTORES PRINCIPALES
DRA. CECILIA E., ENRÍQUEZ ORTIZ, FACULTAD DE CIENCIAS
DR. CHRISTIAN M., APPENDINI ALBRECHTSEN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR
DRA. RUTH, CEREZO MOTA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. ALEC, TORRES FREYERMUTH, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. MARÍA EUGENIA, ALLENDE ARANDÍA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Ruth Cerezo Mota

Secretario: Dr. Alec Torres Freyermuth

1^{er}. Vocal: Dra. Cecilia E. Enríquez Ortiz

2^{do}. Vocal: Dr. Christian M. Appendini Albrechtsen

3^{er}. Vocal: Dra. María Eugenia Allende Arandía

Lugar donde se realizó la tesis: Sisal, Yucatán. México.

TUTORES DE TESIS:

Dra. Cecilia E. Enríquez Ortiz

Dr. Christian M. Appendini Albrechtsen

Resumen

El conocimiento de las reservas potenciales de crudo en la región del Cinturón Plegado de Perdido se ha convertido en una prioridad para la exploración y explotación de hidrocarburos. A la exploración y explotación del petróleo se asocia la posibilidad de un derrame, por lo que estudiar los patrones de dispersión es relevante para las actividades marítimas, el diseño y manejo de estructuras fuera de costa, así como la salud biológica del Golfo de México (GoM). La dispersión en Perdido depende directamente de la circulación oceánica, la cual es influenciada por los remolinos de la corriente de lazo (LCE) que se propagan hacia el oeste tras desprenderse de la corriente de lazo (LC). Por lo tanto, la estructura termohalina y la distribución ambiental de variables bióticas depende del impacto de los LCE. Para caracterizar los LCE se realizó un estudio a profundidad de la circulación oceánica en el occidente del GoM por medio de mapas auto-organizados (SOM) sobre un registro de 24 años (1993-2016) de datos de salinidad y corrientes a 200 metros de profundidad extraídos del modelo *HYbrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM). Para describir la variabilidad espacial se empleó un arreglo de 49 patrones que posteriormente se simplificaron en 7 grupos, mientras que para la variabilidad temporal se emplearon únicamente 6 patrones. Los resultados del SOM fueron consistentes con estudios previos y permitieron obtener información adicional sobre la variabilidad geoespacial de los LCE. El patrón de variabilidad temporal reveló una clara zona de impacto para los LCE sobre la pendiente de la plataforma continental entre las latitudes 22°N y 25°N. Además, se identificó un transporte dominante fuera de costa alrededor de las latitudes 25°N y 26°N, específicamente en la región de Perdido. En dicha región, se asignaron bloques de exploración y explotación de petróleo para cada licitación de 2015 a 2017, incrementando el riesgo por derrames en la zona. Con la modelación hidrodinámica, fue posible establecer distintos patrones de dispersión de hidrocarburos que permitieron determinar las áreas afectadas. El modelo hidrodinámico 3D fue acoplado a un modelo espectral de oleaje y a un modelo Lagrangiano de transporte para analizar los derrames. Tras configurar los modelos, se usaron los 28 bloques licitados por la Secretaría de Energía (SENER) como las fuentes potenciales para un derrame, tanto en superficie como en el fondo. La ocurrencia, tiempo de arribo y distribución espacial del derrame en cada escenario se encuentra en un catálogo de búsqueda desarrollado en Matlab para simplificar su visualización. Este sistema permitirá emplear pocos recursos computacionales para identificar zonas afectadas ante un derrame.

Abstract

The knowledge of potential reservoirs of crude oil in the region known as Cinturon Plegado de Perdido became a priority for exploration and exploitation of hydrocarbons. To the exploration and exploitation, its associated the possibility of an oil spill, therefore studying the dispersion patterns is relevant for maritime activities, the design and operation of offshore structures and also the biological health of the Gulf of Mexico (GoM). The dispersion at Perdido depends directly from the ocean circulation, which is influenced by the loop current eddies (LCE) that propagate to the west after detaching from the Loop Current (LC). For this, the thermohaline structure and the background distribution of biotic variables depends on the impact of the LCE. In order to characterize the LCE an in depth study was realized of the ocean circulation on the western GoM through Self-Organized Maps (SOM) over a 24 year record (1993 – 2016) of salinity and current data at 200 meter depth extracted from the *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM). To describe the spatial variability a set of 49 patterns was employed that afterwards were simplified into 7 groups, while the temporal variability employed only 6 patterns. The SOM results were consistent with previous studies and allowed us to gather additional information on the geospatial variability of the LCE. The temporal variability pattern revealed a clear zone of impact for the LCE over the slope of the continental shelf between latitudes 22°N and 25°N. Furthermore, a dominant offshore transport was identified along latitudes 25°N y 26°N, specifically in the Perdido region. On this region, bidding blocks were assigned for exploration and exploitation for each tender request from 2015 to 2017, which increased the risk for oil spills in the area. With the hydrodynamic modelling, it was possible to establish different oil spill dispersion patterns that allowed to determine the affected areas. The 3D hydrodynamic model was coupled to a spectral wave model and a Lagrangian transport model to analyze each spill. After setting up the models, 28 bidding blocks provided by the Ministry of Energy (SENER) were used as sources for an oil spill, both in the surface and in the bottom. The occurrence, time of arrival and spatial distribution of the oil spill on each scenario is found in a search catalog developed in Matlab to simplify its visualization. This system allows to employ less computational resources to identify affected zones during an oil spill.

Per Aspera, Ad Astra

*A mi padre,
Ramón Rafael Meza Yela*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por proveer los medios económicos para llevar a cabo esta investigación. CVU: 555771.

Al Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme formar parte de la plantilla estudiantil.

Al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros en la Unidad Académica Sisal por haberme abierto las puertas desde 2012.

A mis tutores principales Cecilia Enríquez Ortiz y Christian Appendini Albrechtsen por haber aceptado ser mis mentores durante el doctorado, guiarme constantemente y confiar en mi capacidad para lograr en tiempo y forma con este estudio.

A Christian Appendini por ser un excelente tutor y haberme abierto las puertas del LIPC desde el 2012. He podido evolucionar personal y académicamente gracias a su constante apoyo, esperando que dicha colaboración siga rindiendo frutos a futuro.

A Cecilia Enríquez por su paciencia y consejos oportunos. Su experiencia y profesionalismo me dieron una excelente base en oceanografía física para poder ejecutar este proyecto. Fue la persona adecuada para instruirme durante el doctorado. Además, agradezco la oportunidad que me diste de formar parte de la tripulación durante la campaña de Perido-01 a bordo del Buque Oceanográfico Justo Sierra y tu apoyo para participar en la UGM 2017.

A los sinodales Ruth Cerezo Mota, Alec Torres Freyermuth, Ernesto Tonatiuh Mendoza Ponce y Luis Zamudio por haberme dado la oportunidad de mejorar y enriquecer este proyecto por medio de sus recomendaciones.

A Gonzalo U. Martín-Ruiz, Juan Alberto Gómez-Liera y a José López-González por todo el soporte técnico brindado a lo largo del programa.

A Julio Sheinbaum por su apoyo y constante interés en este proyecto. Sus observaciones enriquecieron este trabajo considerablemente.

A Jorge Zavala por haberme dado acceso a los datos batimétricos del Golfo de México que se emplearon en el dominio computacional de este estudio.

A Héctor Nava por permitirme formar parte de la campaña intensiva de Texas en Agosto 2018, colaborar en sus proyectos y apoyo para participar en la UGM 2018.

To Dr. Yonggang Liu for helping me with the Self-Organizing Maps setup and his contribution in the paper.

To DHI A/S for allowing me the use of their software to fulfill this project and to Rodolfo Bolaños who helped me in setting up the 3D model during my internship in DK back in 2014.

A mis padres por haberme brindado su apoyo incondicional, incluso cuando las cosas se complicaron, gracias por creer en mis metas personales.

A Liliana Bautista y Renatta Jammille Meza Bautista por haber estado a mi lado cada día de forma incondicional. Me impulsan a dar lo mejor de mí, así que cada logro que tenga lo compartiré con ustedes.

TRABAJOS RELACIONADOS A ESTE PROYECTO

Participación en congresos:

Congreso Internacional YCSEC-A 2017 Dauphin Island, Alabama

Congreso Nacional UGM 2017 Pto. Vallarta, Jalisco

Congreso Nacional XX Congreso de Oceanografía ASOCEAN Mérida, Yucatán.

Congreso Nacional UGM 2018 Pto. Vallarta, Jalisco

Artículo publicado:

Meza-Padilla R., Enriquez C., Liu Y., Appendini, A. (2019), Ocean Circulation in the Western Gulf of Mexico with Self-Organizing Maps. *Journal of Geophysical Research – Oceans*. doi: 10.1029/2018JC014377

INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	8
1.1	Antecedentes	8
1.2	Motivación	9
1.3	Estado del arte	10
1.4	Objetivos	14
1.4.1	Objetivo general.....	14
1.4.2	Objetivos específicos.....	14
1.5	Estructura de la tesis.....	14
2	METODOLOGÍA	15
2.1	Caracterización de la circulación oceánica en el Golfo de México occidental.....	16
2.1.1	Distribución espacial y temporal de la circulación oceánica	18
2.1.2	Campaña oceanográfica Perdido-01.....	19
2.2	Modelación numérica de la hidrodinámica, el oleaje y los vertidos de hidrocarburos.....	20
2.2.1	Dominio computacional y batimetría.	20
2.2.1	Condiciones iniciales y de frontera.	23
2.2.2	Implementación del modelo hidrodinámico MIKE3 HDFM	24
2.2.3	Implementación del modelo espectral de oleaje MIKE21 SW	27
2.2.4	Implementación del modelo de transporte de hidrocarburos MIKE OS	29
2.3	Determinación de zonas de afectación y el catálogo de búsqueda sobre vertidos	31
3	DISCUSIÓN Y RESULTADOS	32
3.1	Caracterización de la circulación oceánica en el Golfo de México Occidental	32
3.1.1	Distribución espacial y temporal de la circulación oceánica	32
3.1.2	Circulación oceánica durante la campaña oceanográfica Perdido-01.....	39
3.2	Modelación numérica de hidrodinámica, oleaje y vertido de hidrocarburos	41
3.2.1	Validación del modelo hidrodinámico MIKE3 HD FM.....	42
3.2.2	Validación del modelo espectral de oleaje MIKE21 SW	47
3.2.3	Validación del modelo de transporte de hidrocarburos MIKE OS	49
3.3	Determinación de zonas de afectación por vertidos de hidrocarburos.	54
3.4	Catálogo de búsqueda sobre vertidos de hidrocarburo	57
3.4.1	Guía de usuario	58
3.4.2	Ejemplo de aplicación	61
4	CONCLUSIONES.....	65

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La transición energética en México está pasando por dos grandes transformaciones de forma simultánea. La primera es la transformación de los monopolios estatales de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a una estructura basada en mercados competitivos con la inclusión de empresas internacionales. La segunda es la inclusión de energías renovables para reducir el consumo de combustibles fósiles. Esta transición implica un proceso evolutivo basado en gran medida en las costumbres del pueblo mexicano relacionadas al ahorro energético. La meta es que el 35% de la energía eléctrica en México provenga de energías limpias para el 2024. No obstante, durante esta transición los hidrocarburos seguirán teniendo un rol dominante en el sector energético en los próximos años.

El petróleo como recurso no renovable, tiene un máximo de explotación seguido por un declive hasta el agotamiento. México tuvo un zenit a principios de los ochentas y presentó un segundo pico a principios del milenio. Sin embargo, en la actualidad la producción de petróleo está declinando (Figura 1-1a). Esto ha llevado a la industria petrolera a obtener el crudo de regiones más complejas de perforar, con mayores riesgos, en pozos o reservas cada vez más pequeñas y con crudo de menor calidad aumentando así, el costo por barril. Durante décadas, el complejo Cantarell fue el principal yacimiento de crudo en el país, con un 60% de la producción total de PEMEX en 2004. Sin embargo, el declive de Cantarell se ha evidenciado. En 2006 contaba con una producción de 1,735 mbd y para 2008 ya era de 927 mbd. Las zonas Ku, Maloob y Zaap intentaron compensar la caída de Cantarell, pero no ha sido suficiente. La solución a corto plazo fue la incorporación de nuevas reservas, mejorar la explotación de campos abandonados y la gran apuesta de incluir las aguas profundas del Golfo de México, específicamente la región del Cinturón Plegado de Perdido (CPP), frente a las costas de Tamaulipas (Figura 1-1b).

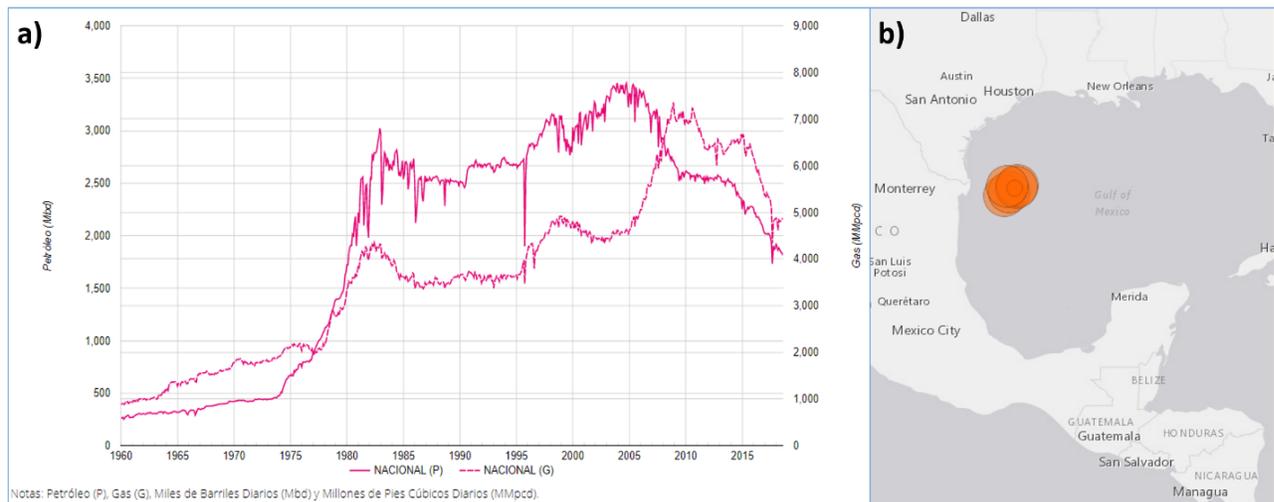


Figura 1-1 (a) Producción nacional de petróleo (P, línea sólida) y gas (G, línea punteada) de 1960 a 2018. (b) Regiones de reservas de petróleo en aguas profundas (círculos naranjas). (Adaptado de: <https://portal.cnih.cnh.gob.mx/>).

Para octubre 2018 ya se habían adjudicado 107 áreas contractuales por medio de nueve licitaciones petroleras (exploración y extracción de aceite y gas) con un total de 113 empresas

petroleras en México de distintas nacionalidades. Las cuatro empresas con mayor inversión en el país son:

- 742.1 millones de dólares: *SHELL exploración y extracción de México* con 11 bloques adjudicados en un área de 20,766.60 km² y 13 pozos comprometidos.
- 518.0 millones de dólares: *ENI International* con 6 bloques adjudicados en un área de 4,386.9 km² y 11 pozos comprometidos.
- 452 millones de dólares: *PC Carigali Mexico Operations* con 9 bloques adjudicados en un área de 20,222.30 km² y 8 pozos comprometidos.
- 423.7 millones de dólares: *Petróleos Mexicanos* con 14 bloques adjudicados en un área de 18,813.70 km² con 8 pozos comprometidos.

La inversión total se estima alrededor de 161,263 millones de dólares de los cuales el 84% es en aguas profundas, 14% en aguas someras y 2% en la porción terrestre. El estado de mayor inversión en aguas profundas es Tamaulipas, mientras que en aguas someras y terrestres es Tabasco (Figura 1-1b). Debido a la gran inversión y a los retos que implica la exploración y explotación en las zonas adjudicadas, resulta imperativo conocer la circulación oceánica en mar profundo y su conexión con la plataforma continental y mares costeros, particularmente al occidente del Golfo de México (WGoM). En el WGoM, la zona de Perdido presenta una dinámica compleja debido a la incidencia de los remolinos anticiclónicos que se desprenden de la corriente de lazo e inciden al talud continental que presenta una gran pendiente y que es altamente escarpado. Por lo anterior, la caracterización hidrodinámica resulta muy compleja, ya que se combinan procesos de meso, sub y microescala. Debido al tirante de agua en zonas profundas, las corrientes son capaces de desplazar los ductos de perforación haciendo mucho más compleja la extracción del gas o crudo incrementando el riesgo de un accidente. En caso de tener un derrame de hidrocarburos, los patrones de dispersión dependerán intrínsecamente de la hidrodinámica dominante en la región.

El riesgo por vertidos es latente y sucede con frecuencia, aunque no sea expuesto públicamente. Desgraciadamente, no existe una fórmula para tratar a todos los vertidos por igual. Depende de las condiciones ambientales de ese instante y de las propiedades particulares del crudo. De igual forma influye la intervención humana, ya sea oportuna o no. Los efectos de un vertido tienen consecuencias a corto, mediano y largo plazo. Sobre todo en derrames de mar profundo, donde una gran cantidad de crudo se queda flotando a profundidades intermedias y no se puede remover mecánicamente como se podría hacer en un derrame superficial (Dickey, 2012). A raíz del Deepwater Horizon, un excelente compendio de investigaciones relacionadas se encuentra disponible en <https://oceanservice.noaa.gov/deepwaterhorizon/>. Sin embargo, gran parte de esta investigación se centra en aguas estadounidenses y no se le da peso a la porción mexicana.

Esta investigación se ubica específicamente en la región de Perdido y se basa en la circulación oceánica a largo plazo, con la finalidad de proveer una herramienta práctica que ayude en la planeación de labores de contingencia ante algún evento de derrame. Este esfuerzo, se une a los existentes que buscan evitar una catástrofe ecológica en el país.

1.2 Motivación

La reforma energética abrió una gama sin precedentes de exploración y explotación de recursos naturales en regiones profundas del mar territorial mexicano. Si bien ya existen varios pozos sobre la plataforma continental, la explotación profunda implica nuevos y mayores retos para la

contingencia de un vertido. Con la finalidad de contribuir en los planes de contingencia y eventualmente evitar una catástrofe ecológica, el producto de esta investigación es un catálogo de búsqueda sobre derrames de hidrocarburo. Es una herramienta práctica y de fácil uso que le permite tomar acciones y decisiones oportunas al personal de cualquier dependencia sin necesidad de contar con conocimientos computacionales y/o fundamentos científicos. La herramienta muestra las posibles trayectorias del vertido considerando los patrones dominantes de circulación oceánica en la región noroccidental del Golfo de México. Así mismo, ésta toma en cuenta las zonas de explotación que se adjudicaron entre 2015 y 2017, con lo cual puede proveer información útil para las evaluaciones de impacto ambiental. De esta manera, la herramienta desarrollada motivará a generar mejores estrategias de respuesta ante un vertido y tomar acciones de prevención con conocimiento de causa.

1.3 Estado del arte

Determinar el tiempo de residencia y destino de un vertido es de interés global y existen muchos grupos de investigación haciendo frente a esta problemática. Por ejemplo, el grupo *RPS* (<https://rpsgroup.com/>) ha venido perfeccionando durante los últimos 30 años los softwares *OILMAP* y *SIMAP* para este propósito. *OILMAP* es un modelo tridimensional que traza distintos componentes de un hidrocarburo en la columna de agua, superficie y atmosfera. *SIMAP* predice trayectorias tridimensionales del vertido e incluye los efectos biológicos que tienen los hidrocarburos en el medio ambiente. Ambos se emplean para simular derrames en mar profundo, aguas continentales, tuberías e instalaciones de almacenamiento y se han implementado por las principales empresas petroleras y agencias gubernamentales en más de 100 países.

Recientemente, en el Mar Mediterráneo se lleva a cabo el proyecto *Tracking Oil Spills & Coastal Awareness* (TOSCA - <http://www.tosca-med.eu/>), el cual busca mejorar la calidad y efectividad del proceso de toma de decisiones en caso de accidentes marinos relacionados a vertidos de hidrocarburos y operaciones de búsqueda y rescate. Este proyecto desarrolla una red de monitoreo y un sistema de pronóstico con base en radares de alta frecuencia y boyas de deriva. El objetivo es crear una herramienta de soporte para la toma de decisiones en caso de accidentes marinos y poder elaborar una estrategia de manejo de común acuerdo entre naciones en caso de vertidos y operaciones de búsqueda. Este sistema ofrece observaciones en tiempo real en las zonas de mucho tráfico marino y en los cinco principales sitios costeros por donde se exporta petróleo del Medio Oriente. De la misma forma, otros países generan las herramientas necesarias para responder a la incertidumbre de un vertido. Por ejemplo, la empresa danesa *DHI* está desarrollando un sistema de pronóstico de derrames de hidrocarburo llamado *GlobalSEA Oil Spill*. Este sistema se presenta como una aplicación online (<https://www.mikepoweredbydhi.com/areas-of-application/coast-and-sea/globalsea-oil-spill>) que funciona de forma operacional y determina el movimiento y la transformación de un derrame en cualquier momento y parte del mundo.

En caso de un vertido en la región occidental del Golfo de México, las partes involucradas son Estados Unidos y México. En Estados Unidos, la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA), a través de la oficina de restauración y respuesta tiene disponibles las herramientas *Automated Data Inquiry for Oil Spills* (ADIOS) y *General NOAA Operational Modeling Environment* (GNOME). ADIOS es un modelo fisicoquímico de degradación del petróleo en medio marino y GNOME predice las posibles rutas y zonas de afectación de un vertido. Tras *Deepwater Horizon* en 2010, se creó el *Gulf of Mexico Research Initiative* (GoMRI -

<http://gulfresearchinitiative.org/>) el cual investiga los impactos del crudo, su dispersión y mitigación con el objetivo de mejorar el conocimiento fundamental de la dinámica de estos eventos y sus implicaciones en la salud pública y el ecosistema. Posteriormente, para el 2015 se fundó en México el *Consortio de Investigación del Golfo de México* (CIGOM – <https://cigom.org/>), el cual es un consorcio de investigación científica y consultoría que se especializa en proyectos multidisciplinarios relacionados a posibles impactos ambientales relacionados con la industria del gas y el petróleo en los ecosistemas marinos del Golfo de México. Dentro del fondo sectorial *SENER - Hidrocarburos/CONACYT* el CIGOM desarrolla un proyecto para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas a la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas del Golfo de México con acciones conjuntas que abordan una gran gama de estudios observacionales, de laboratorio y de modelaciones numéricas. Uno de los principales intereses es comprender la circulación oceánica como mecanismo de transporte.

La circulación oceánica juega un rol determinante en la distribución y dispersión de contaminantes (Liu *et al.* 2011), nutrientes (Rebich *et al.* 2011), larvas (Lugo-Fernández *et al.* 2001) y otros materiales y propiedades que son transportados con las corrientes. Debido a su importancia, existe una gran cantidad de estudios sobre la circulación en el GoM, varios resumidos por Sturges *et al.* (2005). Una característica determinante de la circulación en el GoM, es la entrada de una corriente intensa al sureste, que arriba desde el Mar Caribe a través del canal de Yucatán. Esta corriente se denomina la Corriente de Yucatán, la cual introduce distintas masas de agua con propiedades fisicoquímicas ricas en nutrientes y otros organismos (Rebich *et al.* 2011). La corriente dentro del GoM se conoce como la Corriente de Lazo (LC, por sus siglas en inglés), la cual fluye hacia el norte y se desvía en un meandro anticiclónico. En este proceso, se desprenden de forma irregular remolinos anticiclónicos (Lugo-Fernández, 2007) conocidos como Remolinos de la Corriente de Lazo (LCE, por sus siglas en inglés), que se desplazan hacia el oeste e impactan en todo el GoM como ya lo han descrito distintos autores (e.g. Alvera-Azcarate *et al.* 2009; Liu *et al.* 2016b; Weisberg & Liu, 2017). La LC continúa su paso hacia el estrecho ubicado entre Florida y Cuba y se convierte en la corriente del Golfo (*Gulf Stream*), la cual se propaga hacia el Atlántico Norte (Sturges & Evans, 1983). Estas corrientes gobiernan los procesos oceánicos de mar profundo y tienen gran influencia en los procesos dinámicos sobre la plataforma y consecuentemente sobre los procesos costeros (Oey *et al.* 2005). En este contexto, Elliot (1982) describe los remolinos anticiclónicos como masas de agua cálida y salada (propiedades del agua caribeña) con una velocidad de propagación promedio de 2.1 km/día con un tiempo de vida estimado de un año. Estudios y mediciones más recientes han descrito los LCE como estructuras tridimensionales profundas que acarrearán agua cálida y salina con un máximo de salinidad localizado alrededor de los 200 m de profundidad (Enriquez & Mariño, 2016). Sturges & Leben (2000) analizaron 34 LCE para determinar la frecuencia con la que se desprenden de la LC. Encontraron que los desprendimientos suceden en intervalos entre seis y once meses, por lo que su presencia es continua a lo largo de todo el año. El funcionamiento y salud ambiental de la porción occidental del GoM depende intrínsecamente de la dinámica de los LCE. Los nutrientes acarreados por los LCE influyen directamente en las pesquerías y en las rutas preferentes para la migración de mamíferos marinos. Además, los LCE juegan un rol crucial en la industria petrolera, ya que tanto las corrientes superficiales como las de fondo, influyen en la instalación de tuberías, en los procesos de excavación y en la extracción tanto de crudo como de gas del lecho marino.

Debido a la importancia que tienen los LCE en el GoM, se han realizado distintos estudios para caracterizarlos con base en una gran variedad de datos y metodologías. Nowlin *et al.* (1998)

describieron la circulación en la plataforma de Luisiana y Texas (LATEX) por medio de mediciones en campo (i.e. sensores de presión, corrientímetros, boyas meteorológicas y ecosondas invertidas con sensores de presión) y observaciones remotas (altimetría). Encontraron una circulación costa arriba (anticiclónica) durante el verano y costa abajo (cyclónica) durante el invierno. De forma similar, Zavala *et al.* (2003) usaron imágenes satelitales, un modelo numérico de alta resolución espacial, datos hidrográficos y registros del nivel del mar para describir la circulación sobre la plataforma continental como un proceso dominado por el esfuerzo del viento conforme a época del año. Posteriormente, Sheinbaum *et al.* (2010) se basaron en 14 meses de mediciones de corrientes de superficie a fondo y de altimetría para el periodo de 2004-2005, por otra parte, Dubranna *et al.* (2011) utilizaron de 12 a 19 meses de mediciones de corrientes incluyendo sensores de deriva en siete sitios diferentes, ambos estudios para describir la circulación fuera de la plataforma continental, la cual está dominada por remolinos ciclónicos y anticiclónicos. Recientemente, Portela *et al.* (2018) mostraron que la periodicidad e interacción de los LCE con los LCE remanentes es variable. Esta variabilidad temporal que detectaron en los remolinos ciclónicos y anticiclónicos se encuentra en el rango de semanas a meses respectivamente. Las escalas espaciales, tanto horizontales como verticales de las estructuras variaron significativamente acorde a lo reportado por Hamilton *et al.* (1999) y Sturges *et al.* (2005). De acuerdo al estudio realizado por Smith (1986), la interacción entre la batimetría y los LCE a lo largo de la pendiente de la plataforma continental causa una estructura asimétrica en la porción occidental del LCE. Esta interacción le da al remolino una tendencia de advección propia hacia el norte y noreste separándolo del talud continental. En resumen, los LCE se han analizado por más de 30 años y siguen siendo objeto de estudio debido a su compleja dinámica.

