



**Determinación de hidrocarburos
aromáticos policíclicos en sedimentos y
organismos de la laguna de
Tampamachoco y una porción estuarina
del río Tuxpan, Ver.**

T E S I S

**Que para obtener el grado académico de Maestra en
Ciencias (Química Acuática)**

p r e s e n t a

ISABEL TORRES SÁNCHEZ

Director de tesis: DR. ALFONSO VÁZQUEZ BOTELLO

Comité tutorial: DR. FERNANDO GONZÁLEZ FARÍAS

DR. GILBERTO DÍAZ GONZÁLEZ

DRA. CHRISTINA SIEBE GRABACH

DRA. SILKE CRAM HEYDRICH

México, D. F., 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Un gran agradecimiento al Dr. Alfonso Vázquez Botello por la dirección de esta tesis, por todo el apoyo brindado y todas las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo de investigación en el laboratorio de Contaminación Marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, del cual es responsable.

Al Dr. Fernando González y al Dr. Gilberto Díaz por formar parte de mi comité tutorial y por todos sus comentarios y observaciones que contribuyeron para la realización de este trabajo.

De igual manera agradezco a la Dra. Christina Siebe y a la Dra. Silke Cram por formar parte de mi comité tutorial ampliado y por todas las aportaciones y sugerencias que ayudaron a mejorar y enriquecer esta tesis.

Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, a sus autoridades y a su personal por la gran oportunidad de realizar mis estudios de maestría y por todo el apoyo y las facilidades otorgadas durante la realización de dichos estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante toda la realización de mis estudios de maestría.

A las Maestras Guadalupe Ponce y Adriana Montes por todas sus enseñanzas y consejos durante el procesamiento y análisis de las muestras de sedimentos y organismos utilizadas para la elaboración de esta tesis, así como también, a todas las personas que estuvieron involucradas en el proyecto “Diagnóstico ambiental de la laguna de Tampamachoco y posibles efectos por la operación de la central termoeléctrica presidente Adolfo López Mateos en la zona de influencia” del cual se desprende esta tesis.

Un enorme agradecimiento a Rafael Bazán por su valiosa ayuda en la recopilación de la información del área de estudio y por su consejo en el manejo y análisis de los datos obtenidos en esta tesis. Mil gracias.

DEDICATORIA

A mis padres Francisco y Teresa por su paciencia, su confianza y por el apoyo incondicional que me han brindado siempre.

A mis hermanos Francisco y Guillermo por su cariño y porque siempre han estado conmigo.

A toda mi familia por que siempre han sido una parte importante en mi vida.

A Rafael por su apoyo infinito en esta etapa de mi vida.

A todos ellos todo mi cariño y gratitud.

RESUMEN

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) poseen propiedades carcinogénicas y mutagénicas, el incremento de dichas sustancias químicas en el ambiente es debido principalmente a la quema de combustibles fósiles y material orgánico. En el presente estudio se analizaron las concentraciones actuales de HAPs en sedimentos y organismos (peces y ostiones) en seis estaciones ubicadas en la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, al norte del estado de Veracruz durante la época de secas (marzo) y la de lluvias (agosto) en el 2009. Para esto fueron analizados 16 HAPs prioritarios por cromatografía de gases-FID. Durante la época de secas la concentración promedio en sedimentos fue de $0.86 \pm 0.39 \mu\text{g/g}$ con concentraciones de 0.05 a $3.08 \mu\text{g/g}$ y durante la época de lluvias la concentración promedio fue de $1.14 \pm 0.45 \mu\text{g/g}$ con concentraciones de $0.18 \mu\text{g/g}$ a $3.67 \mu\text{g/g}$. En marzo se encontraron 9 compuestos y en agosto se detectaron 14 compuestos. La frecuencia de los compuestos detectados en marzo fue de 21 (19%) y de los compuestos no detectados fue de 91 (81%) es decir, que la mayoría de los compuestos se encontraron por debajo del límite de detección de $0.01 \mu\text{g/g}$ y durante agosto la frecuencia de los compuestos detectados fue de 58 (52%) y de los compuestos no detectados fue de 54 (48%) a diferencia del mes de marzo la mayoría de los compuestos están por encima del límite de detección. Durante las dos colectas, el criseno presentó las concentraciones totales más altas, seguido por el benzo(a)antraceno y el dibenzo(ah)antraceno y de acuerdo al número de anillos bencénicos de los HAPs se observó una dominancia de los compuestos de 4>6>5>3>2 anillos en ambas colectas. De acuerdo con los análisis estadísticos realizados se observó que el criseno presentó un promedio y distribución de valores diferentes al resto de los compuestos, originado por un valor individual extremo. Las cuantificaciones desarrolladas mostraron que la mayor concentración total de HAPs se presentó en dos estaciones ubicadas en el cauce del río Tuxpan (estaciones 6 y 7) que además presentan la mayor variación entre la temporada de secas y la de lluvias. De acuerdo al número de anillos de los compuestos detectados y con base en los índices moleculares calculados, se observó que las fuentes pirolíticas fueron las dominantes, sin embargo, también se detectaron fuentes petrogénicas, por lo tanto, se consideró un origen mixto con predominancia de fuentes pirolíticas en los sedimentos analizados.

