



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE  
HIDROCARBUROS AROMÁTICOS Y ALIFÁTICOS EN  
SEDIMENTOS SUPERFICIALES EN LA LAGUNA DE  
MECOACÁN, TABASCO MÉXICO.**



**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :**  
**INGENIERA QUÍMICA (LICENCIATURA)**  
**P R E S E N T A**  
**MARÍA ANTONIA MENDOZA CAMPOS**

**MÉXICO D.F.**

**2006**



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 asignado:**

<b>Presidente</b>	<b>Profa. Leticia Ma. de los A. González Arredondo</b>
<b>Vocal</b>	<b>Prof. Rodolfo Torres Barrera</b>
<b>Secretario</b>	<b>Dr. Felipe Vázquez Gutiérrez</b>
<b>1er. Suplente</b>	<b>Prof. Víctor Manuel Luna Pabello</b>
<b>2do. Suplente</b>	<b>Prof. Alfonso Duran Preciado</b>

**Sitio en donde se desarrollo el tema:**

**Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.**

**Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria**

**Asesor del tema: Dr. Felipe Vázquez Gutiérrez \_\_\_\_\_**

**Sustentante: María Antonia Mendoza Campos \_\_\_\_\_**

## **DEDICATORIA**

**A mis padres Rubén Mendoza y Jovita Campos por la paciencia y el empuje que me brindan siempre, por su apoyo y cariño, gracias.**

**A mis hermanos por su ayuda incondicional en las buenas y en las malas.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a PEMEX por la facilidad dada para utilizar los resultados obtenidos durante la realización de los muestreos en la laguna de Mecoacán y al proyecto UNAM-132 por el apoyo brindado para desarrollar la presente tesis.

Al Dr. Felipe Vázquez Gutiérrez por la dirección y apoyo durante la elaboración de esta tesis.

Al M. en C. Héctor Alexander por su apoyo y consejos en el laboratorio.

Al M. en C. Gustavo Enciso y al Biólogo Antonio Frausto por el apoyo en la realización de los muestreos en campo.

Al los Q.F.B. J. Manuel Cortes y Estela Ramírez por tenerme la paciencia y regalarme la enseñanza de cromatografía de gases, tratamiento de muestras y tratamiento de datos analíticos.

Al M. en C. Adrián Díaz por el apoyo en estadística aplicada a los resultados obtenidos.

Al jurado revisor por los comentarios realizados para mejoramiento de esta tesis

A mis compañeros del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por su amistad.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por la formación y conocimientos brindados.

El presente trabajo se realizo gracias al proyecto “Evaluación integral de la Laguna de Mecoacán, municipio de Paraíso, Tabasco”, en el laboratorio de Físicoquímica Marina, en las instalaciones del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Auspiciado por el convenio de colaboración PEP-RMSO-GSIPA-UNAM No. 002 y el proyecto UNAM 132.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>Pág. 9</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
<b>II. GENERALIDADES</b>	<b>12</b>
<b>III. LAGUNAS COSTERAS</b>	<b>13</b>
<b>IV. CONTAMINACIÓN</b>	<b>14</b>
4.1 Contaminación Marina	
4.2 Contaminación en lagunas costeras	
4.3 Toxicidad en el ambiente	
<b>V. GENERALIDADES DEL PETRÓLEO</b>	<b>19</b>
5.1 Breve historia	
5.2 El petróleo en México	
5.3 Composición del petróleo	
5.4 Constituyentes del petróleo	
5.5 Propiedades físicas y químicas del petróleo	
<b>VI. ORIGEN DE LOS HIDROCARBUROS EN EL MEDIO ACUÁTICO</b>	<b>25</b>
6.1 Hidrocarburos biogénicos	
6.2 Hidrocarburos diagénicos	
6.2 Hidrocarburos antropogénicos	
6.3 Aportes y fuentes de origen de los hidrocarburos	
<b>VII. DESTINO DE LOS HIDROCARBUROS</b>	<b>28</b>
<b>VIII. HIDROCARBUROS EN SEDIMENTO</b>	<b>18</b>
8.1 Sedimentos marinos como indicadores de contaminación	
8.2 Importancia de la identificación y cuantificación de hidrocarburos disueltos y sedimentados en lagunas	
8.3 Límites permisibles en Hidrocarburos Policíclicos aromáticos en el ambiente acuático.	

<b>IX. EFECTOS DE LOS HIDROCARBUROS EN LA SALUD HUMANA Y EN LOS ORGANISMOS ACUÁTICOS</b>	<b>Pág. 33</b>
9.1 Toxicidad en la salud humana	
9.2 Toxicidad aguda	
9.3 Efectos sinérgicos	
9.4 Toxicidad en organismos acuáticos	
<b>X. LEGISLACIÓN AMBIENTAL EN MATERIA DE HIDROCARBUROS</b>	<b>38</b>
<b>XI. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>39</b>
11.1 Ubicación de la laguna Mecoacán	
11.2 Climatología	
<b>XII. METODOLOGÍA</b>	<b>43</b>
12.1 Colecta de sedimentos y toma de muestra	
12.2 Tratamiento y extracción de la muestra	
12.4 Cromatografía en columna	
12.5 Control de calidad	
12.6 Cuantificación y cualificación	
<b>XIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>52</b>
<b>XIII. CONCLUSIONES</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS</b>	
<b>ANEXO1. TABLA DE RESULTADOS DE CONCENTRACIÓN DE HC's Y PAH's</b>	
A.1.1 Tabla de resultados de Hidrocarburos alifáticos	<b>65</b>
A.1.2 Tabla de resultados de Hidrocarburos policíclicos aromáticos	<b>67</b>
<b>ANEXO 2. GRÁFICOS DE HC's Y HPA's EN SEDIMENETO SUPERFICIAL</b>	
A.2.1 Gráfica de concentración vs. Compuesto alifático en sedimento durante los tres monitoreos estacionales	<b>68</b>
A.2.2 Gráfica de concentración vs. Compuesto aromático en sedimento durante los tres monitoreos estacionales	<b>71</b>

### **ANEXO 3. DISTRIBUCIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LOS CONTAMINANTES EN LOS TRES MONITOREOS ESTACIONALES.**

A.3.1 Distribución espacio-temporal de Hidrocarburos alifáticos en sedimento para los tres muestreos estacionales	<b>Pág. 74</b>
A.3.2 Distribución espacio-temporal de Hidrocarburos totales en sedimento para los tres muestreos estacionales	<b>75</b>
A.3.3 Distribución espacio-temporal de Hidrocarburos policíclicos aromáticos en sedimento para los tres muestreos estacionales	<b>76</b>

### **ANEXO 4. CURVA DE CALIBRACIÓN DEL ANALITO DE HIDROCARBUROS DEL PETRÓLEO Y CROMATOGRAMA TIPÍCO**

A.4.1 Cromatógrama característico de los 34 HC's del petróleo	<b>77</b>
A.4.2 Curva de calibración de compuestos alifáticos del petróleo	<b>78</b>
A.4.3 Cromatógrama característico de compuestos policíclicos aromáticos del petróleo a determinar	<b>82</b>
A.4.4 Curva de calibración de compuestos policíclicos aromáticos	<b>83</b>

### **ANEXO 5 CROMATOGRAMAS CARACTERÍSTICOS DE HIDROCARBUROS DEL PETRÓLEO**

A.5.1 Cromatógrama característico de hidrocarburos alifáticos en crudo Olmeca	<b>87</b>
A.5.2 Cromatógrama característico de hidrocarburos policíclicos aromáticos en crudo Olmeca	<b>88</b>
A.5.3 Cromatógramas de hidrocarburos alifáticos en sedimento superficial de la laguna de Mecoacán	<b>89</b>
A.5.4 Cromatógrama de hidrocarburos policíclicos aromáticos en sedimento superficial de la laguna de Mecoacán	<b>92</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>95</b>
---------------------	-----------

## RESUMEN

En el presente trabajo, se realiza la evaluación y grado de perturbación ecológica de la laguna de Mecoacán, Tabasco, generada por la presencia de las actividades de exploración y explotación de petróleo que se efectúan en las cercanías de la laguna.

Se efectuó un monitoreo en sedimentos superficiales, en distintas épocas del año como son: nortes (Noviembre y Diciembre) del 2000, estiaje (Abril) y lluvias (Agosto) del 2001, realizando la cuantificación e identificación en de doce hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA's) y treinta y cuatro hidrocarburos alifáticos (HC's). Se presenta un método para el análisis de HPA's y HC's utilizando Cromatografía de Gases Capilar con detector FID.

En las concentraciones de HC's que se determinaron, la temporada de estiaje contribuye con 842.46  $\mu\text{g/g}$ , le sigue la temporada de nortes con un total de 52.42  $\mu\text{g/g}$  y finalmente la temporada de lluvias con un total de alifáticos de 9.39  $\mu\text{g/g}$ . De acuerdo a los índices calculados para determinar el origen del contaminante, se encontró que la procedencia de los hidrocarburos, se debe a un aporte petrogénico y biogénico.

Analizando por muestreo, se encontró en época de estiaje una concentración de la HPA's total de 359.32  $\mu\text{g/g}$ , seguido por la temporada de lluvias con HPA's total de 29.93  $\mu\text{g/g}$  y finalmente la temporada de nortes con una HPA's total de 17.83  $\mu\text{g/g}$ . Se obtiene una predominancia de compuestos formados por 4 anillos bencénicos representado por el Pireno, le siguen los compuestos con 6 anillos bencénicos, representados por el Benzo(g,h,i)pireno, los compuestos con 5 anillos representado por el Benzo(a)pireno y finalmente los compuestos de 3 anillos bencénicos representado por Acenafteno.

La predominancia de compuestos pesados 4 a 6 anillos indica un origen pirolítico, en algunos casos se denota un aporte petrogénico al detectarse la presencia de aromáticos de tres anillos bencénicos. Los índices para diagnosticar cuantitativamente los HPA's de tipo pirogénicos y petrogénicos indican que la procedencia del contaminante se debe a una mezcla de aporte petrogénico y pirolítico.

Se detectaron HPA's con características genotóxicas y cancerígenas como el Benzo(a)pireno con una concentración total de 78.67  $\mu\text{g/g}$ , Benzo(g,h,i)perileno con una concentración total de 137.54  $\mu\text{g/g}$ , Benzo(e)pireno con 10.96  $\mu\text{g/g}$ , Benzo (a)antraceno con 20.05  $\mu\text{g/g}$ , Perileno con 11.08  $\mu\text{g/g}$ , y Criseno con 6.69  $\mu\text{g/g}$ .

## I. INTRODUCCIÓN

En México la industria petrolera anteriormente ha tenido un gran impacto negativo en materia ambiental, debido al petróleo crudo y sus derivados; lo cual hoy en día la industria petrolera ha aplicado medidas diversas que han disminuido la contaminación en sus instalaciones (*Tait, 1987; Vázquez, et al., 1994*).

La República Mexicana, con más de 10,000 km. de litorales, posee aproximadamente 1, 225,500 ha de lagunas costeras potencialmente productivas. En el Golfo de México hay 29 lagunas litorales, de las cuales seis corresponden al estado de Tabasco y cubren un frente marino de casi 60km. Investigaciones geológicas en la llanura deltaica del río Mezcalapa muestran que dentro de ésta se encuentra el sistema lagunar de El Carmen - La Palma -Pajonal - La Machona - La Redonda y Mecoacán (*Vázquez, et al., 1994*).

Específicamente, las lagunas costeras reciben hidrocarburos provenientes de efluentes industriales y desagües, derrames de petróleo, quema de combustibles fósiles e incendios forestales y vegetación.

De igual forma las descargas urbanas y de agricultura liberan cantidades sustanciales al ambiente acuático, por lo que la determinación de la concentración de hidrocarburos en sedimento y agua puede ayudar a determinar el grado de contaminación de un ecosistema. El análisis del contenido de hidrocarburos en sedimento es de gran importancia ya que es el lugar donde se acumulan los contaminantes; por otro lado es importante conocer su concentración en el agua ya que este es el medio de transporte y distribución de estos contaminantes que son introducidos en los ambientes acuáticos.

Existen hidrocarburos que se presentan de manera natural por filtraciones procedentes de los yacimientos en el ambiente marino, sin embargo una proporción significativa de estos en los ambientes costeros y marinos derivan de fuentes antropogénicas; la mayoría son productos refinados del petróleo y sus derivados. Algunos compuestos del petróleo son volátiles y fácilmente degradados en los sistemas acuáticos, pero en muchos casos pueden persistir en la columna de agua y por largos periodos en los sedimentos. Del total anual de petróleo introducido en los mares, aproximadamente el 28% tiene como destino final la zona costera, cuya presencia produce daños visibles e inmediatos y alteraciones ecológicas a largo plazo sobre los organismos y los recursos de esas áreas. En México no existe una metodología oficial de análisis para los HPA's y HC's en sedimentos marinos.

Los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA's), se encuentran en la lista de contaminantes prioritarios debido a sus propiedades carcinogénicas y mutagénicas en general, aunque su propiedad carcinogénica varía de un compuesto a otro. Por ejemplo, el Benzo(a)pireno se considera un potente carcinógeno, el Criseno se considera menos carcinógeno y el naftaleno es no carcinógeno. Se consideran carcinógenos: Benzo(a)antraceno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno y el Indeno(1,2,3-cd)pireno. Se consideran no carcinógenos: Acenafteno, Antraceno, Fluoranteno, Fluoreno, Naftaleno y Pireno; por lo cual es importante desarrollar un método de análisis químico que permita cuantificar los niveles de concentración y preferentemente valores inferiores al límite permitido para humanos.

## **OBJETIVOS**

- **Determinar y cuantificar los niveles de hidrocarburos alifáticos y policíclicos aromáticos en la laguna Costera Mecoacán, analizando muestras de sedimento superficial.**
- **Determinar si esta zona se encuentra impactada y en que medida por la presencia de hidrocarburos del petróleo.**

## II. GENERALIDADES

La contaminación del ambiente marino por hidrocarburos del petróleo es uno de los grandes problemas ecológicos al que se enfrenta la comunidad mundial hoy en día. Debido al intensivo uso del petróleo como la principal fuente de energía, sin duda la contaminación de las lagunas y océanos, especialmente en los últimos años se ha incrementado de manera considerable.

En un reporte realizado por la National Academy of Sciences se estima que aproximadamente 6.1 millones de toneladas métricas de petróleo son introducidas en los océanos anualmente. Los incidentes relacionados con la transportación marítima del petróleo y sus derivados son una de las principales causas de la contaminación marina.

En mar abierto las concentraciones de hidrocarburos son generalmente bajas y el origen de estos componentes no es fácilmente determinado. En contraste a esto en las áreas costeras, bahías y estuarios, los hidrocarburos pueden estar presentes en altas concentraciones, relacionándose su presencia a efectos de contaminación por petróleo como resultado de derrames naturales o accidentales, desechos de refinerías y plantas petroquímicas, operaciones normales de embarque y por transporte atmosférico.

Los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA's) se generan como productos al quemar combustibles fósiles y material orgánico. Las principales fuentes incluyen emisiones de la quema de carbón y madera, emisiones de automóviles, plantas generadoras de energía y quema de desperdicios. Los HPA's se encuentran en una gran variedad de alimentos y son componentes significativos del humo del tabaco (CONACYT, 1987). A nivel mundial hay estudios que revelan su presencia en aire (Bedair, et al., 1992, Padilla, et al., 1989), agua (Thomas, et al., 2000), suelos (Chappin, 1988), alimentos (Merino, 1987) y cosméticos (O'Connor, et al., 2000).

Todos los compuestos orgánicos contienen carbono y la mayoría también hidrógeno, debido a que existe una leve diferencia en electronegatividad entre el carbono y el hidrógeno; la mayoría de los compuestos son no polares. Los hidrocarburos alifáticos son compuestos no polares y son, por lo tanto, pobres competidores con el agua. Los hidrocarburos aromáticos son compuestos no polares o muy débilmente polares como los alifáticos.

Los hidrocarburos que consiguen disolverse en el agua se dispersan rápidamente hasta alcanzar concentraciones por debajo del nivel de toxicidad aguda, pero pueden ser absorbidos por los organismos y afectar a su fisiología, comportamiento, potencial reproductivo y supervivencia (Nacci, et al., 2002).

Los hidrocarburos pueden también llegar hasta el sedimento, donde pueden persistir durante muchos años y afectar a los organismos que viven en el lecho marino y sus proximidades. Cuando el petróleo es derramado en el mar, una parte de los hidrocarburos se fija en el agua y en los organismos, siendo los sedimentos el sitio más importante para el almacenamiento de hidrocarburos.

Existe pérdida de éstos por evaporación, acción de las mareas y flujo de los ríos, así como por descomposición microbiana. La introducción de hidrocarburos en organismos marinos puede ser por

ingestión de alimento conteniendo estos compuestos (*Vives, et al., 2002*) o por absorción directa a través de la columna de agua siendo ésta la ruta más probable.

### **III. LAGUNAS COSTERAS**

Las costas son la franja de nuestro planeta donde se ponen en contacto la tierra, la atmósfera y el agua dulce o salada, las olas son el agente marino que produce mayor modificación de las costas, el viento es otro agente de modificación debido a que altera el tamaño de las olas, acarrea granos de arena y los acumula formando grandes medanos, las mareas son responsables del carácter estuario de las lagunas costeras, pues al penetrar y mezclarse con el agua dulce producen un gradiente de condiciones salinas que permiten la vida de una gran cantidad de organismos. Esta variabilidad en el tipo de costa y sus características de erosión y sedimentación han permitido que, como ecosistemas, las costas sean extremadamente ricas.

Las lagunas costeras son sistemas someros, semicerrados, con comunicaciones efímeras o permanentes con el mar, que se encuentran protegidas de este por algún tipo de barrera, y se encuentran en relación directa con los sistemas hidrológicos continentales (*Vázquez, et al; 1994*).

En las costas encontramos lagunas de agua dulce y más comúnmente estuarios. En México hay más de 137 lagunas costeras de las cuales 92 pertenecen al litoral del Pacífico y 45 al Golfo de México y del Caribe, que cubren una superficie de 12,500 km<sup>2</sup>, son producto del encuentro de dos masas de agua distintas (una proviene del escurrimiento de ríos y otra del mar).

## IV. CONTAMINACIÓN

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

Los contaminantes orgánicos persistentes (COP's) son compuestos químicos resistentes a la degradación fotolítica, biológica y química (biomarcadores); algunos pueden ser semivolátiles, lo que les permite presentarse en forma de vapor o adsorbidos sobre partículas atmosféricas, facilitando su transporte en la atmósfera.

Las propiedades tóxicas de estas sustancias perduran durante largo tiempo en el ambiente y se almacenan en los tejidos grasos, particularmente en los peces y mamíferos marinos con tendencia a concentrarse cada vez más a medida que se transmiten a través de la cadena trófica.

Aunque existen algunas fuentes naturales de hidrocarburos, la mayor parte de los COP's debe su origen a fuentes antropogénicas, asociadas con la fabricación, uso y eliminación de determinados productos químicos orgánicos, proceso de combustión, quema de basura o en incendios forestales.

A esta descripción corresponden los COP's considerados como prioritarios: aldrina, bifenilos policlorados, clordano, DDT, dieldrina, endrina, heptacloro, hexaclorobenceno, mirex, toxafeno, dioxinas y furanos. Así mismo es el caso de otros grupos de sustancias que son candidatas a ser incluidas en el convenio: Hexaclorociclohexano, clordecona, atrazina, endosulfán, pentaclorofenol, ftalatos, parafinas policloradas, hexabromobifenilo, ésteres bifenílicos policlorados, hidrocarburos policíclicos aromáticos, nonil y octa-fenoles perfluoro-octilsulfonato y compuestos órgano-estánnicos, órgano-mercúricos y órgano-plúmbicos (*UNEP 2002; Vives, et al., 2002*).

Las propiedades de estos compuestos son elevada resistencia a la oxidación, mecánica y química; alta permitividad eléctrica; resistencia a la oxidación, al calor y al fuego (altas temperaturas de inflamación); y en algunos casos, afinidad por disolventes grasos. Los COP's se pueden clasificar en dos subgrupos: los hidrocarburos aromáticos policíclicos y los hidrocarburos aromáticos. Los hidrocarburos aromáticos son generalmente los más resistentes a la degradación y se han producido, empleando y liberado de una manera amplia.

### 4.1 CONTAMINACION MARINA

Se define como “la introducción directa o indirecta por el hombre, de sustancias o energéticos en el ambiente marino, estuarios, ríos y lagunas; la cual daña los recursos vivos, pone en peligro la salud humana, altera las actividades marinas entre ellas la pesca, reduce el valor recreativo y la calidad del agua de mar” (*Clark, 1996*).

## 4.2 CONTAMINACION EN LAGUNAS COSTERAS

Los problemas más serios sobre la ecología de las zonas estuario-lagunares nacen de la actividad humana. Por su propia conformación, las áreas estuarinas son lugares que propician la acumulación de diversos materiales antes de su difusión y dilución en el mar. Estos sistemas incluso se consideran verdaderas “cloacas” de la civilización.

En nuestro país los asentamientos humanos en zonas costeras no cuentan con plantas previas de tratamiento de aguas de desecho, y éstas se vierten sobre ríos y estuarios.

La importancia de un ecosistema costero como la laguna de Mecoaacán, ha propiciado el interés de PEMEX por controlar la contaminación del estuario; realizando diversos estudios sobre evaluación ambiental; debido a los derrames ocasionados como ocurrió con el pozo Ixtoc en 1978 (*Patton, et al., 1981*).

Durante diversos años los pescadores y campesinos de la zona costera del Estado de Tabasco denuncian la afectación de sus formas de producción y de vida motivadas por las obras de exploración y explotación petrolera en esa región. En forma particular los pescadores informan que en los últimos años va en aumento la mortalidad de diversos organismos marinos.

La contaminación industrial consiste en el envenenamiento directo de especies y la desaparición temporal de vida en algunas áreas, en la intoxicación que se refleja en las concentraciones de algunos tóxicos en organismos filtradores donde los organismos viven muy cerca de sus límites de tolerancia con respecto a parámetros físico-químicos.

Los objetos y elementos que pueden causar una alteración en un ecosistema estuario-lagunar, se clasifican según su origen como:

- *Naturales*: se encuentran normalmente en el medio, y debido a la intervención humana, se liberan en altas cantidades, y es muy difícil distinguir los niveles naturales de las concentraciones introducidas que varían en el tiempo; en este grupo se incluyen petróleo crudo, metales pesados, materia orgánica en descomposición y los compuestos dejados en suspensión por las operaciones de dragado.
- *Artificiales*: se obtienen por síntesis y son potencialmente las más dañinas y persistentes, ya que no se utilizan, ni se degradan o reciclan (*Clark, 1996*).

Esto se consta en las áreas donde se exploran y explotan con prisa yacimientos petrolíferos, a lo que se suma contribución de refinerías petroleras y complejos petroquímicos. Las fracciones de petróleo o sus derivados de refinación, derramadas accidental o intencionalmente, se transportan eventualmente por arrastre pluvial o eólico hacia las regiones costeras, donde se integran a los sistemas estuario-lagunares.

Cuando un hidrocarburo llega a aguas costeras y comienza a depositarse en la orilla, su potencial de causar daños es mucho mayor. Si el vertido ocurre en un estuario o entra en él por la corriente, viento, etc., se plantean problemas particulares debido a las aguas someras, la alta cantidad de sedimentos en el agua que puede absorber los hidrocarburos, y la presencia de bancos de fango y de marismas de agua salada.

Hay diferentes períodos de peligro para cada uno de los grupos de organismos, tal como la primavera para las aves que están criando y para las larvas de peces, el verano para los organismos bentónicos, y el invierno para las aves migratorias que invernen en el área afectada.

ODUM (1970) señala las principales consecuencias de la alteración de los sistemas lagunares-estuarios:

- Los mecanismos que permiten a los estuarios ser trampas eficientes de nutrientes, también contribuyen como trampas de contaminantes.
- La destrucción de las áreas productoras de detritos como los pastos de pantano y marinos, reducen drásticamente la productividad y limitan directamente su potencial para producir especies de importancia comercial.
- La cadena alimenticia es susceptible a la interferencia del hombre.
- Algunos organismos viven cerca del límite de rangos de tolerancia y pueden extinguirse por cambios ecológicos como introducción de contaminantes o decremento en la concentración de oxígeno resultante de la operación de degrado.
- La estabilización del sedimento es importante para el ciclo normal de nutrientes y áreas de crecimiento extensivo en plantas.
- Normalmente existe un estado natural de eutroficación (disminución del oxígeno disuelto en agua) por lo que los organismos son susceptibles a cualquier proceso en un decremento de la concentración de oxígeno
- El flujo de agua dulce es necesario para que los sistemas lagunares-estuarios funcionen, así la región de baja salinidad es importante para la protección de peces jóvenes, invertebrados y ostiones. La construcción de diques, presas o cualquier desvío de sus causas naturales llega a modificar este aporte con lo cual se extinguen algunas especies.

Las dificultades de las lagunas costeras se resumen principalmente en dos puntos:

1. Conservación: urge a causa del deterioro ambiental de estos sistemas acuáticos, éste crecerá alarmantemente sino se impone un freno inmediato.
2. Alimentación: La productividad potencial hace de estos ecosistemas lugares idóneos para el más directo aprovechamiento de una energía que usualmente se pierde.

Para proponer alternativas son imprescindibles:

1. el impulso a la investigación científica y social bajo una acción multi e interdisciplinaria.
2. la creación de un organismo que coordine estas actividades;

3. la detección y posible solución de los problemas urgentes,
4. la infraestructura tanto técnica como jurídica para llevar acabo las opciones de solución.

No es fácil calcular la cantidad y el origen de los hidrocarburos de petróleo que llegan al medio marino, sin embargo algunos datos son reportados por la Nacional Research Countil, 1985 (*Farrington, 1985*).

En la tabla 1 se reporta un total de 3.2 millones de toneladas métricas por año de hidrocarburos son vertidas al medio marino por distintas fuentes como son Municipales, Industriales, Urbanas y pluviales (representan más del 33% de los hidrocarburos derivados del petróleo vertidos al medio marino).

Por otro lado los aportes correspondientes a la exploración, extracción y transporte de petróleo aportan más del 49% del total. Todo lo anterior nos lleva a esperar 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.

#### **4.3 TOXICIDAD EN EL AMBIENTE**

Debido a la larga vida media biológica que tienen estos compuestos, se facilita la acumulación de concentraciones aparentemente pequeñas durante períodos prolongados de tiempo. Para varios de estos contaminantes, hay algunas pruebas experimentales de que tal exposición acumulativa a un nivel bajo puede estar asociada con efectos no letales crónicos, entre ellos una posible inmunotoxicidad, efectos cutáneos, alteración del rendimiento reproductor y carcinogenicidad potencial o patente.

**TABLA 1. HIDROCARBUROS DEL PETRÓLEO VERTIDOS AL MEDIO MARINO  
(ESTIMADO EN MILLONES DE TONELADAS POR AÑO).**

<i>FUENTE</i>	<i>INTERVALO PROBABLE</i>	<i>ESTIMACIÓN</i>
<b>FUENTES NATURALES</b>		
Filtraciones marinas	0.02 - 2.2	0.2
Erosión de sedimentos	0.005 - 0.5	0.05
<b>FUENTES NATURALES TOTALES</b>	<b>0.025 - 2.5</b>	<b>0.25</b>
PRODUCCIÓN COSTERA	0.04	0.06
<b>TRANSPORTACIÓN</b>		
Operación en buques	0.04 - 1.5	0.7
Operaciones en diques secos	0.2 - 0.05	0.03
Terminales Marinas	0.01 - 0.03	0.02
Descarga de sentina y carga de petróleo	0.02 - 0.06	0.3
<b>TRANSPORTACIÓN TOTAL</b>	<b>0.95 - 2.62</b>	<b>1.47</b>
ATMOSFERA	0.05 - 0.5	0.3
<b>RESIDUOS INDUSTRIALES Y MUNICIPALES</b>		
Residuos municipales	0.4 - 1.5	0.7
Refinerías	0.06 - 0.6	0.1
Otros residuos industriales	0.1 - 0.3	0.2
Aguas residuales Urbanas	0.01- 0.2	0.12
Caudal fluvial	0.01 - 0.5	0.04
Residuos oceánicos	0.005 - 0.02	0.02
<b>RESIDUOS TOTALES</b>	<b>0.585 - 3.14</b>	<b>1.18</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1.7 - 8.8</b>	<b>3.2</b>

**FUENTE: FARRINGTON, 1985**

## **V. GENERALIDADES DEL PETRÓLEO**

### **5.1 BREVE HISTORIA**

*Su nombre significa aceite de piedra (del griego petra).*

Los Hidrocarburos sólidos, líquidos y gaseosos se conocen desde tiempos muy antiguos, en la Biblia se mencionan lagos de asfalto y columnas de fuego (gas natural), los fenicios calafateaban sus naves con asfalto; los babilonios y asirios utilizaban el petróleo como combustible y los egipcios lo emplearon en sus prácticas de embalsamiento.

En Norteamérica, los indígenas recogían el petróleo para usos medicinales. En México, como medicina e incienso ritual, denominando al petróleo con el nombre azteca de “chapopotli” (*Dunque, 1969; Rodríguez, 1985*).

### **5.2 EL PETRÓLEO EN MÉXICO**

El litoral del Golfo de México posee una basta riqueza en yacimientos petrolíferos tanto en tierra firme como en mar abierto, particularmente en la Sonda de Campeche. Por lo que la presencia de hidrocarburos en los sistemas costeros es frecuente, aunado a las descargas y el lavado de buques-tanque, que en buena parte son responsables de la presencia de elevadas concentraciones de breas y alquitranes en playas del litoral mexicano (*Clark, 1996*) Otro punto importante en la contaminación por petróleo es su transporte por vía marina.

Por la importancia económica que representa el Petróleo en México y ante la demanda en el mercado exterior, México a intensificado su explotación, lo que representa un mayor peligro en cuanto a posibles y mayores fuentes 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, refinación y producción de petroquímicos.

Actualmente la Agencia Internacional de Energía (2003), reporta a México entre los países latinoamericanos que más crudo produce (3.8 millones de barriles por día). Por tal motivo las costas de México están expuestas al enorme tráfico de buques-tanque petroleros y al incremento gradual de exploración y explotación de la plataforma continental como la de Campeche, contribuyendo día a día con pequeños o grandes derrames de crudo y/o derivados, alterando de esta manera la estabilidad del ecosistema.

Es evidente que el impacto que ocasionan estos contaminantes al medio marino y que la zona costera incluyendo estuarios con su gran y variada productividad son severamente dañadas debido a sus aguas someras, así la alta cantidad de sedimento en el agua puede absorber y almacenar los contaminantes durante mucho tiempo; y debido a que el principal medio de transporte de los contaminantes es el agua, se deben y tienen que realizar estudios que vigilen la cantidad y variedad de contaminantes disueltos y dispersos en este medio, entre ellos hidrocarburos provenientes de fuentes naturales o artificiales.

### 5.3 COMPOSICIÓN DEL PETRÓLEO

El petróleo bruto es un líquido oleoso de coloración pardo-negruzca, ligeramente verde, raras veces amarillento y muy raramente límpido, que se halla en la naturaleza en grandes bolsas en rocas de sedimentación como arenas y calizas (*IMP, 2002*).

El olor varía, ciertos petróleos de colores poco subidos tienen un olor desagradable, otros de color más acentuado tienen un olor agradable. La densidad oscila de 0.740 y 1.060 g/cm<sup>3</sup> donde se comprenden todo el petróleo explotado.

El Petróleo es una mezcla compleja de compuestos orgánicos de ocurrencia natural, que puede existir en los tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso; conforme a las condiciones de presión y temperatura. Los compuestos orgánicos son esencialmente formados por átomos de carbono e hidrógeno, los cuales se denominan hidrocarburos. La característica principal de los átomos de carbono reside en la capacidad de combinarse entre sí, para formar cadenas, anillos y estructuras moleculares complejas.

Las uniones entre los átomos de carbono pueden ser simple o covalentes (múltiples); estas existen cuando el átomo de carbono comparte electrones con otro átomo en la capa electrónica externa.

### 5.4 CONSTITUYENTES DEL PETRÓLEO

El petróleo crudo y sus productos de refinación son mezclas extremadamente complejas de compuestos orgánicos de los cuales los hidrocarburos son los más abundantes, llegando a comprender más del 85% del total de los componentes (*CONACYT, 1987*).

**HIDROCARBUROS:** son cadenas de átomos de hidrógeno y carbono que de acuerdo a su arreglo estructural de los átomos de carbono en la molécula, se pueden clasificar en:

- Cadena abierta o lineal
- Cadena cerrada o cíclica

Conforme al tipo de enlace entre los átomos pueden ser;

- Saturados o de enlace sencillo: cada uno de los átomos de carbono tiene su enlace cubierto por un átomo de hidrógeno; representan hidrocarburos estables; como son los alcanos (n-parafinas) e iso-alcanos y ciclo alcanos (ciclo parafinas o naftenos).
- No saturados o de enlace covalente: los átomos de carbono muestran enlaces covalentes (dobles o triples) como los alquenos (oleofinas), alquinos (acetilenos), aromáticos (bencenos); estos compuestos son inestables y muy reactivos excepto los compuestos aromáticos.
- Otros compuestos del petróleo crudo son Resinas y asfáltenos, compuestos de Azufre, oxigenados, Nitrogenados, Organometálicos.

**Composición promedio del petróleo crudo:**

Hidrocarburos Saturados	56.0 %
Hidrocarburos Aromáticos	27.1 %
Resinas y Asfáltenos	14.2 %
Otros	2.7 %
TOTAL	100.0 %

## **5.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL PETRÓLEO**

### **PROPIEDADES FÍSICAS**

El petróleo crudo se presenta en la naturaleza con características físicas notorias, entre las que se pueden citar:

1. **COLOR:** en los hidrocarburos sólidos en cuanto mayor es el peso molecular, más oscuro es el petróleo. Los colores que presentan varían de amarillo a café rojizo o verdoso y de café oscuro a negro.
2. **OLOR:** depende de los componentes químicos que predominen en el petróleo crudo por ejemplo:
  - a. Olor a gasolina indica abundancia en parafinas
  - b. Olor agradable señala mayor cantidad de aromáticos
  - c. Olor a azufre proporciona alto contenido de azufre y nitrógeno.
3. **DENSIDAD:** se mide en °API; a valores altos corresponden pesos específicos bajos y viceversa. El peso específico disminuye al incrementarse la temperatura y consecuentemente, a mayor profundidad el petróleo contiene más cantidad de gas disuelto, provocando disminución en su densidad.

