



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**Hidrocarburos Disueltos en Agua de Mar en el
Sur del Golfo de México**

T E S I S

Que para obtener el Título de

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

MARCOS ISRAEL MARTÍNEZ OVANDO



MÉXICO, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO

Presidente	Prof. Rodolfo Torres Barrera
Vocal	Prof. Víctor Manuel Luna Pabello
Secretario	Prof. Felipe Vázquez Gutiérrez
1er. Suplente	Prof. Hilda Elizabeth Calderón Villagomez
2do. Suplente	Prof. Alfonso Durán Moreno

Lugar donde se desarrolló este trabajo:

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
Laboratorio de Físicoquímica Marina.

Asesor del tema:

Dr. Felipe Vázquez Gutiérrez

Firma

Sustentante:

Marcos Israel Martínez Ovando

Firma

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por formarme profesionalmente y cambiarme la vida.

A la Prepa 5 por los buenos momentos que me brindo.

A la Facultad de Química mi segundo hogar.

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, lugar en donde realice este trabajo.

Al Laboratorio de Fisicoquímica Marina por la formación que me ha brindado.

Al Dr. Felipe Vázquez Gutiérrez por la oportunidad de hacer mi Tesis.

A PEMEX PEP-Región Marina Noreste y PEP-Región Marina Suroeste por hacer posible este trabajo.

Al proyecto UNAM:132.

Al Buque Oceanográfico "B/O Justo Sierra" por el trabajo de investigación que realiza y por los momentos extraordinarios que he pasado a bordo de él.

A mis compañeros y amigos del Laboratorio de Fisicoquímica Marina, de la Facultad de Química y de la Prepa.

A mis Hermanos por aguantarme como soy.

Y en especial a mis padres que siempre me han confiado en mi y me han apoyado en toda mi vida.

DEDICATORIA

El camino es largo y parece interminable, tropiezas, te caes y te levantas y sientes que no vas a llegar. La orilla se ve cada vez más lejos y te sumerges en aguas sin fondo; pero en esos momentos de oscuridad aparecen inspiraciones divinas... Ángeles terrenales... Personas maravillosas que te salvan y te empujan a seguir adelante en el difícil camino de la vida.

Llegas a una orilla, algunas veces maravillosa, otras inciertas y te tomas tu tiempo... A veces mucho tiempo... Pero hay más costas que explorar y conquistar y así emprendes en nuevo viaje que nos lleva a crecer y a ser cada día mejores; y no importa el cansancio, las caídas, las decepciones, hay que seguir y luchar por nuestras metas, por conseguir lo que queremos... Y cuando te hundas en la oscuridad y parezca que ya no te vas a levantar hay que encontrar ese faro que nos brinde su Luz y su Inspiración. Así y solo así comprenderemos el verdadero valor de la vida.

Marcos

A mis padres por darme el maravilloso placer de la vida. *Los amo.*

A mi Abuelita Cristina por sus 89 años y espero que nos dure muchos años más.

A mis hermanos Ivania, Efrén y Misael y a mis sobrinos Paco, Lis Ivan, Efrencito, al pequeño retoño Max y al que viene en camino.

A mis compañeros y amigos de laboratorio Edgar, Toño, Dany, Toni, Alex, Paty y Armando, Lilis, Raúl, Miriam, Ricardo, Arce, el Flyer y Dolores que me brindaron su apoyo en todo momento y compartimos muchos momentos divertidos.

A todas aquellas mujeres que fueron, son y seguirán siendo la fuente de inspiración de mi vida.

A mis amigos de la Secu y la Prepa: Andy, Lobo, Cepi, Saúl, Edson, Rilo, Alan, Erick, Jonathan, Mike; al May y demás que fueron y siguen formando parte de mi vida.

A mis amigos de la Fac: Carlos, Fer, el Maga, Rafa, Lore, Hebe, Miguel, la Güera, el Chou, el Resnik, Karla, Magali, Ivett, Rosangela y anexos.

A las niñas hermosas Erika y Jessica.

INDICE

1. RESUMEN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. INTRODUCCIÓN	3
3. CARACTERIZACIÓN DEL GOLFO DE MÉXICO	5
3.1. Importancia Económica del Golfo de México.	5
3.2. Efectos de las Actividades Humanas.	6
3.2.1. Contaminación por Desechos Domésticos.	6
3.2.2. Contaminación por Hidrocarburos del Petróleo.	6
4. GENERALIDADES DEL PETRÓLEO	9
4.1. Características de los Hidrocarburos.	9
4.2. Composición del Petróleo.	9
4.3. Origen de los Hidrocarburos en el Medio Acuático.	10
4.4. Clasificación de los Hidrocarburos.	11
4.4.1. Hidrocarburos Biogénicos.	11
4.4.2. Hidrocarburos Diagenéticos.	12
4.4.3. Hidrocarburos Antropogénicos.	12
4.5. Importancia de la Identificación y Cuantificación de los Hidrocarburos Disueltos y / o Dispersos en el Medio Acuático.	13
4.6. Límites Permisibles de los Hidrocarburos en el Medio Acuático.	13
4.7. Efectos de los Hidrocarburos en los Organismos Acuáticos.	15
4.8. Efectos de los Hidrocarburos en la Salud Humana.	16
5. ÁREA DE ESTUDIO	19
5.1. Caracterización Ambiental del Golfo de México.	19
5.2. Área de Estudio de las Campañas Oceanográficas.	20
5.2.1. Campaña Oceanográfica SGM-8.	20
5.2.2. Campaña Oceanográfica SGM-7.	22
5.2.3. Campaña Oceanográfica SGM-6.	23
5.2.4. Campaña Oceanográfica SGM-4.	23
5.3. Clima.	24
5.4. Temperatura.	24
5.5. Precipitación Pluvial.	25
5.6. Régimen de Vientos.	25
6. METODOLOGÍA	27
6.1. Procedimiento de Extracción.	27

6.2. Determinación de Hidrocarburos por Medio de Cromatografía de Gases.	29
6.3. Control de Calidad.	33
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
7.1. Campaña Oceanográfica SGM-8.	35
7.1.1. <i>Hidrocarburos Aromáticos.</i>	35
7.1.2. <i>Hidrocarburos Alifáticos.</i>	37
7.2. Campaña Oceanográfica SGM-7.	39
7.3. Campaña Oceanográfica SGM-6.	41
7.4. Campaña Oceanográfica SGM-4.	42
7.4.1. <i>Hidrocarburos Aromáticos.</i>	42
7.4.2. <i>Hidrocarburos Alifáticos.</i>	44
7.5. Comparación de los Niveles de Hidrocarburos por Medio de Diagramas de Cajas.	45
7.5.1. <i>Hidrocarburos Aromáticos Totales.</i>	45
7.5.2. <i>Hidrocarburos Alifáticos Totales.</i>	46
7.5.3. <i>Hidrocarburos Totales.</i>	47
8. CONCLUSIONES	49
9. BIBLIOGRAFÍA	50



1. RESUMEN

En la actualidad la explotación del petróleo representa la principal fuente de captación de divisas en México. Por la importancia económica que representa el petróleo para México y ante la demanda en el mercado exterior se ha intensificado su explotación, lo que ha convertido a nuestro país en el cuarto productor de petróleo en el mundo, con una producción diaria de 3 millones de barriles y exportaciones de 1.4 millones de barriles diarios.

El presente trabajo evalúa la variación de los Hidrocarburos Alifáticos, Aromáticos y Totales disueltos en la columna de agua del Sur del Golfo de México. El análisis se realizó comparando cuatro diferentes muestreos realizados en el Sur del Golfo de México durante varios años. Las Campañas Oceanográficas que se analizaron son la SGM-4, SGM-6, SGM-7 y SGM-8 que comprenden de 1999 a 2004.

Para el análisis de los hidrocarburos disueltos se utilizó la técnica de extracción líquido-líquido con Cromatografía de Gases/ Espectrometría de Masas.

Los niveles de Hidrocarburos Aromáticos variaron teniendo un máximo en la Campaña Oceanográfica SGM-7 y posteriormente una reducción para la Campaña SGM-8. En el caso de los Hidrocarburos Alifáticos hay una disminución bastante significativa de la Campaña Oceanográfica SGM-4 a la SGM-8. La variación en los niveles de Hidrocarburos Totales se presenta con un aumento de la Campaña SGM-4 a la SGM-7 teniendo un máximo en esta, posteriormente se observó una disminución en la campaña SGM-8. Se observó que el origen de los Hidrocarburos para las cuatro Campañas Oceanográficas analizadas proviene de la zona de plataformas marinas y de la desembocadura de ríos y lagunas.



OBJETIVO GENERAL:

- Determinar si los Niveles de Hidrocarburos Alifáticos, Aromáticos y Totales en el Sur del Golfo de México han disminuido.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Presentar los niveles de Hidrocarburos Alifáticos y Aromáticos disueltos en agua de mar de cada una de las Campañas Oceanográficas analizadas.
- Identificar las zonas de mayor concentración de Hidrocarburos Alifáticos y Aromáticos mediante el uso de mapas de Surfer.
- Evaluar el cambio en los niveles de Hidrocarburos Alifáticos, Aromáticos y Totales por medio de Diagramas de Cajas.



2. INTRODUCCIÓN

El Golfo de México es un maravilloso ejemplo de las interacciones entre el agua, el aire y la tierra, que hacen posible la vida en el planeta. Ninguno de sus ecosistemas de alta diversidad biológica funciona en forma aislada. Ambientes marinos, litorales y costeros, se encuentran estrechamente interconectados por un mismo flujo de energía. La grandiosidad de las corrientes caribeñas permiten el recambio de sus masas de agua, controlan sus temperaturas y sus salinidades, regulan el clima haciéndolo menos frío en el norte y creando las condiciones favorables para la proliferación de la vida desde sus ecosistemas templados y subtropicales, hasta los arrecifes coralinos, pastos marinos, lagunas costeras y estuarios, ríos, pantanos y manglares. La tenue y casi imperceptible acción de sus mareas, controla el ritmo de sus hábitats costeros, haciendo posible la existencia de millones de organismos que dependen de la materia orgánica transportada por sus flujos y reflujos. Gracias a la interacción entre el viento y el agua, la energía fluye a través del sistema océano-atmósfera-tierra y se distribuye en los diversos compartimientos de este gigantesco almacén calórico que es el Golfo de México (Toledo, 1998).

Las ciencias marinas y costeras han logrado reunir la información necesaria para comprender estas delicadas y complejas interacciones, sin embargo, aún no podemos enfrentar exitosamente el manejo integrado de los recursos de esta región estratégica debido a la sobre explotación y mal manejo de sus recursos que ha contribuido al deterioro de algunas zonas del Golfo de México.

Para México representa, junto con los golfos de California y de Tehuantepec, la zona más productiva entre sus recursos oceánicos y costeros. Sus cuencas hidrológicas abarcan más de dos tercios de la masa continental del territorio mexicano, las que vierten hacia el Golfo el 62 por ciento de la descarga fluvial del país. Aquí se concentran el 70 por ciento de sus ríos, estuarios, lagunas costeras y pantanos. El 90 por ciento del gas natural y más del 80 por ciento de los hidrocarburos se generan en las ricas plataformas continentales de la región. Sus pesquerías de aguas profundas y litorales representan el 40 por ciento de la producción nacional. En los estados costeros vive el 12 por ciento de su población, y por lo menos uno de cada cinco mexicanos dependerá directa o indirectamente de los recursos del Golfo hacia la mitad del siglo XXI (Toledo, 1998).

El Golfo de México es una de las cuencas de hidrocarburos más grandes del mundo, con una producción superior a las 400,000 toneladas métricas por día y sujeta a un intenso tráfico de buques petroleros que movilizan más de 5 millones de barriles diarios. Los buques arrojan al mar aproximadamente 7 millones de barriles al año por el lavado de sus tanques al que hay que sumar una cantidad importante, pero desconocido, de filtraciones naturales. Otras fuentes de posible contaminación para las costas del Golfo de México son el vertido de desechos municipales y la pesca comercial (Botello y Ponce, 1998).

Todo lo anterior hace suponer que el Golfo de México es receptor grandes cantidades de hidrocarburos antropogénicos que pueden afectar a todo su ecosistema. De aquí que análisis de la concentración de hidrocarburos disueltos y dispersos en la columna de agua sea de gran interés ya que este es el medio principal de transporte y distribución de hidrocarburos en los medios acuáticos.



Hoy en día es necesario realizar estudios que determinen el impacto ambiental que sufren las áreas costeras y las aguas continentales del Golfo de México debido a la explotación de recursos petroleros y al desarrollo industrial de la zona, ya que estos estudios servirán de gran apoyo para tomar decisiones a futuro que aseguren un desarrollo sustentable en esta región del país así como para implementar medidas preventivas para el control de la contaminación.

El presente trabajo pretende analizar la variación de los hidrocarburos alifáticos, aromáticos y totales en el sur del Golfo de México y contestar si hay disminución de hidrocarburos alifáticos, aromáticos y totales en la zona empleando para ello la técnica de extracción líquido-líquido con cromatografía de gases.



3. CARACTERIZACIÓN DEL GOLFO DE MÉXICO

3.1. Importancia Económica del Golfo de México.

La economía humana del Golfo de México esta basada en la extracción, procesamiento y distribución de hidrocarburos; en la actividad de los complejos portuarios industriales y comerciales, las pesquerías y en las actividades agropecuarias y turísticas.

El Golfo de México es una región sometida a la influencia de dos terceras partes de la masa continental de Estados Unidos, lo que la convierte en un gigantesco vertedero natural de los desechos de la potencia industrial más importante del mundo. Por otra parte, es una cuenca cerrada que se encuentra expuesta a la continua influencia oceánica, a través de las corrientes caribeñas que se introducen por el canal de Yucatán. Esto la convierte en un receptor natural de una amplia gama de sustancias contaminantes vertidas al medio marino que hacen del Golfo de México una región altamente vulnerable al efecto de la actividad humana en particular a las relacionadas con la producción y transporte de hidrocarburos (Botello *et al.*, 1992).

En el Golfo de México se localizan algunas de las más grandes provincias petroleras del mundo, cuyos recursos según estudios geológicos se estiman entre 2.24 y 21.99 billones de barriles de petróleo crudo y de 5.48 a 44.40 tct de gas natural (Foote *et al.*, 1983). Así el Golfo de México no solo es la región de mayor importancia en la producción y procesamiento de hidrocarburos en el Continente Americano sino que se trata también de la mayor área de perforaciones en la plataforma continental del mundo.

Para 2002 las instalaciones de la Regiones Marinas localizadas en la Sonda de Campeche, produjeron (2604 millones de barriles diarios) 82 por ciento del petróleo crudo de México y el 32 por ciento de gas natural con 1451.8 millones de pies cúbicos diarios; en tanto, que del petróleo crudo, 16 por ciento en las instalaciones de la Región Sur (conformada por Tabasco y Chiapas) y en la Región Norte (que comprende los estados de Veracruz, Tamaulipas, Nuevo León y San Luis Potosí) el 2 por ciento restante (PEMEX-PEP, 2004).

En la actualidad, aproximadamente 5 millones de barriles son transportados diariamente a través del área del Gran Caribe y de estos casi 3 millones son movilizados en el área del Golfo de México, lo cual genera un intenso tráfico de buques-tanque en nuestras costas. Cabe mencionar que la producción de hidrocarburos ha sido ascendente desde 1975 hasta llegar a un nivel de 3.0 millones de barriles por día, lo cual aumenta la probabilidad de derrames accidentales asociados a las intensas actividades de extracción y manejo del petróleo cuando no se toman medidas preventivas necesarias para la protección del ambiente marino (Botello *et al.*, 1992).

No solo las actividades industriales, a partir de la extracción, el procesamiento y el transporte de hidrocarburos amenazan el ecosistema del Golfo de México sino también el desarrollo agropecuario, los procesos acelerados de urbanización, las explotaciones turísticas y la expansión de complejos portuarios comerciales son factores de tensión sobre ambientes de importancia ecológica de la región.



3.2. Efectos de las Actividades Humanas.

3.2.1. *Contaminación por Desechos Domésticos.*

La contaminación marina se define como “la introducción, directa o indirecta, de sustancias o energéticos en el medio marino (incluyendo los estuarios, ríos y lagunas), la cual daña los recursos vivos, pone en peligro la salud humana, altera las actividades marinas, entre ellas la pesca, y reduce el valor recreativo y la calidad del agua del mar” (Joint Group of Experts on the Scientifics of Marine Pollution: GESAMP, 1977).

La contaminación marina y costera causada por los desechos domésticos y urbanos es, en general, el problema más común en toda la región mexicana del Golfo de México y que asocia a todas las grandes ciudades como Tampico, Veracruz, Coatzacoalcos, Villahermosa y Campeche debido a la ausencia o ineficiencia de las plantas de tratamiento de aguas negras. En todas las ciudades, la descarga directa de los desechos municipales e industriales ha dado como resultado condiciones potencialmente peligrosas para la salud humana y para el ambiente marino.

De manera general puede decirse que el vertimiento de desechos sólidos en las zonas costeras provocan tres tipos de efectos:

- Físicos, como cambios de la topografía del fondo, en la circulación y el incremento de la turbidez.
- Químicos, como el lavado de los depósitos, adición de nutrientes y otras sustancias, la reacción con partículas suspendidas, disminución del oxígeno disuelto.
- Biológicos, como la creación de nuevos hábitats, reducción de la fotosíntesis, cubrimiento de bentos, destrucción de comunidades planctónicas y presencia de organismos patógenos.

3.2.2. *Contaminación por Hidrocarburos del Petróleo.*

Entre los contaminantes que se vierten al mar en grandes cantidades sin ningún tipo de control esta el petróleo crudo y sus derivados que durante mucho tiempo han representado la fuente principal de energía para el ser humano ya que hasta el momento no se ha encontrado ningún sustituto que satisfaga las necesidades energéticas que demanda la sociedad día con día.

Debido al importante papel que desempeña nuestro país como unos de los principales productores y exportadores de petróleo y de sus productos hacia Latinoamérica, Estados Unidos, Canadá, Europa y Asia, la contaminación marina por petróleo es el problema de mayor importancia ecológica de nuestros días.

Las descargas y el lavado de los buques-tanque son, en la actualidad la mayor fuente de contaminación por petróleo en los ambientes costeros y marinos y son responsables en buena parte de la presencia de elevadas concentraciones de breas y alquitranes en las playas del Golfo de México.



De manera general, la contaminación marina por petróleo esta asociada a las siguientes actividades:

- Producción de petróleo en alta mar
- Transportación marítima y submarina
- Actividades de exploración y explotación
- Operaciones de embarque, almacenamiento, lavado de buques-tanque y limpieza de los mismos
- Descargas a partir de fuentes industriales y municipales de ciudades costeras
- Accidentes en las operaciones, como rupturas en los oleoductos submarinos, derrames y explosiones de plataformas y accidentes de buques-tanque.
- Acarreo atmosférico de los hidrocarburos.

En México la industria petrolera en su conjunto ha tenido un gran impacto negativo en materia ambiental. Por la amplia gama de productos derivados del petróleo, no ha sido posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la fase de explotación hasta la obtención de los petroquímicos básicos (Vázquez *et al.*, 1994).