Además de la complejidad intrínseca de los LCE, el registro histórico ha sido limitado (temporal y espacialmente) y la necesidad de investigaciones de largo plazo resulta necesaria para describir los patrones hidrodinámicos que consideren todas las posibilidades. Existen distintas técnicas de análisis de datos con cobertura amplia que están disponibles, desde promedios espaciales/temporales y funciones empíricas ortogonales (EOF, por sus siglas en inglés), hasta técnicas no lineales como los mapas auto-organizados (SOM, por sus siglas en inglés) entre otros. En el caso de los promedios espaciales/temporales, es difícil definir las escalas sobre las cuales se debe realizar el promedio, especialmente cuando la circulación es compleja y las corrientes pueden ser anisotrópicas y no homogéneas (Liu & Weisberg, 2005). Los EOF son un método efectivo para concentrar gran cantidad de datos correlacionados en un número reducido de patrones por reducción de varianza (e.g. Espinosa-Carreón *et al.* 2004; Xu *et al.* 2013). Sin embargo, esta técnica requiere de valores de entrada sin espaciamientos en la serie y la remoción de la media espacial y temporal para analizar los campos de anomalía correspondientes, lo cual representa una limitante si se desea considerar el comportamiento promedio de la serie. De forma alternativa, los SOM pueden ser empleados para mitigar las problemáticas mencionadas con anterioridad. Acorde a Liu & Weisberg (2005), los patrones de los SOM son más precisos que los modos dominantes de los EOF. En su investigación encontraron características asimétricas que no fueron detectadas por los EOF en un análisis de patrones de corriente de surgencia y hundimiento. Además, Liu *et al.* (2006) mostraron cómo los SOM extraían patrones complejos de múltiples series de forma simultánea mientras que los EOF fallaron en ello. Reusch *et al.* (2005) contrastaron los EOF con los SOM usando cuatro campos de presión idealizada del Atlántico Norte con y sin perturbaciones adicionales y llegaron a la conclusión de que los SOM eran una técnica más robusta que los EOF.

Los SOM son una técnica de redes neuronales artificiales basada en un proceso de entrenamiento sin supervisión que permite un análisis multivariado. Los resultados obtenidos conservan la topología mientras que se proyectan a un esquema bidimensional para su simplificación. Esto permite visualizar, clasificar, agrupar y detectar patrones de cualquier conjunto de variables que se empleen en el entrenamiento. Por ejemplo, Richardson *et al.* (2003) emplearon esta técnica para detectar patrones de temperatura superficial del mar utilizando imágenes térmicas satelitales. De igual forma detectaron patrones de viento entrenando la red con datos de un escaterómetro (*scatterometer*). Más tarde, Liu & Weisberg (2005, 2007) usaron los SOM para extraer patrones de corriente usando mediciones sobre la plataforma oeste de Florida. Con los patrones de corrientes que obtuvieron, establecieron una relación entre los vientos locales y los procesos de surgencia/hundimiento costero. Recientemente, Vilibic *et al.* (2016) usaron los SOM para un sistema de pronóstico de corrientes superficiales. Estos ejemplos señalan la versatilidad y capacidad de los SOM como una técnica poderosa y robusta para el reconocimiento de patrones y la extracción de características en series donde la no linealidad juega un papel importante, como ocurren en los procesos oceanográficos del GoM.

En el caso específico del GoM, Liu *et al.* (2016b) implementaron un análisis con SOM en espacio y tiempo para caracterizar la LC en la porción oriental del GoM. En este estudio se implementó un análisis con SOM en espacio y tiempo para caracterizar la circulación oceánica en la porción occidental del GoM. Esto con el interés particular de evaluar el efecto de los LCE en los derrames de hidrocarburo que pudiesen presentarse en la región de Perdido dentro de los mares mexicanos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es determinar los patrones de dispersión de hidrocarburos con base en una serie de escenarios de circulación oceánica en la región occidental del Golfo de México asociados a contingencias generadas en la zona del Cinturón Plegado de Perdido. Para ello, se pretende cumplir con los siguientes objetivos específicos.

1.4.2 Objetivos específicos

- 1) Caracterizar la circulación oceánica en la porción occidental del GoM (WGoM) con mapas-auto-organizados.
 - a) Establecer la distribución espacial y temporal de la circulación oceánica en el WGoM.
- 2) Modelar numéricamente distintos escenarios de hidrodinámica, oleaje y vertido de hidrocarburos
 - a) Implementar el modelo hidrodinámico MIKE 3 HDFM para simular los patrones de circulación establecidos en el objetivo 1.
 - b) Implementar el modelo de oleaje MIKE 21 SW y acoplarlo al MIKE 3 HDFM para incluir el efecto del oleaje en la modelación hidrodinámica.
 - c) Implementar el modelo de transporte de hidrocarburos MIKE OS de manera desacoplada a los modelos acoplados MIKE 21 SW y MIKE 3 HDFM.
- 3) Determinar zonas de afectación por medio de mapas de ocurrencia, tiempos de arribo y distribución espacial del vertido en la zona de estudio.
- 4) Implementar un catálogo de búsqueda sobre derrames de hidrocarburo como herramienta para la planeación de estrategias ante contingencias en Perdido.

1.5 Estructura de la tesis

En el siguiente y segundo capítulo, se aborda la metodología referente a la caracterización de la hidrodinámica con base en el análisis de los SOM y las configuraciones empleadas en los modelos de hidrodinámica, oleaje y transporte de hidrocarburos. El tercer capítulo presenta los resultados de la caracterización de la circulación oceánica empleando los SOM, la validación de los modelos numéricos y posteriormente el uso del catálogo de búsqueda. Finalmente, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones y las posibles líneas de investigación a futuro.

2 METODOLOGÍA

Para caracterizar la hidrodinámica en la zona de estudio y determinar los patrones de derrames de hidrocarburos se siguió el esquema de trabajo mostrado en el diagrama de flujo de la Figura 2-1. La primera etapa y parte fundamental de este estudio, fue la caracterización de la circulación oceánica. Para ello, se obtuvieron mediciones en campo a bordo del buque oceanográfico Justo Sierra y valores de corrientes y salinidad a 200 m de profundidad del HYCOM, los cuales se emplearon para entrenar la red SOM y se obtienen los escenarios característicos de la circulación oceánica. Cada escenario se utilizó como condición inicial y de frontera para correr los modelos numéricos (hidrodinámica, oleaje y transporte de hidrocarburos).

En la segunda etapa se corrieron, calibraron y validaron los modelos para poder obtener estimaciones adecuadas del derrame. Para la validación se emplearon los registros existentes de las boyas de la NOAA en la región y las mediciones obtenidas de la campaña PERDIDO01 – JS0515 de la línea 2 de Redes de Observación del proyecto CiGOM. Una vez validados los modelos numéricos, se emplearon los patrones de circulación oceánica como forzantes en una serie de vertidos hipotéticos de hidrocarburos para determinar las trayectorias que tendría un derrame en distintas regiones del WGoM.

En la tercera etapa se emplearon las tres rondas para la exploración y extracción de hidrocarburos en el WGoM que se abrieron desde el 2015 de acuerdo con Comisión Nacional de Hidrocarburos (<https://rondasmexico.gob.mx/#Rondas>) como las regiones potenciales para un vertido. Para la Ronda 1 - Aguas Profundas (CNH-R01-L04/2015) se consideraron 5 bloques en el Cinturón Plegado Perdido. Para la Ronda 2 - Aguas Profundas (CNH-R02-L04/2017) se consideraron 9 bloques en la provincia petrolera de Perdido y para la Ronda 3 - Aguas Someras (CNH-R03-L01/2017) se consideraron 14 bloques en la región de Burgos. Como resultado se simularon vertidos en superficie y fondo en 28 polígonos, dando un total de 56 escenarios. Al incorporarlos a 16 patrones de circulación oceánica, se obtuvieron un total de 896 vertidos. Para poder visualizar toda la información de los vertidos, se desarrolló el catálogo de búsqueda como una herramienta que facilite la planeación estratégica y toma de decisiones ante derrames de hidrocarburo en esta región.

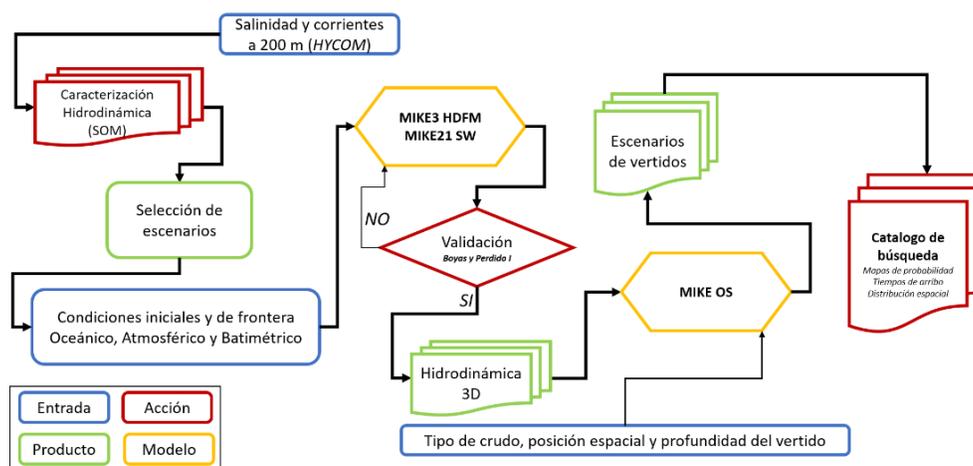


Figura 2-1 Diagrama de Flujo sobre modelación hidrodinámica tridimensional para la determinación de patrones de dispersión por vertido de hidrocarburos en el Golfo de México.

2.1 Caracterización de la circulación oceánica en el Golfo de México occidental

Debido a la compleja dinámica que rige al GoM, es necesario recurrir a técnicas no lineales que permitan su caracterización. Para ello, se empleó la técnica del SOM desarrollada por Kohonen (1982, 2001) y Vesanto & Alhoniemi (2000). Esta técnica adquirió popularidad desde que Richardson *et al.* (2003) demostraron sus aplicaciones en oceanografía. Desde entonces se ha empleado en análisis de datos satelitales como color del océano, clorofila, temperatura superficial del mar y nivel del mar, así como en corrientes tanto medidas como modeladas. A continuación, se muestran algunos ejemplos del uso de los SOM en oceanografía:

- En colorimetría y clorofila, Ainsworth & Jones (1999) emplearon los SOM para clasificar las concentraciones de clorofila alrededor del Océano Pacífico obtenidas del escáner de temperatura y colorimetría a bordo del satélite japonés Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS).
- En registros biológicos y geoquímicos, Aymerich *et al.* (2009) emplearon los SOM para clasificar el espectro de fluorescencia y descubrieron que, si los datos se procesan adecuadamente, los SOM pueden identificar entre distintos grupos algales como las diatomeas y los dinoflagelados.
- En datos satelitales de temperatura superficial del mar, Morioka *et al.* (2010) usaron los SOM para analizar la variabilidad climática en el sur del Océano Índico al clasificar los polos anómalos en la temperatura superficial.
- En datos de altimetría, Liu *et al.* (2008) aplicaron los SOM en series de altimetría en el Mar de China Meridional y extrajeron patrones característicos de las corrientes geostroficas asociadas.
- En datos medidos de corrientes, Liu *et al.* (2005), usaron los SOM para obtener los patrones dominantes de corrientes sobre la plataforma continental al oeste de Florida y relacionaron los procesos de surgencia y hundimiento con el régimen local de vientos.
- En datos modelados de salinidad, Liu *et al.* (2009) usaron los SOM para analizar series temporales de salinidad superficial para caracterizar los patrones de la pluma del río Columbia y los asociaron al régimen de vientos y la variación temporal de descarga del río.

Los SOM consisten en un proceso iterativo de aprendizaje sin supervisión que emplea redes neuronales artificiales. El primer paso de tiempo distribuye los datos multidimensionales de entrada en un mallado bidimensional mientras preserva la topología de los datos. Posteriormente procede iterativamente entre el vector de entrada y el vector de peso (vea Figura 2-2) de forma que los nodos se aproximan a posiciones que mejor representan los valores de entrada. Después de cada iteración, el vector de peso se compara contra el vector de entrada, y el vector de peso que tenga la menor distancia euclidiana entre sí mismo y el vector de entrada se considera como la mejor unidad de empate (BMU, por sus siglas en inglés). El BMU influye a las neuronas vecinas (por medio de la función de vecindad) para que se comporten de forma similar y representen adecuadamente los datos de entrada. En este proceso, los patrones se agrupan por propia similitud. Es decir, los patrones similares se agrupan entre sí y los disimilares se alejan dentro de las dimensiones del mallado bidimensional.

El mallado se especifica antes del entrenamiento, por lo que la selección conlleva a cierta subjetividad y dependen del criterio del usuario (Liu *et al.* 2006). Con arreglos pequeños se

obtienen patrones generales (apegados a la media), mientras que con arreglos mayores se obtiene mayor detalle. Este es el caso del trabajo de Zeng *et al.* (2015), donde usaron tres patrones para mostrar la LC en su forma normal, extendida y retraída, mientras que en el trabajo de Weisberg & Liu (2017) se emplearon 50 patrones para representar con detalle la evolución de la LC.

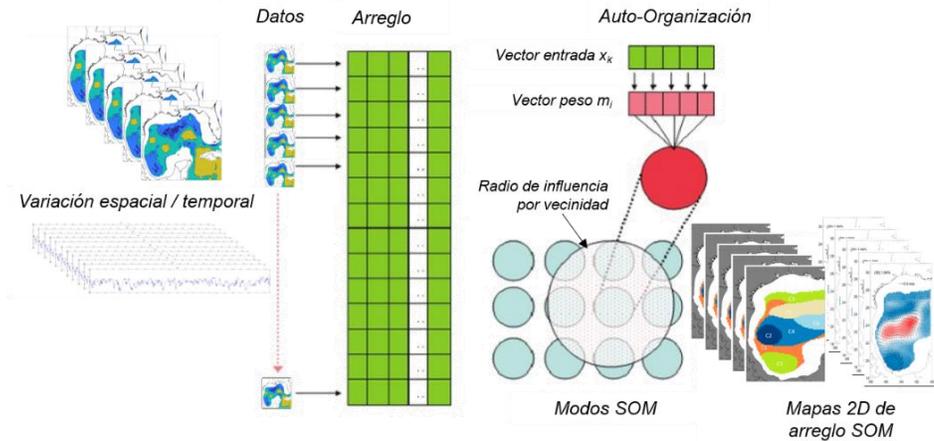


Figura 2-2 Metodología para la caracterización espacial y temporal de la salinidad y las corrientes a 200 m de profundidad por medio de los SOM. (Adaptado de: Liu & Weisberg, 2011).

Para evaluar la sensibilidad al dimensionamiento del arreglo, se realizaron distintas pruebas cambiando sus dimensiones. Se obtuvieron valores del error topológico (ET) y del error de cuantización (EC) como se muestra en la Tabla 1. **Error! Reference source not found.** El error topológico es un porcentaje de los vectores de entrada para los cuales el primer BMU y el segundo BMU no son unidades vecinas. Por lo tanto, mide las propiedades del espacio que son preservadas después del proceso de entrenamiento. El error de cuantización es la distancia promedio entre cada vector de entrada y el BMU, es decir, cuanto detalle está siendo aprendido por la red. Los valores más bajos de EC indican la representación más precisa de los valores de entrada, mientras que los valores más bajos de ET indican la mejor organización de patrones. Así, valores bajos de ET y EC indican una mejor calidad en el mapeo. Al incrementar la calidad de proyección, decrece la calidad de las propiedades (i.e. EC disminuye para arreglos mayores y ET disminuye para arreglos menores). En este intercambio técnico, se busca el detalle necesario que requiera el análisis mientras se preserva la topología de los datos. Este procedimiento es empírico y va a depender intrínsecamente de la naturaleza del estudio. Algunos ejemplos en cómo abordar este intercambio técnico se presentan en Pözlbauer (2004), donde comparan la calidad de estas métricas.

Tabla 1 Ensayos de evaluación del error topológico (ET) y del error de cuantización (EC) para distintos arreglos

Ensayo	Arreglo	ET	EC
1	2x2	0.03	11.75
2	3x3	0.48	11.29
3	4x4	0.58	10.99
4	5x5	0.76	10.63
5	6x6	0.80	10.34
6	7x7	0.78	10.07
7	8x8	0.82	9.79

Se emplearon arreglos de 4x4 (16 patrones) y 7x7 (49 patrones) para la modelación numérica y la caracterización del WGoM respectivamente. Esta selección es subjetiva, como se definió anteriormente. Sin embargo, se considera que los objetivos particulares de este estudio se cumplieron con este criterio. Dado que la variabilidad temporal requiere de menos patrones que la variabilidad espacial, la caracterización temporal se realizó con un arreglo de 2x3 (6 patrones). Una vez establecida la dimensión del arreglo, es importante determinar las características del mallado, ya que éstas determinan la conectividad que existe entre los nodos de la red. Para ello, se emplearon arreglos rectangulares con función de vecindad 'ep', un radio de búsqueda unitario y un proceso de inicialización lineal. El algoritmo de entrenamiento empleado fue en bloque (*batch train*). Esta selección de parámetros arrojó los errores de cuantización más bajos entre las opciones disponibles por el programa y se apega a las recomendaciones dadas por Liu *et al.* (2006). Todo este proceso se llevó a cabo usando el SOM MATLAB Toolbox desarrollado por Vesanto *et al.* (2000), el cual está disponible de forma gratuita a través de la página web del Laboratorio de Información y Computación (CIS) de la Universidad Tecnológica de Helsinki (<http://www.cis.hut.fi/somtoolbox/>).

En este estudio se emplearon datos de salinidad y corrientes a 200 metros de profundidad para caracterizar la circulación del WGoM. Con la finalidad de obtener un panorama simplificado, se empleó el método de K-means y el índice de agrupamiento de Davies-Bouldin (Davies & Bouldin, 1979), los cuales se redujeron a 7 grupos dominantes. Los K-means son un tipo de agrupamiento basado en aprendizaje sin supervisión usado en datos sin categorías predefinidas, lo cual le permite concentrar las variables con base en su similitud. De esta forma fue posible caracterizar la circulación en la región, la cual se describe a continuación.

2.1.1 Distribución espacial y temporal de la circulación oceánica

Para caracterizar la distribución espacial y temporal en el WGoM, es imprescindible poder detectar la propagación de los LCE en el WGoM. Desde los sesenta, estudios como el de Wüst (1964) detectaron masas de agua subsuperficial con propiedades del Caribe (agua cálida con alta salinidad conocida como *Caribbean Subtropical Underwater – SUW*, por sus siglas en inglés) que permitieron analizar las trayectorias de los LCE en el GoM compuesto por masas de agua menos saladas denominadas *Gulf Common Water - GCW* (e.g. Behringer *et al.* 1977; Elliot, 1982). Con la llegada de los satélites a la oceanografía, los LCE se empezaron a detectar por

medio del contorno de los 17 cm dado por la Absolute Dynamic Topography (ADT). Sin embargo, al aproximarse al borde de la plataforma continental, la interacción de mar profundo con la dinámica sobre la plataforma continental altera la señal y se pierde el contorno, el cual es deformado, dificultando el seguimiento de los LCE. Debido a esto, se motivó a que se emplearan otras técnicas para la detección de LCE cerca de la plataforma continental. Por ejemplo, Rudnick *et al.* (2015) emplearon gliders submarinos para caracterizar los remolinos ciclónicos y anticiclónicos en el GoM. Con los datos obtenidos, confirmaron la presencia de una capa con salinidad máxima alrededor de los 200 m de profundidad y que los LCE están compuestos por agua subsuperficial más cálida y salina que el resto del GoM. Otro estudio más reciente (Hamilton *et al.*, 2018), demostró que en todas las posiciones donde midieron la salinidad con valores del nivel del mar superiores a 17 cm, tenían rastros de SUW y que la salinidad máxima se encontraba a una profundidad promedio de 175 m. Dado que en la capa superficial del océano la salinidad se ve influenciada por distintos procesos, como la descarga de ríos y tasas de precipitación/evaporación que inducen mezcla, en este estudio se emplearon los datos a 200 m de profundidad. Al tener la salinidad máxima próxima a los 200 m de profundidad, fue posible contrastar los núcleos de los LCE con el resto del GoM e identificar su aproximación a la plataforma continental como se muestra en la Figura 2-3. En esta figura se muestra para el día 10 de diciembre de 2011 la variación del nivel del mar (Figura 2-3 a) y la salinidad a 200 m de profundidad (Figura 2-3b) donde son evidentes tres núcleos de LCE, mientras que en la variación del nivel del mar solo se observa el LCE recién desprendido de la LC.

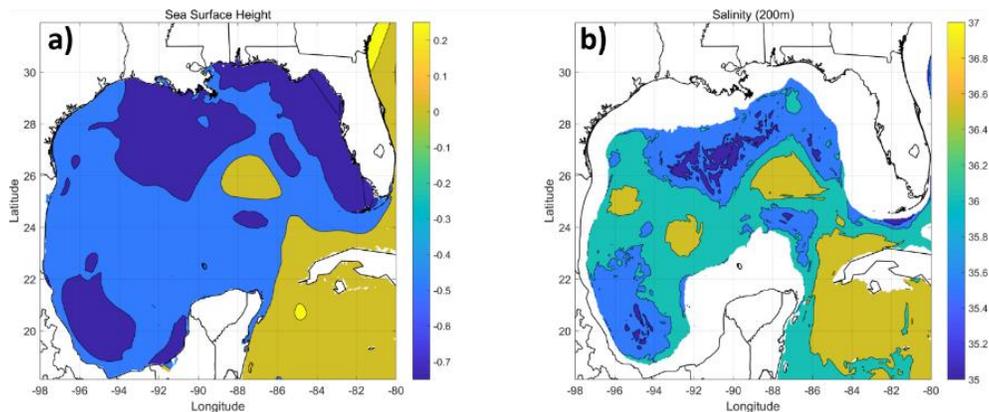


Figura 2-3 Datos del HYCOM para el 10 de diciembre de 2011. (a) en superficie mostrando la variación del nivel del mar (a) y la salinidad a 200 m de profundidad (b).

2.1.2 Campaña oceanográfica Perdido-01

La campaña oceanográfica PERDIDO-01 se llevó a cabo del 12 al 26 de mayo de 2016 a bordo del Justo Sierra. El muestreo se realizó sobre la plataforma continental y la zona oceánica adyacente al estado de Tamaulipas. Se realizaron lances con roseta instrumentada con CTD y LADCP para obtener mediciones de temperatura, salinidad, densidad, clorofila, oxígeno disuelto y velocidad de la corriente en la columna de agua. Se realizaron un total de 33 lances en 28 estaciones (Figura 2-4) entre las latitudes 24°N y 26°N. Los cuatro transectos ilustrados (B, C, D, F) están distribuidos zonalmente (aproximadamente normales a la costa) y cada estación tiene mediciones a distintas profundidades.

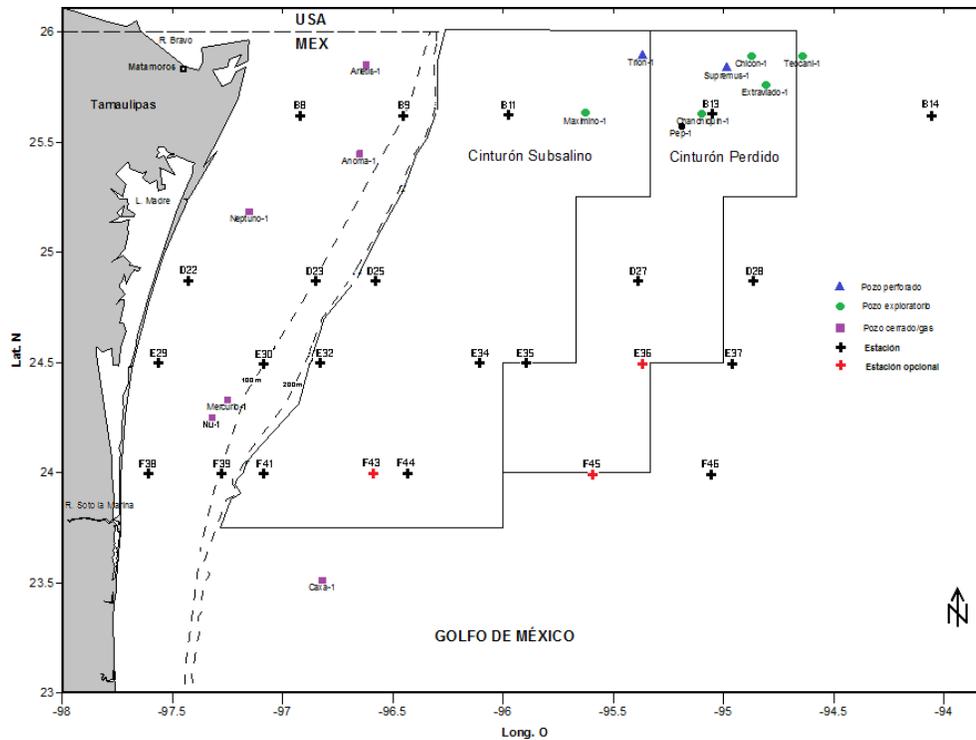


Figura 2-4 Ubicación de las estaciones de muestreo realizadas durante el crucero PERDIDO-01 a lo largo de 4 transectos normales a la costa. Las estaciones se encuentran sobre las isobatas de 50, 100, 500, 1000, 1500, 2000 y 3000 m.

2.2 Modelación numérica de la hidrodinámica, el oleaje y los vertidos de hidrocarburos.

La modelación numérica se implementó en este estudio para poder analizar la cobertura espacial y temporal restringida por las observaciones y/o los sensores remotos. Mientras que las mediciones nos permiten conocer puntualmente un parámetro (en un intervalo de tiempo determinado) y constituyen el dato real de la naturaleza, no revelan la variación espacio-temporal alrededor del sitio de medición. Por otro lado, si bien los sensores remotos permiten una mayor cobertura espacial, se ven restringidos a la capa superficial del océano, así como en la cobertura temporal debido a su traslación alrededor del planeta. Así, el uso de modelos numéricos provee mayor cobertura espacial y temporal lo que permitió caracterizar adecuadamente la hidrodinámica en la región. A continuación, se presenta el dominio computacional, las condiciones iniciales y de frontera para el modelo numérico y la descripción de las principales ecuaciones de los modelos utilizados.