PAISES DEL MEDIO ORIENTE	ARABE LIGERO	34 °API
MÉXICO	ISTMO	32 °API
MÉXICO	MAYA	25 °API
PAISES DEL MAR DEL NORTE	LIGERO	36 °API

4. **VISCOSIDAD:** controla la capacidad de flujo de un fluido; a mayor viscosidad menor flujo. La viscosidad de los hidrocarburos es variada, pues abarca del gas hasta el petróleo semisólido. Así pues esta en función de la composición, temperatura y contenido de gas disuelto.
5. **FLUORESCENCIA:** permite reconocer huellas de aceite en rocas, muestras de canal, recortes procedentes de perforación y lodos de perforación; dado que todos los petróleos fluorescen bajo la luz ultravioleta principalmente los hidrocarburos aromáticos variando de amarillo claro a oscuro y en tonalidades verdosas y azulosas.
6. **ACTIVIDAD ÓPTICA:** consiste en la rotación del plano de polarización de la luz.
7. **ÍNDICE DE REFRACCIÓN:** varía de 1.39 (ligeros) a 1.49 (pesados). Esta propiedad se utiliza en refinerías para caracterizar las fracciones de destilación.
8. **PUNTO DE ESCURRIMIENTO:** temperatura mínima a la cual el petróleo fluye.
9. **PUNTO FLASH:** temperatura a la cual se encienden los vapores del petróleo.
10. **VALOR ESPECÍFICO:** es la evaluación de la calidad de los hidrocarburos.

### **PROPIEDADES QUÍMICAS**

Las principales reacciones químicas que se desarrollan en los hidrocarburos son:

1. Oxidación
2. Reducción o Hidrogenación
3. Polimerización
4. Rompimiento Termal (craking)
5. Procesos Bioquímicos
6. Isótopos o relación isotópica

La solubilidad al agua es la característica más importante usada para asegurar: movilidad química, estabilidad química, acumulación química, bioacumulación química y porción química en el ambiente.

**TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LOS PETRÓLEOS CRUDOS.**

# DE CARBONOS	NOMBRE	PUNTO DE EBULLICIÓN
C <sub>4</sub> a C <sub>10</sub>	Gasolina	15° a 200 ° C
C <sub>11</sub> a C <sub>12</sub>	Keroseno	200 ° a 260°
C <sub>13</sub> a C <sub>20</sub>	Gasóleo	260 ° a 332 ° C
C <sub>20</sub> a C <sub>40</sub>	Aceite lubricante	332 ° a 421 ° C
> a C <sub>40</sub>	residuo	-----

La alta solubilidad al agua de un compuesto químico promueve su mayor movilidad y es menos probable a ser acumulativo, bioacumulativo, volátil y persistente, un compuesto químico altamente soluble es propenso a ser biodegradado y metabolizado por los microorganismos.

Un contaminante químico poco soluble en agua es más probable de ser inmovilizado por vía adsorción y es menos móvil, más acumulativo o bioacumulativo, persistente en los comportamientos ambientales y ligeramente propenso a biodegradarse, puede ser metabolizado por plantas y animales.

**TABLA 3. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE n-ALCANOS.**

NOMBRE	FÓRMULA	PF °C	PE °C	S (mg/L)	d g/mL	ESTADO
Metano	CH <sub>4</sub>	-183	-162		-	Gaseoso
Etano	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	-172	-88.5		-	Gaseoso
Propano	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	-187	-42		-	Gaseoso
n-Butano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	-138	0	61.4	-	Gaseoso
n-Pentano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	-130	36	38.5	0.626	Líquido
n-Hexano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH <sub>3</sub>	-95	69	13.3	0.659	Líquido
n-Heptano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	-90.5	98	2.2	0.684	Líquido
n-Octano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> CH <sub>3</sub>	-57	126	0.43	0.703	Líquido
n-Nonano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CH <sub>3</sub>	-54	151	0.12	0.718	Líquido
n-Decano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> CH <sub>3</sub>	-30	174	0.05	0.730	Líquido
n-Undecano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>9</sub> CH <sub>3</sub>	-26	196		0.740	Líquido
n-Dodecano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> CH <sub>3</sub>	-10	216		0.749	Líquido
n-Tridecano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> CH <sub>3</sub>	-6	234		0.757	Líquido
n-Tetradecano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> CH <sub>3</sub>	5.5	252		0.764	Líquido
n-Pentadecano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>13</sub> CH <sub>3</sub>	10	266		0.769	Líquido
n-Hexadecano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> CH <sub>3</sub>	18	280		0.775	Líquido
N-heptadecano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>15</sub> CH <sub>3</sub>	22	292		-	Líquido
n-Octadecano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> CH <sub>3</sub>	28	308		-	Sólido
n-Dodadecano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>17</sub> CH <sub>3</sub>	32	320		-	Sólido
n-Eicosano	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>18</sub> CH <sub>3</sub>	36	-		-	Sólido

**FUENTE: CONTAMINACIÓN E IMPACTO, 1996.**

TABLA 4. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE HPA's.

NOMBRE	SINÓNIMO	Nº DE ANILLOS	FÓRMULA	PM	PF °C	PE °C	S
Naftaleno		2	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128.17	80	218	31.7
Acenaftileno		3	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	152.20	80-83	28.	--
Acenafteno	1,8-Etilennafteno	3	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	154.21	93-96	279	3.8
Fluoreno	2,3-Bencindeno	3	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>	166.22	115	293	1.685
Fenantreno		3	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178.23	100-101	340	1.00
Antraceno		3	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178.23	216	340	0.0446
Fluoranteno	Benzo(jk)fluoreno 1,2-Benzacenafteno	4	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202.26	107-110	384	0.206
Pireno	Benzo(def)fenantreno	4	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202.26	156	393-404	0.123
Benzo(a)antraceno	1,2-Benzantraceno	4	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228.29	155-157	438	0.0094
Criseno	1,2-Benzofenantreno	4	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228.29	254	448	0.0018
Benzo(b)fluoranteno	2,3-Benzofluoranteno Benceno(e)acefenantrileno	5	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.32	163-165	-	0.0014
Benzo(k)fluoranteno	8,9-Benzofluoranteno 11,12Benzofluoranteno	5	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.32	217	480	-
Benzo (a)pireno	Benzo(def)criseno 3,4-Benzopireno	5	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.32	179	495	0.0038
Dibenzo(ahantraceno	1,2,5,6-dibenzantraceno	5	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	278.35	266	254	0.0006
Benzo(ghi)perileno	1,12-Benzoperileno	6	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	276.34	277-279	510	0.0002
Indeno(1,2,3-cd)pireno	o-fenilenpireno 2,3-Phenylene pyrene	6	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	276.34	177-180	-	-

## VI. ORIGEN DE LOS HIDROCARBUROS EN EL AMBIENTE ACUÁTICO

La tarea de determinar con precisión los aportes de hidrocarburos en muestras ambientales es muy difícil y complicada debido al gran número de compuestos que pueden estar presentes en ellas, así como por las modificaciones posteriores a su introducción y deposición.

Los contaminantes pueden ser naturales o artificiales. Los primeros se encuentran en el ambiente e incluyen componentes no refinados del petróleo, metales pesados como mercurio y cadmio; sustancias nutrientes derivados del nitrógeno y del fósforo.

Las principales fuentes de hidrocarburos del petróleo en el ambiente marino pueden ser de origen: *biogénico, diagenético, por combustión o antropogénico.*

### 6.1 HIDROCARBUROS BIOGÉNICOS

Son producto de procesos naturales, son sintetizados por casi todas las plantas, animales marinos y terrestres incluyendo la microbiota y peces; así como bacterias del plancton marino algas y plantas superiores. Los alcanos lineales y ramificados son sintetizados por un número considerable de organismos, los alquenos son los compuestos en mayor abundancia en todos los niveles tróficos (*Bedair, et al., 1992*).

TABLA 5. SÍNTESIS DE ALCANOS LÍNEALES POR ORGANISMOS.

ESPECIE	COMPUESTOS
Microbiota	Iso alcanos C <sub>25</sub> - C <sub>32</sub> , n- C <sub>19</sub>
Algas verdes-azules	7 y 8 Metilheptadecano, C <sub>19</sub> y C <sub>21</sub> poliolefinas, Heneicosahexano
W1Algas cafés-rojas	C <sub>15</sub> - C <sub>17</sub> Mono y diolefinas, n-alcanos C <sub>15</sub> - C <sub>21</sub> , Alquilciclopropano
Fitoplancton	Heneicosahexano (HEH), n-alcanos C <sub>15</sub> - C <sub>17</sub>
Zooplancton	n-alcanos impares C <sub>21</sub> - C <sub>31</sub> , Pristano, C <sub>19</sub> Mono-olefinas
Espojas y corales	C <sub>25</sub> - C <sub>34</sub> n-alcanos sin preferencia de carbonos pares-impares
Peces	Escualeno, C <sub>19</sub> , C <sub>20</sub> mono-di y tri olefinas, n-parafinas C <sub>15</sub> - C <sub>33</sub>
Vegetación terrestre	n-C <sub>21</sub> al n-C <sub>33</sub> , n-alcanos impares

FUENTE: CONTAMINACIÓN E IMPACTO, 1996.

También pueden ser adquiridos por medio de sus recursos alimenticios a través de la columna de agua ya sea filtración o contacto directo. El Pristano (C<sub>19</sub>) y el Fitano (C<sub>20</sub>) son compuestos que se encuentran comúnmente en el petróleo. Los hidrocarburos más característicos de la mayoría de los sedimentos costeros no contaminados son:

- Los hidrocarburos biogénicos de origen reciente exhiben una alta predominancia de n-alcanos de número impar.
- Los aportes por detritos de plantas terrígenas se caracterizan por la presencia de n-alcanos de número impar en la región de C<sub>23</sub> a C<sub>33</sub>.

- Los aportes biogénicos marinos (origen marino) se ven marcados por la presencia de n-alcanos C<sub>15</sub>, C<sub>17</sub> y C<sub>19</sub>.
- Contribuciones biogénicas notan la predominancia de un isoprenoide, usualmente el Pristano (C<sub>19</sub>), siendo la proporción de Pristano/Fitano > 1, en tanto el Fitano (C<sub>20</sub>), es raro encontrarlo como un biolípido. El Pristano y el Fitano son compuestos que se encuentran comúnmente en el petróleo, en los organismos solo se conoce el Pristano que al parecer ingresa con el alimento (*Padilla, 1989*).
- Los valores de la proporción isotópica del carbono en material biogénico son totalmente diferentes a los que se presentan en el petróleo crudo.
- Se pueden presentar una o varias olefinas o cicloalcanos en rangos de peso molecular bajo.
- Los de tipo aromático no se presentan frecuentemente o al menos en proporciones significativas (*Bedair, et al., 1992*).

## 6.2 HIDROCARBUROS DIAGÉNICOS

Las moléculas biogénicas como terpenos, esteroides, pigmentos carotenoides, etc., pueden ser alterados después de su deposición en los sedimentos, por acción microbiana o por procesos químicos originando una amplia variedad de nuevos compuestos químicos. Así los constituyentes primordiales de los hidrocarburos diagénicos incluyen: hidrocarburos alifáticos, cicloalcanos, estéranos, hidrocarburos aromáticos policíclicos y triterpenos pentacíclicos. (*Wakeham, et al., 1981*).

## 6.3 HIDROCARBUROS ANTROPOGÉNICOS

Las partículas atmosféricas de ciudades densamente pobladas contienen hidrocarburos saturados y aromáticos, los cuales son formados durante la combustión incompleta o pirólisis de los combustibles, la hulla y la madera. La mayoría de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HPA's) formados durante la combustión son transportados por vía atmosférica hacia la superficie de los mares, y posteriormente por sedimentación se introduce en los sedimentos costeros.

Los HPA's originados por combustión se caracterizan por un grado de alquilación menor que aquellos presentes en el petróleo crudo, ya que los procesos de pirólisis favorecen menos la alquilación, mientras que los de baja temperatura (maduración del petróleo) producen una mayor sustitución. También los HPA's presentes en sedimentos y formados por combustión, contienen un escaso número de HPA's con 2 anillos (naftalenos), pero exhiben un gran número de HPA's formados por 3-5 anillos bencénicos como: fenantrenos, antracenos, pirenos, benzoantracenos y benzopirenos (*Clark, 1996*).

Los hidrocarburos provenientes de fuentes antropogénicas poseen una amplia variedad de compuestos ya que se originan por medio de múltiples actividades y se introducen al ambiente por varias rutas (quema de carbón y combustibles fósiles, uso de máquina de combustión interna, incineración de basura, combustión industrial, efluentes municipales, actividades de transporte, derrames y refinación petrolera).

Actualmente se estima en 3.2 millones de toneladas métricas anuales los aportes totales de hidrocarburos al medio marino, contribución que proviene en su mayoría de fuentes terrestres principalmente descargas de desechos industriales y municipales.

- Los HAP's están presentes de 3 a 6 anillos bencénicos

- El fluoranteno y perileno son los HAP's más característicos de muestras de hidrocarburos originados por combustión incompleta (pirólisis), fenantreno, benzoantraceno, criseno y benzopirenos en menor proporción.
- Los compuestos mono, di y tri sustituidos del fenantreno son los constituyentes más abundantes del petróleo intemperizado.
- El dibenzotiofeno es mucho menos abundante en los petróleos intemperizados que en los crudos recientes.

Los HPA's constituyen una de las clases más severas de contaminantes orgánicos relacionados con las actividades humanas. Su importancia como contaminante dentro del medio marino está relacionada con su movilidad, debido a su alto peso molecular son relativamente móviles y por ende baja volatilidad y solubilidad.

#### **6.4 APORTES Y FUENTES DE ORIGEN DE LOS HIDROCARBUROS**

Las estimaciones de la "Internacional Tanker Owners Pollution Federation" de Londres, realizadas en 1986, indican que el total de aportes de petróleo al ambiente marino por todas las fuentes es aproximadamente 3.2 millones de toneladas por año, siendo introducido éste al océano y a zonas costeras de diversas maneras:

En la tabla 6, se puede apreciar que la fuente principal de contaminación la constituyen las descargas industriales y urbanas, así como las operaciones relacionadas con el transporte. Esta consideración es importante para zonas costeras, las cuales tienen un intenso tráfico de buques petroleros, así como desarrollos importantes de centros urbanos e industriales.

**TABLA 6. APORTE DE PETRÓLEO EN ESTUARIOS MARINOS.**

FUENTE	ESTIMACIÓN
Descargas industriales urbanas	37 %
Operaciones de transporte	33 %
Accidentes petroleros	12 %
Atmosféricos	9 %
Fuentes naturales	7 %
Producción/Exploración	2 %

## VII. DESTINO DE LOS HIDROCARBUROS

Los principales procesos involucrados en el destino del petróleo en zonas costeras, se ejemplifica en la figura 1.

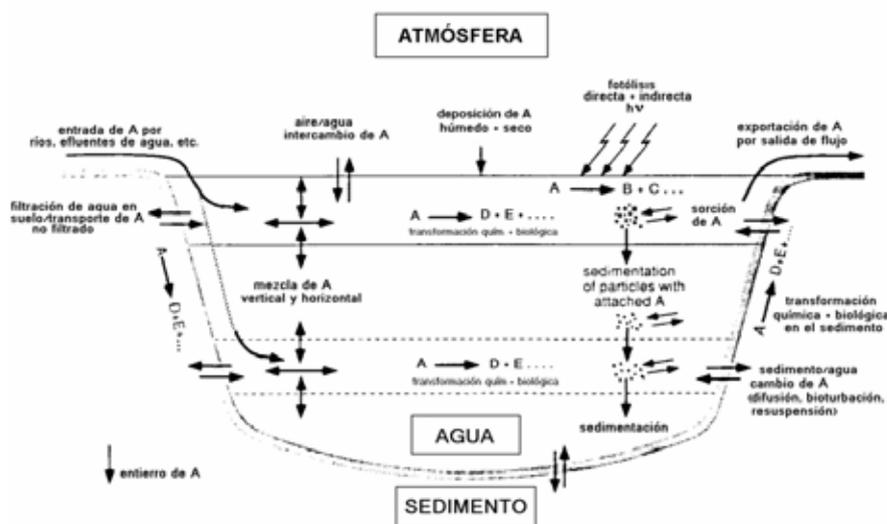


FIGURA 1. PROCESOS QUE DETERMINAN LA DISTRIBUCIÓN, TIEMPO DE RESIDENCIA O HUNDIMIENTO DE UN COMPUESTO ORGÁNICO ANTROPOGÉNICO EN UN LAGO (Schwarzenbach, 1993).

Después de la descarga o derrame de petróleo se forma una delgada película en la superficie del agua, misma que se dispersa por acción del oleaje, viento y marea. Sobre esta película actúan factores físicos, químicos y biológicos (intemperismo), como son (Lizárraga, et al., 1982; Schwarzenbach, 1993):

1. Evaporación
2. Dispersión
3. Emulsificación
4. Disolución de las fracciones ligeras
5. Oxidación
6. Sedimentación
7. Biodegradación
8. Adsorción sobre materia orgánica articulada

Sin embargo y a pesar de la pérdida por factores físicos y transformaciones químicas, en su gran mayoría los componentes del petróleo permanecen inalterados en el medio acuático, puede decirse que la evaporación, dispersión, emulsificación y disolución son factores de intemperismo de mayor importancia durante las fases preliminares del derrame, mientras que la oxidación, sedimentación y biodegradación se relacionan con procesos a largo plazo, los cuales determinan en conjunto el destino del petróleo derramado.

## VIII. HIDROCARBUROS EN SEDIMENTOS

Los sedimentos son el producto del intemperismo depositados por los agentes de erosión, la clasificación de los sedimentos clásticos depende de la composición, tamaño de partícula, clasificación de grano y forma.

TABLA 7. CLASIFICACIÓN DE SEDIMENTOS.

PARTÍCULA	TAMAÑO (mm)	SEDIMENTO	ROCA
Bloque	> a 256	Grava	Conglomerado
Guijón	64 a 256	Grava	Conglomerado
Guijarro	2 a 64	Grava	Conglomerado
Arena	1/16 a 2	Arena	Arenisca
Limo	1/25 a 1/16	Limo	Limonita
Arcilla	> a 1/256	arcilla	Lutita

Los sedimentos son el receptáculo de materiales y sustancias dispersas en la columna de agua, por lo que su análisis químico es de gran utilidad para detectar algunos contaminantes en ecosistemas acuáticos. En los sedimentos de zonas contaminadas, las concentraciones de hidrocarburos de origen fósil pueden variar en un amplio rango, según el origen de la contaminación y las características del ecosistema incluso llegan a ser mucho mayores que las concentraciones de hidrocarburos biogénicos, de tal forma que la composición de los mismos se ve influenciada directamente por el tiempo que estos tengan en los sedimentos y desde luego de la composición original del petróleo de donde provengan.

Los tiempos de residencia de hidrocarburos fósiles en los sedimentos puede ser de 3 a 10 años, según la velocidad de degradación de estos; en zonas costeras tropicales puede ser mucho mayor por la presencia de nutrientes, luz, temperatura, oxígeno y sustrato, así como bacterias y oxidación fotoquímica que inducen altas tasas de biodegradación por bacterias.

### **8.1 SEDIMENTOS MARINOS COMO INDICADORES DE CONTAMINACIÓN**

Las características geoquímicas de los sedimentos hacen de estos un dispositivo de vigilancia frente a problemas de contaminación; debido a que constituyen el más grande y estable depósito y recurso para la existencia de una amplia variedad de elementos orgánicos e inorgánicos en el medio marino (incluyendo contaminantes).

#### **VENTAJAS**

1. Concentran contaminantes por periodos más largos que los organismos
2. Son más estacionarios y más fáciles de analizar que los organismos.
3. Representan el hábitat de muchos organismos.
4. Representan la base alimenticia para muchos organismos.
5. Son fáciles de obtener, muestrear y repetir muestreos en los mismos sitios que nos señalen tendencias de contaminación

6. Dan información más precisa sobre áreas pequeñas y distribución regional de ciertos contaminantes que la biota.
7. Brindan información en escala de tiempo, aún en etapas previas a la introducción de un contaminante (BASELINE).
8. En regiones de gradientes físicos altos (estuarios) son el mejor medio para obtener datos comparables aún sobre el alto rango de variación de las condiciones ambientales.

#### *DESVENTAJAS*

1. Los niveles reales o potenciales de contaminantes en sedimentos son algunas veces el producto de una compleja interacción y transformación antes de que el contaminante este finalmente incorporado en ellos.
2. En algunas áreas, la erosión y sedimentación alternada da como resultado un registro geológico fragmentado. En áreas de baja depositación, la “bioturbación” puede alterar la historia deposicional de los contaminantes.
3. Los sedimentos usualmente no concentran contaminantes del mismo grado que lo hacen los organismos, lo cual dificulta la detección de aportes antropogénicos a cierta distancia del origen del aporte.

En los últimos veinte años, se han conducido estudios en las costas mexicanas con el fin de determinar los niveles de hidrocarburos biogénicos y petrogénicos presentes en los sedimentos y comprender los factores físico-químicos que controlan la distribución y destino de estos; apoyándose principalmente en técnicas analíticas útiles para la determinación precisa de constituyentes inorgánicos y orgánicos presentes en los sedimentos.

### **8.2 IMPORTANCIA DE LA IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE HIDROCARBUROS DISUELTOS Y SEDIMENTADOS EN LAGUNAS COSTERAS**

La investigación de hidrocarburos de petróleo en el ambiente acuático tiene su importancia; para evaluar la calidad medioambiental que determinará el grado de contaminación y el posible impacto que pueda causar a los ecosistemas.

Es importante evaluar la presencia de HPA's en los tres compartimentos de un ecosistema costero: agua, sedimentos y organismos. El estudio de los HPA's disueltos y dispersos en la columna de agua es una actividad importante en los programas de vigilancia de la contaminación por petróleo; además de esta forma (disuelta o dispersa) los HPA's están disponibles para los organismos acuáticos, lo cual es altamente peligroso debido a su toxicidad y a su potencialidad cancerígena y mutagénica (*Bouloubassi, et al., 1991; Kay, et al., 1999*).

El análisis de HPA's en los sedimentos costeros pueden sugerir un proceso de acumulación de estos compuestos, así como del tipo de fuentes de los mismos. Es por ello que evaluar el contenido de los aromáticos en los sedimentos puede servir como un indicador de la entrada de estos compuestos al medio acuático; los sedimentos tienen un efecto sustancial integral sobre los patrones temporales de entrada de HPA's, y ofrecen un buen esquema geográfico sobre todo cuando se conocen parámetros ambientales como patrones de corrientes, origen de los sedimentos, tasas de sedimentación, entre otros (*Clark, 1996*).

**TABLA 8. HIDROCARBUROS PRESENTES EN SEDIMENTOS COSTEROS Y MARINOS DEL GOLFO DE MÉXICO Y MAR CARIBE.**

ZONA DE ESTUDIO	ENTIDAD	AGUA ppb( $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ )	SEDIMENTOS $\mu\text{g}/\text{mL}$	ORGANISMOS $\mu\text{g}/\text{mL}$
Laguna Madre	Tamaulipas	-	26.0	-
Laguna de Pueblo Viejo	Veracruz	-	53.0	-
Laguna de Tamiahua	Veracruz	-	31.0	-
Laguna de Alvarado	Veracruz	-	18.0	-
Laguna del Ostión	Veracruz	18.4	120.0	850.0
Río Coatzacoalcos	Veracruz	-	680.0	6.0 Peces; 8 crustáceos; 7.5 moluscos
río Tonalá	Veracruz	-	1148.0	-
Laguna del Carmen	Tabasco	4.0	45.0	-
Laguna Machona	Tabasco	7.0	45.0	-
Laguna Mecoacán	Tabasco	5.0	88.0	-
Laguna de Términos	Campeche	-	85.0	-
Laguna de Términos	Campeche	48.0	37.0	2.3
Laguna Bojórquez	Quintana Roo	4.4	12.0	-
Laguna Nichupté	Quintana Roo	-	93.0	-
Plataforma Continental de Campeche	-	-	43.3	-
Golfo de México	Golfo de México	11.0	94.0	-
Caribe Mexicano	Caribe Mexicano	15.0	70.0	-
LIMITE PERMISIBLE PARA ZONAS NO CONTAMINADAS (UNESCO 1976)	10.0		70.0	-

CONTAMINACIÓN E IMPACTO, 1996.

En la laguna costera de Mecoacán en Tabasco, estudios anteriores han detectado niveles altos de hidrocarburos en sedimentos ( $88 \mu\text{g}/\text{mL}$ ), esto se explica debido a que se encuentra en una zona de explotación petrolera, en la que durante las actividades rutinarias de perforación y transporte del petróleo, se ocasionan derrames que pueden considerarse como aportes continuos de hidrocarburos de petróleo hacia este sistema costero. Debe mencionarse también que cerca de la laguna, se asienta la terminal petrolera de “Dos Bocas” cuya capacidad de almacenamiento es de 6 millones de barriles de petróleo crudo y cuya movilización, carga y descarga se liberan desechos que tienen como destino final el ecosistema lagunar.

La Norma establecida por UNESCO (1976) de  $70 \mu\text{g}/\text{mL}$  para “zonas no contaminadas”; da por hecho que la laguna de Mecoacán ocupa el sexto lugar entre las lagunas costeras más contaminadas de diversas regiones del Golfo de México y Mar Caribe (Espino, 1994). Véase tabla 8.

### 8.3 LÍMITES PERMISIBLES EN HIDROCARBUROS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS EN EL AMBIENTE ACUÁTICO

Dieciséis contaminantes orgánicos derivados del Petróleo (HPA's) son considerados como contaminantes prioritarios por la EPA, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comunidad Económica Europea (CEE) debido a su toxicidad y a su potencialidad cancerígena y mutagénica (Menzie, et al., 1992).

En nuestro país no existen Normas que controlen los límites permisibles de hidrocarburos en el ambiente (aire, agua, suelo, organismos acuáticos), por lo que con frecuencia se recurre a referencias de organismos internacionales (Canadá, Estados Unidos y Países bajos). Véase tabla 9.

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 9. LÍMITES PERMISIBLES PARA HPA's ESTABLECIDOS POR CANADÁ Y PAISES BAJOS.

FUENTE	PARAMETRO	SUELO *1 (mg/Kg.)	SUELO *2 (mg/Kg.)	SUELO *3 (mg/Kg.)	AGUA (µg/mL)
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	8.0	8.0	75	-
	Criseno	8.0	8.0	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-cd)pireno	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	
PAISES 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-cd)pireno	5	-	-	0.5
	Benzo(g,h,i)perileno	10	-	-	1.0
HPA's TOTAL		20	-	-	10

FUENTE: PROFEPA, 1999

\*HTP: Hidrocarburos totales de petróleo; \*1: Se refiere al suelo de uso agrícola; \*2: Se refiere al suelo residencial/recreativo; \*3: Se refiere al suelo de uso industrial.

## **IX. EFECTOS DE LOS HIDROCARBUROS EN LA SALUD HUMANA Y EN LOS ORGANISMOS ACUÁTICOS**

### **9.1 TOXICIDAD EN LA SALUD HUMANA**

Uno de los factores más importantes para evaluar la capacidad contaminante de un compuesto es su degradabilidad, es importante que el contaminante se degrade de forma rápida y cuantitativa. En la mayoría de los casos, las reacciones de degradación transforman el contaminante en otros compuestos de menor toxicidad, pero caso contrario los productos de degradación son tanto o más tóxicos que los pesticidas.

Por otra parte, los compuestos químicos se presentan normalmente en el medio ambiente como mezclas de composición desconocida, de forma que sus efectos tóxicos pueden ser aditivos, antagonísticos o sinérgicos.

### **9.2 TOXICIDAD AGUDA**

Los hidrocarburos aromáticos son los más tóxicos, seguidos por las series olefinicas, nafténicas y parafinicas. Dentro de cada una de las series las moléculas de bajo peso molecular son las más tóxicas.

Las Parafinas producen anestesia y narcosis en concentraciones bajas, causando daño celular y muerte en altas concentraciones.

Los naftenos o cicloparafinas aunque se presentan como productos naturales de la biota marina pueden inferir y bloquear los procesos biológicos de organismos marinos.

Los hidrocarburos aromáticos son considerados como los componentes del petróleo más dañinos, ya que algunos actúan como veneno agudo y otros como el 3,4-benzopireno presentan actividad carcinogénica.

Una de las sinergias para explicar es el uso de tensoactivos, que favorecen la emulsión y dispersión de los productos derivados del petróleo; la toxicidad de las dispersiones aumenta debido a que con su uso es probable que este multiplique el número de pequeñas gotas de aceite y por consiguiente la posibilidad de contacto o ingestión.

Para evaluar la toxicidad de una muestra existen dos tipos de metodologías principales: las relaciones cuantitativas estructura-toxicidad (QSTR) utiliza ecuaciones matemáticas; y los bioensayos, que son técnicas de laboratorio que evalúa experimentalmente por medio de respuesta biológica del organismo expuesto la toxicidad (*Estudio de degradación Cáp. V; Tsevetnenko, et al., 2002*).

Para medir el daño que pueden causar en los seres humanos algunas sustancias químicas, entre ellas los hidrocarburos, se reutilizan pruebas en ratones para determinar la dosis letal media ( $LD_{50}$ ), que es la cantidad de químico que mata la mitad de la población, a la cual se le aplica.

En la tabla 10 se reportan datos de  $DL_{50}$  para los HPA's más tóxicos por su poder carcinogénico (*Pradyot, 1992; Randerath, et al., 1999*).

La ingestión de hidrocarburos alifáticos (HC's), puede afectar tres sistemas orgánicos fundamentales: pulmón, aparato gastrointestinal y sistema nervioso (*Guía de Salud e Higiene Laboral*)

- a) Pulmón: los síntomas respiratorios son: ahogo, tos, sibilancias y ronquera. Síntoma de distress respiratorio, como, tos persistente, cianosis, retención intercostal, taquipnea.
- b) Generalmente son irritantes de boca, garganta e intestino, se han observado vómitos espontáneos hasta en un 40% de los pacientes, muchos presentan náuseas, malestar intestinal, distensión abdominal, eructos, flatulencia.
- c) SNC, es inusual la aparición de síntomas como letárgica, aturdimiento, estupor y coma (conviene descartar en este caso la presencia de aditivos tóxicos como aromáticos o plaguicidas o bien la posibilidad de una ingesta considerable de gran volumen o la presencia de una neumonía por aspiración grave).

Los hidrocarburos alifáticos de  $C_1$  a  $C_4$  no producen efectos sistémicos, actúan como "simples asfixiantes, la inhalación puede causar hipoxia, puede cruzar con facilidad la membrana alveolo capilar y originar síntomas neurológicos, efectos cardiotoxicos con producción de arritmias fatales. Sus efectos se observan cuando la concentración en el aire es tan elevada que disminuye de forma importante la presión parcial del oxígeno.

Los hidrocarburos de  $C_5$  a  $C_8$  deprimen el SNC, causando mareos e incoordinación motora; en general tienen un bajo poder tóxico y se necesitan altas concentraciones en el ambiente para producir depresión central, también producen polineuropatía como el hexano.

A medida que aumenta el número de carbonos en su estructura, disminuye la concentración necesaria para producir efecto depresor en el SNC, de tal forma que para: Hexano 30  $\mu\text{g/mL}$ , Heptanos 15 $\mu\text{g/mL}$  y Octanos 10 $\mu\text{g/mL}$  (*Guía de Salud e Higiene Laboral*).

Los efectos de los COP's pueden ser muy sutiles y desencadenarse a bajas concentraciones, presentándose después de varios años de la exposición, llegando en ocasiones a presentarse en las subsecuentes generaciones.

TABLA 10. DL<sub>50</sub> PARA HPA's CONSIDERADOS COMO PELIGROSOS EN SU TOXICIDAD.

HPA's	ORAL DL <sub>50</sub> (mg/kg)	LC <sub>50</sub> (ppm/4H)	HC's	SNC DEPRESOR (µg/mL)
Naftaleno	600	No reportada	Metano	Asfixia -
Acenafteno	No reportada	No reportada	Etano	Asfixia
Fenantreno	700	No reportada	Propano	Asfixia
Antraceno	430	No reportada	n-Butano	Asfixia
Fluoranteno	2000	No reportada	n-Pentano	Asfixia
Pireno	800; *2700	No reportada	n-Hexano	30
Benzo(a)antraceno	10	No reportada	n-Heptano	15
Criseno	No reportada	No reportada	n-Octano	10
Benzo(e)pireno	No reportada	No reportada	n-Nonano	No reportada
Benzo(a)pireno	500-*5628	64,000	n-Decano	No reportada
Perileno	No reportada	No reportada	n-Undecano	No reportada
Benzo(ghi)perileno	No reportada	No reportada	n-Dodecano	No reportada
*Benzo(b)fluoranteno	72	No reportada	n-Tridecano	No reportada
*Benzo(k)fluoranteno	2820	No reportada	n-Tetradecano	No reportada
*Indeno(1,2,3-cd)pireno	72	No reportada	n-Pentadecano	No reportada
			n-Hexadecano	No reportada
			n-heptadecano	No reportada
			n-Octadecano	No reportada
			n-Dodadecano	No reportada
			n-Eicosano	No reportada

FUENTE: Pradyot, 1992;

\*CHEM SERVICE CERTIFICADOS DE CALIDAD;

SNC: Sistema Nervioso Central

En los últimos años se ha estado acumulando evidencia científica para relacionar la exposición a COP's específicos con sus efectos a la salud. Entre estas se tiene:

- Cáncer
- Impedimento en el comportamiento neuronal, incluyendo desorden en el aprendizaje, bajo desempeño mental y déficit en la atención.
- Alteraciones en el sistema inmune.
- Deficiencias reproductivas.
- Reproducción del período de lactancia en madres en edad de lactancia.

El mecanismo más importante para la mayoría de estos efectos es la inducción de disfunciones en el sistema endocrino, diversos estudios han demostrado que los COP's como DDT, dioxinas, PCB's, etc.; pueden causar efectos en el sistema reproductivo y endocrino, en el crecimiento celular, en el metabolismo de carbohidratos y lípidos, y sobre la concentración de iones y agua en el cuerpo.

Existen tres tipos de exposición humana.

- Exposición aguda de altas dosis, derivada de accidentes laborales;
- Exposición crónica de mediano nivel asociada a exposiciones laborales o al consumo de alimentos contaminados;
- Exposición crónica de bajo nivel, relacionada con la exposición a los niveles existentes en el ambiente.

En general los efectos sobre la salud de exposiciones agudas, están bien documentados, sin embargo la exposición a bajos niveles y sus efectos poblacionales han sido más difíciles de estudiar, debido a que la población abierta esta expuesta a diversos COP's durante su vida, y la mayoría de los individuos tiene niveles detectables desde su nacimiento.

La capacidad de monitoreo y análisis de COP's en México, en distintas matrices ambientales y biológicas, es escasa. Lo mismo ocurre en cuanto a la investigación orientada a evaluar los riesgos para la salud y los ecosistemas derivados de la exposición intermitente o continua, a corto, mediano o largo plazo (*Informe COP's, 2004*).

#### **9.4 TOXICIDAD EN ORGANISMOS ACUÁTICOS**

Cuando se derrama o introduce petróleo o sus derivados en un estuario, una considerable cantidad de sus componentes son adsorbidos por material orgánico particulado el cual al depositarse transportan el petróleo y sus componentes hacia los sedimentos en donde pueden ser consumidos por organismos bentónicos o almacenados por cierto tiempo. La penetración de hidrocarburos en los peces es a través las membranas externas, principalmente la superficie de las agallas, y se almacenan en los tejidos grasos, particularmente en los peces y mamíferos marinos con tendencia a concentrarse cada vez más a medida que se transmiten a través de la cadena trófica.