No es fácil calcular la cantidad y el origen de hidrocarburos del petróleo que llega al medio marino. Actualmente se estima en 3.2 millones de toneladas métricas anuales los aportes totales de hidrocarburos al medio marino y con mucho la más grande contribución, proviene de las fuentes terrestres principalmente de la descarga de desechos industriales y municipales (Tabla 1). Los derrames accidentales y los provocados por buques-tanque, junto con la exploración y la producción en alta mar introducen aproximadamente 0.47 millones de toneladas métricas/año, siendo este valor relativamente bajo si se considera que la producción mundial anual es de 3 billones de toneladas métricas, cuya mitad se transporta por vía marítima. Los derrames accidentales por buques-tanque vierten 400,000 toneladas anuales de hidrocarburos al medio marino, de los cuales la gran mayoría (75%) ocurren en puerto durante operaciones de carga y descarga. Finalmente, los aportes terrestres se refieren a descargas de las aguas utilizadas en los diferentes procesos de refinación del petróleo crudo y otras industrias. Estas descargas son a través de emisores directamente, o por medio del aporte de los ríos adyacentes.

Tabla 1. Principales fuentes de hidrocarburos en el ambiente marino

Fuentes de Contaminación	Ton metricas/año	%
Descargas urbanas e industriales	1.184	37.0%
Transporte atmosférico	0.288	9.0%
Accidentes de buques-tanque	0.384	12.0%
Transportación marítima	1.056	33.0%
Aportes naturales	0.224	7.0%
Exploración y producción	0.064	2.0%
Total	3.2	100.0%



Por todo lo anterior se espera encontrar niveles de hidrocarburos superiores en las zonas costeras que los niveles que se pudiesen encontrar en mar abierto siendo así las zonas costeras las más castigadas por estos contaminantes.

Debido a la gran interacción entre la columna de agua, los organismos y los sedimentos, estos hidrocarburos son retenidos en los tejidos de los organismos y en la columna de los sedimentos, almacenándose por períodos considerables, debido a su gran estabilidad química.

Por la importancia económica que representa el petróleo en México y, ante la demanda en el mercado exterior se ha intensificado su explotación lo cual representa un mayor peligro en cuanto a posibles potenciales de contaminación del ambiente por la emisión de humos, polvos, gases y descarga de aguas residuales generadas durante la perforación de pozos petroleros, por la extracción de líquidos, por su refinación y producción de petroquímicos.

En la actualidad México se ha convertido en el cuarto productor de petróleo en el mundo. Por tal motivo especialmente las costas del Golfo de México están expuestas al enorme tráfico de buques-petroleros, y al incremento gradual de la exploración y explotación de la plataforma continental, principalmente en Campeche lo cual contribuye día con día a que se derramen pequeñas o grandes cantidades de petróleo y sus derivados al mar, alterando la estabilidad de los ecosistemas costeros. Debido a que uno de los principales medios de transporte de estos contaminantes es el agua se deben realizar constantes estudios que vigilen la cantidad y variedad de contaminantes que son disueltos o dispersos en este medio, principalmente los hidrocarburos provenientes de fuentes naturales o artificiales.



4. GENERALIDADES DEL PETRÓLEO

4.1. Características de los Hidrocarburos.

Los hidrocarburos son compuestos formados por átomos de carbono e hidrógeno, de gran abundancia en la naturaleza, presentes principalmente en el petróleo (Chappin y Summerlin, 1988; PEMEX, 1988).

Los principales componentes del petróleo son los hidrocarburos, los cuales representan del 50-98% en relación a la composición total (Clark y Brown, 1977). El Carbono (80-87%) y el Hidrógeno (10-15%) son los principales y más abundantes elementos en el petróleo, aunque hay otros elementos como el Azufre (0-10%), Nitrógeno (0-1%) y el Oxígeno (0-5%) que están presentes en cantidades menores ya sea en su forma elemental o bien como constituyentes heterocíclicos y grupos funcionales. También se reportan algunos metales trazas como Vanadio, Níquel, Hierro, Aluminio y Cobre y cuya concentración varía dependiendo del tipo de petróleo crudo y la región donde se formó.

4.2. Composición del Petróleo.

Dependiendo del número de átomos de carbono y de la estructura de los hidrocarburos que integran el petróleo, se tienen diferentes propiedades que los caracterizan y determinan su comportamiento como combustibles, lubricantes, ceras o solventes. En la tabla 2 se presenta la composición promedio de un petróleo crudo según Koons (1973).

Tabla 2. Composición típica de un petróleo crudo (Koons, 1973).

Componente	Porcentaje
Por Tamaño Molecular	
Gasolinas (C ₅ -C ₁₀)	30.0%
Kerosenas (C ₁₀ -C ₁₂)	10.0%
Destilados Ligeros (C ₁₂ -C ₂₀)	15.0%
Destilados Pesados (C ₂₀ -C ₄₀)	25.0%
Residuos Pesados	20.0%
Por Composición	
Hidrocarburos Saturados (Alcanos Lineales y Ramificados)	30.0%
Hidrocarburos Nafténicos (Cicloalcanos)	50.0%
Hidrocarburos Aromáticos	15.0%
Compuestos Polares (Nitrógeno, Azufre, Oxígeno)	5.0%

Así, los hidrocarburos del petróleo consisten de compuestos saturados de cadena lineal (alcanos), compuestos alicíclicos (cicloalcanos) y compuestos aromáticos conteniendo cuando menos un anillo bencénico en su estructura molecular.



Los alcanos a su vez pueden ser saturados de cadena lineal (parafinas) o isoalcanos de cadena ramificada (isoparafinas) con la fórmula general (C_nH_{2n+2}) y con átomos de carbono desde C_1 hasta C_{40} y en ocasiones se han reportado cadenas con más de C_{60} átomos de carbono.

Por encima de 13 átomos de carbono el grupo más importante de cicloalcanos (naftenos) son los hidrocarburos isoprenoides conformados por unidades de isopreno, siendo el Pristano (C_{19}) y el Fitano (C_{20}) los más abundantes en los petróleos, aunque se han reportado series isoprenoides de hasta 40 átomos de Carbono.

Los alcanos alicíclicos consisten de compuestos en los cuales todos o algunos de los átomos de Carbono están arreglados molecularmente formando anillos. La gran mayoría de estos compuesto cíclicos contienen una serie de constituyentes de importancia menor y que a semejanza de los isoprenoides también están formados por precursores específicos ya sea de plantas o animales (Posthuma, 1977) y además son empleados como *marcadores moleculares* de gran uso e importancia en estudios geoquímicos y del comportamiento de derrames (Albaigés y Albrecht, 1979).

Los hidrocarburos aromáticos son usualmente menos abundantes que los saturados y contienen uno o más anillos bencénicos íntimamente ligados o conectados en su estructura molecular, estos pueden presentarse como no-sustituídos o bien presentar una sustitución en un átomo de Hidrógeno por grupos metilo, denominándose a este proceso *alquilación* y la cual se da con mayor grado en los hidrocarburos aromáticos de dos (naftalenos) o tres (antraceno y fenantreno) anillos bencénicos. El grupo de los hidrocarburos aromáticos policíclicos lo conforman aquellos compuestos cuya estructura molecular se origina por la unión de 3 o más anillos bencénicos siendo ejemplos de éstos: pireno, criseno, benzoantraceno, benzopireno, benzofluoreno, benzofluoranteno y perileno.

Además hay hidrocarburos con presencia de azufre, nitrógeno y oxígeno formando familias bien caracterizadas, y un contenido menor de otros elementos. Al aumentar el peso molecular de los hidrocarburos las estructuras se hacen verdaderamente complejas y difíciles de identificar químicamente con precisión. Un ejemplo son los asfaltenos que forman parte del residuo de la destilación al vacío; Estos compuestos además están presentes como coloides en una suspensión estable que se genera por el agrupamiento envolvente de las moléculas grandes por otras cada vez menores para constituir un todo semicontinuo (IMP, 2002).

4.3. Origen de los Hidrocarburos en el Medio Acuático.

Las fuentes por las cuales los hidrocarburos son introducidos al ambiente marino son numerosas y el número de los componentes individuales en los diferentes tipos de petróleo es muy grande, esto crea grandes retos para su identificación y caracterización. También otro problema surge debido a la alteración del petróleo, ya sea por mecanismos fisicoquímicos o bien por efectos de los microorganismos que están presentes en la columna de agua o los sedimentos. Así la composición química de los petróleos de las



diferentes regiones productoras, y aún los provenientes de una misma región varían ampliamente, ya que contienen miles de diferentes compuestos químicos originados y ensamblados de manera distinta durante su formación geoquímica.

Los contaminantes presentes en el medio marino pueden ser divididos en distintas categorías: Biogénicos, Diagenéticos y Antropogénicos. Los primeros son productos de procesos naturales; en esta categoría están componentes no refinados del petróleo, metales pesados como el mercurio, el plomo y el cadmio y sustancias nutrientes derivadas del nitrógeno y fósforo. Los segundos son creados por la acción microbiana o por procesos químicos.

Los contaminantes artificiales son aquellos que no se presentan naturalmente, sino que han sido sintetizados por el hombre como son ciertos productos refinados del petróleo, hidrocarburos halogenados como el DDT y los bifenilos policlorinados (PCB's), plásticos, detergentes y elementos radioactivos ya que no existen concentraciones naturales de ellos, la sola presencia de estas sustancias en los estuarios y zonas costeras indica contaminación (Centro de Ecodesarrollo, 1981).

4.4. Clasificación de los Hidrocarburos.

4.4.1. *Hidrocarburos Biogénicos.*

Los hidrocarburos de origen biológico se encuentran en gran parte de los organismos marinos y en todos los sedimentos recientes. Afortunadamente existen diferencias de composición y estructura entre estos hidrocarburos y los derivados del petróleo y así es posible distinguirlos claramente (Clark y Blumer, 1967).

Estos son sintetizados por casi todas las plantas, animales terrestres y marinos, incluyendo la micro biota, bacterias, plancton marino, diatomeas, algas y plantas superiores (Bedair y Al-Saad, 1992). La síntesis de este tipo de hidrocarburos está controlada por rutas metabólicas, lo cual trae como resultado mezclas de compuestos de limitada complejidad estructural relacionada directamente con la función biológica especificada.

Las características de los hidrocarburos biogénicos son:

- Los formados recientemente exhiben un alto nivel de n-alcenos de número impar.
- Algunas especies marinas principalmente del fitoplancton sintetizan un número limitado de hidrocarburos, sobretodo los alcanos de número impar en el rango del C₁₅ al C₂₁.
- La vegetación terrestre y el sargazo marino producen cadenas de n-alcenos en la región del C₂₃ al C₃₃ con carbonos dominantes del C₂₁ al C₂₉.
- Los pastos de pantano y marismas producen alcanos con carbonos típicos del C₃₃, los cuales están asociados a las ceras que cubren a las hojas de los vegetales terrestres superiores.



- El Pristano (C_{19}) es un componente típico de los copépodos calanoides y también de algunos peces.
- Compuestos del tipo aromático no se presentan frecuentemente o al menos en proporciones significativas (Bedair y Al-Saad, 1992).

Otros tipos de compuestos que también han sido determinados en organismos marinos incluyen a ciertos hidrocarburos triterpenoides (Hopanos) y naftenos con uno a tres anillos (Ourisson *et al.*, 1979). Se reportan también biosíntesis de hidrocarburos aromáticos policíclicos principalmente por bacterias marinas y terrestres y plantas superiores (Borneff *et al.*, 1968).

4.4.2. Hidrocarburos Diagenéticos.

Las moléculas biogénicas precursoras como son los terpenos, esteroides pigmentos carotenoides entre otros, pueden ser alterados después de su deposición en los sedimentos, principalmente por la acción microbiana o bien por procesos químicos originando de esta manera una amplia variedad de nuevos compuestos químicos.

Los constituyentes primordiales de los hidrocarburos diagenéticos incluyen hidrocarburos alifáticos, cicloalcanos, esteroides, hidrocarburos aromáticos policíclicos y triterpenos pentacíclicos. Uno de los grupos más significativos de esta rama es el de los aromáticos policíclicos, algunos de los cuales también están presentes en el petróleo y otras fuentes de hidrocarburos como gasolinas y kerosenos.

4.4.3. Hidrocarburos Antropogénicos.

Son aquellos que son introducidos como resultado de cualquier tipo de actividad humana. Los hidrocarburos provenientes de fuentes antropogénicas poseen una amplia variedad de compuestos ya que se originan por medio de múltiples actividades (industriales, municipales, petroleras) y se introducen al ambiente por varias rutas (lodos de dragado, lodos de plantas de tratamiento, cenizas, desechos industriales y desechos municipales y derrames accidentales). Su composición es mixta, ya que se presentan hidrocarburos provenientes del petróleo, así como los que se forman por el proceso de combustión.

Los efluentes municipales y las descargas de refinерías, complejos petroquímicos y otras industrias, constituyen los mayores aportes a la contaminación por hidrocarburos en las áreas costeras, y una fuerte proporción de la carga total de estos hidrocarburos son sin duda los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's) que son compuestos orgánicos que sólo contienen hidrógeno y carbono dispuestos en forma de dos o más anillos de benceno fusionados, con grupos substituidos, posiblemente unidos, a uno o más anillos, dichos compuestos se derivan de la quema incompleta (pirolisis) de combustibles fósiles o de materia orgánica, y se localizan en áreas marinas y estuarino-lagunares disueltos en agua, acumulados en los sedimentos, flora y fauna de los mismos.



Durante mucho tiempo y hasta hace poco, nadie se preocupaba por los residuos generados por las diferentes actividades humanas, dando por hecho que la naturaleza limpiaba todo aquello que contaminaba al ambiente, pero según fueron cambiando tanto la composición como la naturaleza de los residuos, y al aumentar su cantidad y complejidad, esta capacidad (degradativa y amortiguadora) empezó a alterarse (Gutiérrez, 1990). Debido a lo anterior, es necesario realizar un estudio completo de los efectos que causan estos residuos al ambiente marino y en base a los resultados tomar medidas de protección y conservación para mitigar los efectos negativos provocados por los hidrocarburos antropogénicos.

4.5. Importancia de la Identificación y Cuantificación de los Hidrocarburos Disueltos y / o Dispersos en el Medio Acuático.

El agua es un medio de transporte en dirección horizontal y vertical, principalmente, para sustancias menos adsorbentes y más polares como es el caso de los alcoholes seguido por los aromáticos y finalmente los alifáticos (Tölgyessy, 1993).

Los hidrocarburos son compuestos no polares o de baja polaridad por lo que son poco solubles en el agua. Los (PAH's) son los más solubles y estables químicamente por lo que sus tiempos de residencia son mayores que los hidrocarburos alifáticos (Handbook, 2002).

Las investigaciones de los (PAH's) en el ambiente acuático es muy importante, a si como la parte de valoración de la calidad del medio ambiente que determina el estado de contaminación y los impactos probables que pueden causar a los ecosistemas (Kennicutt *et al.*, 1994., Fernández *et al.*, 1997). Los (PAH's) son de preocupación especial porque ellos son extensamente distribuidos en el ambiente y muchos de ellos tienen propiedades tóxicas y carcinogénicas (Youngblood y Blumer, 1975., Lake, 1979., Venkatesan y Kaplan, 1982; Homan, 1984., Pruell y Quinn, 1985).

La presencia de los PAH's en la columna de agua, tejidos de los organismos y los sedimentos resientes, es una prueba evidente de que las actividades humanas descargan sus desechos a la red hidrológica desde donde son conducidos, primero hasta los sistemas lagunares y estuarinos y posteriormente al océano costero, ya que ninguno de este tipo de hidrocarburos es de origen biogénico; es decir que no pueden ser formados a través de mecanismos biológicos y / o bioquímicos (Centro de Ecodesarrollo, 1981).

4.6. Límites Permisibles del los Hidrocarburos en el Medio Acuático.

Los PAHs se consideran compuestos orgánicos persistentes (COPs), por lo que pueden permanecer en el medioambiente durante largos periodos de tiempo sin alterar sus propiedades tóxicas. Debido a sus propiedades tóxicas y efectos carcinogénicos, dieciséis PAH's son considerados como contaminantes prioritarios por la EPA, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comunidad Económica Europea (CEE) (Menzie *et al.*, 1992).



En nuestro país no existen normas con respecto a límites permisibles de hidrocarburos en el ambiente (suelo, agua y aire), por lo que se ha recurrido a referencias de organismos internacionales (Canadá, Países Bajos y Estados Unidos). En los Estados Unidos, cada gobierno estatal ha desarrollado sus propios límites permisibles, los cuales fueron definidos de acuerdo a una evaluación de riesgo (Saval, 1995). En México, la PROFEPA ha manejado criterios de limpieza desarrollados por el Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados conformado por esta dependencia (Tabla 3) (Profepa, 1999).

Tabla 3. Límites permisibles para PAH's establecido por Canadá y los Países Bajos y Criterios de Limpieza Desarrollados por la PROFEPA.

Fuente	Parámetro	Suelo 1 (mg/kg)	Suelo 2 (mg/kg)	Suelo 3 (mg/kg)	Agua (µg/L)
PROFEPA	HTP	1000	1000	2000	---
	Benzo(a)pireno	0.08	0.08	0.75	---
	Benzo(a)antraceno	0.8	0.8	7.5	---
	Benzo(b)fluoranteno	0.8	0.8	7.5	---
	Benzo(k)fluoranteno	8	8	75	---
	Criseno	80	80	750	---
Canadá	Benzo(a)antraceno	0.1	1.0	10.0	0.01
	Benzo(a)pireno	0.1	1.0	10.0	0.01
	Benzo(a)fluoranteno	0.1	1.0	10.0	0.01
	Benzo(b)fluoranteno	0.1	1.0	10.0	---
	Dibenzo(a,h)antraceno	0.1	1.0	10.0	0.01
	Indeno(1,2,3-c,d)	0.1	1.0	10.0	0.01
	Naftaleno	0.1	5.0	50.0	0.1
	Fenantreno	0.1	5.0	50.0	0.2
	Pireno	0.1	10.0	100.0	0.2
PAÍSES BAJOS	Naftaleno	5	---	---	7.0
	Fenantreno	10	---	---	2.0
	Antraceno	10	---	---	2.0
	Fluoranteno	10	---	---	1.0
	Criseno	5	---	---	0.5
	Benzo(a)antraceno	5	---	---	0.5
	Benzo(a)pireno	1	---	---	0.2
	Benzo(k)fluoranteno	5	---	---	0.5
	Indeno(1,2,3-c,d)pireno	5	---	---	0.5
	Benzo(g,h,i)perileno	10	---	---	1.0
	HPA total	20	---	---	10.0

HTP: Hidrocarburos totales de petróleo.

Suelo 1: Se refiere a uso agrícola. Suelo 2: De uso residencial / recreativo. Suelo 3: De uso industrial (PROFEPA, 1999).



4.7. Efectos de los Hidrocarburos en los Organismos Acuáticos.

Los diversos ecosistemas reciben petróleo, en cantidades diversas, de forma natural, desde hace millones de años. Por esto es lógico que se encuentren muchos microorganismos capaces de metabolizar el petróleo y que sea frecuente el que muchos seres vivos sean capaces de eliminar el absorbido a través de la cadena alimenticia.

El petróleo en concentraciones bajas, aproximadamente de $0,1\mu\text{g/g}$, retarda la división celular y el crecimiento del plancton. En concentraciones superiores a $1,0\mu\text{g/g}$ producen la muerte de gran cantidad de organismos fitoplanctónicos, así como de larvas y huevos de peces. En los peces parecen tener efectos mecánicos, ya que al depositarse sobre las branquias, impide el intercambio gaseoso y los peces mueren por asfixia.

Los alcanos en concentraciones bajas producen anestesia y narcosis a los organismos acuáticos, mientras que en altas concentraciones producen daño celular y la muerte. Los naftenos o ciclo parafinas interfieren con los procesos biológicos de los organismos marinos como búsqueda de alimentos, selección del hábitat y atracción sexual (Albert, 1990).

