

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



**Distribución y posible origen de hidrocarburos (HA's n-alcános y HAP's) en
las aguas del Golfo de México durante las campañas oceanográficas XIXIMI
IV-VI (2015-2017)**

T E S I S

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

Mariana Ana Laura Saenz-Avalos

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. ENERO, 2024.

RESUMEN

Este estudio aborda la investigación de las posibles fuentes de hidrocarburos (n-alcanos y aromáticos policíclicos) en las aguas profundas del Golfo de México. Mediante el análisis de datos colectados en la columna de agua durante las campañas oceanográficas XIXIMI (IV, V, VI) entre 2015-2017, el propósito principal fue establecer vínculos entre la concentración de hidrocarburos, su distribución y los procesos físicos que los conducen, lo que permite obtener una visión ambiental detallada de la región. Aunque los hidrocarburos son esenciales para la industria petrolera, también representan amenazas potenciales al medio ambiente, lo que subraya la importancia de comprender su dinámica y su interacción con los factores físicos que operan en este entorno. Esta investigación incluye la comparación de datos, el mapeo de la distribución de hidrocarburos, el cálculo de índices ambientales y la discusión sobre su posible origen. Los resultados obtenidos revelan la marcada influencia de los procesos físicos en la dispersión de los hidrocarburos. Se destaca la predominancia de hidrocarburos alifáticos con posibles fuentes petrogénicas y la presencia de hidrocarburos aromáticos, cuyo origen parece estar relacionado con la combustión de biomasa. Estos hallazgos poseen implicaciones significativas, proporcionando información de importancia para la gestión de derrames de hidrocarburos y amplía la comprensión de la compleja dinámica marina en el Golfo de México.

Palabras clave: Aguas profundas, HC alifáticos, HC aromáticos policíclicos, Golfo de México, Factores forzantes, Corrientes, vientos.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

Posible origen y distribución de HC (HA's n-alcanos y HAP's) en
las aguas del Golfo de México durante las campañas
oceanográficas XIXIMI IV-VI (2015-2017)

T E S I S


QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

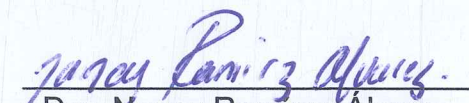
PRESENTA

MARIANA ANA LAURA SAENZ-AVALOS

Aprobada por:



Dr. José Vinicio Macías Zamora
Director de tesis



Dra. Nancy Ramirez Alvarez
Sinodal



Dr. Rubén Castro Valdez
Sinodal

DEDICATORIA

A mi familia.

AGRADECIMIENTO

A la Facultad de Ciencias Marinas e Instituto de Investigaciones Oceanológicas por permitirme estudiar una maestría en Oceanografía Costera.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado para realizar mis estudios de maestría. No. de becario: 1074091

Al Consorcio de Investigación del golfo de México (CIGoM). Proyecto de hidrocarburos SENER-CONACyT por los datos incluidos en este trabajo.

Al **Dr. Vinicio Macias** por aceptar ser mi director de tesis, por su paciencia, apoyo y consejos durante la elaboración de la tesis.

A mis sinodales, **Dra. Nancy Ramírez y Dr. Rubén Castro** por su paciencia, disposición, conocimiento y tiempo brindado.

A todos **mis amigos**, por acompañarme en mi camino y hacer esta travesía especial.

A **mi familia...**♥

INDICE

RESUMEN	2
Dedicatoria	4
Agradecimientos.....	5
Introducción.....	17
Hidrocarburos	19
HC ALIFÁTICOS: n-ALCANOS	20
Orígenes de HC alifáticos.....	22
HC AROMATICOS POLICICLICOS	22
Orígenes de HC aromáticos policíclicos	24
Índices referenciales de los HC aromáticos policíclicos.....	26
Antecedentes	27
Justificación.....	30
Hipótesis.....	31
OBJETIVO.....	32
OBJETIVO GENERAL	32
OBJETIVOS PARTICULARES	32
ÁREA DE ESTUDIO.....	33
Circulación atmosférica.....	34
Circulación oceánica.....	35

Masas de agua	38
Ríos	40
Circulación profunda	41
DATOS Y MÉTODOS	42
Bases de datos de HC alifáticos y aromáticos	42
Laboratorio: Extracción de Hidrocarburos en Agua de Mar	45
Limpieza del material:	45
Protocolo de extracción y limpieza	45
Circulación Oceánica y Velocidades Geostróficas en el Golfo de México mediante Altimetría Satelital	47
Circulación del viento	49
División de la Columna de Agua en Capas según Masas de Agua en el Golfo de México.....	49
Interpolación objetiva	50
Fuentes de HC.....	51
Índice Preferencial del Carbono (IPC):	51
Índice Terrígeno/Acuático (TAR):	52
Antraceno/(Antraceno+Fenantreno):	53
Índice Fluoranteno/(Fluoranteno+Pireno):	53
Índice HMW/LMW:.....	54

Resultados	55
Campaña oceanográfica XIXIMI-04 (agosto-septiembre de 2015)	55
Relaciones de los HC alifáticos y aromáticos con la circulación atmosférica en la zona de aguas profundas del GdM	57
Relaciones de los HC alifáticos con la circulación oceánica en la zona de aguas profundas del GdM.	59
Identificación de posibles fuentes de HC alifáticos en la zona de aguas profundas del GdM	62
Relaciones de los HC aromáticos con la circulación oceánica en la zona de aguas profundas del GdM.....	65
Campaña oceanográfica XIXIMI-05 (10-25 de junio de 2016)	68
Relaciones de los HC alifáticos y aromáticos con la circulación atmosférica en la zona de aguas profundas del golfo de México.....	70
Relaciones de los HC alifáticos con la circulación oceánica en la zona de aguas profundas del golfo de México	72
Identificación de posibles fuentes de HC alifáticos en la zona de aguas profundas del golfo de México	75
Relaciones de los HC aromáticos con la circulación oceánica en la zona de aguas profundas del golfo de México	78
Identificación de posibles fuentes de HC aromáticos en la zona de aguas profundas del golfo de México	79

Campaña oceanográfica XIXIMI-06 (agosto - septiembre del 2017).....	81
Relaciones de los HC alifáticos y aromáticos con la circulación atmosférica en la zona de aguas profundas del golfo de México.....	82
Relaciones de los HC alifáticos con la circulación oceánica en la zona de aguas profundas del golfo de México	84
Identificación de posibles fuentes de HC alifáticos en la zona de aguas profundas del golfo de México	87
Identificación de posibles fuentes de HC alifáticos en la zona de aguas profundas del golfo de México	89
Identificación de posibles fuentes de HC aromáticos en la zona de aguas profundas del golfo de México	91
Discusión.....	93
Influencia de la circulación atmosférica en la distribución de HC en el GdM	93
Influencia de la circulación oceánica en la distribución de HC en el GdM	95
Fuente probable de hidrocarburo alifáticos	96
Fuente probable de hidrocarburo aromático.....	99
Conclusión.....	102
Bibliografía.....	103

FIGURAS

Fig. 1. Esquema de la clasificación de HC. Fuente: modificada de UNAM (2023).20

Fig. 2. Estructura química de los 16 Hidrocarburos Aromáticos policíclicos (HAPs) clasificados por la EPA como prioritarios. Fuente: Reategui y Salazar (2016)..... 23

Fig. 3. Infraestructura de petróleo y gas y filtraciones de petróleo natural en el GdM. Pulster *et al.*,2020. 28

Fig. 4. Esquema conceptual de la circulación general en el Caribe y el GdM. Las flechas rojas representan flujos predominantemente superficiales (por encima de la isoterma de 7 °C). Las siglas indicadas en el mapa (CY, CF y CL) representan las corrientes de Yucatán, florida y de lazo. Durante, 2021..... 36

Fig. 5. Área de estudio en el GdM. Los círculos naranjas son las estaciones de muestreo para los cruceros oceanográficos XIXIMI-04, 05 y 06. La línea gris indica la isóbata de los 200 y 1000 m de profundidad, la primera separa la región costera de la oceánica, y la segunda limita en este estudio la región de aguas profundas del GdM. 44

Fig. 6. Circulación del golfo de México durante la campaña XIXIMI-04 del 27 de agosto al 16 de septiembre de 2015. Modificado de Pulster *et al.*,2020. Las fechas negras indican las velocidades geostróficas (cm s) calculadas con altimetría y la isolínea amarilla resalta el ADT = 0.25m. Las fuentes de HC están señaladas con triángulos azules para USA y negros para México..... 56

Fig. 7. Distribución espacial de la concentración promedio de los HC con el patrón de circulación de viento diario. (a) alifáticos totales con patrón de viento para el 31

de agosto, (c) aromáticos totales con patrón de viento para el 3 de septiembre. Los datos corresponden a la campaña XIXIMI-04 y se calcularon para el estrato de 0 a 10 m de la región de aguas profundas del GdM.....	58
Fig. 8. Distribución espacial superficial de la concentración promedio de HC alifáticos durante la campaña XIXIMI-04.....	60
Fig. 9. Distribución espacial de la concentración promedio de HC alifático en la columna de agua durante la campaña XIXIMI-04. Alifáticos totales en (a) GCW, (b) TACW, (c) AAIW, (d) NADW (versión sin circulación oceánica).....	61
Fig. 10. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs la profundidad nominal el GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-04.....	63
Fig. 11. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs. TAR (material terrígeno-acuático) en la zona de aguas profundas del GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-04.....	64
Fig. 12. Distribución espacial superficial de la concentración promedio de HC aromático durante la campaña XIXIMI-04.....	66
Fig. 13. Distribución espacial de la concentración promedio de HC HAPs en la columna de agua durante la campaña XIXIMI-04. HAPs totales en (a) AAIW y (b) NADW (sin datos de circulación oceánica).....	67
Fig. 14. Circulación del GdM durante la campaña XIXIMI-05 del 10 de junio al 25 de junio de 2016. Modificado de Pulster <i>et al.</i> ,2020. Las fechas negras indican las velocidades geostróficas (cm s) calculadas con altimetría y la isolínea amarilla	

resalta el ADT = 0.25m. Las fuentes de HC están señaladas con triángulos azules para USA y negros para México..... 69

Fig. 15. Distribución espacial de la concentración promedio de los HC con el patrón de circulación de viento diario. (a) alifáticos totales con patrón de viento para el 11 de junio, (b) aromáticos totales con patrón de viento para el 19 de junio. Los datos corresponden a la campaña XIXIMI-05 y se calcularon para el estrato de 0 a 10 m de la región de aguas profundas del GdM. 71

Fig. 16. Distribución espacial superficial de la concentración promedio de HC alifáticos durante la campaña XIXIMI-05..... 73

Fig. 17. Distribución espacial de la concentración promedio de HC alifático en la columna de agua durante la campaña XIXIMI-05. Alifáticos totales en (a) TACW, (b) NADW (versión sin patrón de circulación)..... 74

Fig. 18. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs la profundidad nominal el GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-05..... 76

Fig. 19. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs. TAR (material terrígeno-acuático) en la capa superficial del GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-05..... 77

Fig. 20. Distribución espacial superficial de la concentración promedio de HC aromático durante la campaña XIXIMI-05. 78

Fig. 21. Gráficos de dispersión de HAPs basados en relaciones diagnósticas de (a) [Flu/ (Flu + Pyr)] vs [Ant/ (Ant + Phe)], para la identificación de fuentes en el GdM.

Datos obtenidos del crucero XIXIMI-05. Abreviaturas: Ant, antraceno; Phe, fenantreno; Flu, fluoranteno; Pyr, pireno. 80

Fig. 22. Circulación del golfo de México durante la campaña XIXIMI-06 del 10 de agosto al 16 de agosto de 2017. Modificado de Pulster *et al.*,2020. Las fechas negras indican las velocidades geostróficas (cm s) calculadas con altimetría y la isolínea amarilla resalta el ADT = 0.25m. Las fuentes de HC están señaladas con triángulos azules para USA y negros para México. 81

Fig. 23. Distribución espacial de la concentración promedio de los HC con el patrón de circulación de viento diario. (a) alifáticos totales con patrón de viento para el 23 de agosto, (b) aromáticos totales con patrón de viento para el 07 de septiembre. Los datos corresponden a la campaña XIXIMI-06 y se calcularon para el estrato de 0 a 10 m de la región de aguas profundas del GdM. 83

Fig. 24. Distribución espacial superficial de la concentración promedio de HC alifáticos durante la campaña XIXIMI-06. 85

Fig. 25. Distribución espacial de la concentración promedio de HC alifático en la columna de agua durante la campaña XIXIMI-06. Alifáticos totales en (a) AAIW (b) NADW (versión sin circulación oceánica). 86

Fig. 26. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs la profundidad nominal el GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-06. 88

Fig. 27. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs. TAR (material terrígeno-acuático) en el del GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-06.	89
Fig. 28. Distribución espacial de la concentración promedio de HAPs en la columna de agua durante la campaña XIXIMI-06. HAPs totales en (a) TACW, (b) NADW (sin datos de circulación oceánica).	90
Fig. 29. Gráficos de dispersión de HAPs basados en relaciones diagnósticas de (a) [Flu/ (Flu + Pyr)] vs [Ant/ (Ant + Phe)], para la identificación de fuentes en el GdM. Datos obtenidos del crucero XIXIMI-06. Abreviaturas: Ant, antraceno; Phe, fenantreno; Flu, fluoranteno; Pyr, pireno.	92
Fig. 30. Fuentes probables de HC alifáticos en la capa superficial para cada crucero (XIXIMI-04, XIXIMI-05 y XIXIMI-06) del GdM.	97
Fig. 31 Fuentes probables de HC alifáticos en la capa, a) GCW; b) TANW; c) AAIW; d) NADW, para cada crucero (XIXIMI-04, XIXIMI-05 y XIXIMI-06) del GdM.	98
Fig. 33 Fuentes probables de HC aromáticos en capa superficial para cada crucero (XIXIMI-04, XIXIMI-05 y XIXIMI-06) del GdM.	100
Fig. 34 Fuentes probables de HC aromáticos en la capa, a) GCW; b) TANW; c) AAIW; d) NADW, para cada crucero (XIXIMI-04, XIXIMI-05 y XIXIMI-06) del GdM.	101

TABLAS

Tabla I. Incidentes en Estados Unidos:	28
Tabla II. Incidentes en México	29
Tabla III. Datos de muestre de las campañas oceanográficas	44

INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos [HC] han sido una fuente importante de generación de energía para las industrias y el desarrollo de nuestra vida cotidiana. El combustible (gasolina, diésel, petróleo), los plásticos, las fibras sintéticas, las cremas, los insecticidas, alquitrán, fertilizantes y la mayoría de las botellas de plástico de distintos productos comerciales, son solo algunos ejemplos del uso de los HC en nuestra vida diaria. (Cavazos-Arroyo *et al.*,2014). Sin embargo, sus propiedades fisicoquímicas y los derrames tanto accidentales como intencionales y el mal empleo, los convierten en compuestos dañinos para los ecosistemas, ya que, producen efectos negativos sobre la calidad de las aguas, la salud humana, y los recursos biológicos a corto, medio y largo plazo. En ocasiones pueden generar un gran impacto ecológico y económico (Zubizarreta Solá *et al.*,2018; López *et al.*,2016).

Entre los posibles efectos biológicos fisiológicos y/o bioquímicos. Tenemos, por ejemplo; que los HC aromáticos como el tolueno, el naftaleno, el benzopireno y el fenantreno, son particularmente tóxicos debido a su tendencia a acumularse en los tejidos grasos, lo que dificulta su eliminación por parte del organismo. Una vez dentro de los organismos, estos compuestos tienen la oportunidad de causar alteraciones en la bioquímica y fisiología de los organismos. Estos impactos pueden tener consecuencias en el éxito reproductivo de los organismos y potencialmente provocar alteraciones genéticas, como cambios en el tamaño y crecimiento de las poblaciones de cada especie (Zamora *et al.*, 2012). Además, los cambios inducidos por los vertidos de HC en los hábitats donde se encuentran los organismos pueden

generar modificaciones en las relaciones entre los diferentes componentes de los ecosistemas. Estos cambios en las poblaciones y las interacciones ecológicas pueden tener efectos a largo plazo en la estabilidad y el equilibrio del ecosistema. (Iturbe *et al.*,2007).

Los HC ingresan al ambiente marino principalmente desde fuentes terrestres y marinas, pueden ser continuas o discontinuas. En la primera, desde fuentes terrestres, algunos HC se evaporan a la atmósfera, frecuentemente por quemas de materiales orgánicos como ocurre en los incendios forestales y se adhieren a partículas sólidas que pueden viajar largas distancias antes de depositarse en ríos, lagos o suelos y posteriormente terminar en el mar mediante el transporte atmosférico; otro aporte importante son las emisiones marinas que incluye las emisiones naturales de petróleo. También, aquellos que ocurren por derrames accidentales y explosiones de plataformas, operación y limpieza de transportes marítimos, y descargas residuales originadas durante la perforación de pozos petroleros, refinación, producción de petroquímicos, operaciones de embarque y almacenamiento. (Tobiszewski y Namieśnik, 2012).

Es importante señalar que algunos HC pueden tener más de un origen y que su presencia en un determinado lugar puede deberse a una combinación de diferentes fuentes y transporte. Por ejemplo, el benceno, un HC aromático común, puede ser producido por procesos biológicos, por la quema de combustibles fósiles y por la liberación de sustancias químicas industriales (Wallace, 1996). Dependiendo de su origen y de la forma en que son liberados al medio, impactan de diferente forma en la salud humana y en el medio ambiente (Weisel, 2010). Por ejemplo, los HC

aromáticos pirogénicos y biogénicos pueden ser emitidos por fuentes puntuales, como chimeneas y vertederos, y tener un impacto localizado en la calidad del aire y del suelo, mientras que los HC aromáticos petrogénicos pueden ser liberados en grandes cantidades por accidentes petroleros y tener un impacto a gran escala (Sammarco *et al.*,2013).

Hidrocarburos

Los HC son compuestos orgánicos formados por átomos de carbono e hidrógeno. Gracias a sus enlaces covalentes carbono-carbono [c-c] presentes en su cadena principal, son abundantes en la naturaleza y se pueden clasificar en dos grupos importantes: los HC. Alifáticos y los HC. Aromáticos (Fig. 1). El primero son HC de cadenas abiertas (alicíclicos) o cerradas (cíclicos) y se clasifican en saturados e insaturados dependiendo de la cantidad de átomos de hidrógeno y los enlaces (simples, dobles y triples) presentes. El segundo grupo son HC que contienen anillos de benceno con 6 átomos de carbonos y enlaces dobles intercalados como estructura básica. Se dividen en monocíclicos (un anillo) y policíclicos (más de dos anillos) (Brown *et al.*,2014).

Los HC saturados son aquellos compuestos que tienen el máximo de átomos de hidrógeno en su estructura molecular, es decir están saturados de hidrógeno, estos compuestos solamente presentan enlaces sencillos: C-C o C-H, este grupo, además, son llamados Alcanos o parafinas, ya que, son compuestos poco reactivos. En el caso de los HC insaturados, reemplazan sus enlaces simples con el hidrogeno

por enlaces múltiples de c-c; como dobles, llamados alquenos y triples, conocidos como alquinos (Brown *et al.*,2014).

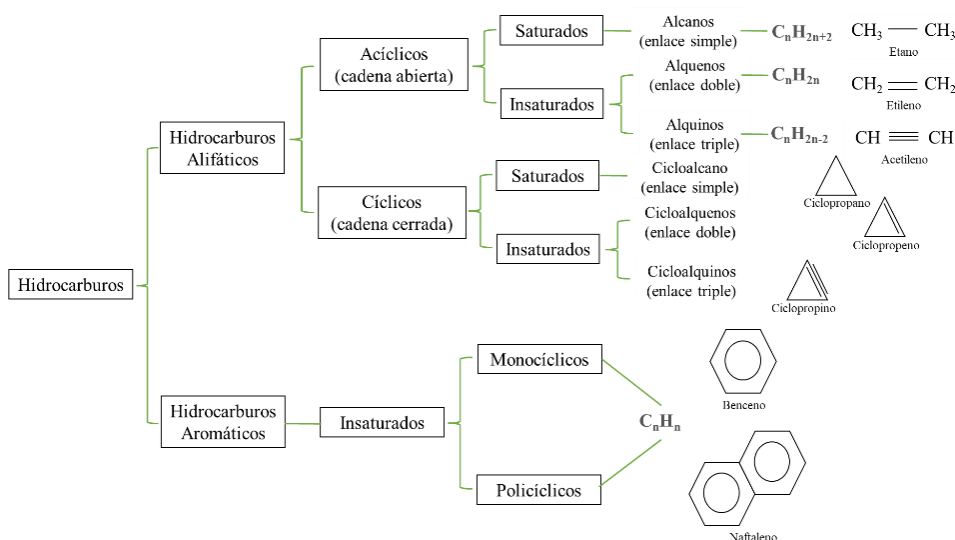


Fig. 1. Esquema de la clasificación de HC. Fuente: modificada de UNAM (2023).

Los HC son moléculas apolares, se encuentran en gran cantidad en la naturaleza y son la base de los combustibles fósiles, como el petróleo y el gas natural (Speight, 2015). Entre sus formas destaca el petróleo que es una mezcla de HC que varía en su composición dependiendo del lugar de origen. Su estado es líquido viscoso y de color oscuro que se encuentra en el subsuelo terrestre, compuesto principalmente por HC de cadena larga. Se reporta como un recurso no renovable y su extracción puede ser costosa y compleja, pero es una de las fuentes de energía más importantes y utilizadas en todo el mundo (Alboudwarej *et al.*,2006).

HC ALIFÁTICOS: n-ALCANOS

Son HC saturados cuya fórmula general es C_nH_{2n+2} y presentan enlaces simples entre los átomos de carbono, formando cadenas lineales, ramificadas o cíclicas.

Gracias a las propiedades de los c-c, es posible la formación de largas cadenas de carbonos, al aumentar la serie se incrementa el punto de fusión, ebullición y la densidad. Del mismo modo, cuando aumenta la masa molecular, los alcanos varían desde gases y líquidos inflamables hasta aceites viscosos y sólidos de consistencia cerosa (Brown *et al.*,2014). En función del número de carbonos que forman la estructura lineal y su comportamiento en el agua se pueden clasificar en: a) una volátil de cadena corta, bajo peso molecular que tiende a la fugacidad, b) formada por compuestos solubles, peso molecular intermedio, denominada "fracción acomodada en agua" y c) la fracción hidrofóbica, de alto peso molecular, que tiende a asociarse por adsorción a partículas orgánicas (Saliot, 1981).

Los alcanos se encuentran en el petróleo crudo y en el gas natural, también se pueden sintetizar a través de procesos químicos industriales, como la síntesis de Fischer-Tropsch. (Speight, 2015). Los alcanos más comunes en el petróleo son los alcanos lineales o ramificados de cadena corta a media, que van desde el metano (CH₄) hasta el hexadecano (C₁₆H₃₄). Sin embargo, también pueden encontrarse alcanos de cadena larga en el petróleo, como el octadecano (C₁₈H₃₈) y el triacontano (C₃₀H₆₂). La proporción de alcanos en el petróleo crudo puede variar significativamente dependiendo de la ubicación geográfica, la edad del yacimiento, y se clasifica el petróleo según su gravedad API y su viscosidad (Guzmán-Osorio *et al.*,2020).

Orígenes de HC alifáticos

Los HC alifáticos de origen biogénico se producen por la biosíntesis de materia orgánica en los seres vivos, tanto terrestres como acuáticos. Estos HC pueden provenir de micro y macroalgas, bacterias, plancton marino, diatomeas y plantas superiores, entre otros (Clark & Blumer, 1967). Por lo tanto, los HC alifáticos de origen biogénico se encuentran en el medio de manera natural y no están relacionados con la actividad humana (Bedair & Al-Saad, 1992). Un ejemplo son los alcanos lineales, como C15 y C17 sintetizados por el fitoplancton, estos microorganismos fotosintéticos, que incluyen diversas especies de algas microscópicas, son una fuente importante de compuestos orgánicos en los ecosistemas acuáticos (Harada *et al.*,2021).

Por otro lado, los HC alifáticos de origen petrogénico se encuentran en depósitos de petróleo y gas natural, y se forman a partir de la descomposición de la materia orgánica, que se ha acumulado y ha sufrido un proceso de transformación geológica a lo largo del tiempo. Este proceso de transformación implica altas presiones, temperaturas y procesos químicos complejos (Silva *et al.*,2013). Los HC de origen petrogénico son comúnmente extraídos de depósitos por la industria petrolera, y liberados ya sea por derrames, quema o emanaciones de combustibles fósiles (Calva *et al.*,2005; Pelletier *et al.*,1991).

HC AROMATICOS POLICICLICOS

Los HC aromáticos polinucleares (HAPs) son una familia de compuestos que contienen dos o más anillos de benceno unidos por un extremo en común. Los anillos pueden estar en forma recta, angulados o racimados. La estructura

condensada más sencilla, formada por sólo dos anillos aromáticos es el naftaleno y es considerado uno de los tres HAPs más comunes junto con el antraceno y el fenantreno (Brown *et al.*,2014). Tales compuestos se comportan como aromáticos, ya que:

- Son resistentes a la oxidación y a la reducción.
- Son más estables que los alifáticos.
- Son solubles en disolventes orgánicos.
- Pueden ser líquidos o sólidos a temperatura ambiente, dependiendo de su estructura química.
- Su reacción principal es la sustitución electrofílica aromática (SEA).
- Son cancerígenos.
- Los enlaces dobles carbono-carbono en el anillo, les confiere una gran estabilidad y una alta densidad de electrones.

Algunos ejemplos de compuestos aromáticos son:

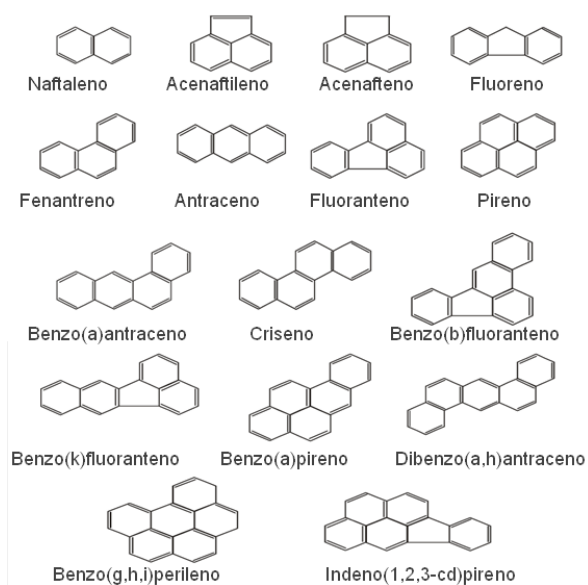


Fig. 2. Estructura química de los 16 Hidrocarburos Aromáticos policíclicos (HAPs) clasificados por la EPA como prioritarios. Fuente: Reategui y Salazar (2016).

Los HC aromáticos tienen una gran importancia para el hombre, porque se utilizan en la industria y el comercio. Por ejemplo, los derivados del benceno, como el tolueno y el xileno, se utilizan como disolventes en la producción de pinturas, lacas y adhesivos; el naftaleno se usa en la fabricación de plásticos, resinas y productos químicos agrícolas. Sin embargo, algunos HC aromáticos, como el benceno, son cancerígenos y pueden causar enfermedades graves como la leucemia. Además, la exposición a HC aromáticos puede provocar problemas respiratorios, irritación de la piel, náuseas y mareos (Mastandrea *et al.*,2005).

Orígenes de HC aromáticos policíclicos

Los HAPs pueden hallarse casi en todas partes, en el aire, la tierra y el agua, procedentes de fuentes naturales o antropogénicas. La contribución de las fuentes naturales, como los incendios forestales y los volcanes, es mínima comparada con las emisiones causadas por el ser humano. La combustión de combustibles fósiles es la principal fuente de emisión de HAPs. Otras emisiones proceden de la combustión de residuos y madera, así como de los vertidos de petróleo crudo o refinado que en sí mismo contiene HAPs. (Scholz-Böttcher *et al.*,2009).