Los efectos que tenga el petróleo o sus derivados sobre la vida marina dependen de factores como:

- Tipo de petróleo derramado, composición y caracterización.
- La concentración, exposición y duración del organismo
- Grado de intemperismo del petróleo
- Forma en que se encuentre presente: solución, emulsión, suspensión o disperso y adsorbido a materia orgánica.
- Estadío de vida de las especies: larvaria, juveniles o adultas (edad, peso, talla).
- Presiones ambientales naturales: climáticas, temperatura de agua, salinidad, corrientes y acción de olas.
- Procedimientos de limpieza: dispersantes.

Las respuestas biológicas de los organismos que acompañan la presencia del petróleo son:

- Efectos tóxicos letales, en donde los componentes del petróleo interfieren procesos celulares causando la muerte de las especies.
- Efectos subletales que alteran actividades fisiológicas o de conducta, pero no causa una muerte inmediata,
- Ingestión e incorporación de petróleo o sus componentes causando carcinogénesis.
- Interferencia en la búsqueda de alimento o escape a predadores.
- Alteración del hábitat de las especies, dando como resultado cambios en la composición y diversidad de las especies.
- Efectos d tipo mecánico, depositándose sobre las branquias, no permitiendo el intercambio de gases.
- En concentraciones de 0.5 a 10.0µg/mL dañan los órganos de los sentidos, produce destrucción de las células que forman el epitelio branquial.

El grupo de moluscos bivalvos (ostiones, almejas, mejillones) ha sido el más estudiado y evaluado en los ecosistemas costeros del Golfo de México, debido a que ingieren los hidrocarburos que se encuentran presentes en la columna de agua (disueltos, en suspensión o adsorbidos sobre partículas) durante su alimentación (filtración) y los bioacumulan en sus tejidos grasos con lo que pueden alcanzar niveles tóxicos cuantificables (*Contaminación e Impacto, 1996*).

Así la introducción de hidrocarburos en la cadena trófica puede provocar desequilibrios ecológicos y/o la transmisión de sustancias tóxicas al hombre.

En general el daño biológico del petróleo o sus componentes es mucho más severo si éste se presenta en un ambiente estuario o zonas costeras; como consecuencia la zona intermareal es la más afectada, pues en ella hay una mayor diversidad y abundancia de especies; así como también existen aquí los estadios juveniles de muchas especies oceánicas (*Clark, 1996*).

## **X. LEGISLACIÓN AMBIENTAL EN MATERIA DE HIDROCARBUROS**

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (*LGEEPA, 1996*) es el instrumento fundamental que introdujo la modificación al régimen de las autorizaciones de obras o actividades que pueden causar desequilibrios ecológicos o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el ambiente.

Particularmente para las actividades petroleras:

- I. Obras hidráulicas, vías generales de comunicación, oleoductos, gasoductos y carbo ductos.
- II. Industria del petróleo, petroquímica, química, siderurgia, papelera, azucarera, del cemento y eléctrica.
- XIII. Obras o actividades que correspondan a asuntos de competencia federal que puedan causar desequilibrios ecológicos graves o irreparables, daños a la salud pública o a los ecosistemas o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas relativas a la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

La LGEEPA establece criterios para atender la contaminación del suelo con 11 artículos de los cuales destacan:

Art. 134 párrafo I, II, IV Se mencionan los criterios de la prevención y control de la contaminación.

Art. 136 párrafo I, II, III, IV Condiciones para prevenir o evitar residuos que se infiltren, acumulen o depositen en suelo.

Art. 139 Descargas, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en suelos, se sujeta a disposición de la Ley de aguas nacionales y de LGEEPA.

Art. 140 Generación, manejo y disposición final de residuos de lenta degradación esta sujeta a lo que establezca la Norma Oficial Mexicana en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (Diario Oficial, 13 de Diciembre de 1996).

En México no existen Normas que establezcan límites permisibles en contaminación con hidrocarburos en el ambiente (suelo, agua y aire), motivo por el cual se recurre a Organismos Internacionales como Canadá, Países Bajos y EUA para tener referencia.

## XI. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El sistema lagunar Carmen-Machona-Pajonal y la laguna de Mecoacán conformaba uno de los sistemas costeros más productivos del país, aportando a Tabasco el 36 % de la producción ostrícola nacional, México ocupaba entonces el sexto lugar en el ámbito mundial.

Pero al igual que otras lagunas, la laguna de Mecoacán, se encuentra bajo la presión de diferentes procesos naturales y de actividades humanas. Desde hace 50 años las actividades pesqueras así como las petroleras de la Terminal de Dos Bocas (en los últimos 25 años) son de vital importancia para la población local y nacional; sin embargo se a detectado una disminución de la producción ostrícola de la laguna en los últimos años, las inspecciones rutinarias en los bancos ostrícolas indican una mortandad progresiva durante la etapa de crecimiento del ostión.



FIG. 2. LOCALIZACIÓN DEL SISTEMA LAGUNAR CARMEN-MACHONA - MECOACÁN.

Considerando que las obras de infraestructura portuaria realizadas desde hace aproximadamente 25 años, han afectado el comportamiento de la corriente costera, provocando un proceso de azolve de la Barra de Dos Bocas, lo que a impedido el ingreso de la salinidad necesaria para el cultivo del ostión. Por otra parte esta laguna ha sufrido varios derrames de petróleo, entre los más recientes la fracturación de un mechero en 1991, provocando la muerte de gran parte de la producción ostrícola.

En este sentido desde la década de los 80's, la laguna a sido sujeta a una serie de estudios ambientales los cuales han registrado niveles elevados de hidrocarburos, algunos metales, coniformes fecales y bajos niveles de oxígeno disuelto.

## 11.1 UBICACIÓN

El sistema lagunar de Mecoacán se ubica en la zona litoral de Tabasco al norte del municipio de Paraíso, en el litoral del Golfo de México y entre los meridianos 93° 04' y 93° 14' y los paralelos 18° 16' y 18° 26'; forma parte del cuerpo deltaico de los ríos Grijalva y Usumacinta.

La laguna Mecoacán tiene forma elipsoidal, un área aproximada de 5,168 ha. Su eje principal se orienta en dirección este-oeste y es paralelo a la línea de costa: mide 11.5 km. de norte a sur, y en su parte más ancha 7 km.

El sistema lagunar de Mecoacán, se encuentra asociado a tres de los ríos más importantes del país: el Mezcalapa, el Grijalva y el Usumacinta, así como a otros cuerpos de agua, como son: el Río González; las lagunas: Tinaja, Eslabón, Troncón, Pomposú, La Negrita, La Tilaza, Manatí y Arrastradero. En estos cuerpos de agua se mantienen diversas interacciones biológicas y ecológicas, lo cual hace de esta zona un área con alto valor ecológico, cultural y socioeconómico que justifican plenamente el llevar a cabo programas de desarrollo sustentables para su conservación y aprovechamiento, así como para poder enfrentar los problemas que las actividades antropogénicas puedan provocar (González, 1986; Vázquez, 2001).

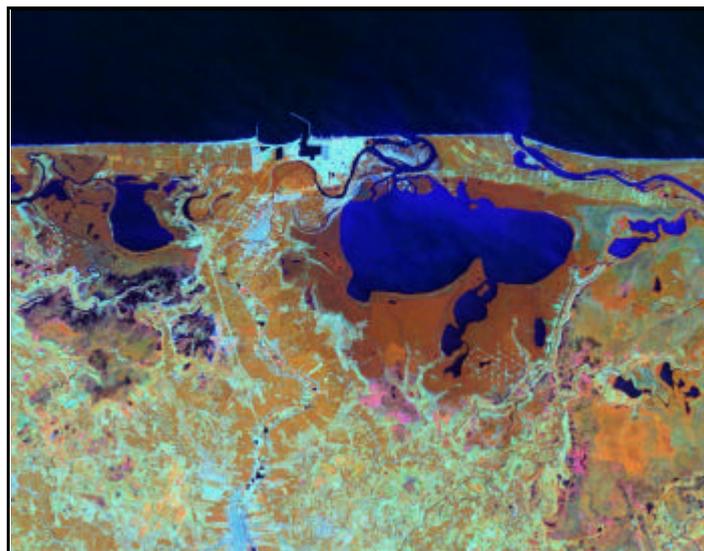


FIG. 3. IMAGEN SATELITAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Batimétricamente es muy somera, la profundidad de este cuerpo acuático oscila entre 0.30 y 2.30 m, y el promedio de 1 m, sólo en los canales que rodean la Isla Morelos y en la Boca se registran profundidades mayores de 5m. El canal de acceso al mar registra algunos tramos con honduras de 8m y se localiza al norte.

La laguna es un par de canales en forma de pinza que se abren permanentemente al mar a través de la Barra de dos Bocas. Por la parte este de la laguna desemboca en río Escarbado (15 m de ancho), el cual sirve de enlace a aquélla con el río González, que llega al Golfo de México. En la parte sureste se localiza el río Cuxcuchapa (15 m de ancho); el río Seco desemboca al noroeste de la laguna, con un ancho aproximado de 100 m.

La laguna Tilapa, al sur de la laguna Mecoacán, se conecta con ésta por medio de un canal de aproximadamente 300m de anchura; la laguna La Negrita también al sur, se conecta a través del río Cuxcuchapa (15 m de ancho); ambas son mas pequeñas que la de Mecoacán.

El aporte principal de materia orgánica proviene del manglar que rodea a la laguna y del lirio acuático que es arrastrado por los ríos que desembocan en la misma, o que es introducido por las corrientes provenientes de otros ríos que llegan al mar, como el río González.

Según Lankford (1977), la laguna de Mecoacán corresponde al tipo: depresión intradeltática y marginal.

- presenta típicas barreras arenosas,
- el escurrimiento puede ser directo o el agua del río puede entrar a la laguna a través de sendas;
- ocurren rápidamente modificaciones en la forma y batimetría,
- la energía es usualmente baja , excepto en los canales y ensenadas,
- hay salinidad típicamente baja pero puede mostrar estacionalidad y variaciones cortas en tiempo.

La laguna penetra al sistema y se distribuye hacia el sur y sureste de la laguna, con una ligera circulación en sentido de las manecillas del reloj, que se acentúa a medida que transcurre la pleamar; finalmente se pierde esta circulación, y la masa de agua se dirige hacia la boca de la laguna durante la bajamar.

El 3% del área del sistema estuario-lagunar de Mecoacán lo ocupan los bancos ostrícolas de *Crassostrea virginica*, distribuidos de manera natural hacia el suroeste del sistema; que son redoblados periódicamente a partir de cultivos que se encuentran en la parte oeste de dicha laguna, se concentran especialmente en las áreas cercanas en la boca de la laguna.

Los sedimentos que muestra esta laguna se pueden clasificar en forma general desde arenas limosas hasta arcillas arenosas. Presenta arenas finas, que forman el piso de los canales de la barra Dos Bocas y que han sido aportadas por el flujo de mareas; limos de grano grueso a mediano son los sedimentos de mayor distribución en el fondo de la laguna de Mecoacán, y tiene un origen deltaico, y arcillas, con cantidades variables de arena fina, acumuladas en el centro de la laguna.

## **11.2 CLIMATOLOGÍA**

### ➤ CLIMA

Evidencia un clima de tipo Am (f) w'' (i)g y pertenece a la región hidrológica 30, se caracteriza por ser tropical lluvioso, muy cálido, húmedo, con lluvias en verano. La precipitación invernal oscila entre 8.5% del total anual. La estación más seca se presenta en invierno. Las características representativas se presentan en la tabla 11.

TABLA 11. CARACTERÍSTICAS REPRESENTATIVAS DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 30.

CARACTERÍSTICA	MINÍMA	MÁXIMA
Evaporación mm anual	916	2021.7
Precipitación m <sub>3</sub> /seg	379	5394.0
Temperatura °C	2	48

La temperatura media del mes más frío es mayor de 18 °C; se presentan dos estaciones lluviosas separadas por una temporada seca, corta en verano, y una larga en la mitad más fría del año (invierno-primavera), el mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano (*López, 1997*).

#### ➤ TEMPERATURA

Muestra un marcado ascenso a partir del mes de abril, mayo y agosto (época calurosa), las altas temperaturas se ven atenuadas debido a que en mayo se inicia el período de lluvias que concluye aproximadamente entre septiembre y octubre. Entonces las temperaturas más altas se presentan en el mes de mayo y las más bajas en el mes de enero.

#### ➤ SUELOS

Son de origen fluvial, característicamente Gleysols hidromorfos, con un drenaje externo e interno muy deficiente, lo cual provoca la permanencia de las inundaciones y la formación de diferentes cuerpos de agua costeros (*Carta demográfica municipal, 1997*).

Los suelos descritos para esta zona están presentados por suelos inundables con altos contenidos de sales, por lo que el desarrollo de los cultivos se ve frecuentemente limitado, sustentan vegetación de manglar y selva, se utilizan para el cultivo de pastizales y agricultura de temporal, plantaciones de coco, huertos familiares y ganadería.

#### ➤ VEGETACIÓN Y FLORA

Predomina la vegetación acuática y subacuática, se refiere a especies que se desarrollan en lugares muy húmedos o que se mantienen inundados durante cierto periodo del año o permanentemente. En gran parte estas lagunas están bordeadas por manglar y en sus raíces la formación de algas, debido a la fluctuación de salinidad se produce el limo o arena y las aguas son turbias y ricas en nutrientes.

Existen dos tipos de vegetación: los manglares y la vegetación de pantanos, así como otras formas asociadas como matorrales halófitos, la mucalería, popales (u hojillal), tulares (o espadañales) y comunidades flotantes (plantas acuáticas).

#### ➤ FAUNA

La fauna más notable la constituyen los peces (Peje lagarto, Róbalo, Mojarra castarrica, etc.); moluscos (ostión) y crustáceos (Piguay Jaiba). Los moluscos como ya se menciono ocupan un lugar muy importante debido a que es la principal actividad en la comunidad de Paraíso.

Entre los mamíferos se tiene al manatí, algunos reptiles como lagartija, iguana verde, cocodrilo de pantano, culebra de agua, etc. El grupo de aves residente y migratoria es de lo más variado y representativo como con: la Agachona, Enmascarada, Chachalaca, Gallareta, Garza blanca, Paloma huil, Pato golondrino, Zopilote, etc.

## XII. METODOLOGÍA

Se llevaron a cabo muestreos en las tres estaciones climáticas de la zona: *nortes, estiaje y lluvias*, ejecutados durante noviembre-diciembre del 2000 (nortes); abril (estiaje) y septiembre (lluvias) del 2001; en la figura 4; se establece el mapa de muestreo del sedimento superficial en la laguna Mecoacán así con las coordenadas geográficas representadas en la tabla 12.

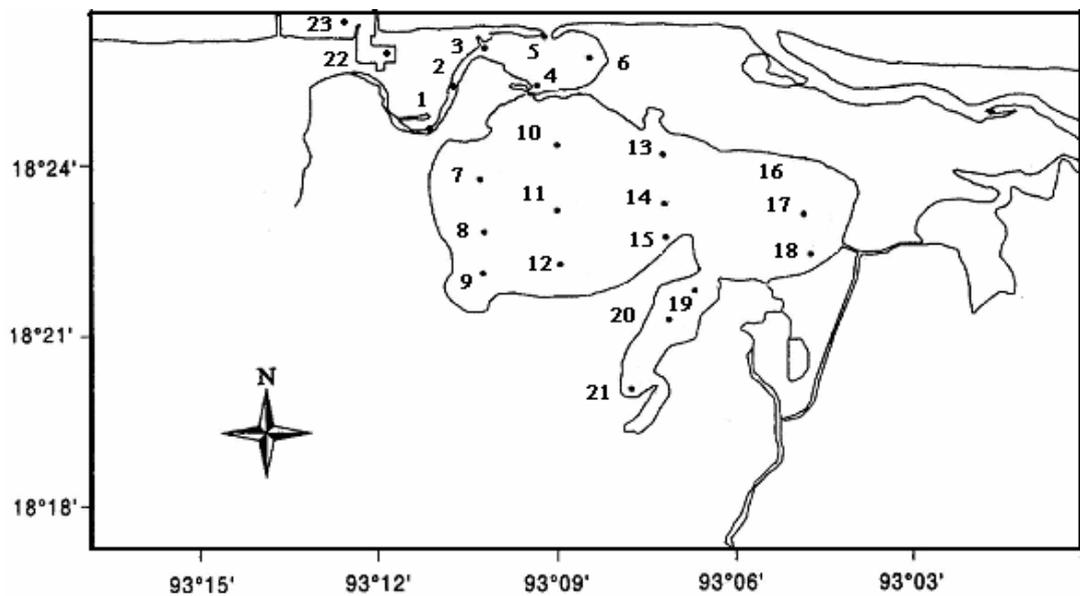


FIGURA 4. UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MUESTREO.

TABLA 12. SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE ESTACIONES DE MUESTREO.

ESTACIÓN	CUERPO DE AGUA	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		PROFUNDIDAD ( m )
		LATITUD (N)	LONGITUD (W)	
1	RÍO SECO E ISLA	18° 25.851'	93° 11.661'	0.4
2		18° 24.862'	93° 10.684'	3.1
3		18° 26.217'	93° 09.657'	4.8
4		18° 25.548'	93° 08.854'	3.1
5		18° 26.405'	93° 08.510'	1.8
6		18° 26.077'	93° 07.896'	2.1
7	LAGUNA MECOACÁN	18° 24.123'	93° 09.705'	1.1
8		18° 23.166'	93° 09.611'	1.5
9		18° 22.659'	93° 09.680'	1.2
10		18° 24.559'	93° 08.558'	0.9
11		18° 23.519'	93° 08.545'	1.6
12		18° 22.845'	93° 08.504'	1.6
13		18° 24.494'	93° 06.791'	0.9
14		18° 23.515'	93° 06.753'	0.8
15		18° 22.892'	93° 06.861'	1.0
16		18° 24.460'	93° 05.113'	1.1
17		18° 23.531'	93° 05.114'	1.2
18		18° 22.865'	93° 04.888'	1.2
19		18° 22.248'	93° 06.296'	0.8
20	LAGUNA TILAPA	18° 21.894'	93° 06.707'	1.1
21		18° 20.787'	93° 07.380'	1.4
22	CANAL DOS BOCAS	18° 26.565'	93° 11..502'	8.8
23		18°26.565'	93°02..211'	1.7

## 12.1 COLECTA DE SEDIMENTOS Y TOMA DE MUESTRA

Los sedimentos se colectaron con una draga Van Veen, tomando aproximadamente los primeros 10 cm. de la columna sedimentaria; con ayuda de una espátula metálica se tomo una porción y se colocó en frasco de vidrio previamente lavado; se le adiciono metanol para evitar la degradación microbiana y se congelaron hasta su análisis en el laboratorio.

La identificación y cuantificación de hidrocarburos se basa en cuatro pasos generales:

1. recolección y preservación de la muestra.
2. extracción de la materia orgánica a partir de la matriz inorgánica del sedimento.
3. separación de los hidrocarburos a partir de su matriz orgánica (lípidos).
4. identificación y cuantificación de los hidrocarburos.

La metodología utilizada para el análisis de hidrocarburos alifáticos y aromáticos en sedimentos fue la propuesta en el manual CARIPOL (1986) y por UNESCO (1982), la cual consiste básicamente en el esquema de la figura 5.

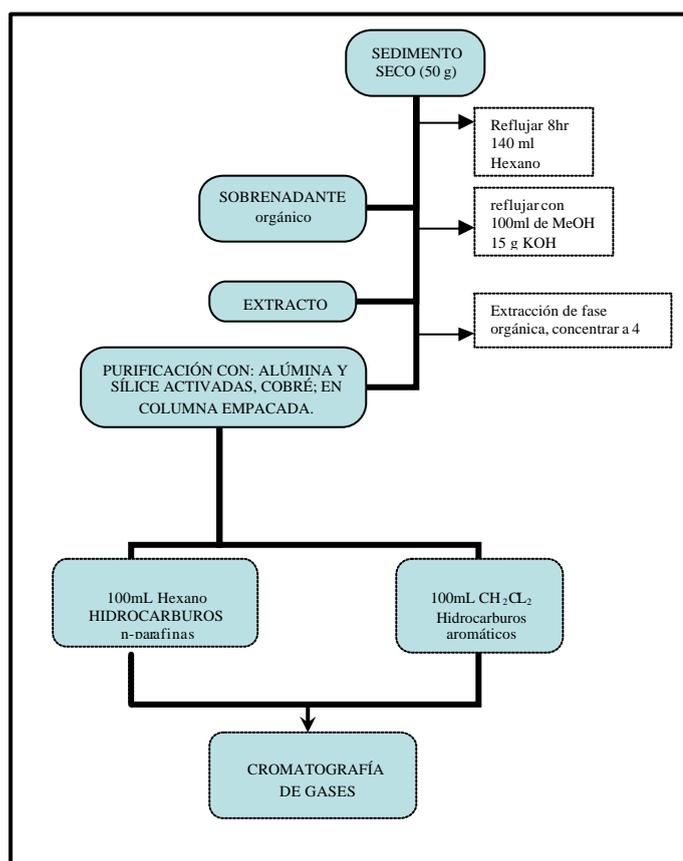


FIGURA 5. PROCEDIMIENTO QUÍMICO DEL ANÁLISIS DE HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS Y POLICÍCLICOS AROMÁTICOS EN MUESTRAS DE SEDIMENTO.

## 12.2 TRATAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE LA MUESTRA

El material de colecta se descongeló a temperatura ambiente, secándose a una temperatura de 40 a 45 °C en charolas de aluminio, una vez secos fueron macerados en mortero de porcelana, pasados por un tamiz de abertura de malla de 0.25 mm, para uniformar el tamaño de grano y evitar interferencias de este parámetro. Se pesó una muestra de 50 g, procurando una homogeneidad mediante cuarteos, y se colocó en un cartucho de extracción de celulosa; este se colocó en un equipo de extracción soxhlet (*ASTM, 2002*), para extraer a reflujo durante 8 hrs. con una mezcla de solventes  $C_6H_{12}:CH_2Cl_2$  (4:1).

A la par se prepararon: una muestra control (blanco de proceso), con la primera serie de muestras; así como la replica de una muestra del lote tomada al azar, para verificar la reproducción de las condiciones de trabajo.

Transcurridas las 8 h, se dejó enfriar el sistema y se adicionó potasa metanólica al 15%, saponificándose a temperatura durante 4 h.

Se dejó enfriar el sistema a temperatura ambiente, y se realizó la separación de fases de la muestra en un embudo de separación mediante dos adiciones de hexano:

- Se colocó la muestra en el embudo de separación,
- Se adicionaron 25 mL de hexano en el embudo y se agitó durante 2 min. dando ventilación periódica.
- Se dejó reposar la muestra hasta la separación de fases.
- Se separó el extracto (fase orgánica) en un matraz previamente etiquetado.
- Se adicionó un segundo volumen de 25 mL de hexano y se repitió el procedimiento.
- Las fracciones orgánicas de hexano (extracto) fueron recolectadas en el mismo matraz.
- Se le adicionó a el extracto un poco de sulfato de sodio anhidro para eliminar el agua.
- Se concentró la muestra (fase orgánica de hexano) en rotavapor hasta aproximadamente 10 mL.
- Con un flujo de Nitrógeno gaseoso se concentró nuevamente el extracto (fase orgánica) hasta el volumen de 4 mL.

### 12.3 CROMATOGRAFÍA EN COLUMNA

Se empacó una columna de vidrio de 30 cm x 1 cm. de diámetro, en suspensión con hexano; provista con un tapón de lana de vidrio silanizada, 1 g de Sulfato de Sodio anhidro, 10 g de alúmina (desactivada al 3%), 1.5 g de sílice (desactivada al 2%) y 10 g de cobre activado.

TABLA 13. SECUENCIA DE ELUCIÓN PARA SEPARACIÓN DE ALIFÁTICOS Y POLICÍCLICOS AROMÁTICOS EN MUESTRA DE SEDIMENTO.

AFRACCIÓN	VOLUMEN DE ELUYENTE (ml)	DISOLVENTE	FRACCIÓN RESULTANTE
1	70	Hexano	Alifáticos
2	15	Cloruro de metileno	Aromáticos
3	50	Cloruro de metileno	Aromáticos

Se agregó el extracto concentrado a 4mL (fase orgánica) cuidadosamente al interior de la columna con ayuda de una pipeta pasteur y se dejó eluir hasta que el nivel de la muestra bajara hasta la superficie del cobre activado, se realizó un enjuague de las paredes con 4 mL de hexano al matraz que contenía la muestra y se agregó a la columna, se dejó eluir nuevamente hasta la superficie del cobre, este paso se repite dos veces más. Una vez terminado el último enjuague se inició el proceso de elución como está indicado en la tabla 13, la adición sucesiva del eluyente se realizó una vez que el anterior alcanzó la superficie del cobre en la columna.

Se colectó la fracción 1 en un matraz bola y se concentró en rotavapor hasta 10 mL, se concentró en un flujo de nitrógeno gaseoso hasta 4 mL y se trasvasó a un vial de 4mL, en el cual se llevó a sequedad la fracción alifática. Se reconstituyó con hexano y se analizó utilizando la técnica analítica de Cromatografía de Gases.

Se recolectaron las fracciones 2 y 3, que contienen los compuestos aromáticos y se siguió el procedimiento de concentración con rotavapor y flujo de nitrógeno gaseoso aplicado a la fracción alifática. Esta fracción aromática se reconstituye con una mezcla de solvente Cloruro de Metileno:Benceno (50:50) y se analizó por Cromatografía de Gases.

### 12.4 CROMATOGRAFÍA DE GASES

La cromatografía de gases es una de las técnicas actuales más utilizadas para evaluar los niveles de contaminación por hidrocarburos de petróleo.

Esta definida como un método de separación en el cual los componentes de una mezcla se separan 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.

Los análisis de muestras ambientales por cromatografía de gases capilar de alto rendimiento son sumamente costosos, debido a que los equipos y estándares son de importación; los solventes usados son de alta pureza al igual que los gases, lo cual encarecen aun más los estudios; es por ello que para calcular la precisión y exactitud se necesitaría realizar por lo menos diez veces el análisis cromatográfico de una muestra elegida al azar, en nuestro caso, no se cuenta con el presupuesto suficiente para ello; por lo que se optó por desarrollar otra técnica.

## **12.5 CONTROL DE CALIDAD**

El lote de muestras que se recibió, fue registrado en una bitácora de control, en donde se asignó número consecutivo/estación/Fracción HPA's/Fracción HC's para su identificación futura.

Previamente se introduce al equipo cromatográfico una tabla de calibración de soluciones primarias de 12 HPA's de concentración conocida y preparadas con soluciones independientes, se utiliza una mezcla de estándares certificados marca Chem Service; de igual manera se procede para la fracción HC's de 34 compuestos; estas soluciones sirvieron para la preparación de las soluciones secundarias.

Para obtener la curva de calibración se prepararon por triplicado disoluciones a diez niveles de concentración y tres blancos de recuperación, se inyectaron por triplicado y estadísticamente se determinó por compuesto: comportamiento individual, porcentaje de recuperación, límite de detección de equipo, límite de detección de método y cuantificación.

Se realizaron: blanco de reactivos, de proceso y de solventes para eliminar la posible contaminación que existiera a lo largo del proceso metodológico.

## 12.6 CUANTIFICACIÓN Y CUALIFICACIÓN

La cualificación se realizó a través de la inyección de los compuestos individuales empleados y verificando el tiempo de retención correspondiente al analito.

Para la cuantificación se empleó la técnica de estándar externo inyectando una curva de calibración de diez puntos de concentraciones diferentes en el cromatógrafo de gases GC 5890 SERIES II. (Véase Anexo A.4.1 y A.4.2).

La concentración de cada compuesto está en función de la atenuación de trabajo del programa, volumen de reconstitución, volumen de inyección y cantidad de muestra; para calcular la concentración final se utilizó la siguiente fórmula.

$$\text{Concentración final} = \frac{(C_e) (A_t \times V_r)}{g_M}$$

Donde:

- $C_e$ : Concentración reportada por el equipo
- $A_t$ : Atenuación de trabajo
- $g_M$ : Gramos de muestra utilizados para el análisis
- $V_r$ : Volumen de reconstitución

En el Anexo A.5.1 y A.5.2, se presentan cromatogramas característicos de HC's y HPA's en sedimento superficial de la laguna de Mecocacán.

El análisis de las fracciones se realizó empleando un Cromatógrafo de Gases Hewlett-Packard modelo 5890 SERIES II, equipado con un detector de ionización de flama (FID), con columna capilar de 30m de longitud x 0.32 mm de diámetro interno x 5µm de espesor de capa (5% Fenil Metil Silicón).

Las condiciones de temperaturas programadas se dan en la tabla 14 y los tiempos de retención por analito se registran en la tabla 15.

TABLA 14. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL GC 5890 SERIES II.

CONDICIONES DE operación DEL GC 5890		CONDICIONES DE operación DEL GC 5890	
<b>ANALISIS HC's</b>		<b>ANALISIS HPA's</b>	
Cromatógrafo de gases	HP 5890 SERIES II	Cromatógrafo de gases	HP 5890 SERIES II
Detector	Ionización de flama (FID)	Detector	Ionización de flama (FID)
Columna	5 MS capilar 30m x 0.32mm x 0.5 μm, sílice fundido 5% Fenilmetil-silicón	Columna	5 MS capilar 30m x 0.32mm x 0.5μm, sílice fundido 5%Fenil-metil-silicón
Temperatura	Detector: 315°C Inyector: 60 °C	Temperatura	Detector: 315°C Inyector: 100 °C
Rampa de temperatura	Temp. Inicial: 60°C , tiempo de equilibrio 0 min. 130°C, con incremento 7°C/min., 0 min. 220°C con incrementos 5°C/min., 0 min. 315°C con incrementos 7°C/min., 8 min.	Rampa de temperatura	Temp. inicial: 100 °C con incremento 10 °C/min. , tiempo de equilibrio 0 min. 170 °C con incremento 5 °C/min., 0 min. 280 °C con incrementos 10 °C/min., 315 °C.
Tiempo de corrida	49.57 min.	Tiempo de corrida	35 min.
Gas Acarreador	Helio grado 4.8 CERO (99.99% pureza) 1ml/min.	Gas Acarreador	Helio grado 4.8 CERO (99.99% pureza) 1ml/min.
Gas auxiliar	Nitrógeno grado 4.8 CERO (99.99% pureza) 30 mL/min.	Gas auxiliar	Nitrógeno grado 4.8 CERO (99.99% pureza) 30 ml/min.
Gas para Detector	Aire 300 mL/min. Hidrógeno 30 mL/min.	Gas para Detector	Aire 300 mL/min. Hidrógeno 30 mL/min.
Volumen de inyección	2μL , splitless	Volumen de inyección	1μL , splitless

**TABLA 15. TIEMPOS DE RETENCIÓN DE COMPUESTOS ALIFÁTICOS Y POLICÍCLICOS AROMÁTICOS, TOMADOS DE UN CROMATOGRAMA ESTÁNDAR.**

TIEMPOS DE RETENCIÓN DE HCS y HPA's					
Compuesto	Tiempo de retención	Compuesto	Tiempo de retención	Compuesto	Tiempo de retención
n-Octano	2.609	n-Pentacosano	32.210	Naftaleno	3.190
n-Nonano	3.968	n-Hexacosano	33.364	Acenafteno	6.360
n-Decano	5.647	n-Heptacosano	34.443	Fenantreno	9.900
n-Undecano	7.474	n-octacosano	35.471	Antraceno	10.130
n-Dodecano	9.319	n-Nonacosano	36.447	Fluoranteno	11.990
n-Tridecano	11.159	n-Triacontano	37.383	Pireno	14.980
n-Tetradecano	13.103	n-Dotriacontano	38.279	Benzo(a)antraceno	20.120
n-Pentadecano	15.109	n-Tritriacontano	39.151	Criseno	20.290
n-Hexadecano	17.120	n-Tetratriacontano	39.988	Benzo (e)pireno	25.650
n-Heptadecano	17.238	n-Pentatriacontano	40.804	Perileno	25.830
Pristano	19.098	n-Hexatriacontano	41.592	Benzo (a)pireno	26.150
n-Octadecano	19.274	n-Heptatriacontano	42.423	Benzo(ghi)perileno	30.470
Fitano	21.025	n-Octatriacontano	43.375		
n-Nodadecano	22.888	n-nonatriacontano	44.491		
n-Eicosano	24.688	n-Tetracontano	45.795		
n-Heneicosano	26.418	n-Tetracosano	30.969		
n-Docosano	28.082	n-Pentacosano	32.210		
n-Tricosano	29.607	n-Hexacosano	33.364		
n-Tetracosano	30.969				

### XIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS EN SEDIMENTO

En el Anexo A1.1 se muestran los resultados de n-alcenos detectados en  $\mu\text{g/g}$  base seca registrados en los sedimentos superficiales de la laguna de Mecocacán para las tres campañas de monitoreo, apreciándose la diversidad de n-parafinas en el rango de n-C8 hasta n-C40.

Analizando por muestreo encontramos que en época de estiaje la concentración total de alifáticos en la laguna es de  $842.46 \mu\text{g/g}$  con una concentración promedio de  $36.63 \mu\text{g/g} \pm 164.1$ , le sigue la temporada de nortes con un total de  $52.42 \mu\text{g/g}$  y una concentración promedio de  $2.28 \mu\text{g/g} \pm 2.69$  y finalmente la temporada de lluvias con un total de alifáticos de  $9.39 \mu\text{g}$ ,  $\pm 1.26$ .

#### CONCENTRACIONES TOTALES DE ALIFÁTICOS EN SEDIMENTO SUPERFICIAL

ESTACIÓN	I	II	III
1	9.73	788.96	1.38
2	N.C	28.49	N.C
3	0.87	4.06	N.C
4	N.C	1.14	N.C
5	0.25	4.14	N.C
6	8.37	1.09	N.C
7	0.80	1.01	N.C
8	1.95	0.76	N.C
9	1.53	0.58	N.C
10	N.C	0.89	N.C
11	1.45	1.11	N.C
12	0.81	N.C	N.C
13	1.01	1.28	5.58
14	5.97	1.16	N.C
15	2.08	N.C	N.C
16	4.97	1.32	N.C
17	4.41	N.C	N.C
18	3.15	1.57	2.43
19	1.37	N.C	N.C
20	2.24	1.76	N.C
21	1.47	1.32	N.C
22	N.C	0.86	N.C
23	N.C	0.97	N.C
Conc. Total ( $\mu\text{g/g}$ )	52.42	842.46	9.39
Conc. prom ( $\mu\text{g/g}$ )	2.28	36.63	0.41
DESV. STD	$\pm 2.69$	$\pm 164.10$	$\pm 1.26$

N.C: No calculado

I: Muestreo en época de nortes, II: Muestreo en época de estiaje

III: Muestreo en época de lluvia

La concentración total de Alifáticos para los tres monitoreos del área oscilan entre 0.25 y 788.96  $\mu\text{g/g}$  con una concentración promedio de los puntos de muestreo de  $13.11 \pm 94.85 \mu\text{g/g}$ .