Tanto moluscos como crustáceos y peces pueden acumular hidrocarburos derivados del petróleo en los tejidos. Las evidencias sugieren que los hidrocarburos aromáticos se acumulan rápidamente y en concentraciones mayores que los alcanos, a la vez se retienen por periodos más largos en los tejidos del animal. Los moluscos captan los hidrocarburos del petróleo más lentamente que los crustáceos, pero los acumulan en altas concentraciones y los liberan más lentamente (Anderson *et al.*, 1974).

Los ostiones, almejas, mejillones, que son moluscos bivalvos de importancia comercial que ingieren los hidrocarburos que se encuentran presentes en la columna de agua, ya sea disueltos o adsorbidos sobre partículas en suspensión durante su alimentación (filtración), y los bioacumulan en sus tejidos grasos, pudiendo alcanzar de esta manera niveles tóxicos, (Clement *et al.*, 1980). Así la introducción de hidrocarburos en la cadena trófica puede provocar desequilibrios ecológicos y / o la transmisión de sustancias tóxicas al hombre.

El grupo de los moluscos bivalvos ha sido el de los más evaluados en los ecosistemas costeros del Golfo de México, en particular la especie *Crassostrea virginica* la cual representa un recurso pesquero litoral importante en esta región.

Toledo (1988) realizó una recopilación de datos obtenidos a través de una investigación multidisciplinaria en donde se observa que 19 especies de organismos estuarinos, incluyendo peces, crustáceos y moluscos destinados al consumo humano, presentaron niveles de hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH's) con niveles promedio de 6.0 ppm (peces), 1.8 ppm (crustáceos) y 7.5 ppm (moluscos). Los compuestos aromáticos identificados fueron: el benzo(a)pireno, criseno y pireno, cuyo potencial carcinogénico y riesgo para la salud humana es muy alto.



Un gran número de factores, los cuales actúan solos o combinados, gobiernan los efectos del petróleo o sus derivados sobre la vida marina. Así, los daños biológicos dependen principalmente de:

- a) El tipo de petróleo derramado, su composición y características en especial el contenido de compuestos aromáticos de bajo peso molecular, los cuales son considerados como los más tóxicos entre los hidrocarburos. En la práctica se ha confirmado que ejercen mayor toxicidad los compuestos de refinación del petróleo que el petróleo bruto (Moore, 1974).
- b) La concentración a la cual los organismos se encuentran expuestos y la duración de la exposición.
- c) El grado de intemperismo del petróleo.
- d) La forma en que se halle; ya sea en solución, en emulsiones, en suspensión o bien disperso o adsorbido en materia orgánica.
- e) La especie o grupo de individuos de que se trate (plancton, necton o bentos).
- f) El estado de vida de las especies, ya sean formas larvarias, juveniles o adultas.
- g) Presiones ambientales naturales, impuestas por condiciones climáticas o fluctuaciones en la temperatura del agua, salinidad y otros parámetros oceanográficos, principalmente corrientes y acción de las olas.
- h) Los procedimientos de limpieza del petróleo, principalmente si durante éstos se emplean dispersantes.

4.8. Efectos de los Hidrocarburos en la Salud Humana.

Algunos de los hidrocarburos presentes en el crudo tienen una conocida toxicidad para el ser humano, entre estos compuestos destacan por sus efectos en la salud los hidrocarburos aromáticos simples y los policíclicos (PAH's).

Los efectos tóxicos de los hidrocarburos sobre los organismos vivos dependen de la concentración y el tiempo de exposición. Los compuestos más tóxicos son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (Jenssen, 1994). Estos son un grupo de compuestos orgánicos que exhiben fuertes propiedades tóxicas, carcinogénicas y mutagénicas. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos más comunes son: Naftaleno, Antraceno, Acenafteno, Acenaftileno, Fluoreno, Fenantreno, Fluoranteno, Pyreno, Cryseno entre otros. Se encuentran en altas concentraciones en muchos sitios industriales particularmente aquellos asociados con la producción de petróleo, gas e industrias de preservación de maderas (Wilson y Jones, 1993).

Dependiendo de la composición del petróleo estos pueden encontrarse en mayor o menor cantidad. En el caso de los petróleos ligeros, la presencia de los hidrocarburos aromáticos volátiles es mayor.



La toxicidad de los hidrocarburos para los seres humanos es inversamente proporcional a la viscosidad. La inhalación de productos de alta viscosidad como grasas y aceites (150-250 centipoises) no presenta riesgo, no obstante, los productos de menos de 30 centipoises de viscosidad afectan al pulmón, causando neumonitis. Los hidrocarburos tienen diversos efectos en la salud humana dependiendo del medio por el cuál sean introducidos, estos medios pueden ser por ingesta, por aspiración o por contacto.

- ***Ingesta:***

La ingestión de productos de destilación del petróleo en cantidades de 1mL/kg de peso corporal ocasiona vómito, irritación de las membranas mucosas, depresión del sistema nervioso central, cianosis, taquicardia, albuminuria, hematuria, daños hepáticos y arritmias cardíacas. La ingestión de 10 mL/kg de peso corporal produce la muerte (Albert, 1990).

La ingestión de hidrocarburos puede afectar 3 sistemas orgánicos fundamentales: pulmón, aparato gastrointestinal y sistema nervioso.

- a) Pulmón, los síntomas respiratorios son: tos, ahogo, sibilancias y ronqueras. Síntomas de distress respiratorio como tos persistente, cianosis, retracción intercostal, taquipnea. Generalmente se inician inmediatamente después de la ingesta de hidrocarburos.
- b) Generalmente son irritantes de boca, faringe e intestino. Se han observado vómitos espontáneos hasta en el 40% de los pacientes. Muchos presentan nauseas, malestar intestinal, distensión abdominal, eructos y flatulencia.
- c) SNC (sistema nervioso central), es inusual la aparición de síntomas como letargia, aturdimiento estupor y coma (conviene descartar en este caso la presencia de aditivos tóxicos como insecticidas o hidrocarburos aromáticos, o bien la posibilidad de una ingesta intencional de gran volumen, o bien la presencia de una neumonía por aspiración grave).

- ***Aspiración:***

El pulmón es el principal órgano afectado por la toxicidad de los hidrocarburos. La toxicidad pulmonar aparece fundamentalmente por aspiración. La toxicidad pulmonar del hidrocarburo aspirado es el resultado de la inhibición de la actividad surfactante y de la lesión directa de los capilares y el tejido pulmonar.

El riesgo de aspiración depende de las propiedades de viscosidad, volatilidad, y tensión superficial del hidrocarburo. El mayor riesgo de aspiración corresponde a un producto de baja viscosidad, baja tensión superficial y gran volatilidad.

- ***Contacto:***

Dermatitis de contacto: produce irritación de la piel y picores, la piel en este estado facilita la absorción de los componentes del petróleo.



Se ha asociado un aumento del riesgo de cáncer de piel y de pulmón con la presencia de hidrocarburos poliaromáticos (PAH's). Dieciséis PAH's (naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoreno, benzo(k)fluoreno, benzo(a)pireno, indeno(1,2,3-cd)pireno, dibenzo(ah)antraceno y benzo(ghi)perileno) son considerados como contaminantes prioritarios por la EPA, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comunidad Económica Europea (CEE) debido a sus efectos cancerígenos (Menzie *et al.*, 1992).

Para medir el daño que pueden causar al ser humano algunas sustancias químicas entre ellas los hidrocarburos se utiliza la dosis letal media (LD₅₀) que no es otra cosa que la cantidad del químico que mata a la mitad de la población a la que se le aplica. En la Tabla 4 se muestran las LD₅₀ para los PAH's que se encuentran entre los más tóxicos por su gran poder carcinogénico, las concentraciones fueron aplicadas vía oral a ratones.

TABLA 4. LD₅₀ para algunos PAH's aplicadas vía oral a ratones (Pradyot, 1992).

HIDROCARBURO	LD₅₀
Naftaleno	600 mg/kg
Acenafteno	No reportada
Fenantreno	700 mg/kg
Antraceno	430 mg/kg
Fluoranteno	2000 mg/kg
Pireno	800 mg/kg
Benzo(a)antraceno	10 mg/kg
Criseno	No reportada
Benzo(e)pireno	No reportada
Benzo(a)pireno	500 mg/kg
Perileno	No reportada
Benzo(ghi)perileno	No reportada



5. ÁREA DE ESTUDIO

5.1. Caracterización Ambiental del Golfo de México.

El Golfo de México, es una cuenca oceánica semicerrada tiene un área aproximada de 2 millones de km², un volumen de agua de 20 millones de km³ y su dimensión Este-Oeste es alrededor de 1,600 Km. En su parte occidental tiene una extensión Norte-Sur de 1,300 Km y entre Yucatán y Florida mide aproximadamente 900 Km. En la parte Este, frente a las costas de Campeche y Yucatán una amplia y somera plataforma, mientras que la parte Oeste presenta una plataforma estrecha, la cual puede alcanzar profundidades mayores a 1000 m cerca de la costa. En el Golfo de México se suceden una serie de procesos físicos, químicos y biológicos (corrientes oceánicas, anillos ciclónicos y anticiclónicos, tormentas tropicales y extratropicales, huracanes, nortes, surgencias y cascadas) que hacen del Golfo un inmenso almacén de energía del sistema océano-atmósfera. Su singularidad ecológica así como su situación geopolítica y económica, lo convierten en la mayor y más importante cuenca de aguas protegidas de la América Neotropical. También es necesario destacar que:

Una compleja combinación de procesos geológicos, depositaciones aluviales, mezclas de aguas dulces y salinas, elevadas concentraciones de nutrimentos, mareas y corrientes hacen del Golfo una de las zonas estuarinas más importantes de la tierra. Más de la mitad de sus litorales están bordeados por estuarios, bahías y lagunas costeras. Se trata de 27 grandes sistemas. Su papel como áreas de refugio, alimentación y reproducción de por lo menos el 50 por ciento de las especies que constituyen las pesquerías litorales, los convierten en áreas ecológica y económicamente críticas y en objetivo central de la investigación científica.

Los humedales costeros, son uno de los más vastos y ricos reservorios de energía y nutrimentos del litoral del Golfo de México. Más del 60 por ciento de estos prodigiosos ecosistemas se encuentran en esta región. Aunque su riqueza biológica y el papel que juega en las funciones ecológicas del Golfo están muy lejos de ser conocido y apreciado, se sabe que los pantanos costeros de Tabasco y Campeche albergan 45 de las 111 especies de plantas acuáticas reportadas para México, lo que lo convierte en la reserva más importante de plantas acuáticas de Mesoamérica. En cuanto a peces de aguas dulces, de las 500 especies enlistadas para América Central, a los humedales costeros del Golfo corresponde más de la mitad. Este valor como hábitat, es su mayor aportación a la economía ecológica del Golfo, independientemente de sus vinculaciones energéticas y económicas con las pesquerías de alto valor alimenticio y comercial.

Los bosques de mangle, poseen una notable habilidad para tolerar la salinidad y para crecer en los substratos lodosos y arenosos de los estuarios y lagunas costeras tropicales. Esta capacidad los hace prevalecer frente a otras comunidades de los ambientes costeros. Las productividades biológicas de los bosques de mangle se han estimado hasta en 24 toneladas de peso seco por hectárea al año, cifra superior a las de las selvas tropicales altas y a las de las lagunas costeras y estuarios.



Los pastos marinos, junto con las algas marinas, abundan en los estuarios y en los ambientes someros del Golfo, especialmente en los sistemas lagunares tamaulipecos, las áreas de cayos y arrecifes de Veracruz, y, sobre todo, en la Sonda de Campeche y el área de Laguna de Términos. Se trata de un hábitat de gran importancia por sus funciones de estabilizadores de sedimentos y de sitios de crianza y alimentación para una enorme variedad de invertebrados y peces. Esta diversidad se sostiene gracias a una elevada productividad primaria: hasta 2 000 gramos de peso seco por metro cuadrado al año.

Los arrecifes coralinos, figuran entre los ecosistemas tropicales de mayor diversidad y valor estético. Gracias a su alta productividad biológica, sostienen a mayor número de especies animales que cualquier otro ecosistema marino o terrestre conocido. La intensa actividad física y ecológica que se desarrolla en los arrecifes juega un papel decisivo en el mantenimiento del equilibrio químico de las aguas oceánicas, al procesar los enormes volúmenes de sedimentos arrastrados al lecho marino por las corrientes oceánicas y las descargas de los ríos. Además, son barreras que disipan la energía de las corrientes, creando ambientes de baja intensidad y de alta estabilidad que, al estabilizar las costas, favorecen las funciones de otros ambientes críticos, como los pastos marinos, las lagunas costeras y los manglares. Agréguese sus funciones como áreas de refugio, alimentación y crianza de numerosas especies que las habitan de un modo permanente, estacional u ocasionalmente.

En el territorio mexicano del Golfo, existen cerca de 30 formaciones arrecifales entre las que sobresalen los de la Blanquilla, Isla de Lobos y de Enmedio, en el área de Tampico-Tuxpan; La Gallega, la Galleguilla, Anegada de Adentro, Isla verde, Pájaros y Sacrificio, en Veracruz; Chopas, Enmedio, Anegada de Afuera, Cabezo y Rizo, en las cercanías de Antón Lizardo; y los de Arcas, Obispo, Triángulos, Banco Nuevo, Banco Inglés, Arenas y Alacrán, en la plataforma de Campeche. A ellos se suman los riquísimos arrecifes caribeños.

5.2. Área de Estudio de las Campañas Oceanográficas.

5.2.1. Campaña Oceanográfica SGM-8.

El área de estudio de la campaña SGM-9, se realizó en la zona sur del Golfo de México, en la Bahía de Campeche entre las coordenadas 18° a 22° Norte y 89° a 95° Oeste (Fig. 5.2.1). Teniendo sus límites en tierra al Oeste en Punta Zapotitlán, Veracruz y al Este en Puerto Progreso, Yucatán. Es decir se incluyen en su totalidad los estados de Tabasco y Campeche. El área de estudio incluye al banco de Campeche y a la Bahía de Campeche, de acuerdo a la clasificación de Antoine (1972).

El banco de Campeche es una región carbonatada muy extendida y casi plana, limitada al oeste por la cuenca Tabasco-Campeche y al este por el estrecho de Yucatán. La Bahía de Campeche está limitada por el paralelo 21° N y por las costas de los estados de Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán al oeste, sur y este, respectivamente (Aguirre, 2002).

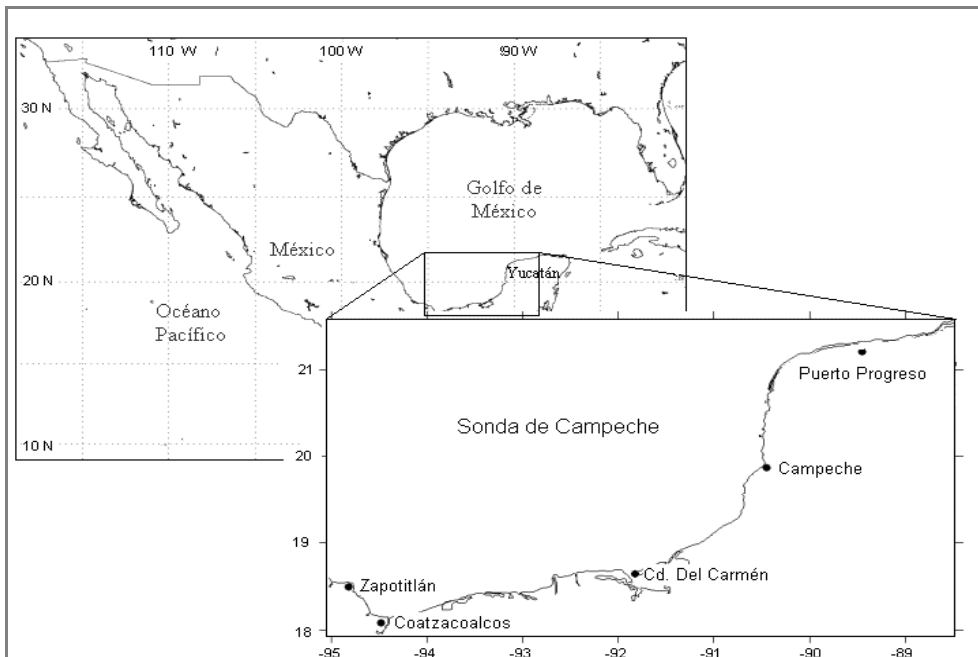


Figura 5.2.1. Área de estudio de la campaña oceanográfica SGM-8.

El número de estaciones para esta campaña de muestreo es de 136 estaciones y comprende la Sonda de Campeche y por ende las principales zonas con actividad petrolera en la zona marina (Fig. 5.2.2). La campaña se realizó de Septiembre a Octubre de 2003.

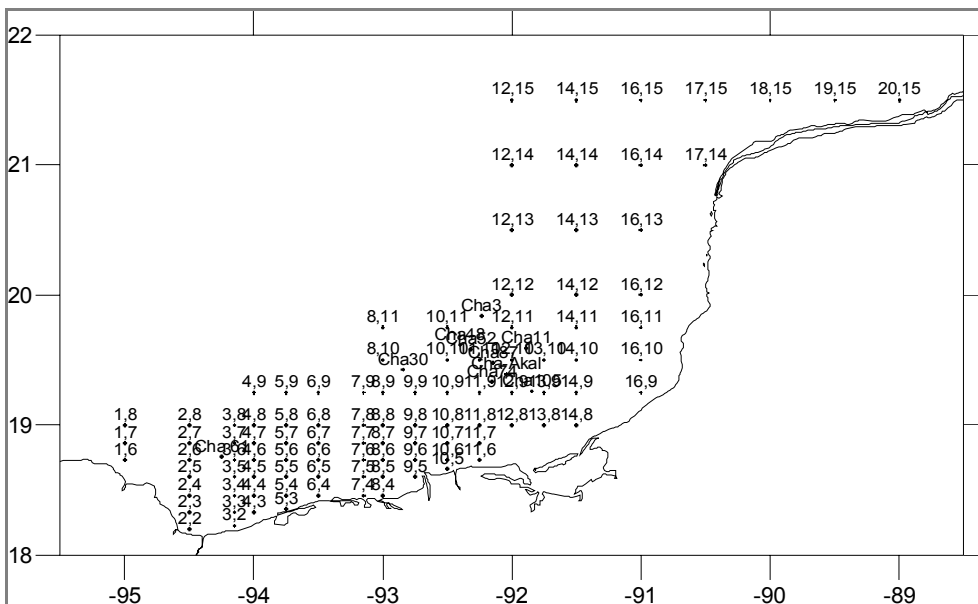


Figura 5.2.2. Estaciones de muestreo de la campaña oceanográfica SGM-8.



Esta área de estudio al igual que todo el Golfo de México tiene una dinámica oceanográfica compleja determinada por el intercambio de calor y momento en la superficie, por los intercambios de masa y vorticidad, por la morfología de sus cuencas, plataformas continentales y costas (Sheinbaum *et al.*, 1997).

5.2.2. Campaña Oceanográfica SGM-7.

El área de estudio de la campaña SGM-7 cubre al Oeste desde Punta Zapotitlán, Veracruz y al Este desde Puerto Progreso, Yucatán, teniendo el polígono las siguientes coordenadas (Tabla 5).

Tabla 5. Polígono del área de estudio SGM-7.