2.2.1 Dominio computacional y batimetría.

Para caracterizar la circulación hidrodinámica en Perdido, se consideró la región costera de Texas, Tamaulipas y el norte de Veracruz (98°W – 94°W y 21.5°N – 30°N). Esta porción del WGoM se discretizó por medio de volúmenes finitos. La discretización se realizó por medio de una malla flexible no estructurada de baja resolución espacial fuera de costa (10 km) y de alta en la franja costera (0.5 km) dando como resultado 25,459 nodos y 49,633 elementos. El dominio computacional tiene una frontera abierta al sur que varía longitudinalmente sobre la latitud 21.5°N

y otra al este que varía latitudinalmente sobre la longitud 94°W, mientras que el resto del dominio es limitado por la línea de costa. En la discretización vertical se emplearon mallas estructuradas compuestas por una combinación de 15 niveles sigma y 10 niveles zeta de espesor variable y topológicamente idénticas (vea Figura 2-5 y Figura 2-6, Tabla 2 y Tabla 3). Las coordenadas sigma siguen el contorno del fondo marino y son útiles en aguas someras, porque pueden representar con precisión el relieve del fondo. Las coordenadas zeta son rectangulares y ahorran tiempo de cómputo en aguas profundas, ya que hay poca variabilidad vertical. Son útiles en aguas profundas porque representan con precisión los gradientes horizontales de presión y la mezcla vertical. Por lo tanto, la combinación de ambas coordenadas resultó ser una buena aproximación para la compleja batimetría y escarpes pronunciados en la zona de estudio, considerando la optimización del tiempo computacional.

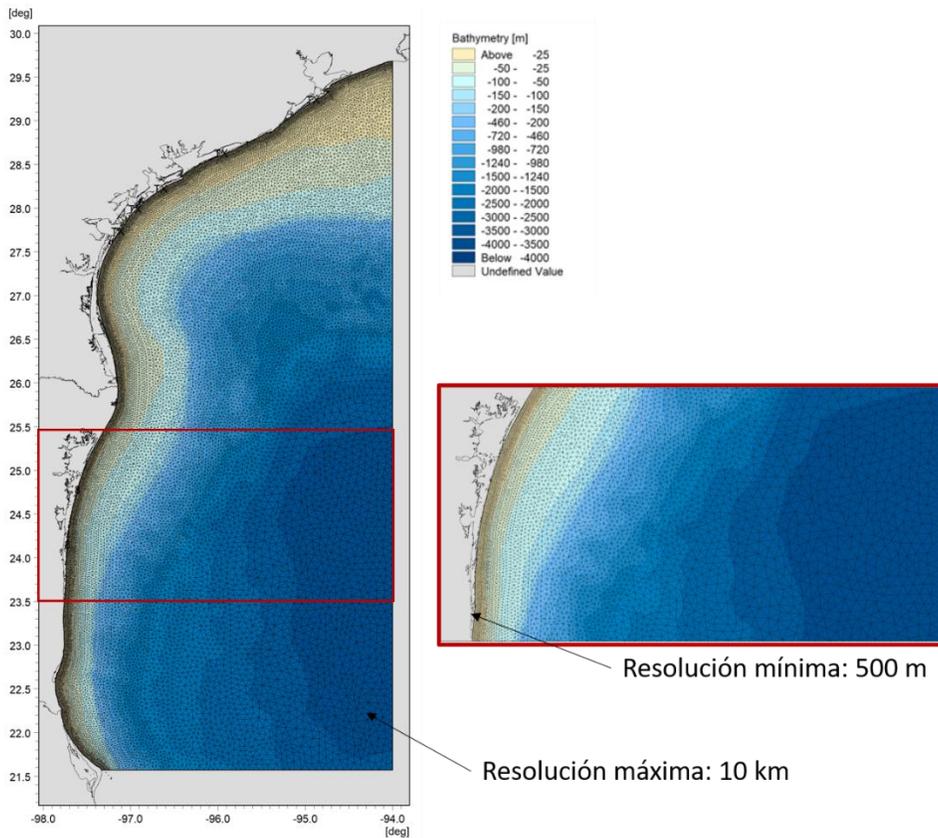


Figura 2-5 Porción noroccidental del GoM que muestra la discretización horizontal por medio de mallas flexibles no estructuradas de resolución variable, desde 10 km costa afuera hasta 500 m en el frente costero.

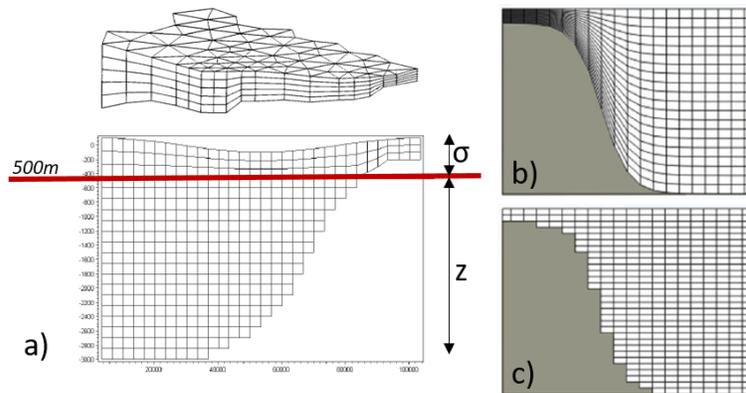


Figura 2-6 (a) Discretización vertical combinada de resolución variable con niveles sigma hasta 500 m de profundidad y coordenadas zeta en el resto de la columna de agua. (b) Esquema de coordenadas sigma siguiendo el relieve del fondo. (c) Esquema de coordenadas zeta en capas rectangulares.

Tabla 2 - Distribución vertical en coordenadas sigma de los primeros 500 m de profundidad

Niveles sigma normalizados (desde la superficie libre hasta los 500 m de profundidad)															
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Val	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.10	0.10	0.15	0.15	0.20

Tabla 3 - Distribución vertical en coordenadas zeta a partir de los 500 m de profundidad hasta el fondo marino

Niveles zeta en metros (a partir de los 500 m de profundidad hasta el fondo marino)										
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Val	100	200	300	500	750	750	500	300	200	100

Los datos batimétricos empleados para generar el dominio computacional fueron proporcionados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM al grupo de investigadores del CIGOM como un producto terminado. Todo el análisis y procesamiento de los datos fue realizado por el grupo de trabajo del Dr. Zavala-Hidalgo, sin embargo en esta sección se describen brevemente. Las fuentes empleadas fueron:

- Datos de GEBCO de 1'
- Datos de HYCOM pronóstico de 1/25°
- Batimetría HYCOM exp.32.5 de 1/25°
- Batimetría PEMEX de 1/100°
- Batimetría COAPS de 1/12°
- Batimetría del Dr. Zavala-Hidalgo de 1/20°
- Batimetría Cozumel Norte de 0.0028°

Las batimetrías fueron interpoladas y comparadas entre sí, contra la carta batimétrica internacional del Mar Caribe y Golfo de México (IBCCA) y contra los datos obtenidos por sondeos de profundidad realizados por la NOAA, entre otras instituciones. Tras dicho análisis, los

investigadores del CCA decidieron emplear los datos de GEBCO como batimetría base, los datos de HYCOM para la plataforma continental norte, región oriental y centro del GoM, los datos de PEMEX para el Banco de Campeche y Veracruz, y la batimetría de Cozumel para el Canal de Cozumel. En la Figura 2-7 (a) se muestran las regiones que cubren cada una de las batimetrías mencionadas. Debido a que detectaron que la fusión de distintas fuentes batimétricas genera brincos abruptos entre las bases de datos, decidieron suavizar las isobatas por medio de una función tangente hiperbólica, la cual le dio continuidad a los contornos batimétricos (Figura 2-7 b). En la Figura 2-7 (c) se muestra un transecto vertical a lo largo del estrecho de Florida, los contornos son la magnitud de la corriente de la base de datos del HYCOM. En ella se observa que los datos tienen una discretización vertical distinta y más robusta que no cubre por completo la columna de agua del dominio computacional con mayor resolución. Por lo tanto, fue necesario extrapolar la información del HYCOM hacia el fondo para cubrir toda la columna de agua.

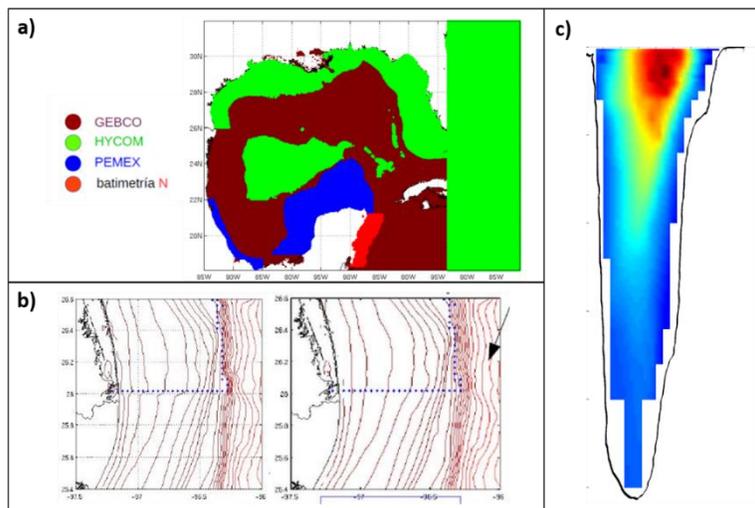


Figura 2-7 (a) Distribución espacial de las bases de datos que se emplearon para la batimetría del Golfo de México. (b) Suavizado de los contornos batimétricos por medio de una función tangente hiperbólica. (c) Transecto vertical en el estrecho de Florida, donde la magnitud de la corriente se muestra en contornos.

2.2.1 Condiciones iniciales y de frontera.

Los modelos numéricos necesitan condiciones iniciales y de frontera para poder reproducir la circulación oceánica en la zona de interés, por lo que se emplearon distintos modelos globales. Para la parte oceánica se empleó el *HYbrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM) + *Navy Coupled Ocean Data Assimilation* (NCODA) específicamente para el GoM, mientras que para la parte atmosférica se empleó el *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR). Ambos modelos tienen datos disponibles para la zona de estudio. HYCOM + NCODA desde enero de 1993 y el CFSR desde enero de 1979. A continuación, se describen las principales características de cada modelo.

El HYCOM + NCODA GoM fue desarrollado por el *Naval Research Laboratory* como un modelo general de circulación oceánica compuesto por tres distintos tipos de coordenadas en la vertical. En aguas abiertas y estratificadas usa coordenadas basadas en la densidad (*isopycnal*). En aguas someras y costeras usa la ecuación de continuidad para crear una transición dinámica a coordenadas que siguen el fondo marino. Finalmente emplea coordenadas Z en la capa de

mezcla y/o aguas no estratificadas. Los distintos tipos de coordenadas permite mayor resolución en la parte superficial del océano y en zonas someras, lo cual implica una mejor representación de los procesos físicos que ocurren en el mar. El modelo incluye asimilación de datos por medio del NCODA, el cual fue desarrollado por Cummings (2005) y Cummings & Smedstad (2013). El NCODA colecta información de altimetría, temperatura superficial del mar, así como perfiles de salinidad de distintos dispositivos (e.g. XBTs, flotadores Argo y boyas) y los asimila al modelo para tener una mejor representación numérica de las condiciones reales. La proyección de los valores en superficie hacia el fondo se realiza por medio de los perfiles sintéticos MODAS desarrollados por Fox *et al.* (2002). Los perfiles sintéticos del MODAS son propiedad de la marina estadounidense y no están disponibles para su distribución. El HYCOM + NCODA GoM incluye la marea astronómica y el desfogue de los principales ríos que desembocan en el GoM. Tiene una resolución horizontal uniforme de $0.04^\circ \times 0.04^\circ$ en un sistema coordinado de longitud/latitud mientras que en la vertical está compuesto por 40 niveles. Los datos utilizados tienen una resolución temporal de 3 horas.

El CFSR es un modelo global de alta resolución espacial y temporal desarrollado por el *National Centre for Environmental Prediction* para caracterizar las condiciones climáticas en tierra, océano y atmósfera. El CFSR provee información a partir de enero de 1979 a 2010 (Saha *et al.* 2010) con una extensión (CFSv2) a partir de enero 2011 hasta la fecha (Saha *et al.* 2014). El modelo asimila información satelital por medio de una interpolación estadística a cada nodo de la malla y cubre por medio de 64 niveles un total de 38 km de la atmósfera desde la superficie hasta los 0.26 hPa. El CFSR tiene datos disponibles cada hora y una resolución horizontal mínima de $0.3125^\circ \times 0.3125^\circ$ en proyección longitud/latitud.

La configuración inicial del modelo hidrodinámico requiere de las siguientes condiciones:

- Un campo 2D de la superficie libre
- Un campo 3D de salinidad y temperatura para el dominio computacional
- Un campo 2D para las condiciones de frontera, de corrientes, salinidad y temperatura
- Un transecto con la variación del nivel del mar a lo largo de la frontera abierta
- Un campo 2D con la presión atmosférica y las componentes del viento a 10 m sobre el nivel del mar

Para simular el crecimiento, transformación y decaimiento del oleaje, se requiere:

- Un campo 2D de las componentes del viento
- Condiciones de frontera para incorporar el oleaje local y mar de fondo

Finalmente, el modelo de transporte de hidrocarburos se corrió de forma desacoplada incorporando como condiciones iniciales y de frontera los campos de corriente y densidad obtenidos de las simulaciones realizadas con los dos modelos anteriores.

2.2.2 Implementación del modelo hidrodinámico MIKE3 HDFM

El MIKE3 HDFM se ha desarrollado para aplicaciones en ambientes estuarinos, costeros y marinos. Se basa en la resolución tridimensional de las ecuaciones promediadas de Reynolds y Navier-Stokes bajo los supuestos de presión hidrostática y Boussinesq. Las ecuaciones de continuidad, momentum, temperatura, salinidad y densidad se consideran dentro de un esquema de turbulencia cerrado.

La ecuación de continuidad está descrita por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (\text{Ec. 2-1})$$

Donde x, y, z son las coordenadas cartesianas; u, v, w son las componentes de la velocidad en las direcciones x, y, z y S es la magnitud de la descarga debido a una fuente.

La ecuación del momentum horizontal en las componentes x - e y - está descrita por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} &= fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ &\frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2-2})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} &= -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ &\frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2-3})$$

Donde t es el tiempo; x, y, z son las coordenadas cartesianas; η es la superficie libre; d es la columna de agua; $h = \eta + d$ es la profundidad total; u, v, w son las componentes de la velocidad en las direcciones x, y, z ; $f = 2\Omega \sin\Phi$ es el parámetro de Coriolis donde Ω es la velocidad angular de la rotación de la tierra y Φ es la latitud geográfica; g es la aceleración gravitacional; ρ y ρ_0 son la densidad del agua y la densidad de referencia; s_{xx}, s_{xy}, s_{yx} son los tensores de radiación; v_t es la viscosidad turbulenta; p_a es la presión atmosférica; S es la magnitud de la descarga debido a una fuente y u_s, v_s son las velocidades de descarga de la fuente hacia el entorno.

Los términos horizontales del esfuerzo (en u y v) se describen usando una relación esfuerzo-gradiente simplificada de la siguiente manera:

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

Donde A es la viscosidad horizontal turbulenta.

Las condiciones de frontera de superficie y fondo para u, v, w son:

At $z = \eta$:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 V_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy})$$

At $z = -d$:

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 V_t} (\tau_{bx}, \tau_{by})$$

Donde (τ_{sx}, τ_{sy}) y (τ_{bx}, τ_{by}) son las componentes en x- e y- del esfuerzo generado por el viento en superficie y la fricción en el fondo respectivamente.

Dado que el agua se considera como un fluido incompresible, la densidad no depende de la presión, sólo de la salinidad y temperatura por medio de la ecuación de estado dada por UNESCO (1981) $\rho = \rho(T, s)$. La advección de la salinidad y la temperatura en el medio siguen la ecuación general de transporte-difusión (DHI, 2017). La viscosidad turbulenta en la horizontal emplea la formulación de Smagorinsky con un valor constante de 0.28 mientras que en la vertical emplea la formulación k-epsilon con una viscosidad turbulenta máxima de 0.4 m²/s.

La fricción de fondo está determinada por el coeficiente de fricción dada por:

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \bar{u}_b |\bar{u}_b|$$

Donde c_f es el coeficiente de arrastre y $\bar{u}_b = (u_b, v_b)$ es la velocidad del flujo encima del fondo. La velocidad del flujo en el fondo está determinada por el esfuerzo de fricción y está dada por:

$$U_{\tau b} = \sqrt{c_f |u_b|^2}$$

Para cálculos en 3D, \bar{u}_b es la velocidad en el fondo a una determinada profundidad Δz_b y el coeficiente de arrastre se determina asumiendo un perfil logarítmico entre el fondo y una profundidad específica (Δz_b):

$$c_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\Delta z_b}{z_0} \right) \right)^2}$$

Donde $\kappa = 0.4$ es la constante de Von-Karman y z_0 es la longitud de escala de la rugosidad del fondo con un valor de 0.05m. El esfuerzo en superficie está determinado por el viento y está dado por la siguiente relación empírica:

$$\bar{\tau}_s = \rho_a c_d |\bar{u}_w| \bar{u}_w$$

Donde ρ_a es la densidad del aire, C_d es el coeficiente de arrastre por viento, y $\bar{u}_w = (u_w, v_w)$ es la velocidad del viento a 10 metros sobre el nivel del mar. La velocidad del flujo en superficie está dada por:

$$U_w = \sqrt{\frac{\rho_a c_f |\bar{u}_w|^2}{\rho_0}}$$

El coeficiente de arrastre depende de la velocidad del viento y emplea la fórmula empírica propuesta por Wu (1980, 1994) para la parametrización:

$$c_f = \begin{cases} c_a & w_{10} < w_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a} (w_{10} - w_a) & w_a \leq w_{10} < w_b \\ c_b & w_{10} \geq w_b \end{cases}$$

Donde $C_a = 1.255 * 10^{-3}$, $C_b = 2.425 * 10^{-3}$, $w_a = 7.5 \frac{m}{s}$, $w_b = 27.5 \text{ m/s}$ son factores empíricos y w_{10} es la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie.

Además de los parámetros mencionados, se consideran los siguientes criterios. Integración temporal y discretización espacial en un esquema de orden alto (i.e. Runge-Kutta de 4to orden). El intervalo de tiempo utilizado es de una hora y el número crítico de la condición de Courant-Friedrich-Levy (CFL) para controlar la estabilidad numérica es de 0.8. En todas las simulaciones se incluye el efecto de Coriolis y el forzamiento del oleaje por medio de los tensores de radiación, los cuales influyen a las corrientes en aguas someras. El desfogue de los principales ríos en la zona de estudio se obtuvo del Atlas de Agua en México (2016).

2.2.3 Implementación del modelo espectral de oleaje MIKE21 SW

El modelo espectral de oleaje de tercera generación MIKE 21 SW (Sørensen *et al.* 2004) se emplea para simular el crecimiento, decaimiento y transformación de ondas generadas por el viento, tanto en regiones costeras como en mar profundo. Dentro de sus aplicaciones se encuentra el diseño de estructuras fuera de costa, determinación del clima marítimo y predicción de oleaje para eventos extremos. En este trabajo se incluye la modelación del oleaje con el propósito de incorporar sus efectos sobre los patrones de circulación y sobre los procesos de mezcla durante un derrame. La discretización espacial y espectral de las ecuaciones se realizó por medio de volúmenes finitos centrados en cada celda, y la integración temporal se hace con

una aproximación de paso de tiempo fraccional donde el método que se usa para propagar el oleaje es explícito de multi-secuencia.

La densidad del espectro varía en tiempo y espacio en función de dos parámetros, de la dirección del número de onda (θ) y de la frecuencia angular relativa ($\sigma = 2\pi f$). La densidad de acción (N) está relacionada con la densidad de energía (E) por medio de:

$$N = \frac{E}{\sigma}$$

Para este estudio, la ecuación de balance de acción del oleaje está dada por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma}$$

Donde $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ es la densidad de acción, t es el tiempo, $\vec{x} = (x, y)$ son las coordenadas cartesianas, $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ es la velocidad de propagación del grupo de ondas y S es el término fuente para la ecuación de balance de energía. ∇ es el operador diferencial 4D en \vec{x}, σ, θ – *espacio*. Las cuatro velocidades de propagación características están dadas por:

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right]$$

Donde, s es la coordenada espacial en la dirección de la onda θ , y m es la coordenada perpendicular a s . $\nabla_{\vec{x}}$ es el operador diferencial 2D en \vec{x} – *espacio*.

El término fuente de energía (S) representa la superposición de funciones fuente que describen varios fenómenos físicos y está dada por:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

Donde S_{in} representa la generación de energía por el viento (Janssen 1989, 1991; Janssen *et al.* 1989); S_{nl} la transferencia de energía no lineal en la interacción onda-onda (Hasselmann and Hasselmann 1985; Hasselmann *et al.* 1985; Komen *et al.* 1994); S_{ds} es la disipación de energía debido al descrestamiento (Komen *et al.* 1994); S_{bot} es la disipación de energía debido a la fricción con el fondo (Johnson and Kofoed-Hansen 2000) y S_{surf} es la disipación de energía debido a la rotura del oleaje inducida por el fondo (Battjes and Janssen 1978; Eldeberky and

Battjes 1996). Para más información relacionada a los términos fuente, la discretización de las ecuaciones de gobierno, la integración temporal y los parámetros del modelo se sugiere leer a Sorensen *et al.* (2004).

La configuración inicial del MIKE21 SW se basa en el trabajo realizado por Ruiz-Salcines (2013), donde se calibró y validó el modelo utilizando datos de las boyas de la NOAA bajo condiciones normales, frentes fríos y huracanes. Se consideró la solución totalmente espectral, no estacionaria en el tiempo con una discretización direccional de 36 direcciones para cubrir todos los ángulos del oleaje incidente y una discretización espectral logarítmica de 32 frecuencias con un factor de 1.1 a partir de una frecuencia mínima de 0.05 Hz. El intervalo de tiempo utilizado fue de una hora. Las interacciones cuádruples se incluyen en la transferencia de energía. Para la rotura del oleaje se considera un valor γ constante de 0.80 y un valor α de 1. La fricción de fondo se aproxima por medio del modelo de Nikuradse con un valor constante de 0.04 m. Para el descrestamiento se consideraron los coeficientes de disipación C_{dis} y Δt_{dis} con valores de 3.5 y 0.6 respectivamente. La condición inicial está dada por las fórmulas de JONSWAP en la zona de generación (*fetch*) y para el crecimiento del oleaje con los parámetros $a = 0.07$, $b = 0.09$ y parámetro pico = 3.3. Las fronteras son cerradas, es decir que no entra ni sale oleaje al dominio (e. g. Appendini *et al.* 2013, 2014), pues se asume que la influencia del mar de fondo (swell) generado en el Atlántico Norte y en la parte central/oriental del Mar Caribe es despreciable para la región del WGoM.

El oleaje generado se acopló al modelo hidrodinámico MIKE3 HDFM para incluir la influencia del oleaje sobre la variación del nivel del mar, las corrientes y los procesos de mezcla ante un derrame de hidrocarburos.

2.2.4 Implementación del modelo de transporte de hidrocarburos MIKE OS

Para simular el movimiento y decaimiento de un derrame, se utilizó una aproximación Lagrangiana por medio del módulo de MIKE 21/3 Oil Spill. Este modelo considera las partículas como un volumen de control y no modifica las condiciones hidrodinámicas ni el entorno. El modelo se ha empleado exitosamente en otras regiones del mundo para evaluaciones de impacto ambiental, derrames aislados, operaciones de limpieza, sistemas de alerta temprana, evaluación de la cantidad de dispersantes requerida para la contingencia de un vertido, entre otras aplicaciones. El decaimiento del crudo fue caracterizado por medio de distintos procesos tales como dispersión, emulsificación, disolución, sedimentación, evaporación, oxidación y biodegradación (Figura 2-8 a), los cuales están sujetos a diferentes escalas temporales (Figura 2-8 b) conforme a su composición química (Figura 2-8 c). Así, el crudo se categorizó en dos fracciones. Una porción volátil ligera (peso molecular inferior a 160 g/mol con punto de ebullición inferior a 300°C) y una porción pesada (superiores a dicho umbral). En cuanto a las ceras y los asfaltenos, se consideró que no sufren de ningún tipo de degradación, evaporación o disolución en el medio.

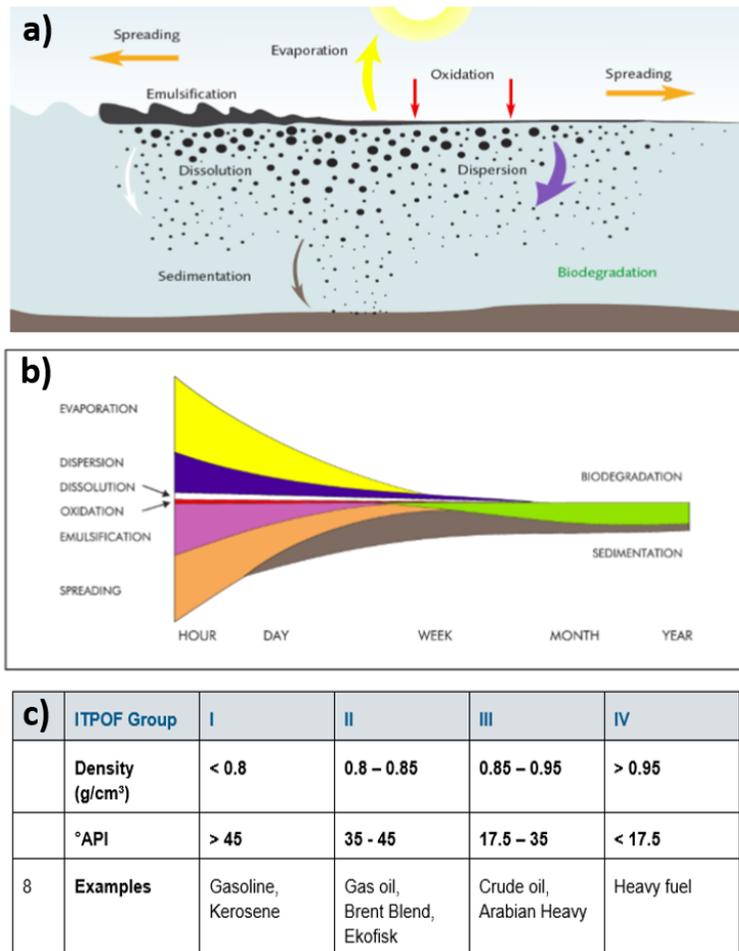


Figura 2-8 (a) Esquema de los distintos procesos de intemperismo que puede sufrir un hidrocarburo en el mar. (b) Esquema de las distintas escalas temporales (desde horas hasta años) acorde a cada proceso. (c) Agrupación del crudo en 4 grupos acorde a su densidad. Adaptado de DHI (2019).

El modelo considera el intemperismo ilustrado en la Figura 2-8 por medio de ocho variables de estado que se basaron en una ecuación diferencial de primer orden para describir la variación temporal. La fracción volátil ligera (en kg) se representa como la pérdida de masa debido a la evaporación, la disolución, la biodegradación y la fotooxidación. La fracción pesada (en kg) se representa como la pérdida de masa debido a la disolución, la biodegradación y la fotooxidación. Las ceras (en kg) y asfaltenos (en kg) se igualan a cero, ya que no sufren de ningún cambio. La fracción de agua por crudo (kg/kg) se representa por medio de la emulsificación y la liberación de agua dentro de la fracción del crudo. El diámetro de las gotas se define acorde a French-McCay (2004) y está en función de la tasa de disipación energética debido a la rotura del oleaje y a la viscosidad cinemática. El área que cubre el vertido se definió por medio de una constante de dispersión (Mackay, 1980), el volumen del crudo derramado y el área de la partícula. Las proporciones de cada componente varían dependiendo del tipo de crudo que se quiera representar en la simulación. Las simulaciones que conforman el catálogo utilizaron un crudo medio con la siguiente proporción: fracción ligera (50%), fracción pesada (40%), ceras (8%) y asfaltenos (2%). Este criterio se basó en la caracterización de los tipos de crudo que se pueden extraer en la región. Las componentes de masa se definieron como un volumen de control dentro del flujo con la misma distribución en cada partícula. Es decir, el número de partículas necesario

para simular un vertido es independiente del volumen de éste, ya que las partículas dependen de la densidad del crudo. Por lo tanto, las componentes de masa se distribuyen en el número de partículas. Por ejemplo, si se considera un vertido de 1,000 kg y se emplean 1,000 partículas, entonces el modelo asigna automáticamente 1 kg por partícula. Ahora, si se incrementa el número de partículas (10,000), entonces el modelo ajustará la masa por partícula. En este sería 0.1 kg por partícula.