Los sitios de colecta con los valores más elevados en función de su concentración total fueron: la estación 1 con 788.96  $\mu\text{g/g}$  en estiaje y 9.73  $\mu\text{g/g}$  en nortes; estación 2 con 28.5  $\mu\text{g/g}$  en estiaje; estación 6 con 8.37  $\mu\text{g/g}$  en nortes; estación 14 con 5.97  $\mu\text{g/g}$  en nortes; estación 13 con 5.58  $\mu\text{g/g}$  en lluvias y la estación 16 con 4.97  $\mu\text{g/g}$  en nortes. Véase Anexo A.2.1.

Las 17 estaciones restantes presentaron valores totales dentro del intervalo de 0.2532 a 4.14  $\mu\text{g/g}$ . Del total de 23 sitios muestreados el 73.9% presenta concentraciones con valores menores a 4.14  $\mu\text{g/g}$ .

La presencia de Fitano en el ambiente no se describe como un producto formado por biosíntesis, es considerado como un indicador de posibles contribuciones antropogénicas. El Pristano se encuentra muy comúnmente en el medio marino ya que se ha detectado en algunos grupos de organismos como bacterias y zooplancton.

Una razón que permite determinar el tipo de fuente de contaminación es la relación *Pristano/Fitano* con valores cercanos a la unidad, indica presencia de derivados de hidrocarburos del petróleo (Broman, et al., 1987) y en el intervalo de 1.4 a 6.7 indica aporte de hidrocarburos biogénicos (Commendatore, et al., 2004; Lecaros., et al., 1991).

En las estaciones 1, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 14, 16 y 18 se detectaron los isoprenoides Pristano y Fitano cuyos valores de la razón Pristano/Fitano van de 0.93 a 1.5.

En general en la tabla 16 se reportan los valores calculados para esta razón, se puede apreciar que en la temporada de Estiaje la tendencia de esta razón tiene un intervalo de 1.97 a 5.02 indicando la presencia principalmente de hidrocarburos biogénicos; caso contrario en la temporada de Lluvias o nortes la tendencia de esta razón tiene un intervalo de 0.93 a 1.35 indicando una contribución de hidrocarburos de petróleo.

La razón de *Alif.Tot/n-C16*, indica una tendencia: si es = 15, para muestras contaminadas con petróleo y > 50, para muestras con contaminante de tipo biológicos (Clark., et al., 1973).

En la tabla 16 se presenta el resultado de *n-Alcanos/n-C16*, obteniéndose excepto en la estación 13 y 14 (nortes), con valores superiores a 50, lo que indica una contribución de hidrocarburos de tipo biológico en los sedimentos.

Las concentraciones más altas de los hidrocarburos alifáticos se encuentran dentro del intervalo de n-C22 a n-C36, en literatura se reporta una contribución de nC19 a n-C26 como parafinas provenientes de las emisiones vehiculares.

La distribución global de Hidrocarburos de *n-Cpares* y *n-Cimpares* en porcentaje, se muestra en el gráfico de la figura 6, el 61% le corresponde a las parafinas n-C pares.

La razón de *n-Cimpares/n-Cpares* se presenta en la tabla 16, esta relación al igual que la de **ICP: Índice de Carbono Preferencial** (Bohem, et al., 1986), cuando es próxima o igual a 1 es característica de un aporte petrogénico.

El predominio de parafinas pares cuya tendencia en las estaciones 1, 2, 5, 6, 8 y 14 son muy próximas a la unidad indica la presencia de compuestos derivados de petróleo.

Podemos señalar que las estaciones 1, 3, 5, 6, 7, 11, 13, 14, 16, 18, 20 y 21 registraron la presencia de *n-C16*, parafina que refleja la presencia de petróleo, sin degradar; las concentraciones registradas oscilan entre los valores 0.037 a 0.259  $\mu\text{g/g}$ , sin embargo la relación del Índice de Carbono Preferencial (*CPI*~1.0) así como la relación entre parafinas impares y pares (~1.0) nos permite conocer de manera indirecta el tipo de hidrocarburos que reciben los sedimentos, con base a la proximidad de la unidad, de esta manera en las estaciones 1, 5, 6, y 14 muestran contaminantes de tipo petrogénico.

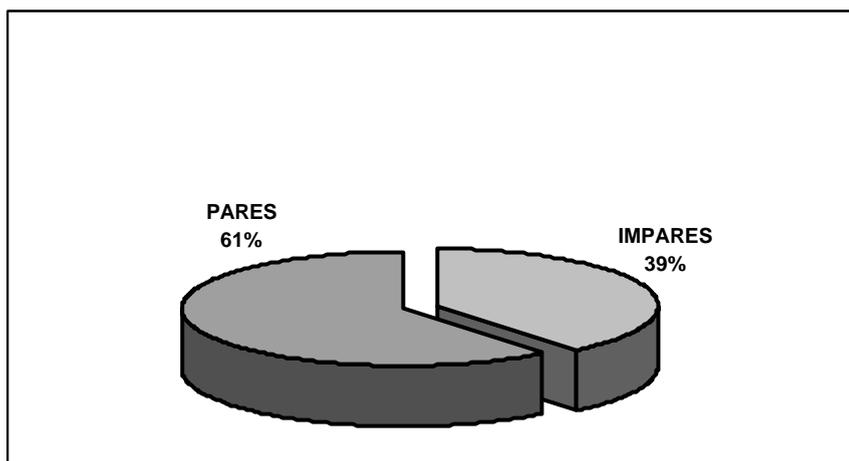


FIGURA 6. DISTRIBUCIÓN DE HC's DE n-C PARES E IMPARES EN SEDIMENTO SUPERFICIAL (valores promedio en  $\mu\text{g/g}$ ).

La cuantificación de la relación *n-C17/Pristano* y *n-C18/Fitano* se reporta en la tabla 16, los valores para ambas razones en algunas estaciones es de 0.9 a 1.16, estos índices nos evalúan la degradación relativa de alcanos lineales, de esta manera valores con tendencia a uno indican la presencia de crudo degradado. Los valores mínimo y máximo que se encontraron para este índice son 0.30 y 2.22 respectivamente, este valor máximo nos indica una baja velocidad de degradación correspondiente a la estación 2 en estiaje, en general los valores máximos corresponden al muestreo en estiaje.

La relación *n-C17/n-C18* se cuantificó para el 30.43 % del total de las muestras, en donde el 26.09 % de este total de muestras presenta una concentración superior a la unidad con una concertación promedio de 0.57  $\mu\text{g/g}$  lo que nos indica que la contribución es de tipo tanto biogénica como antropogénica. La presencia del *n-C20* cuyo aporte en concentración total es de 8.86  $\mu\text{g/g}$  nos indica una contribución al sistema lo cual probablemente se relaciona a diferentes actividades humanas (Clark, 1996).

En el Anexo 3 se presenta el gráfico espacio-temporal para los tres monitoreos ambientales en función de la concentración de los hidrocarburos alifáticos determinados, así como la zona más contaminada en la laguna..

TABLA 16. EVALUACIÓN DE HC's EN SEDIMENTO SUPERFICIAL.

ESTACION	MUESTREO	CPI (1)	n-C17/Pr	n-C18/Phy	Alif Tot/n-C16 (2)	Pr/Phy (3)	n-C17/n-C18	Cimpar / Cpar
1	I	0.65	NC	0.89	93.23	1.30	NC	0.82
	II	1.11	NC	1.31	704.94	0.95	NC	0.81
	III	0.44	NC	0.00	NC	NC	NC	0.55
2	I	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	II	0.26	0.75	2.22	110.10	1.97	0.67	0.61
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
3	I	0.63	NC	NC	NC	NC	NC	0.62
	II	0.29	NC	0.63	38.31	NC	9.30	0.53
	III	0.00	NC	NC	NC	NC	NC	NC
4	I	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	II	0.63	NC	NC	30.69	2.00	NC	0.55
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
5	I	NC	NC	NC	NC	1.18	NC	0.04
	II	1.01	NC	0.63	15.63	3.22	NC	0.81
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
6	I	0.92	0.52	0.82	40.64	1.01	0.64	0.87
	II	0.61	0.43	0.46	18.72	1.66	1.54	0.69
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
7	I	0.11	0.78	NC	NC	1.13	NC	0.59
	II	0.69	NC	1.68	17.97	3.64	NC	0.48
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
8	I	0.17	NC	NC	NC	NC	NC	0.80
	II	0.75	0.30	NC	NC	2.56	NC	0.74
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
9	I	0.49	0.68	0.65	NC	1.00	1.06	0.70
	II	0.50	NC	NC	NC	NC	NC	0.68
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
10	I	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	II	0.73	NC	NC	NC	5.02	NC	0.70
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
11	I	0.17	0.75	0.87	17.98	1.29	1.11	0.25
	II	0.50	0.57	0.77	15.01	2.07	1.52	0.58
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
12	I	0.33	0.83	NC	NC	1.36	NC	3.21
	II	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC

ESTACION	MUESTREO	CPI (1)	n-C17/Pr	n-C18/Phy	Alif Tot/n-C16 (2)	Pr/Phy (3)	n-C17/n-C18	Cimpar / Cpar
13	I	0.06	NC	NC	NC	1.27	NC	0.15
	II	0.37	0.45	0.55	13.15	1.60	1.30	0.54
	III	0.17	0.68	0.65	69.54	1.59	1.65	0.25
14	I	0.98	1.16	1.12	75.94	0.51	0.53	0.98
	II	0.45	0.46	0.58	12.19	1.30	1.02	0.59
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
15	I	0.72	0.65	0.67	NC	1.00	0.97	0.79
	II	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
16	I	0.29	NC	NC	NC	NC	NC	0.31
	II	0.37	0.99	0.97	15.65	1.89	1.92	0.65
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
17	I	0.40	0.88	0.80	NC	1.16	1.29	0.68
	II	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
18	I	0.31	0.95	NC	NC	NC	NC	0.36
	II	0.35	0.72	0.38	16.06	0.93	1.69	0.51
	III	0.33	1.04	0.85	26.24	2.31	2.84	0.61
19	I	0.32	NC	NC	NC	NC	NC	0.50
	II	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
20	I	0.25	0.70	0.86	NC	1.31	1.06	0.44
	II	0.29	0.58	0.63	19.43	1.37	1.26	0.50
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
21	I	0.32	NC	NC	NC	NC	NC	0.45
	II	0.36	1.31	NC	27.03	NC	2.40	0.54
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
22	I	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	II	0.51	NC	1.09	NC	NC	2.40	0.76
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
23	I	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	II	0.57	NC	0.44	NC	NC	2.99	0.79
	III	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
CONC. TOTAL (µg/g)		18.43	16.17	20.53	1378.44	47.58	39.15	26.01
CONC. PROM. (µg/g)		0.27	0.23	0.30	19.98	0.69	0.57	0.38

Phy: Fitano; Pr: Pristano

(1) CPI =1 hidrocarburos petrogénicos, en el rango de 3 a 6 sedimento no contaminado o contaminación por plantas (Colombo, et al., 1989)

(2) valores <15 indica muestra petrogénica, valores >50 indica muestra biológica.

(3) valores ≤ 1 (cerca a 1) indica contribución de Hidrocarburos derivados de petróleo y valores en el intervalo de 1.4 a 6.7 indica contribución de Hidrocarburos biogénicos.

I: Muestreo en época de nortes; II: Muestreo en época de estiaje; III: Muestreo en época de lluvia.

## HIDROCARBUROS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS (HPA's)

En la tabla 18 se presentan las concentraciones de hidrocarburos policíclicos aromáticos detectados en  $\mu\text{g/g}$  base seca en los sedimentos superficiales de la laguna de Mecoacán para las tres campañas estacionales, determinándose compuestos de 2 a 6 anillos bencénicos.

Analizando los resultados por muestreo, se encontró que en época de estiaje la concentración total de HPA's es de  $359.32 \mu\text{g/g}$ , con una concentración promedio de  $15.62 \pm 52.42 \mu\text{g/g}$ , seguido por la temporada de lluvias con concentración total de HPA's  $29.93 \mu\text{g/g}$  y una concentración promedio de  $1.30 \pm 4.46 \mu\text{g/g}$  y finalmente la temporada de nortes con una concentración total de HPA's  $17.83 \mu\text{g/g}$  y una concentración promedio de  $0.78 \pm 1.79 \mu\text{g/g}$ .

TABLA 18. CONCENTRACIONES ENCONTRADAS EN SEDIMENTO SUPERFICIAL EN LOS TRES MONITOREOS ESTACIONALES.

Estación	I	II	III
1	N.C	253.68	N.C
2	N.C	33.05	N.C
3	0.48	10.73	21.39
4	N.C	9.53	0.00
5	0.25	0.15	N.C
6	0.62	2.70	2.45
7	0.39	1.07	N.C
8	0.61	0.26	2.28
9	0.39	2.28	1.56
10	N.C	1.55	0.08
11	0.06	1.07	N.C
12	0.79	N.C	2.17
13	0.32	15.71	N.C
14	1.43	1.88	N.C
15	0.67	0.00	N.C
16	8.77	4.04	N.C
17	N.C	N.C	N.C
18	1.13	7.32	N.C
19	0.29	N.C	N.C
20	0.69	3.28	N.C
21	0.95	7.28	N.C
22	N.C	2.01	N.C
23	N.C	1.74	N.C
CONC. TOTAL ( $\mu\text{g/g}$ )	17.83	359.32	29.93
CONC. PROM ( $\mu\text{g/g}$ )	0.78	15.62	1.30
DESV. EST.	$\pm 1.79$	$\pm 52.42$	$\pm 4.46$

N.C.: No calculado

I: Muestreo en época de nortes; II: Muestreo en época de estiaje; III: Muestreo en época de lluvia.

La concentración promedio de las tres campañas estacionales fue de  $5.90 \pm 30.73 \mu\text{g/g}$  y los sitios de colecta con los valores más elevados en función de su concentración total en el área fueron: la estación 2 con  $33.05 \mu\text{g/g}$  en estiaje, estación 1 con  $253.68 \mu\text{g/g}$  en estiaje; estación 3 con  $21.39 \mu\text{g/g}$  en

lluvias y 10.73  $\mu\text{g/g}$  en estiaje; estación 13 con 15.71  $\mu\text{g/g}$  en estiaje; estación 4 con 9.53  $\mu\text{g/g}$  en estiaje; estación 16 con 8.77  $\mu\text{g/g}$  en nortes; estación 18 con 7.32  $\mu\text{g/g}$  en estiaje y estación 21 con 7.28  $\mu\text{g/g}$  en estiaje.

Las 15 estaciones restantes presentan concentraciones totales de HPA's dentro del intervalo de 0.56 a 4.05  $\mu\text{g/g}$ . Del total de 23 sitios muestreados el 65.2 % tiene concentraciones menores a 4.05  $\mu\text{g/g}$ .

La cuantificación de compuestos HPA's en función del número de anillos mostrada en la figura 7, se obtiene el predominio de compuestos formados por 4 anillos bencénicos con un promedio de 2.04  $\mu\text{g/g}$ , le siguen los compuestos con 6 anillos bencénicos con un promedio de 1.99  $\mu\text{g/g}$ , el tercer lugar le corresponde a los compuestos con 5 anillos bencénicos con un promedio de 1.46  $\mu\text{g/g}$  y finalmente los compuestos de 3 anillos bencénicos con una concentración promedio de 0.41  $\mu\text{g/g}$ .

El compuesto más abundante de 4 anillos fue el Pireno con una concentración promedio de 1.65  $\mu\text{g/g} \pm 12.99$ ; el Benzo(g,h,i) pireno con 1.99  $\mu\text{g/g} \pm 8.97$  de concentración promedio representa el grupo de 6 anillos bencénicos; la abundancia de los compuestos de 5 anillos fue el Benzo(a) pireno con una concentración de 1.14  $\mu\text{g/g} \pm 7.03$ , el Acenafteno con 0.25  $\mu\text{g/g} \pm 1.2$  y finalmente los compuestos de 2 anillos bencénicos no fueron detectados.

La no-predominancia de compuestos con 2 anillos bencénicos indica que no hay aporte de petróleo crudo reciente en la laguna.

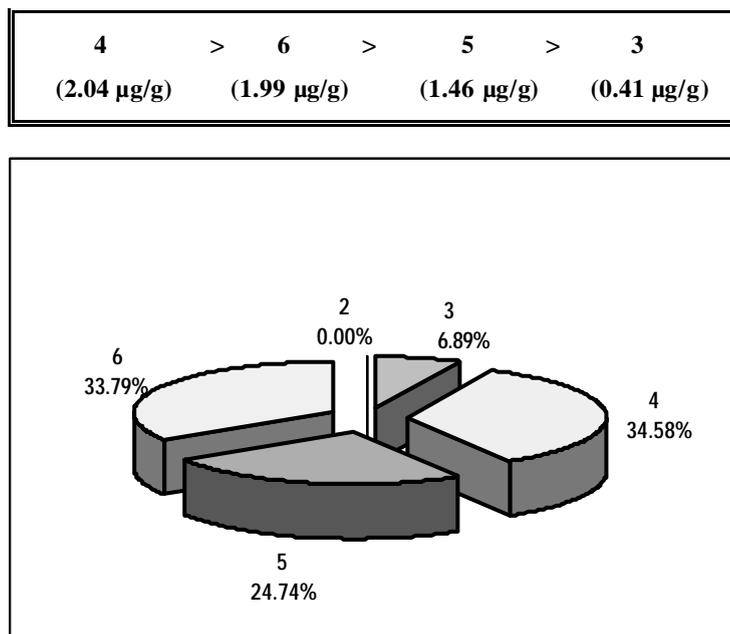


FIGURA 7. DISTRIBUCIÓN DE HPA's EN SEDIMENTO SUPERFICIAL EN RELACIÓN AL NÚMERO DE ANILLOS AROMÁTICOS (valores promedio en  $\mu\text{g/g}$ ).

Los HPA's de 3 y 4 anillos (antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno y criseno) se originan principalmente a través de procesos de altas temperaturas o pirólisis, principalmente la quema de combustibles fósiles. El fenantreno es uno de los compuestos más característicos y abundantes en áreas donde haya contaminación por petróleo, cuyas fuentes de origen son procesos pirolíticos y productos de desecho de la industria petrolera.

**TABLA 19. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE HPA's EN SEDIMENTO SUPERFICIAL.**

Anillos	Compuesto	Conc. promedio ( $\mu\text{g/g}$ )	Desv. Std.
3	ACENAFTENO	0.2463	$\pm 1.2$
	FENANTRENO	0.065	$\pm 0.15$
	ANTRACENO	0.0218	$\pm 0.06$
4	FLUORANTENO	0.0735	$\pm 0.23$
	PIRENO	1.653	$\pm 12.99$
	BENZO(a)ANTRACENO	0.291	$\pm 1.26$
	CRISENO	0.097	$\pm 0.51$
5	BENZO(e)PIRENO	0.159	$\pm 0.51$
	PERILENO	0.161	$\pm 0.47$
	BENZO(a)PIRENO	1.14	$\pm 7.03$
6	BENZO(g,h,i)PIRENO	1.99	$\pm 8.97$

La predominancia de compuestos pesados 5 a 6 anillos indica un origen pirolítico, en algunos casos se denota un aporte petrogénico al presentarse la presencia de aromáticos de tres anillos bencénicos.

Los compuestos que no fueron detectados en el estudio, su posible ausencia puede atribuirse al límite de detección del equipo analítico o bien a la recuperación de estos por la técnica empleada.

Botello (1993), reporta niveles de HPA's en sedimento de diversos sistemas costeros del Golfo de México (valor  $\mu\text{g}$  peso seco). En donde se puede decir que en la laguna de Mecoaacán la predominancia de anillos bencénicos es en general compuestos PAH's de mayor peso que son los más estables y tienen muy poca solubilidad en agua.

En estudios realizados en programas regionales, como el coordinado por la NOAA, se reportan niveles de HPA's totales en sedimento con intervalos entre  $< 0.005$  y  $36.7 \mu\text{g/g}$ , con una dominancia de compuestos provenientes de la pirólisis de materiales orgánicos derivados de varios procesos (Clark, 1996; Vázquez, et al., 2000).

Si comparamos los resultados obtenidos en la laguna de Mecoaacán con los criterios establecidos por la CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment), establece valores para el benzo(a)antraceno y benzo (a)pireno de 0.00001 mg/L, naftaleno, fenantreno y pireno 0.0002 mg/L, todos rebasan el valor de referencia.

ECOSISTEMA	TOTAL MIN-MAX	ANILLOS DOMINANTES (SUMA TOTAL POR ANILLOS)			
<b>VERACRUZ</b>					
L. MANCHA	0.60-15.47	4 (1.06)	> 5 (0.68)	> 3 (0.28)	> 6 0.27
L. LLANO	0.03-17.33	4 (1.20)	> 5 (0.73)	> 3 (0.17)	
L. SALADA	0.03-13.27	4 (1.25)	> 5 (0.52)	>3 (0.29)	
<b>TABASCO</b>					
L. CARMEN -MACHONA	0.01-1.23	4 (0.46)	> 3 (0.23)	> 5 (0.12)	> 2 (0.02)
L. MECOACÁN	0.01-0.89	4 (0.51)	> 3 (0.31)	> 5 (0.16)	> 2 (0.03)

Los índices para diagnosticar cuantitativamente los HPA's de tipo pirogénicos y petrogénicos (*Zhendi et al., 2003*); son tomados de *Benlahcen et al., (1997)*, reporta un método usando la relación **Fenantreno/Antraceno <10** y **Fluoranteno/Pireno >1** para identificar la fuente de contaminación de procesos de combustión.

*Lake et al., (1979)* y *Sicre et al., (1987)* incluyen además **Benzo(a)antraceno/Criseno**, **Fenantreno/(Fenantreno + Antraceno)** y **Benzo(e)pireno/(Benzo(e)pireno + Benzo(a)pireno)**.

Así los resultados obtenidos se muestran en la tabla 20, se puede decir que de acuerdo al intervalo establecido para la razón **Ph/An** los valores que arroja esta razón son menores a 10, su concentración se encuentra en el intervalo de 0.86 a 4.90µg/g, con lo que se puede decir que el origen del contaminante es pirolítico; para la razón **FUPy** los valores de concentración se encuentran en dos intervalos de 0.016 a 1.066 µg/g y de 1.17 a 13.19 µg/g indicando que la procedencia del contaminante se debe a una mezcla de aporte petrogénico y pirolítico.

Es importante señalar que se detectaron HPA's con características genotóxicas y cancerígenas como el Benzo(a)pireno con un valor total de 78.67  $\mu\text{g/g}$ , Benzo(g,h,i)perileno con una concentración de 137.54  $\mu\text{g/g}$ , Benzo(e)pireno con 10.96  $\mu\text{g/g}$ , Benzo (a)antraceno con 20.05  $\mu\text{g/g}$ , Perileno con 11.08  $\mu\text{g/g}$ , y Criseno con 6.69  $\mu\text{g/g}$ ; su máxima concentración se detectó en la estación 1 durante la temporada de estiaje, véase tabla 18. Esto representa un riesgo ambiental debido a que la principal actividad en la laguna son los bancos ostrícolas y pesca, de esta manera estos contaminantes pueden estar disponibles para los recursos pesqueros de la región y ser destinados para el consumo humano con su efecto sobre la salud humana.

En el Anexo 3 se presentan los gráficos espacio-temporal de la distribución de los contaminantes policíclicos en función de su concentración para cada monitoreo estacional realizado en la laguna

TABLA 20. ÍNDICES PARA EVALUACIÓN DE HPA's EN SEDIMENTO SUPERFICIAL.

ESTACIÓN	MUESTREO	Ph/An (1)	Fl/Py (2)	Chr/BaA	BaA/Chr	Ph/(Ph+An)	BePy/(BePy+BaPy)
1	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	II	N.C	0,0167	2,0104	0,4974	1,0000	0,3361
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
2	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	II	N.C	1,1742	N.C	N.C	1,0000	0,3393
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
3	I	N.C	0,7739	N.C	N.C	1,0000	N.C
	II	N.C	0,0922	0,8769	1,1404	1,0000	0,5871
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	1,0000	1,0000
4	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	II	4,9014	8,2588	N.C	N.C	N.C	0,6347
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
5	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	0,3195
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
6	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	0,3183
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	1,0000
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	1,0000	1,0000
7	I	N.C	N.C	N.C	N.C	1,0000	0,2317
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	1,0000	1,0000
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	0,0000
8	I	1,6024	0,5735	N.C	N.C	0,6157	0,1506
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	0,0000
	III	0,8618	0,0345	N.C	N.C	0,4629	1,0000
9	I	N.C	N.C	N.C	N.C	1,0000	0,1965
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	1,0000	1,0000
	III	1,0115	0,0986	N.C	N.C	0,5029	1,0000
10	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	III	N.C	0,3224	N.C	N.C	N.C	N.C
11	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
12	I	1,6486	0,9421	0,4942	2,0233	0,6224	0,2734
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	III	0,8575	0,0587	N.C	N.C	0,4617	1,0000
13	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	0,1926
	II	N.C	0,5527	N.C	N.C	1,0000	1,0000
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
14	I	1,3097	0,7696	N.C	N.C	0,5670	0,1575
	II	1,4525	2,4661	N.C	N.C	0,5923	1,0000
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
15	I	1,4928	1,0669	N.C	N.C	0,5988	0,6169
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
16	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	0,8419
	II	N.C	5,2762	N.C	N.C	N.C	0,0988
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
17	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
18	I	1,3271	N.C	N.C	N.C	0,5703	0,4335
	II	N.C	3,8710	N.C	N.C	1,0000	1,0000
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
19	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	0,2677
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
20	I	1,3504	0,7359	N.C	N.C	0,5745	0,5879
	II	N.C	0,8226	N.C	N.C	1,0000	1,0000
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
21	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	0,1533
	II	N.C	N.C	N.C	N.C	1,0000	0,2541
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
22	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	II	3,3333	13,1850	4,5337	0,2206	0,7692	0,1228
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
23	I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
	II	N.C	1,2084	5,9830	0,1671	N.C	0,1721
	III	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
CON. TOTAL (µg/g)		21,1491	42,3001	13,8983	4,0488	20,3378	19,2861
CONC. PROM. (µg/g)		0,3065	0,6130	0,2014	0,0587	0,2948	0,2795
DES EST.		± 0,8232	± 2,0039	± 0,9284	± 0,2839	± 0,4153	± 0,3811

FUENTE: Budzinsky et al., 1997; Soclo et al., 2000.

N.C: No Calculado

NOTACIÓN: Ph: Fenantreno; An: Antraceno; Fl: Fluoranteno; Py: Pireno; Chr: Criseno;

BaA: Benzo(a)antraceno; BePy: Benzo(e)pireno; BaPy: Benzo(a)pireno.

(1) Ph/An < 10 pirolítico y > 10 petrogénico

(2) Fl/Py > 1 piro lítico y > 1 petrogénico

I: Muestreo en época de nortes; II: Muestreo en época de estiaje; III: Muestreo en época de lluvia.

#### **XIV. CONCLUSIONES**

I) La laguna de Mecocacán ha tenido variaciones físicas, fisicoquímicas y biológicas, como producto del proceso de asolvamiento en su desembocadura al mar, acción que ha repercutido básicamente en la región sureste, como se puede apreciar en los gráficos de distribución espacio-temporal de los contaminantes.

II) El deterioro de la calidad de los sedimentos de la laguna, por la gran cantidad de aguas continentales que aporta el canal Cuxcuchapa, depositando importantes cargas de contaminantes orgánicos e inorgánicos, que debido a sus aguas someras se tiene una contribución y almacenaje de los contaminantes en sus sedimentos, así como otros factores que influyen gradualmente en el deterioro de la laguna de Mecocacán:

III) Se calcularon correlaciones para hidrocarburos alifáticos que ayudaron a determinar la posible fuente de contribución del contaminante.

IV) Los hidrocarburos alifáticos que se registraron con mayor frecuencia en los sedimentos de la laguna fueron de  $n\text{-C}_{20}$  a  $n\text{-C}_{35}$  considerando que el origen de los  $n$ -alcanos fue mixto tanto biogénico como petrogénico.

V) La presencia de isoprenoides como Pristano ( $2.93 \mu\text{g/g}$ ) y Fitano ( $2.82 \mu\text{g/g}$ ) en forma proporcional, indicando de esta manera un aporte de contribución mixta de contaminantes, tanto petrogénico como antropogénico en la laguna.

VI) La concentración total de hidrocarburos alifáticos más alta se reporta en la estación 9, con  $904.27 \mu\text{g/g}$  en sedimento superficial para la temporada de estiaje.

VII) En el caso de los HTP en los sedimentos se encontró que la concentración del Río Seco tiene una contribución de  $1042.64 \mu\text{g/g}$  que rebasa los criterios establecidos por PROFEPA de 1000 ppm que es el que utiliza Canadá y los países bajos.

VIII) Se determinó que la contribución mayoritaria la tienen los hidrocarburos alifáticos aproximadamente dos veces y media sobre la aportación de compuestos policíclicos aromáticos.

X) En base a la composición de los HPA's encontrada en los sedimentos lagunar-estuarino, se puede decir que la fuente de origen de estos hidrocarburos son principalmente la pirólisis, quema de campos de cultivo, diagénesis de la materia orgánica, material movilizado mediante el transporte atmosférico y petróleo, debido a que la presencia de fenantreno (característico y abundante en zonas contaminadas por petróleo) se encuentra en concentración promedio de  $0.065 \mu\text{g/g} \pm 0.15$ , Acenafteno con  $0.246 \mu\text{g/g} \pm 1.2$  y los hidrocarburos generados por pirólisis se encuentran con una concentración promedio el benzo(g,h,i)pireno con  $1.99 \mu\text{g/g} \pm 8.97$  y benzo(a)pireno con  $0.159 \mu\text{g/g} \pm 0.51$ .

X) La concentración más alta de HPA's en sedimento superficial, registrada en el presente estudio fue de  $407.8 \mu\text{g/g}$  correspondiendo a la temporada de estiaje, además de un predominio de compuestos de alto peso molecular (5 a 6 anillos bencénicos).

XI) La presencia de HPA's como el Benzo(a)pireno considerado como un potente carcinogénico, seguido de Benzo(g,h,i)pireno, Pireno, ente otros en el ecosistema, pone de manifiesto el riesgo que existe para los organismos marinos y la salud humana, debido a que la región es uno de los más importantes en recursos pesqueros de estuarios (camarón y ostiones, almeja), además que rebasa los criterios interinos de limpieza establecidos por la PROFEPA y CCME de 0.0001 ppm para el Benzo(a)antraceno y benzo(a)pireno, naftaleno, fenantreno y pireno para uso en suelo agrícola .

XII) Se encontraron los más altos niveles de concentración de hidrocarburos alifáticos en la temporada de estiaje ( $36.63 \mu\text{g/g} \pm 164.10$ ), seguida por la temporada de nortes ( $2.28 \mu\text{g/g} \pm 2.69$ ) y finalmente la temporada de lluvias ( $0.41 \mu\text{g/g} \pm 1.26$ ). Para los hidrocarburos policíclicos aromáticos se obtuvieron las concentraciones más altas en la temporada de estiaje ( $359.32 \mu\text{g/g} \pm 52.42$ ), seguida por la temporada de nortes ( $29.93 \mu\text{g/g} \pm 4.46$ ) y finalmente la temporada de lluvias ( $17.83 \mu\text{g/g} \pm 1.79$ ).

XIII) Con el estudio realizado no se pueden determinar las causas que provocaron la presencia de estos contaminantes en los sedimentos, sin embargo se puede decir que tanto las aguas residuales de la ciudad de Paraíso y las descargas de PEMEX, pueden contribuir gradualmente en la presencia de hidrocarburos del petróleo en la laguna.

XIV) Se recomienda continuar con el monitoreo de hidrocarburos en sedimento en las tres temporadas del año, con el fin de vigilar la cantidad y variedad de contaminantes así como el tipo de fuente (natural o artificial), para tener una evaluación permanente de la laguna de Mecoacán, además incluir programas de monitoreo de sustancias tóxicas disueltas y dispersas en la columna de agua debido a que es el principal medio de transporte de los contaminantes y en organismos como peces, camarón, ostión, entre otros, dado que son organismos que bioacumulan estos contaminantes.