Los HAPs pirogénicos son generados por pirolisis o combustión incompleta de materia orgánica que contiene carbono e hidrógeno. A elevadas temperaturas y bajo condiciones de poco oxígeno o sin oxígeno, la pirólisis de compuestos orgánicos produce fragmentos de moléculas y radicales que se combinan para dar lugar a los HAPs. La composición de los productos de la pirosíntesis depende del combustible, la temperatura y el tiempo de permanencia a altas temperaturas (Kraus *et al.*,2005).

Evidentemente, los HAPs se liberan de la zona de combustión en forma de vapores. La mayoría se condensan en el acto sobre partículas de hollín o forman ellos mismos partículas muy pequeñas y pueden ser depositados cerca del lugar de combustión o pueden ser transportados a grandes distancias por los vientos (Ortiz *et al.*,2007; Bandowe *et al.*,2021).

Los HAPs pirogénicos se generan en numerosas fuentes, entre las que destacan las emisiones de la industria y el tráfico, la quema de combustibles fósiles, la quema de biomasa (como la madera) y los incendios forestales. En la industria, los procesos de combustión incompleta que generan a este grupo incluyen la producción de coque, la fundición de metales y la fabricación de productos químicos (Bandowe *et al.*,2021).

Los HAPs biogénicos son producto de procesos metabólicos de organismos microscópicos, y macroscópicos como las plantas y las termitas donde se ha comprobado que aportan al suelo, naftaleno y perileno (Kraus *et al.*,2005). También provienen de la degradación de la materia orgánica en condiciones aerobias y anaerobias que según Wilcke (2007) son la fuente de HAPs de 4, 5 y 6 anillos debido a que algunos son precursores del humus.

Los HAPs petrogénicos son derivados del petróleo, productos de la transformación de materia orgánica en el subsuelo durante millones de años, sus principales compuestos incluyen homólogos alquilados y no sustituidos de naftalenos, fluórenos, fenantrenos, dibenzotiofenos y crisenos (Johnsen & Karlson 2007). Generalmente ingresan al ambiente en fase gaseosa (por evaporación-

deposición) y en fase líquida (derrames de crudo) principalmente (Ortiz *et al.*,2007).

Esta clasificación simple, no siempre resulta útil para discernir las fuentes de HAPs en un sitio dado, un mismo compuesto puede provenir de diferentes fuentes. Se obtienen diferentes perfiles de HAPs dependiendo de temperatura de combustión, duración del proceso, las condiciones de la flama (oxígeno) y del tipo de material orgánico (Chrysikou *et al.*,2008) y una vez expuestos sufrirán procesos de transformación que dependerán de las características químicas de los compuestos y de las variables ambientales (Maliszewska-Kordybach *et al.*,2009, Ortiz *et al.*,2007).

Índices referenciales de los HC aromáticos policíclicos

Los índices son herramientas utilizadas en el análisis de los HC aromáticos policíclicos (HAPs), presentes en muestras ambientales (por ejemplo, aire, agua, suelo), para intentar determinar su origen. Estas relaciones se basan en la abundancia relativa de un compuesto en comparación con otro en diferentes fuentes. Por lo tanto, su uso adecuado sirve para desarrollar estrategias efectivas para detectar fuentes principales y ayudar a reducir los riesgos ambientales y a la salud, generados por estos contaminantes (Yunker *et al.*,2002).

Se han identificado relaciones efectivas utilizando compuestos específicos de peso molecular 178, 202 y 276, que se conocen como fen-antraceno (Fen-Ant), pireno-fluoranteno (Pyr-Fla) e indeno(1,2,3-cd) pireno (Ind) (Yunker *et al.*,2002), entre otras.

Antecedentes

El Golfo de México [GdM], es considerada una de las mayores cuencas productoras de HC y representa para la economía de México, un gran sostén, ya que, en él se llevan a cabo actividades, como es el turismo, la pesca, asentamientos costeros y la explotación petrolera. Esta última, representa el 60% de la economía de México y es una de la fuente más importante de HC en el GdM (Colmanares, 2008). Las principales áreas de producción petroleras incluyen: Louisiana, EUA; costas de Texas, EUA y bahía de Campeche, México; las cuales están consideradas, además, como zonas de alto riesgo para accidentes petroleros (Fig. 3) (Botello, 2005).

La Administración Nacional oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés), agencia científica estadounidense adscrita al Departamento de Comercio de los EUA , registra los derrames de HC en USA. De acuerdo con sus registros, de 2010 a 2017, ocurrieron anualmente un promedio de 43 percances relacionados con el vertido de HC en las aguas del GdM, resaltando 2015, 2016 y 2017 con un promedio de 63 accidentes por año (NOAA, 2022). Por otra parte, Petróleos Mexicanos (Pemex) en sus informes de Responsabilidad Social del 2010- 2015, registra 59,456 barriles en concepto de fugas y derrames de HC en aguas continentales, destacando el año 2010 con 25,824 barriles (Pemex, 2016).

Debido a las catástrofes ocurridas y al mal manejo de los accidentes, la Secretaría de Marina en conjunto con U.S. Coast Guard crearon el Plan MEXUS, es un plan de Contingencia entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América sobre contaminación del medio ambiente marino por derrames de HC y otras sustancias nocivas. En el Anexo MEXUSGOLF se presentan los lineamientos

con respecto a la comunicación y coordinación que deben ser usados para facilitar la respuesta conjunta cuando ocurre un incidente de contaminación que pueda afectar o amenazar las aguas costeras del GdM. (Semarnat, 2018). Los incidentes más relevantes se detallan en la figura 3, en la tabla I y II.

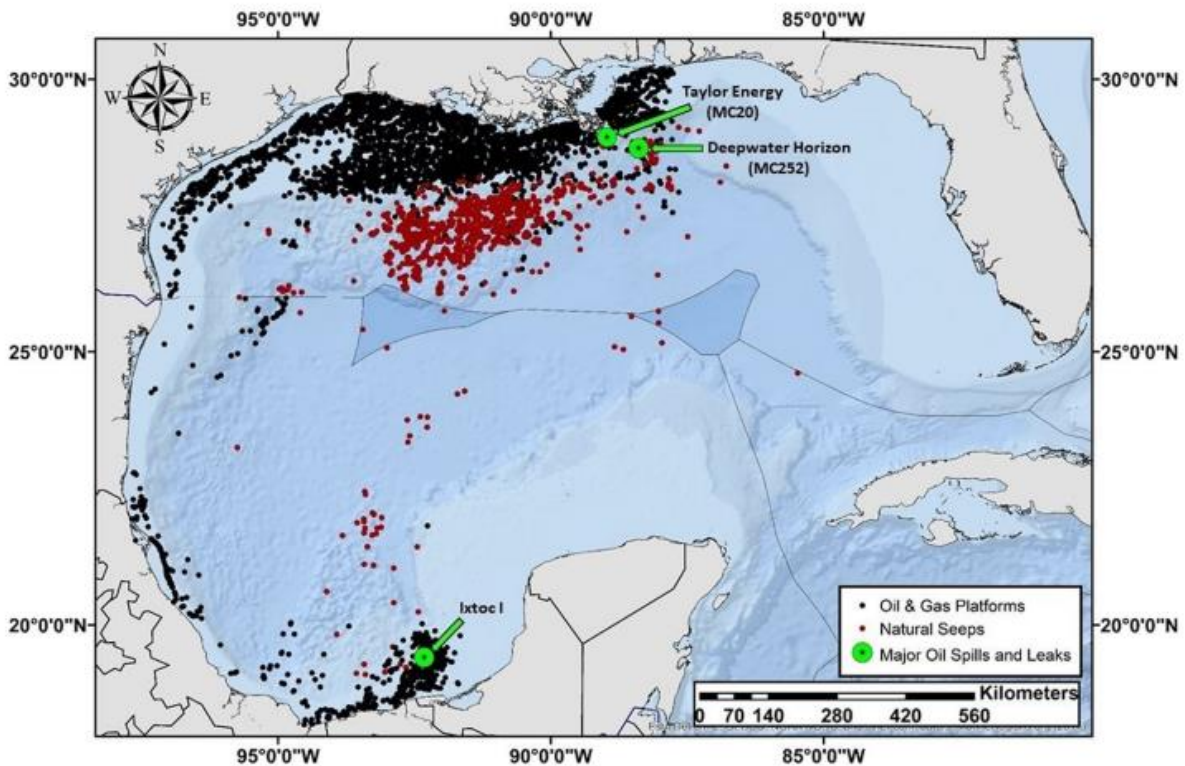


Fig. 3. Infraestructura de petróleo y gas y filtraciones de petróleo natural en el GdM. Pulster *et al.*,2020.

Tabla I. Incidentes en Estados Unidos:

País de Incidente	Lugar	Fecha del Incidente	Cantidad Derramada	Referencias
EE.UU.	91 km al sureste de la Bahía de Galveston, Texas	8 de junio de 1990	Aprox. 100,000 barriles de crudo	NOAA, 2022
EE.UU.	Florida	10 de noviembre de 2005	31,047 barriles de combustible	U.S. Coast Guard y SEMAR, 2012
EE.UU.	72 km de la costa de Luisiana,	20 de abril de 2010	Aprox. 4.1 millones de barriles de petróleo	U.S. Coast Guard y SEMAR, 2012; Beyer

	1600m de profundidad			<i>et al.,2016; Reddy, et al.,2011</i>
EE.UU.	13 km al sur de Timbalier Island	20 de octubre 2014	Marea negra que se extendía en una franja de aprox. 4.8 km de largo	NOAA, 2022
EE. UU.	Bloque Green Canyon del GdM	12 de mayo de 2016	2,100 barriles de petróleo crudo	NOAA, 2022
EE. UU.	GdM, Misisipi Canyon 209	13 de octubre 2017	9,000 barriles de mezcla de petróleo y agua	NOAA, 2022

Tabla II. Incidentes en México

País de Incidente	Lugar	Fecha del Incidente	Cantidad derramada	Referencias
México	Pozo marino Ixtoc, ubicado a 94 km frente a la costa de Ciudad del Carmen, Campeche.	3 de junio de 1979	3.5 millones de barriles de petróleo crudo	NOAA, 1992; U.S. Coast Guard y SEMAR, 2012
México	Plataforma YUM II/Zapot. 32 km frente a la costa de Ciudad del Carmen, Campeche	10 de octubre 1987	Aprox. 30,000 barriles por día	NOAA, 1992
México	Plataformas Kab01 y Kab21	21 de octubre 2007	Aprox. 422 barriles diarios	U.S. Coast Guard y SEMAR, 2012
México	La plataforma petrolera Abkatun, Sonda de Campeche, Golfo de México	1 de abril de 2015	No especificado, incendio en plataforma	Pemex, 2015

Incidentes naturales en México

Hasta aquí, hemos revisado bibliografía referente a incidentes generados por actividades antropogénicas dentro de la industria petrolera. Sin embargo, no es la única vía importante de ingreso de HC en el GdM, como mencionamos antes, el GdM es una cuenca petrolera, ya que adicionalmente, presenta numerosas emanaciones naturales de HC fósiles y de gas metano que se ubican tanto al norte del golfo en territorio norteamericano, como sobre la plataforma y el talud continentales del suroeste del GdM. En la Sonda de Campeche la principal emanación natural de aceite es conocida como la chapopotera de Cantarell; su importancia y dimensiones han sido evaluadas a través de imágenes del satélite RADARSAT a partir del año 2000 (Quintero-Marmol *et al.*,2005; Miranda *et al.*,2004).

De acuerdo con el Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, las emisiones naturales de petróleo representan en escala global, aproximadamente el 46 % anual de la aportación de HC al ambiente oceánico. Las estimaciones de emanaciones de HC fósiles al medio marino registradas por Wilson *et al.*,(1974) en el GdM, permitió registrar al sector norte del Golfo como de baja tasa de aportación (0.1 barril/ día por 1000 mi²); mientras que, en el suroeste del Golfo, la tasa estaría en el orden de 100 barriles/día por 1000 mi²

JUSTIFICACIÓN

La justificación de este estudio radica en la necesidad de comprender la dinámica de los HC en las aguas profundas del Golfo de México (GdM) y su interacción con los procesos físicos presentes en la región. Los HC son sustancias de gran

importancia para la industria petrolera, pero también pueden representar una amenaza ambiental cuando son liberados accidentalmente al medio marino, ya sea por derrames o vertidos.

Los HC derramados en el mar experimentan diversos cambios físicos y químicos que afectan su comportamiento y destino en el entorno marino. Algunos de estos cambios pueden provocar la eliminación de los HC de las capas superficiales del océano, mientras que otros pueden llevar a su persistencia en el medio marino. Comprender estos procesos es fundamental para evaluar los posibles impactos ambientales de los derrames de HC en el Golfo de México y tomar decisiones informadas para su mitigación y manejo.

Además, el Golfo de México es una región altamente estratificada, con una circulación compleja y fuertemente influenciada por la presencia de la Corriente del Golfo y sus remolinos (eddies) asociados, así como por las condiciones climáticas, como los huracanes. Estos forzamientos físicos pueden jugar un papel importante en la distribución y dispersión de los HC en el Golfo de México, lo que hace necesario estudiar su interacción con los procesos físicos dominantes en la región.

HIPÓTESIS

H1: La principal fuente de los HC alifáticos en las aguas del Golfo de México es de origen petrogénico, asociado a la actividad petrolera presente en la zona de estudio.

Y la principal fuente de los HC aromáticos es de origen pirogénica.

H2: La distribución de los HC está fuertemente influenciada por los forzamientos físicos asociados a las corrientes de lazo (CL) durante periodos de extensión de la CL y al viento en épocas de huracanes.

OBJETIVO

OBJETIVO GENERAL

Relacionar las concentraciones de HC alifáticos totales (HAT) y aromáticos policíclicos totales (HAPsT) en la región mexicana de aguas profundas del Golfo de México, durante las campañas oceanográficas XIXIMI IV, V y VI correspondientes a los años 2015-2017, con los procesos físicos dominantes, y ofrecer un panorama ambiental de la zona de estudio a partir de índices referenciales de los compuestos mencionados.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Mapear la distribución de los HC alifáticos y aromáticos policíclicos totales en superficie y profundidad de la columna de agua de Golfo de México.
- Calcular los índices de referencia para evaluar el posible origen de los HC tanto alifáticos como aromáticos.
- Discutir sobre el posible impacto de corrientes y vientos sobre los HC en la zona de estudio a partir de los resultados obtenidos.
- Explicar sobre la calidad de las aguas en función de las concentraciones y distribuciones de los HC en la zona de estudio.

ÁREA DE ESTUDIO

El Golfo de México [GdM] es una cuenca semicerrada localizada en el océano Atlántico, entre México, Estados Unidos y Cuba, tiene una profundidad máxima estimada de 3700 m y su área es aproximadamente de 1550000 km. Como se muestra en la Fig. 4, el golfo se conecta con el Mar Caribe por el Canal de Yucatán, localizado entre la península de Yucatán y Cuba, y con el norte del océano Atlántico, a través, del Estrecho de Florida, entre la península de Florida y Cuba (Candela *et al.*,2002).

Cuenta con una extensa plataforma continental con una profundidad menor a los 200 m que bordea sus márgenes y va desde Florida, Estados Unidos, hasta la península de Yucatán, México (Lugo, 1985). Las regiones más anchas de la plataforma se encuentran en: la Península de Florida con 180 km de extensión, los estados de Texas y Luisiana con 160 km, por último, la plataforma continental del sur del GdM que comienza desde el estado de Campeche, con 130 km hasta la zona norte de la península de Yucatán, con 260 km (Dubranna *et al.*,2011). Entre las dos grandes regiones la plataforma se va estrechando a la altura de los sistemas montañosos que corren paralelos a la costa (Lugo, 1985); desde el Cañón del Misisipi, Luisiana, con 80 km, hasta la zona volcánica de los Tuxtlas, Veracruz, con un máximo estrechamiento, de 6 a 16 km. (Lugo, 1985, Dubranna *et al.*,2011).

La dinámica en el GdM es compleja, entre los procesos más importantes semipermanentes se encuentra la CL y las estructuras de mesoescala anticiclónicas que se desprenden de la misma. El principal mecanismo de forzamiento de la circulación en el golfo es la acción del viento, el intercambio de calor entre el océano

y la atmósfera, las descargas fluviales (Monreal-Gómez *et al.*,2004) y el transporte asociado al flujo que ingresa a través del canal de Yucatán y que sale por el estrecho de Florida (Sheinbaum *et al.*,2002).

Circulación atmosférica

La circulación atmosférica en el Golfo de México se ve influenciada por diversos fenómenos meteorológicos y sistemas de alta y baja presión que afectan la región de manera estacional y a lo largo del año. Los principales son los nortes, vientos alisios, corriente de chorro y los ciclones tropicales. Estos fenómenos meteorológicos contribuyen a los patrones climáticos de la región y pueden tener un impacto significativo en las condiciones del tiempo, la temperatura, las precipitaciones y los vientos en el área del Golfo de México.

Los "nortes" son eventos meteorológicos de corta duración asociados con sistemas de alta presión que se originan al noroeste de las montañas Rocallosas y se desplazan hacia el sureste. Estos eventos ocurren principalmente entre octubre y mayo y tienen un impacto importante en las regiones occidental y sur del Golfo de México. Los nortes pueden causar descensos abruptos de temperatura, fuertes lluvias y vientos intensos con dirección predominante del norte (Mateos-Jaso *et al.*,2012).

Los ciclones tropicales, como huracanes, también afectan la circulación atmosférica en el Golfo de México. Estos sistemas meteorológicos en rotación, caracterizados por un centro de baja presión alrededor del cual giran vientos intensos, tienen un alto potencial destructivo y se forman sobre las aguas cálidas de los océanos en las regiones tropicales, durante el verano y otoño (mayo a noviembre) (Romero-

Centeno et al.,2003). Los huracanes, en particular, pueden tener un gran impacto en los patrones de viento y precipitación en la región (Ojeda *et al.*,2017).

La corriente en chorro, un flujo de vientos a gran altura en la atmósfera también afecta la circulación atmosférica en el Golfo de México. Esta corriente se encuentra generalmente entre los 30° N y 60° N y se desplaza hacia el sur durante los meses de invierno y primavera. Está asociada con desprendimientos de masas de aire frío provenientes del continente que atraviesan el Golfo de México (Zavala-Hidalgo *et al.*,2014). Por último, los vientos alisios desempeñan un papel crucial en la circulación atmosférica. Durante el verano, estos vientos soplan desde el noreste hacia el noroeste del Golfo debido a la influencia de un sistema de alta presión atmosférica semipermanente en el Atlántico Norte. Esta configuración favorece el transporte de humedad y calor desde el océano hacia las áreas costeras y continentales. Sin embargo, en septiembre, el patrón de vientos cambia hacia el oeste en el norte del Golfo debido a la presencia de frentes fríos provenientes del noroeste de los Estados Unidos, mientras que el sistema de alta presión sobre el Océano Atlántico se desplaza hacia el noreste. En la Bahía de Campeche, ubicada en el Golfo de México, se experimentan intensos vientos de componente sur, especialmente en el lado occidental, debido a la influencia de una cadena montañosa que desvía el viento a través del Istmo de Tehuantepec (Zavala-Hidalgo *et al.*,2014; Romero-Centeno et al.,2003).

Circulación oceánica

El flujo que ingresa a través del canal de Yucatán proviene del Caribe y del Atlántico, (Fig. 4), donde el rasgo predominante es la corriente de Yucatán [CY] (Ochoa *et*

al.,2021; Sheinbaum *et al.*,2002). La CY nace cerca del Sistema Arrecifal Mesoamericano, y es alimentada por las corrientes del Caribe y de Caimán (Schmitz y McCartney, 1993; Gallegos, 1996). La CY incursiona al GdM con una velocidad promedio de 1.5 ms cerca de la superficie (Candela *et al.*,2002); Ochoa *et al.*,2003) y máximas de 2.5 ms (Abascal *et al.*,2003). Tiene una dirección norte dominante, hasta aproximadamente los 23 N, donde se libera del control topográfico impuesto por el banco de Campeche (Maul, 1977). En ocasiones la dirección de la corriente de Yucatán varía de noreste a noroeste y su transporte promedio es de 23.9Sv (Sheinbaum *et al.*,2002) Después vira anticiclónicamente hacia el estrecho de Florida para dar origen a la CL. (Ochoa *et al.*,2001, Sheinbaum *et al.*,2002).

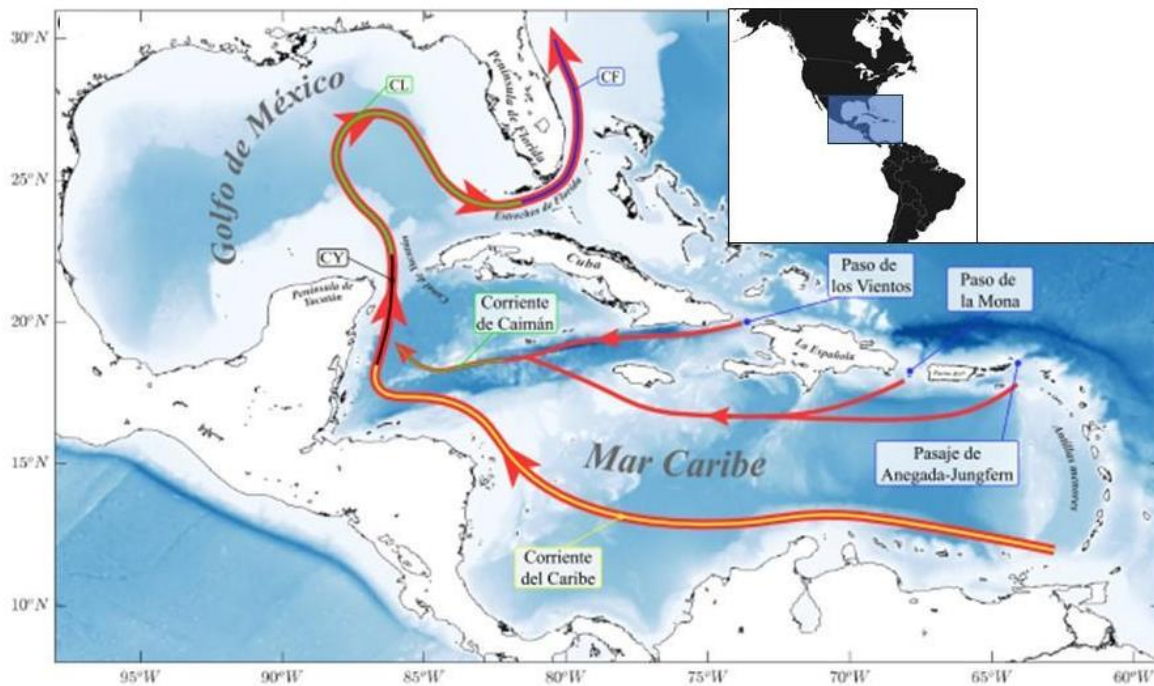


Fig. 4. Esquema conceptual de la circulación general en el Caribe y el GdM. Las flechas rojas representan flujos predominantemente superficiales (por encima de la isoterma de 7 °C). Las siglas indicadas en el mapa (CY, CF y CL) representan las corrientes de Yucatán, florida y de lazo. Durante, 2021.

En promedio, la CL penetra más hacia el norte en primavera y verano, hasta los 24 - 26°N, mientras que en otoño e invierno la corriente puede llegar a estrecharse (estrangularse) hasta acercarse tanto con la corriente que retorna que se unen provocando el desprendimiento de un remolino anticiclónico con diámetro entre 200 y 300 km que inciden en la vertical de 500 a 1000 m de profundidad (Candela *et al.*,2002; Chang y Oey, 2011; Oey *et al.*,2013), con velocidades tangenciales de más de 1 ms (Dietrich y Lin, 1994), y una migración hacia el oeste a una velocidad de entre 3 y 6 km día. Luego, llega al talud continental localizado frente a las costas de los estados de Tamaulipas y Texas y se disipa. Este desprendimiento ocurre en un periodo que oscila de 3 a 21 meses y su tiempo de vida es de alrededor de 1 año (Mendoza-Alfaro and Alvarex-Torres, 2012).

La CL muestra una inestabilidad alrededor del borde, en el cual se forman remolinos ciclónicos frontales (LCFE, por sus siglas en inglés) (Zavala-Hidalgo *et al.*,2003a), que pueden crecer y propagarse principalmente hacia el noroeste, algunos desvían su trayectoria hacia el área central del oeste de la cuenca (Vidal *et al.*,1992) y otros, con una menor frecuencia hacia el sur (Vukovich, 2007). En las zonas de las plataformas costeras de Texas-Luisiana, Florida y la Bahía de Campeche se han registrado giros ciclónicos más pequeños que el gran giro anticiclónico, sus diámetros máximos son de aproximadamente 150 km (Monreal-Gómez *et al.*,2004). Uno de los giros ciclónicos semi permanente más estudiados se presenta en la Bahía de Campeche con un tamaño promedio de~ 100 km, se centra en ~20°N y 95°W, aunque se extiende desde el sur hasta 21.5°N y hasta los 94°W por el este, y su tamaño y ubicación están delimitados por la topografía particular de la región: una cuenca profunda al oeste, y una pendiente suave y menos profunda al este

(Pérez-Brunius *et al.*,2013). En promedio presenta una circulación ciclónica durante el otoño (Díaz-Flores *et al.*,2017). Y un flujo de magnitud de 11 – 26 cm s y aunque no hay evidencia clara de una diferencia estacional, existe una mayor intensificación en invierno en la costa oeste (29 – 34 cm s) y debilitamiento en verano en la cuenca este (<15 cm s) (Pérez-Brunius *et al.*,2013).

Masas de agua

El Golfo de México es una región marina única y compleja que alberga diversas masas de agua con características físicas y termodinámicas distintivas. Estas masas de agua desempeñan un papel crucial en la dinámica y el funcionamiento del ecosistema marino y tienen una influencia significativa en el clima regional y global. Desde la superficie hasta una profundidad de 3,000 m, se identifican varias masas de agua en el Golfo de México, cada una con sus propias propiedades y características únicas (Portela *et al.*,2018):

1. El Agua Superficial del Caribe (CSW): La CSW se encuentra en la capa superficial del mar Caribe y es una mezcla de aguas superficiales del Atlántico Norte, agua del río Amazonas y escorrentía de agua dulce local de América del Sur. Tiene una salinidad inferior a 35.5 ups y se encuentra principalmente entre 50 y 75 metros de profundidad. Las temperaturas en esta masa de agua varían en un rango amplio, típicamente mayores a 25°C (Carrillo *et al.*,2016).
2. Por debajo, se encuentra el Agua Subtropical del Atlántico Norte (NASUW): Esta masa de agua se caracteriza por tener un máximo de salinidad y una

temperatura de alrededor de 20.4°C. Esta masa de agua se reconoce por su salinidad erosionada superior a 36.8 g/kg. La NASUW se encuentra típicamente entre 100 y 150 metros de profundidad (Portela *et al.*,2018; Carrillo *et al.*,2016).

3. Similar a la NASUW se identifica el Agua del Golfo (GCW), es ligeramente más fría y menos salina, representa el máximo de salinidad subsuperficial del agua del Golfo fuera de las estructuras de las corrientes en remolino de límite oeste (LCEs). La GCW se encuentra entre 100 y 150 metros de profundidad (Portela *et al.*,2018).
4. A mayor profundidad, se registran el Agua Central del Atlántico Tropical (TACW) estas aguas tienen su origen en cúpulas permanentes de isopícnas en la parte oriental de las dorsales térmicas y se conocen como Zonas Mínimas de Oxígeno. Tienen una concentración de oxígeno baja, generalmente por debajo de 3 ml/L, y se encuentran por debajo de las aguas del Golfo. Las TACW muestran características de baja salinidad y temperatura y se extienden hasta profundidades de 700 m (Portela *et al.*,2018).
5. Por debajo de las TACW se encuentra Agua Intermedia Antártica (AAIW), en la zona de los 740 a 900 metros de profundidad. Se origina en el frente polar subantártico y se caracteriza por una salinidad mínima y temperaturas entre 4 y 7°C. La AAIW muestra valores de oxígeno de alrededor de 3 a 3.5 ml/L (Portela *et al.*,2018; Hamilton *et al.*,2018).
6. Finalmente, el Agua Profunda del Atlántico Norte (NADW) se encuentra por debajo de las TACW y se extiende hasta las mayores profundidades del Golfo

de México. Se caracteriza por tener temperaturas cercanas a los 4°C, salinidad alrededor de 35.15 g/kg y altos valores de oxígeno superiores a 4.5 ml/L (Carrillo *et al.*,2016; Portela *et al.*,2018).