Los principales forzamientos empleados en el modelo de transporte fueron: la velocidad y dirección horizontal de deriva, la velocidad vertical de deriva, la velocidad y dirección del viento, temperatura, salinidad, densidad y la altura y el periodo del oleaje incidente. Las simulaciones del vertido en superficie y fondo se realizaron por medio de la liberación de partículas durante cada hora en 11 distintos puntos que representan el perímetro de los bloques licitados por la CNH. Se obtuvo un total de 896 simulaciones numéricas al considerar derrames en superficie y fono en 28 ubicaciones en 16 escenarios hidrodinámicos ($28 \times 2 \times 16 = 896$).

2.3 Determinación de zonas de afectación y el catálogo de búsqueda sobre vertidos

Para evaluar las zonas afectadas se utilizó un mapa de ocurrencia, el cual indica que regiones tuvieron mayor incidencia de partículas durante el derrame simulado. Para determinar qué zonas serían afectadas antes que otras, se utilizó la edad de la partícula, la cual está definida por la duración de la simulación. La distribución espacial en 3D del vertido se obtuvo al trazar la trayectoria de las partículas en el plano horizontal y a lo largo de la columna de agua. Con un total de 896 simulaciones, fue necesario recurrir a un catálogo de búsqueda para poder visualizar las zonas con mayor ocurrencia, el tiempo de arribo y la distribución tridimensional de forma eficiente. El catálogo es una serie de funciones y matrices que operan dentro del software Matlab. Por lo tanto, es necesario que los usuarios cuenten con esta herramienta para poder visualizar los datos. La descripción paso a paso del contenido del catálogo se encuentra en el siguiente capítulo.

3 DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Esta sección se divide en cuatro partes. En la primera se describen los resultados obtenidos con la técnica de los SOM para caracterizar la distribución espacial y temporal de la circulación oceánica en el WGoM, así como la dinámica observada durante la campaña de campo. En la segunda parte se describen los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas de los tres modelos. En la tercera, se establecen las zonas de afectación por vertido de hidrocarburos y en la cuarta parte se describe el catálogo de búsqueda con un ejemplo de aplicación.

3.1 Caracterización de la circulación oceánica en el Golfo de México Occidental

3.1.1 Distribución espacial y temporal de la circulación oceánica

La distribución espacial de la circulación oceánica se dividió en 49 patrones. La dimensión de los remolinos se describió con base en la terminología empleada por el servicio de pronóstico y monitoreo para operadores en la industria costa afuera *Woods Hoole Group, Inc.* (www.horizonmarine.com/loop-current-eddies). En la liga anterior, clasifican los LCE en cuatro grupos de forma muy simplificada: muy grande, grande, mediano y pequeño. En ese tenor, en la Figura 3-1 (a) se muestran los cuatro patrones más frecuentes siendo el de recuadro rojo el más frecuente (3.56%). En la Figura 3-1 (b) los cuatro menos frecuentes siendo el del recuadro azul el menos frecuente (1.00 %) y en la Figura 3-1 (c), la ocurrencia que tuvieron los 49 patrones. Las barras rojas indican los patrones del inciso (a) y las azules los patrones del inciso (b). Los cuatro patrones más frecuentes muestran un LCE grande (patrón 9), mediano (patrón 3 y 18) y pequeño (patrón 15) al oeste de la longitud 94°W. El patrón 9 en recuadro rojo (más recurrente), muestra un giro de Campeche recargado hacia el oeste. Los cuatro patrones menos frecuentes muestran un LCE pequeño (patrón 46), un LCE entrante muy grande con corrientes fuertes y alta salinidad (patrón 38), una región del golfo medio con más SUW que GCW debido a la presencia de dos LCE (patrón 2) y el menos frecuente (patrón 21 en recuadro azul) es un proceso de fusión con corrientes de pequeña magnitud. Esta caracterización encajó con la descripción de estudios previos basados en mediciones de campo (e.g. Sheinbaum *et al.* 2010; Dubranna *et al.* 2011) y contra datos modelados que incluyen asimilación de datos como el hindcast (1992-1999) del Princeton Ocean Model descrito por Oey (2003).

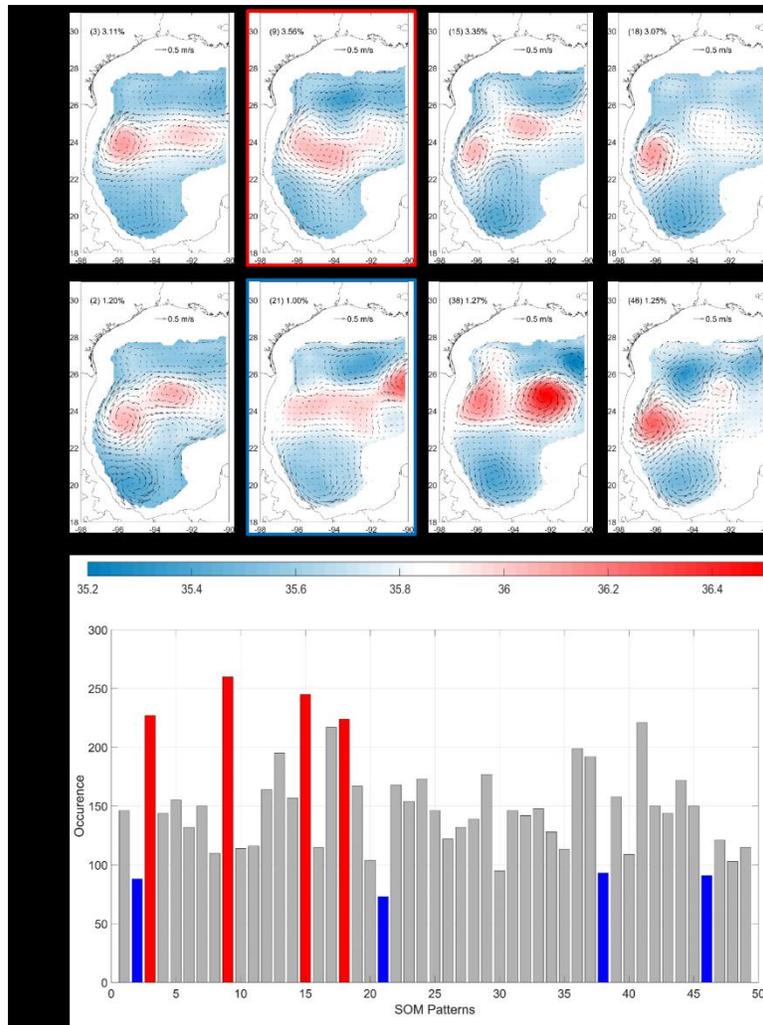


Figura 3-1 – Patrones de circulación obtenidos del análisis espacial de los SOM. a) Distribución espacial de los cuatro patrones más persistentes, el recuadro rojo indica el patrón más frecuente. b) Distribución espacial de los cuatro patrones menos persistentes, el recuadro azul indica el menos frecuente. En la esquina superior izquierda se muestra en paréntesis el número del patrón y en porcentaje su frecuencia a lo largo de la serie de tiempo. La salinidad se muestra en contornos en un rango de 35.2 a 36.5 PSU, mientras que los vectores indican la dirección de la corriente. c) Conteo de los pasos de tiempo que contiene cada patrón. La suma de todas las barras equivale a la longitud de la serie temporal de entrada. Las barras rojas corresponden a la distribución espacial de los patrones en (a) y las barras azules corresponden a la distribución espacial de los patrones en (b).

La Figura 3-2 muestra la partición de los 49 patrones en 7 grupos dominantes utilizando el método de K-means y el índice de agrupamiento de Davies-Bouldin (Davies & Bouldin, 1979). Los K-means agruparon la información acorde a características y propiedades similares entre sí mientras que el índice es una métrica que evalúa la calidad del agrupamiento basado en características inherentes a los datos. El agrupamiento se realizó con el propósito de simplificar la caracterización de la circulación en el WGoM como se muestra en Meza-Padilla *et al.* (2019).

1 2.00%	8 1.51%	15 3.36%	22 2.30%	29 2.42%	36 2.72%	43 1.97%
2 1.20%	9 3.57%	16 1.57%	23 2.11%	30 1.30%	37 2.63%	44 2.35%
3 3.11%	10 1.56%	17 2.97%	24 2.37%	31 2.00%	38 1.27%	45 2.05%
4 1.97%	11 1.59%	18 3.07%	25 2.00%	32 1.94%	39 2.16%	46 1.25%
5 2.12%	12 2.25%	19 2.29%	26 1.67%	33 2.03%	40 1.49%	47 1.66%
6 1.81%	13 2.67%	20 1.42%	27 1.81%	34 1.75%	41 3.03%	48 1.41%
7 2.05%	14 2.15%	21 1.00%	28 1.90%	35 1.55%	42 2.05%	49 1.57%

Figura 3-2 - Patrones del análisis espacial del SOM concentrados con K-means y el índice de Davies-Bouldin para obtener 7 grupos dominantes. Cada patrón tiene un porcentaje de ocurrencia y los 7 grupos se identifican por medio del color de los recuadros.

La distribución espacial de los 7 grupos dominantes se muestra en la Figura 3-3 y se describe a continuación.

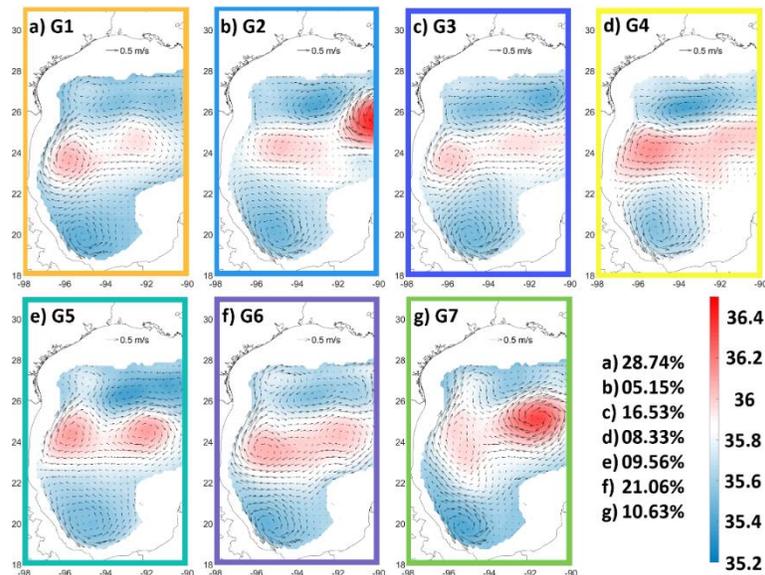


Figura 3-3 - Siete grupos dominantes para la circulación oceánica en el Golfo de México Occidental. Los índices indican el porcentaje de ocurrencia, la salinidad está en contornos y los campos de velocidad en vectores.

El Grupo 1 conforma la distribución espacial más frecuente en el WGoM y está compuesto por doce patrones. Los 4 patrones más frecuentes de la Figura 3-1 a se encuentran en este grupo. La principal característica del grupo es la presencia de un LCE mediano en la zona de impacto con corrientes intensificadas al norte viajando a lo largo del borde de la plataforma y formando un patrón en forma de gancho en la porción norte del WGoM. Este giro anticiclónico se ha

detectado por medio de trayectorias de deriva por Hamilton *et al.* (1999) y con altimetría por Hyunn & Hogan (2008), quienes lo asocian al efecto topográfico de la esquina noroccidental (i.e. forma semi-cerrada entre las latitudes 26°N a 28°N y longitudes 94°W a 96°W). Además, se ha identificado por medio de estructuras coherentes lagrangianas (cLCSs) por Gough *et al.* (2019). Este grupo de circulación oceánica revela una transferencia de energía a escalas menores como producto de la colisión de los LCE, lo cual genera ciclones sub-superficiales y chorros como mecanismos de disipación también reportados por Hyunn & Hogan (2008) en el GoM y por Zhang *et al.* (2016) en el mar del sur de China.

El Grupo 2 está compuesto por tres patrones. Se caracteriza por el cruce de los LCE a través de la longitud 90°W entrando a la porción occidental del GoM. La alta salinidad en el núcleo y las fuertes corrientes que forman un ciclón par al norte de la latitud 26°N son características propias de los remolinos anticiclónicos que recién se desprenden de la LC.

El Grupo 3 contiene nueve patrones, en los cuales se muestra a los LCE pequeños que apuntan al suroeste e inducen la traslación del giro de Campeche hacia el este mientras que en la porción norte del WGoM se forman ciclones de sub-mesoescala. Los LCE pequeños promueven el transporte a través de las isobatas cerca de la pendiente de la plataforma forzando la circulación por encima del quiebre de la misma como se ha descrito anteriormente por Ohlmann *et al.* (2001).

El Grupo 4 se conforma por cinco patrones. Este grupo es particularmente interesante porque las altas salinidades a lo largo del GoM no se encuentran encapsuladas por núcleos definidos como sucede en los otros casos, además, el giro de Campeche se muestra extendido. Después de un intervalo pronunciado entre incidencias de LCE o LCE débiles apuntando al oeste, el giro de Campeche se expande. También se aprecia un ciclón mediano al norte debido al chorro en dirección costa afuera generado por la porción norte del LCE.

El Grupo 5 tiene cinco patrones. En ellos, el giro de Campeche muestra una extensión al oeste a lo largo del borde de la plataforma veracruzana con una inclinación hacia el norte. El LCE existente y el incidente, se están agrupando en el GoM por lo que la principal característica de este grupo es una absorción/fusión entre LCE existentes e incidentes. Este proceso provee de energía y vorticidad al LCE en decadencia e incita una propagación al oeste aunado a un incremento en dimensión, lo cual permite colisiones subsecuentes.

El Grupo 6 está compuesto por diez patrones que muestran un giro anticiclónico muy grande después del proceso de fusión o absorción. Estos anillos chocan en las pendientes oeste y noroeste. Las colisiones al norte de la latitud 24°N generan pares ciclónicos-anticiclónicos debido al impacto normal a una pendiente pronunciada (Hyunn & Hogan, 2008). Se ha detectado que este tipo de LCE contrae el giro de Campeche al sur, mientras que se presentan fuertes corrientes a lo largo del borde de la plataforma en la zona de impacto. Este proceso incita transporte a través de las isobatas como se ha reportado en estudios previos como por ejemplo Ohlmann *et al.* (2001). Valores altos de salinidad dominan el GoM central mostrando valores similares entre los núcleos de los LCE y el área adyacente.

El Grupo 7 tiene cinco patrones donde un LCE bien definido con alta salinidad se encuentra al este de la longitud 93°W. La señal de salinidad en el GoM central muestra una mezcla entre SUW y GCW difuminando el núcleo del LCE anterior. Fuertes corrientes se encuentran en el GoM central debido al LCE recién desprendido y a lo largo del borde de la plataforma donde la corriente en forma de gancho es visible. El giro de Campeche se ve inclinado sobre la plataforma

veracruzana causando corrientes hacia la costa en dirección al noroeste debido a la interacción entre la porción norte del giro de Campeche y la porción sur del LCE.

Agrupar los 49 patrones en 7 grupos dominantes tiene el único propósito de simplificar la caracterización de la circulación oceánica. Sin embargo, para las modelaciones numéricas se buscó un balance entre la cantidad de escenarios y se decidió emplear 16 patrones como se muestra en la Figura 13. Este criterio permitió capturar mayor variabilidad en las distintas condiciones oceánicas de la región y conservó un bajo número de escenarios permitiendo su inspección. Además, los 16 patrones obtenidos a partir de un arreglo de 4x4 encajan adecuadamente con las características de los patrones dominantes de la Figura 3-4.

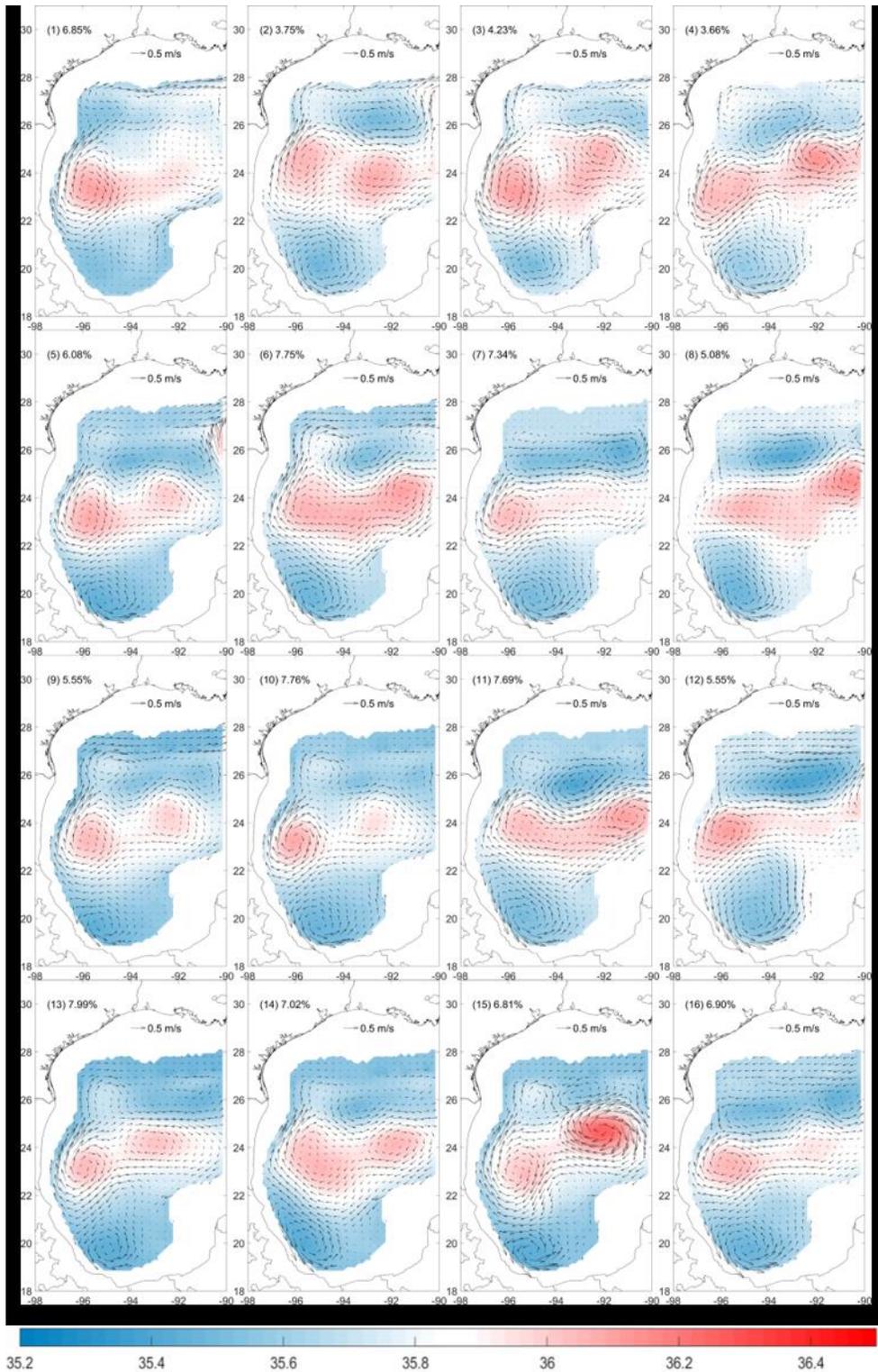


Figura 3-4 – Patrones de circulación obtenidos del SOM con base en una matriz de 4x4. En la esquina superior izquierda el número del patrón está en paréntesis y su ocurrencia en porcentaje. Salinidad en contornos y campo de velocidades en vectores.

Al estudiar las series temporales de salinidad y corrientes, los SOM pudieron identificar regiones que varían de forma similar, extrayendo los distintos patrones temporales a lo largo del WGoM. Los nodos se agruparon conforme a la similitud que tuvieron y conformaron las regiones que se presentan en la Figura 3-5 (a). La caracterización temporal mostró que los valores más bajos de salinidad se encontraron en la región C3 mientras que los más altos en la región C2. Acorde a Donohue *et al.* (2008), la región C2 corresponde a la posición final de 20 trayectorias de LCE entre 1993 y 2005. Por lo tanto, la presencia de SUW empacada en los núcleos de los LCE arribó a la región C2. La dilución de salinidad entre la SUW entrante (propagándose a lo largo de las regiones C4 y C6) y la GCW se encontró en la región C1. Tras analizar las series temporales (Figura 3-5 b), la salinidad máxima que se encontró en la región C2 correspondió al LCE Pelagic el cual se desprendió de la LC el 26 de febrero de 2002. Conforme el LCE Juggernaut (23 de enero de 2000) se introducía al WGoM, su dimensión permitió que altas salinidades se identificaran para esa fecha en la región C5. Sin embargo, esta región fue dominada por la formación de ciclones pares que se desprenden de la LC y otros ciclones que se forman tras las colisiones de los LCE. Destacó que en el registro de Horizon Marine, solo Nelson (febrero de 1989 a diciembre de 1990) se consideró un LCE muy grande hasta la entrada del LCE Juggernaut, casi diez años después. A partir de entonces, la tasa de LCE muy grandes entrando al WGoM se mantuvo constante hasta Nautilus y Olympus que se formaron el mismo año y se desprendieron en mayo 2015 y agosto 2015 respectivamente. Las regiones C6-C4-C2 cuentan con una salinidad promedio mayor al resto de las regiones indicando la ruta que tomaron los LCE en su propagación al oeste. El análisis del SOM indicó que la porción sur del LCE regula la intrusión noroccidental del giro de Campeche, por ende, controla su variabilidad geoespacial, coincidiendo con los estudios de Perez-Brunius *et al.* (2018) y Tenreiro *et al.* (2018).

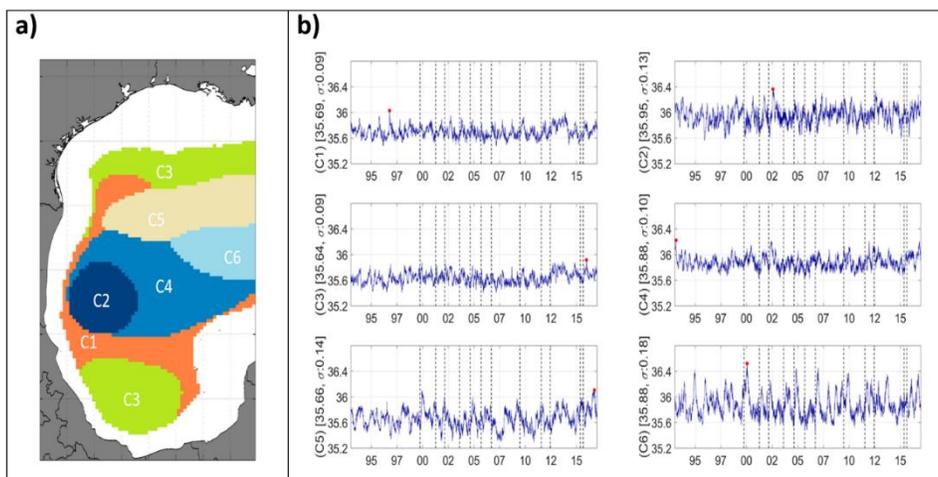


Figura 3-5 - Análisis temporal del SOM con un arreglo de 2x3 (6 patrones). a) Las seis regiones de variabilidad temporal (C1 a C6). b) Variación temporal característica de la salinidad a 200 m de profundidad para cada región identificada en a). La media y la desviación estándar de la salinidad están en el eje Y de cada panel. Los puntos rojos indican la salinidad máxima registrada en cada región y las líneas punteadas verticales indican las fechas de desprendimiento de 12 LCE en ese periodo acorde a Horizon Marine.

Los patrones temporales y espaciales mostraron que conforme los LCE entraron al WGoM e interactuaron con los remanentes de LCE previos, ocurrió un proceso de fusión. Los LCE de

mayor tamaño desplazaron el giro de Campeche hacia el sur, mientras que los LCE de menor tamaño le permitieron expandirse. Se identificaron tres direcciones dominantes asociadas a procesos de circulación específicos. Los LCE en dirección suroeste tendieron a ser de menor tamaño y tuvieron corrientes débiles alrededor de la latitud 26°N. Los LCE de tamaño medio en dirección oeste fueron los más comunes y formaron la corriente que asemeja un gancho en la porción noroccidental del WGoM. Finalmente, los LCE en dirección noroeste generaron corrientes de mayor magnitud entre las latitudes 24°N y 26°N e interactuaron con la batimetría. Estos remolinos tendieron a separarse del talud continental y regresaron a la porción central del GoM donde fueron absorbidos por LCE entrantes. La parte central del GoM fue dominada por el paso de LCE y la fusión de masas de agua locales y las transportadas por los LCE. La ruta de los LCE se ubicó por medio del análisis temporal en las regiones C4 y C6.

La interacción de la porción norte del giro de Campeche con la porción sur del LCE transportó agua hacia la costa y se considera, acorde a este estudio, que es uno de los principales mecanismos de mezcla entre las masas de agua en el WGoM como se muestra en la región C1 del análisis temporal. En términos de los procesos físicos que afectan el tránsito de los LCE y su interacción con la batimetría y otros fenómenos en el WGoM, ocurrió una transferencia de energía (mesoescala a sub-mesoescala) como mecanismo de disipación. La diferencia entre las rutas de los LCE grandes y los pequeños, es que los grandes impactan en las pendientes occidental y noroccidental de la plataforma, mientras que los pequeños se propagaron francos al suroeste. La migración al norte de los LCE se fomentó cuando se reduce la fricción entre la batimetría y los LCE. Los impactos normales a una pendiente pronunciada también propiciaron la propagación al norte.

La reflexión costa afuera, la propagación del dipolo en la porción norte del LCE y una ruta anticiclónica son resultado de esta interacción y estudios previos concuerdan con esta conclusión como se muestra en Hyunn & Hogan (2008). Con estos resultados se desprende que el resultado principal fue detectar un proceso de absorción/fusión. Por otro lado, el análisis temporal reveló regiones específicas donde ocurrieron transferencias de energía. Al delimitar el WGoM en 6 regiones con base en la salinidad y las corrientes, se obtuvieron las regiones que variaron de forma similar a lo largo del tiempo y se establecieron zonas de mezcla entre las masas de agua SUW y GCW. Además, se detectó una zona de impacto específica (C2) que se pudo dividir en tres tipos (NW, W, SW). Las rutas preferentes de propagación se ubicaron entre las latitudes 22°N y 26°N donde la circulación ciclónica de sub-mesoescala es dominante.