# ANEXO

# ANEXO1. TABLA DE RESULTADOS DE CONCENTRACIÓN DE HC's Y PA's

## A.1.1 TABLA DE RESULTADOS DE HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS (µg/g).

Estación	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			11			12				
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III		
n-C8	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C9	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
n-C10	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
n-C11	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
n-C12	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
n-C13	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
n-C14	0.09	N.D	N.D	ND	0.17	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.04	0.04	N.D	N.D	0.16	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	0.03	0.14	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C15	0.12	N.D	N.D	ND	0.16	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.23	N.D	0.16	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.07	0.06	N.D	0.16	N.D	N.D	N.D		
n-C16	0.10	1.12	N.D	ND	0.26	N.D	N.D	0.11	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.27	N.D	0.21	0.06	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.08	0.07	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C17	N.D	N.D	N.D	ND	0.11	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.17	0.01	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.01	N.D	0.06	N.D	N.D	N.D	N.D	0.06	0.03	N.D	0.12	N.D	N.D	N.D	N.D	
PRISTANO	0.11	0.48	N.D	ND	0.14	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02	N.D	0.06	0.21	N.D	0.32	0.04	N.D	0.07	0.03	N.D	N.D	0.02	N.D	0.08	N.D	N.D	N.D	0.03	N.D	0.09	0.05	N.D	0.14	N.D	N.D	N.D	
n-C18	0.07	0.67	N.D	ND	0.16	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	0.26	0.01	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	0.06	0.02	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
FITANO	0.08	0.51	N.D	ND	0.07	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	0.01	N.D	0.05	0.07	N.D	0.32	0.02	N.D	0.06	0.01	N.D	0.14	0.01	N.D	0.08	N.D	N.D	N.D	0.01	N.D	0.07	0.03	N.D	0.10	N.D	N.D	N.D	
n-C19	0.12	1.18	0.01	ND	0.03	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	N.D	N.D	0.17	0.01	N.D	0.06	0.02	N.D	N.D	0.01	N.D	0.07	N.D	N.D	N.D	N.D	0.05	0.01	N.D	0.10	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C20	0.17	6.39	0.01	ND	0.68	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	N.D	N.D	0.46	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C21	0.09	0.29	N.D	ND	0.11	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.47	0.00	N.D	0.06	N.D	N.D	0.39	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C22	0.21	6.36	0.03	ND	0.45	N.D	0.05	0.12	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	0.17	N.D	0.49	0.05	N.D	0.05	0.04	N.D	N.D	0.04	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.06	N.D	0.04	0.03	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C23	0.96	160.42	0.07	ND	0.50	N.D	N.D	0.10	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	0.42	0.04	N.D	0.04	0.03	N.D	N.D	0.03	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C24	0.69	308.48	0.07	ND	0.18	N.D	0.04	0.37	N.D	N.D	0.17	N.D	N.D	N.D	N.D	0.61	0.07	N.D	0.06	0.06	N.D	0.10	0.05	N.D	0.06	0.04	N.D	N.D	0.06	N.D	0.03	0.04	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	
n-C25	0.44	10.57	N.D	ND	1.34	N.D	0.00	0.09	N.D	N.D	0.03	N.D	0.01	0.24	N.D	0.41	0.03	N.D	0.02	0.03	N.D	0.05	0.03	N.D	0.02	0.03	N.D	N.D	0.04	N.D	0.01	0.03	N.D	0.02	N.D	N.D	N.D	
n-C26	0.45	20.06	0.08	ND	2.08	N.D	0.04	0.29	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	0.23	N.D	0.57	0.05	N.D	0.02	0.04	N.D	0.05	0.04	N.D	0.05	0.05	N.D	N.D	0.05	N.D	0.01	0.05	N.D	0.01	N.D	N.D	N.D	
n-C27	0.72	25.73	0.08	ND	1.87	N.D	0.03	0.15	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	0.25	N.D	0.48	0.04	N.D	0.02	0.04	N.D	0.04	0.04	N.D	0.02	0.04	N.D	N.D	0.05	N.D	0.04	0.05	N.D	0.03	N.D	N.D	N.D	
n-C28	1.18	63.74	0.22	ND	5.62	N.D	0.17	0.72	N.D	N.D	0.11	N.D	N.D	0.26	N.D	0.66	0.08	N.D	0.05	0.06	N.D	0.24	0.06	N.D	0.18	0.10	N.D	N.D	0.08	N.D	0.13	0.11	N.D	0.08	N.D	N.D	N.D	
n-C29	0.54	74.08	0.06	ND	0.63	N.D	0.17	0.21	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	0.28	N.D	0.69	0.05	N.D	N.D	0.04	N.D	0.04	0.04	N.D	0.15	0.04	N.D	N.D	0.06	N.D	0.01	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C30	1.06	32.71	0.10	ND	5.58	N.D	0.26	0.70	N.D	N.D	0.09	N.D	N.D	0.28	N.D	0.67	0.07	N.D	0.14	0.06	N.D	0.37	0.05	N.D	0.30	0.07	N.D	N.D	0.08	N.D	0.26	0.09	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C32	0.43	11.47	0.12	ND	0.50	N.D	N.D	0.10	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.25	N.D	0.21	0.04	N.D	N.D	0.04	N.D	0.09	0.04	N.D	0.11	0.04	N.D	N.D	0.05	N.D	0.09	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C33	0.77	14.23	0.08	ND	3.68	N.D	N.D	0.27	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	0.26	N.D	0.12	0.05	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	0.05	N.D	0.07	0.06	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C34	0.93	7.31	0.06	ND	0.32	N.D	0.08	0.09	N.D	N.D	0.04	N.D	0.04	0.32	N.D	0.34	0.06	N.D	0.04	0.05	N.D	0.17	0.05	N.D	0.04	0.04	N.D	N.D	0.07	N.D	0.10	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C35	0.22	12.93	0.05	ND	0.48	N.D	0.02	0.19	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	0.33	N.D	0.13	0.08	N.D	N.D	0.05	N.D	0.26	0.04	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	0.05	N.D	0.01	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C36	0.16	12.29	0.03	ND	0.41	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	0.06	N.D	0.10	0.47	N.D	N.D	0.11	N.D	N.D	0.10	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	0.05	N.D	0.17	0.02	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C37	N.D	4.16	0.02	ND	0.51	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C38	N.D	3.76	0.12	ND	1.22	N.D	N.D	0.14	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D									
n-C39	N.D	8.97	0.09	ND	0.94	N.D	N.D	0.15	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
n-C40	N.D	1.02	0.10	ND	0.30	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D

Continuación

Estación	13			14			15			16			17			18			19			20			21			22			23				
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III		
n-C8	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C9	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C10	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C11	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C12	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C13	N.D	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C14	N.D	0.04	N.D	0.06	0.05	N.D	0.03	N.D	N.D	N.D	0.06	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	0.11	N.D	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	
n-C15	N.D	0.05	0.04	0.09	0.05	N.D	0.10	N.D	N.D	0.17	0.05	N.D	0.13	N.D	N.D	N.D	0.06	0.04	N.D	N.D	N.D	0.08	0.05	N.D	0.07	0.04	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	
n-C16	N.D	0.10	0.08	0.08	0.10	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.08	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.10	0.09	N.D	N.D	N.D	0.09	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	
n-C17	N.D	0.02	0.04	0.11	0.03	N.D	0.06	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	0.09	N.D	N.D	0.15	0.05	0.05	N.D	N.D	N.D	0.08	0.03	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	
PRISTANO	0.06	0.06	0.06	0.09	0.06	N.D	0.09	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	0.11	N.D	N.D	0.16	0.07	0.05	N.D	N.D	N.D	0.11	0.05	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C18	N.D	0.02	0.02	0.20	0.03	N.D	0.06	N.D	N.D	N.D	0.02	N.D	0.07	N.D	N.D	N.D	0.03	0.02	N.D	N.D	N.D	0.07	0.02	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	
FITANO	0.05	0.03	0.04	0.18	0.04	N.D	0.09	N.D	N.D	0.20	0.02	N.D	0.09	N.D	N.D	N.D	0.08	0.02	0.14	N.D	N.D	0.08	0.04	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	
n-C19	N.D	0.01	N.D	0.13	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	0.07	N.D	N.D	N.D	0.02	N.D	0.23	N.D	N.D	0.07	0.02	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C20	0.05	0.01	0.02	0.34	N.D	N.D	0.13	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	0.07	N.D	N.D	0.14	0.00	0.03	N.D	N.D	N.D	0.08	0.00	N.D	0.06	0.01	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C21	0.04	N.D	0.00	0.13	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	0.27	N.D	N.D	N.D	0.00	N.D	N.D	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	0.06	ND	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C22	0.08	0.05	0.31	0.11	0.04	N.D	0.08	N.D	N.D	0.11	0.04	N.D	0.07	N.D	N.D	0.10	0.06	0.09	N.D	N.D	N.D	0.08	0.07	N.D	0.05	0.07	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	
n-C23	0.03	0.04	0.15	0.14	0.03	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.10	N.D	0.08	N.D	N.D	0.08	0.05	0.06	N.D	N.D	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	
n-C24	0.24	0.11	1.35	0.56	0.06	N.D	0.09	N.D	N.D	0.39	0.08	N.D	0.29	N.D	N.D	0.17	0.11	0.17	0.09	N.D	N.D	0.15	0.15	N.D	0.09	0.11	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	
n-C25	0.03	0.03	0.16	0.45	0.03	N.D	0.02	N.D	N.D	0.08	0.03	N.D	0.22	N.D	N.D	0.05	0.04	0.06	0.02	N.D	N.D	0.04	0.05	N.D	0.03	0.04	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	
n-C26	0.22	0.09	1.39	0.48	0.06	N.D	0.09	N.D	N.D	0.47	0.08	N.D	0.40	N.D	N.D	0.22	0.10	0.24	0.04	N.D	N.D	0.17	0.17	N.D	0.09	0.10	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	
n-C27	0.02	0.05	0.16	0.42	0.05	N.D	0.11	N.D	N.D	0.25	0.05	N.D	0.24	N.D	N.D	0.24	0.05	0.10	N.D	N.D	N.D	0.09	0.07	N.D	0.06	0.06	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	
n-C28	0.16	0.16	0.82	0.55	0.13	N.D	0.28	N.D	N.D	0.94	0.19	N.D	0.58	N.D	N.D	0.66	0.18	0.35	0.13	N.D	N.D	0.33	0.30	N.D	0.27	0.22	N.D	N.D	0.08	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	
n-C29	N.D	0.05	0.11	0.63	0.05	N.D	0.24	N.D	N.D	0.29	0.06	N.D	0.19	N.D	N.D	0.12	0.05	0.09	0.09	N.D	N.D	0.07	0.07	N.D	0.10	0.06	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	
n-C30	0.03	0.10	0.22	0.58	0.10	N.D	0.34	N.D	N.D	1.30	0.13	N.D	0.61	N.D	N.D	0.76	0.13	0.26	0.27	N.D	N.D	0.40	0.18	N.D	0.35	0.12	N.D	N.D	0.08	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	
n-C32	N.D	0.04	0.07	ND	0.04	N.D	N.D	N.D	N.D	0.31	0.05	N.D	0.23	N.D	N.D	0.18	0.05	0.09	0.23	N.D	N.D	0.08	0.05	N.D	0.04	0.05	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	
n-C33	N.D	0.08	0.16	0.27	0.07	N.D	N.D	N.D	N.D	0.08	N.D	0.18	N.D	N.D	N.D	0.07	0.24	N.D	N.D	N.D	N.D	0.04	0.08	N.D	0.03	0.06	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	
n-C34	N.D	0.04	0.07	0.19	0.04	N.D	0.11	N.D	N.D	0.29	0.04	N.D	0.25	N.D	N.D	0.04	0.04	0.08	0.10	N.D	N.D	0.11	0.04	N.D	0.09	0.05	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	
n-C35	N.D	0.05	0.07	0.07	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	0.14	0.05	N.D	0.12	N.D	N.D	0.07	0.05	0.09	N.D	N.D	N.D	0.05	0.06	N.D	0.03	0.04	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	
n-C36	N.D	0.04	0.03	0.04	0.06	N.D	N.D	N.D	N.D	0.04	0.03	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.07	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02	N.D	0.03	0.04	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	
n-C37	N.D	0.01	0.02	ND	0.01	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	
n-C38	N.D	N.D	0.07	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
n-C39	N.D	N.D	0.08	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.09	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
n-C40	N.D	N.D	0.04	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D

N.D.: No detectado, por debajo del límite de cuantificación de método.  
 I: Muestreo en época de Nortes; II: Muestreo en época de estiaje; III: Muestreo en época de lluvia.

**A.1.2 TABLA DE RESULTADOS DE HIDROCARBUROS POLICÍCLIOS AROMÁTICOS (µg/g).**

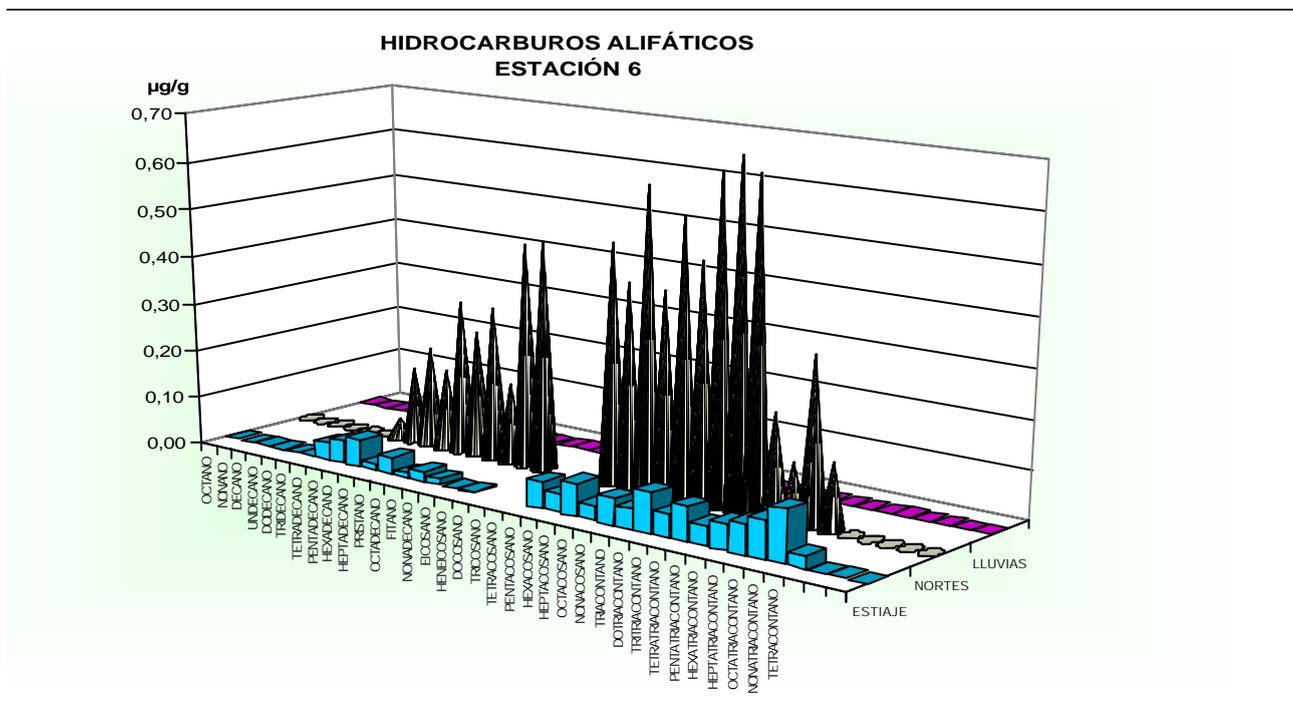
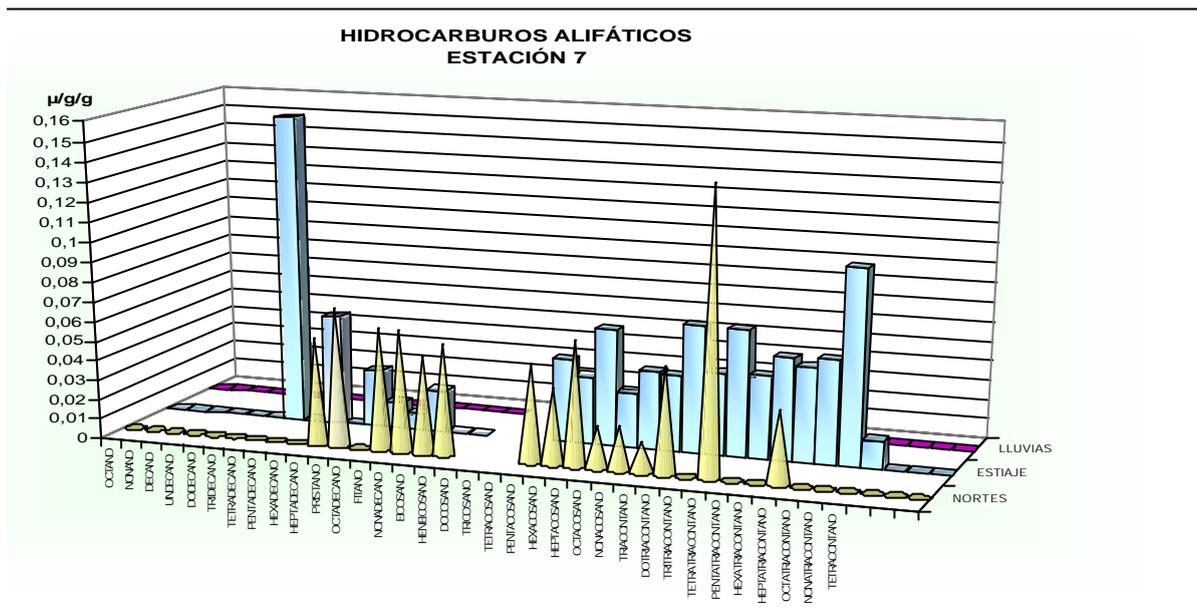
Estación	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			11			12		
	Muestreo	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III		
NAFTALENO	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
ACENAFTENO	N.D	0.65	N.D	N.D	5.60	N.D	N.D	0.52	8.30	N.D	0.37	N.D	0.30	N.D	0.05	0.13	N.D																			
FENANTRENO	N.D	1.00	N.D	N.D	0.31	N.D	N.D	0.04	0.38	0.07	N.D	0.38	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.07	0.05	0.03	N.D	0.08	N.D	0.34	0.05	0.01	0.17	N.D								
ANTRACENO	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.08	N.D	0.05	N.D	0.39	N.D	N.D	0.17	N.D																	
FLUORANTENO	N.D	1.81	N.D	N.D	0.31	N.D	0.03	0.28	N.D	N.D	0.30	N.D	0.06	N.D	0.03	N.D	0.02	N.D	0.25	0.03	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D							
PIRENO	N.D	107.97	N.D	N.D	0.26	N.D	0.04	3.02	0.08	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.03	0.04	N.D	N.D	0.06	N.D	0.56	0.05	N.D	0.30	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	0.35	
BENZO(A)ANTRACENO	N.D	2.00	N.D	N.D	7.84	N.D	0.09	0.47	6.96	N.D	0.27	N.D	0.19	N.D	N.D	N.D	0.10	N.D	0.07	0.11	N.D	0.14	N.D	N.D	0.10	N.D	0.07	N.D	0.07							
CRISENO	N.D	4.01	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.42	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	
BENZO (E)PIRENO	N.D	1.72	N.D	N.D	0.67	N.D	N.D	0.97	0.48	N.D	1.33	N.D	0.02	N.D	0.11	0.05	0.23	0.03	0.02	N.D	0.03	N.D	0.07	0.03	0.03	0.10	N.D	0.04	N.D							
PERILENO	N.D	3.40	N.D	N.D	1.30	N.D	0.12	0.68	N.D	N.D	0.77	N.D	0.05	N.D	N.D	0.23	N.D	N.D	N.D	0.19	N.D	N.D	0.13	N.D	0.12	N.D										
BENZO (A)PIRENO	N.D	58.46	N.D	N.D	1.77	N.D	0.05	0.58	2.31	N.D	0.50	N.D	0.05	0.10	N.D	N.D	1.59	0.55	N.D	0.26	N.D	0.04	0.15	0.25	N.D	0.62	0.25	N.D	0.43	N.D	N.D	0.30	N.D	0.04	N.D	
BENZO(GHI)PERILENO	N.D	72.65	N.D	N.D	15.01	N.D	0.11	3.41	3.1862	N.D	5.48	N.D	0.13	0.06	N.D	0.28	1.06	1.57	0.15	0.51	N.D	0.11	0.11	0.24	0.13	1.26	0.31	N.D	0.99	0.06	0.06	0.67	N.D	0.18	N.D	

Estación	13			14			15			16			17			18			19			20			21			22			23				
	Muestreo	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III				
NAFTALENO	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
ACENAFTENO	N.D	N.D	N.D	0.08	0.09	N.D	0.03	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.09	N.D	N.D	N.D	N.D	0.03	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	N.D	N.D	
FENANTRENO	N.D	0.28	N.D	0.21	0.06	N.D	0.11	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.14	0.06	N.D	N.D	N.D	N.D	0.14	0.03	N.D	N.D	0.13	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
ANTRACENO	N.D	N.D	N.D	0.16	0.04	N.D	0.07	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.11	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.10	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
FLUORANTENO	N.D	0.23	N.D	0.08	0.30	N.D	0.06	N.D	N.D	N.D	0.09	N.D	N.D	N.D	N.D	0.34	N.D	N.D	N.D	N.D	0.06	0.02	N.D	N.D	0.41	N.D	N.D	0.23	N.D	N.D	0.08	N.D	N.D	N.D	
PIRENO	0.05	0.42	N.D	0.10	0.12	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	N.D	N.D	0.13	0.09	N.D	N.D	N.D	N.D	0.08	0.03	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	N.D	
BENZO(A)ANTRACENO	N.D	0.18	N.D	0.10	0.10	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.13	N.D	N.D	N.D	N.D	0.11	0.27	N.D	N.D	N.D	N.D	0.06	0.06	N.D	N.D	0.33	N.D	N.D	0.11	N.D	N.D	0.08	N.D	N.D	
CRISENO	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	1.23	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.52	N.D	N.D	0.48	N.D	N.D	
BENZO (E)PIRENO	0.04	0.07	N.D	0.06	0.06	N.D	0.06	N.D	N.D	3.58	0.05	N.D	N.D	N.D	N.D	0.08	0.24	N.D	0.06	N.D	N.D	0.06	0.06	N.D	0.08	0.35	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	0.07	N.D	N.D	
PERILENO	0.18	N.D	N.D	0.31	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.67	0.47	N.D	N.D	N.D	N.D	0.11	N.D	N.D	0.15	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	0.43	1.03	N.D	0.20	N.D	N.D	0.35	N.D	N.D	N.D	
BENZO (A)PIRENO	N.D	3.08	N.D	0.14	0.12	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	1.47	N.D	N.D	N.D	N.D	0.11	0.81	N.D	N.D	N.D	0.05	0.83	N.D	N.D	2.92	N.D	N.D	0.51	N.D	N.D	0.31	N.D	N.D	N.D	
BENZO(GHI)PERILENO	0.05	11.44	N.D	0.20	1.00	N.D	0.15	N.D	N.D	3.29	1.83	N.D	N.D	N.D	N.D	0.34	5.43	N.D	0.08	N.D	N.D	0.07	2.21	N.D	0.44	2.11	N.D	N.D	0.34	N.D	N.D	0.31	N.D	N.D	

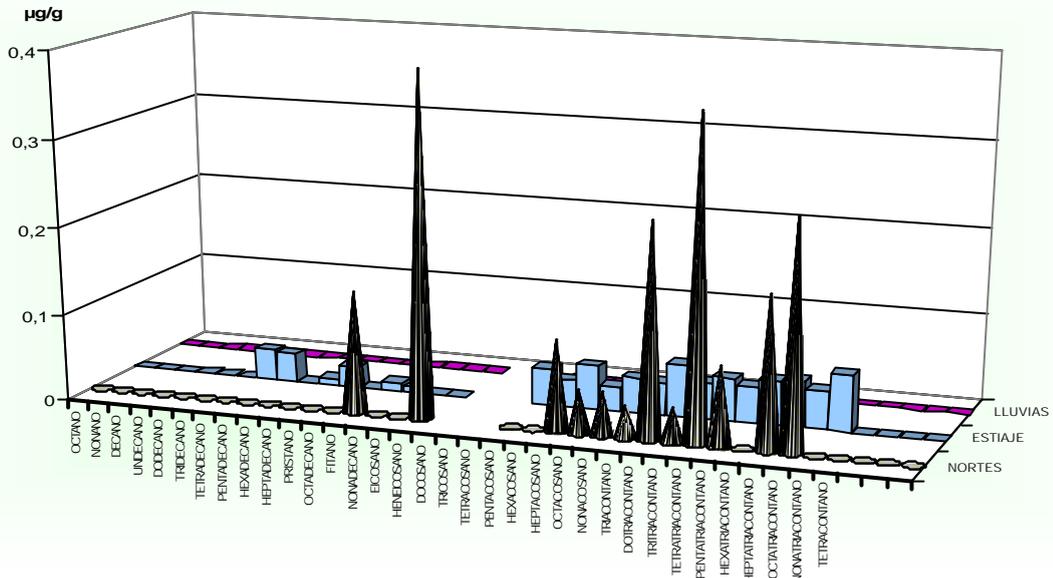
N.D.: No detectado, por debajo del límite de cuantificación de método.  
 I: Muestreo en época de Nortes; II: Muestreo en época de estiaje; III: Muestreo en época de lluvia.

## ANEXO 2. GRÁFICOS DE HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS E HIDROCARBUROS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS EN SEDIMENTO SUPERFICIAL

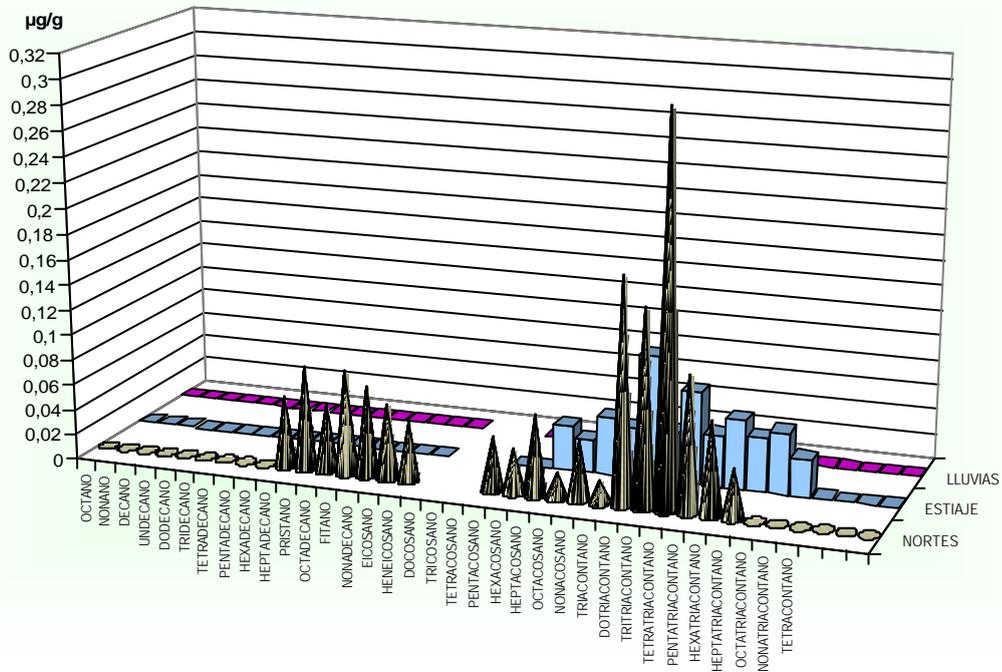
### A.2.1 GRÁFICA DE CONCENTRACIÓN vs. COMPUESTO ALIFÁTICO EN MUESTRAS DE SEDIMENTO.



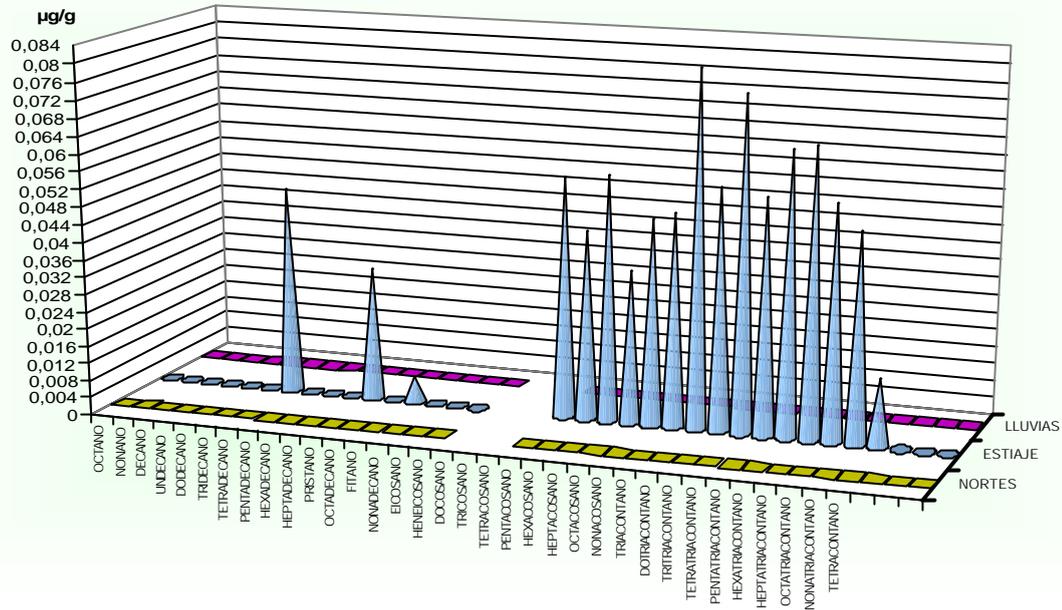
### HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS ESTACIÓN 8



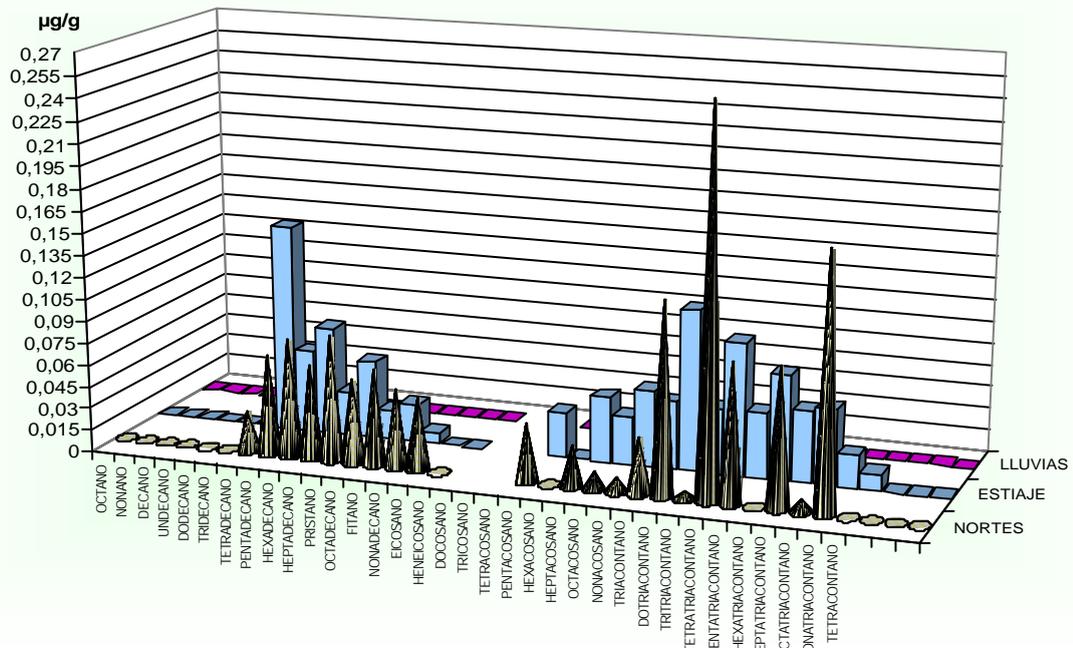
### HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS ESTACIÓN 9



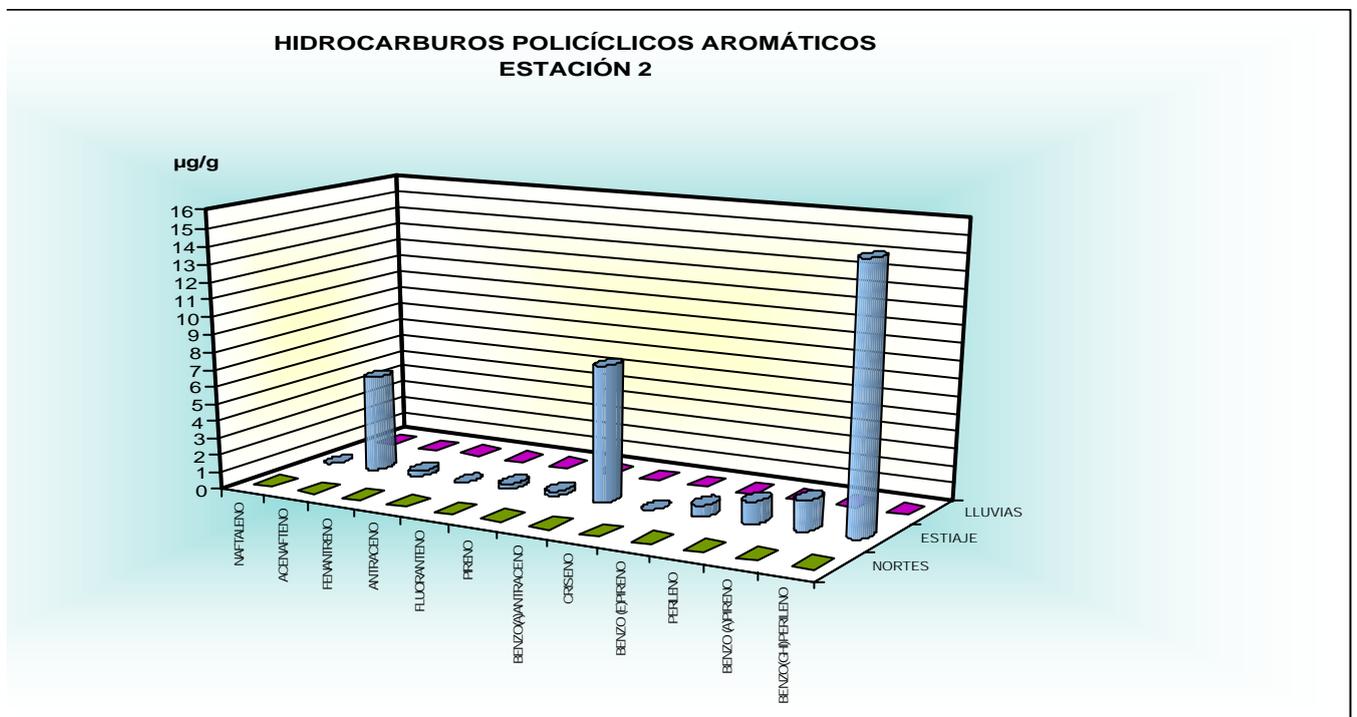
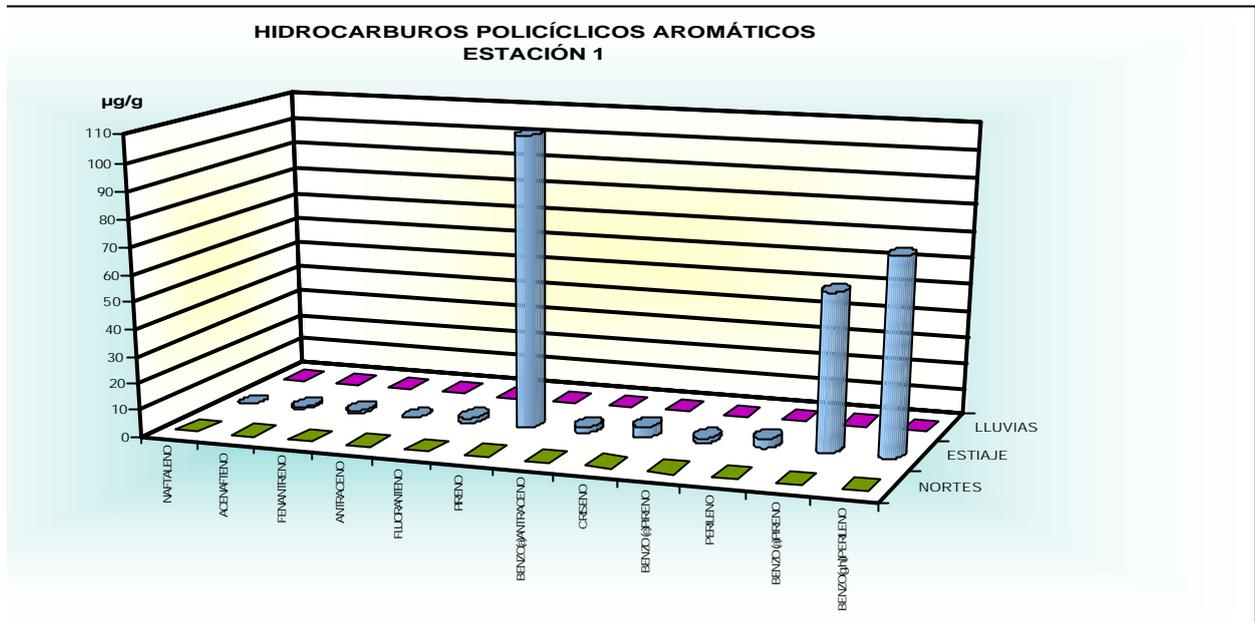
**HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS  
ESTACIÓN 10**



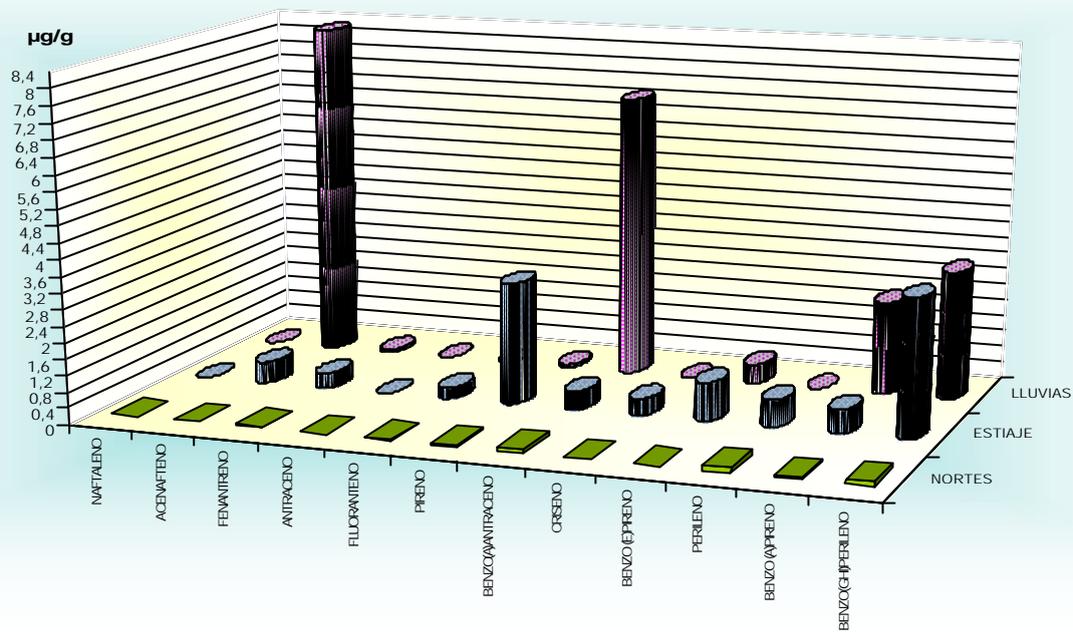
**HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS  
ESTACIÓN 11**



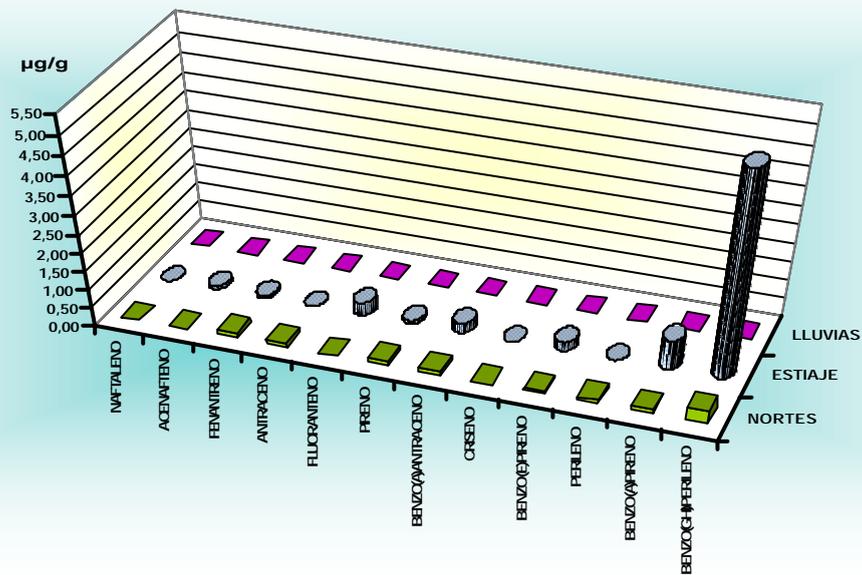
## A.2.2 GRÁFICA DE CONCENTRACIÓN vs. COMPUESTO AROMÁTICO EN MUESTRAS DE SEDIMENTO.