Ríos

Las plataformas continentales del GdM está física, química y biológicamente influenciadas por los ríos. La gran entrada de agua dulce contiene altas concentraciones de contaminantes, como nitrógeno, fósforo, compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales y materia orgánica, entre otros (Jiménez *et al.*,2010), mientras que las aguas del golfo adentro están permanentemente estratificadas (Dagg y Breed, 2003). Las zonas con mayor influencia de ríos están localizadas principalmente al norte y al centro-sur de la cuenca. En la región norte del golfo, el sistema Misisipi-Atchafalaya, es la principal fuente de agua dulce para la capa superficial del GdM. La máxima descarga de este sistema ocurre durante primavera, en abril, mientras que la mínima en otoño, aproximadamente el 30% la descarga máxima de primavera, a partir de septiembre (Dinnel y Wiseman, 1986, Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009,). Entre las plataformas Texas-Lousiana y Tamaulipas se encuentra el rio Bravo con descargas máximas en verano y mínimas en primavera. En la plataforma central y sur de la cuenca se localizan los ríos Pánuco, Papaloapan, Coatzacoalcos, ambos representan el 30% del escurrimiento fluvial del país, el sistema Grijalva-Usumacinta, primer sistema fluvial más importante de México, y el rio Champotón (de la Lanza y Gómez, 2004). Los

escurrimientos máximos de los ríos en el territorio mexicano ocurren durante el verano-otoño, y disminuyen hacia la primavera (de la Lanza y Gómez, 2004).

Circulación profunda

En la parte oriental del Golfo de México, la principal fuente de energía para la circulación en las aguas profundas proviene de la Corriente del lazo y sus interacciones con la topografía submarina (Candela *et al.*,2019). La expansión y retracción de la Corriente del lazo inducen movimientos en la capa inferior mediante inestabilidades baroclínicas, generando eddies profundos y ondas Rosby topográficas. Estos mecanismos permiten que la energía y las corrientes se transmitan hacia la cuenca occidental del Golfo, tanto hacia el interior como a lo largo de la frontera norte (Hamilton *et al.*,2016; Sheinbaum *et al.*,2016).

Numerosos estudios numéricos y observaciones han sugerido la existencia de un flujo promedio en sentido ciclónico alrededor de la cuenca profunda del Golfo de México (Pérez-Brunius *et al.*,2018). Este flujo, conocido como el Giro Abisal de Sigsbee (Sigsbee Abysal Gyre), es un fenómeno importante que se encuentra en la llanura abisal de la cuenca occidental. Se caracteriza por vórtices anticiclónicos y ciclónicos que interactúan con la topografía submarina y están influenciados por la disipación de los eddies de la Corriente del lazo contra la frontera occidental (Hamilton *et al.*,1990; DeHaan & Sturges, 2005).

El flujo de la corriente de frontera profunda también ha sido un tema de estudio importante. Se ha atribuido a la rectificación de ondas de Rosby topográficas que se generan por la compleja interacción entre las capas superior e inferior, impulsada

por la dinámica de la Corriente del Lazo y el desprendimiento de eddies en el noreste del Golfo (Oey and Lee, 2002; Furey *et al.*,2018). Estas ondas de Rosby, con períodos de entre 20 y 100 días, se propagan a lo largo del talud continental y juegan un papel crucial en el transporte de agua fría y densa del Atlántico Norte Profundo (NADW) a través del Canal de Yucatán hacia la cuenca profunda (Pérez-Brunius *et al.*,2018).

Un aspecto interesante y aún no completamente comprendido es la separación de la corriente de frontera profunda del talud Campeche Escarpment. Parte del flujo de la corriente de frontera parece separarse de manera consistente en una ubicación fija cerca de los 92.8° Oeste, lo que resulta intrigante ya que ocurre aguas abajo de la brusca curva de la esquina noroeste del Banco de Campeche, que no representa un obstáculo para el flujo. Aunque las boyas que alcanzaron el talud de Campeche siguieron fluyendo hacia el este, alrededor del 30% de las boyas se separaron de la corriente de frontera y adoptaron una trayectoria ciclónica alrededor del Golfo. Se requiere más investigación para comprender completamente este fenómeno y su relación con la formación de eddies profundos y su impacto en la circulación en el Golfo (Oey and Lee, 2002; Pérez-Brunius *et al.*,2018).

DATOS Y MÉTODOS

Bases de datos de HC alifáticos y aromáticos

Los datos se obtuvieron de tres expediciones oceanográficas realizadas en la región de aguas profundas del GdM (Fig. 5) durante tres años consecutivos: XIXIMI-04 (del 27 de agosto al 16 de septiembre de 2015), XIXIMI-05 (del 10 al 25 de junio de 2016) y XIXIMI-06 (del 18 de agosto al 10 de septiembre de 2017), tuvieron como

objetivo caracterizar la región central del golfo tras el derrame de petróleo Deepwater Horizon. Durante estas expediciones se realizaron un total de 33, 34 y 42 estaciones respectivamente, y se recolectaron un total de 394, 427 y 512 muestras de agua (Tabla III). Para la recolección de muestras de agua de mar se utilizó una roseta equipada con un CTD (SBE 9plus de Sea-Bird Scientific), sensores de fluorescencia (Seapoint), un sensor de oxígeno de membrana (SBE43 de Sea-Bird Scientific) y botellas Niskin y/o Niskin-X de 20 litros de capacidad.

Las muestras de agua de mar para el análisis de la concentración de HA (n-alcanos, $\mu\text{g/L}$) y la concentración de HAPs ($\mu\text{g/L}$) se recolectaron en 12/13 muestras de 19 niveles diferentes (5,10, 20, 50, 100, máximo de fluorescencia, 250, 300, 400, mínimo de oxígeno disuelto, 600, 800 y 1000, 1200, 1500, 2000, 2500 m y fondo) dependiendo de la profundidad de la estación.

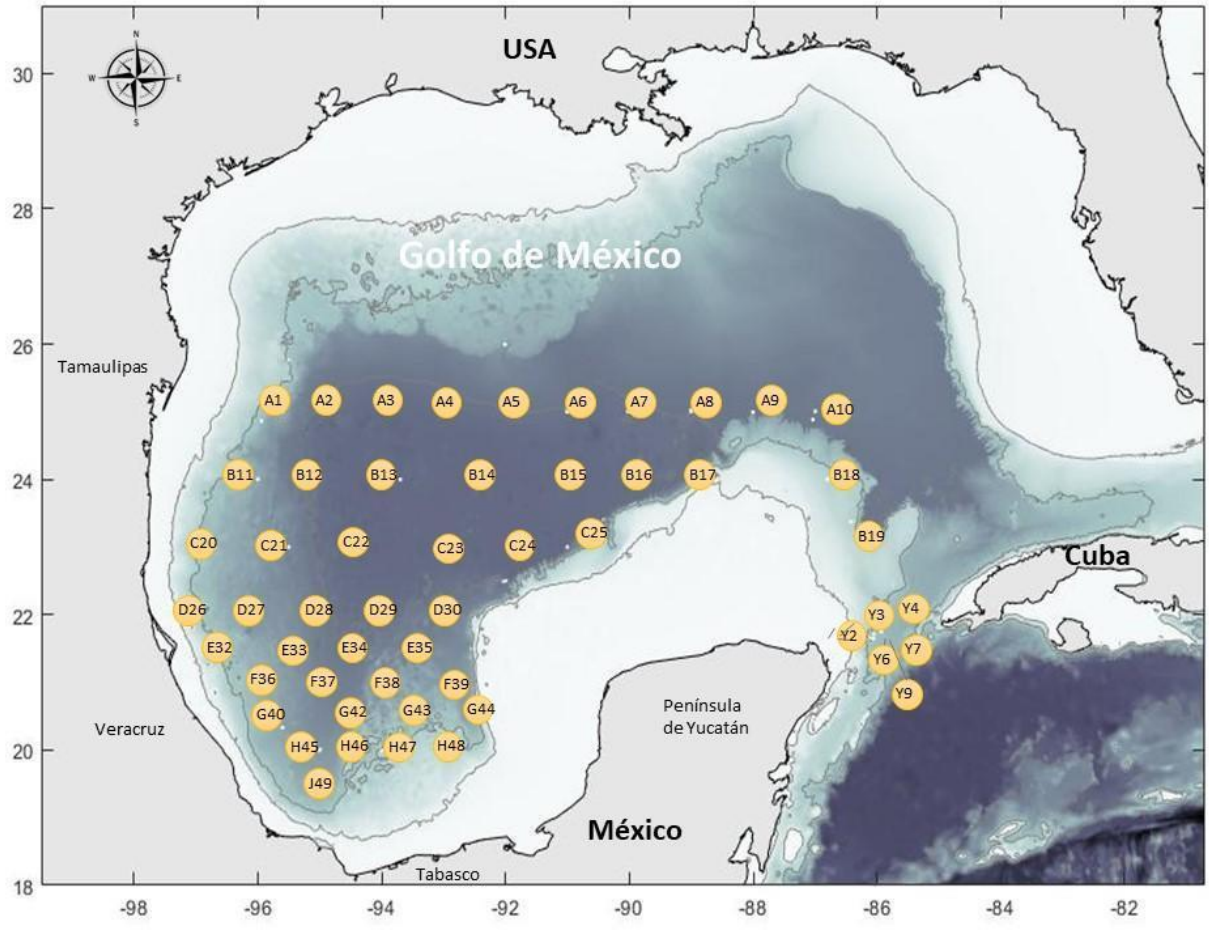


Fig. 5. Área de estudio en el GdM. Los círculos naranjas son las estaciones de muestreo para los cruceros oceanográficos XIXIMI-04, 05 y 06. La línea gris indica la isóbata de los 200 y 1000 m de profundidad, la primera separa la región costera de la oceánica, y la segunda limita en este estudio la región de aguas profundas del GdM.

Tabla III. Datos de muestre de las campañas oceanográficas

Campaña	Nro. Transecto	Transectos	Nro. estaciones	Nro. Muestras
XIXIMI-4	6	A, B, C, D, E, Y	33	394
XIXIMI-5	7	A, B, C, D, F G, H	34	427

XIXIMI-6	10	A, B, C, D, E, F	42	512
		G, H, J, Y		

En cada estación se obtuvieron datos continuos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, densidad ($\sigma\text{-t}$, kg m^{-3}), oxígeno disuelto ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) y fluorescencia de la clorofila a (Unidades relativas, UR) a través de los muestreos realizados con la roseta/CTD. Estos datos forman parte de la base de datos del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM; Herzka *et al.*, 2017).

Laboratorio: Extracción de Hidrocarburos en Agua de Mar

Limpieza del material:

Las muestras se recolectan en botellas ámbar de 2 L y se fijan con una solución de cloruro de mercurio antes de almacenarlas a 2°C . El material de laboratorio se somete a una limpieza rigurosa, incluyendo lavado, enjuague y descontaminación en mufla a $400^{\circ}\text{C}/4\text{h}$. El material de vidrio volumétrico y el resto de material, que no puede ser introducido a la mufla, se limpió mediante lavadas con solventes de limpieza (metanol, acetona y diclorometano, grado pesticida). Además, se limpian resinas, sales y arena, asegurando un entorno libre de contaminantes.

Protocolo de extracción y limpieza

Para obtener la fracción orgánica, se tomaron 1.8 L de la muestra de agua de mar y se extrajo mediante extracción líquido-líquido en un embudo separador de 2 L

utilizando diclorometano (3 x 60 mL) como solvente de extracción. Las muestras se colocaron en un agitador durante 5 minutos a una velocidad constante.

Para estimar las recuperaciones en las muestras, se utilizaron estándares surrogados para compuestos alifáticos (11-Chloroo- undecene y Eicoseno) y aromáticos (6 HC-aromáticos deuterados) (Kuppusamy *et al.*,2020). Las muestras se concentraron casi a sequedad (5 ml) en el Rocket Synergy Evaporator. La purificación del extracto se realizó por cromatografía líquida en un sistema Filter-Burdick & Jackson Vacuum Manifold. La columna se empaquetó con un tapón de fibra de vidrio, 0.5 g de arena, 2 g de sílica, 2 g alúmina, 0.5 g de arena y finalmente 0.5 g de sulfato de sodio anhidro. Una vez montada la columna se acondicionó con hexano. Para recuperar los n-alcanos y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), se realizó una elución de manera secuencial con 15 mL de hexano y 40 mL de una mezcla de hexano y diclorometano (70:30 v/v), respectivamente.

Ambas fracciones se concentraron utilizando un evaporador Rocket (1mL) y posteriormente se trasvasaron a un tubo de concentraron con enjuagues repetidos de hexano (grado pesticida) y con un flujo suave de gas nitrógeno se concentró a un volumen final de 0.2 mL. Finalmente, se trasvaso a un vial ambar y se le agregó 10 µl del estándar interno para hidrocarburos lineales (Chloro-octadecane 100 ug mL) y 10 µl aromáticos (p-therphenil 5 ug mL) para la cuantificación de los n-alcanos y HAPs (Martínez *et al.*, 2004). Se incluyeron blancos control y fortificados como parte del control de calidad durante el proceso de análisis de las muestras.

Para identificar y cuantificar las concentraciones HC se utilizó, para n-alcanos un sistema GC-FID (cromatógrafo de gases con detector de ionización de llama) y para HAPs un sistema CG-MS (Cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas).

Para identificar y cuantificar las concentraciones HC se utilizó, para n-alcanos un sistema GC-FID (cromatógrafo de gases con detector de ionización de llama) y para HAPs un sistema CG-MS (Cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas). Para la cuantificación se utilizó el método de estándar interno. La lista de compuestos analizados para los n-alcanos fue del n-C10 al n-C40, mientras que para los HAPs se consideraron: naftaleno, 1-metilnaftaleno, 2-metilnaftaleno, bifenilo, 2-dimetilnaftaleno, acenaftileno, acenafteno, 3-trimetilnaftaleno, fluoreno, dibenzotiofeno, fenantreno, antraceno, 1-metilfenantreno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, benzo(e)pireno, perileno, benzo(g,h,i)perileno, dibenzo(a,h)antraceno, indeno (1,2,3) pireno.

Circulación Oceánica y Velocidades Geostróficas en el Golfo de México mediante

Altimetría Satelital

Los datos de altimetría satelital utilizados en este estudio consisten en mapas de topografía dinámica absoluta (ADT), que describen la altura de la superficie marina en relación con el geoide, una superficie de geopotencial constante. Estos mapas ADT se derivan de la combinación de la topografía dinámica promedio (MDT) y la

anomalía de nivel del mar (SSH). Las anomalías temporales de SSH se obtienen al restar la climatología del nivel del mar desde 1993 hasta 2012 (Dufau *et al.*,2016).

Para construir un producto integral de nivel L4 DUACS/AVISO (AVISO), se integran datos de múltiples misiones altimétricas (estos datos son distribuidos por el Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS)). Este producto se caracteriza por su interpolación en tiempo y espacio, utilizando mapas de mallas regulares con una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y una resolución temporal de 1 día. Esta interpolación se realiza con una ventana temporal de 14 días para suavizar la información y obtener una representación más coherente de los datos.

La metodología adoptada involucra la utilización de los mapas de altimetría diarios de la región del Golfo de México. Estos datos se aplican para obtener series de tiempo de la topografía dinámica absoluta (ADT) en las posiciones correspondientes a los puntos de malla en la sección de aguas profundas del golfo. La interpolación de estos datos se lleva a cabo utilizando un esquema ponderado basado en el inverso de la distancia entre los puntos de malla, lo que nos permite generar perfiles horizontales de nivel del mar y estimar corrientes geostróficas.

En particular, se destaca la importancia del contorno de ADT igual a 0.52 m como un indicador importante de altas velocidades geostróficas, ya que su posición se correlaciona con los máximos gradientes. Esto facilita la identificación de regiones de mayor intensidad en la circulación oceánica.

Circulación del viento

Se analizan los datos diarios de viento en una región marina específica. Los datos incluyen las componentes de velocidad y la magnitud total del viento, y están georreferenciados mediante coordenadas de longitud y latitud, junto con las fechas de las mediciones.

La primera etapa del análisis consiste en calcular el promedio de la magnitud del viento a lo largo de las diferentes fechas disponibles. Esta información proporciona una visión general de las características promedio del viento en la región durante el período de estudio.

A continuación, se procede a calcular el promedio de las componentes de velocidad a lo largo de las fechas disponibles. Estas flechas representan la dirección y magnitud del viento en función de las coordenadas geográficas. Para facilitar la interpretación de las visualizaciones, se añaden etiquetas descriptivas en los ejes y se agrega una escala de colores para indicar las magnitudes de las flechas.

División de la Columna de Agua en Capas según Masas de Agua en el Golfo de México

Se propone una metodología para segmentar la columna de agua en capas según las distintas masas de agua presentes en el Golfo de México. El enfoque se basa en la temperatura como indicador principal y considera la posible influencia de los HC en esta distribución vertical.

En primer lugar, se recopilan datos de temperatura a lo largo de la columna de agua en la región del Golfo de México. Estos datos son esenciales para comprender las

características térmicas de las masas de agua en diferentes profundidades. Siempre que sea posible, se incluyen datos de concentración de HC para evaluar su impacto en la estructura térmica.

La metodología se basa en la definición de rangos de temperatura asociados con cada masa de agua específica. Estos rangos se establecen de la siguiente manera:

- Agua Superficial: Temperaturas por encima de 25°C.
- Agua Común del Golfo: Temperaturas entre 20°C y 25°C.
- Agua Central del Atlántico Norte: Temperaturas entre 8°C y 20°C.
- Agua Intermedia Antártica (AAIW): Temperaturas entre 6°C y 8°C.
- Agua Profunda del Atlántico Norte: Temperaturas por debajo de 6°C.

Utilizando estos rangos de temperatura como guía, se procede a dividir verticalmente la columna de agua en capas correspondientes a cada masa de agua. Cada capa se define en función de las mediciones de temperatura tomadas en diferentes ubicaciones y momentos a lo largo del período de estudio.

Interpolación objetiva

Se emplea la técnica de interpolación objetiva (IO) para estimar datos de HC en una región marina. Esta técnica se basa en condiciones estadísticas que garantizan una interpolación óptima al minimizar el error cuadrático medio (Bretherton *et al.*, 1976). La IO opera con anomalías, lo que significa que se parte de una estimación inicial que refleje con precisión las condiciones promedio de la variable de interés (Bretherton *et al.*, 1976).

Una parte fundamental es el desarrollo de un modelo de covarianza espacial. Esta función captura cómo la relación entre los puntos de muestreo varía según la distancia entre ellos. La covarianza se modela comúnmente utilizando una función gaussiana, que se ajusta al comportamiento espacial de los datos (Bretherton *et al.*, 1976).

La estimación de anomalías es un paso crucial en el proceso de IO. Estas anomalías se calculan con respecto al campo medio estimado previamente. La función de covarianza espacial se utiliza para ponderar la influencia de las anomalías en puntos vecinos a cada ubicación de muestreo, permitiendo capturar patrones de variación espacial. Por último, los pesos de ponderación se calculan en función de la función de covarianza y las distancias entre puntos. Estos pesos determinan la contribución relativa de las anomalías vecinas en la estimación del valor en una ubicación dada. Los pesos se aplican a las anomalías para generar una estimación mapeada de los datos de HC en toda la región de estudio.

Fuentes de HC

Índice Preferencial del Carbono (IPC):

El Carbon Preference Index (CPI) es una herramienta que se emplea para analizar la distribución de los n-alcanos en un contexto ambiental. Indica la posible predominancia de n-alcanos pares o impares, o la ausencia de predominancia. Un valor de CPI cercano a uno sugiere que no hay preferencia entre n-alcanos pares e impares, lo que generalmente se asocia con aportes petrogénicos y otras fuentes antropogénicas. En contraste, valores de CPI significativamente diferentes de 1 indican un origen biológico. Por ejemplo, valores de CPI más altos (> 3) indican una

contribución de n-alcenos de fuentes terrígenas (El Nemr *et al.*,2016; Leider *et al.*,2013). Para el cálculo de CPI se utiliza la siguiente formula:

$$CPI = \frac{\Sigma_{impar}(nC_{23} - nC_{31}) - \Sigma_{impar}(nC_{25} - nC_{33})}{\Sigma_{par}(nC_{24} - nC_{32})}$$

Índice Terrígeno/Acuático (TAR):

La Relación Terrígeno/Acuática (TAR) es una métrica utilizada para evaluar las contribuciones de alcanos en un entorno específico, centrándose en las preferencias en pares o nones cuando existen indicaciones claras en este sentido. Esta métrica se basa en la proporción de alcanos de cadena corta en comparación con los de cadena larga presentes en una muestra determinada.

El TAR se calcula dividiendo la concentración de alcanos de cadena larga entre la concentración de alcanos de cadena corta. (Bourbonniere y Meyers, 1996). Para calcular el TAR, se utiliza la siguiente fórmula:

$$TAR = \frac{C_{27} + C_{29} + C_{31}}{C_{15} + C_{17} + C_{19}}$$

El numerador representa las concentraciones de n-alcenos impares de cadena larga en la muestra que pueden ser de origen terrestre generalmente. Y el denominador representan las concentraciones de n-alcenos impares de cadena corta en la muestra que generalmente son de origen acuático (frecuentemente derivados del fitoplancton).

Valores distintivamente mayores a 1.3 indican una mayor influencia terrestre, mientras que valores verdaderamente menores a 0.7 sugieren una mayor contribución acuática. Los valores que se encuentran entre 1 ± 0.3 no presentan una dominancia de n-alcános.

Antraceno/(Antraceno+Fenantreno):

Este índice distingue entre fuentes petrogénicas y pirogénicas para Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) (Yunker et al. 2002). Un valor menor a 0.1 sugiere presencia de petróleo, mientras que un valor mayor indica una dominancia de la combustión. Aunque el límite de 0.10 generalmente es aplicable, se debe considerar que algunas fuentes como aceite diésel y crudos pueden presentar relaciones inusuales.

Índice Fluoranteno/(Fluoranteno+Pireno):

Este índice evalúa la contaminación por quema de biomasa, como madera y residuos vegetales (Yunker et al. 2002). Valores altos indican mayor contribución de quema de biomasa. Relaciones entre 0.40 y 0.50 son características de la combustión de combustibles fósiles líquidos, mientras que relaciones mayores a 0.50 sugieren combustión de materiales como pasto, madera o carbón.

Índice HMW/LMW:

El índice de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) de Masa Molecular Alta (HMW) y Masa Molecular Baja (LMW) permite discernir entre fuentes petrogénicas y pirogénicas. Una relación mayor que 1 indica fuente petrogénica, mientras que una menor que 1 sugiere fuente pirogénica. La relación entre concentraciones de HMW y LMW brinda información sobre la contribución de la quema de combustibles fósiles versus emisiones de vehículos y combustión incompleta (Yang *et al.*,2009).

RESULTADOS

Campaña oceanográfica XIXIMI-04 (agosto-septiembre de 2015)

Durante la campaña oceanográfica XIXIMI-04, del 27 de agosto al 16 de septiembre de 2015, se identificó un flujo anticiclónico proveniente de la CL en el área este de la cuenca. Este flujo se caracterizó por valores de altura del nivel del mar (ADT) superiores a 0.25 m y se extendió al norte del GdM, cerca del Delta del Misisipi, hasta aproximadamente 26°N.

La Fig.6 muestra la CL en su fase final extendida, donde desprende un gran remolino anticiclónico de núcleo cálido (denominado en inglés Loop Current eddy, LCE), previamente identificado meses antes de la campaña como "Olympus". También se aprecia al oeste del golfo a "Nautilus II", un LCE formado en mayo del 2015, y remolinos ciclónicos de núcleo frío, más pequeños, alrededor del sistema de la CL (denominados en inglés, Loop current frontal eddies, LCFEs).

En las animaciones del campo de corrientes geostróficas, graficado por la NOAA/AOML se visualiza que el remolino "Olympus" experimentó varios eventos de reconexión con la CL. Se desplazó hacia el norte hasta el Cañón de Misisipi, interactuó con el remolino "Poseidon" (LCE) y migraron hacia el oeste y suroeste hasta su disipación en el oeste del Golfo en junio de 2016.

Por otro lado, "Nautilus II" tuvo un comportamiento similar a Olympus, se reconectó en múltiples eventos a "Nautilus" (LCE) y se desplazó oeste-noroeste de la cuenca hasta disiparse en el Golfo occidental entre diciembre de 2015 y enero de 2016.

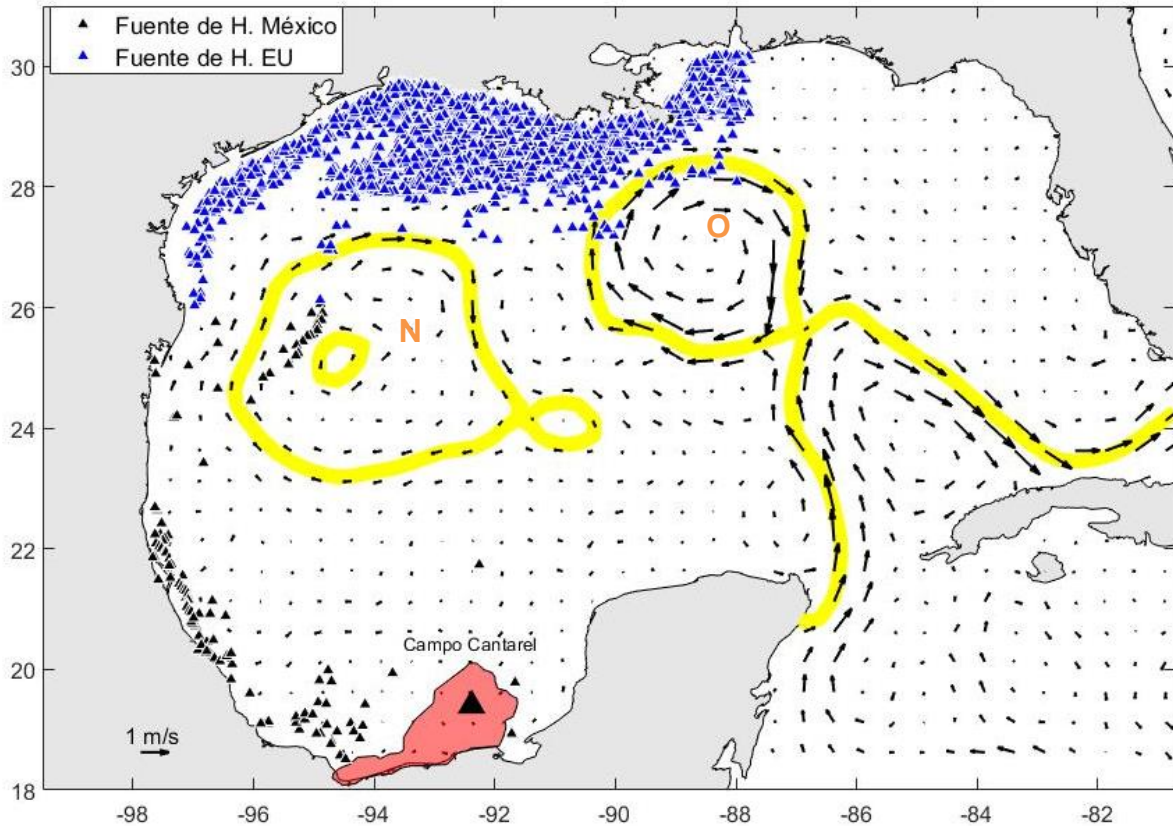


Fig. 6. Circulación del golfo de México durante la campaña XIXIMI-04 del 27 de agosto al 16 de septiembre de 2015. Modificado de Pulster *et al.*,2020. Las fechas negras indican las velocidades geostróficas (cm s) calculadas con altimetría y la isolínea amarilla resalta el ADT = 0.25m. Las fuentes de HC están señaladas con triángulos azules para USA y negros para México.