Vértice	Lat. Norte	Long. Oeste
1	21°30'00"	95°00'00"
2	21°30'00"	89°00'00"
3	18°15'00"	95°00'00"
4	18°15'00"	89°00'00"

El número de estaciones para el muestreo fue de 80 y se realizó de Noviembre a Diciembre de 2002. La Figura 5.2.3. muestra las estaciones de muestreo, el mapa anexo siguiente así como los demás mapas de las diferentes campañas se elaboraron utilizando los mapas cartográficos de la Secretaría de Marina 800, 840 (Datum Geográfico: NAD-27, Proyección Mercator, Escala 1:1,000,000), los conjuntos vectorizados por el INEGI (1999), (Datum Geográfico: NAD-27, Proyección Mercator, Escala 1:250,000) y de PEP (Marzo, 1998).

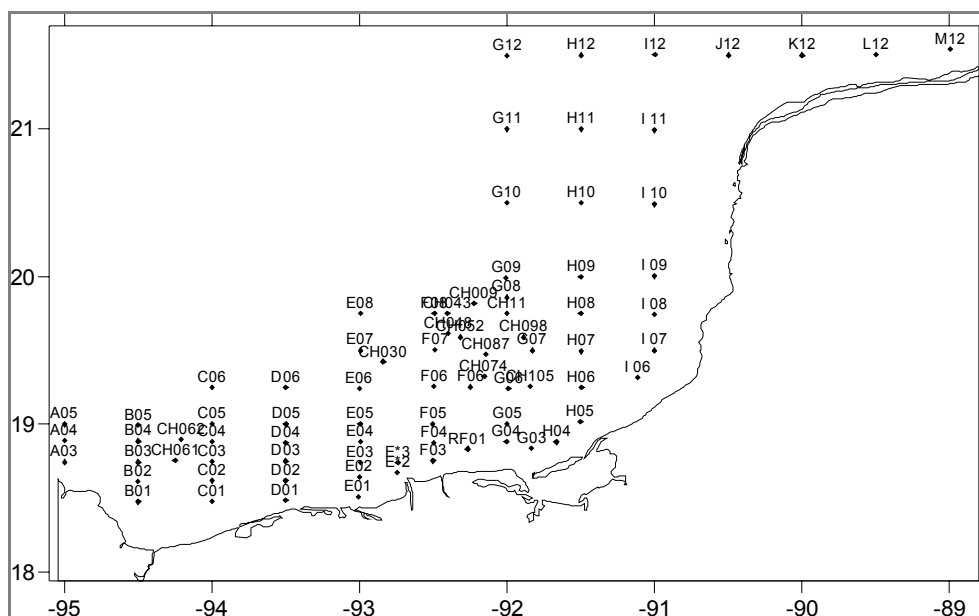


Figura 5.2.3. Estaciones de muestreo de la campaña oceanográfica SGM-7.



5.2.3. Campaña Oceanográfica SGM-6.

El área de estudio de la campaña SGM-6 cubre al Oeste desde Punta Zapotitlán, Veracruz y al Este desde Puerto Progreso, Yucatán, teniendo el polígono las siguientes coordenadas (Tabla 6).

Tabla 6. Polígono del área de estudio SGM-6..

Vértice	Lat. Norte	Lat. Oeste
1	22°00'00"	91°00'00"
2	18°30'00"	91°00'00"
3	22°00'00"	95°15'00"
4	18°30'00"	95°15'00"

El número de estaciones para el muestreo fue de 80 y comprende las principales zonas con actividad petrolera en la zona marina donde se ubica la principal producción de petróleo en el país. La campaña SGM-6 se realizó de Noviembre a Diciembre de 2001. En la figura 5.2.4 se muestran las estaciones de analizadas en la campaña oceanográfica SGM-6, además se muestra un diagrama de las instalaciones petroleras donde se observan los puntos de muestreo cercanos a las mismas.

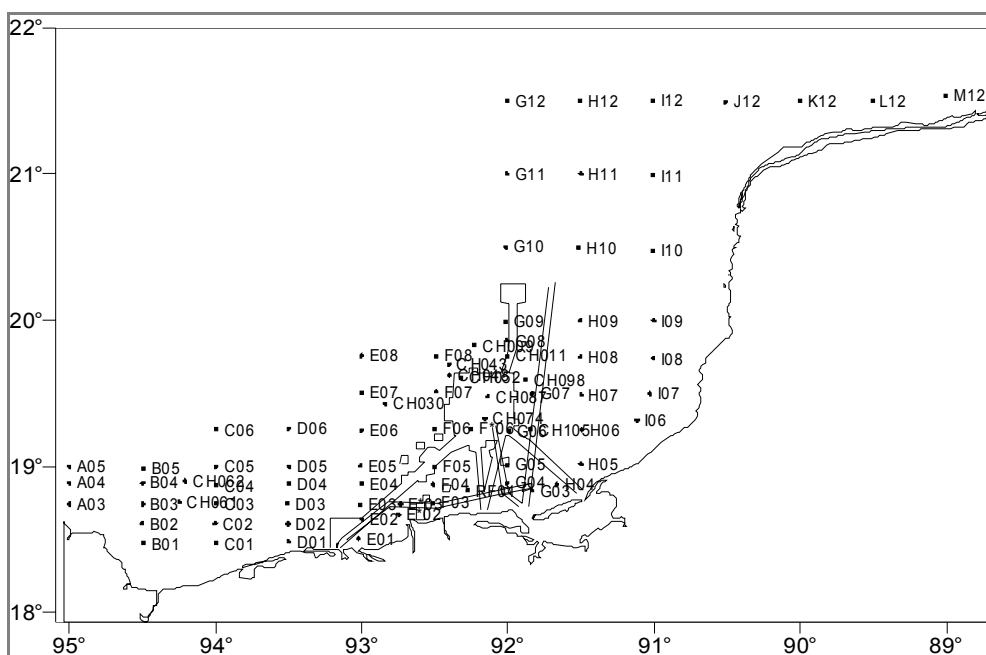


Figura 5.2.4. Estaciones de muestreo de la campaña oceanográfica SGM-6.

5.2.4. Campaña Oceanográfica SGM-4.

El área de estudio de la campaña SGM-4 consideró 53 estaciones hidrográficas distribuidas en el Sur del Golfo de México sobre las aguas de la plataforma continental de la Sonda de



Campeche y sobre su borde. La campaña SGM-4 se realizó del 28 Noviembre al 10 de Diciembre de 1998. En la figura 5.2.5 se muestran las estaciones de analizadas en la campaña oceanográfica SGM-4

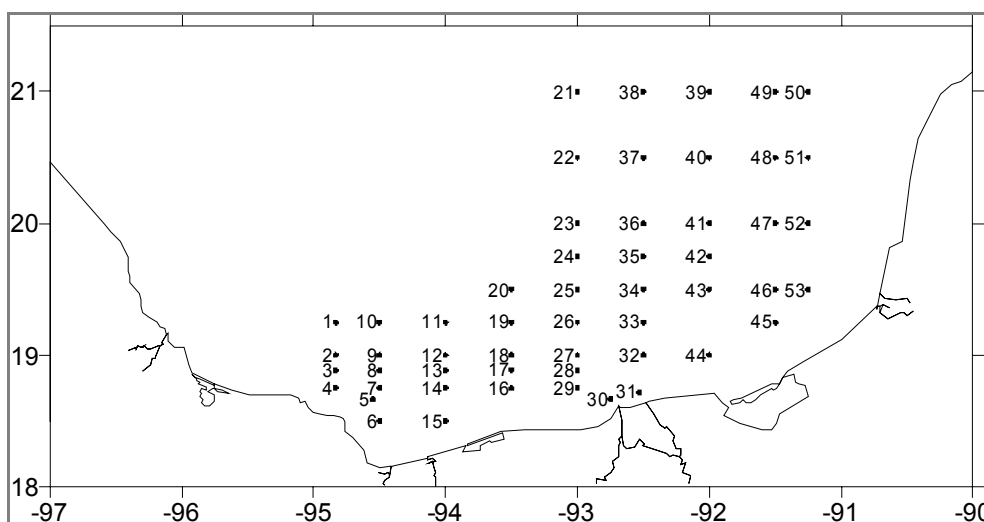


Figura 5.2.5. Estaciones de muestreo de la campaña oceanográfica SGM-4.

5.3. Clima.

El clima se define como la integración de las variables meteorológicas de temperatura, la precipitación, la humedad, la radiación solar, presión atmosférica, nubosidad y el viento (velocidad y dirección).

El océano regula el clima global. Su inercia térmica le permite almacenar el calor que proviene del sol y luego distribuirlo por conducto de su circulación y cederlo a la atmósfera (Gallegos *et al.*, 1996).

Para el área de estudio en la parte continental, que contempla en su totalidad los Estados de Tabasco y Campeche y una parte del Estado de Yucatán, se tienen los climas de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García para la República Mexicana, de: a) clima cálido subhúmedo intermedio con lluvias en verano (Aw1(w)); b) clima cálido subhúmedo con mayor humedad (Aw2(w)), en la zona que rodea a la Laguna de Términos, y c) clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am(f)) en la zona de Palizada, Pom-Atasta. (INE, 2002).

5.4. Temperatura.

La evolución de la temperatura es predominantemente de periodo anual, se registra un periodo cálido con temperaturas de promedio mensual superiores a 27 °C, en los meses de abril a septiembre, siendo los más cálidos abril, mayo y junio con temperaturas promedio



de 27 °C y 30 °C.

Aunque se registran valores máximos extremos superiores a 40 °C, en el mes de octubre se inicia un descenso de temperaturas con valores de 27 °C a 24 °C en diciembre, mes donde se inician las temperaturas bajas y continúan hasta el mes de febrero con temperaturas de 22° a 24° C. El descenso de temperaturas es debido a la presencia de los vientos del norte acompañados de lluvias ocasionales.

5.5. Precipitación Pluvial.

Para los estados costeros del Golfo de México, la precipitación en el período de 1941 – 2002, muestra que Tabasco presenta una alta precipitación; después de la Isla del Carmen en Campeche, la precipitación disminuye hasta la Península de Yucatán, esto contrasta con la alta precipitación del Sur de Veracruz. La precipitación en la zona de estudios, al igual que la temperatura es predominantemente de período anual, con lluvias de junio a noviembre, siendo los meses más lluviosos septiembre, octubre, y principios de noviembre con precipitaciones mayores a 250mm.

Se observa una ligera disminución en la precipitación durante los meses de noviembre a febrero (época de “nortes”) con precipitaciones entre 100 y 200 mm, y se registran los valores mínimos de febrero a mayo, época considerada de secas. Por la ubicación del área, se presentan tormentas y depresiones tropicales, ciclones y huracanes. Estos fenómenos se presentan con mayor frecuencia en los meses de septiembre y octubre aumentando las precipitaciones con valores superiores a 500mm.

Los huracanes son responsables de los grandes cambios en la morfología costera, aparte de afectar grandemente las actividades humanas, también tienen una gran influencia sobre las estructuras de los ecosistemas marinos y terrestres, tanto en su biomasa como en su biodiversidad (Lodge y Mc Dowell, 1991).

5.6. Régimen de Vientos.

En la región existen dos sistemas de vientos dominantes. De octubre a febrero los vientos son del Noroeste. Estos se forman por el movimiento de masas de aire frío y seco, provenientes de la porción continental de Estados Unidos y sur de Canadá, que interactúan con las masas de aire marítimo tropical propias del Golfo de México. Durante los meses de abril y mayo, los vientos tienden poco a poco a orientarse en dirección norte-sur; para los meses de junio a agosto, los vientos provienen del sureste y para los meses septiembre y octubre, el viento que proviene del norte tiende a alinearse en la dirección este-oeste.



La velocidad promedio del viento varía de 11.1 km/h a 14.8 km/h, con vientos fuertes en las regiones del Sureste de hasta 18.3 y 22.2 km/h. El viento mensual dominante proviene del Norte, la velocidad máxima promedio mensual es de 7.5 m/s y la mínima promedio mensual es de 2.2 m/s.

Considerando los patrones anuales de temperatura, precipitación y régimen de vientos, podemos determinar tres eventos climáticos en general. Época de lluvias, de junio a octubre; época de “Nortes”, de octubre a febrero, caracterizada por vientos provenientes del Estados Unidos y Canadá, y época de sequía de febrero a mayo.



6. METODOLOGÍA

Para las cuatro campañas oceanográficas analizadas, los hidrocarburos se colectaron a bordo del B/O “Justo Sierra” propiedad de la UNAM siguiendo el método Normalizado propuesto por la APHA-AWWA-WPCF, 1995; IOC-UNESCO (1981). Se sumergió una botella de cristal de color ámbar, de 2 L de capacidad aproximadamente con el apoyo del guinche de proa a una profundidad de 5 m, tapada con papel aluminio para que en el momento en que el agua haga presión, este se rompa y penetre el agua a la botella, este proceso dura 10 min (Figura 6.1.1). Ya llena la botella es almacenada para su transportación y análisis en laboratorio.



Figura 6.1.1. Muestra Superficial de Agua. **Figura 6.1.2.** Muestra de Fondo de Agua.

Para la muestra de hidrocarburos de fondo se utilizó el agua de la botella Niskin correspondiente a la de mayor profundidad vertiéndola en una botella de cristal de color ámbar, de 2 L aproximadamente de capacidad (Figura 6.1.2.).

La técnica de extracción de los hidrocarburos se realizó siguiendo el método 6410B de extracción líquido-líquido con cromatografía de gases / espectrometría de masas aprobado por el Standard Methods Committee, 1987. Aceptado por la U. S. Environmental Protection Agency como equivalente al método EPA 625 con algunas variantes.

6.1. Procedimiento de Extracción.

La extracción se realiza por medio de un embudo de separación como se señala a continuación:

1. Se mide 1 L de muestra.
2. Se vierte la muestra al embudo de separación verificando el pH con un papel indicador de pH de gama amplia y se ajusta a un $\text{pH} > 11$ con una solución 3N de NaOH.
3. Se agita vigorosamente la solución para homogenizar.
4. Se añaden 80 mL de cloruro de metileno y se agita vigorosamente el embudo durante 2 minutos con una ventilación periódica para liberar presión.



5. Se deja reposar el embudo para la separación de las fases orgánica y acuosa durante 5 minutos aproximadamente.
6. Se separa la fase orgánica de la acuosa recolectar el extracto en un frasco ámbar de 250 mL marcado como fracción básica.
7. Se añaden 60 mL de cloruro de metileno se repiten los pasos 4, 5, 6.
8. Se realiza una tercera extracción del mismo modo que el punto anterior.
9. Después de la tercera extracción se ajusta el pH de la fase acuosa a un valor < 2 con una solución de H_2SO_4 .
10. Se extrae en serie con 80, 60 y 60 mL de cloruro de metileno la fase acuosa acidificada igual como se hizo con la fracción básica.
11. Se recolecta el extracto en frasco ámbar etiquetado como la fracción ácida de la muestra.
12. Para cada fracción se utiliza un concentrador Kuderna-Danish (K-D) de 500mL.
13. Se vierte el extracto de cada fracción a su respectivo concentrador K-D.
14. Se coloca el K-D en un baño de agua caliente (entre 60 y 65°C) en una campana de extracción de manera que el tubo concentrador se sumerja parcialmente en el agua.
15. Cuando el volumen del líquido alcance 1 mL, se retira el K-D y se deja secar y enfriar durante 10 minutos aproximadamente.
16. Se retira la columna Snyder y se lava el matraz con 2 mL de cloruro de metileno con una pipeta pasteur.
17. El contenido del tubo concentrador se pasa con una pipeta pasteur a un vial ámbar con tapón de rosca y septum enjuagando bien el tubo concentrador con cloruro de metileno.
18. El contenido del vial se deja secar en la campana de extracción, o mediante un flujo directo de nitrógeno.
19. Para inyectar la muestra al cromatógrafo se adiciona con pipeta volumétrica 1 mL de cloruro de metileno al vial que contiene la muestra seca.
20. Se toma 1 μL del volumen reconstituido con una microjeringa de 10 μL y se inyecta al cromatógrafo de gases.



6.2. Determinación de Hidrocarburos por Medio de Cromatografía de Gases.

La cromatografía de gases es una de las técnicas actuales mas utilizadas para evaluar los niveles de contaminación por hidrocarburos del petróleo. La cromatografía se ha definido como un método físico de separación en el cual los componentes a separar se distribuyen entre dos fases, una de las cuales constituye la fase estacionaria, de gran área superficial, y la otra es un fluido (fase móvil) que pasa a través o a lo largo de la fase estacionaria.

La determinación analítica de los hidrocarburos disueltos y dispersos en la columna de agua fue por medio de cromatografía de gases de alto rendimiento, en un cromatógrafo de gases Hewlett-Packard Mod. 5890 Series II equipado con un detector de ionización de flama y una columna capilar 5% Fenil Metil Silicón de 25 m de largo x 0.32mm de diámetro interno y 5µm de espesor (Figura 6.2.1.). La rampa de temperatura fue programada de 100 a 300 °C con incrementos de 10 °C/min hasta una temperatura de 170 °C, después incrementos de 5 °C/min hasta una temperatura de 280 °C y por ultimo incrementos de 10 °C/min. El gas acarreador fue el Nitrógeno. La temperatura del detector fue programada a 315°C.

La identificación y cuantificación de cada hidrocarburo presente en la columna de agua se obtuvo a través del programa para PC Hewlett-Packard Chemstation 3365 que opera el cromatógrafo de gases, el cual proporciona los resultados a partir de las curvas de calibración individuales de los hidrocarburos que se determinaron.



Figura 6.2.1. Cromatógrafo de gases Hewlett-Packard Mod. 5890

Para que los análisis fueran certeros se inyecta una mezcla de estándares certificados a diferentes concentraciones para obtener curvas de calibración que nos ayudan a identificar y cuantificar los hidrocarburos.

El valor de concentración reportado por el equipo se tiene que corregir por el volumen de aforo, la cantidad de agua marina extraída y por la recuperación del Hidrocarburo analizado.



$$C_{final} = \left[\frac{C_{reportada\ por\ el\ equipo} \times Aforo}{Volumen\ de\ muestra} \right] \times Recuperacion\ del\ Hidrocarburo$$

En la Tabla 7 se presentan los Hidrocarburos Alifáticos analizados así como sus tiempos de retención.

Tabla 7. Curva de Calibración e Identificación de Hidrocarburos Alifáticos.

	Tiempo de retención	Hidrocarburo		Tiempo de retención	Hidrocarburo
1	5.313	N-Decano	14	29.555	N-Tricontano
2	8.942	N-Dodecano	15	30.999	N-Tetracosano
3	12.633	N-Tetradecano	16	32.301	N-Pentacosano
4	14.453	N-Pentadecano	17	33.507	N-Hexacosano
5	16.033	N-Hexadecano	18	34.628	N-Heptacosano
6	17.687	N-Heptadecano	19	35.692	N-Octacosano
7	17.753	Pristano	20	36.699	N-Nonacosano
8	19.535	N-Octadecano	21	37.665	N-Triacontano
9	19.651	Fitano	22	39.481	N-Dotriacontano
10	21.553	N-Nonadecano	23	41.179	N-Tetratriacontano
11	23.780	N-Eicosano	24	43.005	N-Hexatriacontano
12	26.037	N-Eneicosano	25	45.405	N-Octatriacontano
13	27.933	N-Docosano	26	48.710	N-Tetracontano

A continuación se presentan dos ejemplos de los cromatogramas de Hidrocarburos Alifáticos.