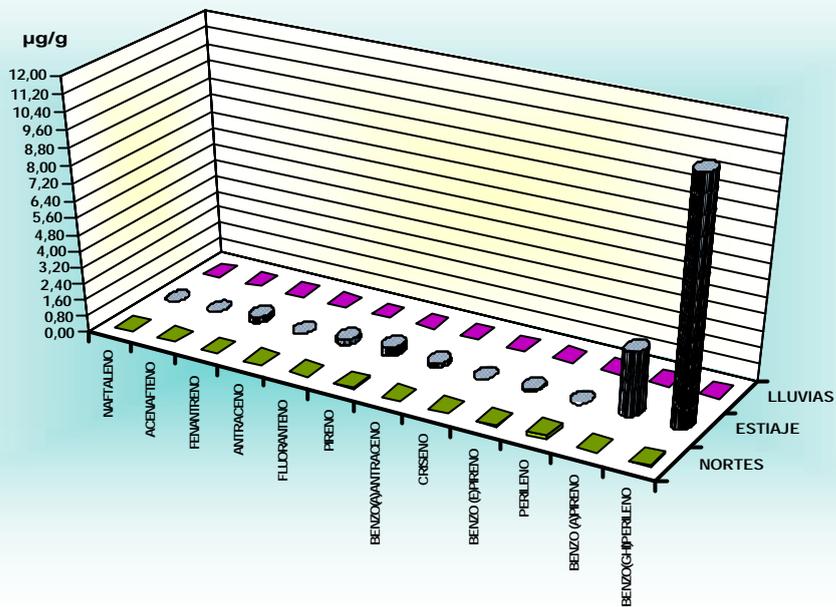
**HIDROCARBUROS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS  
ESTACIÓN 3**



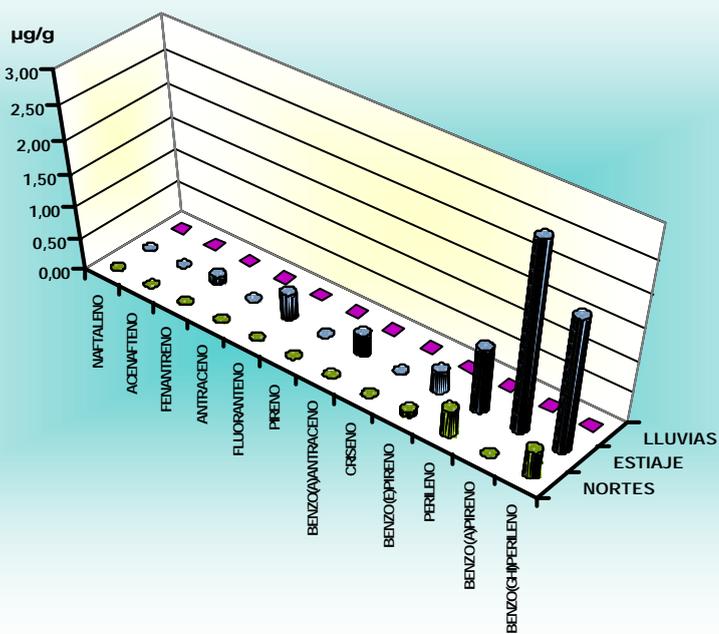
**HIDROCARBUROS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS  
ESTACIÓN 18**



**HIDROCARBUROS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS  
ESTACIÓN 13**



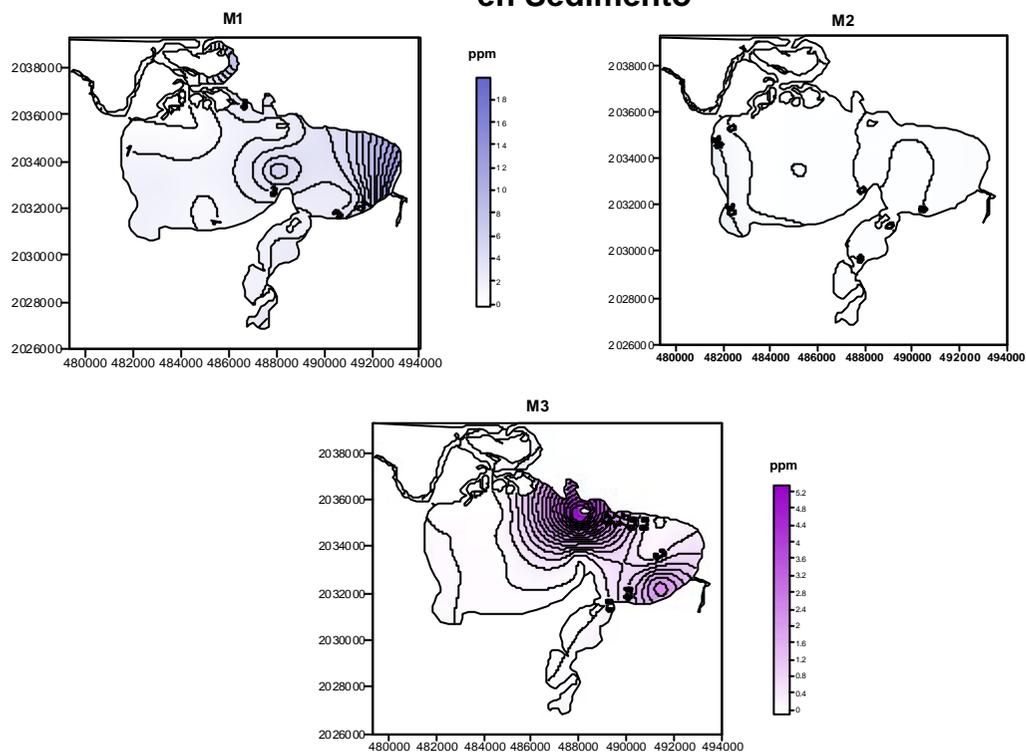
**HIDROCARBUROS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS  
ESTACIÓN 21**



# ANEXO 3. DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE CONTAMINANTES DEL PETRÓLEO EN LA LAGUNA, EN LOS TRES MONITOREOS ESTACIONALES.

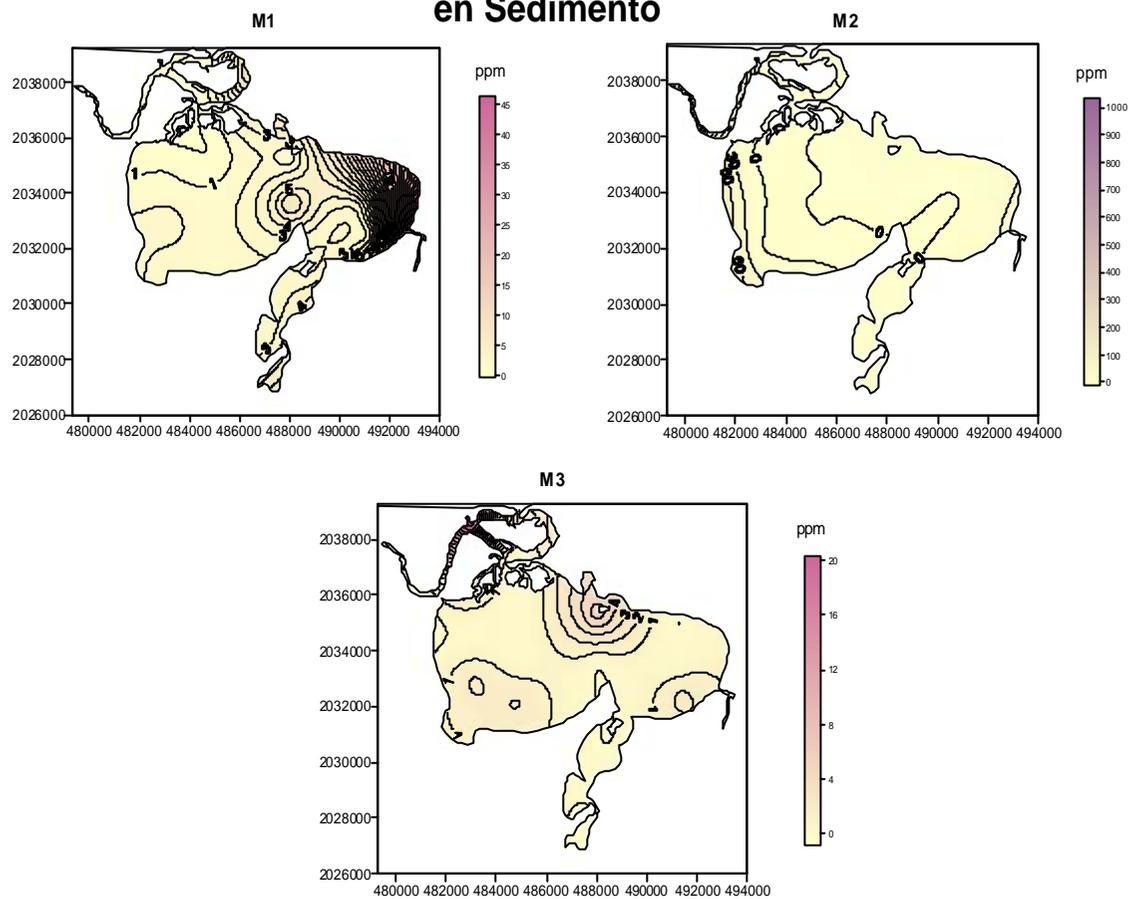
## ANEXO 3.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE HC's EN SEDIMENTO

### Hidrocarburos Alifáticos en Sedimento



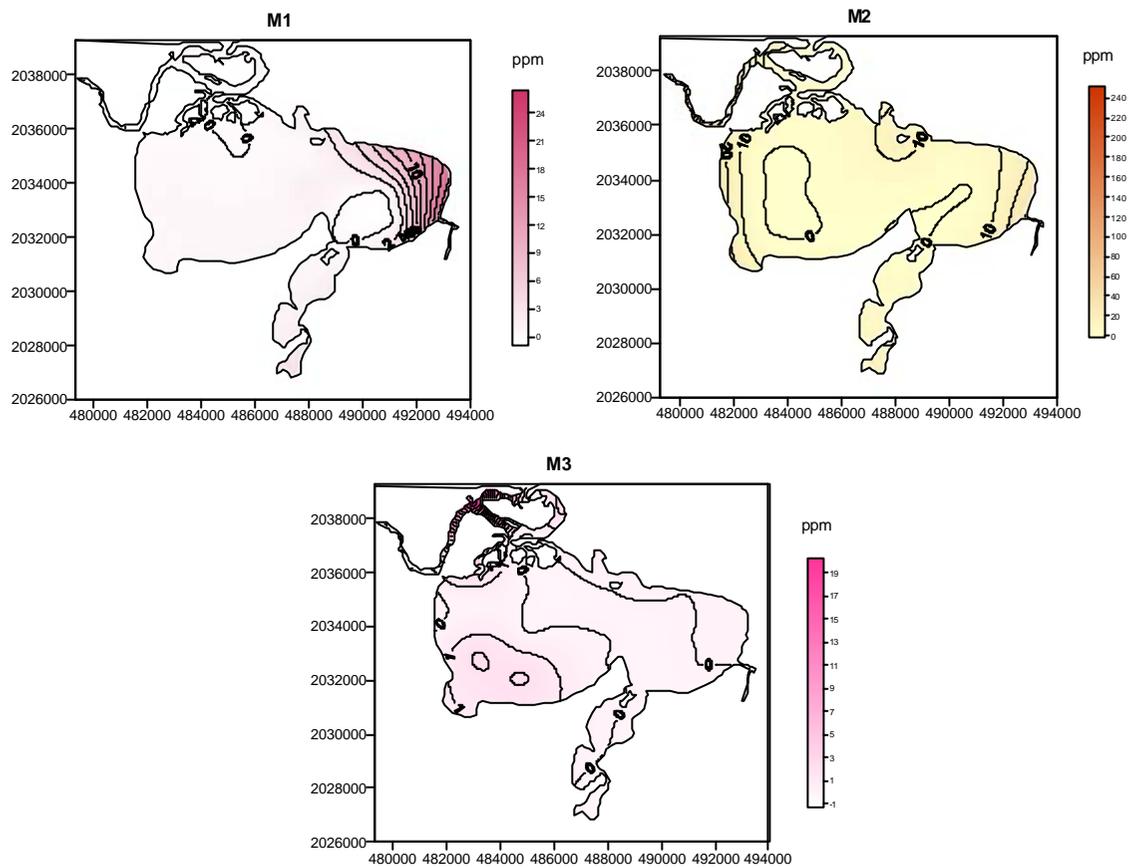
### A.3.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE HTP EN SEDIMENTO

#### Hidrocarburos Totales en Sedimento



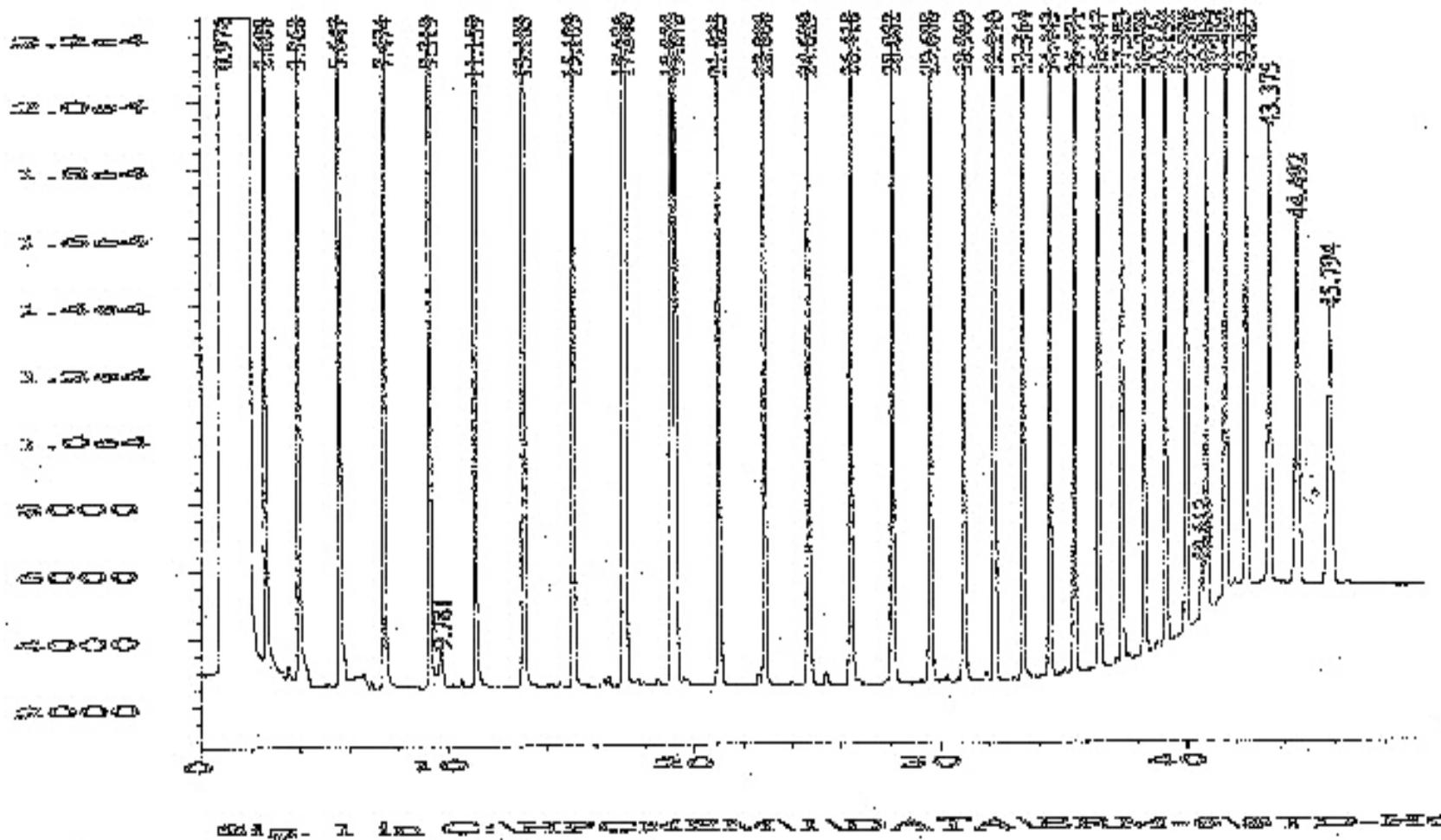
### A.3.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE HPA's EN SEDIMENTO

#### Hidrocarburos Aromáticos en Sedimento

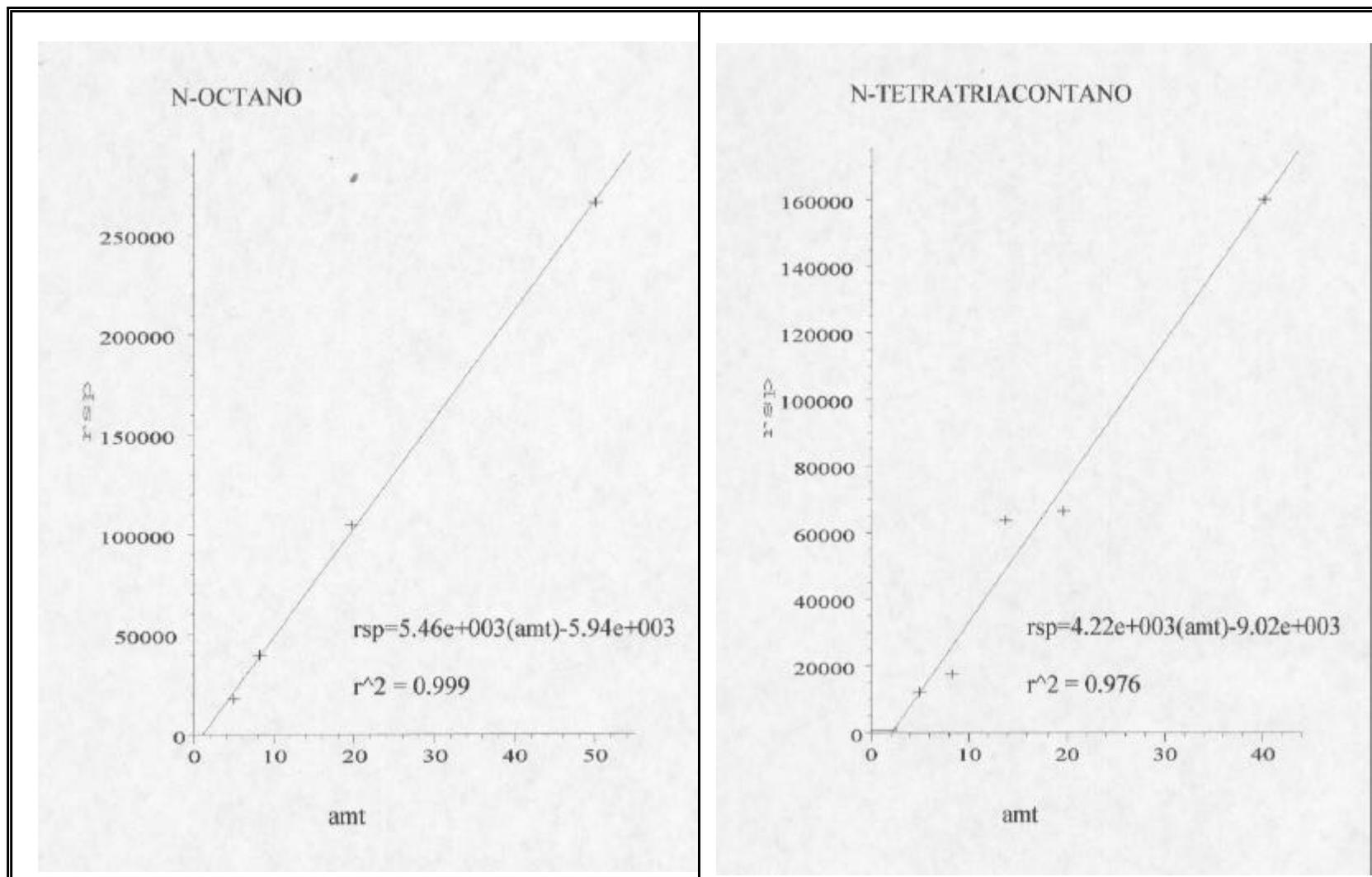


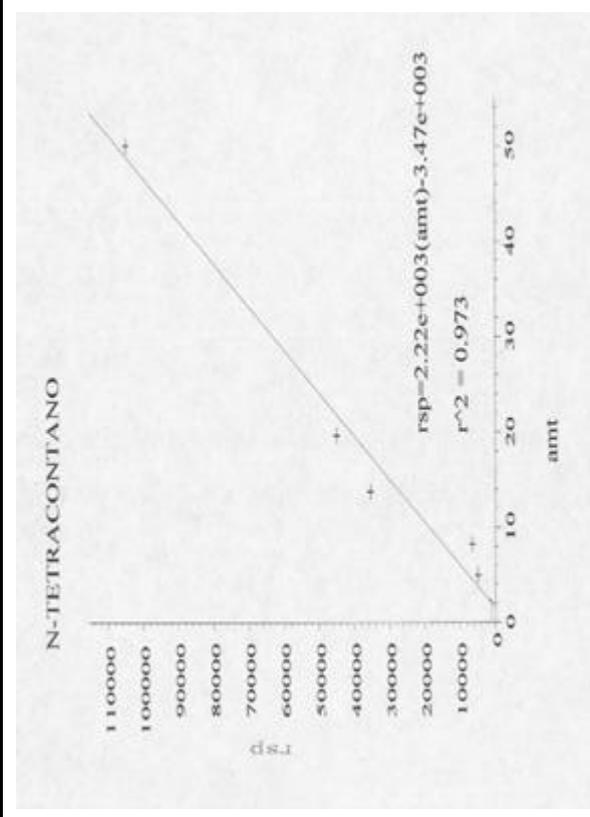
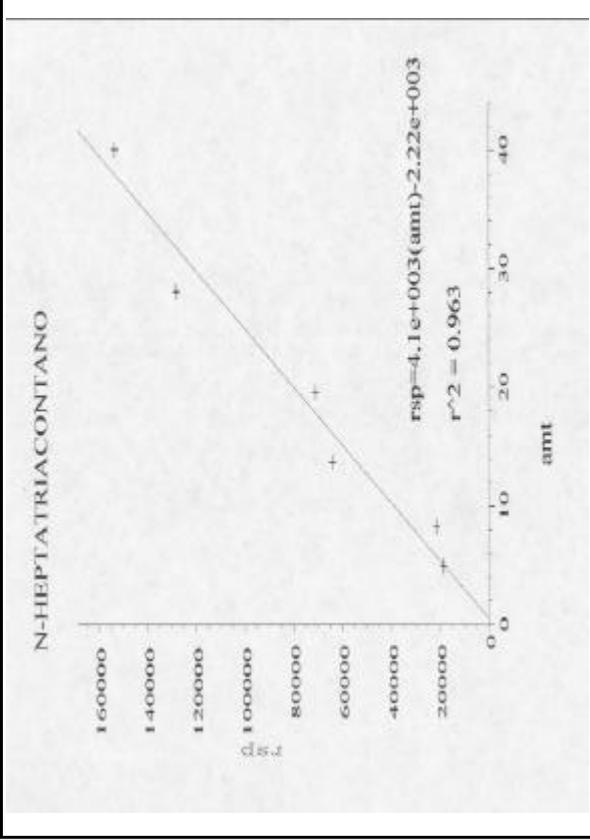
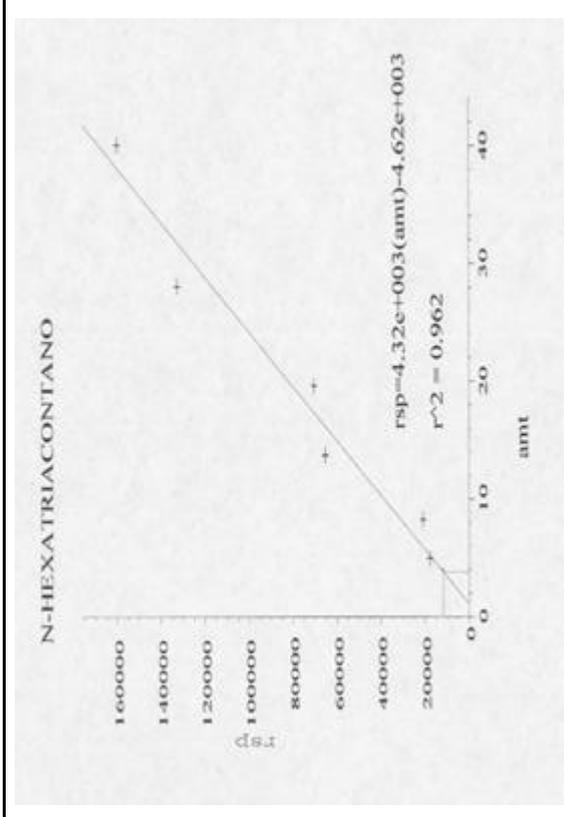
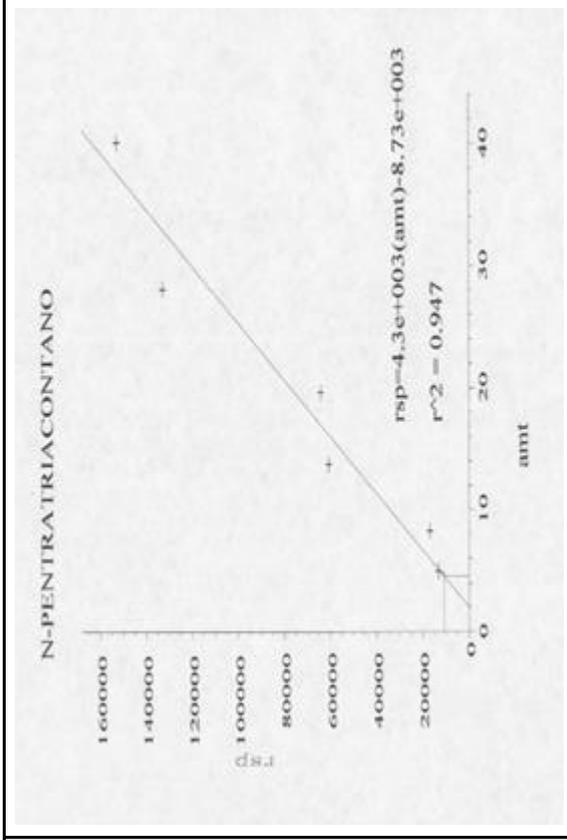
**ANEXO 4. CURVA DE CALIBRACIÓN DEL ANALITO DE  
HIDROCARBUROS DEL PETRÓLEO Y CROMATOGRAMA CARACTERÍSTICO.**

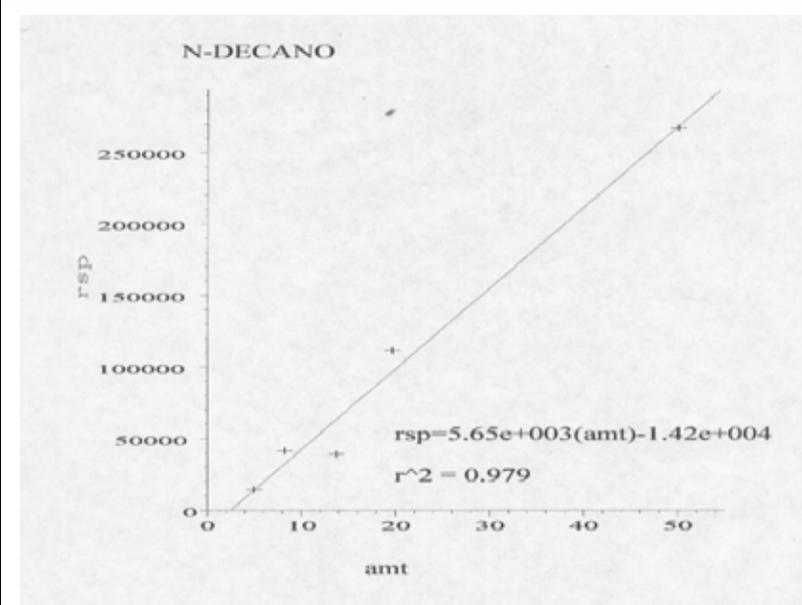
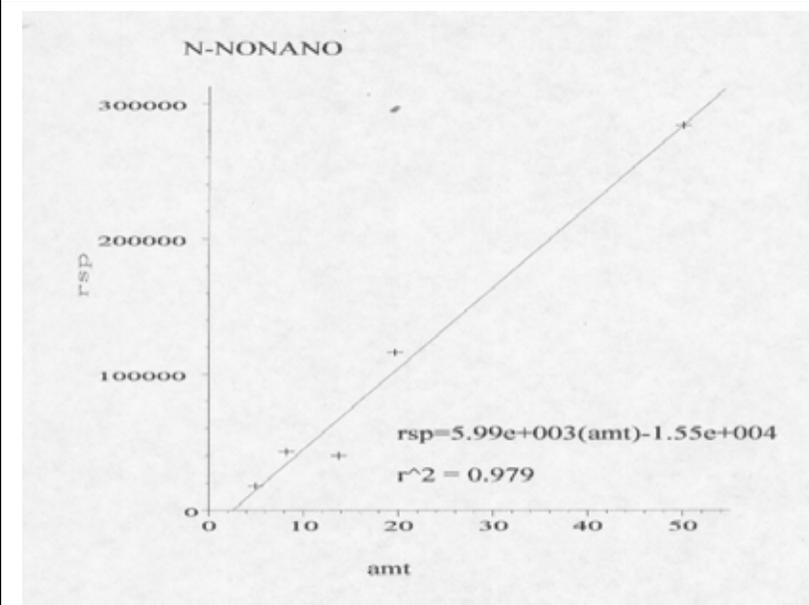
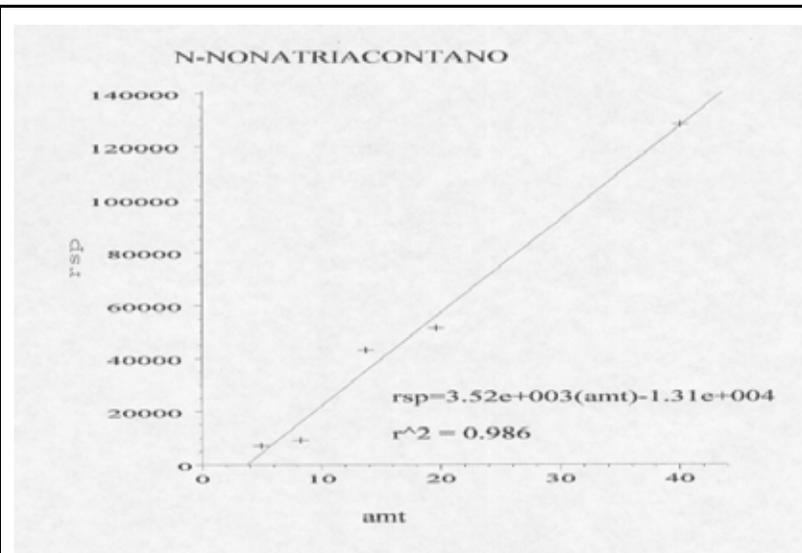
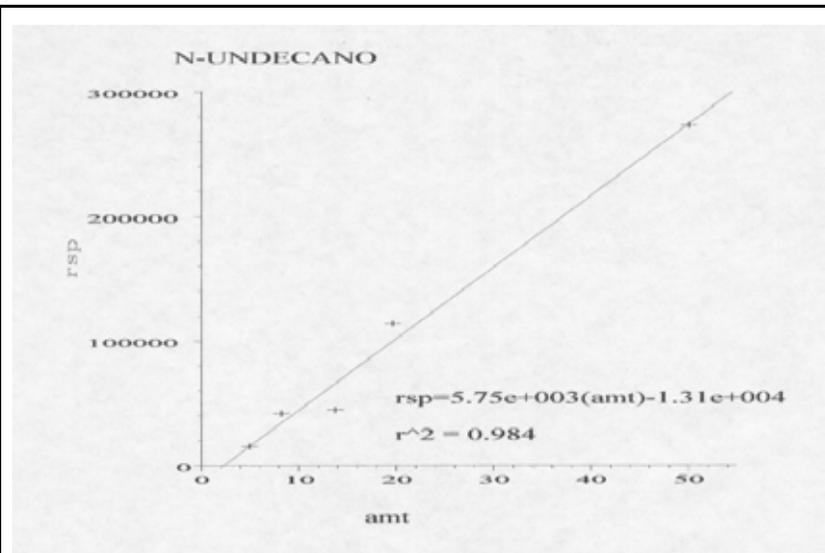
**A.4.1CROMATOGRAMA CARACTERÍSTICO DE LOS 34 HC's A DETERMINAR**