En la Fig. 6 se pueden apreciar los LCFEs ciclónicos (flechas en sentido contrario a las manecillas del reloj) y anticiclónicos (flechas en sentido a las manecillas del reloj). Los LCEs se señalan en naranja y se identifican con las letras "N" (Nautilus - Nautilus II) y "O" (Olympus), siguiendo la denominación propuesta por el Horizon Marine Group. También se incluye un polígono rosa que representa el complejo Cantarell, zona de fuente de hidrocarburos.

Por último, en la bahía de Campeche, sur del GdM, no se pudo detectar claramente la presencia del remolino ciclónico semi-permanente que suele ser predominante

en el patrón de circulación de esta región, según lo señalado por Pérez-Brunius et al. en 2013. No obstante, en el mapa de la altimetría GTS interfase del 02/sep/2015 que muestra el campo de corrientes geostróficas en el GdM, elaborado por la NOAA, se puede observar esta estructura ciclónica con velocidades inferiores a los 25 cm/s.

La Fig. 6 se utilizará como mapa base en las siguientes representaciones gráficas, donde se analizará la influencia de la dinámica superficial en la distribución de HC en cada capa de agua.

Relaciones de los HC alifáticos y aromáticos con la circulación atmosférica en la zona de aguas profundas del GdM

La Fig. 7 muestra dos mapas que representan la distribución espacial de la concentración promedio de HC totales (alifáticos Fig. 7a y HAPs Fig. 7b) en la región de estudio, calculadas en el estrato de 0 a 10 metros. Cada mapa se genera utilizando información del patrón de circulación del viento para los días de muestreo. Se eligieron días al azar para representar el patrón de viento en el área de estudio, lo que permite visualizar la variación en la concentración de HC y cómo el patrón de viento diario puede influir en su distribución.

Las escalas de colores en la Fig. 7a va de 0 a 6 $\mu\text{g/L}$ alifáticos totales. A grandes rasgos, se puede observar en la figura 7a que alrededor del 60% de las estaciones registran valores de concentración de HC alifáticos entre 1.4 y 2.5 $\mu\text{g/L}$, destacando especialmente la estación Y3 del transecto Y con un valor de 6 $\mu\text{g/L}$. Por otro lado,

las estaciones cercanas a la costa noroeste del transecto A y B presentaron los valores promedios más bajos de HC, por debajo de 1 $\mu\text{g/L}$.

Las escalas de colores en la Fig. 7b va de 0 a 0.16 $\mu\text{g/L}$ de HAPs totales. Se muestra que alrededor del 48% de las estaciones registran valores de concentración entre 0.04 y 0.07 $\mu\text{g/L}$. El 16% de las estaciones registraron valores mayores a 0.08 $\mu\text{g/L}$, destacando en particular las estaciones A5 con 0.16 $\mu\text{g/L}$ y D26 con 0.15 $\mu\text{g/L}$. Por otro lado, el 29% restante de las estaciones exhiben concentraciones bajas de HC aromáticos, inferiores a 0.03 $\mu\text{g/L}$.

En cuanto al patrón de circulación del viento, se muestra un comportamiento típico de la estación de verano, caracterizado por una combinación de vientos del sureste y del este. Se observa un mayor énfasis en los vientos del sureste debido a los "Sures" y ráfagas restantes de una tormenta tropical que afectó la región noratlántica y llegó con menor fuerza al noroeste del GdM

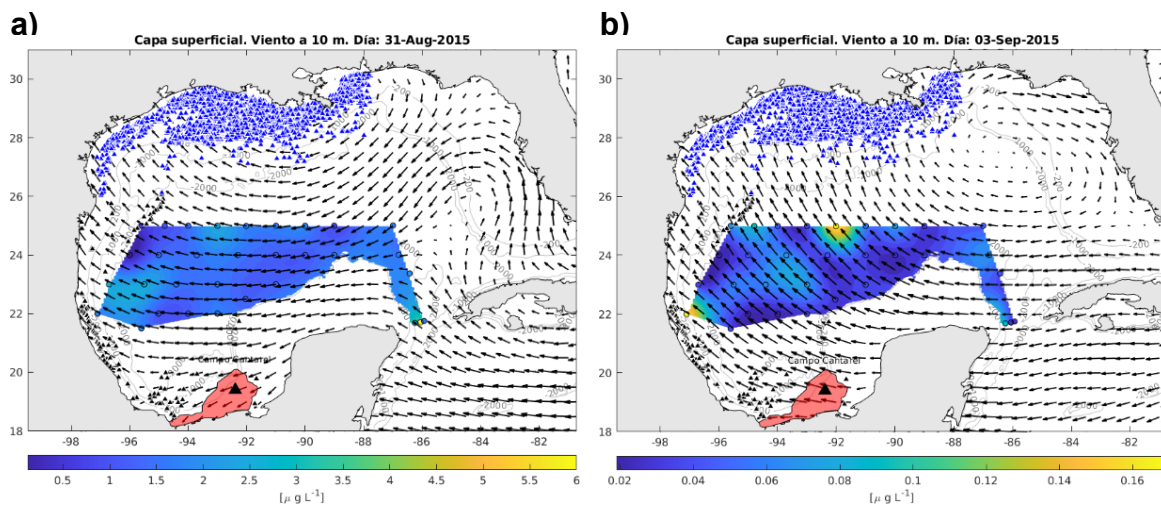


Fig. 7. Distribución espacial de la concentración promedio de los HC con el patrón de circulación de viento diario. (a) alifáticos totales con patrón de viento para el 31 de agosto, (c) aromáticos totales con patrón de viento para el 3 de septiembre. Los datos corresponden a la campaña XIXIMI-04 y se calcularon para el estrato de 0 a 10 m de la región de aguas profundas del GdM.

Relaciones de los HC alifáticos con la circulación oceánica en la zona de aguas profundas del GdM.

La Fig. 8 muestra la distribución espacial de la concentración promedio de HC alifáticos totales en la capa superficial de la región de estudio. La escala de colores en el mapa va de 0 a 6 $\mu\text{g/L}$ para los alifáticos totales.

El estudio revela que, de las 30 estaciones muestreadas, el 61% presentan valores entre 1.4 y 2.5 $\mu\text{g/L}$. Sin embargo, en las estaciones costeras del transecto C y D, se observa una mancha con valores cercanos a 3 $\mu\text{g/L}$, indicando una posible entrada de HC, desde el sur y norte del golfo, siguiendo los contornos de los remolinos. Destacan las estaciones Y3 y Y2, que muestran los valores más altos, 6 $\mu\text{g/L}$ y 2.48 $\mu\text{g/L}$ respectivamente, sugiriendo una posible entrada desde la corriente de Yucatán.

En contraste, las estaciones costeras del transecto A y B presentan los valores más bajos, con concentraciones menores a 1 $\mu\text{g/L}$.

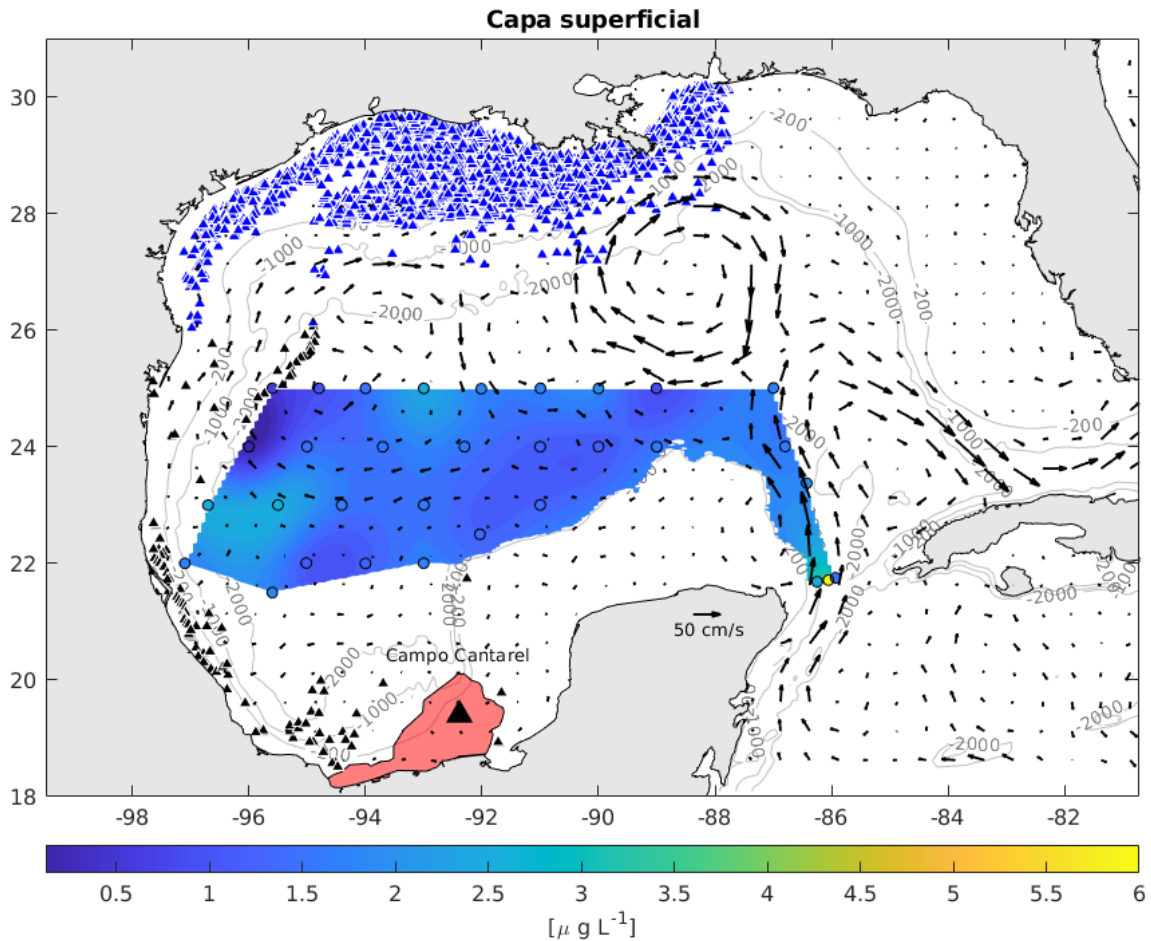


Fig. 8. Distribución espacial superficial de la concentración promedio de HC alifáticos durante la campaña XIXIMI-04.

En la Fig. 9a se presenta la concentración promedio de HC alifáticos en 31 estaciones en la capa GCW, con una escala de colores de 0 a 8 $\mu\text{g L}$. Se observó que el 55% de las estaciones registraron valores de concentración entre 1 y 2 $\mu\text{g L}$, mientras que un 16% mostraron valores entre 2 y 3 $\mu\text{g L}$ cerca de la plataforma de Yucatán. Las estaciones costeras del transecto A y B presentaron concentraciones más bajas, menores a 1 $\mu\text{g L}$. La estación C21 registró el valor más alto de 7.6 $\mu\text{g L}$. En la Fig. 9b y 9c, la distribución de HC se es similar. Con escalas de colores de 0 a 4 $\mu\text{g L}$. Los resultados mostraron que entre el 60 - 76% de las estaciones

registraron valores entre 1 y 2 $\mu\text{g/L}$, indicando una presencia moderada de HC en la mayoría de las áreas muestreadas. Aproximadamente, el 20% de las estaciones presentaron concentraciones mayores a 2 $\mu\text{g/L}$ cerca de la plataforma de Yucatán y los bordes del remolino Nautilos II. Las estaciones B17 y Y2 con los valores más altos entre 3.2-3.9 $\mu\text{g/L}$ y 2.5-3.0 $\mu\text{g/L}$, respectivamente. Por otro lado, el 125% restante de las estaciones exhibió los valores más bajos, con concentraciones menores a 1 $\mu\text{g/L}$.

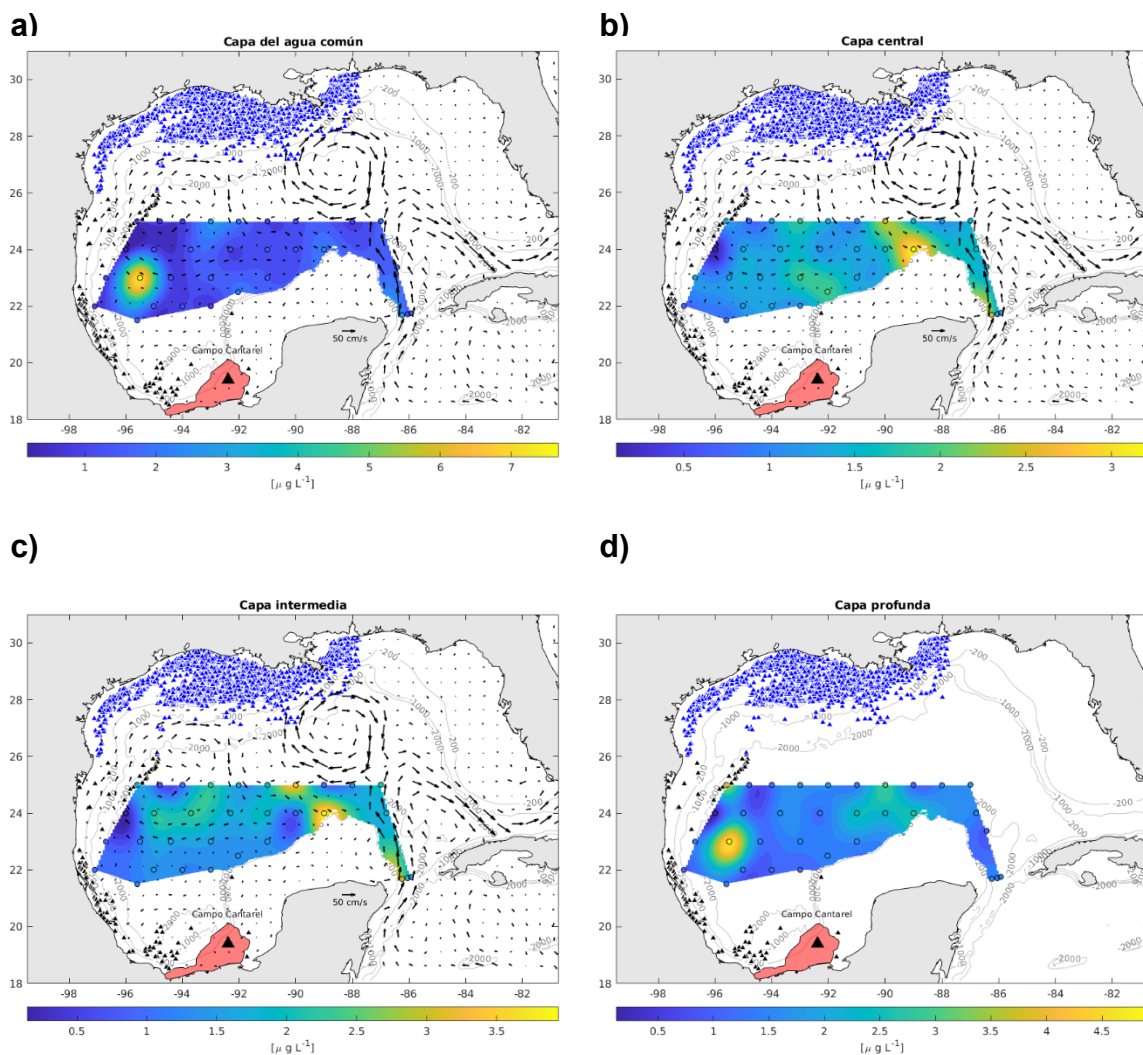


Fig. 9. Distribución espacial de la concentración promedio de HC alifático en la columna de agua durante la campaña XIXIMI-04. Alifáticos totales en (a) GCW, (b) TACW, (c) AAIW, (d) NADW (versión sin circulación oceánica).

La Fig. 9d muestra la distribución de HC alifáticos totales en la región de estudio, sin la información de los vectores de corrientes geostróficas. La escala de colores en la Fig.9d varía de 0 a 5 $\mu\text{g/L}$ y se presentan datos de 33 estaciones de muestreo. El análisis revela que el 79% de las estaciones registraron valores de HC alifáticos entre 1 y 2 $\mu\text{g/L}$. Asimismo, un 15% de las estaciones presentaron concentraciones superiores a 2 $\mu\text{g/L}$. Se destaca una mancha al final del transecto B, cercana la plataforma de Yucatán. Por otro lado, se observa, al igual que en las capas anteriores, que la estación B11 tuvo el valor más bajo de concentración, con 0.1 $\mu\text{g/L}$. En contraste, las estaciones con los valores más altos de HC alifáticos fueron C21 con 4.9 $\mu\text{g/L}$, A1 con 4 $\mu\text{g/L}$ y A7 con 3.6 $\mu\text{g/L}$.

Identificación de posibles fuentes de HC alifáticos en la zona de aguas profundas del GdM

La Fig.10 presenta un índice diagnóstico, índice de carbono preferencial (CPI), de HC alifáticos en la zona de aguas profundas del GdM. En el estudio los valores del índice variaron de 0.32 a 4.35, con una predominancia de contribuciones petrogénicas. El 77% de las estaciones correspondiente a los A, B, C, D, E y Y mostraron valores del CPI alrededor de 1, limitado por un rango 1 ± 0.3 , lo cual es típico de hidrocarburos petrogénicos (Mille *et al.*,2007). Esta predominancia se mantiene a lo largo de la columna de agua.

Por otra parte, el 18% de las estaciones de los transectos A, B, C, D, E y Y mostraron valores de CPI que se encuentra por encima del límite superior de 1, lo cual sugiere un posible origen biogénico (El Nemr *et al.*,2016). En el caso de las estaciones con valores cercanos a 2, donde predomina la presencia de n-alcenos de números impares más bajos, n-C15, n-C17 y n-C19, especialmente n-C17; se relaciona comúnmente con un origen biogénico como el fitoplancton (El Nemr *et al.*,2016; Hernández-Guzmán *et al.*,2021). En contraste, los valores más bajos de CPI (alrededor de 0.5) encontrados en los transectos A y B generalmente están asociados a n-alcenos derivados de un origen mixto (Elfadly *et al.*,2017).

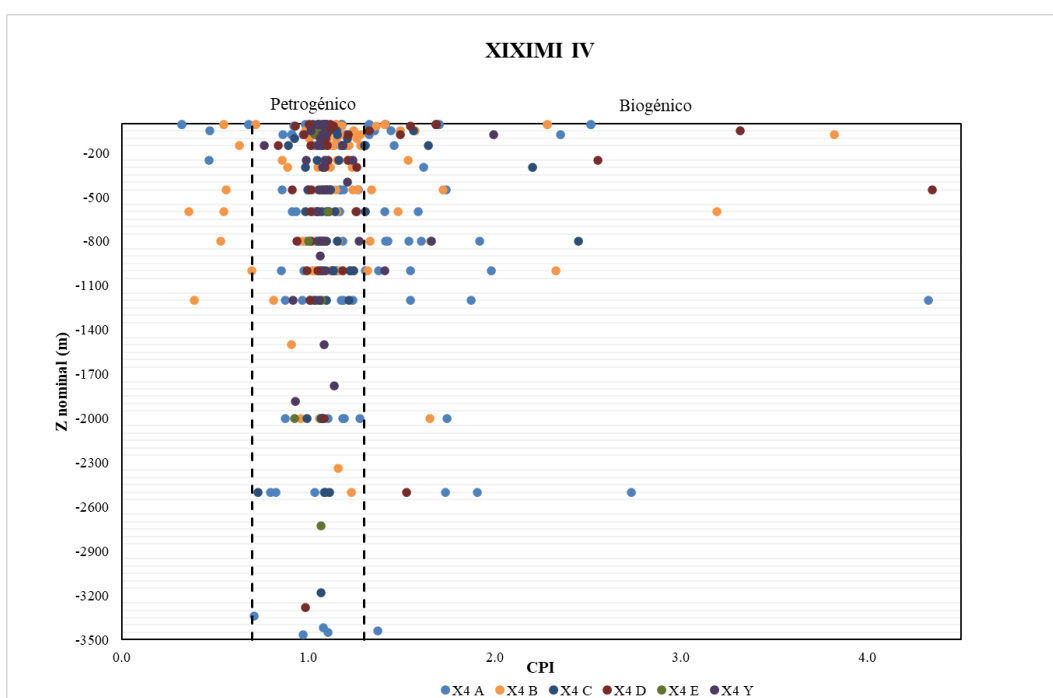


Fig. 10. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs la profundidad nominal el GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-04.

Para las muestras que arrojaron indicios de origen biogénico se les calculo el índice terrígeno acuático (TAR) y se graficaron contra el CPI, con el fin de identificar las

estaciones con una influencia terrígena o marina. Al igual que en el CPI se delimito un rango alrededor de 1 TAR para definir las muestras con un posible origen petrogénico. Los valores de TAR variaron de 0.12 a 2.84. Las estaciones A1, A2, A7, B17 y D26 presentan profundidades con valores de TAR inferiores a 0.7 (variando de 0.12 a 0.68), lo que sugiere predominantemente la presencia de n-alcenos de fuentes acuáticas. La estación B15 superficial presentó valores de TAR superiores 1.3 indicando una mayor contribución de plantas terrestres superiores (Gong *et al.*,2020)

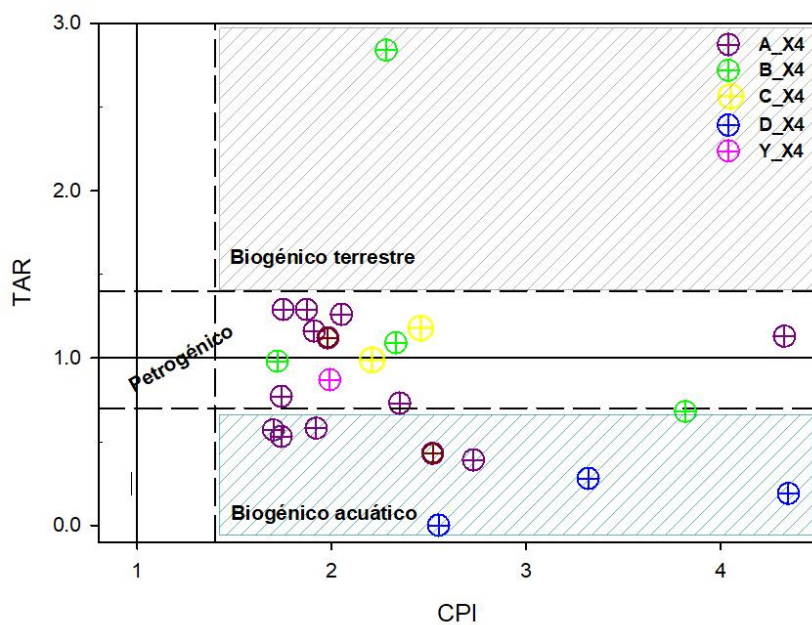


Fig. 11. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs. TAR (material terrígeno-acuático) en la zona de aguas profundas del GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-04.

Relaciones de los HC aromáticos con la circulación oceánica en la zona de aguas profundas del GdM

La Fig. 12 muestra la distribución espacial de la concentración promedio de HAPs's totales en la capa superficial de la región de estudio. Al analizar los datos, se observa que el 47% de las estaciones de muestreo presentan concentraciones de HC aromáticos que oscilan entre 0.04 y 0.07 $\mu\text{g/L}$. Además, un 23% de las estaciones registraron valores mayores a 0.08 $\mu\text{g/L}$, indicando una distribución similar a los alifáticos, con posibles entradas desde el norte, destacando en particular las estaciones A5 con 0.17 $\mu\text{g/L}$ y D26 con 0.13 $\mu\text{g/L}$.

Por otro lado, el 30% restante de las estaciones exhiben concentraciones bajas de HC aromáticos, inferiores a 0.03 $\mu\text{g/L}$.

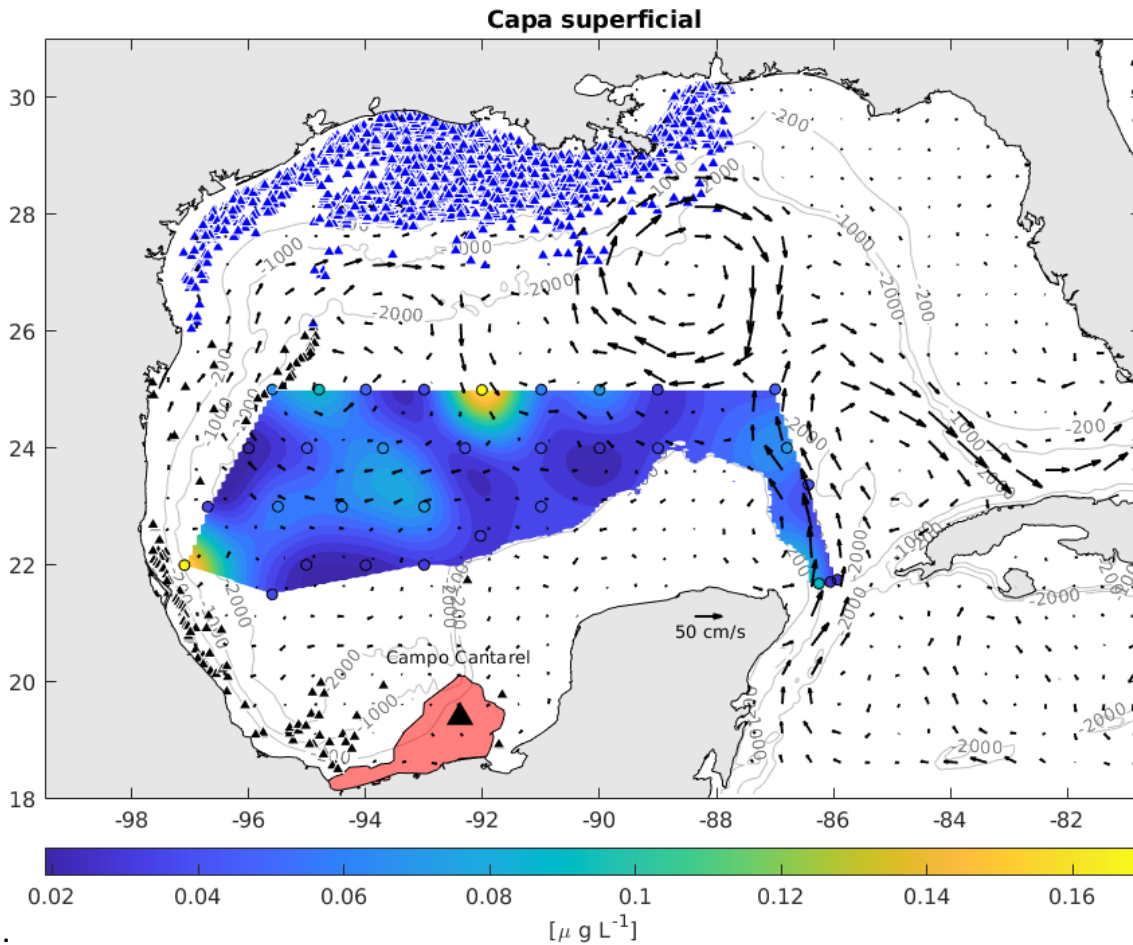


Fig. 12. Distribución espacial superficial de la concentración promedio de HC aromático durante la campaña XIXIMI-04.