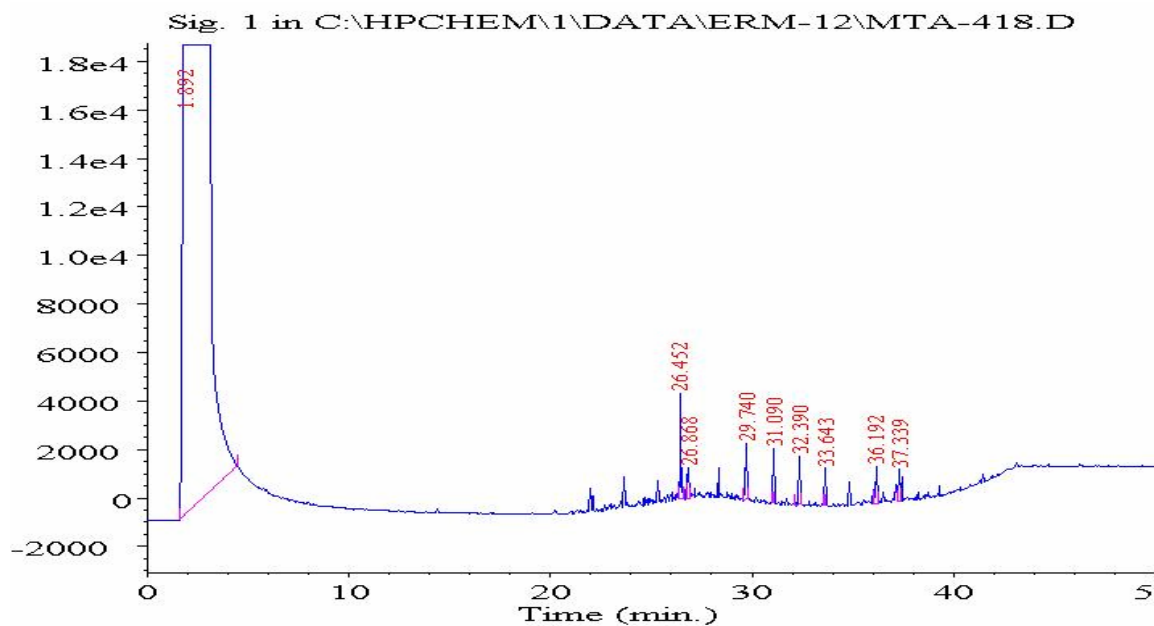


Figura 6.2.1. Cromatograma de Hidrocarburos Alifáticos.

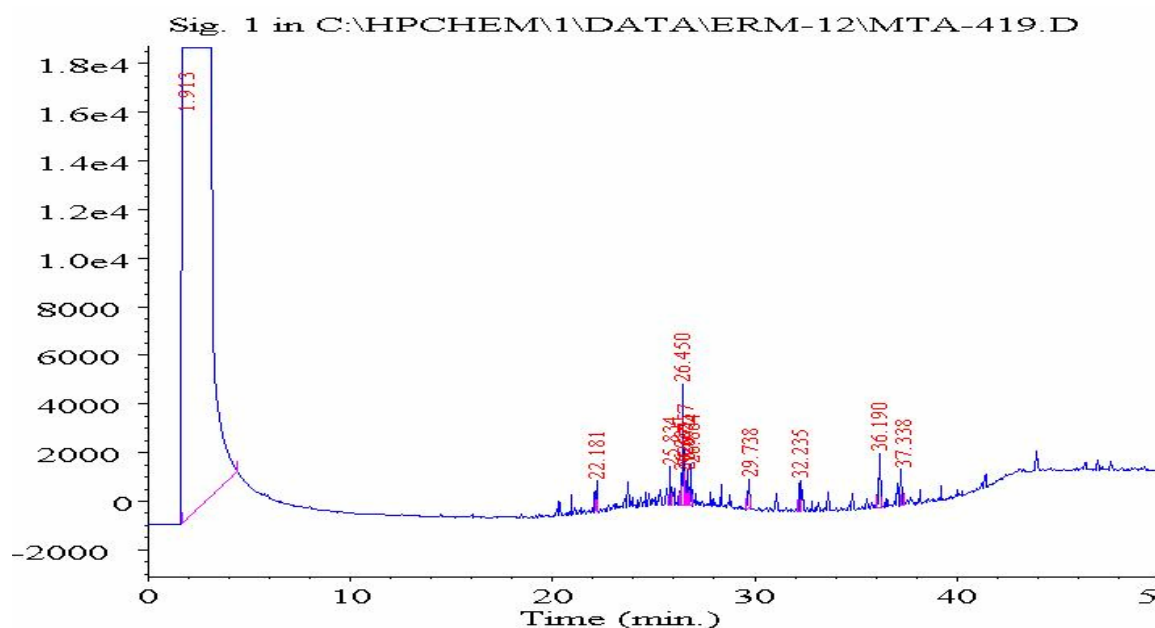


Figura 6.2.2. Cromatograma de Hidrocarburos Alifáticos.

En la Tabla 8 se presentan los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH's) analizados así como sus tiempos de retención.

Tabla 8. Curva de Calibración e Identificación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

	Tiempo de retención	Hidrocarburo		Tiempo de retención	Hidrocarburo
1	4.842	Naftaleno	15	14.574	2 Metilfenantreno
2	5.903	2 Metilnaftaleno	16	16.903	Fluoranteno
3	6.082	1 Metilnaftaleno	17	17.791	Pireno
4	6.79	Bifenilo	18	23.083	Benzo(a)Antraceno
5	7.098	2,6 Dimetilnaftaleno	19	23.271	Criseno
6	7.733	Acenaftileno	20	27.636	Benzo(b)Fluoranteno
7	8.139	Acenafteno	21	27.813	Benzo(k)Fluoranteno
8	9.058	2,3,5 Trimetilnaftaleno	22	28.498	Benzo(e)Pireno
9	9.45	Fluoreno	23	28.886	Benzo(a)Pireno
10	11.058	1 Metilfluoreno	24	29.021	Perileno
11	11.821	Benzotiofeno	25	32.365	Inden(1,2,3cd)Pireno
12	12.387	Fenantreno	26	32.419	Dibenzo(ah)Antraceno
13	12.575	Antraceno	27	32.935	Benzo(ghi)Perileno
14	14.18	1 Metilfenantreno			



En las Figuras 6.2.3. y 6.2.4. se presentan ejemplos de los cromatogramas de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

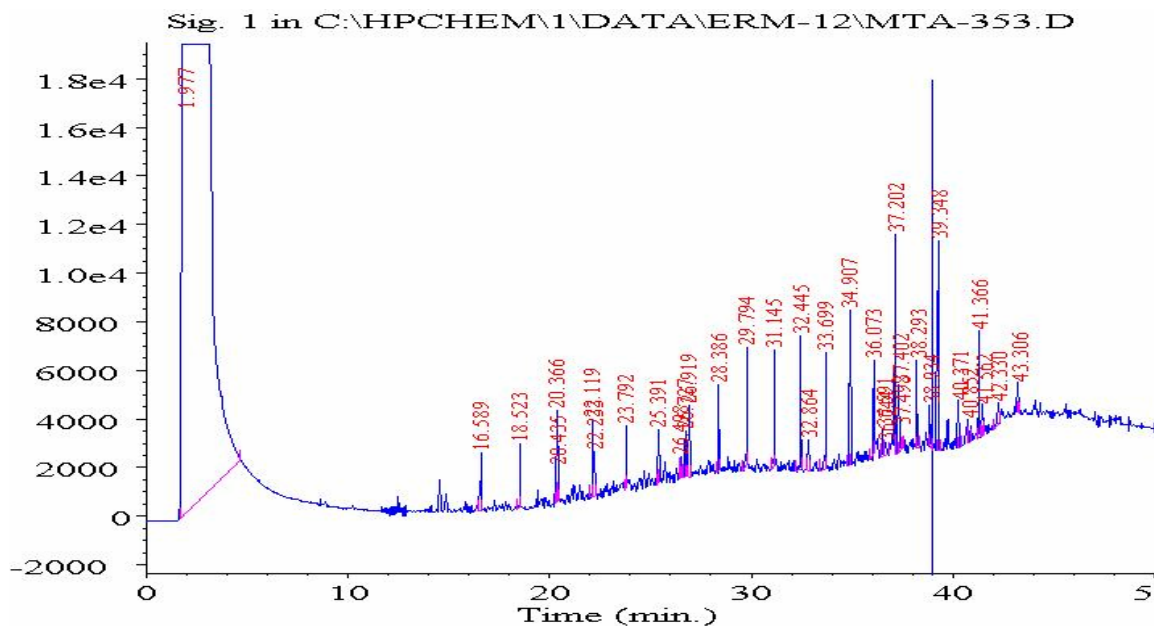


Figura 6.2.3. Cromatograma de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

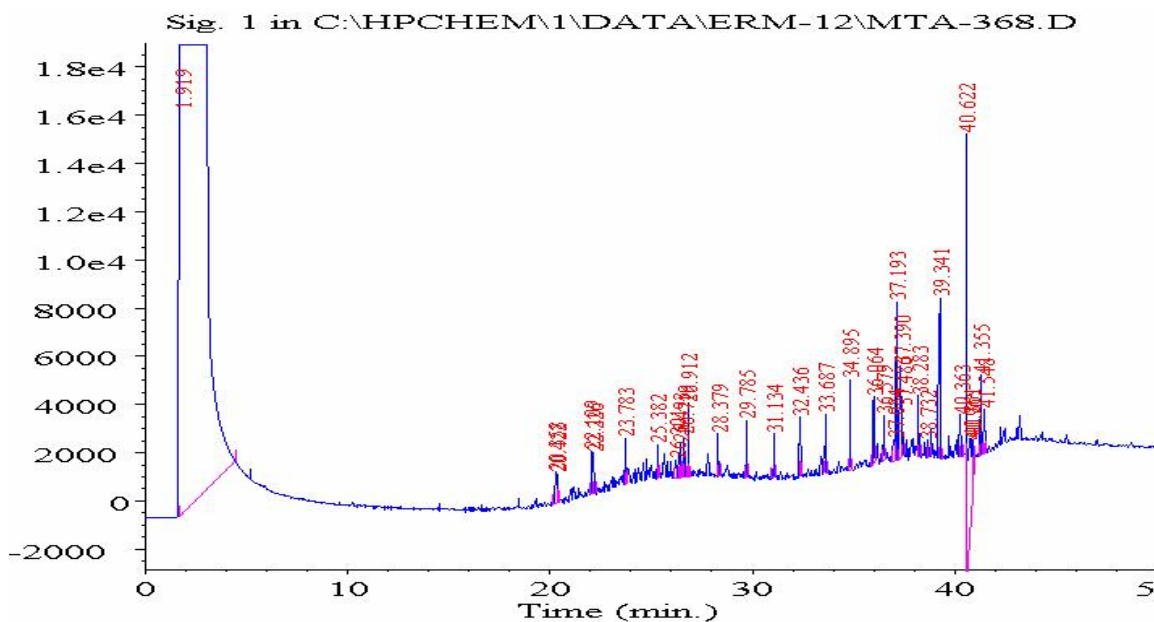


Figura 6.2.4. Cromatograma de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.



6.3. Control de Calidad.

Durante el muestreo se sigue un protocolo de acuerdo al manual de calidad que nos permite el buen cuidado, conservación y transporte de las muestras hasta la llegada al laboratorio. Ya en el laboratorio se realiza una Cadena de Custodia interna que nos permite la fácil manipulación e identificación de las muestras y su rastreabilidad durante el proceso de extracción. Para obtener resultados confiables de acuerdo al Control de Calidad interno se realizan muestras control (Duplicadas, Fortificada, Doble Fortificada y Blancos Adicionados) junto con el procesamiento de las muestras por analizar de acuerdo a los lineamientos establecidos en los Procedimientos Técnicos y de Operación del Manual de Calidad del Laboratorio.

Los resultados obtenidos son tratados estadísticamente y mediante gráficos que nos indican si el lote de muestras fue tratado correctamente, es decir, si el lote analizado está dentro de los límites de aceptación y de control establecidos durante las pruebas iniciales de desempeño de las técnicas utilizadas.

Durante las pruebas iniciales de desempeño se obtiene algunos de los siguientes parámetros: la Linealidad del Sistema, la Exactitud y Precisión del Método y los Límites de Detección y Cuantificación tanto Instrumentales como Metodológicos.

Los Límites de Detección Metodológicos nos dan un parámetro para el reporte final de resultados, es decir, solo se reportarán los resultados que están por encima de este valor, los que no se reporta como menor al límite. Esto se hace porque con los Límites de Detección Metodológicos se asegura la presencia del compuesto analizado por la técnica utilizada.

En la Tabla 9 y 10 se muestran los Límites de Detección Metodológicos para Hidrocarburos Aromáticos y Alifáticos disueltos en Agua de la Campaña Oceanográfica SGM-9.

Tabla 9. Límites de Detección de Método para Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

Compuesto	Límite de Detección de Método µg/L
Naftaleno	1.310
2-Metilnaftaleno	0.540
1-Metilnaftaleno	0.140
Bifenilo	0.060
2,6-Dimetilnaftaleno	0.110
Acenaftileno	0.087
Acenafteno	0.300
2,3,5-Trimetilnaftaleno	0.050
Fluoreno	0.094
1-Metilfluoreno	0.028
Benzotiofeno	0.003
Fenantreno	0.011
Antraceno	0.010
1-Metilfenantreno	0.014

**Tabla 9.** Límites de Detección de Método para Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

Compuesto	Límite de Detección de Método µg/L
2-Metilfenantreno	0.01
Fluoranteno	0.015
Pireno	0.014
Benzo(a)antraceno	0.013
Criseno	0.015
Benzo(b)fluoranteno	0.056
Benzo(k)fluoranteno	0.066
Benzo(e)pireno	0.012
Benzo(a)pireno	0.085
Perileno	0.046
Indeno(1,2,3-cd)pireno	0.142
Dibenzo(a,h)antraceno	0.022
Benzo(ghi)perileno	0.031

Tabla 10. Límites de Detección de Método para Hidrocarburos Alifáticos.

Compuesto	Límites de Detección de Método µg/L
N-decano	0.0024
N-dodecano	0.0034
N-tetradecano	0.0029
N-pentadecano	0.0028
N-hexadecano	0.0029
N-heptadecano	0.0022
Pristano	0.0031
N-octadecano	0.0050
Fitano	0.0028
N-nonadecano	0.0023
N-eicosano	0.0024
N-heneicosano	0.0023
N-docosano	0.0024
N-tricosano	0.0006
N-tetracosano	0.0028
N-pentacosano	0.0027
N-hexacosano	0.0026
N-heptacosano	0.0026
N-octacosano	0.0043
N-nonacosano	0.0024
N-triacontano	0.0021
N-dotriacontano	0.0018
N-tetratriacontano	0.0013
N-hexatriacontano	0.0029
N-octatriacontano	0.0065
N-tetracontano	0.0064



7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Campaña Oceanográfica SGM-8.

En esta campaña oceanográfica se colectaron muestras superficiales de agua para determinar hidrocarburos Alifáticos y Aromáticos.

7.1.1. Hidrocarburos Aromáticos.

En términos generales se encontraron los hidrocarburos aromáticos 2 Metil Naftaleno, 1 Metil Naftaleno, 2,6 Di Metil Naftaleno, Acenafteno, Fenantreno, Antraceno, 2 Metil Fenantreno, Fluoranteno, Pireno, Criseno, Inden(1,2,3cd)pireno en 17 estaciones, lo que significa un 14% del total de las estaciones muestreadas.

Concentración de Hidrocarburos Aromáticos Extracción Básica, SGM-8

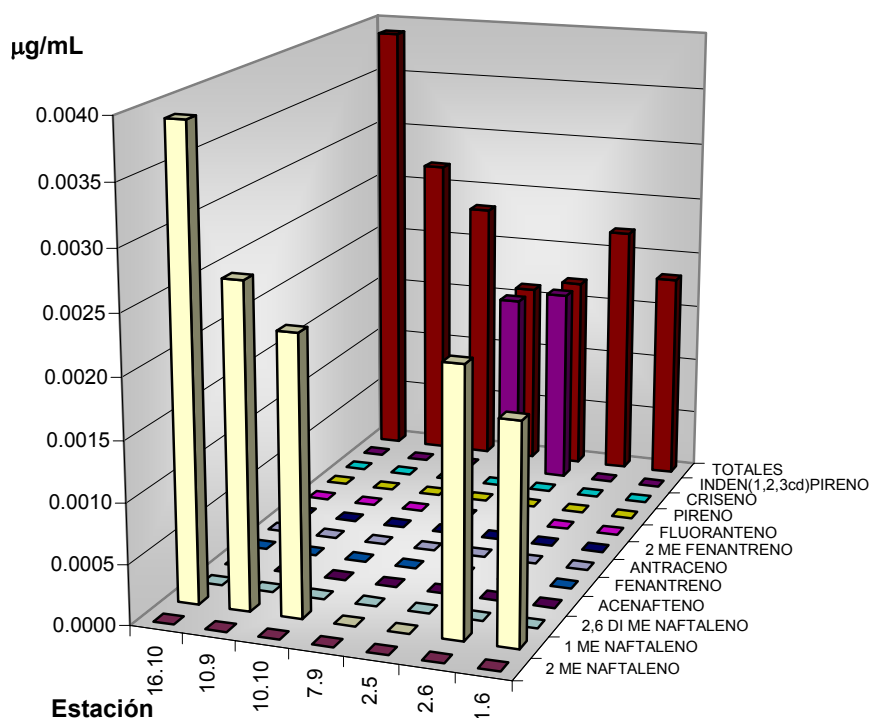


Figura 7.1.1. Concentración de hidrocarburos aromáticos disueltos, fracción básica, campaña oceanográfica SGM-8, 2003.

Este comportamiento observado, que tiene que ver con las bajas o nulas concentraciones reportadas para la gran mayoría de las estaciones, se encuentra en función de la baja solubilidad de los hidrocarburos en agua.



La estación 16.10, que se encuentra al Este de la laguna de Términos (Figura 7.1.3.) registro las concentraciones (en la fracción ácida) más altas de hidrocarburos disueltos con 0.0198 $\mu\text{g/mL}$, las sustancias detectadas en esta estación fueron el Fenantreno (0.0187 $\mu\text{g/mL}$) y el 2, Metil-Naftaleno (0.0011 $\mu\text{g/mL}$). Para esta misma estación pero en su fracción básica también se registraron concentraciones de hidrocarburos disueltos específicamente de 1 Me Naftaleno con 0.0039 $\mu\text{g/mL}$ (Figura 7.1.1. , Figura 7.1.2.).

Concentración de Hidrocarburos Aromáticos Extracción Ácida, SGM-8

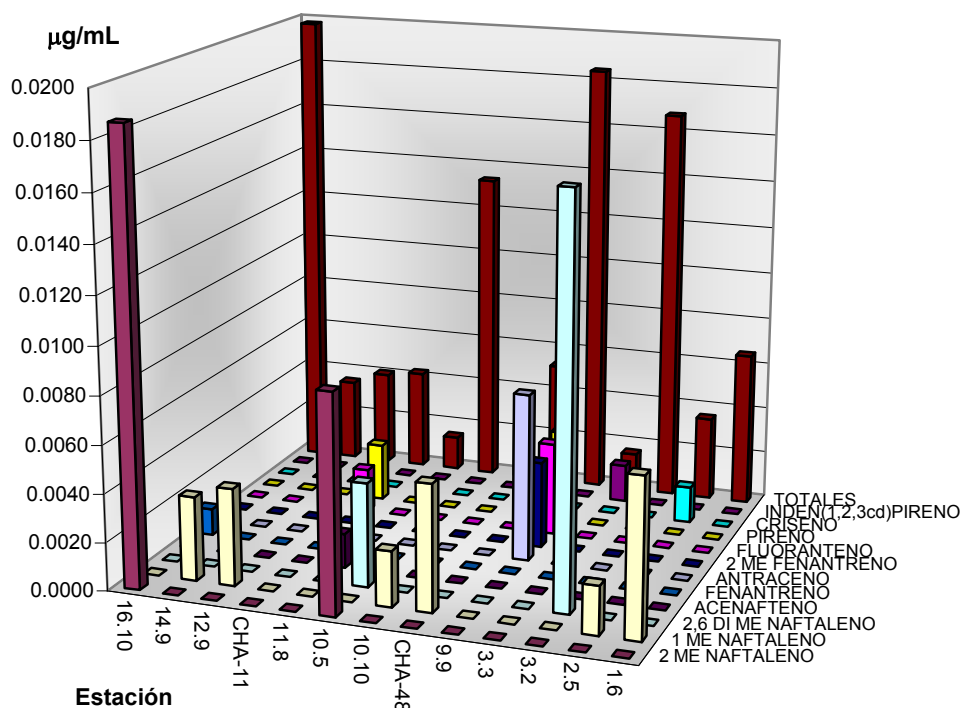


Figura 7.1.2. Concentración de hidrocarburos aromáticos disueltos, fracción ácida, campaña oceanográfica SGM-8, 2003.