3.1.2 Circulación oceánica durante la campaña oceanográfica Perdido-01

Durante la campaña oceanográfica Perdido-01 que se llevó a cabo del 12 al 26 de mayo de 2016, la región se encontró bajo la influencia de un giro ciclónico al norte y uno anticiclónico al sur. Como resultado, se presentó una convergencia de ambos sistemas que indujo flujo costa afuera, como mostró la circulación geostrofica extraída con altimetría obtenida del portal de oceanografía física de la NOAA en <https://www.aoml.noaa.gov/phod/dhos/altimetry.php>. En la Figura 3-6 se muestra la corriente geostrofica en vectores y la altura dinámica en contornos. El perfil vertical de corrientes de la estación más profunda se adaptó del reporte técnico de la campaña (Enriquez & Mariño, 2016) y se muestra en la Figura 3-7 (a)Figura 3-6. Los datos se obtuvieron por medio de un correntómetro acústico Doppler (LADCP) instalado en la roseta. El tono rojo indica la

componente zonal de la velocidad y el verde la meridional donde se aprecia cómo en los primeros 500 metros de profundidad domina una corriente hacia el este (fuera de costa). Se presentó una segunda corriente profunda (entre 1,500 m y 2,500 m) que se dirige al este, mientras que el resto del perfil contiene velocidades próximas a cero.

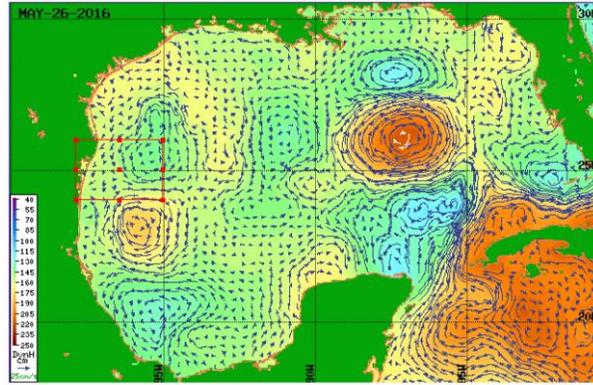


Figura 3-6 - Circulación geostrofica del Golfo de México durante la campaña oceanográfica de Perdido, de acuerdo a la NOAA. El recuadro rojo delimita la zona de lances de la campaña.

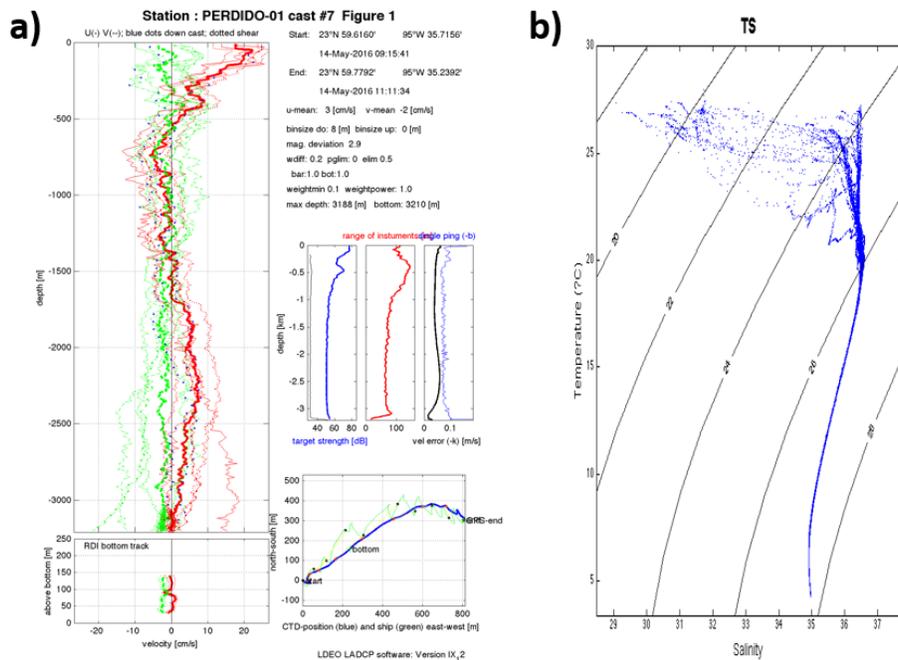


Figura 3-7 – a) Perfil vertical de corrientes medidas con LADCP en la estación más profunda del muestreo. Perfil de velocidades (izquierda) y parámetros de calidad (derecha). b) Diagrama de Temperatura - Salinidad (TS) para todas las estaciones muestreadas en Perdido-01. Adaptado del reporte técnico Enriquez & Mariño (2016).

Las condiciones termohalinas en la Figura 3-7 (b), muestran que la región tiene una marcada convergencia de masas de agua oceánicas y de descargas continentales, ya que el diagrama TS refleja una dilución de las aguas marinas durante la temporada del muestreo (mayo).

Acorde a Enriquez & Mariño (2016), la capa superficial mostró menor temperatura cerca de la costa y mayor temperatura al sureste de la región. Conforme incrementó la profundidad, el

gradiente horizontal de temperatura fue cambiando de dirección, con menor temperatura al noroeste y mayor al sureste, quedando un gradiente norte-sur (menores temperaturas al norte) en profundidades mayores a 50 m. El reporte técnico indicó que la productividad de clorofila se concentró en la zona costera y aumentó en la porción fuera de costa alrededor de los 100 m de profundidad. El oxígeno disuelto tuvo un máximo alrededor de los 50 m de profundidad mientras que al norte se encontró a menor profundidad (influenciado por el ciclón) y al sur a mayor profundidad (influenciado por el anticiclón). Las temperaturas, salinidades y densidades fueron constantes a partir de los 500 m de profundidad y hasta el fondo marino.

En la latitud 25.25°N, se trazó un transecto perpendicular a la costa que cubrió la columna de agua desde la superficie hasta los 1,500 m de profundidad. En este transecto, Enriquez & Mariño (2016), analizaron distintas variables como temperatura, salinidad y densidad (Figura 3-8). A partir de los 500 m de profundidad hacia el fondo los cambios termohalinos fueron menores. La columna de agua fue estable y bien estratificada con agua más cálida y de menor salinidad en la superficie. En superficie, se apreció agua de baja salinidad sobre una capa de máxima salinidad alrededor de los 200 m, mientras que la termoclina se apreció entre los 100 y 500 m de profundidad.

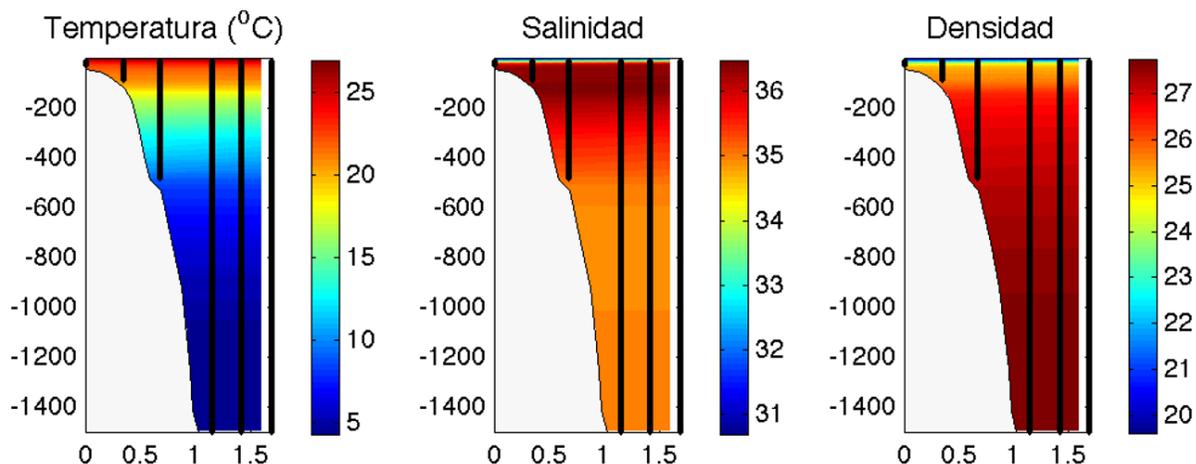


Figura 3-8 - Transecto perpendicular a la costa en latitud 25.25°N de superficie a 1,500 m de profundidad. El eje x muestra la distancia desde la costa en grados, mientras que el eje y muestra la profundidad. Adaptado del reporte técnico Enriquez & Mariño (2016).

3.2 Modelación numérica de hidrodinámica, oleaje y vertido de hidrocarburos

En esta sección se describen los resultados obtenidos de los modelos numéricos y se comparan con las mediciones disponibles. Para validar la hidrodinámica, se emplearon dos bases de datos. Los registros de las boyas de la NOAA (<https://www.ndbc.noaa.gov/>) en las estaciones 42019 y 42020, y los registros obtenidos durante la campaña de Perdido-01 del 12 al 26 de mayo de 2016. De las boyas se obtuvieron los registros de presión atmosférica y viento a 10 metros sobre el nivel del mar. Los valores de salinidad, temperatura y corrientes se obtuvieron de la campaña de campo. Para validar el oleaje se usaron nuevamente las estaciones 42019 y 42020 con los registros de altura de ola significativa y periodo medio. En la Figura 3-9 se muestran las ubicaciones de las estaciones de la campaña y de las dos boyas de la NOAA empleadas. La nota LADCP indica la posición del perfil vertical de corrientes en la estación más profunda y próxima

a las fronteras del dominio computacional. El modelo de transporte de hidrocarburos es más complejo de validar debido a la escasez de datos en la región, entonces se realizó un análisis de sensibilidad para determinar la importancia de cada mecanismo de transporte sobre las trayectorias. Las configuraciones del análisis se resumen en la Tabla 4 de la Sección 3.2.3.

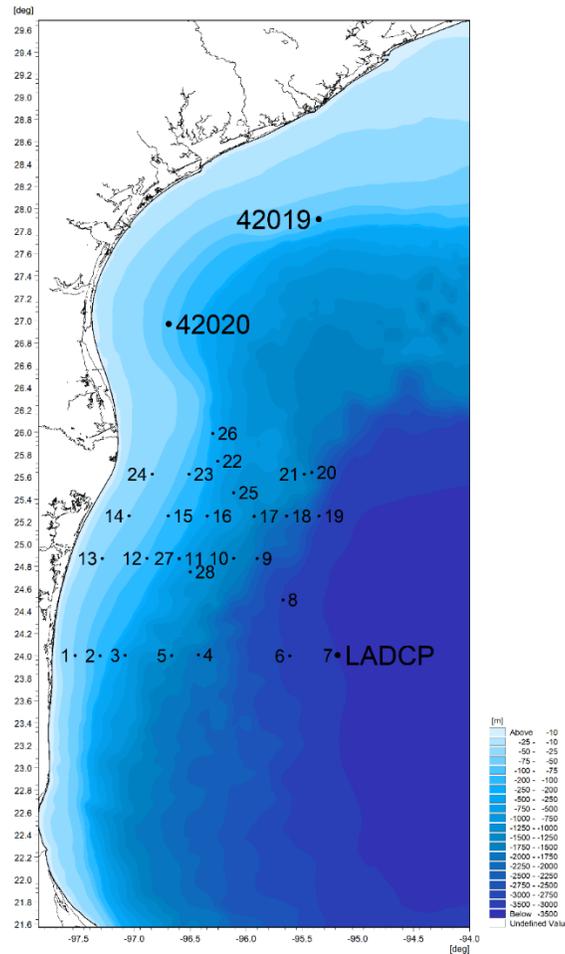


Figura 3-9 - Ubicación geográfica de lances en la campaña de Perdido 01 y boyas NDBC para la validación de los modelos numéricos.

3.2.1 Validación del modelo hidrodinámico MIKE3 HD FM

La validación del modelo hidrodinámico demostró que el modelo numérico tiene la capacidad de reproducir adecuadamente las condiciones medidas in situ. En esta sección se compararon los registros del viento y la presión atmosférica de las boyas 42019 y 42020 de la NOAA. Además, se comparó la temperatura, salinidad y corrientes en la estación más profunda de la campaña Perdido-01.

En la Figura 3-10 se muestra la validación en la boya 42019 donde se compararon la presión atmosférica, la magnitud y dirección del viento durante el periodo de la campaña de Perdido-01.

La presión atmosférica modelada con datos del CFSR mostró representar adecuadamente los datos medidos. La magnitud del viento modelada y observada permaneció generalmente por debajo de los 10 m/s a excepción de un pico aproximado de 15 m/s modelado que no se encontró en el registro medido y está asociado a un cambio de dirección que no capturó el modelo. La dirección del viento se mantuvo dentro del rango de 0 a 180 grados con predominancia a 90 grados. Es decir, vientos del este, lo cual es congruente con la época del año.

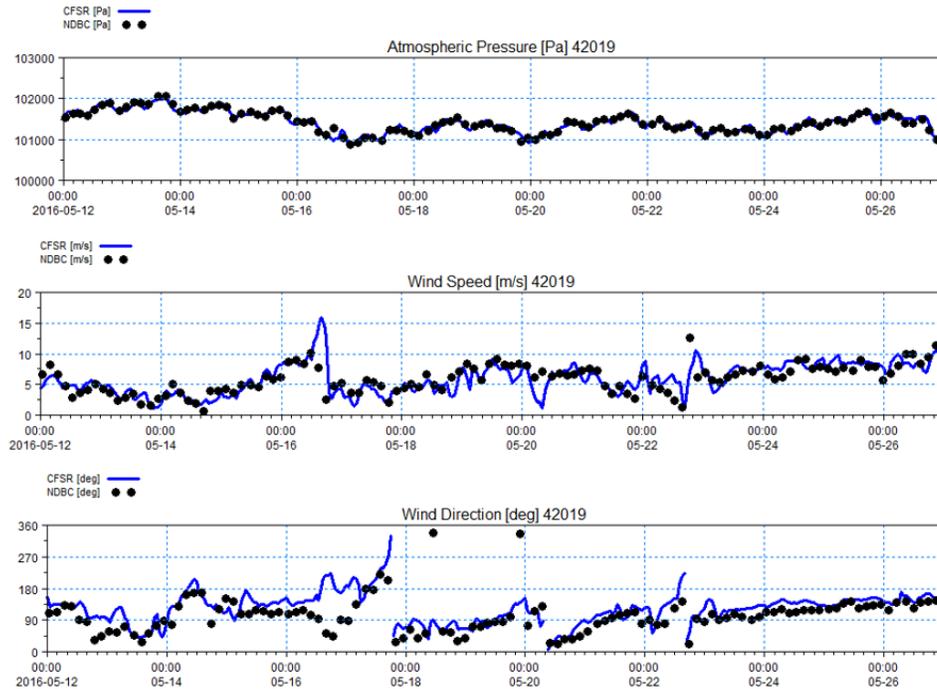


Figura 3-10 - Validación atmosférica en boya 42019 de presión atmosférica (panel superior), magnitud del viento (panel medio) y dirección del viento (panel inferior). En puntos negros el registro medido por la boya y en azul CFSR.

En la Figura 3-11, se muestra la validación en la boya 42020 donde se observó que durante el periodo de la campaña no se presentaron vientos superiores a 12 m/s. El modelo logró reproducir adecuadamente las oscilaciones del registro a excepción de las fechas posteriores al 24 de mayo donde sobreestimó ligeramente la magnitud del viento. Sin embargo, durante ese mismo periodo, la dirección del viento se mantuvo constante y el modelo la capturó correctamente. El 16 de mayo de 2016, se presentó un único registro medido con dirección de 270 grados (oeste) con un viento asociado de 5 m/s que no es capturado por el modelo, pero fue de poca duración y baja intensidad, por lo que se considera que no afecta en el transporte de hidrocarburos.

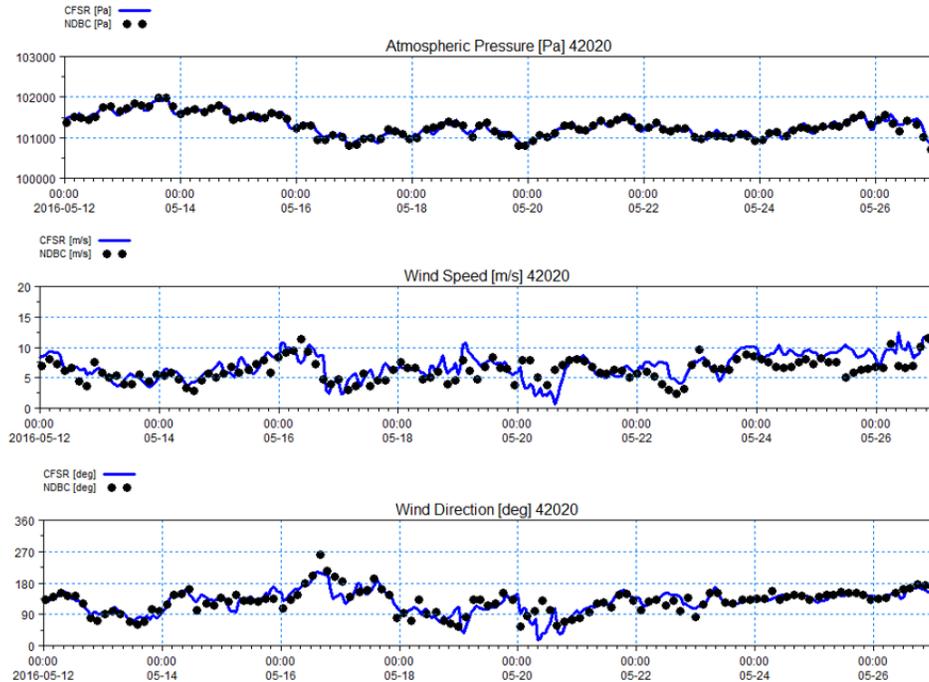


Figura 3-11 - Validación atmosférica en boya 42020 de presión atmosférica (panel superior), magnitud del viento (panel medio) y dirección del viento (panel inferior). En puntos negros el registro medido por la boya y en azul CFSR.

El análisis anterior muestra la validación durante el periodo de la campaña. Esta validación se realizó para los 16 escenarios del SOM y los resultados se encuentran en el Anexo 01 – Atmosférico.

Para validar la hidrodinámica en la zona de estudio se emplearon las mediciones obtenidas a partir de las diferentes estaciones muestreadas durante la campaña de Perdido-01. La salinidad y temperatura obtenida con el CTD se agrupo acorde a la profundidad medida:

- 50 metros – Estaciones 1, 13, 14 y 24.
- 100 metros – Estaciones 2, 12, 15 y 23
- 500 metros – Estaciones 3, 16, 22 y 27
- 1,000 metros – Estaciones 25, 26 y 28
- 1,500 metros – Estaciones 4, 10, 17 y 21
- 2,000 metros – Estaciones 9, 18 y 20
- 3,000 metros – Estaciones 6, 8 y 19
- 3,500 metros – Estación 7

Las corrientes marinas que se obtuvieron con el LADCP se agruparon de la misma forma:

- 50 metros – Estaciones 1, 26.
- 100 metros – Estaciones 2, 15, 16 y 25.
- 500 metros – Estaciones 3, 17, 24 y 29.
- 1,000 metros – Estaciones 27 y 28.
- 1,500 metros – Estaciones 5, 14, 18 y 23.
- 2,000 metros – Estaciones 4, 12, 13, 19, 21 y 22.
- 3,000 metros – Estaciones 6, 7, 10, 11 y 20

- 3,500 metros – Estación 8

En la Figura 3-12 se muestra la estación a 3,500 metros de profundidad mientras que el resto de las estaciones se encuentran en el anexo referente a la validación hidrodinámica. Los resultados se resumen a continuación.

- La profundidad total medida, modelada con (MIKE3) y la del modelo regional (HYCOM) fueron distintas. Es complicado aproximarse a la batimetría correcta debido a las distintas resoluciones espaciales y verticales de los modelos aunado a los escarpes pronunciados en la región.
- Las estaciones sobre la plataforma continental (<200 m de profundidad) mostraron corrientes del mismo orden de magnitud, pero las direcciones difirieron.
- A 500 m de profundidad los resultados del MIKE3 se apegaron más al registro medido que a los resultados de HYCOM, tanto en velocidad como en dirección de las corrientes.
- A 1,000 m de profundidad el registro medido en la estación 28 muestra una corriente que va hacia el este (fuera de costa) y gira hacia el sur después de los 900 m de profundidad y tanto MIKE como HYCOM no pudieron capturar estos giros cerca del fondo marino. En la estación 27 el MIKE3 se apegó al giro de las corrientes mientras que el HYCOM proyectó la dirección en superficie hacia el fondo.
- A 1,500 m de profundidad, MIKE3 y HYCOM subestimaron las corrientes en los primeros 500 m en las estaciones 5, 14 y 18 mientras que reprodujeron adecuadamente la magnitud en la estación 23. En la estación 14 el MIKE3 reprodujo una corriente en superficie que va hacia el este en superficie y gira hacia el norte conforme incrementa la profundidad mientras que los valores medidos muestran que giró de sur hacia el este.
- Las estaciones a 2,000 m de profundidad mostraron que las corrientes en los primeros 200 m de profundidad en el HYCOM se apegaron más a los valores medidos que los de MIKE3, mientras que las direcciones no fueron capturadas por ambos modelos.
- A 3,000 m los modelos reprodujeron unos giros de corriente a profundidades mayores a 1,000 m que no se presentaron en el registro medido. La magnitud se representó adecuadamente por ambos modelos.

A modo de ejemplo aquí se muestra la estación más profunda debido a dos razones. Por un lado, fue la más cercana a las fronteras del dominio computacional, lo cual permitió comparar los valores de entrada del HYCOM y como MIKE3 los adaptó para propagarlos hacia el resto del dominio. Por otro, al comparar los perfiles verticales de corriente en los registros medidos en las regiones someras contra ambos modelos numéricos, se presentó gran variabilidad. Esta gran variabilidad entre corrientes medidas y modeladas se asoció a la discretización vertical que usaron los modelos, la compleja batimetría caracterizada por cañones y pendientes pronunciadas y la alta dinámica en la zona de estudio debido al impacto de los LCE. Este resultado sugiere la necesidad de incorporar mayor resolución en la vertical, lo cual incrementará considerablemente el costo computacional de correr las simulaciones.

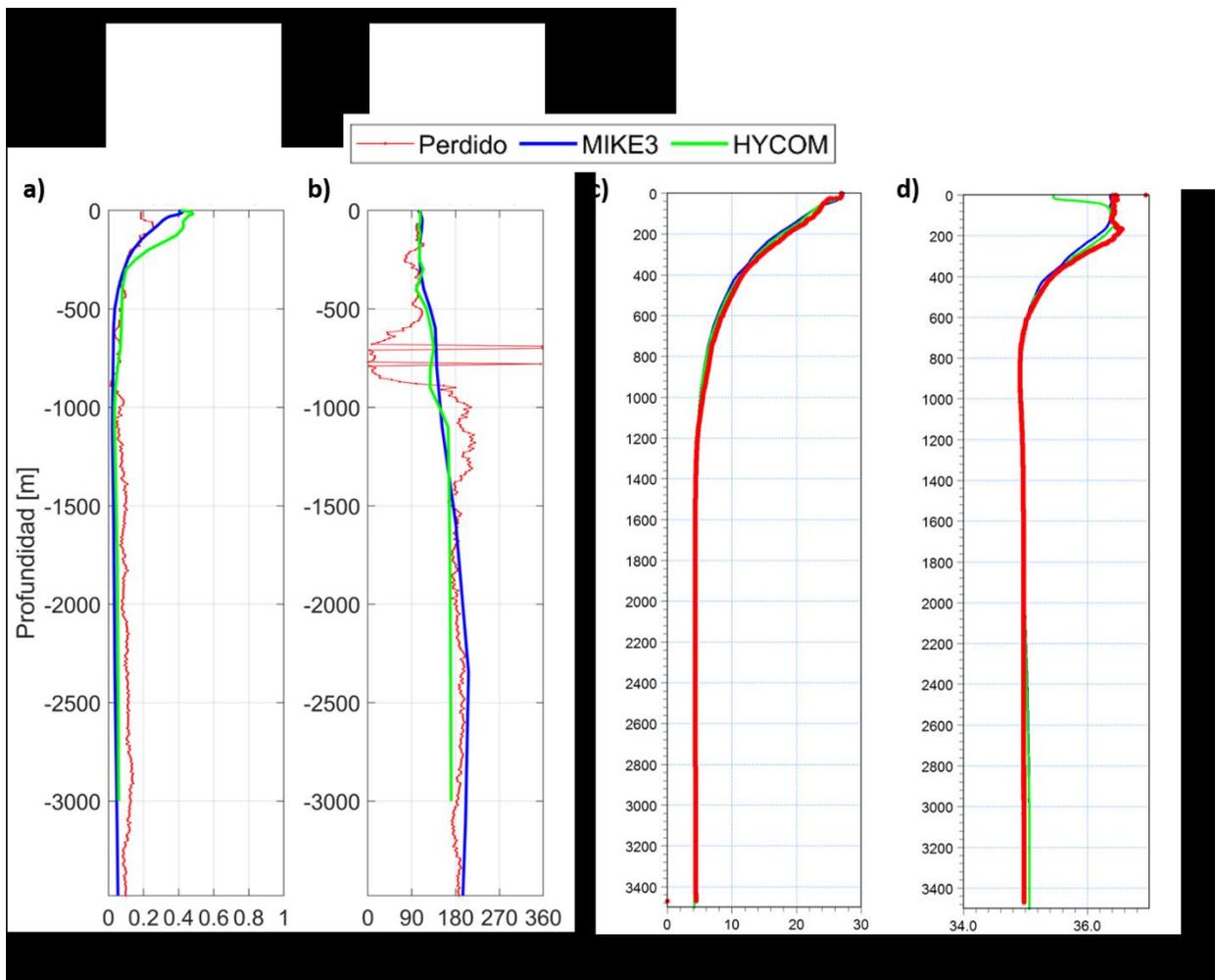


Figura 3-12 - Validación hidrodinámica de MIKE3 a lo largo de la columna de agua en la estación 7. a) Velocidad; b) Dirección; c) Temperatura y d) Salinidad. En color rojo se muestra el registro medido en campo, en azul MIKE3 y en verde HYCOM.

Tras haber analizado el perfil vertical de corrientes (Figura 3-12 a), se obtuvo que la mayor velocidad se encontró en superficie y fue disminuyendo hacia el reposo conforme se aproximó a los 1,000 m de profundidad. A partir de dicha profundidad (1,000 m), las mediciones registraron corrientes que oscilaron alrededor de 0.12 m/s en el resto de la columna de agua mientras que los modelos (HYCOM y MIKE3) las subestimaron. Sin embargo, los modelos mostraron una buena aproximación al perfil vertical de corrientes en los primeros 500 m de profundidad, lo que se relaciona a la mayor resolución en la vertical. En la Figura 3-12 (b), los primeros 500 m de profundidad mostraron una dirección dominante del norte. Entre 500 y 780 m de profundidad la corriente giró de norte a este y posteriormente regresó al norte entre 780 y 1,000 m. Este giro no fue capturado por los modelos. De los 1,000 m de profundidad hacia el fondo, la dirección promedio osciló entre los 240 y 280 grados con un promedio de 270 grados (oeste).