En la Fig. 13a, que representa la capa AAIW, la barra de colores indica concentraciones que van de 0 a 0.3 $\mu\text{g L}^{-1}$. Los datos muestran que el 50% de las estaciones presenta concentraciones entre 0.04 y 0.07 $\mu\text{g L}^{-1}$, mientras que el 33% tiene valores menores a 0.03 $\mu\text{g L}^{-1}$. El 17% de las estaciones muestra concentraciones por encima de 0.08 $\mu\text{g L}^{-1}$, destacando la estación B17 con 0.29 $\mu\text{g L}^{-1}$, cerca de la plataforma de Yucatán, y D26 con 0.26 $\mu\text{g L}^{-1}$, estación costera. Este patrón se presenta en las capas GCW y TACW.

Por último, en la Fig. 13b que representa la capa NADW, la barra de colores indica concentraciones que van de 0 a 0.17 $\mu\text{g/L}$. Se observa que el 65% de las estaciones presenta concentraciones entre 0.04 y 0.07 $\mu\text{g/L}$, mientras que el 19% tiene valores menores a 0.03 $\mu\text{g/L}$. El 16% de las estaciones muestra concentraciones por encima de 0.08 $\mu\text{g/L}$, resaltando la estación B15 con 0.16 $\mu\text{g/L}$ y Y2 con 0.15 $\mu\text{g/L}$, la última en el canal de Yucatán

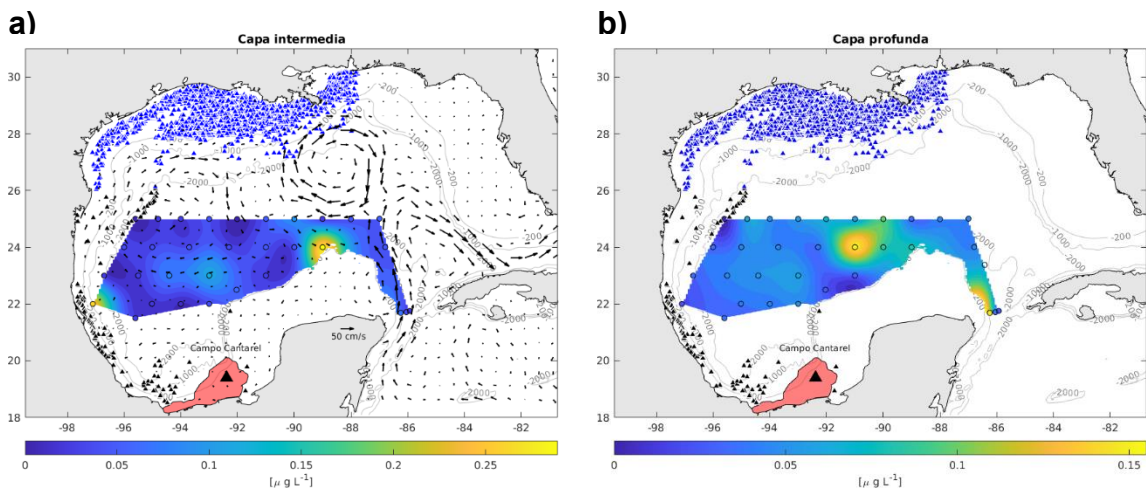


Fig. 13. Distribución espacial de la concentración promedio de HC HAPs en la columna de agua durante la campaña XIXIMI-04. HAPs totales en (a) AAIW y (b) NADW (sin datos de circulación oceánica).

Campaña oceanográfica XIXIMI-05 (10-25 de junio de 2016)

Durante la campaña oceanográfica XIXIMI-05 de junio de 2016, se presentó la CL en su fase contraída, localizada entre los 22 y 24°N, "Olympus", previamente descrito en la campaña XIXIMI-04, que se encontraba disipándose al oeste del golfo, cerca de los 23°N y 96°W; y un LCE desprendido recientemente, nombrado "Poseidón" y ubicado alrededor de los 25°N y 88°W.

De acuerdo con la información proporcionada por Horizon Marine Group, "Poseidón" estuvo activo desde abril de 2016 hasta abril de 2017. A lo largo de su existencia, experimentó múltiples separaciones y reconexiones con la CL. En abril de 2016, "Poseidón" se desprendió nuevamente y migró hacia el oeste y el suroeste en los meses siguientes, afectando temporalmente las operaciones en ciertas áreas del Golfo de México. Finalmente, el remolino se disipó en abril de 2017 en el Golfo de México occidental.

En la Fig. 14, se identificaron diversos LCFEs con circulación ciclónica, uno de los hallazgos destacados fue la presencia de un remolino contiguo a "Poseidón", ubicado en la entrada del golfo, lo que sugiere una posible interacción entre ambos sistemas. Y estructuras ciclónicas adicionales en la Bahía de Campeche, con velocidades más bajas, lo que sugiere que podrían estar relacionadas con el remolino semi-permanente presente en esa área.

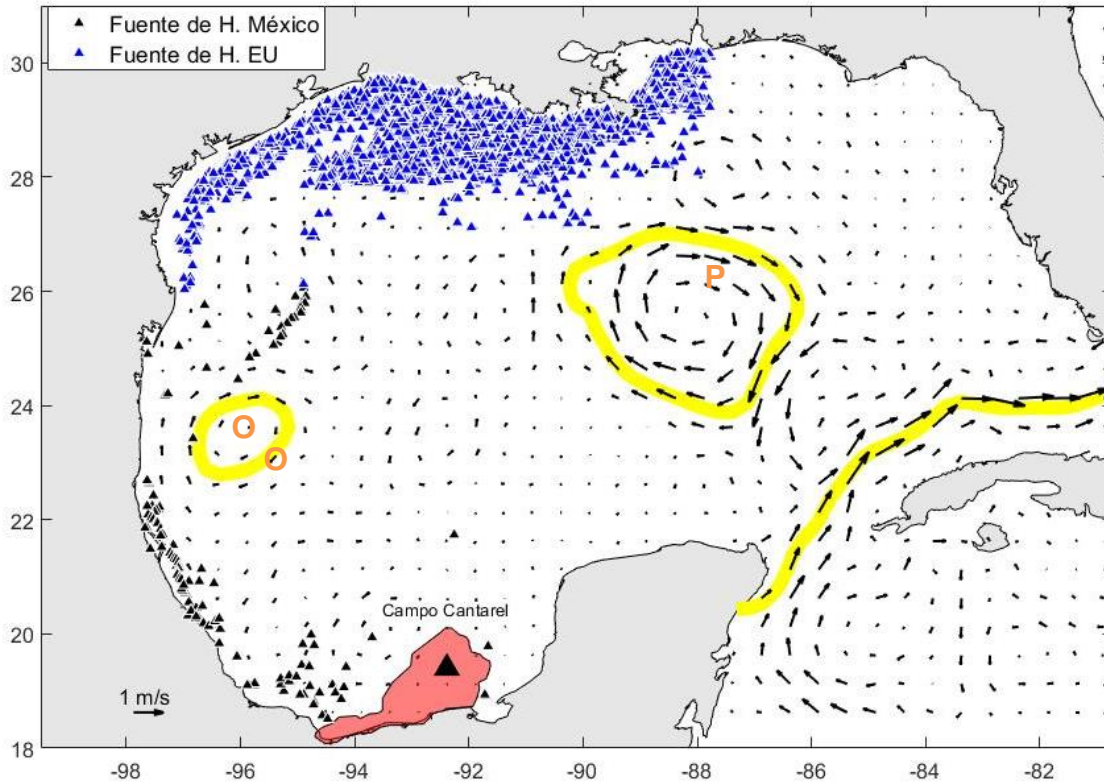


Fig. 14. Circulación del GdM durante la campaña XIXIMI-05 del 10 de junio al 25 de junio de 2016. Modificado de Pulster *et al.*,2020. Las flechas negras indican las velocidades geostróficas (cm s) calculadas con altimetría y la isolinia amarilla resalta el ADT = 0.25m. Las fuentes de HC están señaladas con triángulos azules para USA y negros para México.

En la Fig. 14 se pueden apreciar los LCFEs alrededor de los LCEs que se señalan en naranja y se identifican con las letras "P" (Poseidón) y "O" (Olympus), siguiendo la denominación propuesta por el Horizon Marine Group.

Por último, en la bahía de Campeche, se pueden apreciar estructuras ciclónicas, donde las velocidades del flujo son más reducidas. En el mapa de altimetría elaborado por la NOAA, se puede observar el giro semi- permanente con velocidades inferiores a los 25 cm/s al sur de la oeste de la bahía campeche.

Relaciones de los HC alifáticos y aromáticos con la circulación atmosférica en la zona de aguas profundas del golfo de México

En el mes de junio de 2016, se registraron eventos meteorológicos significativos en el Golfo de México. La presencia de la onda tropical número 5, que se formó en el Caribe y se extendió sobre Tabasco y Chiapas, junto con una zona de inestabilidad con potencial ciclónico, generó sistemas de baja presión que provocaron fuertes tormentas con nubosidad y lluvias intensas.

El 19 de junio (Fig. 15b), la tormenta tropical Danielle se localizó sobre la costa norte de Veracruz, formándose a partir de la depresión tropical número 4 del océano Atlántico. Esta depresión tropical se ubicó a 170 km al este-noreste del puerto de Veracruz, con desplazamiento hacia el oeste a 13 km/h, vientos máximos sostenidos de 55 km/h y rachas de 75 km/h. Posteriormente, el sistema se intensificó y el día 20 de junio se desarrolló a tormenta tropical cerca de la costa norte de Veracruz, con vientos máximos sostenidos de 65 km/h y rachas de 85 km/h. Finalmente se disipó el 21 al este-sureste de Veracruz.

La Fig. 15 muestra dos mapas que representan la disposición espacial de la concentración promedio de HC totales (alifáticos Fig. 15a y HAPs Fig. 15b), en el área de análisis, calculadas en el estrato de 0 a 10 metros. Se mantiene los mismos criterios que en la Fig. 7

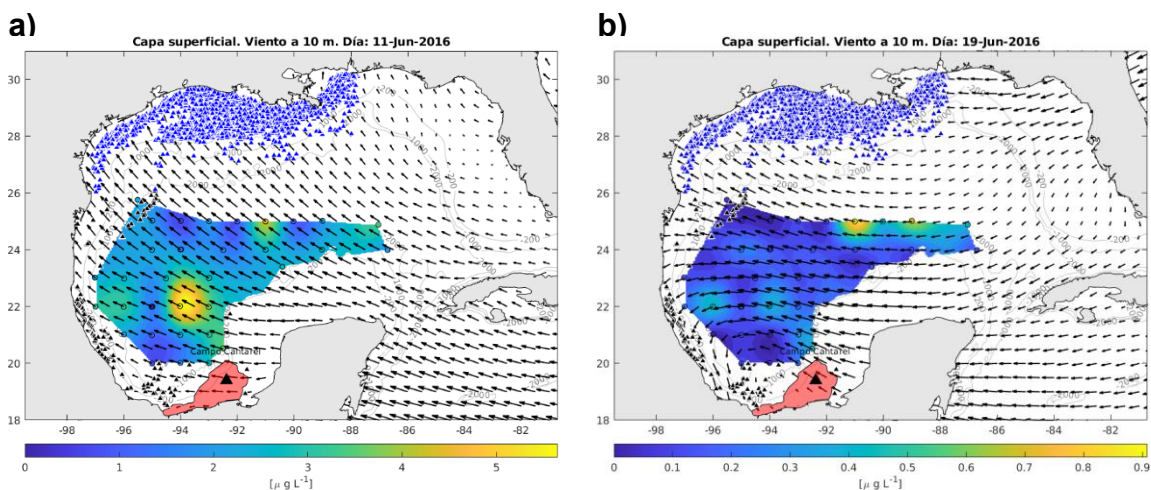


Fig. 15. Distribución espacial de la concentración promedio de los HC con el patrón de circulación de viento diario. (a) alifáticos totales con patrón de viento para el 11 de junio, (b) aromáticos totales con patrón de viento para el 19 de junio. Los datos corresponden a la campaña XIXIMI-05 y se calcularon para el estrato de 0 a 10 m de la región de aguas profundas del GdM.

Las escalas de colores en la Fig. 15a va de 0 a 5.8 $\mu\text{g/L}$ para los alifáticos totales. Se puede apreciar que alrededor del 35% de las estaciones muestran concentraciones de HC alifáticos entre 1 y 2 $\mu\text{g/L}$. Un 35% adicional presenta valores superiores a 2 $\mu\text{g/L}$, cabe destacar que las estaciones con valores por encima de 3 $\mu\text{g/L}$ se distribuyen, aparentemente, siguiendo los patrones de circulación del viento, desde la plataforma de Yucatán y la bahía Campeche hacia las zonas costeras de Veracruz y Tamaulipas. La estación D29 presentó el valor más alto de HC con un 5.6 $\mu\text{g/L}$. Por otro lado, el resto de las estaciones exhiben concentraciones por debajo de 1 $\mu\text{g/L}$.

Las escalas de colores en la Fig. 15b va de 0 a 0.9 $\mu\text{g/L}$ para los aromáticos. Aproximadamente el 35% de las estaciones presentan valores de concentración de HAPs en el intervalo de 0.1 a 0.4 $\mu\text{g/L}$. El 7% de las estaciones registró valores superiores a 0.4 $\mu\text{g/L}$, destacándose las estaciones A6 con 0.9 $\mu\text{g/L}$ y A8 con 0.8

$\mu\text{g/L}$. Por otro lado, el 58% restante de las estaciones muestran concentraciones bajas de HC aromáticos, inferiores a $0.1 \mu\text{g/L}$.

Relaciones de los HC alifáticos con la circulación oceánica en la zona de aguas profundas del golfo de México

En el mapa de la Fig. 16, la barra de colores abarca desde 0 hasta $5.8 \mu\text{g/L}$ para los HC alifáticos. De las estaciones muestreadas, el 65% presenta valores en el rango de 1 a $3 \mu\text{g/L}$. Un 27% de las estaciones exhibe valores superiores a $3 \mu\text{g/L}$, siendo notables D29 con $5.7 \mu\text{g/L}$ y A6 con $4.4 \mu\text{g/L}$. Se puede apreciar que las concentraciones más altas se encuentran en la Bahía Campeche, lo que sugiere una posible entrada de HC desde el sur del golfo. Y un transporte hacia el noroeste del golfo influenciado por eventos meteorológicos ocurridos en la zona de estudio.

Cabe destacar que la distribución presentada en la capa superficial se repite en la siguiente capa de agua GCW. Por otro lado, un reducido 1% de las estaciones presenta los valores más bajos, con concentraciones menores a $1 \mu\text{g/L}$, marcando un contraste significativo con las áreas de mayor concentración.

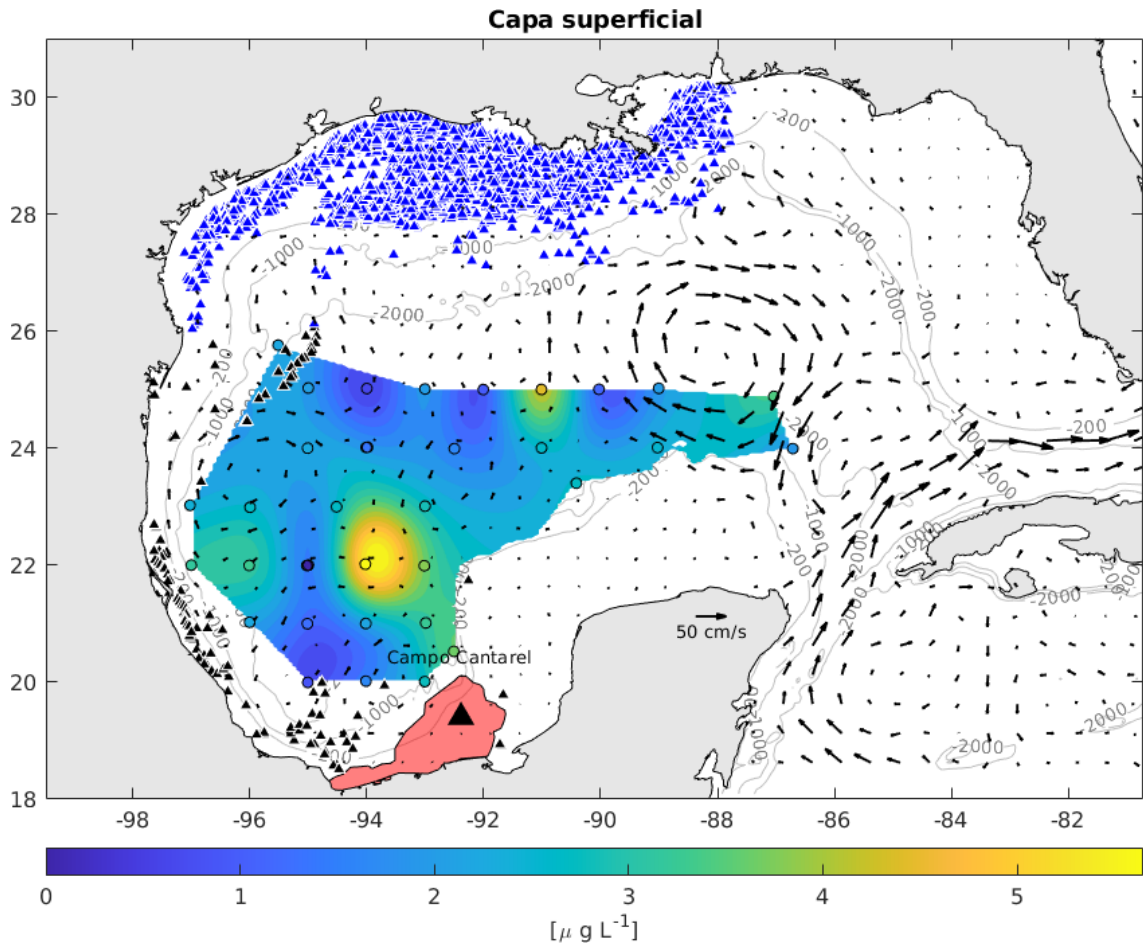


Fig. 16. Distribución espacial superficial de la concentración promedio de HC alifáticos durante la campaña XIXIMI-05.

En la Fig. 17a, se representa la concentración promedio de HC alifáticos en la capa TAWC. La barra de colores abarca desde 0 hasta $6.5 \mu\text{g L}^{-1}$, se observa que el 71% de las estaciones presentaron valores que oscilan entre 1 y $3 \mu\text{g L}^{-1}$. El 21% reflejaron concentraciones superiores a $3 \mu\text{g L}^{-1}$, especialmente cerca de la plataforma interna de Yucatán y en las cercanías del campo Cantarell.

Dentro de esta variabilidad, es importante mencionar que la estación D29 destacó con el nivel más elevado, alcanzando $6.5 \mu\text{g L}^{-1}$, seguida de la estación H48 con $5.5 \mu\text{g L}^{-1}$, ambas ubicadas en la región de la Bahía de Campeche. En contraste, un

porcentaje menor de estaciones presentó concentraciones más bajas, inferiores a $1 \mu\text{g/L}$. Se observa que en la capa AAIW la distribución fue similar registrando sus máximos en D29 y H48, mostrando una posible entrada de HC desde la bahía de Campeche hacia las costas de Veracruz, siguiendo un patrón ciclónico.

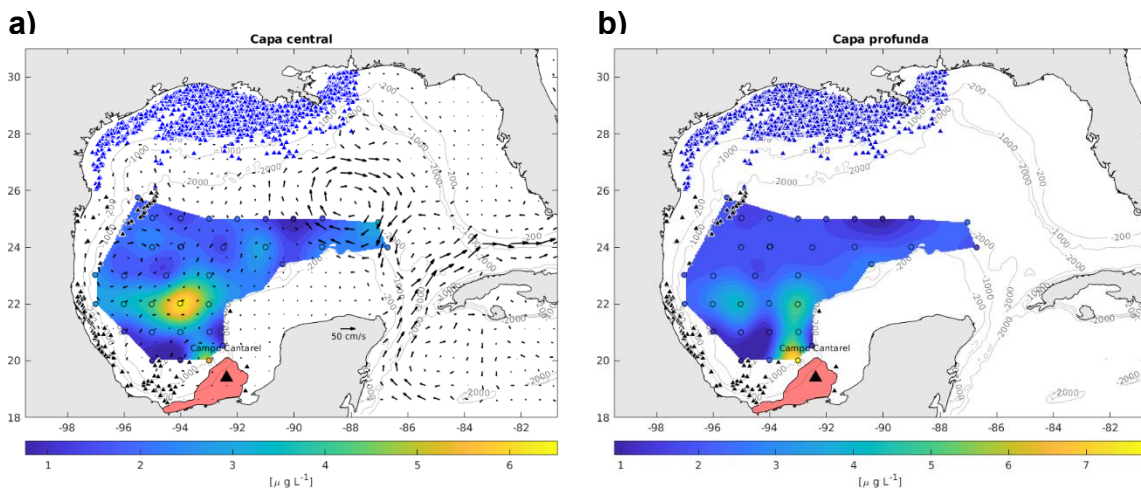


Fig. 17. Distribución espacial de la concentración promedio de HC alifático en la columna de agua durante la campaña XIXIMI-05. Alifáticos totales en (a) TACW, (b) NADW (versión sin patrón de circulación).

El 79% de las estaciones graficadas en la Fig. 17b presentaron concentraciones de HC alifáticos en el rango de 1 a $3 \mu\text{g/L}$, lo cual sugiere una presencia alta de HC en comparación con las anteriores capas de agua. Además, se observa que el 14% de los sitios mostraron concentraciones superiores a $3 \mu\text{g/L}$. Cabe aclarar que los valores que excedieron los $5 \mu\text{g/L}$ se encuentran cercano al campo Cantarell y al igual que en las capas superiores sigue una circulación ciclónica

En cuanto a las estaciones con los niveles más altos de HC alifáticos, se destacan H48 con una concentración de 7.8 µg/L y D30 con 5.2 µg/L. Un porcentaje reducido de estaciones registró valores por debajo de 1 µg/L.

Identificación de posibles fuentes de HC alifáticos en la zona de aguas profundas del golfo de México

La Fig.18 presenta un índice diagnóstico, índice de carbono preferencial (CPI), de HC alifáticos en la zona de aguas profundas del GdM. En el estudio los valores del índice variaron de 0.37 a 4.38, con una predominancia de contribuciones petrogénicas. El 47% de las estaciones correspondiente a los A, B, C, D, F, G y H mostraron valores del CPI alrededor de 1, limitado por un rango 1 ± 0.3 , lo cual es típico de hidrocarburos petrogénicos (Mille *et al.*,2007). En contraste con XIXIMI-04, aumentó el número de estaciones que presentan una mezcla fuentes en la columna de agua, en especial en zonas profundas.

Por otra parte, aproximadamente el 30% de las estaciones de los transectos A, B, C, D, F, G y H mostraron valores de CPI que se encuentra por encima del límite superior de 1, lo cual sugiere un posible origen biogénico (El Nemr *et al.*,2016). En el caso de las estaciones con valores cercanos a 2, donde predomina la presencia de n-alcános de números impares más bajos, n-C15, n-C17 y n-C19, especialmente n-C17; se relaciona comúnmente con un origen biogénico como el fitoplancton (El Nemr *et al.*,2016; Hernández-Guzmán *et al.*,2021).

XIXIMI V

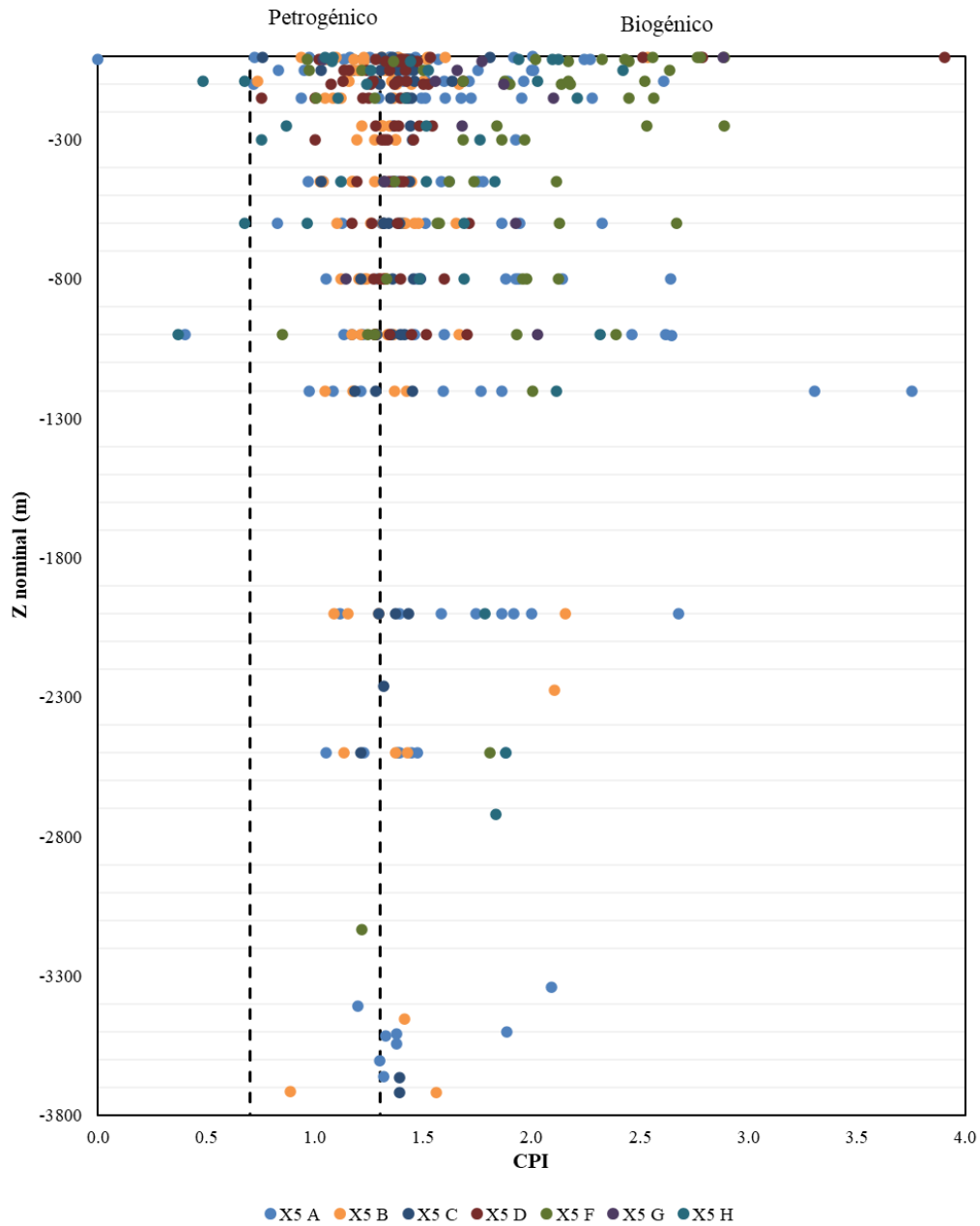


Fig. 18. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs la profundidad nominal el GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-05.

La Fig. 19 muestra la relación de los índices TAR y CPI para muestras con indicios de orígenes biogénicos. Los valores de TAR variaron de 0.12 a 6.52. Las estaciones

A5, A7 y A8 presentan profundidades con valores de TAR inferiores a 0.7 (variando de 0.20 a 0.68), lo que sugiere predominantemente la presencia de n-alcenos de fuentes acuáticas. Los transectos muestreados presentan profundidades con TAR superiores 1.3 indicando y una preferencia de n-alcenos impares de alto peso molecular, n-C27, n-C29 y n-C31, en especial n-C29, lo que sugiere una mayor contribución de plantas terrestres superiores (Gong *et al.*,2020). Es el caso de A1, A3, A5, F38 que presentaron valores de TAR superiores 3.02 indicando una mayor contribución de plantas terrestres superiores.