La estación 9.9 también registró concentraciones altas de hidrocarburos y se encuentra frente a la chapopotera CHA-30 en la zona de plataformas petroleras (Figura 7.1.3.). La concentración registrada en la fracción ácida fue de 0.0185 $\mu\text{g/mL}$ de los compuestos Antraceno, 2, Metil Fenantreno, Fluoranteno y Pireno con 0.0070 $\mu\text{g/mL}$, 0.0036 $\mu\text{g/mL}$, 0.0039 $\mu\text{g/mL}$, y 0.0039 $\mu\text{g/mL}$ respectivamente (Figura 7.1.2.).



En la estación 3.2 también se observó una concentración alta con respecto a las demás estaciones muestreadas con $0.0168 \mu\text{g/mL}$ que fue de un solo hidrocarburo, 2,6, Dimetil naftaleno (Figura 7.1.2.). Esta estación se encuentra cerca de la costa en la parte Oeste de la zona de estudio.

Por último se observó que existe una clara influencia de actividad petrolera en la zona la que provoca el aumento de las concentraciones de hidrocarburos en agua superficial, ya que prácticamente todas las concentraciones detectadas de estas sustancias se encuentran en la zona de plataformas marinas frente a la Laguna de Términos (Figura 7.1.3.).

Otro punto importante donde se encontraron hidrocarburos en agua superficial fue al Oeste de la zona de estudio, cerca de la desembocadura del río Coatzacoalcos, muy probablemente debida al transporte de hidrocarburos y las refinerías cercanas. Las estaciones involucradas en este comportamiento son 1.6, CHA-48, CHA-11, 12.9, 16.10, 14.9, 10.9, 10.10, 7.9, 11.8 para la zona de plataformas y 2.5, 2.6, 3.3, 3.2, 1.6 en la parte Oeste (Figura 7.1.3.).

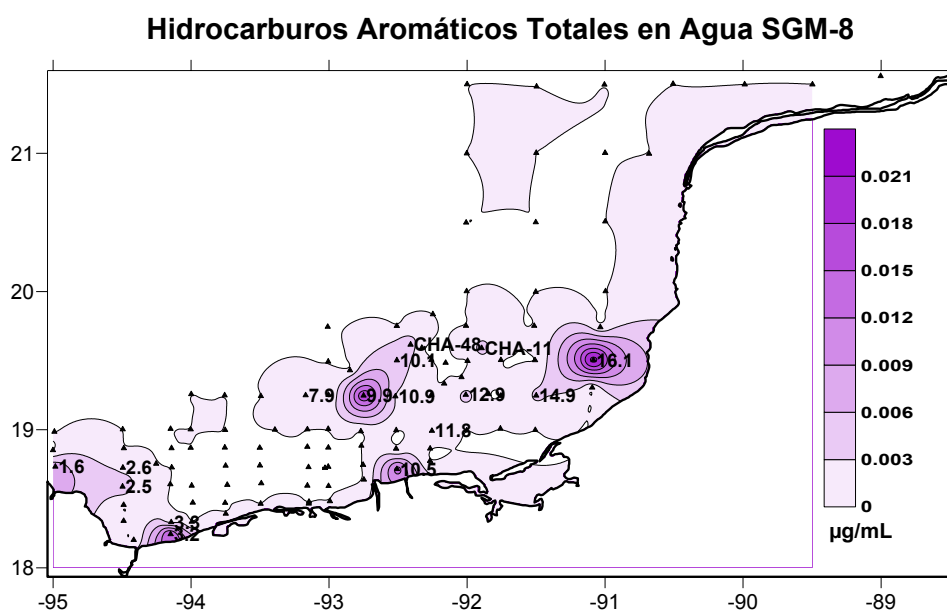


Figura 7.1.3. Distribución horizontal de Hidrocarburos Aromáticos Totales en agua, campaña oceanográfica SGM-8, 2003.

7.1.2. Hidrocarburos Alifáticos.

Se encontraron 12 de los 26 hidrocarburos alifáticos analizados en 36 estaciones, lo que representa el 30% del total de estaciones muestreadas. Los compuestos identificados son el N-heptadecano, N-octadecano, N-nonadecano, N-docosano, N-tricosano, N-tetracosano, N-pentacosano, N-hexacosano, N-heptacosano, N-octacosano, N-nonacosano y N-triacontano.



La estación que presentó la mayor concentración de hidrocarburos es la estación 16.9 con una concentración total de 2.248 $\mu\text{g/L}$ (ppb), en esta estación se encontraron 9 de los 12 hidrocarburos identificados siendo el N-Nonacosano y el N-Heptacosano los compuestos que presentan las concentraciones más altas 0.393 $\mu\text{g/L}$ y 0.345 $\mu\text{g/L}$ respectivamente (Figura 7.1.4.)

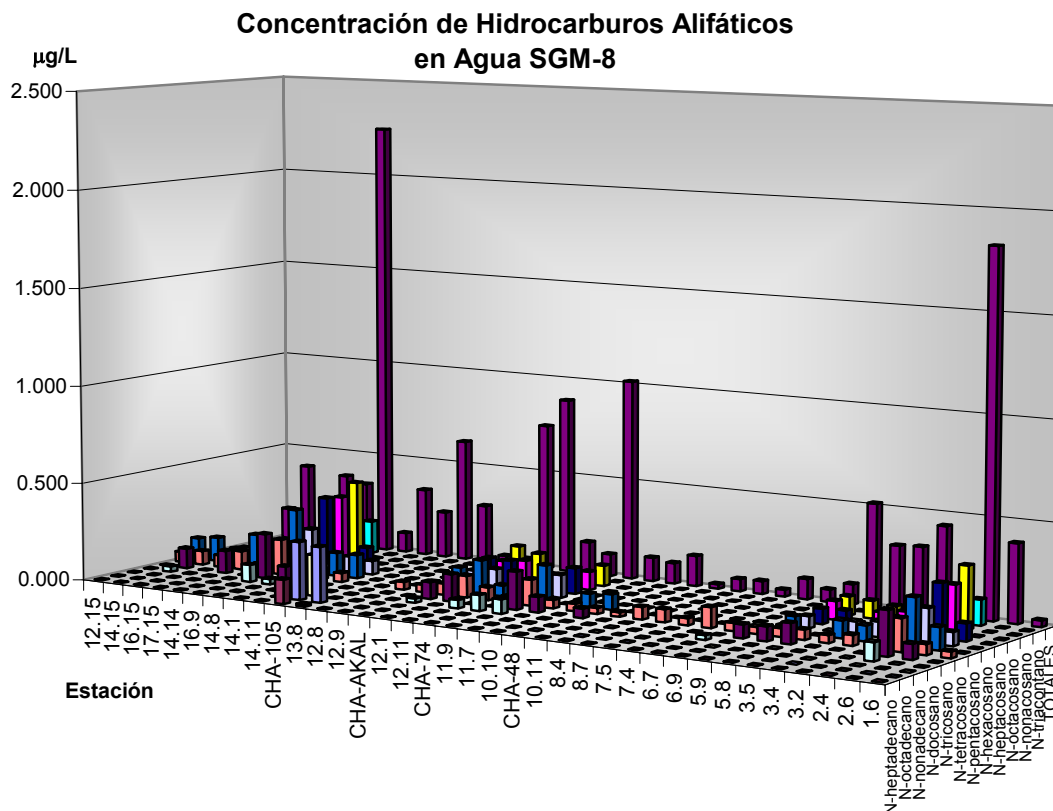


Figura 7.1.4. Concentración de hidrocarburos alifáticos disueltos, campaña oceanográfica SGM-8, 2003.

Otra estación que presentó una concentración alta de hidrocarburos es la estación 2.4 que se encuentra cerca de la desembocadura del río Coatzacoalcos (Figura 7.1.5.), la concentración total en esta estación es de 1.825 $\mu\text{g/L}$ y el compuesto que presenta la concentración más alta es el N-Nonacosano (0.313 $\mu\text{g/L}$).

Los compuestos que aparecen con mayor frecuencia son el N-Tetracosano y el N-Pentacosano que están presentes en 33 y 20 estaciones respectivamente, para el N-Tetracosano el valor más alto se presenta en la estación 16.9 con un valor de 0.180 $\mu\text{g/L}$.



En el caso del N-Pentacosano el valor más alto registrado es de $0.318 \mu\text{g/L}$ presente también en la estación 16.9 localizada en la zona de plataformas (Figura 7.1.5.).

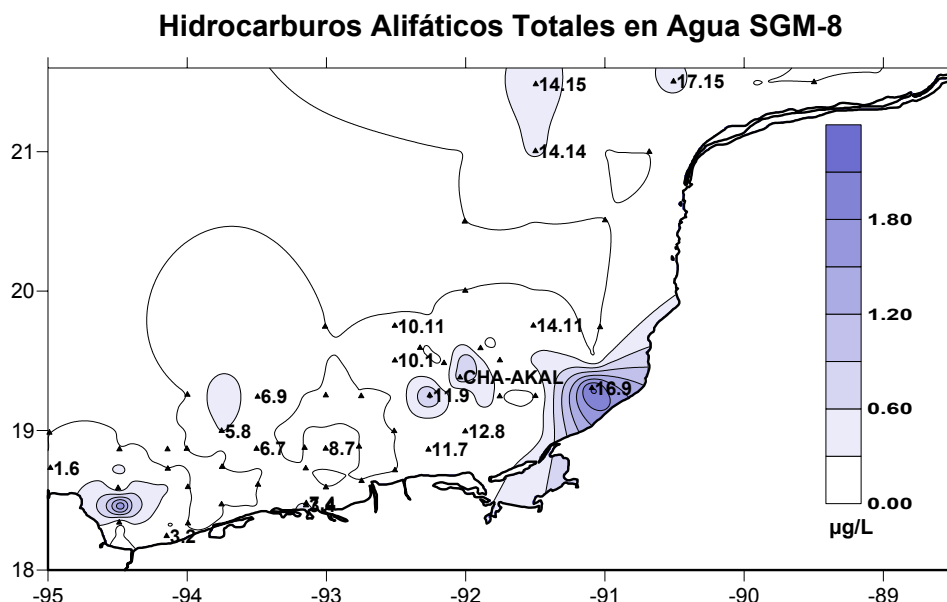


Figura 7.1.5. Distribución horizontal de Hidrocarburos Alifáticos Totales en agua, campaña oceanográfica SGM-8, 2003.

7.2. Campaña Oceanográfica SGM-7.

En esta campaña se analizaron muestras superficiales de agua para determinar hidrocarburos aromáticos solamente.

Como se observa en los resultados de otras campañas y debido a la baja solubilidad de los hidrocarburos, la concentración disuelta es muy baja y no se encuentra en todas las estaciones. En la estación E*-02 (Figura 7.2.1.) localizada frente a la desembocadura del río Grijalva (Figura 7.2.2.); se observó la mayor concentración de hidrocarburos disueltos totales, $0.0560 \mu\text{g/mL}$.

El Acenafileno fue el compuesto que se presentó en mayor concentración en esta estación con una concentración de $0.0335 \mu\text{g/mL}$. La estación E-06, cercana a una chapopotera, presentó una concentración total de $0.0201 \mu\text{g/mL}$. Como se observa en la figura 7.2.1. los compuestos aromáticos que se encontraron en varias estaciones presentes, fueron el Benzo(k)Fluoranteno, y el Benzo(b)Fluoranteno.



Concentración de Hidrocarburos Aromáticos en Agua SGM-7

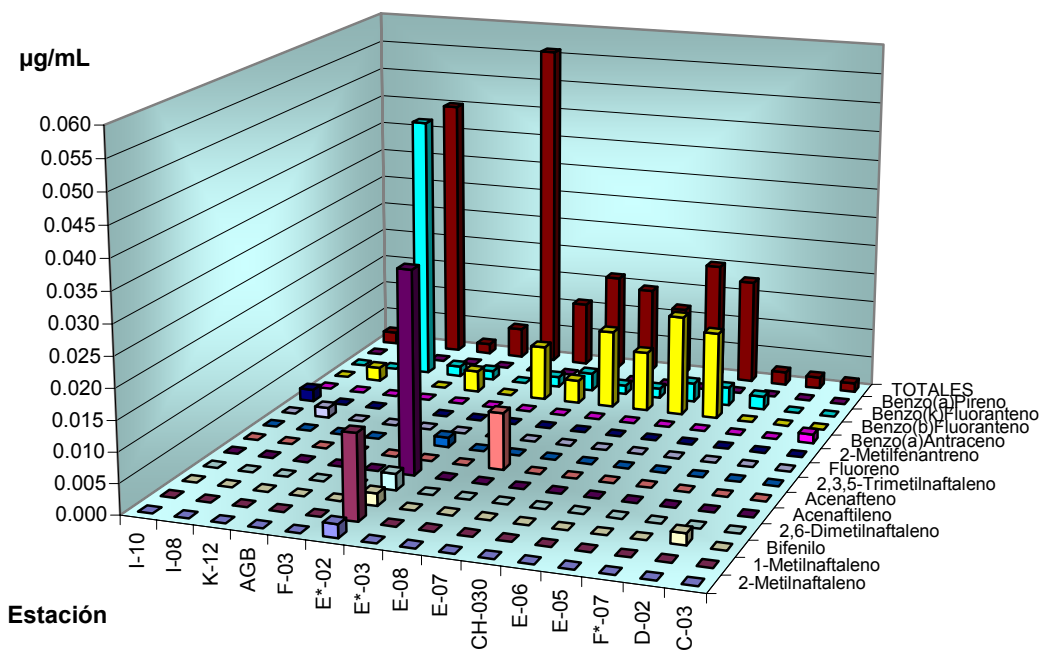


Figura 7.2.1. Concentración de hidrocarburos aromáticos disueltos, campaña oceanográfica SGM-7, 2002.

En general solamente se detectaron hidrocarburos disueltos en 15 estaciones los cuales se localizaron hacia la parte Oeste del área de estudio y de la zona de las plataformas marinas (Figura 7.2.2.). Estas 15 estaciones representan el 18.3% del total de estaciones muestreada en esta campaña.

Hidrocarburos Aromáticos Totales en Agua SGM-7

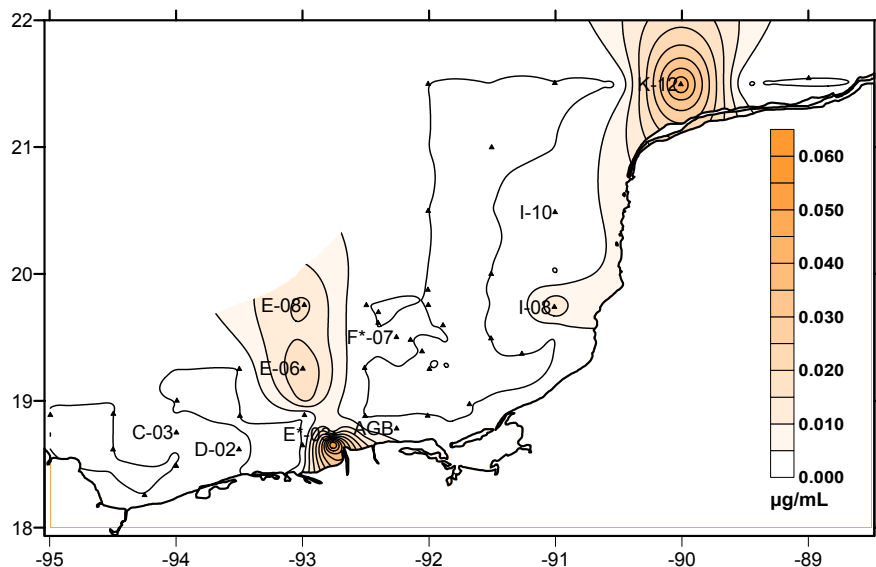


Figura 7.2.2. Distribución horizontal de Hidrocarburos Aromáticos Totales en agua, campaña oceanográfica SGM-7, 2002.



7.3. Campaña Oceanográfica SGM-6.

En la campaña oceanográfica SGM-6 se tomaron muestras de agua superficiales y de fondo para determinar hidrocarburos aromáticos solamente. Para este estudio solo se presentaran los resultados de agua superficiales para el efecto de realizar un estudio comparativo de la variación de los niveles de hidrocarburos en agua superficial de las 4 campañas aquí presentadas.

La variación de la fracción superficial de los hidrocarburos totales se encontró entre concentraciones cercanas a cero y 0.0111 $\mu\text{g/mL}$, determinándose el valor mayor a noroeste de la ciudad de Progreso, Yuc en la estación I12 (Figura 7.3.2.). En esta estación los compuestos encontrados son el Acenafteno y el Benzo(a)Antraceno reportando concentraciones 0.0013 $\mu\text{g/mL}$ y 0.0098 $\mu\text{g/mL}$ respectivamente siendo este último valor el mayor reportado para un compuesto individual de todas las estaciones muestreadas (Figura 7.3.1.).

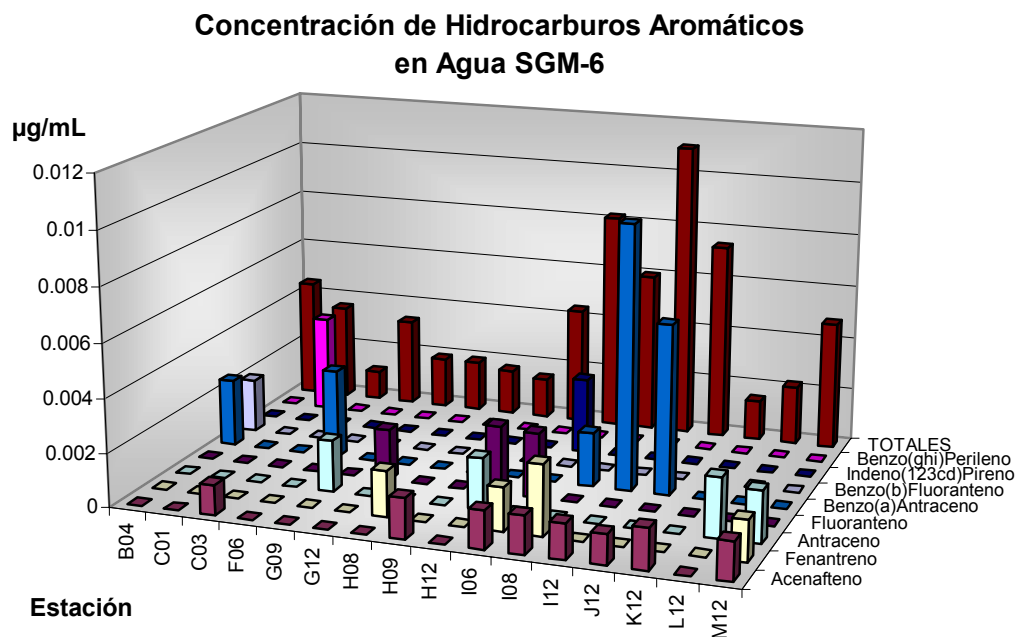


Figura 7.3.1. Concentración de hidrocarburos aromáticos disueltos, campaña oceanográfica SGM-6, 2001.