Por otro lado, las temperaturas (Figura 3-12 c) modeladas mostraron representar adecuadamente los valores medidos, tanto en superficie como en el resto de la columna de agua. El valor máximo osciló alrededor de los 27°C en superficie y decreció paulatinamente conforme se aproximó a los 1,000 m de profundidad donde adquirió un valor constante de 4.7°C hasta llegar al fondo marino. Finalmente, el perfil de salinidad (Figura 3-12 d) mostró valores superiores a 36.40 PSU en los

primeros 100 m de profundidad y una salinidad máxima alrededor de los 200 m de profundidad con un valor medido de 36.56 PSU. A partir de esta profundidad y hacia los 1,000 m de profundidad, decreció hasta obtener un valor aproximado de 35 PSU el cual permaneció constante el resto de la columna de agua. Los valores modelados se apegaron al perfil de salinidad a excepción de los valores superficiales donde HYCOM mostró una mayor dilución (menor salinidad) que la medida en campo. MIKE3 se aproximó más a la salinidad medida en los primeros 100 m de profundidad y entre 100 y 300 m de profundidad subestimó la salinidad medida. Posteriormente, el perfil de salinidad del MIKE3 adquirió un perfil altamente correlacionado con las mediciones. En las estaciones más someras se presentó mayor variabilidad entre los valores medidos y los modelados, lo cual se asoció a procesos recurrentes sobre la plataforma continental.

Las comparaciones de los perfiles de corrientes, salinidad y temperatura se realizaron para todas las estaciones de la campaña y se presentan en el Anexo 02 – Hidrodinámica.

3.2.2 Validación del modelo espectral de oleaje MIKE21 SW

La validación del modelo espectral de oleaje se realizó empleando los datos de altura de ola significativa y periodo medio obtenidos de las estaciones 42019 y 42020 de la NOAA. Se seleccionaron estas boyas debido a la extensa cobertura temporal que tienen, lo cual permitió emplearlas para validar tanto el periodo de la campaña de campo como el periodo de los distintos escenarios empleados en este estudio. En la Figura 3-13, se muestra el análisis estadístico realizado para la estación 42019 durante mayo 2016. El inciso (a) muestra la correlación entre los valores medidos y los modelados mientras que a la derecha se muestran las métricas de la correlación (i.e. error medio, error medio absoluto, raíz cuadrada del error medio, desviación estándar de residuales, coeficiente de determinación, coeficiente de eficiencia e índice de concordancia). En el inciso (b), se muestran los mínimos, máximos, promedios y desviaciones estándar para los valores medidos (azul) y modelados (rojo). En el inciso (c) se muestra la serie temporal de la altura de ola significativa y en el inciso (d) la serie temporal del periodo medio. A raíz de este análisis, se determinó que para la estación 42019 el modelo sobrestimó la altura de ola significativa máxima, mientras que el resto de la serie temporal mostró una subestimación tanto del oleaje como del periodo medio.

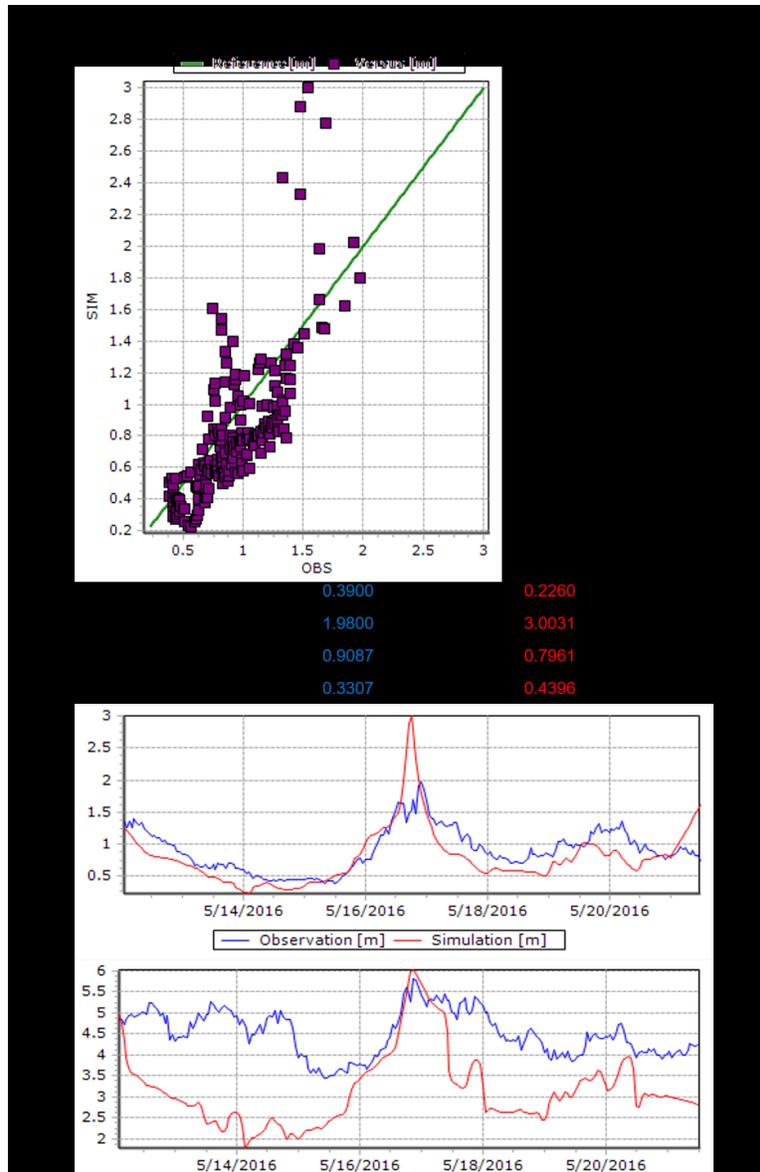


Figura 3-13 - Validación del oleaje en boya NDBC 42019. Correlación entre valores medidos (azul) y modelados (rojo) con tablas descriptivas de la estadística de la muestra (panel superior) y registro temporal de altura de ola significativa y periodo (panel inferior).

La Figura 3-14 muestra los resultados para la estación 42020. La información se distribuyó conforme a los incisos descritos en la figura anterior. En esta boya, la altura de ola significativa medida fue representada adecuadamente por el modelo. Sin embargo, nuevamente subestimó el periodo medio a lo largo de toda la serie temporal. En el Anexo 03 – Oleaje, se presentan las validaciones del oleaje para los 16 escenarios del SOM. En algunos casos la correlación fue muy alta y los valores modelados representaron adecuadamente la altura de ola significativa en ambas estaciones. Sin embargo, en todos los escenarios fue recurrente la subestimación del periodo medio. Esto se debe a que únicamente se modeló el oleaje inducido por el campo de vientos local y las fronteras del modelo se consideraron cerradas. Posiblemente incrementé el periodo medio al alimentar las fronteras del modelo con los espectros de energía del oleaje incidente del resto del GoM.

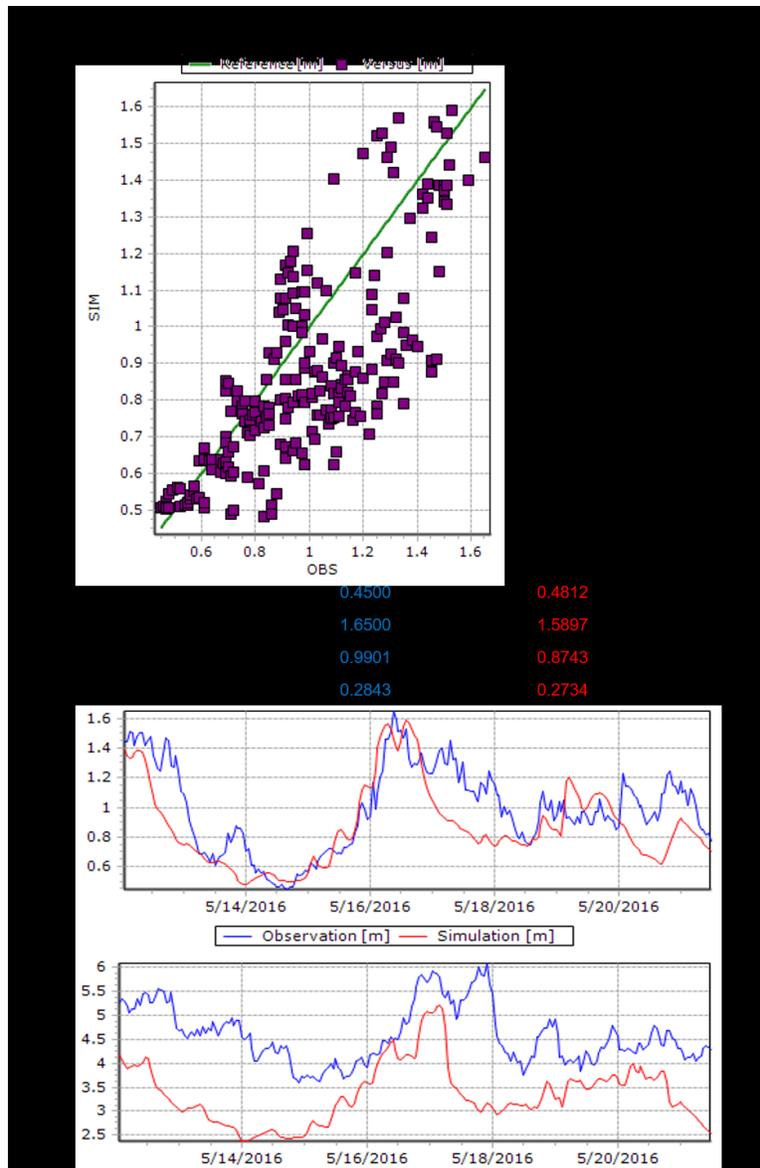


Figura 3-14 - Validación del oleaje en boya NDBC 42020. Correlación entre valores medidos (azul) y modelados (rojo) con tablas descriptivas de la estadística de la muestra (panel superior) y registro temporal de altura de ola significativa y periodo (panel inferior).

Las comparaciones de altura de ola significativa y periodo medio se realizaron para todos los 16 escenarios del SOM y se presentan en el Anexo 03 – Oleaje.

3.2.3 Validación del modelo de transporte de hidrocarburos MIKE OS

La evaluación del modelo de transporte de hidrocarburos se basó en estudiar la susceptibilidad que tuvieron las fracciones del crudo a distintos mecanismos de transporte (Tabla 4). Las fracciones de crudo son los porcentajes de porción volátil y porción pesada de cada componente. Se dividieron en cuatro grupos, los cuales se asocian a un grado API en específico acorde a su densidad. Las partículas conservativas descartaron las cuatro fracciones, es decir, la densidad de la partícula fue la misma que la del medio. Los mecanismos de transporte que se analizaron

fueron el viento (1), las corrientes (2), el viento con corrientes (3), el viento con corrientes y oleaje (4), condición extrema con viento ciclónico (5) y condición extrema con frente frío (6). Los derrames se ubicaron tanto en la franja costera (-97.7°W, 23.4°N) como en mar profundo (-95.4°W, 25°N). Esto arrojó un total de 60 simulaciones que se resumen en la Tabla 3. Los escenarios 1 a 4 tienen un periodo de simulación de 252 horas, mientras que el huracán tuvo un periodo de 167 horas y el frente frío de 239 horas.

Tabla 4 - Relación de simulaciones para análisis de sensibilidad del modelo de transporte de hidrocarburos

Grupo ITPOF	I	II	III	IV	Conservativo
Densidad (g/cm ³)	< 0.8	0.8 - 0.85	0.85 - 0.95	> 0.95	1
°API	>45	35 - 45	17.5 - 35	< 17.5	X
Fracciones de hidrocarburo en modulo Oil Spill de DHI					
Volátil ligera	100	70	55	35	0
Pesada	0	30	45	65	0
Mecanismos de transporte					
1	Viento y presión atmosférica				
2	Corrientes				
3	1 + 2				
4	1 + 2 + Oleaje				
5	Huracán				
6	Frente Frío				
Ubicación de vertido fuera de costa (1) y costero (2)					
Coordenadas	(1) 25°N, -95.4°W (2) 23.4°N, -97.7°W				
Simulaciones	12	12	12	12	12
Total	60				

Como se ejemplifica en la Figura 3-15, el tipo de crudo influye considerablemente en el transporte de las partículas. Un derrame de petróleo pesado (a) es mucho más denso y difícil de extraer del medio que un derrame de gasolinas (b). Las fracciones ligeras se mezclan con mayor facilidad,

pero a la vez permanecen menos tiempo expuestas al medio ambiente debido a la volatilidad, factor que no necesariamente es benéfico durante un derrame.

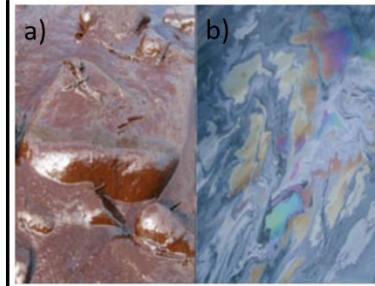


Figura 3-15 - Derrame de hidrocarburos pesados (a) y ligeros (b)

En la Figura 3-16 se muestra la posición del derrame costero y del derrame profundo en la región de Perdido. En el inciso (a) se consideraron partículas conservativas y en el inciso (b) se consideró un crudo ITPOF tipo III. Se emplearon tres colores para cada derrame. Los derrames en rojo consideraron únicamente el viento y la presión atmosférica, los derrames en gris consideraron únicamente la hidrodinámica y los derrames en negro consideraron la hidrodinámica, el viento y la presión atmosférica.

En los derrames de mar profundo, las condiciones atmosféricas no generaron tanta dispersión como las corrientes marinas. Las partículas conservativas y las del crudo ITPOF tipo III coincidieron en dirección y extensión desde el inicio del derrame. Sin embargo, la cobertura del derrame que consideró un crudo fue mayor. En los derrames costeros, tanto para partículas conservativas como para el crudo, el transporte fue hacia el sur debido a la hidrodinámica y posteriormente al norte debido al viento. En este caso también hubo mayor cobertura espacial considerando el crudo ITPOF tipo III que usando las partículas conservativas. Al conjugar las variables oceánicas y atmosféricas, en ambos casos se obtuvo un transporte inicial al sur que posteriormente giró hacia el este (costa afuera) en el derrame somero y en el derrame profundo se advectó hacia el norte. Estos resultados reflejaron la importancia que tiene el viento como mecanismo de transporte en la capa superficial (i.e. primeros 25 metros de profundidad) del océano.

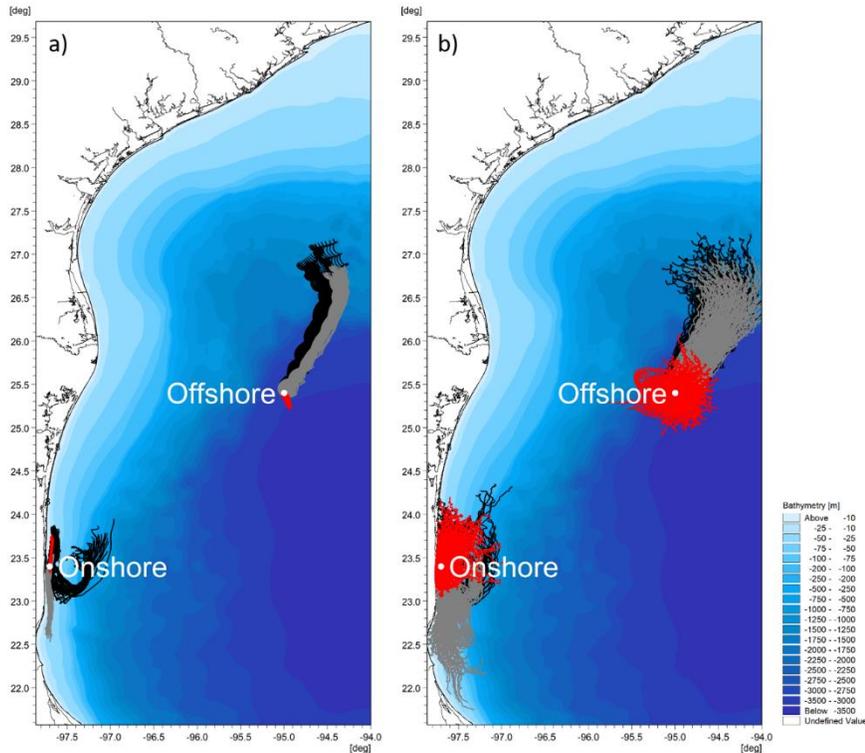


Figura 3-16 - Comparativa de trayectorias bajo distintos forzamientos con partículas conservativas (a) y un crudo ITPOF tipo III (b). Considerando solo viento y presión (rojo), solo hidrodinámica (gris), viento, presión e hidrodinámica (negro).

En la Figura 3-17 se compararon nuevamente dos ubicaciones (derrame somero y profundo) donde se consideraron partículas conservativas (a) y un crudo ITPOF tipo III (b). En este caso los derrames en rojo sirvieron para indicar el transporte debido a un frente frío, en gris debido a un huracán y en negro condiciones normales que contemplaron la hidrodinámica, el oleaje, el viento y la presión atmosférica.

En los derrames de mar profundo, se percibió que los fenómenos meteorológicos influyeron en la extensión del derrame hacia el norte. Cuando se consideró el viento ciclónico el derrame tuvo una dirección dominante hacia el este en ambas composiciones (crudo y conservativo). Sin embargo, las partículas conservativas mostraron mayor advección. Cuando se consideró el viento de un frente frío los derrames tuvieron características similares en términos de forma y extensión. Cuando se consideraron condiciones normales, pero se acopló el oleaje, se demostró que el oleaje tiene influencia en la extensión y dirección dominante del derrame (vea trayectorias en negro entre inciso (a) e inciso (b). En la región costera, el transporte dominante fue debido al viento y tanto las trayectorias ante un frente frío, como ante un huracán donde el giro ciclónico indujo transporte de norte a sur en la porción occidental, se desplazaron hacia el sur. En el caso de las partículas conservativas, el derrame bajo viento ciclónico tuvo mayor extensión, mientras que en el crudo ITPOF tipo III fueron de dimensiones similares.

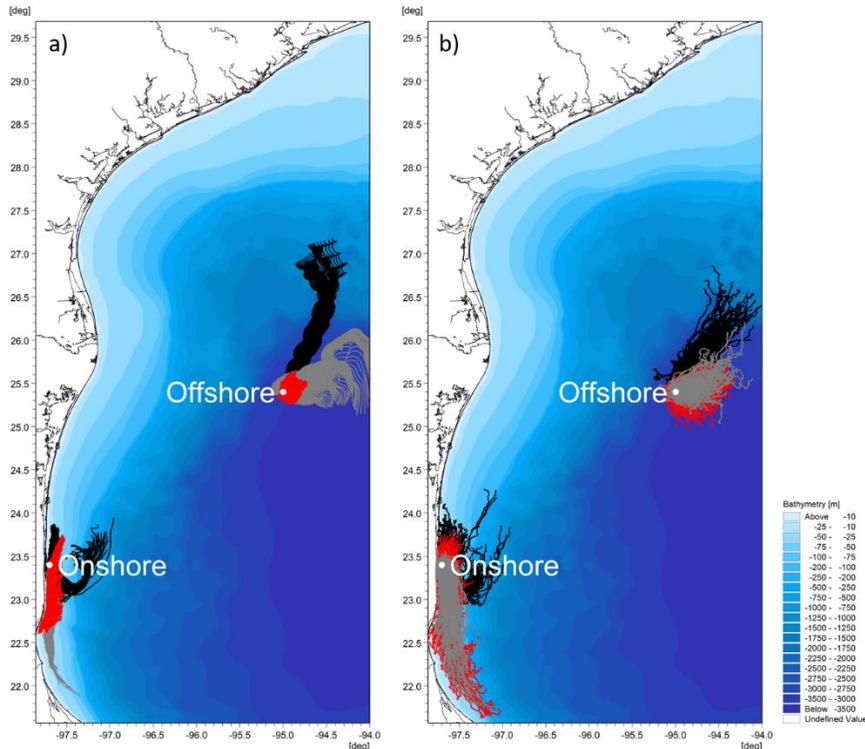


Figura 3-17 - Comparativa de trayectorias bajo distintos forzamientos con partículas conservativas (a) y un crudo ITPOF tipo III (b). Considerando frente frío (rojo), huracán (gris) e hidrodinámica con oleaje (negro).

Además de haber comparado la advección debido a distintos forzantes entre un crudo medio y partículas conservativas, se analizó la advección que pueden tener las partículas conservativas y los cuatro distintos tipos de crudo ITPOF ante los mismos agentes forzantes. En el Anexo 04 – Hidrocarburos se muestran los resultados y se resumen a continuación:

- Al considerar únicamente condiciones atmosféricas, las partículas conservativas presentaron menor advección que el resto de los hidrocarburos. Los cuatro tipos de crudo ITPOF presentaron la misma cobertura alrededor del derrame tanto en la región profunda como en la somera.
- Al considerar únicamente las condiciones oceánicas, las partículas conservativas indicaron la trayectoria del derrame, pero no tuvieron la misma cobertura espacial que los distintos tipos de hidrocarburo ITPOF. La advección incremento conforme incrementó la densidad del crudo. Es decir, las partículas pesadas se trasladaron a una distancia mayor del punto inicial del derrame que las partículas muy ligeras.
- Al combinar las condiciones atmosféricas y oceánicas, las partículas conservativas tuvieron trayectoria y cobertura espacial similar a la de un crudo muy ligero (ITPOF tipo I). Los derrames con partículas ligeras, medias y pesadas fueron muy similares entre sí en el derrame costero y fuera de costa el derrame con crudo pesado (ITPOF tipo IV) tuvo mayor extensión que el resto de los derrames.
- Al combinar las condiciones atmosféricas y oceánicas con el oleaje acoplado se obtuvieron las mismas trayectorias dominantes para cada tipo de derrame, pero la cobertura espacial del derrame se redujo.

- Al considerar las condiciones extremas por huracán, las partículas conservativas en mar profundo mostraron mayor extensión que cualquier otro tipo de crudo mientras que, en la parte somera, la mayor cobertura espacial la tuvo el crudo pesado y su extensión fue reduciendo conforme se consideró un crudo más ligero. En todos los casos la trayectoria se pudo obtener con la aproximación de las partículas conservativas.
- Al considerar las condiciones extremas por frente frío, las partículas conservativas tuvieron la menor advección hacia el sur, la cual incremento conforme se consideró un crudo más denso. En la región profunda las partículas conservativas se mantuvieron próximas a la zona del derrame, mientras que en los distintos tipos de crudo la cobertura espacial fue muy similar.

3.3 Determinación de zonas de afectación por vertidos de hidrocarburos.

Para determinar las zonas de afectación por vertido de hidrocarburos se consideraron todas las condiciones hidrodinámicas obtenidas con los SOM. Es decir, todos los patrones de circulación se superpusieron para obtener la envolvente total que indicó las zonas que podrían ser afectadas en cada ronda. Cabe destacar que en ninguna de las simulaciones realizadas se consideró la intervención humana como medios mecánicos (recolección) o químicos (dispersantes), por lo que la extensión de los derrames fue bastante considerable. Este criterio se basó en el accidente del Deepwater Horizon (2010), donde no se pudo sellar la fuga durante varias semanas y representa el peor escenario.

En la Figura 3-18 se muestra la envolvente que consideró un derrame en superficie (panel superior) y en el fondo marino (panel inferior) en los cinco bloques de la Ronda 1. El derrame avanzó temporalmente de izquierda a derecha, por lo que en el extremo izquierdo se muestra la dispersión a 24 horas y en el extremo derecho la dispersión a 360 horas. Esto indicó que las primeras 72 horas son críticas para desplegar los mecanismos de contingencia ante un derrame. De 10 (e) a 15 (f) días, las trayectorias se dirigieron hacia el suroeste (hacia la zona costera) y al este a lo largo de la latitud 26°N. El transporte al este se asoció a la porción norte del remolino anticiclónico que indujo flujo costa afuera. Cuando se liberaron las partículas desde el fondo marino, se percibió que a largo plazo los derrames adquirieron la misma cobertura, mientras que en las primeras 72 horas la mancha se conservó agrupada cerca del origen del derrame. En todos los derrames de superficie, la envolvente se extendió hacia el sureste en comparación con los derrames de fondo.

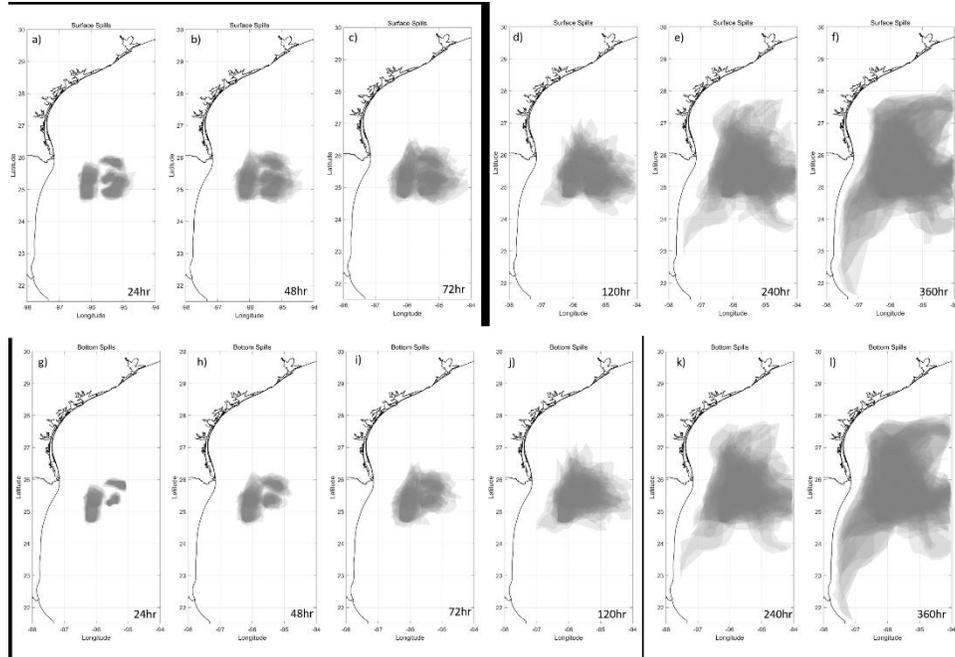


Figura 3-18 - Envolvente de derrames para los cinco bloques de la Ronda 1. Derrames de superficie (panel superior) y derrames de fondo (panel inferior). Instantes del derrame a 24 horas (a-g), 48 horas (b-h), 72 horas (c-i), 120 horas (d-j), 240 horas (e-k) y 360 horas (f-l).

En la Figura 3-19 se muestra la envolvente que se obtuvo al considerar los derrames de la Ronda 2. Se consideraron derrames en aguas entre 1,500 y 2,500 m de profundidad ubicados entre las latitudes 24°N y 26°N al este de la longitud 97°W. Este bloque se caracterizó por ser de aguas profundas y encontrarse al sur de la zona de explotación de la Ronda 1. En esta serie de escenarios, los derrames superficiales tuvieron mayor cobertura y se desplazaron hacia el suroeste. La intrusión al norte a 5 días del derrame tuvo una extensión aproximada de 100 km y a los 15 días no rebasó la latitud 28°N. Por ende, los derrames afectaron más al frente costero de Tamaulipas que a la costa Texana.