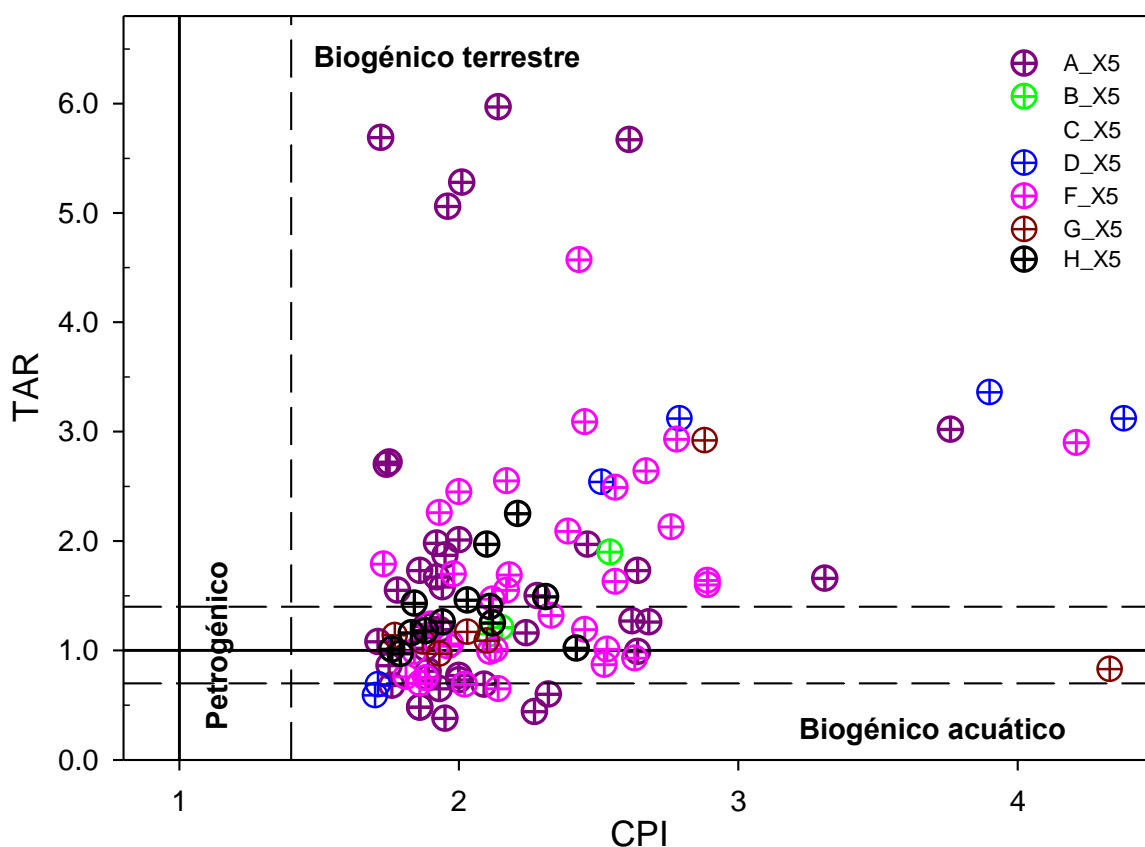


Fig. 19. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs. TAR (material terrígeno-acuático) en la capa superficial del GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-05.

Relaciones de los HC aromáticos con la circulación oceánica en la zona de aguas profundas del golfo de México

En el mapa de la Fig. 20, la barra de colores abarca desde 0 hasta 0.9 $\mu\text{g/L}$ para los HAPs's. De las estaciones muestreadas, el 61% presenta valores en el rango de 0.1 a 0.4 $\mu\text{g/L}$. Un 13% de las estaciones registraron valores mayores a 0.4 $\mu\text{g/L}$, siendo especialmente notables las estaciones A6 con 0.9 $\mu\text{g/L}$ y A8 con 0.7 $\mu\text{g/L}$. Por otro lado, el 26% restante de las estaciones exhiben concentraciones bajas de HC aromáticos, inferiores a 0.1 $\mu\text{g/L}$. Al igual que en la Fig. 16 la distribución en la Bahía de Campeche es similar. Las estaciones al noreste del golfo con mayor concentración, con respecto al resto, e influenciadas por los LCEs, sugieren una posible entrada de HC desde el norte del golfo. Cabe destacar que la distribución presentada en la capa superficial se repite en las siguientes capas de agua.

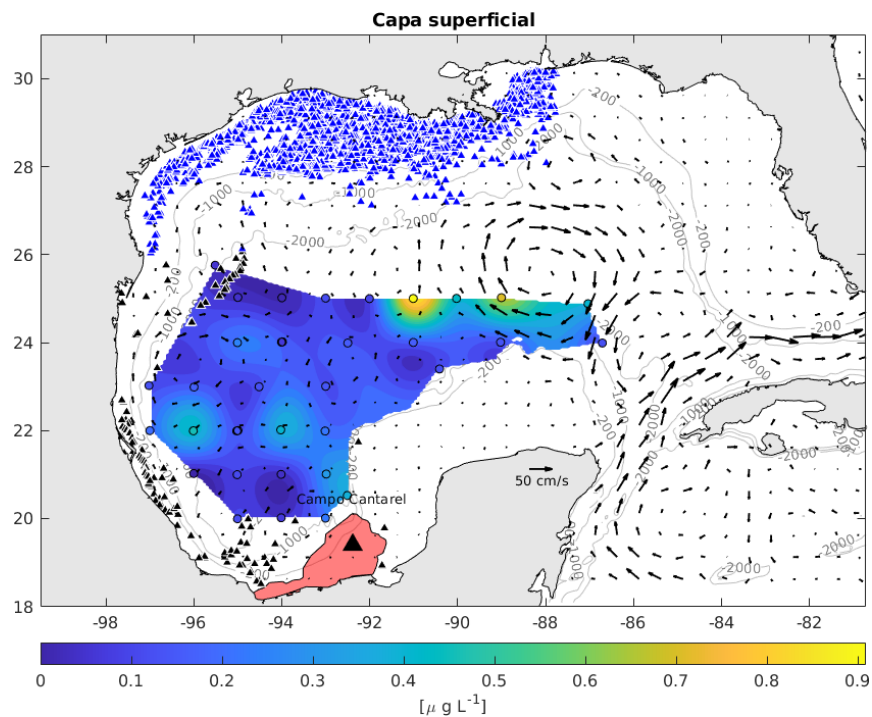


Fig. 20. Distribución espacial superficial de la concentración promedio de HC aromático durante la campaña XIXIMI-05.

Identificación de posibles fuentes de HC aromáticos en la zona de aguas profundas del golfo de México

Para cada muestra de agua, se trazaron las proporciones de isómeros de HAPs, $[\text{Flu}/ (\text{Flu} + \text{Pyr})]$ en función de $[\text{Ant}/ (\text{Ant} + \text{Phe})]$ para mostrar cómo se distribuyen los PAH en relación con sus posibles fuentes (Fig. 21).

Se observa que 63% muestran evidencia de derivar principalmente de la combustión por $[\text{Ant}/ (\text{Ant} + \text{Phe})] > 0.1$ y combustión de biomasa y carbón por valores $[\text{Flu}/ (\text{Flu} + \text{Pyr})] > 0.5$. Por otro lado, un 22% muestran valores de $[\text{Flu}/ (\text{Flu} + \text{Pyr})] < 0.5$ lo que sugiere que, además de la entrada pirolítica como fuente principal, la entrada petrogénica también podría estar contribuyendo como fuente de HAPs.

No se puede ignorar la contaminación derivada del petróleo o combustión de petróleo que aparece en las algunas estaciones del transecto A, ya que, cercano a esas estaciones se encuentra los campos petrolíferos de USA, donde la exploración y refinerías de petróleo podrían contribuir a los PAH.

XIXIMI V

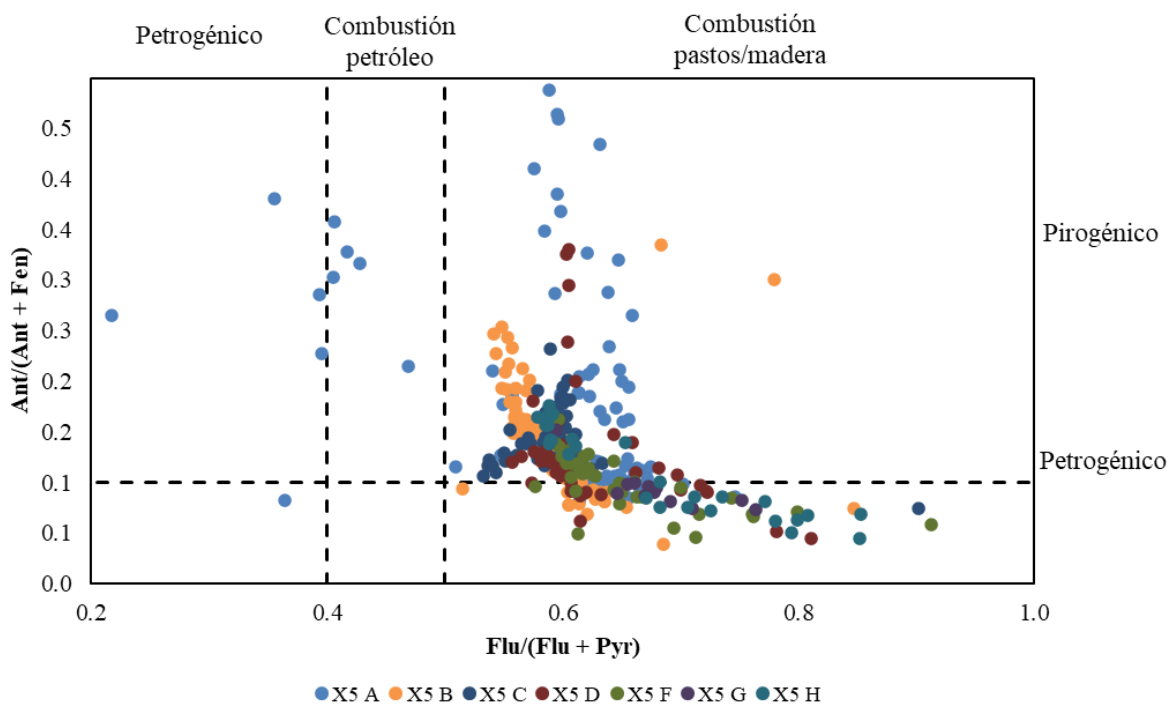


Fig. 21. Gráficos de dispersión de HAPs basados en relaciones diagnósticas de (a) $[\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})]$ vs $[\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})]$, para la identificación de fuentes en el GdM. Datos obtenidos del cruceo XIXIMI-05. Abreviaturas: Ant, antraceno; Phe, fenantreno; Flu, fluoranteno; Pyr, pireno.

Campaña oceanográfica XIXIMI-06 (agosto - septiembre del 2017)

Al igual que en la campaña oceanográfica XIXIMI-04 se observa (Fig. 22) que la CL se extendió hacia el norte y se encuentra en su fase de ahorcamiento próxima a formar un nuevo LCE, nombrado "Quantum " aproximadamente en los 25° N y 86°W. Persiste Poseidón (en su fase terminal) descritos en la campaña anterior, localizado al oeste del golfo, cerca de las coordenadas 25° N 96°W y 27° N 91°W. Además, se pueden apreciar los LCFEs alrededor de los LCE y la CL.

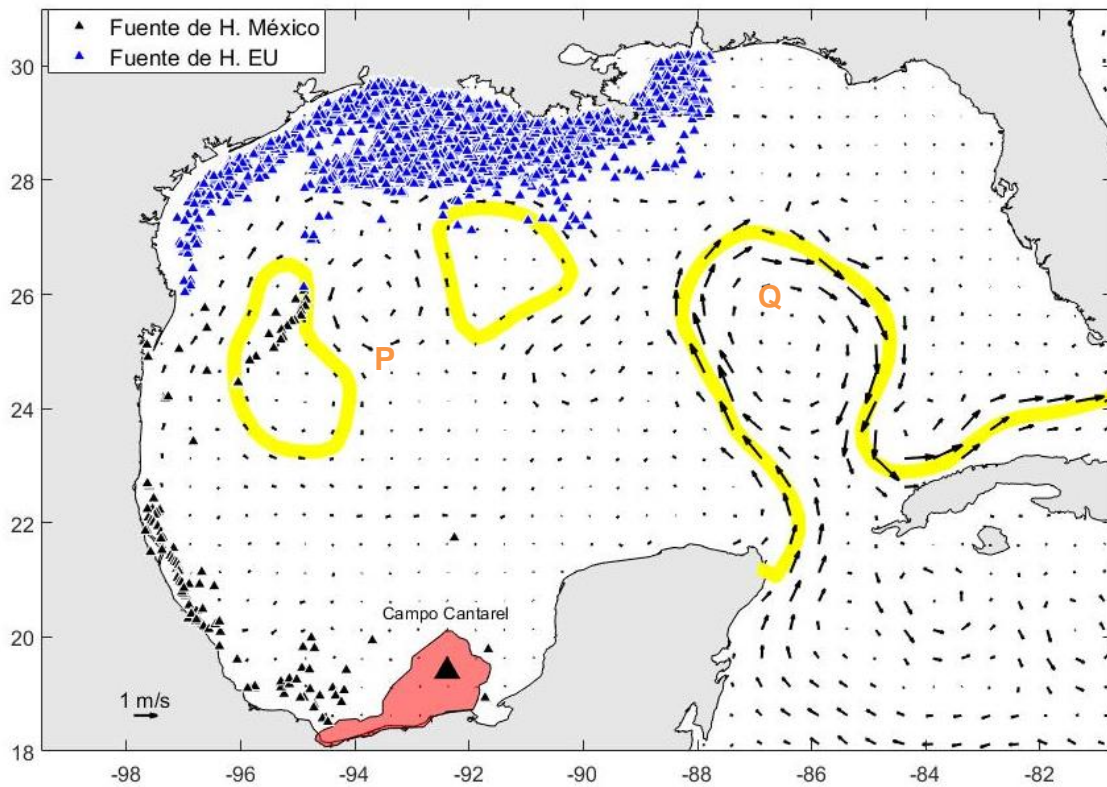


Fig. 22. Circulación del golfo de México durante la campaña XIXIMI-06 del 10 de agosto al 16 de agosto de 2017. Modificado de Pulster *et al.*,2020. Las flechas negras indican las velocidades geostroficas (cm s) calculadas con altimetría y la isolínea amarilla resalta el ADT = 0.25m. Las fuentes de HC están señaladas con triángulos azules para USA y negros para México.

Relaciones de los HC alifáticos y aromáticos con la circulación atmosférica en la zona de aguas profundas del golfo de México

Durante el periodo comprendido entre agosto y septiembre en la región del Golfo de México, se observó un comportamiento meteorológico atípico en cuanto al patrón de vientos. Este período estuvo marcado por la influencia de múltiples ondas tropicales que ingresaron al Golfo procedentes de la Península de Yucatán. Estos sistemas desencadenaron un aumento significativo en la nubosidad y una intensa actividad de precipitaciones en la zona.

Adicionalmente, se registraron la presencia y avance de sistemas frontales al norte de Estados Unidos con dirección suroeste, así como la formación y desarrollo de huracanes. Dos depresiones tropicales se generaron en el Golfo de México y evolucionaron hasta convertirse en huracanes de categoría 2 y 3, respectivamente. El primero de estos fenómenos tuvo lugar a mediados de agosto y se originó de un remanente del huracán Harvey (Fig. 23a una circulación en contra de las manecillas del reloj sobre la bahía campeche), que luego se intensificó para convertirse en el huracán Harvey. Este sistema impactó las costas del Golfo de México, específicamente en la región occidental.

La segunda depresión tropical se formó durante la primera semana de septiembre en la Bahía de Campeche, transformándose posteriormente en el huracán Katia, de categoría 2 (Fig. 23b circulación en contra de las manecillas del reloj frente a las costas de Tamaulipas y Veracruz). El desplazamiento de este huracán siguió una trayectoria hacia el sureste del Golfo.

La Fig. 23 muestra dos mapas que representan la disposición espacial de la concentración promedio de HC totales (alifáticos Fig. 23a y HAPs Fig. 23b), en el área de estudio, calculadas en el estrato de 0 a 10 metros. Se mantiene los mismos criterios que en la Fig. 7

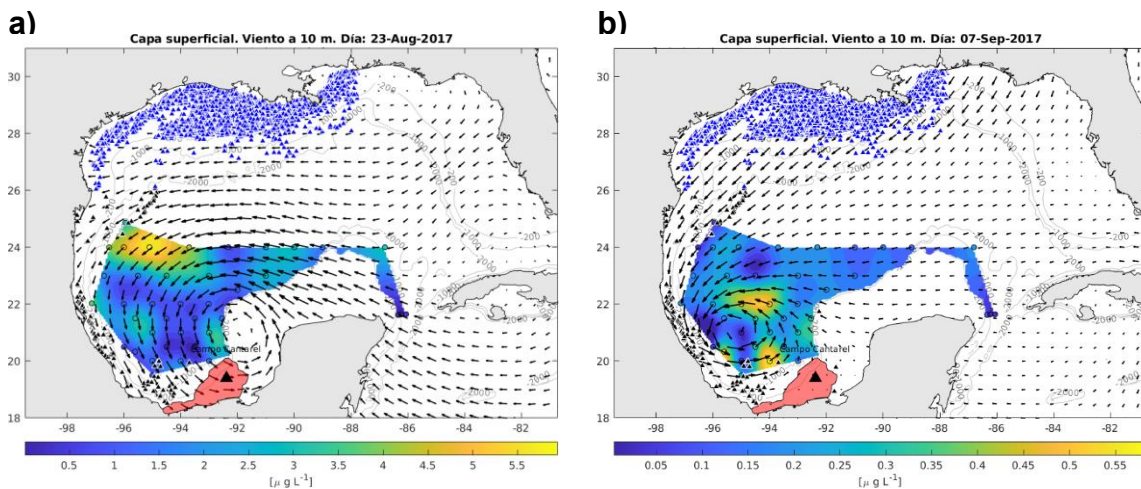


Fig. 23. Distribución espacial de la concentración promedio de los HC con el patrón de circulación de viento diario. (a) alifáticos totales con patrón de viento para el 23 de agosto, (b) aromáticos totales con patrón de viento para el 07 de septiembre. Los datos corresponden a la campaña XIXIMI-06 y se calcularon para el estrato de 0 a 10 m de la región de aguas profundas del GdM.

Las escalas de colores en la Fig. 23a va de 0 a 6 µg/L para los alifáticos totales. Se puede apreciar que alrededor del 34% de las estaciones muestran concentraciones de HC alifáticos entre 1.0 a 3.0 µg/L. Un 21% presenta valores superiores a 3 µg/L, cabe destacar que las estaciones con valores por encima de 3 µg/L se distribuyen, aparentemente, siguiendo los patrones de circulación del viento, desde las costas de Tamaulipas, hacia las zonas costeras de Yucatán, sugiriendo una posible entrada de HC desde el noroeste del golfo. La estación D29 presentó el valor más alto de HC con un 5.6 µg/L. El resto de las estaciones exhiben concentraciones por debajo de 1 µg/L.

Las escalas de colores en la Fig. 7b va de 0 a 0.6 $\mu\text{g/L}$ para los aromáticos. Aproximadamente el 56% de las estaciones presentan valores de concentración de HAPs en el intervalo de 0.1 a 0.3 $\mu\text{g/L}$. El 22% de las estaciones registró valores superiores a 0.3 $\mu\text{g/L}$, sobresaliendo las estaciones H5 con 0.58 $\mu\text{g/L}$ y H46 con 0.52 $\mu\text{g/L}$. Debido a la ubicación de los puntos con mayores concentraciones y a las depresiones presentes en la zona de estudio se podría inferir una posible entrada de HAPs desde el campo Cantarell. El restante de las estaciones muestra concentraciones bajas de HC aromáticos, inferiores a 0.1 $\mu\text{g/L}$.

Relaciones de los HC alifáticos con la circulación oceánica en la zona de aguas profundas del golfo de México

En el mapa de la Fig. 24, la barra de colores abarca desde 0 hasta 6.0 $\mu\text{g/L}$ para los HC alifáticos. Cabe destacar que la distribución de los HC presentada en la capa superficial es igual a la presentada en la Fig. 23. Por lo que se puede deducir que la circulación atmosférica domino en la zona de estudio durante la campaña oceanográfica.

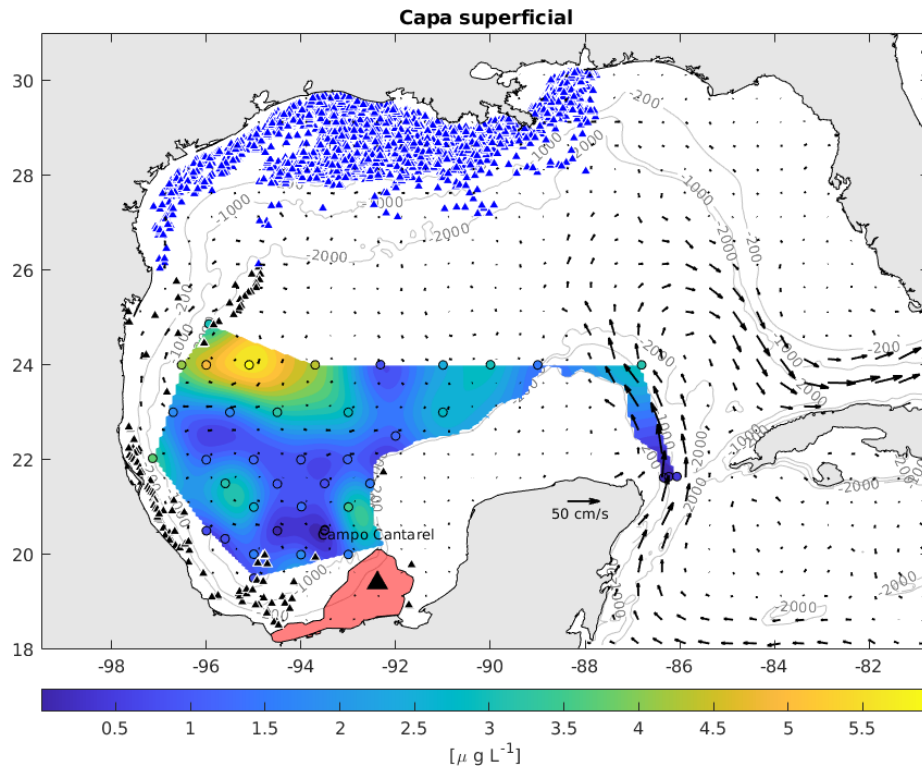


Fig. 24. Distribución espacial superficial de la concentración promedio de HC alifáticos durante la campaña XIXIMI-06.

Durante la campaña oceanográfica, se observó una interesante similitud en la distribución de hidrocarburos en la capa de agua común del golfo con respecto a la capa superficial. Esta coincidencia podría estar relacionada con la influencia de los huracanes que impactaron la región en ese período.

Las temperaturas registradas fueron notables, manteniéndose en un rango de 20 a 25 °C hasta profundidades de 250 metros. Este patrón térmico elevado podría ser un indicio de la influencia directa de depresiones ciclónicas.

Cuando una depresión ciclónica afecta la zona, se desencadena un fenómeno crucial: el levantamiento de la superficie del mar. Esta elevación conlleva un hundimiento de la termoclina. Como resultado, se produce un ensanchamiento

significativo de la capa de agua. Este mismo comportamiento se repite en la distribución de HC aromáticos.

En la Fig. 25a, se representa la concentración promedio de HC alifáticos en la capa AAIW. La barra de colores abarca desde 0 hasta 9.2 $\mu\text{g/L}$, se observa que el 39% de las estaciones presentaron valores que oscilan entre 1 y 3 $\mu\text{g/L}$. El 27% reflejaron concentraciones superiores a 3 $\mu\text{g/L}$, especialmente cerca de las costas de Tamaulipas y plataforma interna de Yucatán y en las cercanías del campo Cantarell; destacando la estación E35 con 9.2 $\mu\text{g/L}$. Esta distribución nos habla de una posible entrada de HC desde el norte del golfo por corrientes de frontera y desde el sur del golfo hacia las fronteras de la península de Yucatán.

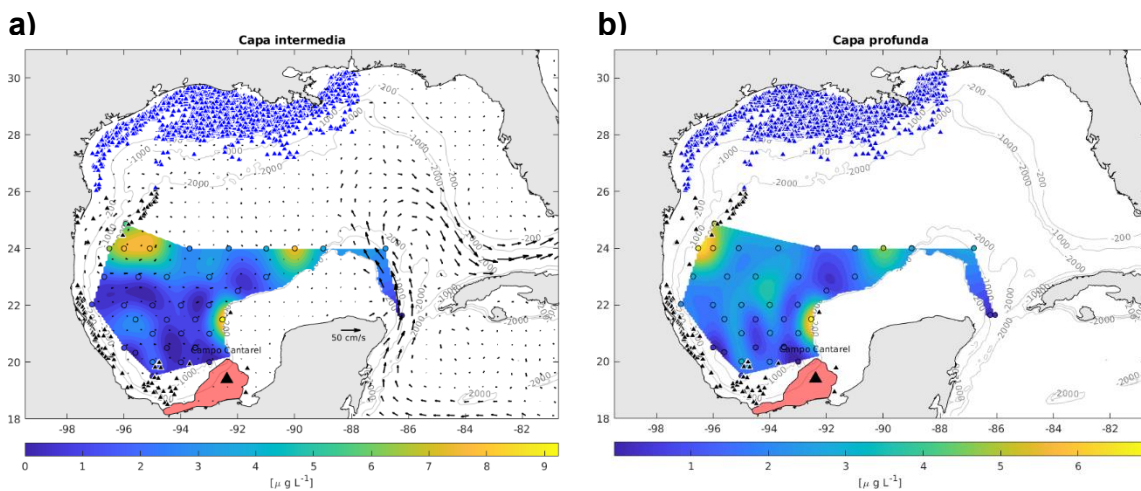


Fig. 25. Distribución espacial de la concentración promedio de HC alifático en la columna de agua durante la campaña XIXIMI-06. Alifáticos totales en (a) AAIW (b) NADW (versión sin circulación oceánica).

El 59% de las estaciones graficadas en la Fig. 25b presentaron concentraciones de HC alifáticos en el rango de 1 a 3 $\mu\text{g/L}$. Además, se observa que el 16% de los sitios

mostraron concentraciones superiores a 3 µg/L, resaltando las estaciones E35 con 6.8 µg/L y A1 con 6.6 µg/L, similares a lo observada en la capa anterior. Este comportamiento se lo puede atribuir a las corrientes de fondo y la circulación general ciclónica de fondo descrita anteriormente.

Identificación de posibles fuentes de HC alifáticos en la zona de aguas profundas del golfo de México

La Fig.26 presenta el índice de carbono preferencial (CPI), de HC alifáticos en la zona de aguas profundas del GdM. En el estudio los valores del índice variaron de 0.25 a 3.43, con una predominancia de contribuciones petrogénicas. El 73% de las estaciones correspondiente a los A, B, C, D, E, F, G, H, J y Y mostraron valores del CPI alrededor de 1, limitado por un rango 1 ± 0.3 , lo cual es típico de hidrocarburos petrogénicos (Mille *et al.*,2007). Esta predominancia se mantiene a lo largo de la columna de agua.

Por otra parte, el 15% de las estaciones de los transectos A, B, C, D, E, F, G, H y Y mostraron valores de CPI que se encuentra por encima del límite superior de 1, lo cual sugiere un posible origen biogénico (El Nemr *et al.*,2016). En el caso de las estaciones con valores cercanos a 2, donde predomina la presencia de n-alcanos de números impares más bajos, n-C15, n-C17 y n-C19, especialmente n-C17; se relaciona comúnmente con un origen biogénico como el fitoplancton (El Nemr *et al.*,2016; Hernández-Guzmán *et al.*,2021). En contraste, los valores más bajos de CPI (alrededor de 0.5) encontrados en los transectos A, C, D, G y Y generalmente están asociados a n-alcanos derivados de un origen mixto (Elfadly *et al.*,2017).