La mayoría de las concentraciones totales de HAPs encontrados en sedimentos estuvo por debajo de la concentración umbral (TEL=1.68) para provocar efectos adversos a la comunidad bentónica y salud humana, excepto las estaciones ubicadas en el río Tuxpan (estación 6 con 3.1 y la 7 con $3.7 \mu\text{g/g}$) durante marzo y agosto respectivamente. También se cuantificó la cantidad de carbono orgánico y tamaño de partícula y se observó que no existe relación entre dichos parámetros y la concentración de HAPs en cada estación. Para los HAPs cuantificados en tejidos de organismos acuáticos se observó que durante los muestreos de marzo y agosto se detectaron un total de 13 compuestos de HAPs,

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

en 22 especies de peces y una de molusco, de éstos, 12 se presentaron en marzo y 12 en agosto. En marzo se analizaron 14 especies de peces y una de molusco, de las cuales la que presentó la mayor concentración total fue *Bagre marinus* con 88.87µg/g, seguida por *Caranx hippos* con 51.64µg/g. Durante el mes de agosto se analizaron ejemplares pertenecientes a 11 especies de peces y una de molusco, de las cuales, *Caranx hippos* presentó la mayor concentración total con 26.82µg/g. El benzo(b)fluoranteno, fluoranteno y criseno fueron los hidrocarburos dominantes en los organismos analizados en ambas colectas; dichos compuestos representan un riesgo para la salud humana debido a su potencial carcinógeno. La especie bentónica *Crassostrea virginica* (ostión) presentó concentraciones muy bajas en ambas colectas, en comparación con las especies de peces. El esquema trófico formado por las especies capturadas en la laguna de Tampamachoco y río Tuxpan, explica el proceso de aporte e ingesta de compuestos potencialmente peligrosos que son acumulados en consumidores primarios, y que se presentan de forma magnificada en los consumidores superiores, al aumentar la concentración en sus tejidos, sin embargo es necesario considerar las etapas del ciclo reproductivo de las especies, ya que se ha observado que esto origina variaciones en el contenido graso del tejido muscular y por lo tanto modificará las concentraciones de HAPs cuantificadas. La tendencia de acumulación de HAPs en las matrices ambientales evaluadas fue: peces > sedimentos > ostiones.

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

II. ANTECEDENTES	10
II.1 Definición de HAPs y propiedades físico-químicas de los compuestos analizados.....	10
II.2 Origen y fuentes de HAPs en ambientes acuáticos.....	13
II.3 Comportamiento de los HAPs en ambientes acuáticos	15
II.4 Identificación del origen de HAPs.....	19
II.5 Bioacumulación de HAPs en organismos acuáticos (bivalvos y peces).20	
II.6 Efectos biológicos y toxicidad de los HAPs sobre los organismos acuáticos.....	22
II.7 Antecedentes de estudios realizados en el área de estudio y zonas aledañas	23
III. JUSTIFICACION	24
IV. OBJETIVOS.....	27
IV.1 Objetivo general.....	27
IV. 2 Objetivos particulares	27
IV. 3 Hipótesis planteadas.....	27
V. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	29
VI. ESTADO ACTUAL DE LA LAGUNA DE TAMPAMACHOCO Y DESEMBOCADURA DEL RIO TUXPAN	42
VII. METODOLOGÍA	46
VII.1 Periodicidad de colecta y ubicación de estaciones	46
VII. 2 Colecta de Muestras	50
VII.4 Determinación de materia orgánica, y análisis granulométrico.....	54
VII. 5 Determinación de hidrocarburos por medio de cromatografía de gases	57
VII.6 Análisis estadístico	63
VIII. RESULTADOS.....	65
VIII.1 Parámetros físico-químicos.....	65
VIII.2 HAPs identificados y cuantificados en sedimentos.	68
VIII.3 Comparación de las concentraciones actuales con un estudio anterior y con trabajos realizados en la zona	79