Otra estación costera que presentó altos niveles de hidrocarburos disueltos es la estación I06 (Figura 7.3.2.) con una concentración de 0.0082 $\mu\text{g/mL}$, siendo el Indeno(123cd)Pireno el compuesto que presenta mayor concentración (0.0028 $\mu\text{g/mL}$).

En general se identificaron 8 hidrocarburos aromáticos en 16 estaciones siendo el Acenafteno y el Benzo(a)Antraceno los que aparecen con mayor frecuencia en 8 y 5 estaciones respectivamente (Figura 7.3.1.).

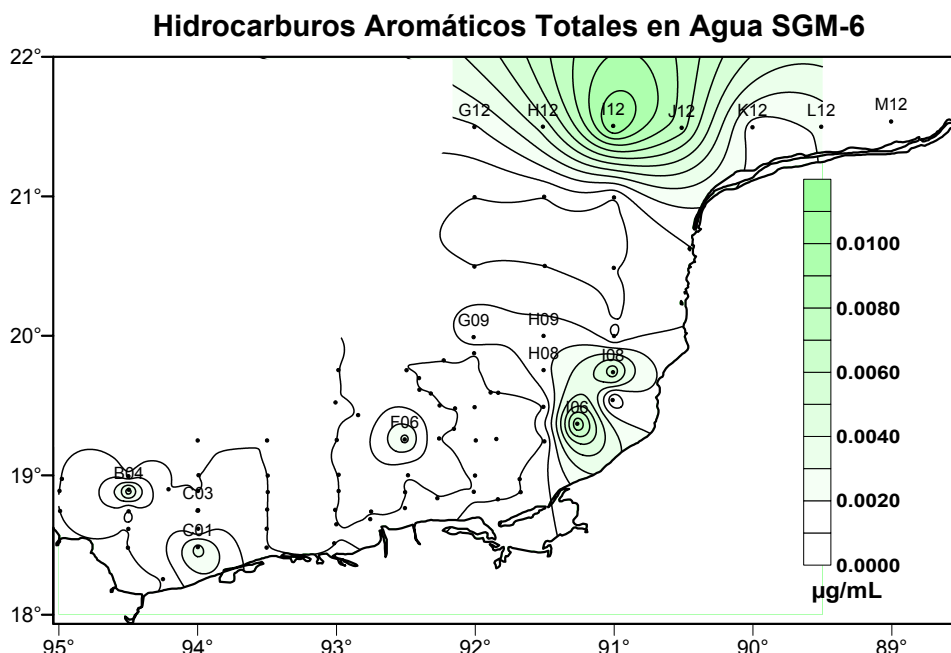


Figura 7.3.2. Distribución horizontal de Hidrocarburos Aromáticos Totales en agua, campaña oceanográfica SGM-6, 2001.

7.4. Campaña Oceanográfica SGM-4.

En esta campaña se tomaron muestras superficiales de agua a las cuales se les determinó los niveles de hidrocarburos alifáticos y aromáticos disueltos en agua de mar.

7.4.1. *Hidrocarburos Aromáticos*

Los hidrocarburos aromáticos totales (Figura 7.4.1.) presentaron por lo menos un compuesto en el 58.49% de las muestras con un promedio global de 0.0021 $\mu\text{g/mL}$ y valores máximo y mínimo en las estaciones 29 y 38 de 0.0151 $\mu\text{g/mL}$ y 0.000057 $\mu\text{g/mL}$ respectivamente. Los valores más altos de hidrocarburos aromáticos se registran sobre las aguas costeras de Tabasco, entre la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta y el sistema lagunar Carmen-Pajonal-La Machona (Figura 7.4.2.).

El porcentaje más alto de ocurrencia de los hidrocarburos aromáticos se detectó en la estación 29 con el 23.53%. Esto significa la presencia de cuatro compuestos; Fluoranteno, Pireno, Benzo(a)Antraceno y Benzo(b)Fluoranteno, dicha estación es seguida de las estaciones 19, 32 y 52 con un 17.64% respectivamente (Figura 7.4.1.).



Concentración de Hidrocarburos Aromáticos en Agua SGM-4

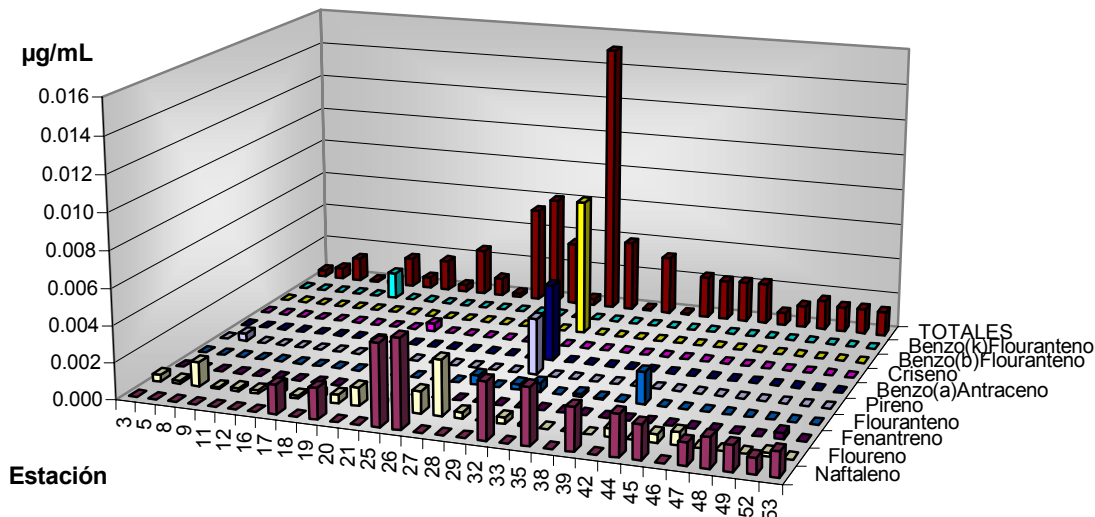


Figura 7.4.1. Concentración de hidrocarburos aromáticos disueltos, campaña oceanográfica SGM-4, 1998.

El hidrocarburo aromático más frecuente fue el Fluoreno apareciendo en el 41.51% de las muestras, representando 22 estaciones. El compuesto aromático de mayor concentración fue el Benzo(b)Flouranteno con 0.0075 µg/mL en la estación 29.

Hidrocarburos Aromáticos Totales en Agua SGM-4

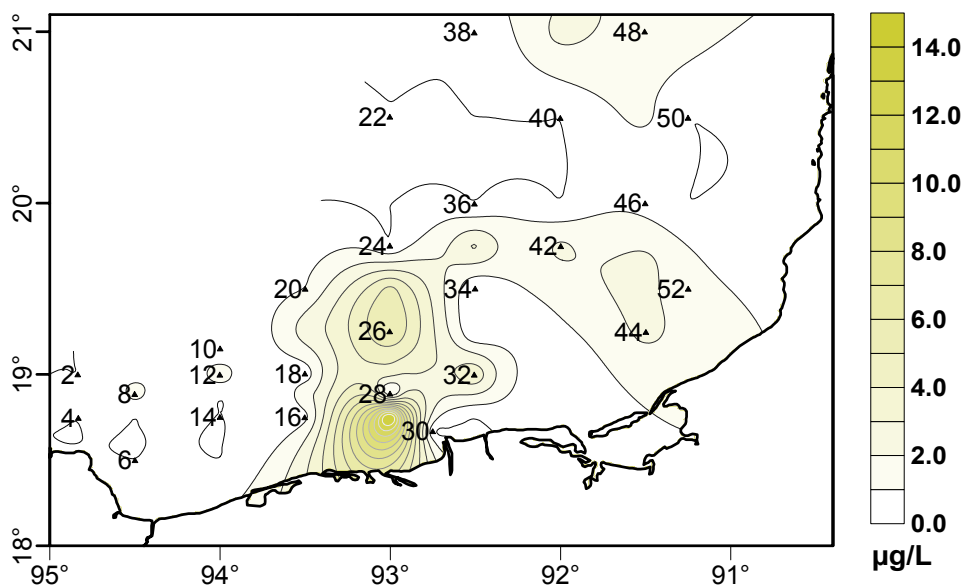


Figura 7.4.2. Distribución horizontal de Hidrocarburos Aromáticos Totales en agua, campaña oceanográfica SGM-4, 1998.



7.4.2. Hidrocarburos Alifáticos

Por su parte los hidrocarburos alifáticos totales presentaron un promedio de 1.711 $\mu\text{g/L}$ con un valor máximo en la estación 47 y un valor mínimo en la estación 10 de 5.107 $\mu\text{g/L}$ y 0.065 $\mu\text{g/L}$ respectivamente (Figura 7.4.3.)

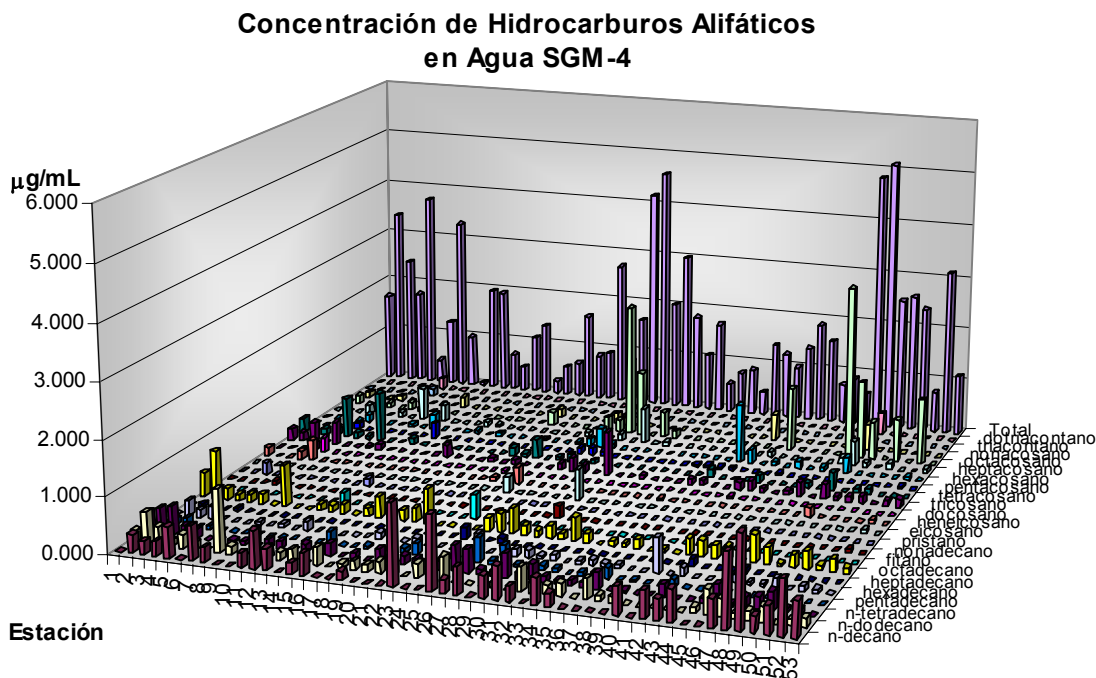


Figura 7.4.3. Concentración de hidrocarburos alifáticos disueltos, campaña oceanográfica SGM-4, 1998.

Los hidrocarburos alifáticos aparecen por lo menos uno en el 100% de las muestras analizadas (Figura 7.4.3.). El porcentaje más alto de ocurrencia de los alcanos totales se detectó en la estación 5, con un 72.3% teniendo la presencia de 16 compuestos de los 22 analizados. Esta estación es seguida de las estaciones 47 y 52 con un 59.1% y 54.5% de los alcanos analizados. El hidrocarburo alifático de mayor concentración fue el N-Octacosano con una concentración de 3.208 $\mu\text{g/L}$ en la estación 46.

Como se puede observar en la Figura 7.4.4. las zonas en donde se localizaron las mayores concentraciones de hidrocarburos alifáticos están localizadas en el área de plataformas marinas y cerca de las aguas costeras de Tabasco, entre la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta y el sistema lagunar Carmen-Pajonal-La Machona.

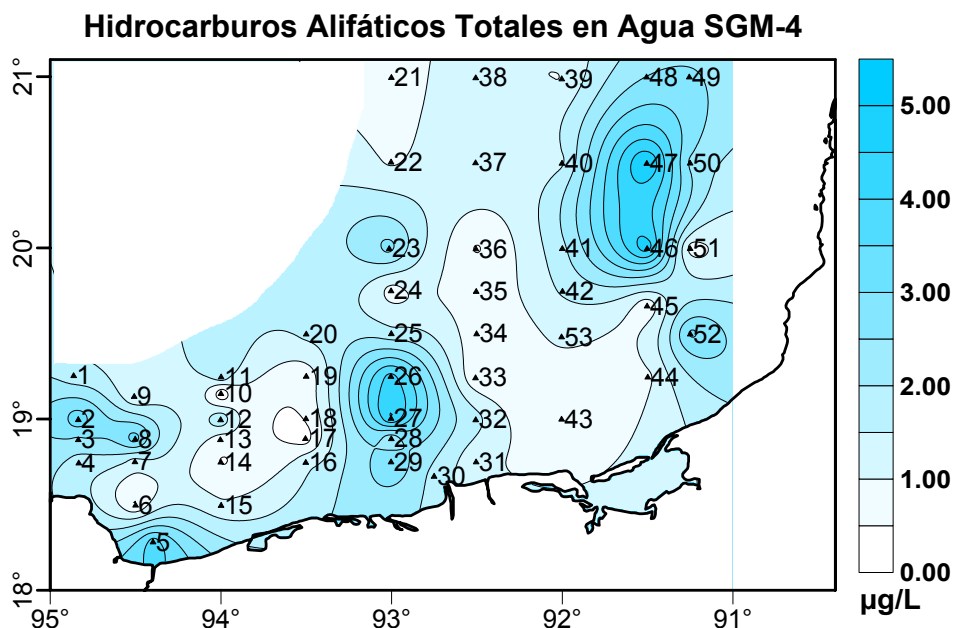


Figura 7.4.4. Distribución horizontal de Hidrocarburos Alifáticos Totales en agua, campaña oceanográfica SGM-4, 1998.

7.5. Comparación de los Niveles de Hidrocarburos por Medio de Diagramas de Cajas.

7.5.1. Hidrocarburos Aromáticos Totales.

El siguiente diagrama de cajas (Figura 7.5.1.) representa la variación que han tenido los Hidrocarburos Aromáticos Totales a través de las campañas que se analizaron en este escrito. Podemos observar que a partir de la campaña oceanográfica SGM-4 hubo un incremento en los niveles de Hidrocarburos Aromáticos teniendo un máximo en la campaña SGM-7 con un valor promedio de 0.0126 $\mu\text{g}/\text{mL}$ con un intervalo de confianza del 75%; para la campaña oceanográfica SGM-8 se nota una disminución en los niveles pero los valores todavía están por arriba de las campañas SGM-4 y SGM-7.

En los mapas de distribución horizontal de Hidrocarburos Aromáticos Totales (Figuras 7.1.3., 7.2.2., 7.3.2. y 7.4.2.) para cada una de las campañas oceanográficas observamos que las mayores contribuciones de Hidrocarburos Aromáticos provienen de la zona de plataformas marinas de la sonda de Campeche y de la desembocadura de varios ríos que vierten sus aguas al mar.

Lo anterior nos indica que el aporte que tiene la actividad petrolera en la zona de plataformas marinas es muy significativo; estos aportes se pueden deber a varios factores como lo son: derrames de petróleo, fugas en la perforación de pozos y en el transporte del petróleo, las aguas de lastre provenientes del lavado de los petroleros, hidrocarburos producidos por la combustión incompleta de los quemadores de las plataformas marinas, etc.



Por el lado de las aportaciones que provienen del continente, tenemos la descarga de aguas residuales a ríos que vierten sus aguas al mar, contaminación producida por los efluentes que las industrias vierten a ríos y lagunas de la región y en menor medida por filtraciones naturales.

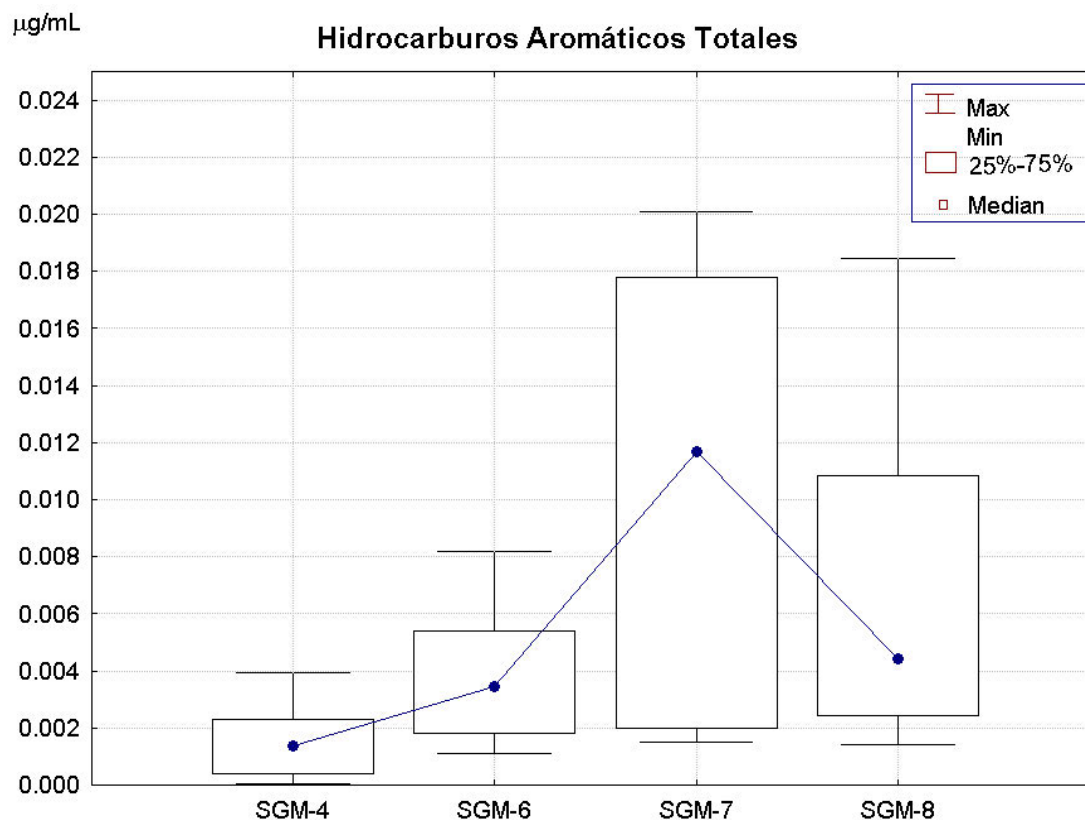


Figura 7.5.1. Niveles de Hidrocarburos Aromáticos Totales para las campañas oceanográficas SGM-4, SGM-6, SGM-7 y SGM-8.