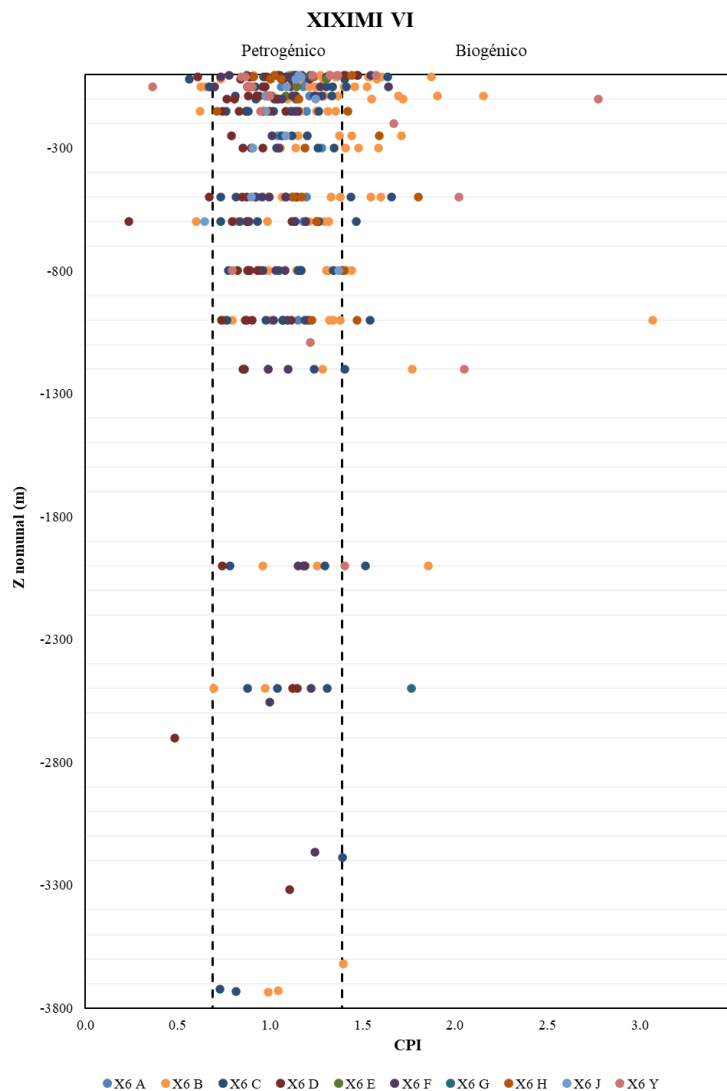


Fig. 26. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs la profundidad nominal el GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-06.

Para las muestras que arrojaron indicios de origen biogénico se graficaron contra el CPI. Los valores de TAR variaron de 0.46 a 4.27. La estación B35 600m presentó un valor de TAR inferiores a 0.7 (0.46), lo que sugiere la presencia de n-alcános de fuentes acuáticas. Las estaciones B16, B18, H48, G40, G43, Y3, Y6 en algunas de sus profundidades presentaron valores de TAR superiores 1.3 (2.5-4.27) con una

preferencia de n-alcenos impares de alto peso molecular indicando una contribución de plantas terrestres superiores (Gong *et al.*,2020).

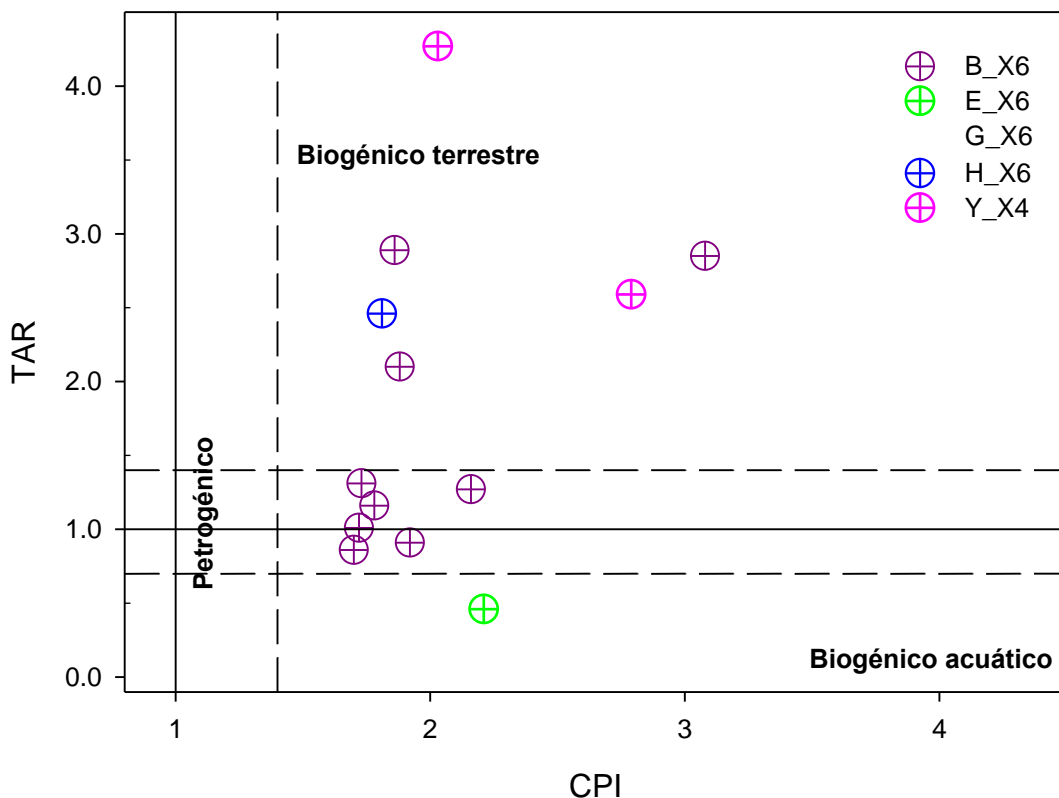


Fig. 27. Gráfico de dispersión de HC alifáticos para la relación diagnóstica de CPI (índice de carbono preferencial) vs. TAR (material terrígeno-acuático) en el del GdM. Datos obtenidos de la campaña XIXIMI-06.

Identificación de posibles fuentes de HC alifáticos en la zona de aguas profundas del golfo de México

En la Fig. 28a, se representa la concentración promedio de HC aromáticos en la capa TACW. La barra de colores abarca desde 0 hasta 0.6 µg/L, se observa que el 55% de las estaciones presentaron valores que oscilan entre 0.1 y 0.3 µg/L. El 29% reflejaron concentraciones superiores a 0.3 µg/L, especialmente en la bahía de Campeche, siguen el contorno de la bahía y están cercanos al campo Cantarell;

destacando la estación E32 con 0.64 $\mu\text{g/L}$ y ubicada frente a la costa de Veracruz. Esta distribución nos habla de una posible entrada de HC desde el sur del golfo hacia las fronteras de la península de Yucatán y siguiendo una circulación ciclónica.

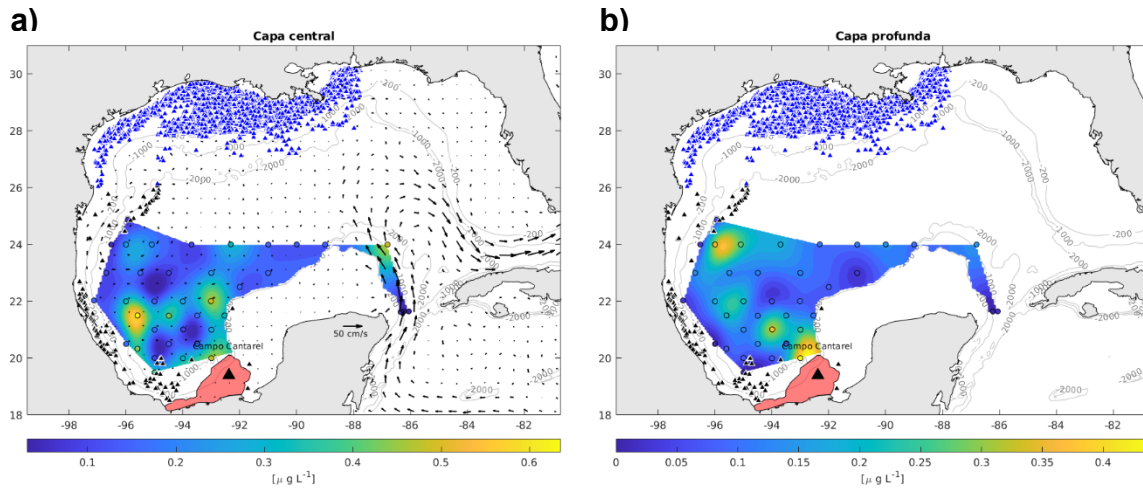


Fig. 28. Distribución espacial de la concentración promedio de HAPs en la columna de agua durante la campaña XIXIMI-06. HAPs totales en (a) TACW, (b) NADW (sin datos de circulación oceánica).

El 63% de las estaciones graficadas en la Fig. 28b presentaron concentraciones de HC aromáticos en el rango de 0.1 a 0.3 $\mu\text{g/L}$. Además, se observa que el 7% de los sitios mostraron concentraciones superiores a 0.3 $\mu\text{g/L}$, resaltando las estaciones H48 con 0.48 $\mu\text{g/L}$ y la estación B11 con 0.38 $\mu\text{g/L}$, similares a lo observada en la capa superficial.

Identificación de posibles fuentes de HC aromáticos en la zona de aguas profundas del golfo de México

Para cada muestra de agua, se calculó y graficó $[\text{Flu}/ (\text{Flu} + \text{Pyr})]$ en función de $[\text{Ant}/ (\text{Ant} + \text{Phe})]$ para mostrar cómo se distribuyen los PAH en relación con sus posibles fuentes (Fig. 29).

Se observa que 73% muestran evidencia de derivar principalmente de la combustión por $[\text{Ant}/ (\text{Ant} + \text{Phe})] > 0.1$ y combustión de biomasa y carbón por valores $[\text{Flu}/ (\text{Flu} + \text{Pyr})] > 0.5$. Por otro lado, un 22% muestran valores de $[\text{Flu}/ (\text{Flu} + \text{Pyr})] < 0.5$ lo que sugiere que, además de la entrada pirolítica como fuente principal, la petrogénica también podría ser una fuente de HAPs.

No se puede ignorar la contaminación derivada del petróleo o combustión de petróleo que aparece en las algunas profundidades de las estaciones, A1, A2, C24 D28, E34, y Y7, ya que, cercano a esas estaciones se encuentra los campos petrolíferos de USA y el campo Cantarell de donde la exploración y refinerías de petróleo podrían contribuir a los PAH.

XIXIMI VI

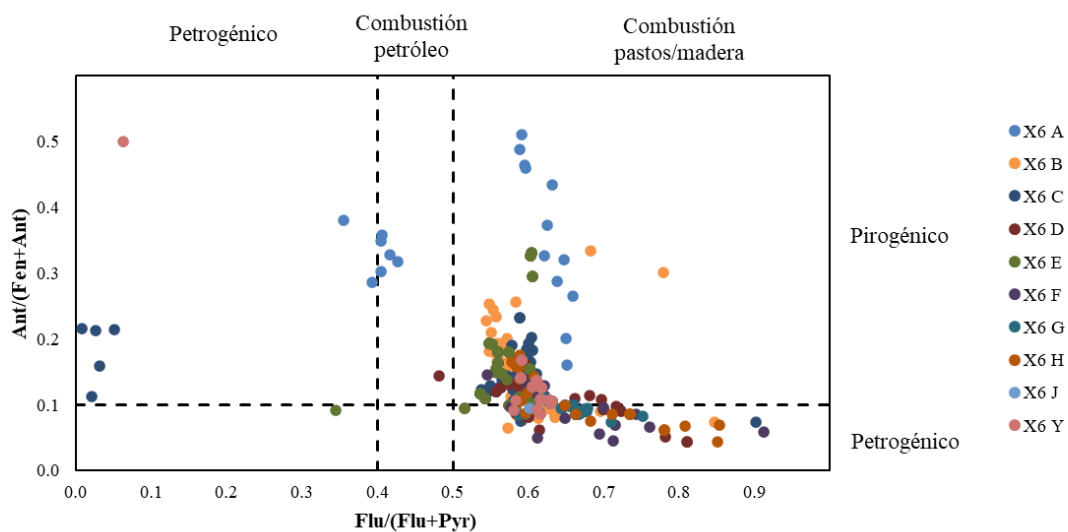


Fig. 29. Gráficos de dispersión de HAPs basados en relaciones diagnósticas de (a) $[\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})]$ vs $[\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})]$, para la identificación de fuentes en el GdM. Datos obtenidos del crucero XIXIMI-06. Abreviaturas: Ant, antraceno; Phe, fenantreno; Flu, fluoranteno; Pyr, pireno.

DISCUSIÓN

Influencia de la circulación atmosférica en la distribución de HC en el GdM

La circulación atmosférica se revela como un factor de vital importancia en el entendimiento de la distribución y concentración de HC en el Golfo de México, como lo evidencian las campañas oceanográficas XIXIMI 4 (Fig. 7), XIXIMI 5 (Fig.15) y XIXIMI 6 (Fig. 23). Estas investigaciones destacan la relación entre los patrones de viento característicos de la región y la presencia de fenómenos climáticos en la configuración de la contaminación por HC en la región.

En el contexto del XIXIMI 4, se observa una relación entre la dirección de los vientos y las concentraciones de HC en diversas estaciones costeras. Los vientos provenientes del sureste y el este actúan como agentes de transporte, facilitando el desplazamiento de HC desde fuentes terrestres y marinas hacia áreas cercanas a la costa occidental del golfo.

Por otro lado, en la campaña XIXIMI-05, la presencia de eventos meteorológicos significativos, como la tormenta tropical Danielle, generó un impacto claro en la distribución de HC. Se observa una correlación entre las concentraciones elevadas y la trayectoria de la tormenta, especialmente en estaciones cercanas a la plataforma interna de Yucatán y la bahía Campeche.

En el contexto de la campaña XIXIMI-06, caracterizada por la presencia de huracanes (Harvey y Katia) y frentes atmosféricos, se evidencia una respuesta directa de la distribución de HC a estos fenómenos climáticos. La detección de núcleos de alta concentración de HC en áreas coincidentes con los contornos de los huracanes refuerza la influencia de los vientos y movimientos inducidos por

estos eventos en la redistribución y concentración de HC en puntos específicos del Golfo de México, como la bahía de Campeche y el noroeste de la región.

La disparidad en la distribución de HC entre las campañas XIXIMI-04 y XIXIMI-06 resalta la trascendencia de los factores climáticos en la dispersión y acumulación de contaminantes. La presencia de frentes y huracanes introduce una agitación adicional en las masas de agua, promoviendo la mezcla y redistribución de HC en la región. Las diferencias en la dirección de los vientos en ambas campañas inciden en la advección de HC desde fuentes externas, ya sean terrestres o marinas.

Influencia de la circulación oceánica en la distribución de HC en el GdM

En la campaña XIXIMI 4, la presencia de núcleos de altas concentraciones en los contornos de los remolinos ciclónicos, como "Olympus" y "Nautilus II", en la capa de agua común sugiere que la convergencia de flujos podría estar contribuyendo a la acumulación de HC en esas áreas. La detección de concentraciones elevadas en los límites tanto de remolinos ciclónicos como anticiclónicos en la capa central es intrigante. Esto podría indicar que tanto las áreas de convergencia como de divergencia están influyendo en la distribución de HC, posiblemente debido a procesos de captura y acumulación de contaminantes en estos remolinos.

La observación de que las manchas de concentración en el canal de Yucatán siguen la dirección de la corriente de Yucatán refuerza la idea de que las corrientes dominantes, como LC, CY y los remolinos, están desempeñando un papel fundamental en el transporte y distribución de HC.

La campaña XIXIMI 5 y XIXIMI 6 presenta una distribución de HC que siguen la circulación ciclónica en la bahía de Campeche, lo cual podría estar relacionado con la interacción entre la circulación local y los vertidos de HC. La coincidencia de las concentraciones de HC con las circulaciones de remolinos ciclónicos y anticiclónicos en la capa de agua intermedia destaca la influencia continua de los patrones de corrientes en la distribución de contaminantes.

Fuente probable de hidrocarburo alifáticos

Los HC alifáticos presentes en el Golfo de México tienen su origen principalmente en la formación y degradación de materia orgánica en el subsuelo durante procesos geológicos a lo largo de millones de años. Estos HC se encuentran en las reservas de petróleo y gas que están presentes en las rocas sedimentarias bajo el fondo marino (Roux *et al.*,2015).

Cuando se habla de señales petrogénicas, como las que se observan en las Fig. 10 y Fig.26, en el Golfo de México, esto generalmente se refiere a la detección de HC que están asociados con productos derivados del petróleo, como el diésel y otros combustibles fósiles. La razón por la que muchas de estas señales son petrogénicas y relacionadas con el diésel se debe a la actividad humana en la región y a la gran presencia de infraestructuras petroleras en el Golfo de México.

El diésel, en particular, es ampliamente utilizado en la industria marina y terrestre en la región. Los buques cisterna, barcos de carga y embarcaciones de servicio utilizan diésel como combustible. Además, la actividad de transporte y las operaciones de mantenimiento en las plataformas petroleras también involucran el uso de diésel. Esto aumenta la probabilidad de fugas y derrames que liberan HC alifáticos, incluido el diésel, en el entorno marino.

La Fig. 30 y Fig.31 condensa y estandariza las posibles fuentes de HC alifáticos en el Golfo de México a lo largo de tres campañas oceanográficas: XIXIMI 4, 5 y 6. Utilizando gráficos de pasteles, se sintetizan los índices calculados que simplifican la complejidad de las fuentes potenciales de estos HC. El análisis destaca que la mayoría de las estaciones muestreadas en la Fig. presentan señales petrogénicas,

lo que indica una fuerte asociación con actividades antropogénicas. Además, se resalta la presencia de señales mixtas y biogénicas microbiológicas en ciertas estaciones. Estas señales están vinculadas con la producción de HC alifáticos por plantas terrestres, plancton marino y bacterias. Se destaca que las señales microbiológicas se observan en estaciones costeras donde la contribución del plancton es mayor.

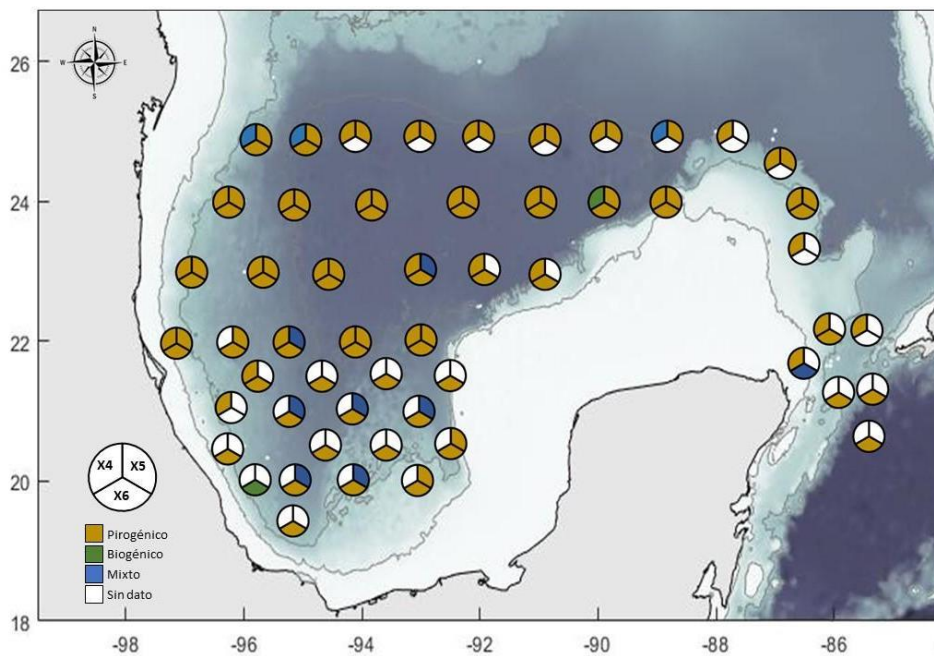


Fig. 30. Fuentes probables de HC alifáticos en la capa superficial para cada crucero (XIXIMI-04, XIXIMI-05 y XIXIMI-06) del GdM.

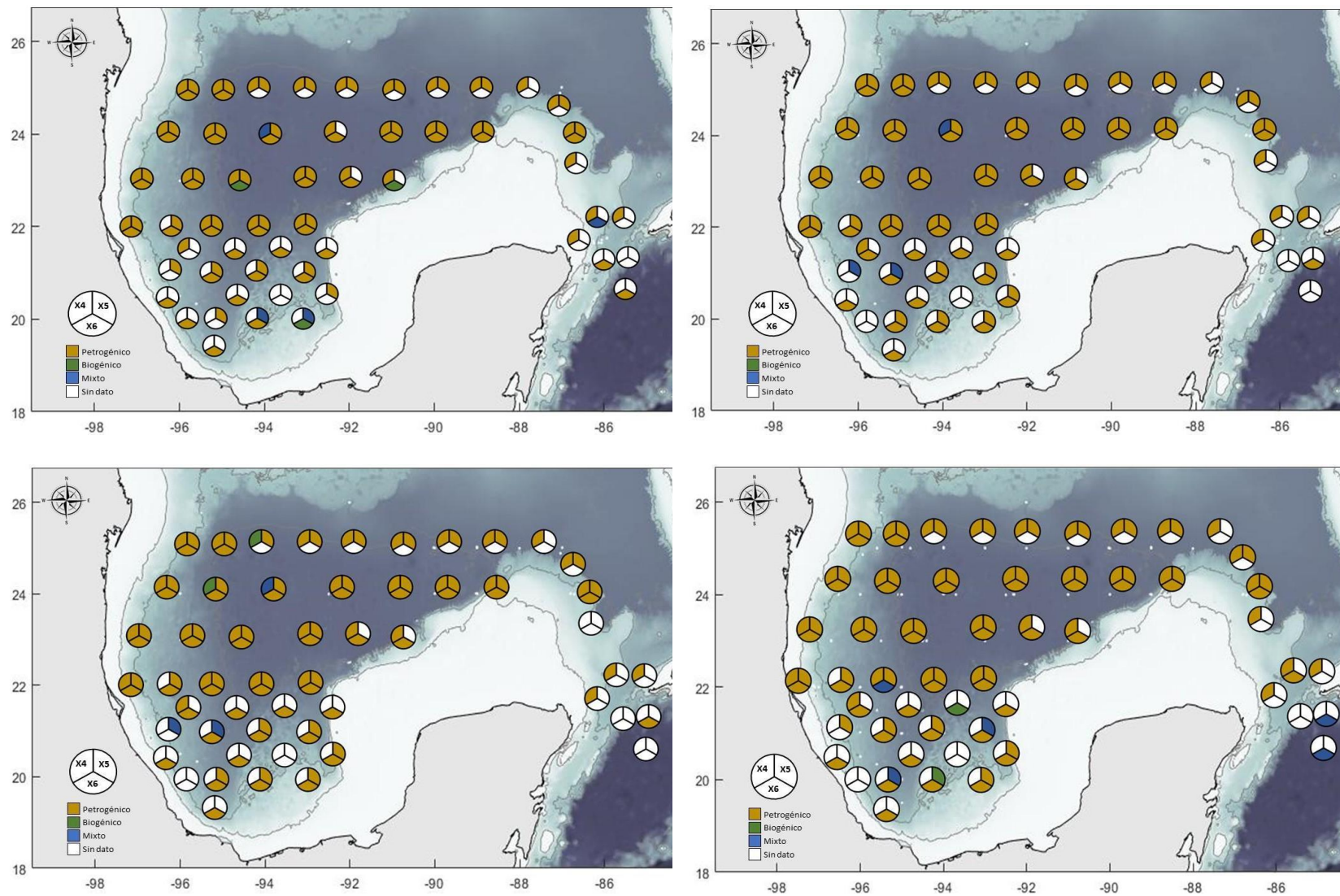


Fig. 31 Fuentes probables de HC alifáticos en la capa, a) GCW; b) TANW; c) AAIW; d) NADW, para cada crucero (XIXIMI-04, XIXIMI-05 y XIXIMI-06) del GdM.

Fuente probable de hidrocarburo aromático

El análisis de las señales de HC alifáticos en el Golfo de México a lo largo de tres campañas oceanográficas (XIXIMI 4, 5 y 6) ha arrojado resultados significativos en términos de las posibles fuentes de origen. Los gráficos de pasteles generados para representar estas señales han proporcionado una visión simplificada y abarcadora estas fuentes en las diferentes estaciones muestreadas.

Es evidente en las Fig. 33 y Fig. 34 que la mayoría de las estaciones muestreadas en el Golfo de México presentan señales de combustión de biomasa, lo que indica la presencia de compuestos liberados durante la quema de materia orgánica. Estas señales son consistentes con actividades antropogénicas y naturales que involucran la quema de vegetación, residuos agrícolas y otros materiales biológicos. La quema de biomasa es una fuente bien conocida de compuestos orgánicos y partículas que pueden ser transportadas por el aire y dispersarse en la región.

Sin embargo, el análisis también ha revelado que las estaciones ubicadas al norte del Golfo de México presentan una señal fuerte en la columna de agua de crudo y combustión de petróleo. Esta señal sugiere la presencia de compuestos químicos liberados durante la quema de productos derivados del petróleo, como gasolina y diésel. La identificación de estas señales específicas de crudo y petróleo indica una fuerte asociación con actividades humanas relacionadas con la industria petrolera y el tráfico marítimo en esta área particular del Golfo.

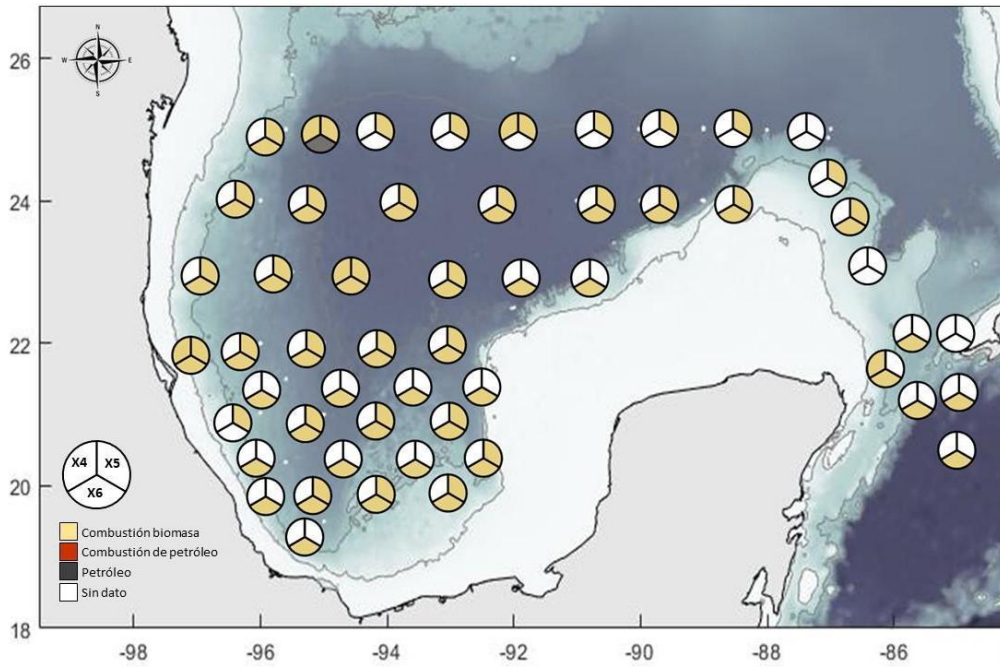


Fig. 33 Fuentes probables de HC aromáticos en capa superficial para cada crucero (XIXIMI-04, XIXIMI-05 y XIXIMI-06) del GdM.