VIII.4 Identificación del origen de los HAPs en sedimentos utilizando los índices moleculares.	82
VIII.5 Granulometría de los sitios de colecta de sedimentos	85
VIII.6 HAPs cuantificados en tejidos de organismos acuáticos.....	92
IX. DISCUSIÓN	106
IX.1 Presencia y concentración de HAPs en sedimentos	106
IX.2 Origen de los HAPs detectados	110
IX.3 HAPs detectados en organismos	111
IX.4 Potenciales efectos de los HAPs detectados para la salud humana.	115
X. CONCLUSIONES	117
XI. RECOMENDACIONES	119
XII. REFERENCIAS.....	120

I. INTRODUCCIÓN

La zona costera es un elemento de transición entre los componentes marino y continental del planeta y es reconocida como uno de los más importantes compartimentos de la biosfera con una amplia diversidad de ambientes y recursos.

Muchas de las zonas costeras del mundo han sido alteradas debido a la emisión y vertido de contaminantes derivados de las actividades antropogénicas. Esto ha afectado significativamente las pesquerías en áreas continentales y marinas; y ha generado riesgos para la salud de las poblaciones humanas que incluyen como parte de su alimentación los productos obtenidos mediante la pesca.

Las evidentes afectaciones a distintas áreas terrestres y acuáticas motivaron estudios sobre los efectos de los contaminantes en la biota y salud humana, los cuales iniciaron a finales de la década de los 70's. Con el tiempo ha cambiado tanto la composición como la naturaleza de los residuos contaminantes, y al aumentar su cantidad como su complejidad, también cambia la capacidad degradativa y amortiguadora del ambiente (Gutiérrez, 1990).

Lo anterior originó la necesidad de realizar investigaciones multidisciplinarias, acerca de los efectos que causan los residuos al ambiente salobre y marino, estableciendo medidas de protección y conservación orientadas a mitigar los efectos derivados de actividades antropogénicas.

Por lo tanto, el control de los contaminantes acuáticos fue identificado como una necesidad inmediata para el buen manejo y conservación de los recursos acuáticos y pesqueros (González-Macías *et al.*, 2006) además de prevenir o reducir los efectos negativos sobre la salud pública.

Sin embargo, aún en la actualidad y debido a la presión de las actividades humanas, los ambientes costero-lagunares como la laguna de Tampamachoco y la porción estuarina del río Tuxpan reciben grandes cantidades de químicos por lo que se consideran las áreas más susceptibles a los efectos derivados de la acumulación de compuestos tóxicos (Sericano *et al.*, 1990 y Senthil *et al.*, 2008).

Libes (1992) menciona que los estuarios y lagunas costeras son particularmente sensibles a la contaminación, debido a la mezcla de agua dulce y salada que produce cambios químicos que tienden a precipitar los contaminantes, quedando atrapados en los sedimentos; dichos compuestos también son reciclados entre los sedimentos y el agua como consecuencia de la actividad biológica.

Además, como los estuarios son sitios de una gran productividad, los contaminantes son transferidos rápidamente a lo largo de las cadenas alimenticias, ya que organismos como ostiones, almejas, mejillones, pueden ingerir contaminantes como los hidrocarburos presentes en la columna de agua y bioacumularlos en sus tejidos grasos, de esta manera entran en la cadena trófica y eventualmente pueden llegar al hombre (Botello *et al.*, 1996).

Otra importante ruta por la cual estos contaminantes son introducidos a los ambientes marinos es el transporte atmosférico que conduce los contaminantes de los continentes hacia las zonas costeras y el mar abierto (Gambaro *et al.*, 2009).

En el caso del sistema estuarino-lagunar de Tuxpan-Tampamachoco, el vertido de contaminantes genera mayores problemas debido a la gran importancia económica y ecológica en la región al constituir un área de crianza, alimentación y reproducción para poblaciones de peces, crustáceos y bivalvos (Castillo-Rivera *et al.*, 2002) que en la actualidad enfrenta una fuerte presión por las actividades de extracción de recursos pesqueros y la instalación de asentamientos irregulares en sus riberas. De igual manera, el vertido de los desechos municipales sin tratar, representan una amenaza para la salud de los habitantes de la región.

Esta situación tiene como origen -entre otros factores- el asentamiento en las costas del Golfo de México, de una gran cantidad de instalaciones petroleras, desde principios del siglo XX, cuando inició la explotación de los campos petroleros ubicados en la denominada faja de oro del Golfo de México.