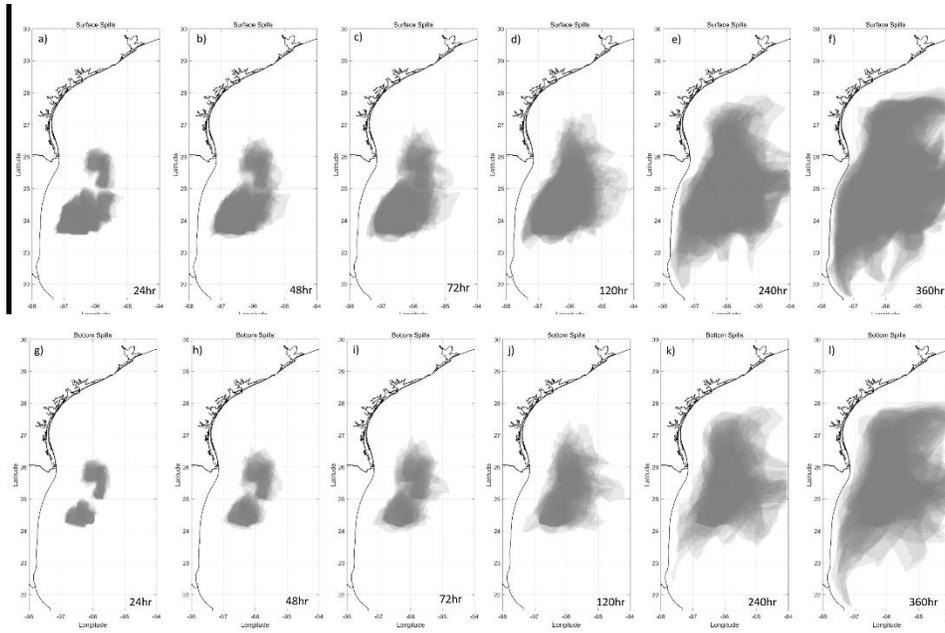


Figura 3-19 - Envolvente de derrames para los cinco bloques de la Ronda 2. Derrames de superficie (panel superior) y derrames de fondo (panel inferior). Instantes del derrame a 24 horas (a-g), 48 horas (b-h), 72 horas (c-i), 120 horas (d-j), 240 horas (e-k) y 360 horas (f-l).

En la Figura 3-20 se muestran los derrames en superficie y fondo considerando los bloques de la Ronda 3. Esta ronda se caracterizó por tener el mayor número de bloques licitados y estar sobre la plataforma continental (aguas someras). Fue evidente desde el inicio de los derrames que la principal zona de afectación fue toda la franja costera de la Laguna Madre. Los bloques alrededor de la latitud 24°N desplazaron el derrame en las primeras 72 horas hacia el norte y a partir del quinto día, la mancha avanzó tanto al sur como hacia el norte y se extendió incluso costa afuera alrededor de la latitud 25°N. El transporte costa afuera se relacionó con los chorros de corriente en dirección al este causados por los LCE. Los bloques de la Ronda 3 fueron los que más afectaron el sur de Texas, todo el estado de Tamaulipas y el norte de Veracruz.

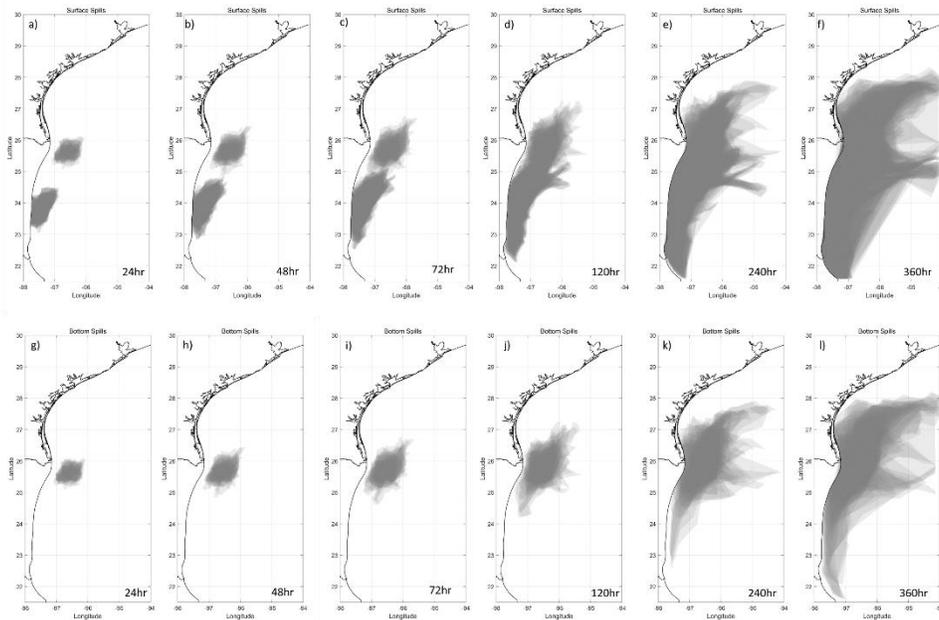


Figura 3-20 - Envoltura de derrames para los cinco bloques de la Ronda 3. Derrames de superficie (panel superior) y derrames de fondo (panel inferior). Instantes del derrame a 24 horas (a-g), 48 horas (b-h), 72 horas (c-i), 120 horas (d-j), 240 horas (e-k) y 360 horas (f-l).

Las distintas zonas afectadas dependieron de la ubicación del derrame, su profundidad y la condición hidrodinámica específica. Se obtuvieron tantas combinaciones que resultó muy complicado concentrar toda la información en una serie reducida de trayectorias por lo que se desarrolló el catálogo de búsqueda sobre vertidos de hidrocarburo.

3.4 Catálogo de búsqueda sobre vertidos de hidrocarburo

El catálogo de búsqueda sobre vertidos de hidrocarburo es una herramienta que permitió visualizar los resultados obtenidos de 896 simulaciones de una forma simple y directa. El objetivo fue poder discernir con facilidad una condición hidrodinámica específica, con la presencia de un derrame (fondo o superficie) en cualquiera de los 28 bloques de explotación en la región de Perdido (Figura 3-21). Los resultados muestran las zonas de ocurrencia, los tiempos de arribo y la distribución 3D del derrame.

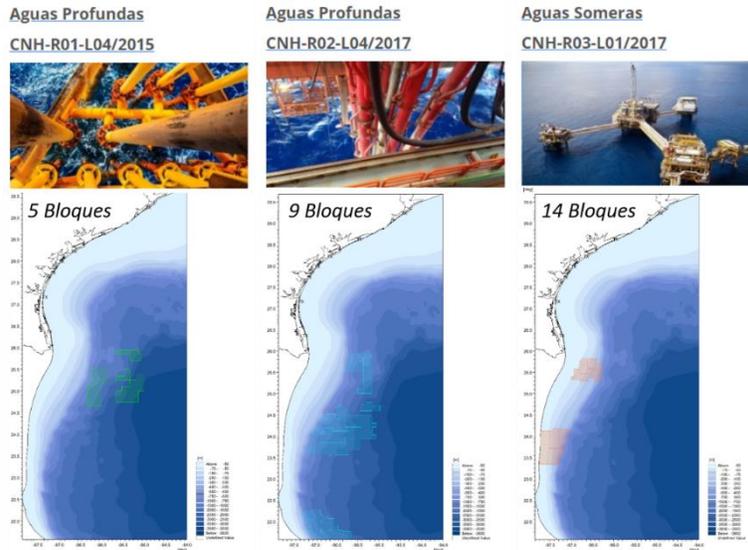


Figura 3-21 – Los 28 bloques de exploración en las tres rondas de la Comisión Nacional de Hidrocarburos en el periodo 2015 a 2017

Las condiciones hidrodinámicas para cada escenario SOM se analizan visualmente por medio de las imágenes que muestran las corrientes marinas en vectores. Se selecciona una condición hidrodinámica en específico y posteriormente se define la ubicación del derrame empleando los bloques de las tres rondas como referencia. Se procede a establecer la profundidad del vertido (fondo o superficie) y finalmente el tipo de gráfico que se desea visualizar.

3.4.1 Guía de usuario

Esta guía ejemplifica el uso del catálogo de búsqueda para identificar zonas de afectación y tiempos de arribo en distintos escenarios de vertido. Es necesario contar con el software MATLAB instalado y trabajar dentro de la carpeta que contiene los datos, funciones y rutinas. Para iniciar escriba *gmenu* en la ventana de comando para que aparezca el menú principal. Al seleccionar *Reference Map* aparece una imagen que ilustra la posición geográfica y número de bloque para cada ronda (Figura 3-22).

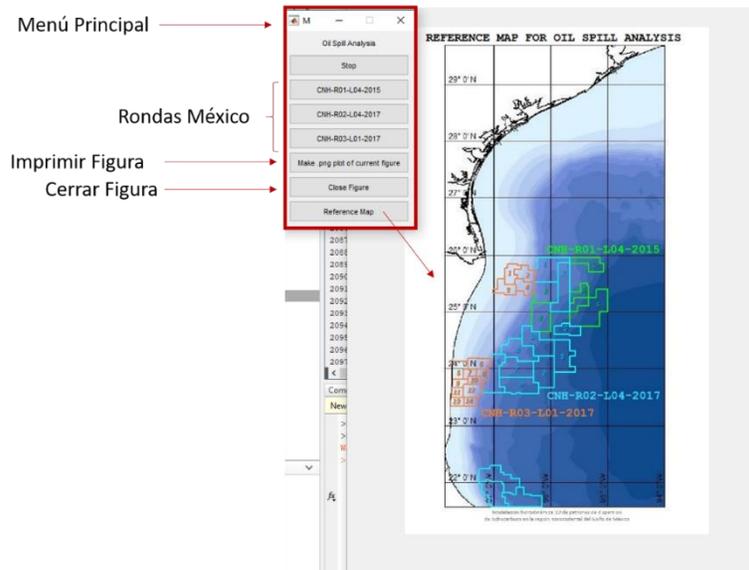


Figura 3-22 - Guía de usuario - Paso 1: Seleccionar Ronda. Usar la imagen de referencia para ubicar las rondas y los bloques que las componen.

El primer paso es seleccionar la ronda de interés. Existen dos rondas en aguas profundas (CNH-R01-L04/2015 y CNH-R02-L04/2017) y una ronda en aguas someras (CNH-R03-L01/2017), vea Figura 3-21.

El segundo paso es seleccionar el patrón de circulación oceánica dominante, el cual se puede obtener al visualizar las corrientes marinas de cada escenario y definir el patrón de mayor interés (Figura 3-23).

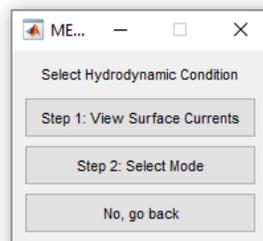


Figura 3-23 - Guía de usuario - Paso 2: Seleccionar la condición hidrodinámica.

El tercer paso es seleccionar el bloque de interés. En esta versión solo se puede ver un escenario a la vez. Como se muestra en la Figura 3-24, la primera ronda cuenta con cinco bloques en el Cinturón Plegado de Perdido, la segunda ronda cuenta nueve bloques en la reserva petrolera de Perdido y la tercera ronda con catorce bloques en la región de Burgos en el frente costero de Tamaulipas.

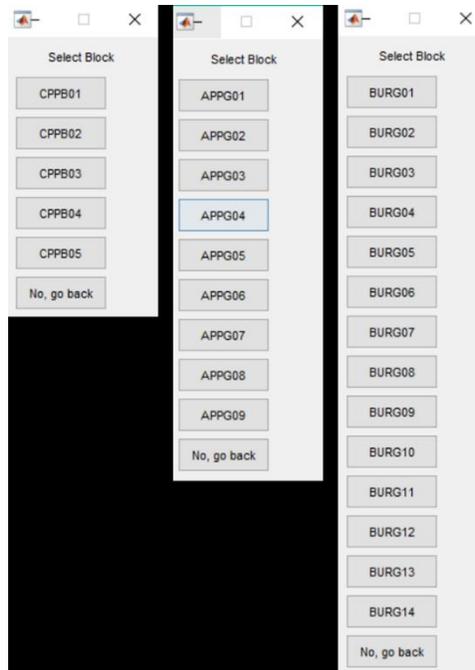


Figura 3-24 - Guía de usuario - Paso 3: Seleccionar el bloque de explotación.

El cuarto paso es seleccionar si el vertido ocurrió en el fondo o en la superficie (Figura 3-25).

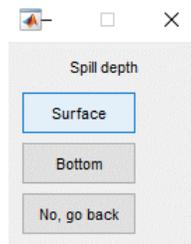


Figura 3-25 - Guía de usuario - Paso 4: Seleccionar la profundidad del vertido.

El quinto paso es visualizar los resultados. En la Figura 3-26 se muestran las opciones disponibles que incluyen la distribución espacial del vertido de forma tridimensional, el tiempo de arribo y las zonas de mayor ocurrencia.

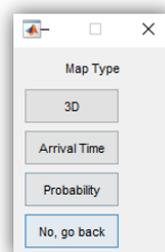


Figura 3-26 - Guía de usuario - Paso 5: Seleccionar el tipo de gráfico.

3.4.2 Ejemplo de aplicación

Tras analizar las corrientes geostóficas derivadas de la altimetría disponible en CoastWatch NOAA/AOML (<http://www.aoml.noaa.gov/phod/dhos/altimetry.php>) se obtuvo que, para el 21 abril del 2010, la circulación dominante en la región CPP fue costa afuera debido a un LCE (Figura 3-27). Para determinar los patrones de dispersión relacionados a dicha circulación hidrodinámica, se tomó en cuenta el SOM número 10, ya que es la circulación hidrodinámica con mayor similitud a las corrientes geostóficas detectadas por el satélite. Se usaron como ejemplo los derrames en el bloque 05 de la Ronda 01 (región más profunda) y el bloque 14 de la Ronda 03 (región más somera).

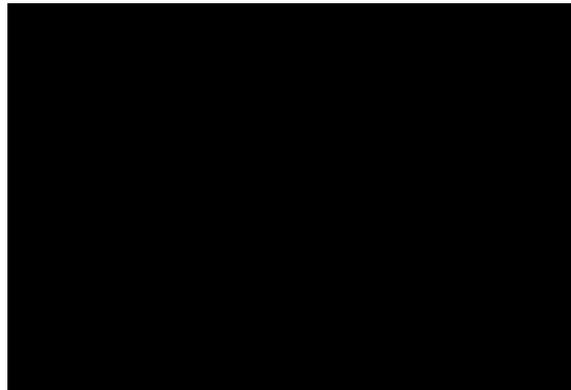


Figura 3-27 – Campo de corrientes geostóficas extraído de altimetría. Adaptado de <http://www.aoml.noaa.gov/phod/dhos/altimetry.php>

Las Figura 3-28, Figura 3-29y Figura 3-30 ilustran los resultados que se pueden obtener con el catálogo ante cualquier escenario. Las probabilidades de ocurrencia en la Figura 3-28 muestran como un derrame en la Ronda 1 transportó al este (mar profundo) y hacia el norte, mientras que uno en la zona somera se distribuyó sobre la plataforma continental hacia el norte. En la Figura 3-29 se muestran los tiempos de arribo, donde los tonos más cálidos son las partículas más longevas. En el derrame somero se apreció que las partículas viajan inicialmente sobre el borde de la plataforma continental y posteriormente se desplazaron hacia la costa. Finalmente, la Figura 3-30 muestra la distribución espacial de ambos derrames de forma tridimensional donde se mostró mayor afectación en la columna de agua en el derrame profundo pero mayor cobertura espacial en el derrame somero.

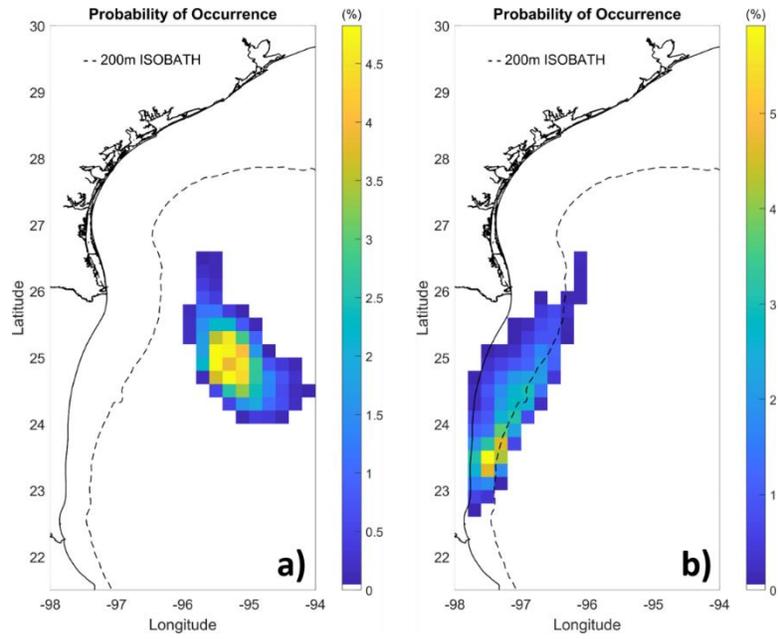


Figura 3-28 - Probabilidad de ocurrencia ante derrames en CPP. a) Derrame de superficie en Bloque 05 de la Ronda 01. b) Derrame de fondo en Bloque 14 de Ronda 03.

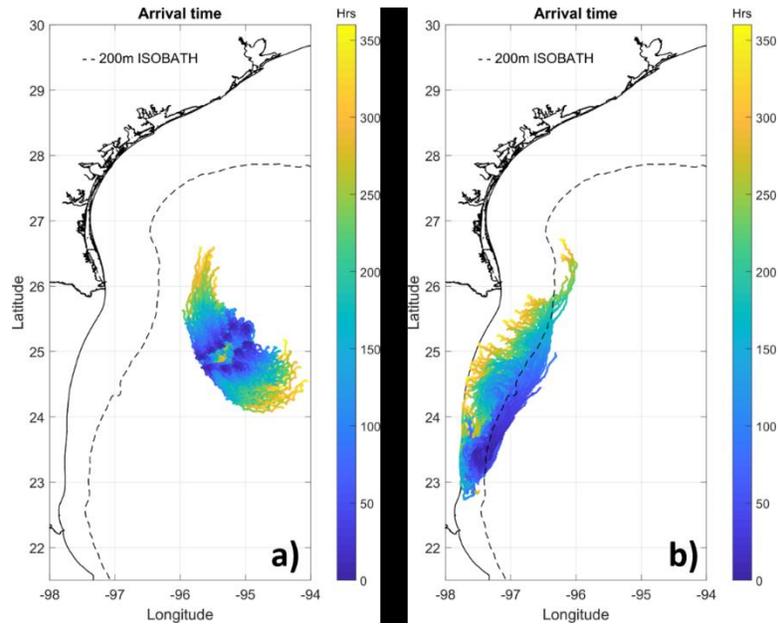


Figura 3-29 – Tiempo de arribo ante derrames en CPP. a) Derrame de superficie en Bloque 05 de la Ronda 01. b) Derrame de fondo en Bloque 14 de Ronda 03.

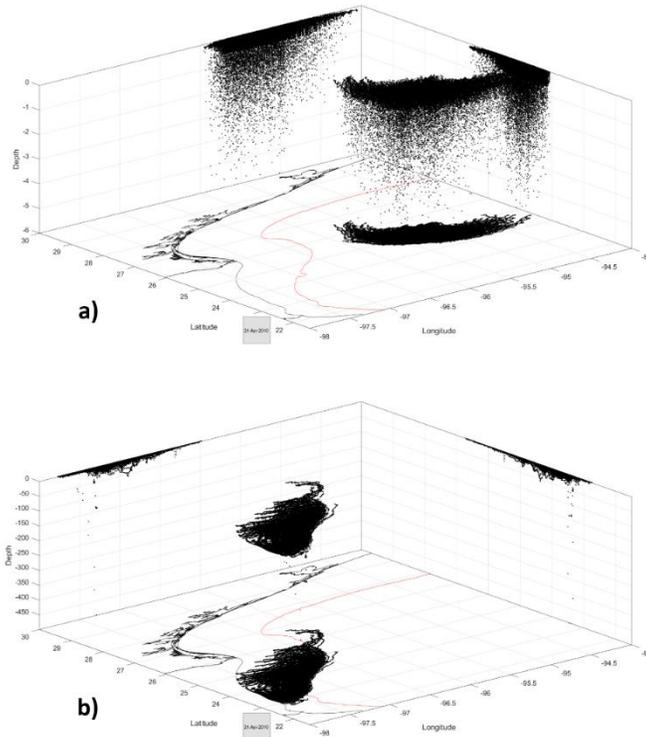


Figura 3-30 – Distribución espacial 3D ante derrames en CPP. a) Derrame de superficie en Bloque 05 de la Ronda 01. b) Derrame de fondo en Bloque 14 de Ronda 03.

Este sistema de búsqueda puede proveer información complementaria durante la elaboración de planes de contingencia ante un vertido. Establecer zonas de ocurrencia permite delimitar geográficamente las zonas prioritarias para evitar mayor dispersión. Los tiempos de arribo permiten programar la llegada de los equipos de recolección y/o la trayectoria de avionetas que insertan dispersantes en la zona del derrame.

Considerando como ejemplo el derrame de fondo en el bloque 14 de la ronda 3, se tiene que la trayectoria dominante del derrame se desplaza hacia el norte sobre el borde de la plataforma continental y pasa sobre la zona de mayor abundancia fitoplanctónica (Figura 3-31 a) y biomasa de zooplancton (Figura 3-31 b) reportada en enero 2011 durante el crucero MARZEE II (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología UNAM, 2012). Al analizar la distribución espacial de densidad de la meiofauna y biomasa de macrofauna durante el crucero MARZEE II (Figura 3-31 c y d), se tiene que la mayor densidad se encuentra justo alrededor del origen del derrame, lo cual implica la necesidad de una intervención inmediata.

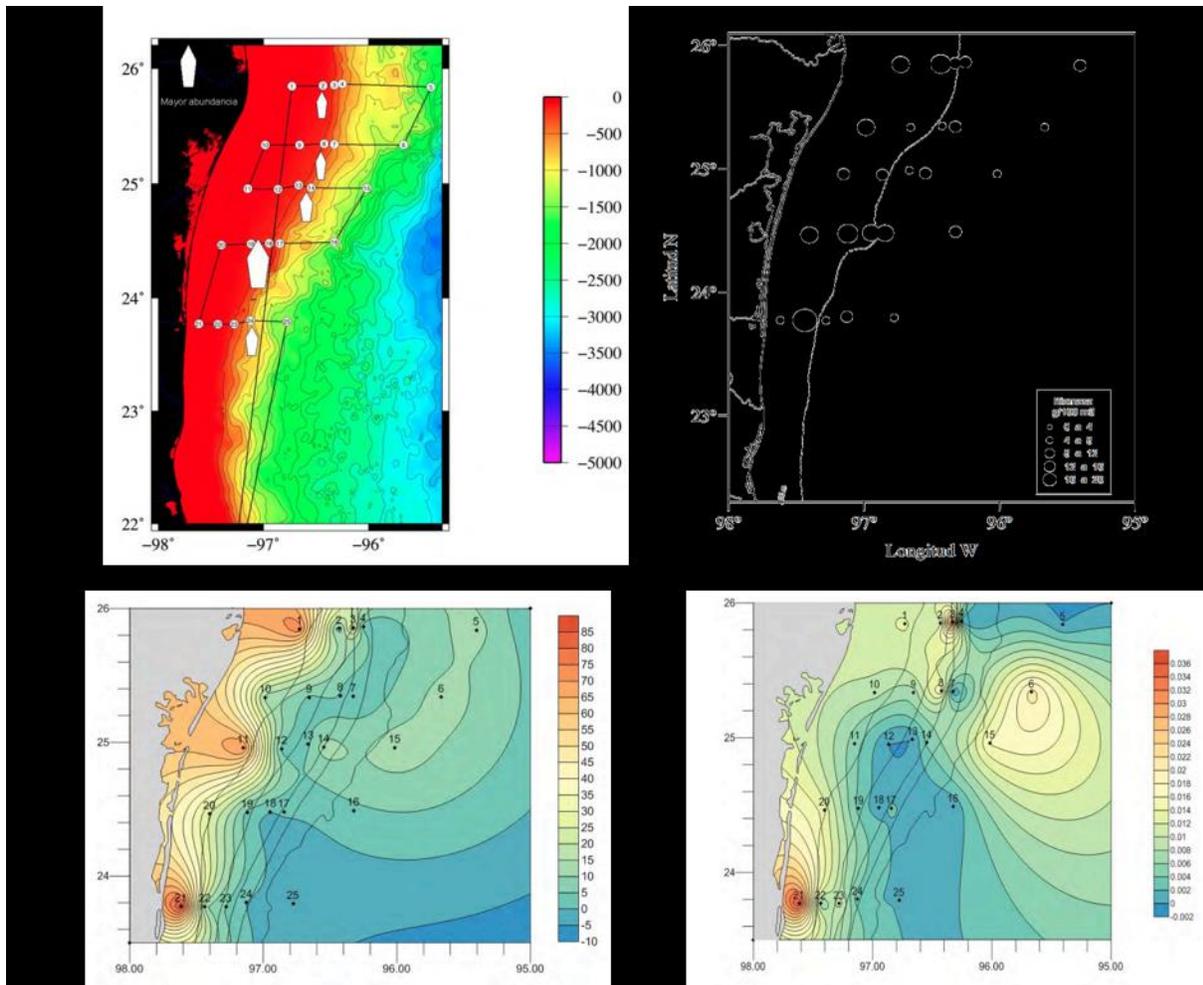


Figura 3-31 – Figuras adaptadas del marco ambiental de las condiciones oceanográficas en el sector noroeste de la ZEE de México en el Golfo de México durante el crucero MARZEE II en enero 2011. a) Mayor abundancia fitoplanctónica; b) Valores de biomasa de zooplancton (g/100 m3); c) Distribución espacial de los valores de densidad (ind/ 10 cm2) de la meiofauna; d) Distribución de la biomasa de macrofauna (g de C/m2).

Acorde a la SEMARNAT (2006), la biodiversidad en la región costera de Tamaulipas es un área de importancia para la conservación de especies marinas. Específicamente, la Laguna Madre es un área prioritaria de protección y reproducción de muchas especies en el GoM. Por lo tanto, emplear este catálogo en conjunto con otros mapas de biodiversidad ecológica permite discernir las condiciones bajo las cuales se podría ver damnificada la franja costera del estado de Tamaulipas. Por otro lado, se analizó el atlas de distribución de mamíferos marinos en México (2018) y se obtuvo que los ejemplares en las costas de Tamaulipas son muy escasos. Se reportó un varamiento de orca pigmea cerca de Tamaulipas (Urban, 2008) y un ejemplar muerto de manatí antillano en el 2000 próximo al sistema lagunar El Chairel-Champayán en la desembocadura del río Panuco. Durante las campañas de Perdido 1 a 3 se realizaron actividades para avistar tortugas marinas, pero ningún ejemplar fue detectado. De esta forma, el catálogo demuestra ser una herramienta útil para la planificación de contingencias y para la evaluación del impacto ambiental durante la fase de remediación tras el vertido.

4 CONCLUSIONES

Se aplicó un análisis en tiempo y espacio usando redes neuronales artificiales en campos de salinidad y corrientes a 200 m de profundidad extraídos del modelo HYCOM en el Golfo de México de 1993 a 2016. Los núcleos de los LCE se detectaron con facilidad a 200 m de profundidad ya que la máxima salinidad contrastó con las masas de agua del GoM (menos salinas). Esta información se empleó para entrenar los mapas auto-organizados donde se identificaron patrones de circulación y regiones de variabilidad característicos del WGoM. La variabilidad espacial, se caracterizó en 49 patrones que posteriormente se agruparon en 7 grupos dominantes para simplificar la caracterización. Los patrones encontrados revelaron la influencia de los LCE sobre la circulación hidrodinámica regional como se observó en las mediciones de la campaña de Perdido-01. La variabilidad temporal arrojó 6 regiones que se agruparon acorde a las variaciones de salinidad y definieron zonas de impacto y rutas preferentes de los LCE.