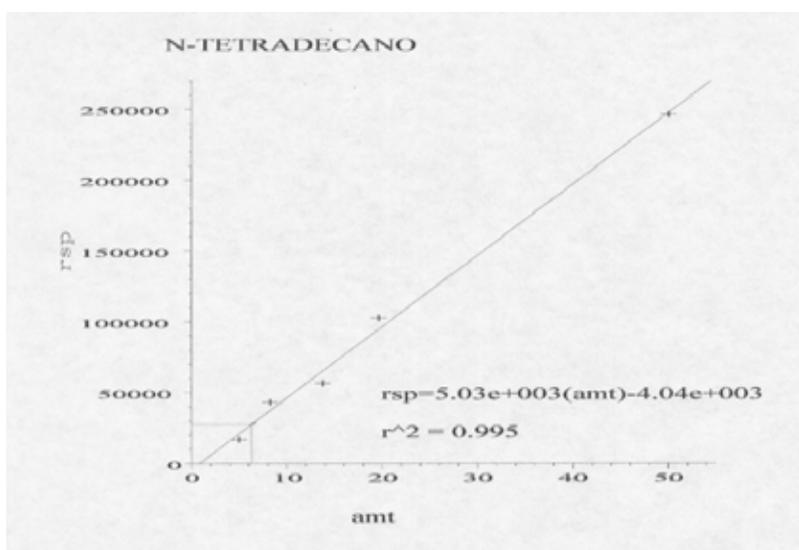
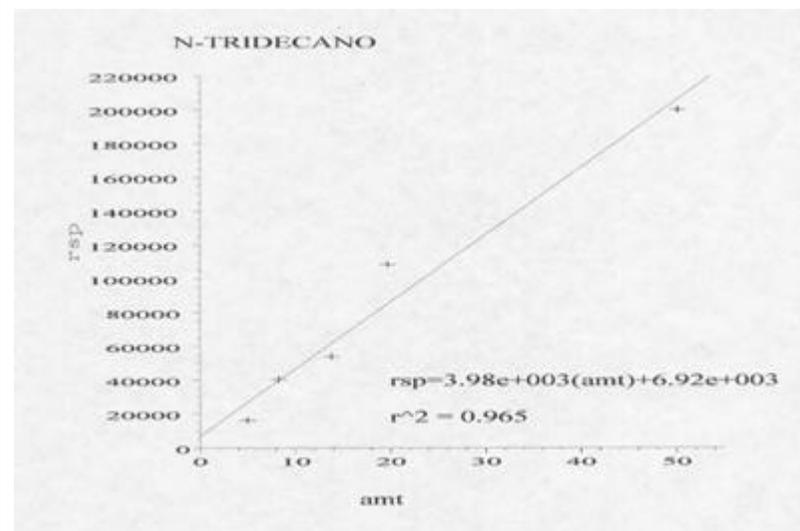
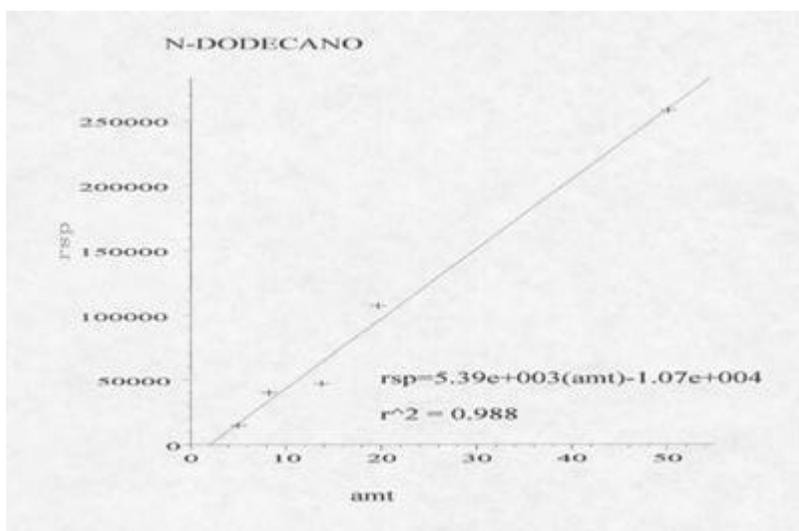


#### A.4.2. CURVA DE CALIBRACIÓN DE COMPUESTOS HC's.

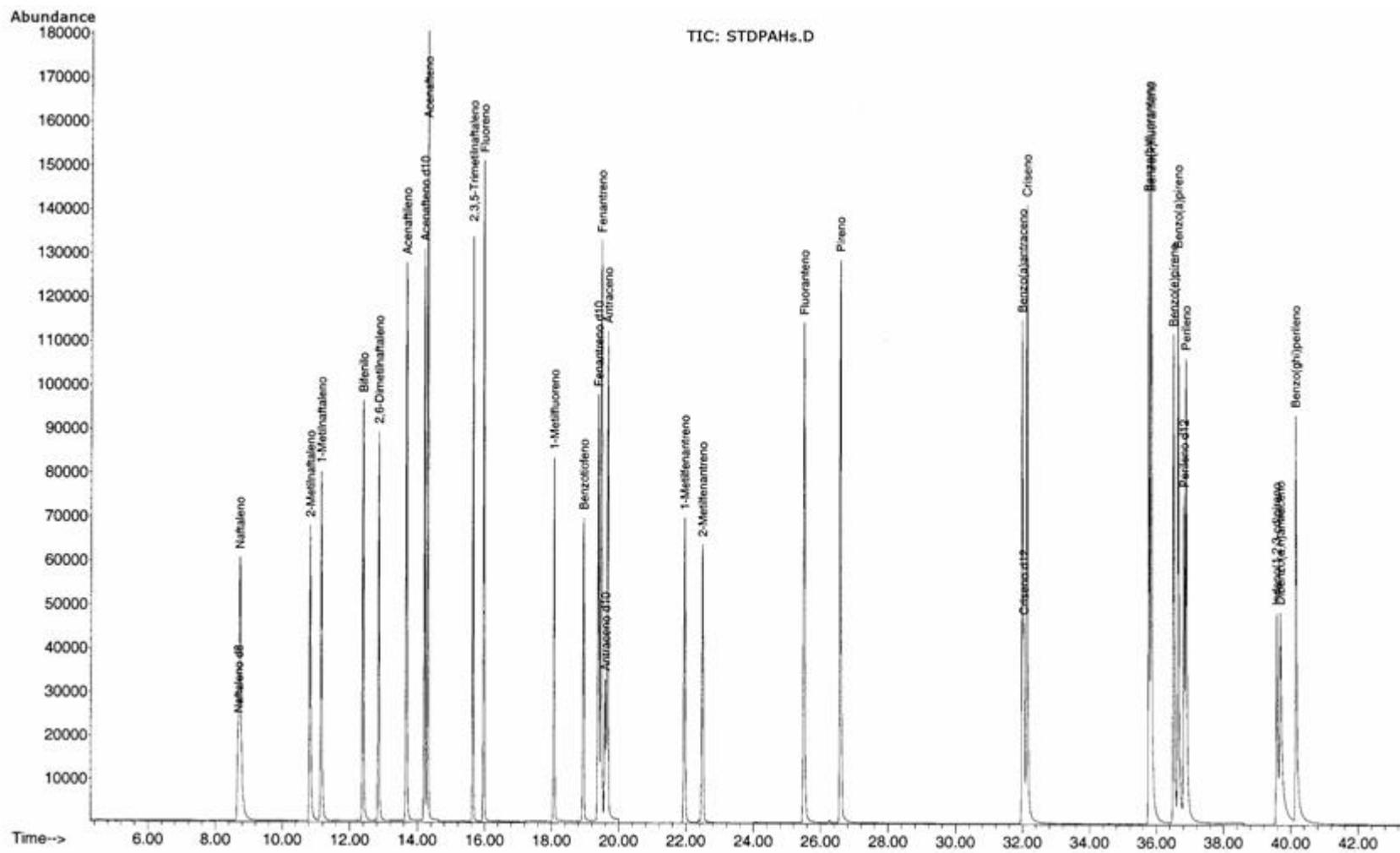




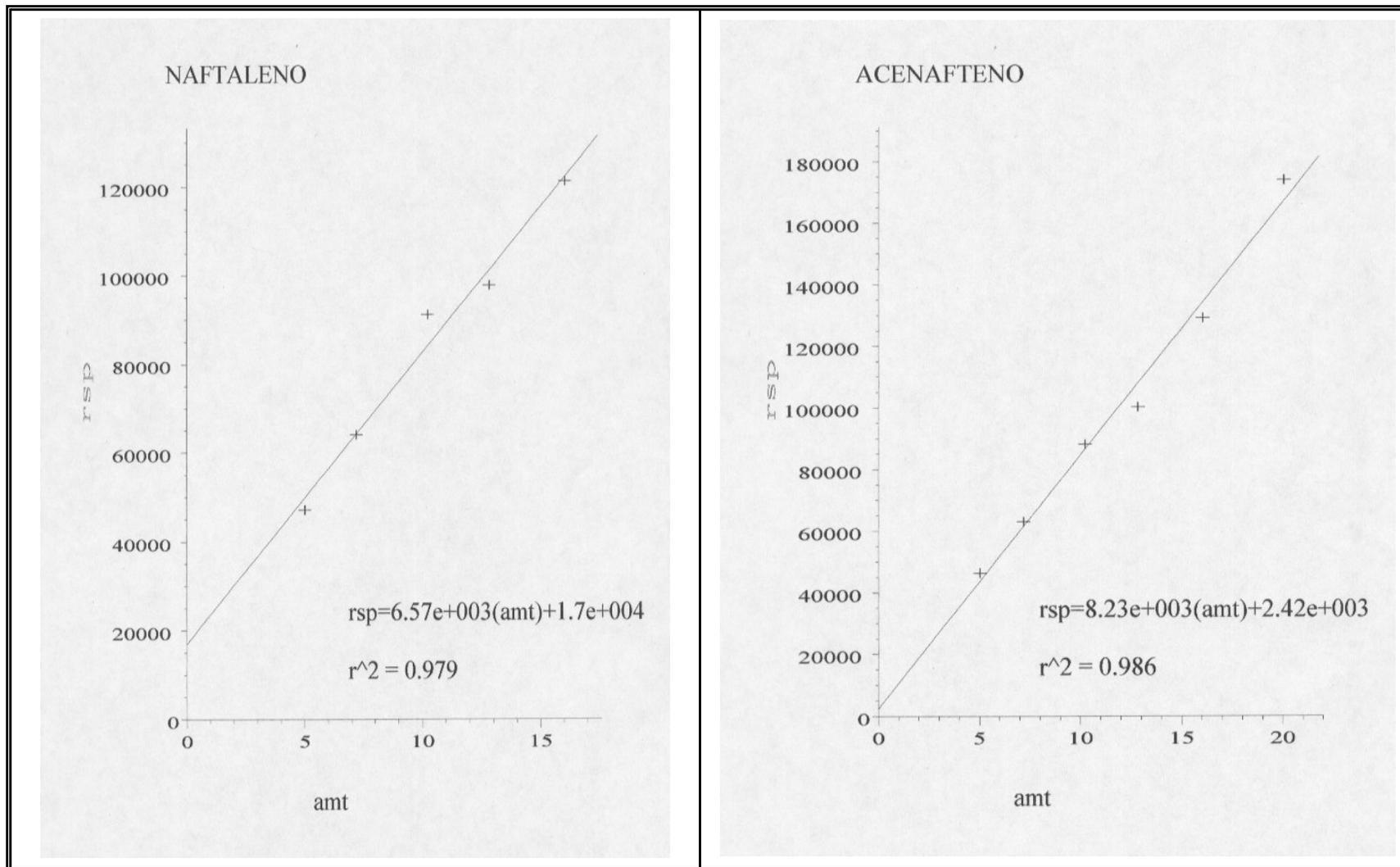


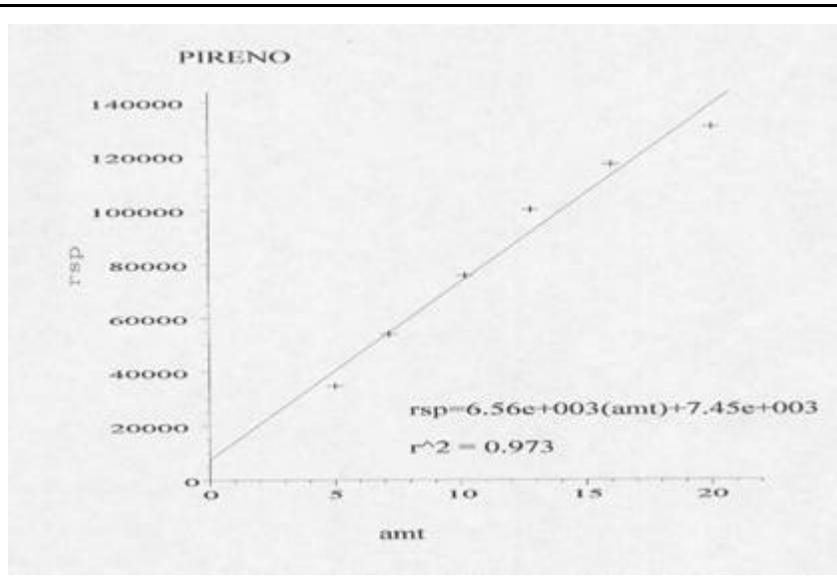
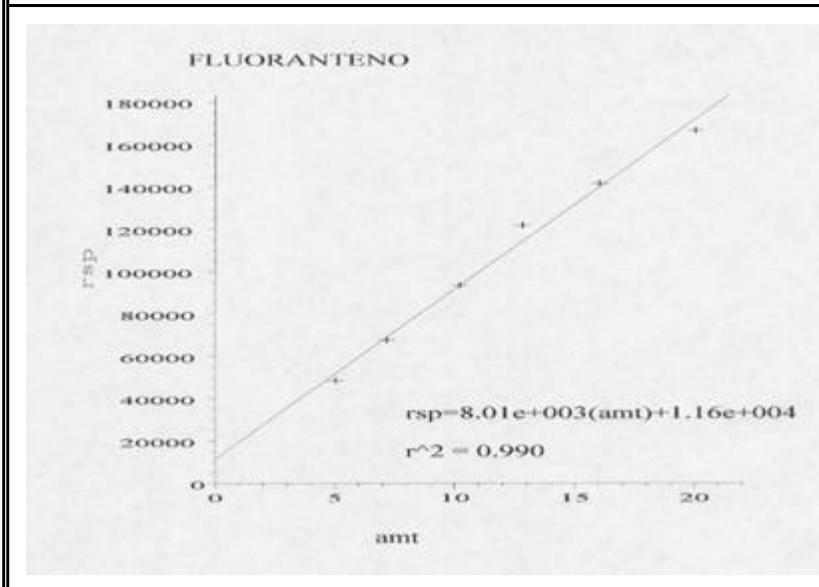
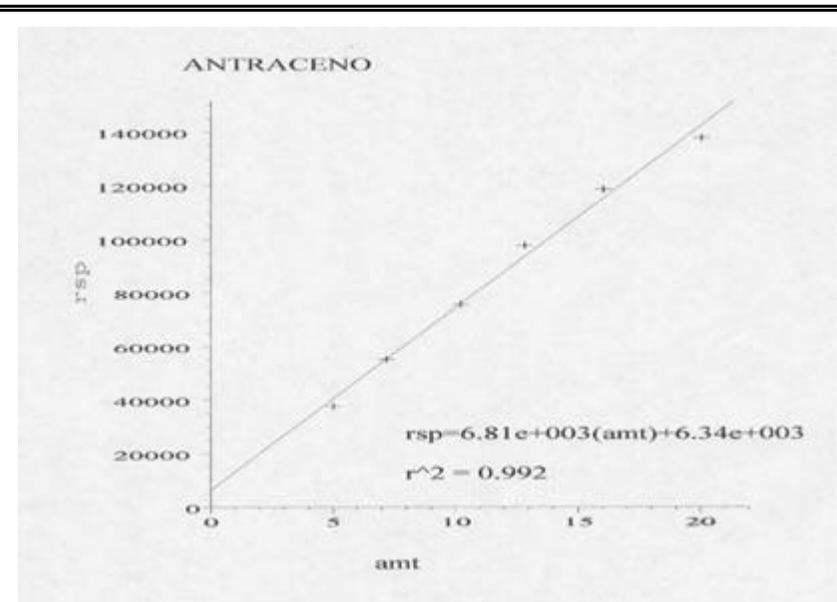
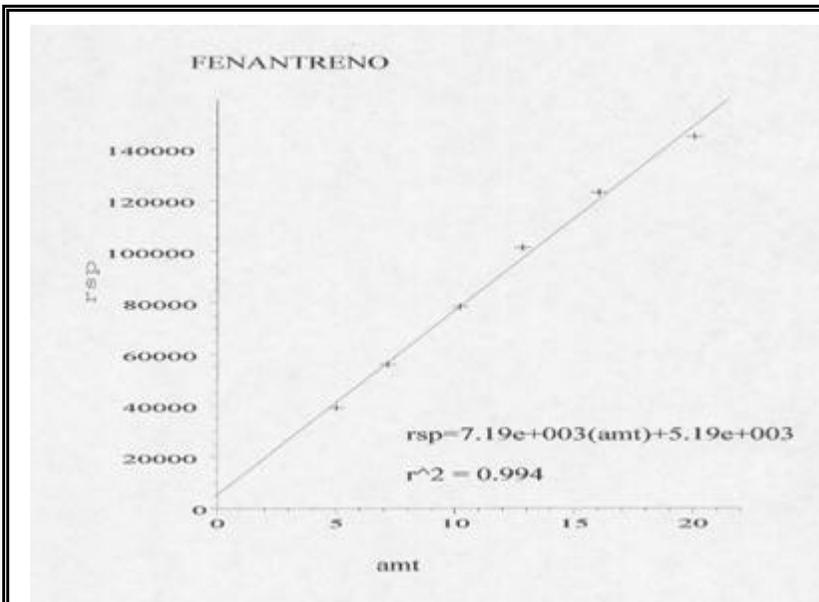


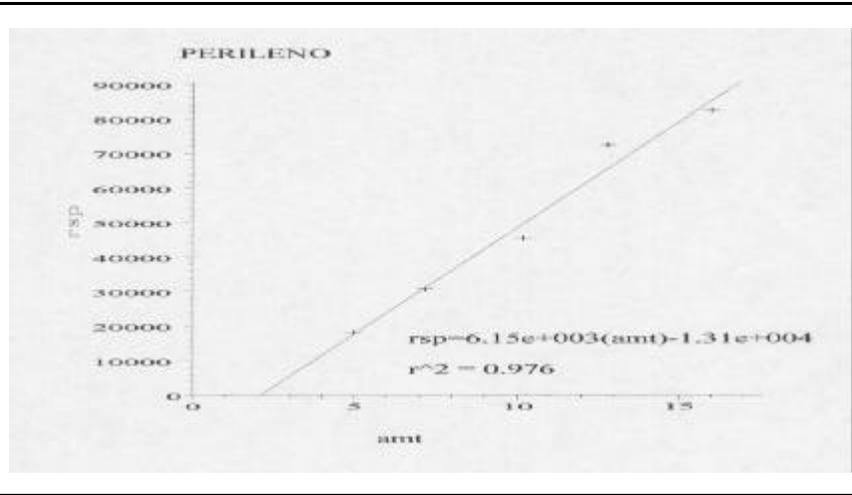
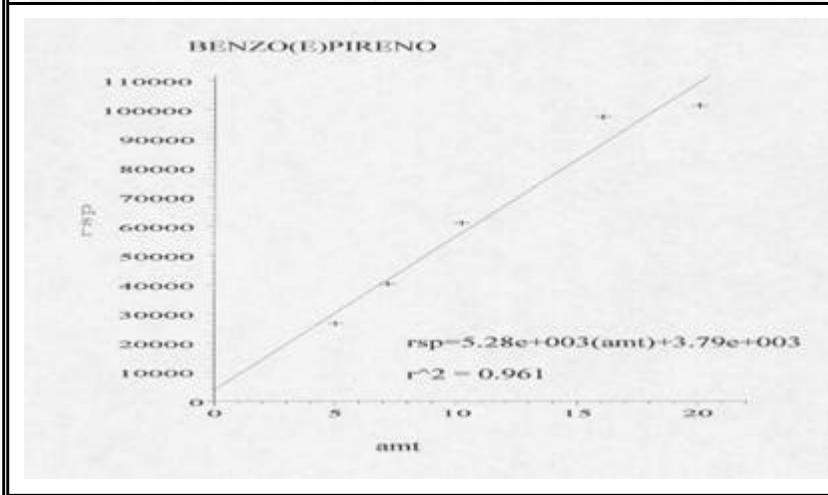
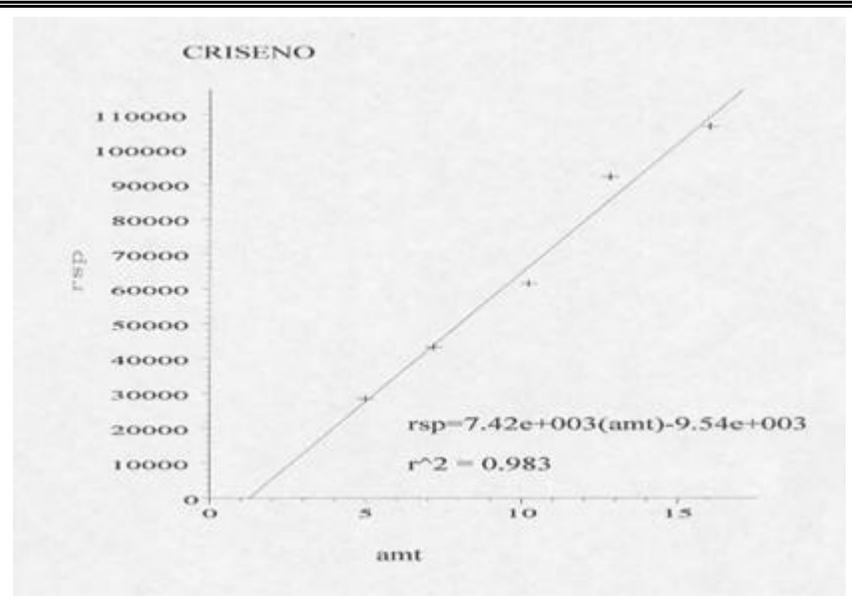
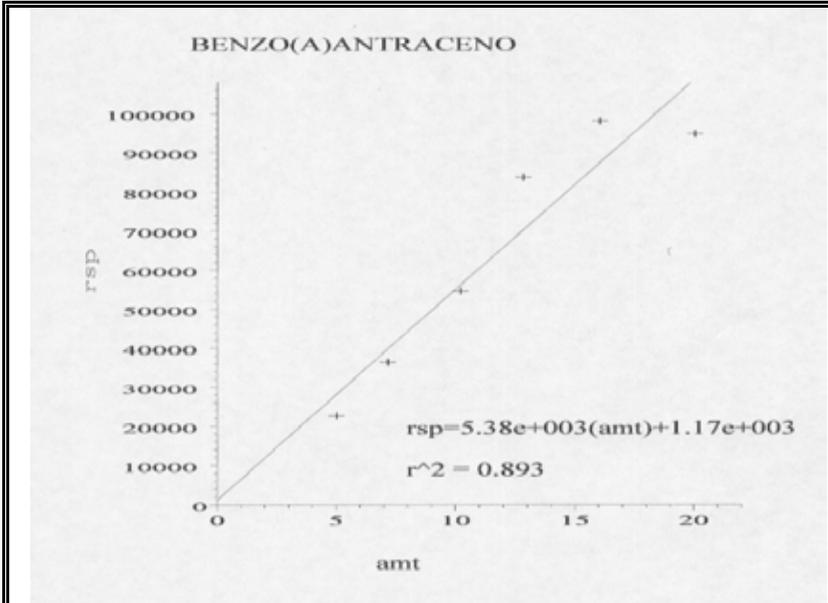
### A.4.3CROMATOGRAMA CARACTERÍSTICO DE 12 HPA's.

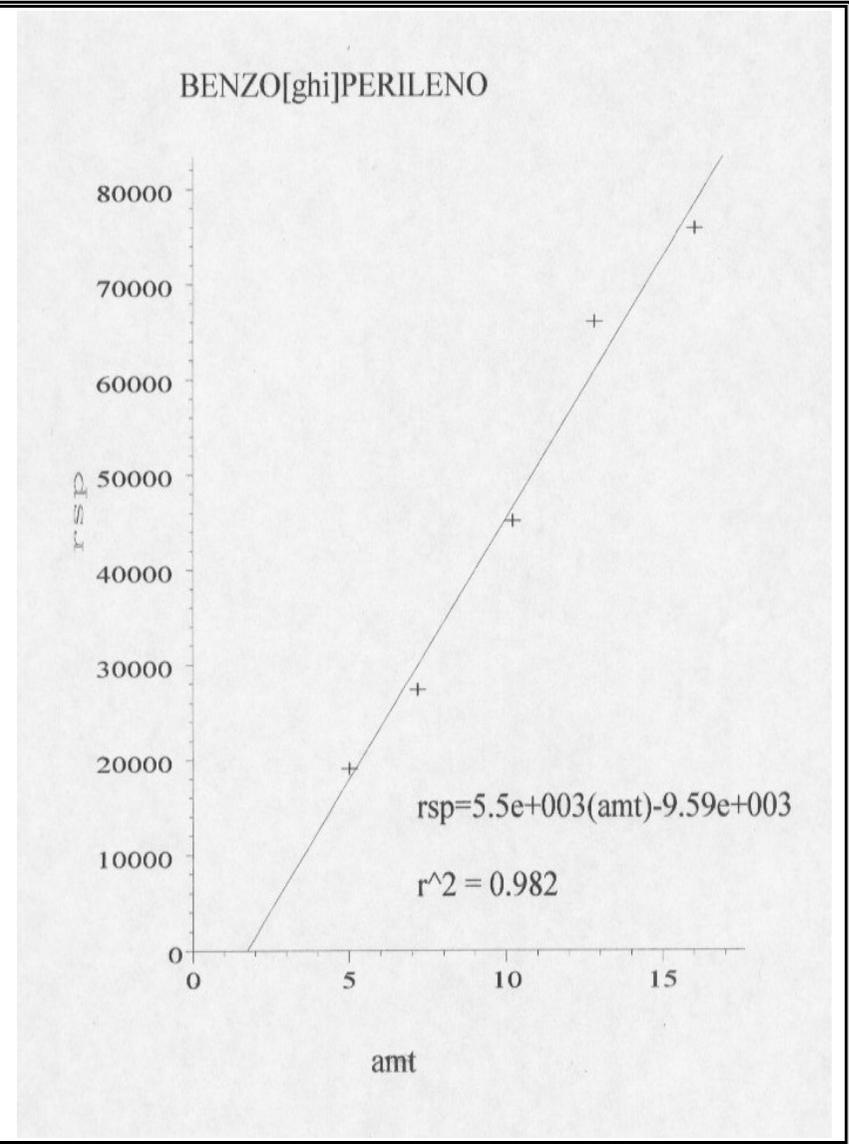
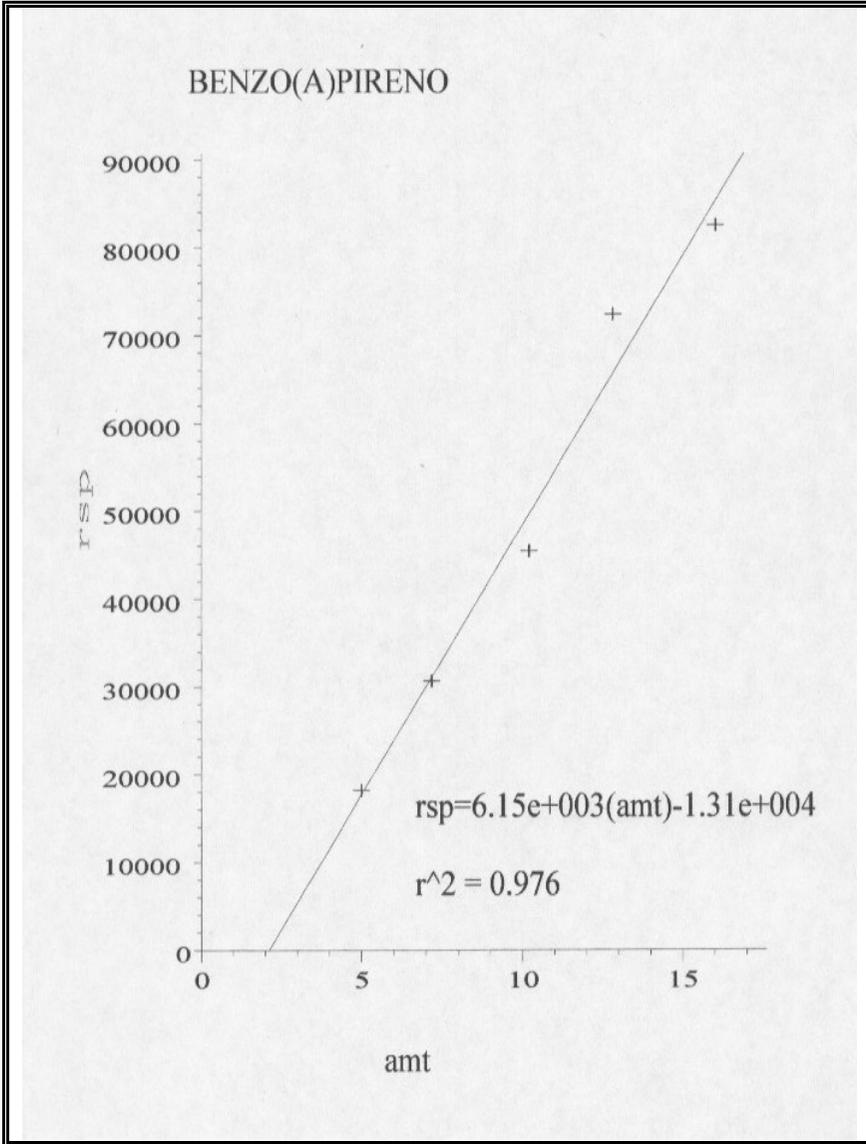