Este proceso de explotación petrolera originó diversos impactos sobre las áreas donde se han desarrollado actividades de extracción, almacenaje, distribución y recepción de hidrocarburos y sus derivados, al generar emisión de residuos al ambiente de manera incidental o debido a condiciones operativas deficientes.

Además de la infraestructura industrial de Petróleos Mexicanos (PEMEX), que opera desde 1938, se ha instalado en las inmediaciones de la laguna de Tampamachoco y río Tuxpan la Central Termoeléctrica Presidente Adolfo López Mateos de Comisión Federal de Electricidad (CFE), cuya operación inició en 1988 para el abastecimiento de energía al centro de la República principalmente.

Actualmente se localizan en el área 6 complejos termoeléctricos de productores independientes y de CFE así como la Terminal Marítima de Tuxpan de PEMEX-Refinación, encargada de recibir gasolinas de importación, almacenarlas y posteriormente enviarlas a la zona centro del país a través del sistema de ductos, adicional a las actividades portuarias de recepción de carga, pesca y mantenimiento de estructuras marinas flotantes y fijas.

El panorama presentado por los diversos trabajos revisados indica que la contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos en los estuarios y sistemas lagunares costeros del Golfo de México es significativa y existe la probabilidad de un incremento respecto a los niveles cuantificados previamente, debido al constante aporte de contaminantes a dichos sistemas. Por lo tanto, es indispensable realizar una evaluación sobre la presencia de HAPs en la laguna de Tampamachoco y río Tuxpan, para determinar el estado actual en que se encuentran dichos sistemas y si el consumo de los organismos que habitan en ellos, representan un riesgo para la salud humana.

II. ANTECEDENTES

II.1 Definición de HAPs y propiedades físico-químicas de los compuestos analizados

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) son compuestos orgánicos que solo contienen carbono e hidrogeno dispuestos en forma de dos o más anillos de benceno fusionados, los cuales difieren en el número y posición de los anillos aromáticos (Furton y Pentzke, 1998) y en el ambiente acuático tienden a adsorberse a partículas suspendidas (especialmente detritos de origen vegetal) y a sedimentos (Ariese *et al.*, 2001).

En la siguiente tabla se indican las propiedades físico-químicas de los 16 HAPs considerados como contaminantes prioritarios por la Environmental Protection Agency (EPA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comunidad Económica Europea (CEE), debido a sus propiedades genotóxicas (teratogénicas, mutagénicas y carcinogénicas) (Menzie *et al.*, 1992 y Neff, 2002).

Tabla II.1-1. Propiedades físico-químicas de los 16 HAPs considerados como contaminantes prioritarios y analizados en este estudio.

HAP	PM (g/mol)	Pf (°C)	Pe (°C)	Pv (mm Hg)	Sol (mg/l)	H (atm·m ³ /mol)	log Kow
Acenafteno	154,21	95	96,2	$4,47 \times 10^{-3}$	1,93	$7,91 \times 10^{-5}$	3,98
Acenaftileno	152,20	92	270	0,029 (20 °C)	3,93	$1,45 \times 10^{-3}$	4,07
Antraceno	178,2	218	342	$1,7 \times 10^{-5}$ (25 °C)	0,76	$1,77 \times 10^{-5}$	4,45
Benzo(a)antraceno	228,29	159	400	$2,2 \times 10^{-8}$ (20 °C)	0,01	1×10^{-6}	5,61
Benzo(a)pireno	252,3	179	311	$5,6 \times 10^{-9}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-7}$	6,06
Benzo(b)fluoranteno	252,3	168,3	-	5×10^{-7} (20-25 °C)	0,0012	$1,22 \times 10^{-5}$	6,04
Benzo(k)fluoranteno	252,3	215,7	480	$9,59 \times 10^{-11}$ (25 °C)	$7,6 \times 10^{-4}$ (25 °C)	$3,87 \times 10^{-5}$	6,06
Benzo(g,h,i)perileno	276,34	273	550	$1,03 \times 10^{-10}$ (25 °C)	$2,6 \times 10^{-4}$ (25 °C)	$1,44 \times 10^{-7}$	6,50
Criseno	228,3	256	448	$6,3 \times 10^{-7}$ (25 °C)	$2,8 \times 10^{-3}$	$1,05 \times 10^{-6}$	5,56