7.5.2. *Hidrocarburos Alifáticos Totales.*

Para el caso de los Hidrocarburos Alifáticos Totales solo tenemos valores de dos campañas oceanográficas, la SGM-8 y SGM-4 respectivamente, en donde podemos observar que ha habido una disminución significativa de la campaña SGM-4 a la SGM-8 (Figura 7.5.2.)

Los aportes en los niveles de Hidrocarburos Alifáticos provienen al igual que para los Hidrocarburos Aromáticos de la zona de plataformas marinas y de la desembocadura de varios ríos (Figuras 7.1.5. y 7.4.4.), solo que en la campaña oceanográfica SGM-4 notamos una mayor incidencia en las estaciones, esto provoca que el valor promedio sea mayor en esta campaña que el de la campaña SGM-8.



La disminución en los niveles de Hidrocarburos Alifáticos de una campaña a otra no se puede explicar de una manera precisa ya que el intervalo de tiempo entre las campañas es de 5 años; para poder explicar mejor esta variación necesitaríamos tener datos intermedios dentro de este intervalo de tiempo que nos permitan interpretar que fue lo que paso en este periodo de tiempo. Desafortunadamente no se cuentan con estos valores ya que en las campañas SGM-6 y SGM-7 no se determinaron Hidrocarburos Alifáticos. A partir de la campaña oceanográfica SGM-8 hasta la última realizada (SGM-11) se han determinado Hidrocarburos Alifáticos disueltos en agua, lo que en trabajos posteriores nos podría ayudar a determinar como ha sido la variación en los niveles de Hidrocarburos Alifáticos Totales en el Sur del Golfo de México y las posibles causas de estas variaciones si es que las hay.

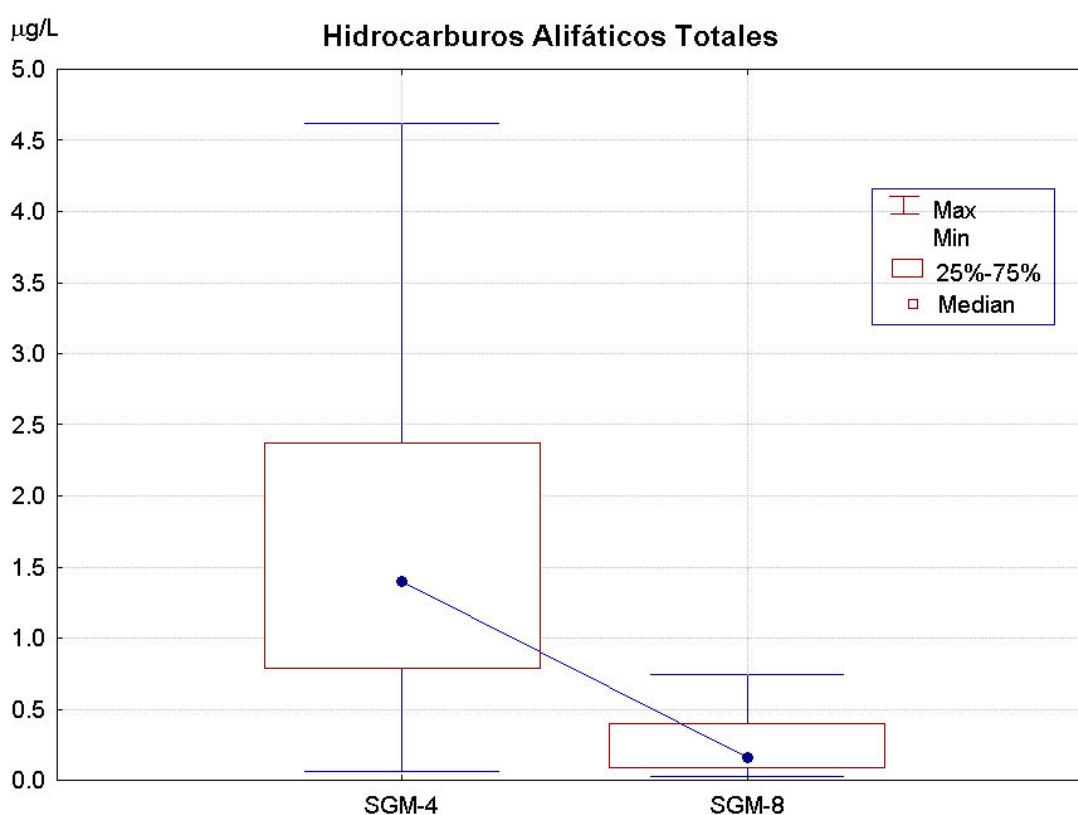


Figura 7.5.2. Niveles de Hidrocarburos Alifáticos Totales para las campañas oceanográficas SGM-4 y SGM-8.

7.5.3. Hidrocarburos Totales.

En el siguiente diagrama de cajas (Figura 7.5.3.) se presentó la variación de los Hidrocarburos Totales para cada una de las campañas analizadas. Como podemos observar en este diagrama los niveles de Hidrocarburos Totales aumentan de la campaña oceanográfica SGM-4 a la SGM-6 y alcanza un máximo en la campaña SGM-7, luego observamos una disminución bastante significativa para la campaña SGM-8. Este comportamiento lo podemos explicar debido al aumento en la producción de crudo que se



observó durante el período de 1999 a 2003 años en los cuales se realizaron las campañas oceanográficas analizadas. Otro factor que influye en la variación de los niveles de Hidrocarburos Totales es el aumento de las descargas municipales y de aguas residuales que hay en los ríos y lagunas que se encuentran dentro de nuestra área de estudio debido al aumento de la población en las ciudades costeras.

Como se puede observar en el diagrama 7.5.3, hay una disminución en los niveles de Hidrocarburos Totales de la campaña oceanográfica SGM-7 a la SGM-8, esta disminución pienso que se debe a que en este periodo se controlaron mejor las descargas y los derrames de Hidrocarburos en la zona de plataformas marinas y a que hubo una mejor distribución de los Hidrocarburos en la columna de agua del Golfo de México.

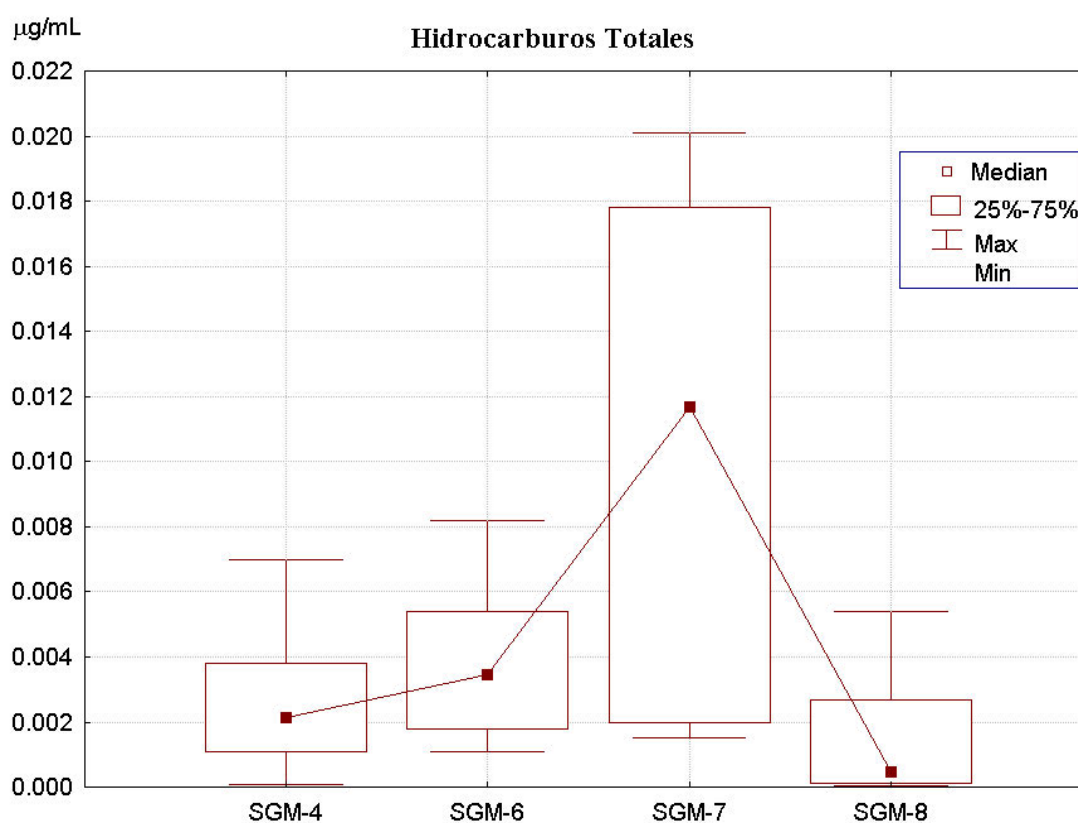


Figura 7.5.3. Niveles de Hidrocarburos Totales para las campañas oceanográficas SGM-4, SGM-6, SGM-7 y SGM-8.



8. CONCLUSIONES

El Sur del Golfo de México tiene una gran importancia económica para México ya que en esta zona se obtiene la mayor parte de petróleo que se extrae en el país y que representa nuestra principal fuente de captación de divisas. Por lo anterior el Sur del Golfo de México merece especial atención para analizar los cambios que se pueden suscitar en materia de Contaminación Ambiental.

Debido a la gran explotación de petróleo y a la contaminación de los ríos que desembocan en el mar, algunas partes del Golfo de México presentan niveles de contaminación elevados que requieren una atención inmediata para la remediación y conservación de los ambientes marinos que subsisten en el Golfo de México.

Los niveles de Hidrocarburos Alifáticos, Aromáticos y Totales en los últimos años han variado con una tendencia a la baja en la última campaña analizada. Esta variación nos indica que a través de los años no se ha podido controlar el incremento de Hidrocarburos que provocan los derrames y descargas de petróleo al mar ni tampoco las descargas de aguas residuales que contaminan los ríos que vierten sus aguas al Mar. Por lo anterior es necesario establecer Normas que obliguen a disminuir las emisiones de Hidrocarburos vertidas hacia el Mar por parte de las industrias que tienen actividades en la zona y también por parte de las descargas municipales y aguas residuales que las poblaciones descargan hacia el Mar.

Para finalizar, es necesario seguir realizando estudios de impacto ambiental en el Sur del Golfo de México para dar seguimiento a los problemas que aquejan a esta zona y tratar de generar las soluciones pertinentes. Cabe señalar que para entender mejor los problemas del Golfo de México sería conveniente analizar en conjunto todos los factores que influyen en el ambiente marino. En el caso de los Hidrocarburos determinados en este documento sería muy favorable analizar conjuntamente Agua, Aire, Sedimento y Organismos para tener así un panorama completo de cómo se distribuyen los Hidrocarburos en el Sur del Golfo de México y de donde provienen; con estos datos se podría formular un plan que asegure conjuntamente la conservación del ambiente marino y el rendimiento económico que se ha tenido en esta región durante mucho tiempo.



9. BIBLIOGRAFÍA

Aguirre Gómez R. 2002. Los Mares Mexicanos a través de la Percepción Remota. Temas selectos de Geografía de México. Instituto de Geografía. UNAM, pp. 45-50.

Albaigés J. y Albrecht P. 1979. Fingerpriting marine pollutant hydrocarbons by computerized gas chromatography mass spectrometry. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 6: 171-190.

Albert L. 1990. Curso Básico de Toxicología Ambiental. Editorial Limusa. México. Segunda Edición, 311 pp.

Anderson J. W., Neff J. M., Cox B. A., Tatem H. E. y Hightower G. M. 1974. The effect of oil on estuarine animals: Toxicity, uptake and depuration, respiration, pp. 285-310.

Antoine J.W. 1972. Structure of the Gulf of Mexico. in: Rezak R y Henry V. J. (Eds.) Contributions on the Geological and Geophysical Oceanography of the Gulf of Mexico. Vol. 3. Texas A. & M. University Oceanographic Studies, pp. 1-34.

APHA, AWWA y WPCF. 1995. Standar Methods. Decimoctava Edición, 1011 pp.

Bedair H. M. y Al-Saad H. M. 1992. Dissolved and Particulate Adsorbed Hydrocarbons in water of Shatt Al-Arab River. *Iraq. Water, Air, Soil Pollution* 61:397-408.

Boluda F. J., Nogué S., Martínez Pérez J. y Muñoz E. 2003. Intoxicación por administración parenteral de insecticidas organoclorados e hidrocarburos aromáticos. *Revista Toxicologica* 20: 46-47.

Borneff J., Selenka F., Hunte H. y Maximos A. 1968. Experimental studies on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants. *Environmental Research* 2: 22-29.

Botello A. V., Ponce G., Toledo A., Díaz G. y Villanueva S. 1992. Ecología, Recursos Costeros y Contaminación en el Golfo de México. *Ciencia y Desarrollo* 17(102):28-48.

Botello A. V., Rojas Galavíz J. L., Benítez Torres J. A. y Zarate Lomelí (Eds.). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. EPOMEX Serie Científica 5. Universidad Autónoma de Campeche. México, 666 pp.

Centro de Ecodesarrollo-SEPESCA. 1981. Atlas del Golfo y Caribe de México. Diagnóstico Ambiental.

Chappin R. G. y Summerlin L. R. 1988. Química. Publicación Cultural. México.

Clark R. C. y Blumer M. 1967. Distribution of n-paraffins in marine organisms and sediments. *Limnology and Oceanography* 12:79-87.



Clark R. C. y Brown D. W. 1977. Petroleum: properties and analyses in biotic and abiotic systems, pp. 1-89. *In*: D.C. Malins (Eds.). Effects of petroleum on Arctic and subarctic marine environments and organisms. Vol. 1. Academy Press. New York.

Clement L. E., Stekoll M. S. y Shaw D. G. 1980. Accumulation, Fractionation and Release of Oil by the Intertidal Clam *Macoma balthica*. *Mar. Biol.* 57: 41-51.

Flores F., Ruiz de Arechavaleta M. y Rosso A. 2002. Desarrollo de un método para la determinación de Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (PAHs). Centro de Investigación y Desarrollo sobre Contaminantes Orgánicos Especiales (CISCOE). 4a Jornadas de Desarrollo e Innovación.

Foote R. Q., Martin R. G. y Powers R. B. 1983. Oil and gas potential of the maritime boundary region in the Central Gulf of México. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 67(7): 1047-1065.

Gallegos A. Barberán, Czitrom J., Fernández S. y Rodríguez A. 1996. Oceanografía Satelital en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM. *Geounam. Boletín Informativo del Área de Ciencias Tierra*, pp. 3-8.

GESAMP. 1977. Joint group of experts on the scientific of marine pollution "impact of oil on the marine environment". Report and Studies. No. 6, pp. 255.

Gutiérrez E. M. 1990. Los Residuos Sólidos Peligrosos: ¿Un Riesgo sin Solución?. *Ciencias No. 20*. UNAM.

Hoffman E. J., Mills G. L., Latimer J. S. y Quinn J. G. 1984. Urban runoff as a source of polycyclic aromatic hydrocarbons to coastal waters. *Environmental Science and Technology* 18: 580-587.

Jenssen M. B. 1994. Review Article: Effects Of Oil Pollution, Chemically Treated Oil, And Cleaning On The Thermal Balance Of Birds. *Environmental Pollution* 86: 207-215.

Kennicutt M. C., Wade T. L., Presley B. J., Requejo A. G., Brooks J. M. y Denoux G. J. 1994. Sediment contaminants in Casco Bay, Maine: inventories, sources, and potential for biological impact. *Environmental Science and Technology* 28: 1-15.

Koons C. B. 1973. Chemical composition: a control on the physical and chemical processes actino on petroleum in the marine environment. *In*: Background papers for a workshop on inputs, fates and effects of petroleum in the marine environment. Vol. 2. National Academy of Sciences. Washington D. C.

Lake J.L., Norwood C., Dimock C. y Bowen R. 1979. Origins of polycyclic aromatic hydrocarbons in estuarine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43: 1847-1854.



- Lodge D. J. y McDowell W. H. 1991. Summary of ecosystem level effects of Caribbean hurricanes. *Biotrópica* 23(4a): 373-378.
- Menzie C. A., Potocki B. B. y Santodonato J. 1992. Exposure to Carcinogenic Polycyclic Hydrocarbons in the Environment. *Environmental Science and Technology* 26:1278-1284.
- Michael J. D. y Mannfred A. H. 2002. *Handbook of toxicology*. Segunda Edición, 1414 pp.
- Moore S. F. 1974. Effects of oil on marine organism: a critical assessment of published data. *Water Research* 8:819-827.
- Ourisson G., Albrecht P. y Rohmer M. 1979. The hopanoids: palaeochemistry and biochemistry of a group of natural products. *Pure and Applied Chemistry* 51: 709-729.
- PEMEX. 1988. *El Petróleo*. Gerencia de información y Relaciones Públicas. México.
- Posthuma J. 1977. The composition of petroleum. *Rapp. P. V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* 171: 7-16.
- Pradyot Patnaik 1992. *A Comprehensive Guide to the hazardous Properties of chemical Substances*.
- PROFEPA. 1999. *Restauración de Suelos Contaminados*. Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados.
- Pruell R. J. y Quinn J. G. 1985. Geochemistry of organic contaminants in Narragansett Bay sediments. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 21: 295-312
- Saval B. S. 1995. Acciones para la remediación de Suelos en México. Segundo Mini Simposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM.
- Sheinbaum J., Zavala J. y Candela J. 1997. Modelación numérica del Golfo de México y Mar Caribe. *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Monografía No. 3. Unión Geofísica Mexicana, pp. 243-264.
- Toledo O. A. 1988. *Energía, Medio Ambiente y Desarrollo*. Serie medio ambiente en Coatzacoalcos. Centro de Ecodesarrollo. Vol. 5. México.
- Vázquez G. F., Gutiérrez E. M., Aguayo C. E., Fernández P. H., Díaz R. A. y Alexander V. H. 1994. El Sistema Lagunar El Carmen-Pajonal-La Machona: Su Hidrodinámica, la Estabilidad de sus bocas y de su línea de costa. Editorial UNAM. México, Vol. 1. 132 pp.
- Venkatesan M. I. y Kaplan I. R. 1982. Distribution and transport of hydrocarbons in surface sediments of the Alaskan Outer Continental Shelf. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 46: 2135-2149.



Wilson S. C. y Jones K. C. 1993. Bioremediation Of Soil Contaminated With Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAHs). *Environmental Pollution* 81: 229-249.

Youngblood W. W y Blumer M. 1975. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment: homologous series in soils and recent marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 39: 1303-1314.

Sitios de Internet Consultados.

Borrás G. Fecha desconocida. Efectos de los Hidrocarburos en la Salud Humana. [web en línea]. Disponible desde Internet en: <http://webs.uvigo.es/h06/webh06/tsfp/es-en/efectos_es.html>. [Con acceso el 09 de Febrero de 2005].

Botello A. V. y Ponce G. 1998. Al Rescate del Golfo de México. El Petróleo. [web en línea]. Disponible desde Internet en: <<http://www.planeta.com/ecotravel/mexico/ecologia/98/0398golf3.html>>. [Con acceso el 03 de Febrero de 2005].

PEMEX-PEP. Informe Anual 2004. Pemex Exploración y Producción. [web en línea]. Disponible desde Internet en: <<http://www.pep.pemex.com/#>>. [Con acceso el 04 de Abril de 2006]

Toledo A. 1998. Al Rescate del Golfo de México. Un Patrimonio Natural Irreemplazable. [web en línea]. Disponible desde Internet en: <<http://www.planeta.com/ecotravel/mexico/ecologia/98/0398golf1.html>>. [Con acceso el 03 de Febrero de 2005].