#### A.4.4. CURVA DE CALIBRACIÓN DE COMPUESTOS HPA's.



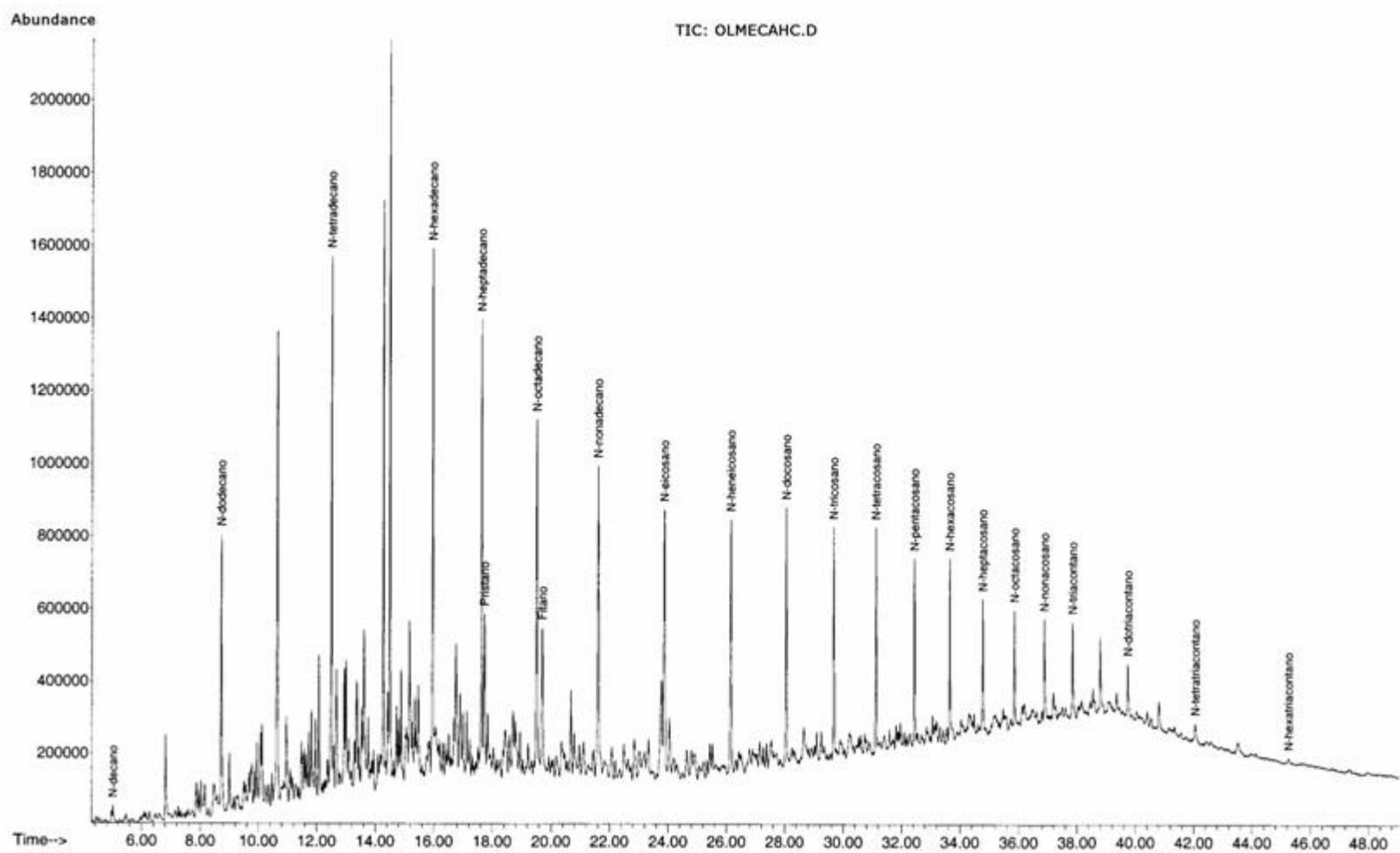




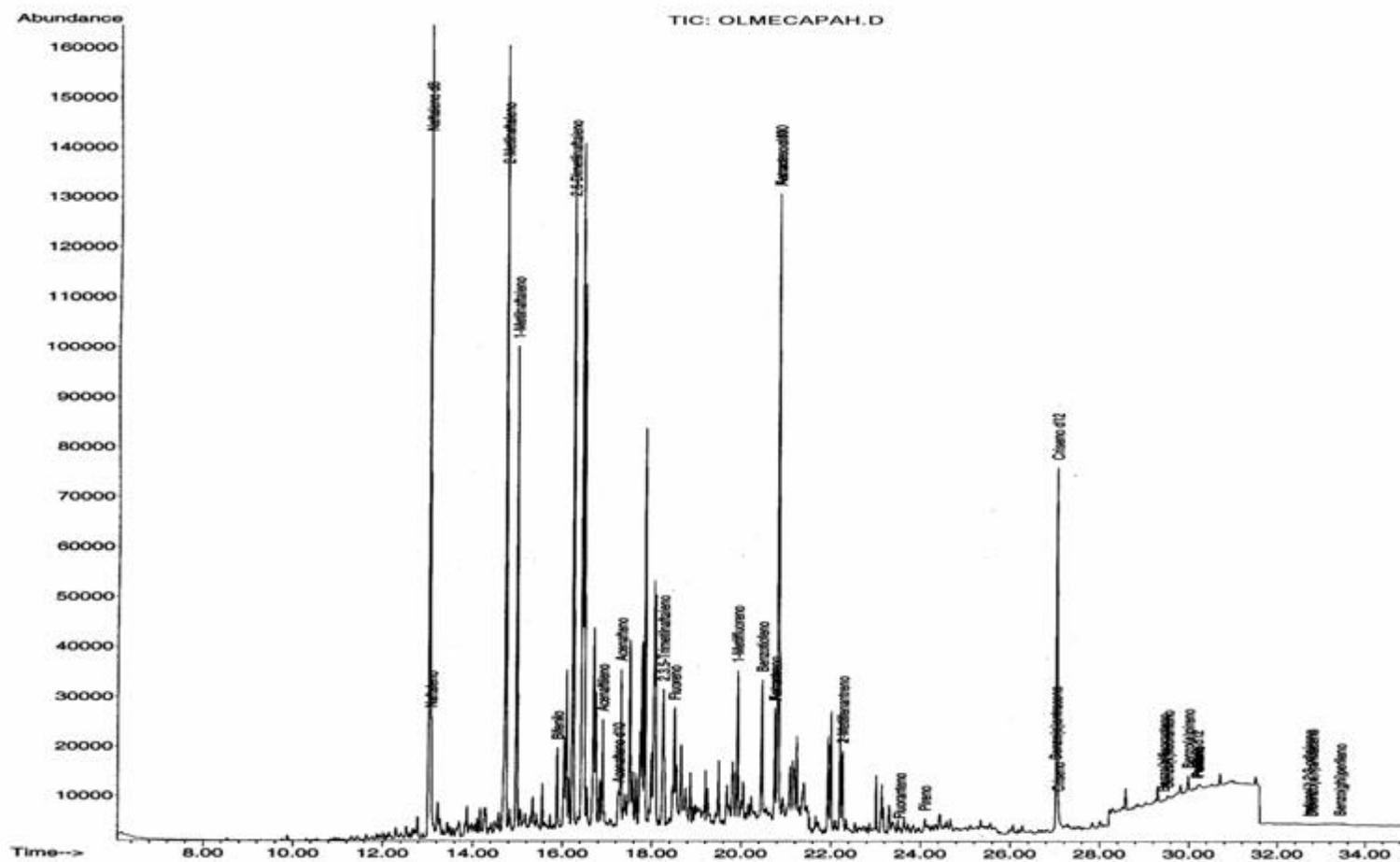


## ANEXO 5. CROMATOGRAMAS CARACTERÍSTICOS DE HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO.

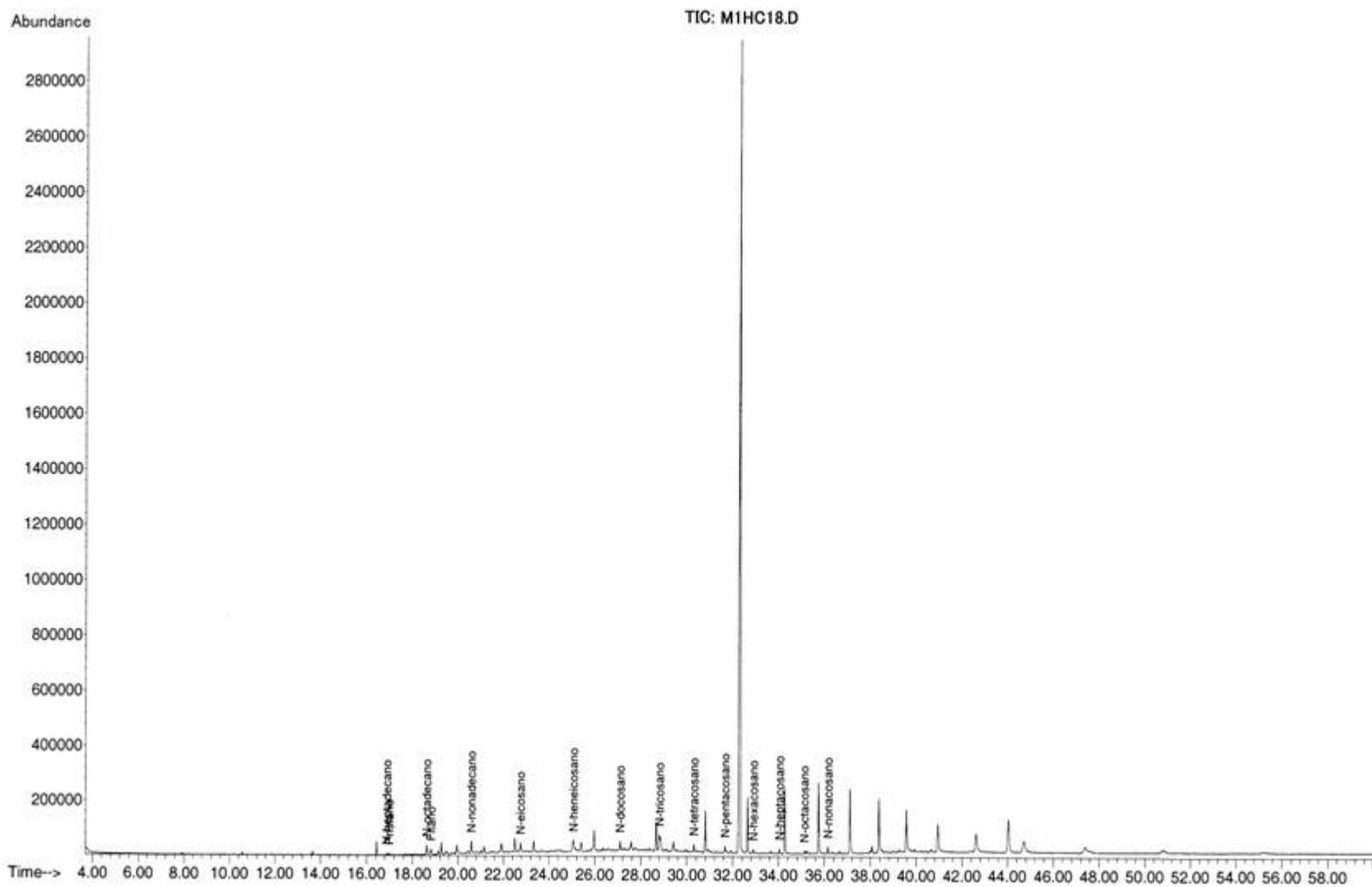
### A.5.1 CROMATOGRAMA CARACTERÍSTICO DE HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS DEL PETRÓLEO.



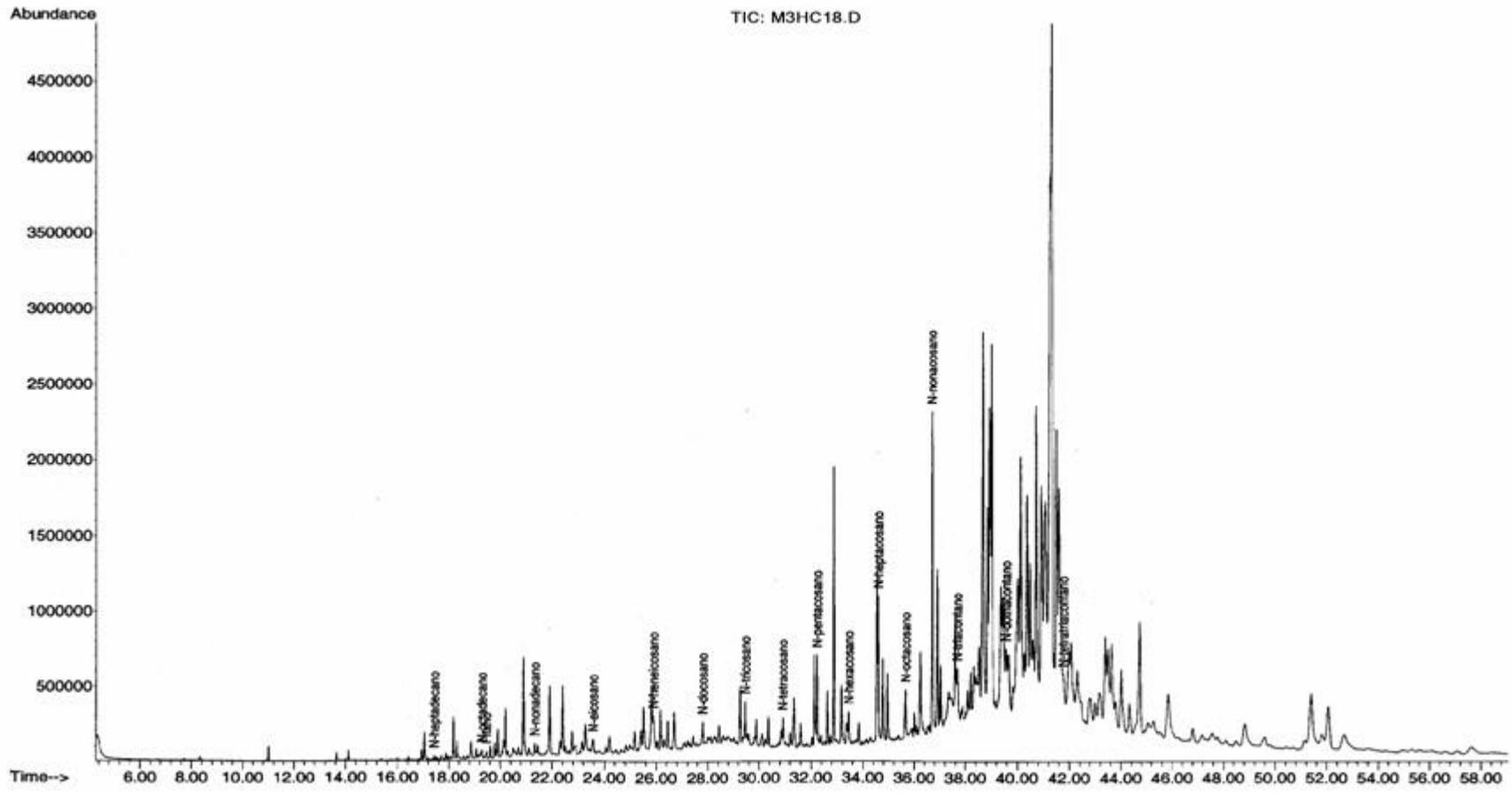
## A-5.2 CROMATOGRAMA CARACTERÍSTICO DE HIDROCARBUROS POLICICLÍCOS AROMÁTICOS DEL PETRÓLEO.



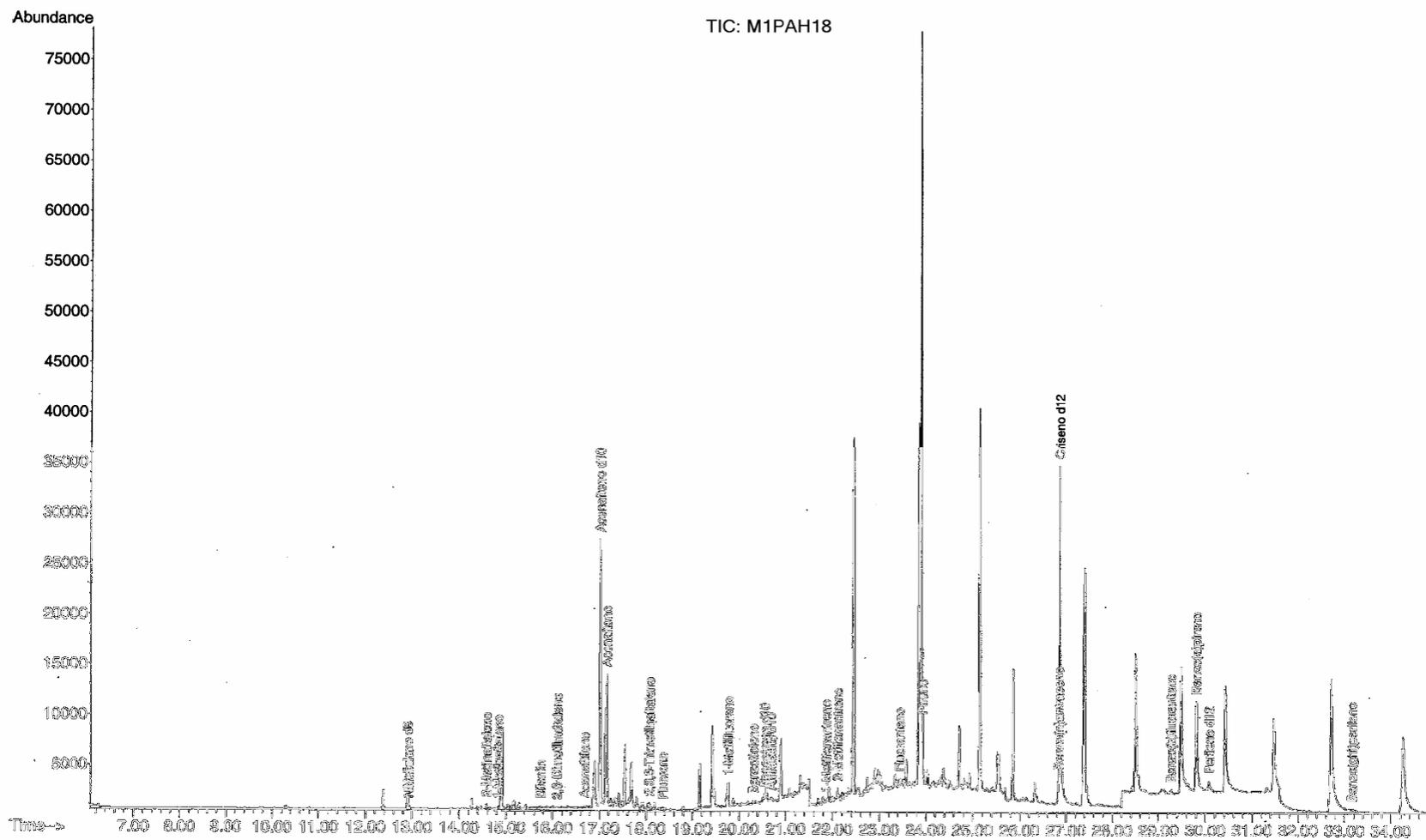
### A.5.3 CROMATÓGRAMAS DE HC'S EN SEDIMENTO SUPERFICIAL DE LA LAGUNA DE MECOACÁN.

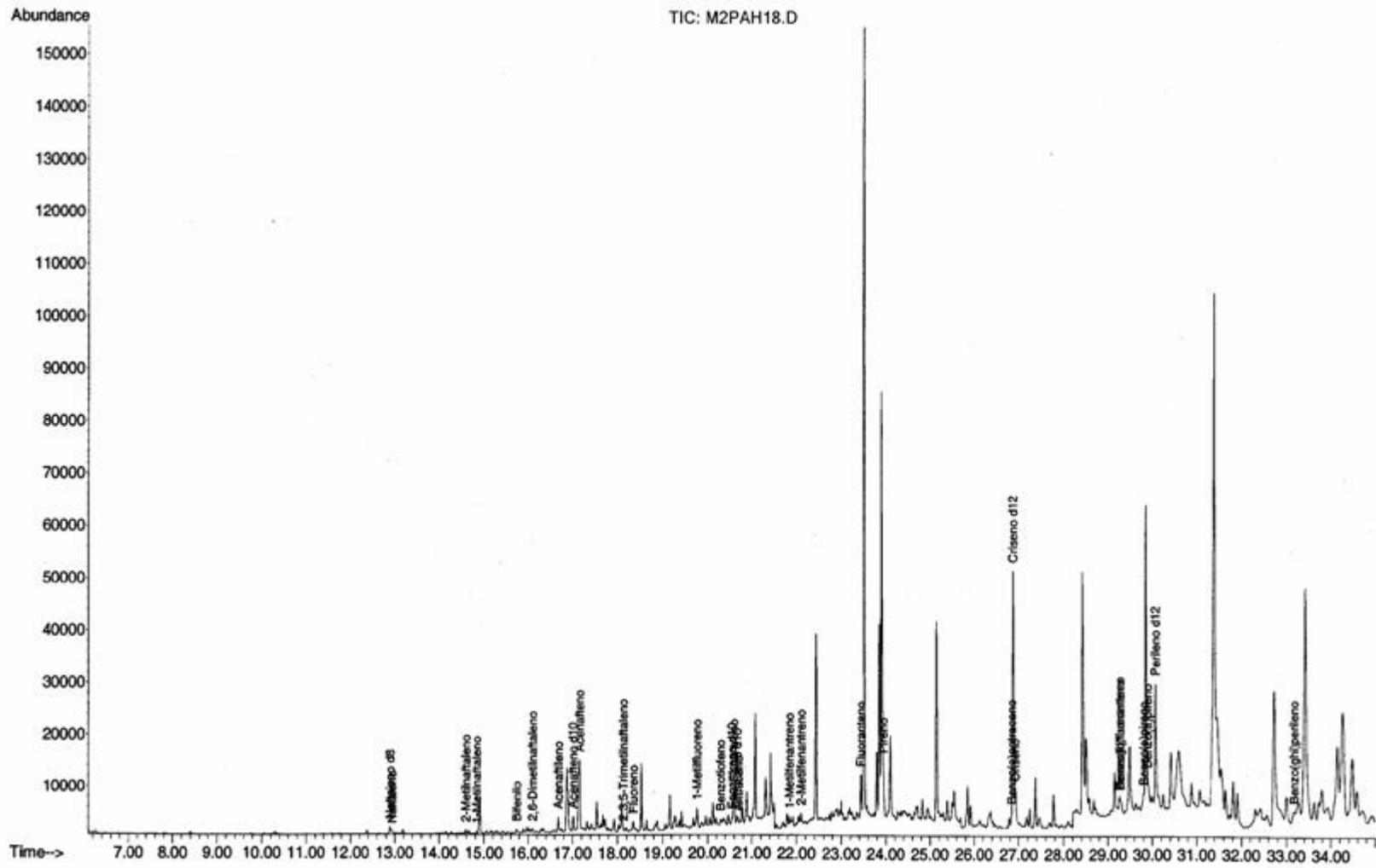


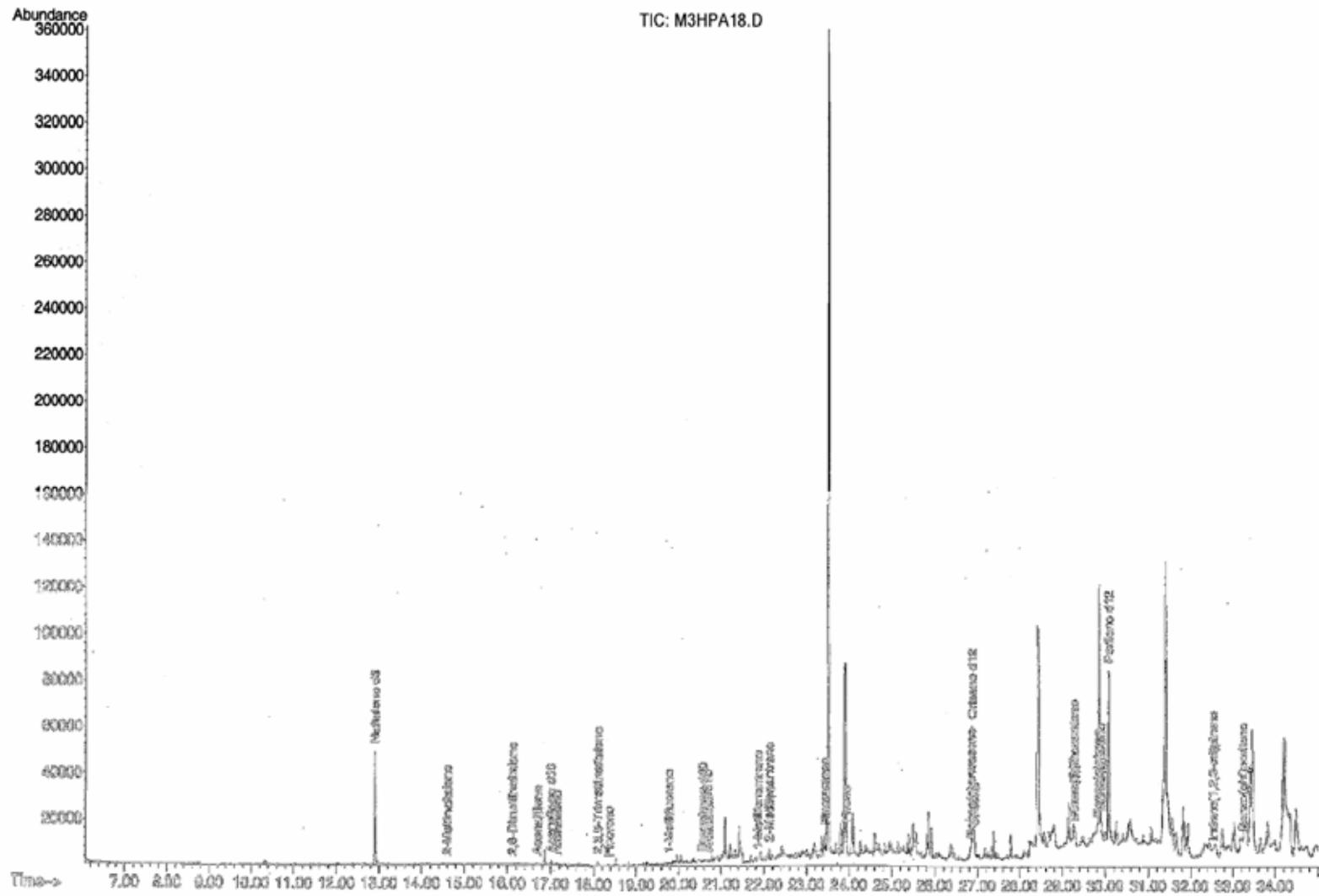




### A.5.4 CROMATÓGRAMAS DE HPA'S EN SEDIMENTO SUPERFICIAL DE LA LAGUNA DE MECOACÁN.







## BIBLIOGRAFÍA

ASTM. D 5369-2002. Standard Practice for Extraction of solid waste samples for Chemical Analysis. Using Soxhlet Extraction.

Bedair, H. M and H. T. Al-Saad. 1992 Dissolved and Particula de Adsorbed Hydrocarbons in water of SAT Al-Arab river, Iraq, Water, Air. Soil Pollution 61:397-408.

BBC mundo. Hidrocarburos en Latinoamérica.

[http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/specials/newsid\\_4562000/4562409.stm](http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/specials/newsid_4562000/4562409.stm)

Benítez, Zárata-Lomelí (Eds). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: diagnostico y tendencias. EPOMEX, Serie Científica V, pp. 666. Universidad Autónoma de Campeche.

Blumer, M. and Sass, J. 1972. Oil pollution: Persistence and degradation of spill fuel oil. Science. 176:1120-1122.

Bohem, P., Requejo, A.G. 1986. Overview of the recent sediment hydrocarbon geochemistry of Atlantic and Gulf Coast outer continental shelf environments. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 23:29-58.

Botello, A.V., Ponce, V. G. y Macko, S. A. 1996. Niveles de concentración de hidrocarburos en el Golfo de México, pp. 225-253. En A.V. Botello, Rojas-Galavis, Benítez, J. A., Zárata-Lomelí (Eds.) Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: Diagnostico y tendencias. EPOMEX, serie científica V. pp. 666. Universidad Autónoma de Campeche.

Botello, A. V., Ponce, V. G., y Díaz, G. 1993. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH's) en áreas costeras del Golfo de México. Hidrobiológica. 3[1-2]:1-15.

Botello, A. V., González, C. y Díaz, G. 1991. Pollution by petroleum hydrocarbons in sediments from continental shelf of Tabasco State, Mexico. Bulletin Environmental Contamination and Toxicology. 47:565-571.

Broman, D., Colmsjo, A., Ganning, B., Naf, C., Zerbuhr, Y. and Ostman, C. 1987. Fingerprinting petroleum hydrocarbons in bottom sediment, plankton and sediment trap collected seston. Marine Pollution Bulletin. 18 [7]:380-388.

Bouloubassi, I. and Saliot, A. 1991. Composition and sources of dissolved and particulate PAH in surface waters from the Rhone Delta (N W Mediterranean). Marine Pollution Bulletin. 22[12]:588-594.

Budzinsky, H., Jones, I., Bellocq, J., Pierard, C. and Garrigues, P. 1997. Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Guironde estuary. Marine Chemistry. 58:85-97.

Carta Geográfica Municipal, 1997. Municipio de Paraíso.

CARIPOL. Manual para el análisis de hidrocarburos del petróleo en sedimentos y organismos marinos. 1986. Subcomisión IOCARIBE/COI. Cartagena, Colombia.

Centro de Ecodesarrollo. 1981. Las Lagunas Costeras de Tabasco: Un ecosistema en peligro. México. ed. Centro de Ecodesarrollo

Clark Jr., R.C., Finley, J.S. 1973. Techniques for analysis of paraffin hydrocarbons and for interpretation of data to assess oil spill effects in aquatic organisms. In: Proceedings of Joint Conference on prevention and Control of Oil Spill. American Petroleum Institute, Washington.

Commendatore, M.G., Esteves, J.L. 2004. Natural and Anthropogenic hydrocarbons in sediments from the Chutub river (Patagonia, Argentina). *Marine Pollution Bulletin*. 18:910-918.

Colombo, J.C. Pelletier, Ch., Brochu, A., Khalil, M., Catoggio, J.A. 1989. Determination of hydrocarbons sources using n-alkanes and polyaromatic hydrocarbons distribution indexes. Case study: River Plata Estuary, Argentina. *Environmental Science and Technology*. 23:888-894.

CONACYT, OEA. El problema crucial de la contaminación. Cap. V, pp.: 87-107.

Chapín, R. G. and L. R. Summerlin. Química. 1988. Publicaciones Cultural, México.

Díaz, G., Botello, A. V. y Ponce, V. 1994. Contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) disueltos en la Laguna de Mecoacán, Tabasco, México. *Hidrobiológica*. 4[1,2]:21-27.

Dunque, R. El petróleo. 1923. Ed. Madrid, ed. 1969.

Espino, G. Lagunas costeras y el litoral Mexicano. 1994. UNAM, Baja California Sur.

Farrington, J. W. Oil in the Sea. 1985. Inputs, fates and effects.. National Academy Press. Washington, D. C.

Gogou, A., Bouloubassi, I. and Stephanou E. G. 2000. Marine Organic Geochemistry of the Eastern Mediterranean: 1. Aliphatic and Polyaromatic hydrocarbons in Cretan Sea Superficial Sediments. *Marine Chemistry*. 68:265-292.

González, S. R. 1986. Estudio Hidrológico y nivel de alteración causado por organoclorados en las lagunas Mecoacán y Carmen-Machona, Tabasco, México. Tesis de Licenciatura, Fac. Ciencias. UNAM.

Informe de Identificación de las capacidades y necesidades de investigación en México en materia de contaminantes orgánicos persistentes. Informe Febrero 2004.

Instituto Mexicano del Petróleo. Acerca del Petróleo. Composición. 2002. <http://www.imp.mx/petroleo/apuntes/composicion.htm>.

Intoxicación por productos industriales. Guía de Salud e Higiene Laboral. <http://www.tratado.uninet.edu/cl008i.html>.

Patton, S. J. and Ringler, W. M. 1981. Ixtoc 1 oil spill: flaking of surface mounds in the Gulf of Mexico.

Kay, H., Patton, L., Latimer, J. S., Pruell, R. J., Pelletier, M., Mickinney, R. and Jayaraman, S. 1999. The Chemistry and Toxicity of sediment affected by oil from the North Cape Spilled in to Rhode Island Sound. *Marine Pollution Bulletin*. 38[4]:314-323.

Lankford, R. R. 1977. Coastal lagoons of Mexico. Their origin and classification. In : estuarine processes. Ed. Wiley, M. Academic Press, New York. pp 182-215.

Lake, J. L., Norwood, C., Dimock, C. and Bowen, R. 1979. Origins of PAH's in estuarine sediments . *Geochemical Cosmochemical. Acta* 43:1847-1854.

Lecaros, O.P., Alberti, P. and Astorga, M.S. 1991. Hidrocarburos parafínicos en aguas del estrecho de Magallanes. *Revista de Biología Marina*. 26 [1]:67-74.

Lizárraga, P., Rodríguez, M. L. y Romero, J. M. 1982. Effects of the Ixtoc-1 blowout on heterotrophic bacteria. *Marine Pollution Bulletin*. 13:67-70.

López, E. S., Maldonado, F., Sanchez, A. M. 1997. Diagnóstico y evaluación del impacto ambiental en comunidades bióticas de los sistemas lagunares costeros: Mecoacán y Carmen-Panojal-Machona. Villa Hermosa, Tabasco, México, 1ª ed.

Menzie, C. A., Potocki, B. B. and Santodonato, J. 1992. Exposure to carcinogenic polycyclic hydrocarbons in the environment. *Environmental Science and Technology*. 26:1278-1289.

Merino, M. The Coastal zone of Mexico. 1987. En *Coastal Management*, 15:27-42.

Michael, J. D. and mannres, A. H. *Handbook of Toxicology*. 2002, 2a ed, pp.: 1414.

Moreno-Casasolas, P. Zonas Costeras. UNAM.  
<http://www.union.org.mx/guia/tesorosdelplaneta/zonascosteras.htm>

Nacci, D. E., Kohaan, M., Pelletier, M. and George, E. 2002. Effects of benzo[a]pyrene exposure on a fish population resistant to the toxic effects of dioxin-like compounds. *Toxicology*. 57:203-215.

National Research Council. 1985. Oil in the Sea. Inputs, fates and effects. National Academy Press. Washington. D. C.

O'Connor, P. T., Jhon, F. P. 2000. Misfit between sediment toxicity and Chemistry. *Marine Pollution Bulletin*. 40:59-64.

Odum, W. E. 1970. Insidious Alternation of the Estuarine Environment. *Trans. Am. Fish. Soc.* 99:836-847.

Padilla, R. M. 1989. Determinación de los niveles de Hidrocarburos en sedimentos recientes del río Calzadas en la región del bajo Río Coatzacoalcos, Veracruz México. Tesis de Licenciatura. Fac. Ciencias. UNAM.

Page, D. S., Boehm, P. D., Douglas, G. S., Bence, A. E., Burns, W. A. and Mankiewicz, P. J. 1999. Pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments record past human activity: A case study in Prince William Sound, Alaska. *Marine Pollution Bulletin*. 38[4]:247-260.

- Pradyot, P. A comprehensive guide to the hazardous properties of chemical substances. 1992.
- PROFEPA. Restauración de suelos contaminados. 1999. Grupo de Trabajo sobre restauración de suelos contaminados. Pág. Web. México.
- Randerath, K., Randerath, E., Zhou, G. D., Supunpong, N., He, L. Y., McDonald, T. J. and Donnelly, K. C. 1999. Environmental and Molecular Mutagenesis. 33:303-312.
- Rodríguez, S. E. Apuntes de Geología del Petróleo. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Departamento de Exploración del Petróleo. UNAM. FID/DICT/85-036.
- Santsch, P. H., Presley, B. J., Wade, T. L., García, R. B. and Baskaran M. 2001. Historical contamination of PAH's, PCBs, DDT's and heavy metals in Mississippi River Delta, Galveston Bay and Tampa Bay sediments cores. Marine Environment Research. 52:51-79.
- Sicre, M.A., Marty, J. C., Salion, A., Aparicio, X., Grimalt, J. and Albaiges, J. 1987. Aliphatic and Aromatic Compounds in aerosols. Atmosphere Environment. 21:2247-2259.
- Soclo, H. H., Garrigues, P. H. and Ewald, M. 2000. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH's) in coastal marine sediments: case studies in cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas. Marine Pollution Bulletin. 40[5]:387-396.
- Swarzenbach, R. Environmental Organic Chemistry. 1993. Jhon Wile and Sons, Inc. pp: 1-291.
- Tait, R. V. 1987. Elementos de ecología marina. Ed. Acribia S. A. 2ª ed., pp.; 16-23.
- Tsvetnenko, Y., Evans, L. 2002. Improved approaches to ecotoxicity testing of petroleum products. Marine Pollution Bulletin. 45:148-156.
- UNESCO, 1976. Guide to operacional procedures for the IGOSS pilot projet on marine pollution (petroleum). Monitoring Manual and guides N°7.
- Vázquez, G. F. 2001. Informe del análisis de la macrocuenca y microcuenca en la laguna de Mecoacán, Tabasco, 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-Panojal-La Machona: su hidrodinámica, la estabilidad de sus bocas y de su línea de costa. Ed. UNAM, México.
- Vives, I. and Grimalt, O. J. 2002. Method for integrated analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine compounds in fish liver. Journal of Chromatography B. 768:247-254.
- Wakeham, S. G., Schaffener, C. and Giger, W. 1981. Diagenic polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments: Advances in Organic Geochemistry. 353-363.
- Zhendi, W. and Fingas, M. F. 2003. Development of oil hydrocarbons finger printing and identification techniques. Marine Pollution Bulletin. 47:423-452.