Emplear 24 años de datos permitió concluir que la interacción entre la batimetría y los LCE controlan la dimensión de los LCE en la zona de impacto. Los remolinos de mayor tamaño diluyen su circunferencia conforme interactúan con el entorno (GCW) y disminuyen su tamaño transformándose en LCE medianos. En contraste, los LCE pequeños tienden a tener corrientes de mayor magnitud, lo cual permite que la SUW permanezca dentro de los LCE durante su propagación hacia el occidente. Este proceso permitió que los núcleos con alta salinidad se aproximaran más al borde de la plataforma continental y que se fusionaran con los remanentes de LCE previos. Como resultado, la fusión causó un incremento en la dimensión del LCE anterior.

Cuando la porción norte del LCE se encontró con remolinos ciclónicos de menor tamaño, las corrientes incrementaron su magnitud con flujos costa afuera. Todos los remolinos ciclónicos de pequeña escala que se formaron y disiparon constantemente entre las latitudes 26°N y 28°N tienen periodos cortos de vida en comparación con los LCE. Sin embargo, estos remolinos ciclónicos funcionaron como mecanismos de mezcla del SUW en el norte y al mismo tiempo inhibieron el cruce de los LCE al norte de la latitud 26°N canalizando su trayectoria hacia el oeste. Su generación se asoció a los cambios de intensidad de la corriente costa afuera de la porción norte de los LCE y a los LCE que están por desprenderse de la LC (en su intrusión al norte en la porción oriental del GoM).

Al modelar los escenarios característicos de la circulación oceánica en la región del CPP, destacaron los siguientes puntos. Las condiciones atmosféricas se modelaron adecuadamente y representaron las condiciones medidas por las estaciones disponibles. Los procesos de mezcla sobre el talud y la plataforma continental impidieron modelar adecuadamente las corrientes debido a los pronunciados escarpes que caracterizan la zona y a la discretización vertical empleada en ambos modelos. Se concluye que un factor limitante en la modelación hidrodinámica de perdido es representar adecuadamente la compleja batimetría con alta resolución en la columna de agua. Por otro lado, el modelo HYCOM tuvo una mayor dilución salina en comparación con los registros medidos, mientras que MIKE3 se apegó mejor a las mediciones y obtuvo un perfil similar al medido. A su vez, las regiones con profundidades menores a 25 metros mostraron gran dependencia al viento en el transporte de hidrocarburos. Las corrientes marinas jugaron un rol crucial para el transporte de hidrocarburos en fondo y superficie para las regiones fuera de costa debido al impacto de los remolinos anticiclónicos. En la estación más profunda y próxima a las fronteras del dominio computacional se detectó un giro en la dirección de la corriente a profundidades entre 500 y 1,000 metros que no se presentó en los modelos numéricos. En el fondo se registraron campos de corriente alrededor de 0.1 m/s que

los modelos subestimaron. Con respecto al oleaje, el modelo es capaz de capturar las alturas de ola significativa, pero subestima el periodo medio debido a que se consideró únicamente el oleaje local inducido por el viento y las fronteras no se alimentaron con los espectros de energía del resto del GoM. Sin embargo, el periodo medio modelado se aproximó al medido en los máximos de altura de ola significativa.

El análisis de sensibilidad del modelo de transporte de hidrocarburos nos indicó que el viento influyó considerablemente al transporte en aguas someras y en eventos energéticos como frentes fríos y huracanes. Entonces el transporte de hidrocarburos ante un frente frío suele ser hacia el sur. En caso de un derrame costero con la presencia de un huracán, antes de tocar tierra el transporte fue de norte a sur y posteriormente fue en sentido inverso (de sur a norte) debido al giro ciclónico del fenómeno. Cabe destacar que cada huracán tiene propiedades únicas que requieren de un análisis específico. Sin embargo, las corrientes marinas fueron el principal mecanismo de transporte fuera de costa. Al acoplar el modelo espectral de oleaje se percibieron cambios en las trayectorias, tanto fuera de costa como en la zona costera y una reducción en la cobertura total del derrame. El descrestamiento y rotura del oleaje fungieron como medios mecánicos de mezcla al fragmentar la mancha del derrame en porciones más pequeñas, lo que implicó cambios en la ruta del derrame y en la tasa de decaimiento. A su vez, las partículas conservativas dieron una buena aproximación de las trayectorias y se asemejaron a las trayectorias de crudos muy ligeros tipo ITPOF I. Este estudio demostró que es relevante considerar el decaimiento de las distintas fracciones del crudo para determinar con mayor certeza la extensión del derrame, ya que los crudos pesados tipo ITPOF IV fueron los que mayor cobertura espacial y temporal tuvieron en el medio.

Al considerar todas las condiciones hidrodinámicas, las envolventes del vertido indicaron que:

- Los cinco bloques que conforman la Ronda 1, fueron influenciados por circulación de mesoescala costa afuera. Al estar en la misma posición que la porción norte de los LCE, dominó la circulación costa afuera (hacia el este).
- Los 9 bloques que conforman la Ronda 2 que se situaron entre 1,500 y 2,500 metros de profundidad, tuvieron una dispersión dominante hacia el suroeste y los derrames fueron propensos a ser advectados por los remolinos anticiclónicos incidentes e incursionaron en latitudes superiores a 26°N en aguas estadounidenses.
- Los 14 bloques de Burgos que conforman la Ronda 3, fueron el grupo que representó la mayor contaminación en la región, ya que la dispersión en aguas someras tuvo mayor cobertura espacial. Además afectó la franja costera en Tamaulipas, norte de Veracruz y el sur de Texas.

Trabajo a futuro

En distintos estudios, como en los de Simón *et al.* (2005), López *et al.* (2012) y Lin *et al.* (2016), la técnica del SOM se empleó con fines de pronóstico. A pesar de que los SOM son poco comunes en oceanografía física, Vilibic *et al.* (2016) implementaron un sistema de pronóstico para corrientes superficiales en la región norte del mar Adriático donde obtuvieron buenos resultados en comparación con el modelo operacional del ROMS. Dentro de los beneficios de usar los SOM en un sistema de pronóstico, se encuentra que el aprendizaje es mucho más simple que en otras técnicas como la asimilación de datos en modelos numéricos, además, el tiempo de ejecución es de un orden de magnitud menor en comparación con los modelos numéricos. Por lo tanto, un sistema de pronóstico basado en los SOM, podría beneficiar a países en desarrollo con recursos de cómputo limitados. Entrenar los SOM con datos que tengan la misma configuración tanto en el reanálisis (*hindcast*) como en el pronóstico (*forecast*), permitiría usar los arreglos para pronosticar corrientes marinas. Esta metodología se puede extender para otros estudios como mareas rojas, sargazo u otras sustancias suspendidas sobre el mar.

Los mapas obtenidos en este estudio pueden ser la base para una evaluación de riesgo y vulnerabilidad ante derrames de petróleo. Sin embargo, los estudios de riesgo y vulnerabilidad requieren incorporar índices socio-económicos, ecológicos, físicos, densidad poblacional e intervención humana durante la contingencia, por lo que determinar la vulnerabilidad de un sistema ecológico en el frente costero o en mar profundo no es trivial y requiere incorporar estadística bayesiana, así como componentes biológicos (rutas de migración, zonas preferentes para pesquerías y anidación) que no se han considerado dentro de los alcances de este proyecto.

REFERENCIAS

- Ainsworth, E. J. and Jones, I. S. F. (1999), Radiance spectra classification from the ocean color and temperature scanner on ADEOS, *IEEE Transaction on Geosciences Remote Sensing*, 37, 1645-1656, ISSN 0196-2892.
- Alvera-Azcárate, A., Barth, A., Weisberg, R.H. (2009), The surface circulation of the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico as inferred from satellite altimetry, *J. Phys. Oceanogr.*, 39, 640-657.
- Amante, C. and Eakins, B.W. (2009) ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*.
- Appendini, C.M., Torres-Freyermuth, A., Salles, P., López-González, J. and Mendoza, E.T. (2014), Wave Climate and Trends for the Gulf of Mexico: A 30-Yr Wave Hindcast. *J. Climate*, 27, 1619–1632, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00206.1>
- Appendini, C. M., Torres-Freyermuth, A., Oropeza, F., Salles, P., López, J. and Mendoza, E.T. (2013) Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: wind reanalysis assessment, *Applied Ocean Research*, 39: 20-30.
- Aymerich, I. F., Piera, J., Soria-Frisch, A. and Cros, L. (2009), A rapid technique for classifying phytoplankton fluorescence spectra based on self-organizing maps, *Applied Spectroscopy*, Vol. 63, No. 6, 716-726, ISSN 0003-7028.
- Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M. (1978), Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng.* ASCE 569-587.
- Behringer D., Molinari, R. and Festa, J. (1977), The variability of anticyclonic current patterns in the Gulf of Mexico. *J. of Geophys. Res.* Vol. 82 No. 34 5469-5476.
- Comisión Nacional del Agua (2016), Atlas del Agua en México.
- Cummings, J. (2005), Operational multivariate ocean data assimilation. *Quart. J. Royal Met. Soc. Part C*, 131(613), 3583-3604.
- Cummings, J.A., Smedstad, O.M. (2013), Variational Data Assimilation for the Global Ocean. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications Vol II*. Chapter 13, 303-343.
- Davies, D. and Bouldin, D. (1979), A Cluster Separation Measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol PAMI-1, No. 2 224-227.
- DHI (2017), MIKE3 Flow Model Hydrodynamic Module. Scientific Description.
- DHI (2017), MIKE 21 Spectral Wave Module. Scientific Description.
- DHI (2017), DHI Oil Spill Model. Scientific Description.
- Donohue, K., Hamilton, P., Leaman, K., Leben, R., Prater, M., Watts, D.R. and Waddell, E. (2006), Exploratory study of deepwater currents in the Gulf of Mexico. Volume II: Technical Report. *OCS Study MMS 2006-074, U.S. Dept. of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region*, New Orleans, LA. 430 pp.

- Dubranna, J., Perez-Brunius, P., Lopez, M. and Candela, J. (2011), Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 116, C08003, doi:10.1029/2011JC007007.
- Eldeberky, Y. and Battjes, J.A. (1996), Spectral modeling of waves breaking: Application to Boussinesq equations. *J. of Geophys. Res.* 101 No. C1, 1253-1264.
- Elliot, B.A. (1982), Anticyclonic Rings in the Gulf of Mexico, *J. Phys. Oce.*, Vol. 12, 1292-1309.
- Enriquez, C. and Mariño, I. (2016), Informe Técnico Final de Perdido-01. Consorcio de Investigación del Golfo de México.
- Espinosa-Carreón, T.L., Strub, P.T., Beier, E., Ocampo-Torres, F. and Gaxiola-Castro, G. (2004), Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height and temperature off Baja California, *J. Geophys. Res.*, 109, C03039, doi:10.1029/2003JC002105.
- Fox, D., Teague, W., Barron, C., Carnes, M. and Lee, C. (2002), The Modular Ocean Data Assimilation System (MODAS). *J. of Atmos. and Oce. Tech.*, 19, 240-252.
- Gough, M.K., Beron-Vera, F.J., Olascoaga, M.J., Sheinbaum, J., Jouanno, J. and Duran, R. (2019), Persistent Lagrangian Transport Patterns in the Northwestern Gulf of Mexico. *J. Phys. Ocean.*, 49, 353–367, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0207.1>
- Hall, C.A. and Leben, R.R. (2016), Observational evidence of seasonality in the timing of loop current eddy separation. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 76, 240-267.
- Hamilton, P., Fargion, G.S. and Biggs, D.C. (1999), Loop Current Eddy Paths in the Western Gulf of Mexico. *J. of Phys. Ocean.*, Vol. 29 1180-1207. doi:10.1175/1520-0485(1999)029.
- Hamilton, P., Leben, R., Bower, A., Furey, H. and Perez-Brunius, P. (2018), Hydrography of the Gulf of Mexico using Autonomous Floats. *J. Phys. Ocean.* 48, 773-794. doi:10.1175/JPO-D-17-0205.1
- Hasselmann, S. and Hasselmann, K. (1985), Computation and parametrizations of Non-Linear Energy Transfer in a gravity wave spectrum, Part 1: A new method for efficient computation of the exact non-linear transfer integral. *J. of Phys. Ocean.* 15, 1369-1377.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.H. and Barnett, T.P. (1985), Computation and parametrizations of Non-Linear Energy Transfer in a gravity wave spectrum, Part 2: Parametrizations of non-linear energy transfer for applications in wave models. *J. of Phys. Ocean.* 15, 1378-1391.
- Hsieh, W. (2004), Nonlinear multivariate and time series analysis by neural network methods, *Rev. Geophys.*, 42, RG1003, doi:10.1029/2002RG000112.
- Hyun, K.H. and Hogan P.J. (2008), Topographic effects on the path and evolution of Loop Current Eddies, *J. Geophys. Res.*, 113, C12026, doi:10.1029/2007JC004155.
- Instituto de Ciencias del Mar y Limnología UNAM (2012), Marco ambiental de las condiciones oceanográficas en el sector NW de la ZEE de México en el Golfo de México (MARZEE II). *Coordinación General de Adaptación al Cambio Climático*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 350 pp. México.
- Janssen, P.A.E.M. (1989), Wave induced stress and the drag airflow over sea waves. *J. of Phys. Ocean.* 19, 745-754.

- Janssen, P.A.E.M., Lionello, P. and Zambresky, L. (1989), On the interaction of wind and waves. *Phil . Trans. R. Soc. Lond.* A329, 289-301.
- Janssen, P.A.E.M. (1991), Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting, *J. of Phys. Ocean.* 21, 1631-1642.
- Johnson, H and Kofoed-Hansen, H. (2000), Influence of Bottom friction on sea roughness and its impact on shallow water wind wave modelling. *J. of Phys. Ocean.* 30, 1743-1756.
- Kohonen, T. (1982), Self-Organized formation of topologically correct feature maps. *Biol. Cybernetics*, 43, 59-69.
- Kohonen, T. (2001), Self-Organizing Maps, 501 pp. *Springer-Verlag*, New York.
- Kohonen, T. (1997), Self-Organizing Maps. Springer-Verlag New York, Inc. Secaucus, NJ, USA. ISBN: 3-540-62017-6.
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and Janssen, P.A.E.M. (1994), Dynamics and modeling of ocean waves. *Cambridge University Press*, UK 560 pp.
- Lin, G., Wang, T. and Chen, L. (2016), A Forecasting Approach Combining Self-Organizing Map with support vector regression for reservoir inflow during typhoon periods. *Advances in Meteorology*, Volume 2016, Article ID 7575126, 12 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7575126>
- Lipphardt, B.L., Poje, A.C., Kirwan, A.D., Kantha, L. and Zweng, M. (2008), Death of three Loop Current Rings. *Journal of Marine Research*, 66, 25-60.
- Liu, Y. and Weisberg, R.H. (2005), Patterns of ocean current variability on the West Florida Shelf using Self-Organizing Maps. *J. Geophys. Res.*, 110, C06003, doi:10.1029/2004JC002786.
- Liu, Y., Weisberg, R.H. and Shay, L.K. (2006), Performance evaluation of the Self-Organizing Map for feature extraction. *J. Geophys. Res.*, 111, C05018, doi:10.1029/2005JC003117.
- Liu, Y. and Weisberg, R.H. (2007), Ocean currents and sea surface heights estimated across the West Florida Shelf, *J. of Phys. Ocean.*, 37(6), 1697-1713, <http://dx.doi.org/10.1175/JPO3083.1>.
- Liu, Y., Liang, X.S. and Weisberg, R.H. (2007), Rectification of the bias in the wavelet power spectrum, *J. of Atmos. and Ocean. Tech.*, 24(12), 2093-2102.
- Liu, Y., Weisberg, R. H. and Yuan, Y. (2008), Patterns of upper layer circulation variability in the South China Sea from satellite altimetry using Self-Organizing Maps. *Acta Oceanologica Sinica*, Vol. 27 (Supp.), 129-144. ISSN 1869-1099.
- Liu, Y., McCreedy, P. and Hickey, B. M. (2009), Columbia River plume patterns in summer 2004 as revealed by a hindcast coastal ocean circulation model, *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L02601, doi:10.1029/2008GL036447, ISSN 0094-8276.
- Liu, Y., Weisberg, R.H., Hu, C. and Zheng, L. (2011), Tracking the Deepwater Horizon Oil Spill: A modeling perspective, EOS, *Transactions American Geophysical Union*. Vol 92 No. 6 45-52, doi:10.1029/2011EO060001.
- Liu, Y. and Weisberg, R.H. (2011), A review of self-organizing map applications in meteorology and oceanography, in *Self-Organizing Maps - Applications and Novel Algorithm Design*, Edited by J. I. Mwasiagi, InTech, Rijeka, Croatia, ISBN 978-953-307-546-4, pp.253-272.

- Liu, Y., Weisberg, R.H., Lenes, J.M., Zheng, L., Hubbard, K. and Walsh, J.J. (2016a), Offshore forcing on the "pressure point" of the West Florida Shelf: Anomalous upwelling and its influence on harmful algal blooms, *J. of Geophys. Res: Oceans*, 121, 5501-5515, <http://dx.doi.org/10.1002/2016JC011938>.
- Liu, Y., Weisberg, R.H., Vignudelli, S. and Mitchum, G.T. (2016b), Patterns of the Loop Current system and regions of sea surface height variability in the eastern Gulf of Mexico revealed by the Self-Organizing Maps, *J. of Geophys. Res.: Oceans*, 121, 2347-2366, <http://dx.doi.org/10.1002/2015JC011493>.
- Lopez, M., Valero, S., Senabre, C., Aparicio, J. and Gabaldon, A. (2012), Application of SOM neural networks to short-term load forecasting: The Spanish electricity market case study. *Electric Power System Research*, Volume 91. 18-27. <http://doi.org/10.1016/j.espr.2012.04.009>.
- Lugo-Fernandez, A., Deslarzes, K.J.P., Price, J.M., Boland, G.S. and Morin, M.V. (2001), Inferring probable dispersal of Flower Garden Banks coral larvae (Gulf of Mexico) using observed and simulated drifter trajectories. *Cont. Shelf Res.* 21. 47-67. doi:10.1016/S0278-4343(00)00072-8.
- Lugo-Fernandez, A. (2007), Is the Loop Current a chaotic oscillator? *J. of Phys. Ocean.* 37(6). 1455-1469. doi:10.1175/JPO3066.1.
- McKay, D.P. (2004), Oil spill impact modeling: Development and validation. *Environmental Toxicology and Chemistry* 23:2441-2456. doi:10.1897/03-382.
- Meza-Padilla, R., Enriquez, C., Liu, Y. and Appendini, C. (2019), Ocean Circulation in the Western Gulf of Mexico Using Self-Organizing Maps. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 124, 4152-4167. <https://doi.org/10.1029/2018JCO14377>
- Mackay, D.P., Buist, I., Mascarenhas, R. and Paterson, S. (1980), Oil spill processes and models. *Environmental Emergency Branch, Department of Fisheries and Environment, Environment Canada, Ottawa, ON.*
- Nowlin, W.D., Jochens, A.E., Reid, R.O. and DiMarco, S.F. (1998), Texas-Louisiana Shelf Circulation and Transport Processes Study: Synthesis Report, Volume I: Technical Report. OCS Study MMS 98-0035. *US Dept. of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA*, 502 pp.
- Oey, L. Y. (2003), A circulation model of the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea. Development of the Princeton Regional Ocean Forecast (& Hindcast) system – PROFS, and hindcast experiment for 1992 – 1999. *Final Report, OCS Study MMS 2005-049, U.S. DOI Minerals Management Service, Herndon, Virginia*. 174 pp.
- Oey, L.Y., Ezer, T. and Lee, H.C. (2005), Loop Current, Rings and Related Circulation in the Gulf of Mexico: A review of numerical models and future challenges. *In: Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models, W. Sturges and A. Lugo-Fernandez (Eds.), Geophysical Monograph Series, Vol. 161, 31-56, AGU, Washington, DC.* doi: 10.1029/161GM04.
- Oey, L.Y., Ezer, T. and Lee, H.C. (2005), Loop Current Rings and related circulation in the Gulf of Mexico: A review of numerical models and future challenges. *Circulation in the Gulf of Mexico: Observation and models. Edited by W Sturges and A. Lugo-Fernandez. Washington DC: American Geophysical Union.* 31-56.
- Ohlmann, J.C., Niiler, P.P., Foz, C.A. and Leben, R.R. (2001), Eddy energy and shelf interactions in the Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 106 No. C2. <https://doi.org/10.1029/1999JC000162>.

- Perez-Brunius, P., Furey, H., Bower, A., Hamilton, P., Candela, J., Garcia-Carrillo, P., and Leben, R. (2018), Dominant circulation patterns of the deep Gulf of Mexico. *Journal of Phys. Ocean.*, 48, 511-529. doi.org/10.1175/JPO-D-17-0140.1
- Pözlbauer, G. (2004), Survey and comparison of quality measures for self-organizing maps. *Proc. 5th Workshop Data Analysis*, Slovakia 2004. 15 pp.
- Portela, E., Tenreiro, M., Pallàs-Sanz, E., Meunier, T., Ruiz-Angulo, A., Sosa-Gutiérrez, R., and Cusí, S. (2018). Hydrography of the central and western Gulf of Mexico. *J. of Geophys. Res.: Oceans*, 123. <https://doi.org/10.1029/2018JC013813>.
- Rebich, R., Houston, N., Mize, S., Pearson, D., Ging, P. and Hornig, C. (2011), Sources and Delivery of Nutrients to the Northwestern Gulf of Mexico from streams in the South-Central United States. *J. of the Ame. Water Resources Assoc. (JAWRA)* 47(5):1061-1086. doi: 10.1111/J.1752-1688.2011.00583.X
- Reusch, D. B., Alley, R. B. and Hewitson, B. C. (2005), Relative performance of self-organizing maps and principal component analysis in pattern extraction from synthetic climatological data. *Polar Geography*, Vol. 29, 188-212, ISSN 1939-0513.
- Richardson, A.J., Risien, C. and Shillington, F.A. (2003), Using Self-Organizing Maps to identify patterns in satellite imagery. *Progress in Oceanography* 59, 223-239. doi:10.1016/J.POCEAN.2003.07.006
- Rudnick, D., Gopalakrishnan, G. and Cornuelle, B. (2015), Cyclonic Eddies in the Gulf of Mexico: Observations by Underwater Gliders and Simulations by Numerical Model. *J. of Phys. Ocean.*, AMS. Volume 45, 313-326. doi:10.1175/JPO-D-14-0138.1.
- Ruíz-Salcines, P. (2013), Campos de viento para hindcast de oleaje: Reanálisis, paramétricos y fusión. Tesis de maestría. *Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente*. Universidad de Cantabria, 84 pp.
- Saha, Suranjana and coauthors (2014), The NCEP Climate Forecast System Version 2. *J. Climate*, 27, 2185-2208
- Saha, Suranjana, and coauthors (2010), The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1015–1057.
- Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (2006), Atlas Geográfico del medio ambiente y recursos naturales.
- Sheinbaum, J., Ochoa, J., Candela, J. and Badan, A. (2010), Full-water column current observations in the western Gulf of Mexico: Final Report. *US Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans LA*. OCS Study BOEMRE 2010-044.
- Simon, G., Lendasse, A., Cottrell, M., Fort, J. and Verleysen, M. (2005), Time series forecasting: Obtaining long term trends with self-organizing maps. *Pattern Recognition Letters*. Volume 26, Issue 12. 1795-1808. <http://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.03.002>.
- Smith, D. (1986), A numerical study of Loop Current eddy interaction with topography in the western Gulf of Mexico. *J. of Phys. Ocean.* 16, 1260-1272.

- Sørensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sørensen, L.S. (2004), A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique. *Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 894–906.
- Sturges, W. and Evans, J.C. (1983), On the variability of the Loop Current in the Gulf of Mexico. *J. of Marine Res.*, Volume 41 (4) 639-653. doi: 10.1357/002224083788520487.
- Sturges, W. and Leben, R. (2000), Frequency of Ring Separations from the Loop Current in the Gulf of Mexico: A Revised estimate. *J. Phys. Oceanography*, Vol 30. 1814-1819. doi: 10.1175/1520-0485(2000)030<1814:FORSFT>2.0;2
- Sturges, W., Lugo-Fernandez, A. and Shargel, M.D. (2005), Introduction to Circulation in the Gulf of Mexico. *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models Geophysical Monograph Series* 161. AGU doi: 10.1029/161GM02.
- Tenreiro, M., Candela, J., Pallaz-Sanz, E., Sheinbaum, J., Ochoa, J. (2018), Near-surface and Deep circulation coupling in the Western Gulf of Mexico. *J. Phys. Ocean.* 48, 145-165. doi.org/10.1175/JPO-D-17-0018.1
- Urban, J. (2008), Conocimiento biológico de las especies de mamíferos marinos incluidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-201. Bases de datos SNIB-CONABIO. *Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad. Proyecto No. CK009*. Ciudad de México.
(http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/CK009_Fichas%20de%20Especies.pdf)
- Vesanto, J., Alhoniemi, E. (2000), Clustering of the Self-Organizing Map. *IEEE Trans Neural Netw.* 2000, 11(3) 586-600. doi: 10.1109/72.846731.
- Vilibić, I., Šepić, J., Mihanović, H., Kalinić, H., Cosoli, S., Janeković, I., Žagar, N., Jesenko, B., Tudor, M., Dadić, V. and Ivanković, D. (2016), Self-Organizing Maps—based ocean currents forecasting system. *Nature Scientific Reports* 6, Article: 22924. doi: 10.1038/SREP22924
- Weisberg, R. and Liu, Y. (2017), On the Loop Current Penetration into the Gulf of Mexico. *J. of Geophys. Res.: Oceans*, 122, 9679-9694 doi:10.1002/2017JC013330.
- Wu, J. (1980), Wind-stress coefficients over sea surface and near neutral conditions – A revisit, *J. of Phys. Oce.* 10, 727-740.
- Wu, J. (1984), The sea surface is aerodynamically rough even under light winds. *Boundary Layer Meteorology*, 69. 149-158.
- Wüst, G. (1964), Stratification and Circulation in the Antillean-Caribbean Basins, Part I. *Columbia University Press*, 201 pages.
- Xu, F., Chang, Y., Oey, L. and Hamilton, P. (2013), Loop Current growth and eddy shedding using models and observations: Analyses of the July 2011 eddy-shedding event. *J. Phys. Ocean.*, 43, 1015-1027, doi:10.1175/JPO-D-12-0138.1.
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S.L. and O'Brien, J.J. (2003), Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high resolution numerical model. *J. Geophys. Res.*, 108(C12), 3389. doi: 10.1029/2003JC001879.

Zeng, X., Li, Y., He, R. and Yin, Y. (2015), Clustering of Loop Current patterns based on the satellite-observed sea surface height and self-organizing map. *Remote Sensing Letters*, 6(1), 11-19, doi: 10.1080/2150704X2014.998347.

Zhang, Z., Tian, J., Qiu, B., Zhao, W., Chang, P., Wu, D. and Wan, X. (2016), Observed 3D Structure, Generation, and Dissipation of Oceanic Mesoscale Eddies in the South China Sea. *Scientific Reports*. 6, 24349. doi:10.1038/srep24349.