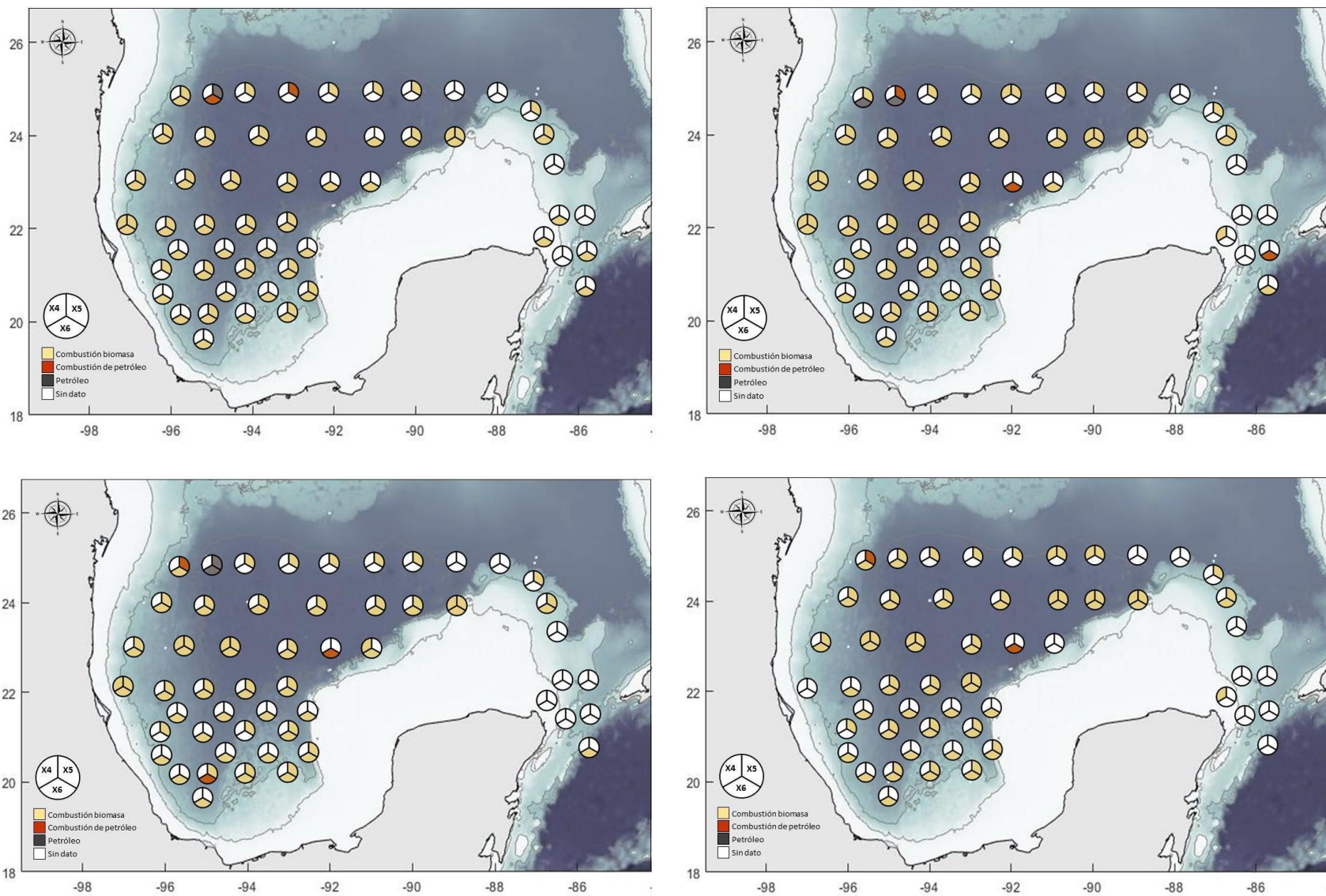


Fig. 34 Fuentes probables de HC aromáticos en la capa, a) GCW; b) TANW; c) AAIW; d) NADW, para cada crucero (XIXIMI-04, XIXIMI-05 y XIXIMI-06) del GdM..

CONCLUSIÓN

En este estudio, se buscó comprender las fuentes y la distribución de los HC alifáticos y aromáticos policíclicos en la región mexicana de aguas profundas del Golfo de México durante las campañas oceanográficas XIXIMI IV-VI. A través de una serie de objetivos específicos, se ha logrado arrojar luz sobre la complejidad de los procesos físicos y las fuentes que influyen en la presencia de estos compuestos en el entorno marino.

- Las señales petrogénicas predominan en la mayoría de las estaciones muestreadas en el Golfo de México.
- La actividad petrolera, incluyendo el tráfico marítimo y operaciones en plataformas, influye significativamente en la presencia de hidrocarburos (HC) alifáticos y aromáticos policíclicos en la región.
- La distribución de HC en la región está fuertemente influenciada por forzamientos físicos. Las corrientes de lazo, especialmente durante periodos de extensión, y los vientos asociados a huracanes son factores determinantes.
- La circulación atmosférica y la dinámica de las corrientes oceánicas desempeñan un papel crucial en la dispersión y acumulación de HC en diferentes áreas del Golfo.
- Los hallazgos de la investigación proporcionan una base sólida para futuros estudios.

BIBLIOGRAFIA

- Abascal, A., Sheinbaum, J., Candela, J., Ochoa, J., & Badan, A. (2003). Analysis of flow variability in the yucatan channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108 (C12).
- Albaiges, J., & Albrecht, P. (1979). Fingerprinting marine pollutant hydrocarbons by computerized gas chromatography-mas spectrometry. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 6(2), 17190.
- Alboudwarej, H., Felix, J., Taylor, S., Badry, R., Bremner, C., Brough, B. & West, C. (2006). La importancia del petróleo pesado. *Oilfield review*, 18(2), 38-58.
- Aly Salem D.M.S, Fadia Abou-Elmagd, M. Morsy, Ahmed El Nemr, Amany El-Sikaily, Azza Khaled (2014) The monitoring and risk asesment of aliphatic and aromatic hydrocarbons in sediments of the Red Sea, Egypt. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 40(4): 333-348.
- Bandowe, B. A. M., Shukurov, N., Leimer, S., Kersten, M., Steinberger, Y., & Wilcke, W. (2021). Polycyclic aromatic hydrocarbons (HAPs) in soils of an industrial area in semi-arid Uzbekistan: spatial distribution, relationship with trace metals and risk asesment. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(11), 4847–4861.
- Bandowe, B.A.M., Shukurov, N., Leimer, S., Kersten, M., Steinberger, Y. y Wilcke, W. (2021). Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en suelos de una zona industrial en el semiárido Uzbekistán: distribución espacial, relación con metales traza y evaluación de riesgos. *Geoquímica Ambiental y Salud*, 43 (11), 4847-4861.

- Bedair, H. M. & Al-Saad, H. T. (1992). Dissolved and Particulate Adsorbed Hydrocarbons in Water of Shatt Al-Arab River, Iraq. *Water, Air, Soil Pollution*, 61: 397-408.
- Bretherton FP, Davis RE, Fandry CB (1976) A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73. *Deep-Sea Res* 23: 559-582.
- Beyer, J., Trannum, H. C., Bakke, T., Hodson, P. V. & Collier, T. K. (2016). Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: a review. *Marine pollution bulletin*, 110(1): 28-51.
- Botello, A. V. (2005). Características, composición y propiedades fisicoquímicas del petróleo. Golfo de México contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias, 1(1): 261-268.
- Bourbonniere, R.A., Meyers, P.A., 1996. Sedimentary geolipid records of historical changes in the watersheds and productivities of Lakes Ontario and Erie. *Limnol. Oceanogr.* 41, 352–359.
- Broman, D., Colmsjö, A., Ganning, B., Näf, C., Zebühr, y Östman, C. 1987. Fingerprinting petroleum hydrocarbons in bottom sediment, plankton, and sediment trap collected seston. *Marine Pollution Bulletin*. 18, 7:380-388.
- Brown, T.L., Lemay, H.E., Murphy, C.J., Bursten, B. E. & Woodward, P.M. (2014). *Química La ciencia central*. 12ed. Pearson.

- Budzinski, H., Jones, I., Bellocq, J., Piérard, C., & Garrigues, P. (1997). Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary. *Marine Chemistry*, 58(1-2), 85–97.
- Calva B, L.G., Botello, A. V.; Ponce Vélez, G. (2005). Composición de hidrocarburos alifáticos en sedimentos de la laguna Sontecomapan, Ver., México. *Hidrobiológica*, 15, (1): 9708.
- Candela, J., Ochoa, J., Sheinbaum, J., Lopez, M., Perez-Brunius, P., Tenreiro, M., Pallàs-Sanz, E., Athié, G. & Arriaza-Oliveros, L. (2019). The flow through the gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 49(6): 1381–1401.
- Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., Badan, A. & Leben, R. 2002. The potential vorticity flux through the Yucatan Channel and the Loop Current in the Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, 29(22): 166–4.
- Carrillo, L., Johns, E., Smith, R., Lamkin, J., and Largier, J. (2016). Pathways and hydrography in the mesoamerican barrier reef system part 2: Water masses and thermohaline structure. *Continental Shelf Research*, 120: 41–58.
- Cavazos-Arroyo, J., Pérez-Armendáriz, B. y Mauricio-Gutiérrez, A. (2014). Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de acatzingo, Puebla, México. *agricultura, sociedad y desarrollo*, 11: 539-550.
- Chang, Y. L. & Oey, L. Y. (2011). Loop current cycle: Coupled response of the loop current with deep flows. *Journal of Physical Oceanography*, 41(3): 458–471.

- Channel and campeche bank. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 76: 217–239.
- Chrysikou, L., Gemenetzi, P., Kouras, A., Manoli, E., Terzi, E., & Samara, C. (2008). Distribution of persistent organic pollutants, polycyclic aromatic hydrocarbons and trace elements in soil and vegetation following a large-scale landfill fire in northern Greece. *Environment International*, 34(2), 210-225.
- Clark Jr., R. C., & Blumer, M. (1967). DISTRIBUTION OF n-PARAFFINS IN MARINE ORGANISMS AND SEDIMENT. *Limnology and Oceanography*, 12(1), 79–87.
- COLMENARES, F. (2008). Petróleo y crecimiento económico en México. *Economía UNAM*. 5(15): 1938-2006.
- DeHaan, C. J., & Sturges, W. (2005). Deep cyclonic circulation in the Gulf of Mexico. *Journal of physical oceanography*, 35(10), 1801-1812.
- Díaz-Flores, M. Á., Salas-de-León, D. A., & Monreal-Gómez, M. A. (2017). Origen y evolución del giro ciclónico de la Bahía de Campeche, Golfo de México. *Revista de biología marina y oceanografía*, 52(3), 441-450.
- Dietrich, D.E., Lin, C.A., (1994). Numerical studies of eddy shedding in the Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.* 99, 7599–7615.
- Dubranna, J., Pérez-Brunius, P., López, M., & Candela, J. (2011). Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 116(C8).

- El Nemr A., Moneer A. A., Ragab S., El Sikaily A. (2016) Distribution and sources of n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in shellfish of the Egyptian Red Sea coast. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 42(2): 12131.
- Expósito-Díaz, G., Salas-de León, D. A., Monreal-Gómez, M. A., Salas-Monreal, D. & Vázquez-Gutiérrez, F. (2009). Corrientes inerciales en el sur del Golfo de México. *Ciencias marinas*, 35(3), 287-296.
- Ficken, K., Li, B., Swain, D., & Eglinton, G. (2000). An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochemistry*, 31(7-8), 745–749.
- Furey H, H., Bower S, A., Pérez Brunius, P., Hamilton, P., & Leben, R. R. (2018). Deep Eddies in the Gulf of Mexico Observed with Floats. *Journal of Physical Oceanography*, 48, 2703-2719.
- Gallegos, A. (1996). Descriptive physical oceanography of the caribbean sea. *Small Islands: Marine Science and Sustainable Development*, 51: 36–55.
- Gao, Y., Han, T., Xia, J., Tan, J., Wang, Y.P. & Wang, S. 2021. Composition and Distribution of Aliphatic Hydrocarbon Compounds and Biomarkers in Seafloor Sediments from Offshore of the Leizhou Peninsula (South China). *ACS Omega* 2021 6 (50), 34286-34293.
- Gary, J. H., Handwerk, G. E., & Kaiser, M. J. (2014). *Petroleum Refining: Technology and Economics*. CRC Pres.
- Guzmán-Osorio, F. J., Adams, R. H., Domínguez-Rodríguez, V. I., Lobato-García, C. E., Guerrero-Peña, A., Barajas-Hernández, J. R., & Baltierra-Trejo, E. (2019).

Alternative method for determining API degrees of petroleum in contaminated soil by FTIR. *Egyptian Journal of Petroleum*.

- Hamilton, P., 1990. Deep currents in the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 20: 1087–1104.
- Hamilton, P., Leben, R., Bower, A., Furey, H., and Pérez-Brunius, P. (2018). Hydrography of the gulf of mexico using autonomous floats. *Journal of Physical Oceanography*, 48(4): 773–794.
- Hamilton, P., Lugo-Fernández, A., and Sheinbaum, J. (2016). A loop current experiment: Field and remote measurements. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 76: 156–173.
- Harada, N., Hirose, Y., Chihong, S., Kurita, H., Sato, M., Onodera, J., Murata, K. & Itoh, F. 2021. A novel characteristic of a phytoplankton as a potential source of straight-chain alkanes. *Scientific Reports*. 11, 14190: 2045-2322.
- Hernández-Guzmán, F.A., Macías-Zamora, J.V., Ramírez-Álvarez, N., Quezada-Hernández, C. & Ortiz-López, R. 2021. Source identification of n-alkanes and isoprenoids using diagnostic ratios and carbon isotopic composition on crude oils and surface waters from the Gulf of Mexico. *Environ Monit Ases* 193, 633.
- Hu, C., Nelson, J. R., Johns, E., Chen, Z., Weisberg, R. H., and Müller-Karger, F. E. (2005). Mississippi River water in the Florida Straits and in the Gulf Stream off Georgia in summer 2004. *Geophys. Res. Lett.* 32:14.

- Iturbe, R., Flores, C., Castro, A. & Torres, L.G. (2007). Sub-soil contamination due to oil spills in zones surrounding oil pipeline-pump stations and oil pipeline right-of-ways in Southwest-Mexico. *Environ Monit Ases*, 133:387–398.
- Jaffe, R., Mead, R., Hernandez, M.E., Peralba, M.C., DiGuida, O.A., 2001. Origin and transport of sedimentary organic matter in two subtropical estuaries: a comparative, biomarker-based study. *Org. Geochem.* 32, 507–526.
- Jeng W-L., Huh C-A. (2006) A comparison of sedimentary aliphatic hydrocarbon distribution between the southern Okinawa Trough and a nearby river with high sediment discharge. *Estuarine Coastal Shelf Sci* 66:217–224
- Johnsen, A. R., & Karlson, U. (2007). Diffuse PAH contamination of surface soils: environmental occurrence, bioavailability, and microbial degradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 76, 533-543.
- Kraus, M., Wilcke, W., Martius, C., Bandeira, A. G., Garcia, M. V. B. & Amelung, W. 2005. Atmospheric versus biological sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (HAPs) in a tropical rain forest environment, *Environmental Pollution*, 135(1): 14354.
- Kujawinski, E. B., Reddy, C. M., Rodgers, R. P., Thrash, J. C., Valentine, D. L. & White, H. K. (2020). The first decade of scientific insights from the Deepwater Horizon oil release. *Nature Reviews Earth & Environment*.
- López, G. P. M., Gómez, P. M., & Duaso, A. I. H. (2016). HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAPs)(I): TOXICIDAD, EXPOSICIÓN DE LA POBLACIÓN Y ALIMENTOS IMPLICADOS/POLYCYCLIC AROMATIC

HYDROCARBONS (PAHS) I: TOXICITY, POPULATION EXPOSURE AND INVOLVED FOODS. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 10(1), 1.

- Lugo Hubp, J. I. (1985), "Morfoestructuras del fondo oceánico", *Boletín*, núm, 15, Instituto de Geografía, UNAM, México, 9-39.
- Maliszewska-Kordybach, B., Smreczak, B., Klimkowicz-Pawlas, A. 2009. Concentrations, sources, and spatial distribution of individual polycyclic aromatic hydrocarbons (HAPs) in agricultural soils in the Eastern part of the EU: Poland as a case study, *Science of The Total Environment*, 407(12): 3746-3753.
- Mastandrea, C., Chichizola, C., Ludueña, B., Sánchez, H., Álvarez, H., & Gutiérrez, A. (2005). Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores biológicos. *Acta bioquímica clínica latinoamericana*, 39(1), 27-36.
- Mateos-Jaso, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R. and Allende-Arandía, M. E., 2012. Variability of the thermohaline structure in the northern Veracruz coral reef system, Mexico. *Cont. Shelf Res.* 50-51, 30-40.
- Maul, G. A. (1977). The annual cycle of the gulf loop current. i. observations during a one-year time series. *Journal of Marine Research*, 35(1): 29–47.
- Mendoza-Alfaro, R. & Alvarex-Torres, P. (2012). Gulf of Mexico large marine ecosystem: resources at risk from climate change. In: Sherman, K., McGovern, G. (Eds.), *Frontline*
- Mille, G., Asia, L., Guiliano, M., Malleret, L., & Doumenq, P. (2007). Hydrocarbons in coastal sediments from the Mediterranean Sea (Gulf of Fos area, France). *Marine Pollution Bulletin*, 54(5), 566–575.

- Monreal Gómez, M.A. y SALAS DE LEÓN, D.A. (2004). Golfo de México, circulación y productividad. *Ciencias*, (076).
- Monreal-Gómez, M. A., Salas-de León, D. y Velasco-Mendoza, H. 2004. La hidrodinámica del Golfo de México. *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*. 135–162.
- Observations on Climate Change and Sustainability of Large Marine Ecosystems. United Nations Development Programme, New York, 135–169."
- Ochoa, J., Ferreira-Bartrina, V., Candela, J., Sheinbaum, J., López, M., Pérez-Brunius, P., Herzka, S. & Amon, R. M. (2021). Deep-water warming in the gulf of mexico from 2003 to 2019. *Journal*
- Oey, L.-Y. (2008). Loop Current and Deep Eddies. *Journal of Physical Oceanography*, 38(7), 1426–1449.
- Oey, L.-Y., and H.-C. Lee, 2002: Deep eddy energy and topographic Rossby waves in the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 3499–3527.
- Oey, L.-Y., Ezer, T., & Lee, H.-C. (2013). Loop Current, Rings and Related Circulation in the Gulf of Mexico: A Review of Numerical Models and Future Challenges. *Geophysical Monograph Series*, 31–56.
- of *Physical Oceanography*, 51(4): 1021–1035."
- Ojeda, E., Appendini, C. M. & Mendoza, E. T. (2017). Storm-wave trends in Mexican waters of the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(8): 1305–1317.

- Ortiz, R., Siebe, C., Díaz, G., Cram, S. (2007). Fuentes de hidrocarburos en suelos orgánicos. *Terra latinoamericana*, 25(2): 105-113.
- Pelletier, É., Ouellet, S., & Pâquet, M. (1991). Long-term chemical and cytochemical assessment of oil contamination in estuarine intertidal sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 22(6), 273–281.
- Pellon de Miranda, F., Marmol, A. M. Q., Pedroso, E. C., Beisl, C. H., Welgan, P., & Morales, L. M. (2004). Analysis of RADARSAT data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex, Gulf of Mexico, using the unsupervised semivariogram textural classifier (USTC). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3), 424–436.
- Pemex. Informe de Responsabilidad Social 2008- 2015. México. 2009-2013. [En línea] [semarnat.gob.mx: /conjuntob/ /archivos/pdf/06_biodiversidad/acuaticos/indicadores](http://semarnat.gob.mx/conjuntob/archivos/pdf/06_biodiversidad/acuaticos/indicadores).
- Pérez Brunius, P., Furey, H., Bower, A. S., Hamilton, P., Candela Pérez, J., García Carrillo, P., & Leben, R. R. (2018). Dominant circulation patterns of the Deep Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 48, 511-529.
- Pérez-Brunius, P., García-Carrillo, P., Dubranna, J., Sheinbaum, J. y Candela, J. 2013. Direct observations of the upper layer circulation in the southern Gulf of Mexico. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 85: 182–194.
- *Physical Oceanography*, 49(6): 1381–1401."

- 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. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(8): 5134–5149.
- Pulster, E. L., Gracia, A., Armenteros, M., Toro-Farmer, G., Snyder, S. M., Carr, B. E., Schwaab, M. R., Nicholson, T. J., Mrowicki, J. & Murawski, S. A. 2020. A First Comprehensive Baseline of Hydrocarbon Pollution in Gulf of Mexico Fishes. *Scientific Reports*, 10:6437
- Quintero-Marmol, A.M.; Miranda, F.P.; Goodman, R.; Bannerman, K.; Pedroso, E.C.; Rodriguez, M.H. (2005). Emanacion natural de Cantarell: Laboratorio natural para experimentos de derrames de petroleo. In *Proceedings of the International Oil Spill Conference (IOSC)*, Miami, FL, USA. 1039–1044.
- Reddy, C. M., Arey, J. S., Seewald, J. S., Sylva, S. P., Lemkau, K. L., Nelson, R. K., Camilli, R. (2011). Composition and fate of gas and oil released to the water column during the Deepwater Horizon oil spill. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(50), 20229–20234.
- Rieley, G., Collier, R.J., Jones, D.M., Eglinton, G., 1991. The biogeochemistry of Ellesmere Lake, UK I: source correlation of leaf wax inputs to the sedimentary record. *Org. Geochem.* 17,6: 901–912.
- Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., gallegos, A., & O'Brien, J. J. (2003). Isthmus of Tehuantepec wind climatology and ENSO signal. *Journal of Climate*, 16(15): 2628-2639.

- SALIOT, A. (1981). Natural hydrocarbons in sea water. In: Dursma E.K. & Dawson R. (Eds) Organic Chemistry. Elsevier, Amsterdam.
- Sammarco, P. W., Kolian, S. R., Warby, R. A. F., Bouldin, J. L., Subra, W. A., & Porter, S. A. (2013). Distribution and concentrations of petroleum hydrocarbons associated with the BP/Deepwater Horizon Oil Spill, Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 73(1): 129–143.
- Schiller, R. V., Kourafalou, V. H., Hogan, P., and Walker, N. D. (2011). The dynamics of the Misisippi River plume: Impact of topography, wind and offshore forcing on the fate of plume waters. *J. Geophys. Res.* 116:C06029.
- Schmitz, W. J. & McCartney, M. S. (1993). On the north atlantic circulation. *Reviews of Geophysics*, 31(1): 29–49.
- Scholz-Böttcher, Barbara M., Ahlf, Stefanie, Vázquez-Gutiérrez, Felipe, & Rullkötter, Jürgen. (2009). Natural vs anthropogenic sources of hydrocarbons as revealed through biomarker analysis: A case study in the southern Gulf of Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(1), 47-56.
- Sheinbaum, J., Athié, G., Candela, J., Ochoa, J. & Romero-Arteaga, A. (2016). Structure and variability of the yucatan and loop currents along the slope and shelf break of the yucatan
- Sheinbaum, J., Athié, G., Candela, J., Ochoa, J., and Romero-Arteaga, A. (2016). Structure and variability of the yucatan and loop currents along the slope and shelf break of the yucatan channel and campeche bank. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 76: 217–239.

- Sheinbaum, J., Candela, J., Badan, A. & Ochoa, J. (2002). Flow structure and transport in the yucatan channel. *Geophysical Research Letters*, 29(3): 10–1.
- Silva, T. R., Lopes, S. R. P., Spörl, G., Knoppers, B. A., & Azevedo, D. A. (2013). Evaluation of anthropogenic inputs of hydrocarbons in sediment cores from a tropical Brazilian estuarine system. *Microchemical Journal*, 109: 178–188.
- Siron, R., Pelletier, E., & Brochu, C. (1995). Environmental factors influencing the biodegradation of petroleum hydrocarbons in cold seawater. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 28(4).
- Snedaker, S. C., Glynn, P. W., Rumbold, D. G., & Corcoran, E. F. (1995). Distribution of n-alkanes in marine samples from southeast Florida. *Marine Pollution Bulletin*, 30(1), 83–89.
- Speight, J. G. (2019). *Handbook of industrial hydrocarbon proceses*. Gulf Profesional Publishing.
- Speight, J.G. (2015) *Handbook of Petroleum Product Analysis*. John Wiley & Sons, Hoboken, 182.
- Tobiszewski, M. & Namieśnik, J. 2012. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources, *Environmental Pollution*, 162: 11019.
- Vidal, V. M. V., Vidal, F. V. & Pérez-Molero, J. M. (1992). Collision of a loop current anticyclonic ring against the continental shelf slope of the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 97(C2): 2155.
- Vit, P. (2005). Productos de la colmena secretados por las abejas: Cera de abejas, jalea real y veneno de abejas. *Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael*

Rangel, 36(1), 35-42. Recuperado en 25 de julio de 2023, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-04772005000100006&lng=es&tlng=es.

- Vukovich, F. M. (2007). Climatology of ocean features in the Gulf of Mexico using satellite remote sensing data. *Journal of Physical Oceanography*, 37(3): 689–707.
- Wallace, L. (1996). Environmental exposure to benzene: an update. *Environmental Health Perspectives*, 104(suppl 6): 1129–1136.
- Wang, C., Wang, W., He, S., Du, J., & Sun, Z. (2011). Sources and distribution of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in Yellow River Delta Nature Reserve, China. *Applied Geochemistry*, 26(8), 1330–1336.
- Waś, E., Szczęśna, T., & Rybak-Chmielewska, H. (2014). Hydrocarbon Composition of Beeswax (*Apis Mellifera*) Collected from Light and Dark Coloured Combs. *Journal of Apicultural Science*, 58(2), 99–106.
- Weisel, C. P. (2010). Benzene exposure: An overview of monitoring methods and their findings. *Chemico-Biological Interactions*, 184(1-2): 58–66.
- Wilcke, W. (2000). SYNOPSIS Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (HAPs) in Soil — a Review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(3), 229–248.
- Wilcke, W. (2007). Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (HAPs) in soil. *Geoderma*, 141(3-4), 157–166.
- Wilcke, W., Amelung, W., Martius, C., Garcia, M. V. B., & Zech, W. (2000). Biological Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (HAPs) in the Amazonian Rain Forest. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(1), 27–30.

- Wilcke, W., Kraus, M., & Amelung, W. (2002). Carbon Isotope Signature of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (HAPs): Evidence for Different Sources in Tropical and Temperate Environments? *Environmental Science & Technology*, 36(16), 3530–3535.
- Wilson, R. D., Monaghan, P. H., Osanik, A., Price, L. C. & Rogers, M. A. (1974). Natural Marine Oil Seepage. *Science*, 184(4139), 857–865.
- Yunker, M. B., Macdonald, R. W., Vingarzan, R., Mitchell, R. H., Goyette, D., & Sylvestre, S. (2002). HAPs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic geochemistry*, 33(4), 489-515.
- Zamora, A.; Ramos, J. Y Arias, M. 2012. Efecto de la contaminación por hidrocarburos sobre algunas propiedades químicas y microbiológicas de un suelo de sabana. *Bioagro*, 24(1): 5-12.
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L. & O'Brien, J. J. (2003a). Cyclonic eddies northeast of the Campeche Bank from altimetry data. *Journal of Physical Oceanography*, 33(3): 623–629.
- Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Mateos-Jaso, A., Morey, S. L. & Martínez-López, B. (2014). The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years? *Atmosfera*, 27(3): 317–334.
- Zubizarreta Solá, A., Martínez Menéndez, J., Rivas Pérez, P., Gómez Iglesias, S. y Sanz Borrás, A. (2018). Revisión de la literatura sobre efectos nocivos de la

exposición laboral a hidrocarburos en trabajadores en ambiente externo. Medicina y Seguridad del Trabajo, 64(252), 271-294.