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

Dibenzo(a,h)antraceno	278,35	262	-	1×10^{-10} (20 °C)	5×10^{-4}	$7,3 \times 10^{-8}$	6,84
Fenantreno	178,2	100	340	$6,8 \times 10^{-4}$ (25 °C)	1,20	$2,56 \times 10^{-5}$	4,45
Fluoranteno	202,26	11	375	5×10^{-6} (25 °C)	0,26	$6,5 \times 10^{-6}$	4,90
Fluoreno	166,2	117	295	$3,2 \times 10^{-4}$ (20 °C)	1,98	1×10^{-4}	4,18
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	276,3	163,6	530	1×10^{-6} (20 °C)	0,062	$6,95 \times 10^{-8}$	6,58
Naftaleno	128	80,5	218	0,05	0,003	-	3,37
Pireno	202,3	156	404	$2,5 \times 10^{-6}$ (25 °C)	0,077	$1,14 \times 10^{-5}$	4,88

Fuente: [Agency for Toxic Substances and Disease Registry](#) (ATSDR)

En donde: **PM**: peso molecular (g/mol). **Pf**: punto de fusión (°C). **Pe**: punto de ebullición (°C). **Pv**: presión de vapor. **Sol**: solubilidad. **H**: constante de la ley de Henry. **log Kow**: logaritmo del coeficiente de reparto octanol-agua (Kow).

La presión de vapor se refiere a la presión que ejercen las moléculas en estado de vapor que han sido proyectadas fuera de la masa de la disolución en la que se encuentre la sustancia. Se mide en unidades de presión, siendo la conversión de milímetros de mercurio a pascales: presión (Pa) = 133,28 x presión (mmHg). En general, los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentan una presión de vapor baja, lo que posibilita que puedan viajar largas distancias en la atmósfera antes de regresar a la tierra en forma de agua de lluvias o por asentamiento de partículas.

La solubilidad es la máxima concentración de un compuesto capaz de disolverse en el agua. Se mide en unidades de concentración (mg/l). La solubilidad en agua de los HAPs es muy baja, la cual decrece al aumentar el peso molecular y tamaño de la molécula. Son solubles en disolventes orgánicos y por tanto, lipófilos. Así que son potencialmente bioacumulados y concentrados en sedimentos y suelos en función de su persistencia.

La constante de la ley de Henry describe la tendencia de un compuesto a volatilizarse y será mayor cuanto más alto sea el valor de esta. Los HAPs presentan valores bajos de la constante de la ley de Henry.

El logaritmo del coeficiente de reparto octanol-agua (K_{OW}) es una medida de cómo un compuesto puede distribuirse entre dos disolventes inmiscibles, agua (disolvente polar) y octanol (disolvente relativamente no polar, que representa a

los lípidos). Se calcula dividiendo la concentración que presenta la sustancia en el octanol entre la que presenta en el agua y mide la hidrofobicidad o la afinidad hacia los lípidos, de una sustancia disuelta en agua. Los compuestos químicos con valores altos de K_{OW} tienden a acumularse en las porciones lipídicas de los organismos y a concentrarse en suelos y sedimentos. Por el contrario, los compuestos con bajos K_{OW} tienden a distribuirse en el agua o aire. Los HAPs presentan valores elevados de $\log K_{OW}$, lo que indica su predisposición a ser bioacumulados por los organismos vivos.

El coeficiente de adsorción del carbono orgánico (K_{OK}). Es una medida de la distribución del compuesto entre el suelo y la fase líquida. Representa la capacidad de un compuesto para ser adsorbido por la materia orgánica y la arcilla presentes en el suelo.

II.2 Origen y fuentes de HAPs en ambientes acuáticos

Los HAPs constituyen un grupo de contaminantes ampliamente distribuidos, generados por diferentes procesos (Baumard *et al.*, 1999).

- Combustión incompleta de materia orgánica fósil y reciente (origen pirolítico o pirogénico),
- Maduración lenta de la materia orgánica en el gradiente geotérmico (origen petrogénico),
- Degradación a corto plazo de precursores biogénicos (diagénesis).
- Son producidos y sintetizados por organismos marinos (biogénicos).

Los HAPs pueden hallarse en el aire, la tierra y el agua, procedentes de fuentes naturales o antropogénicas, aunque la contribución de las fuentes naturales, como los incendios forestales y los volcanes, es mínima comparada con las emisiones causadas por el ser humano, que son producidas principalmente por procesos de combustión (Mastandrea *et al.*, 2005).

Las fuentes de HAPs a los ambientes acuáticos se pueden clasificar en dos grupos, las fuentes puntuales y las no puntuales (Arias, 2008):

Las fuentes puntuales son aquellas que descargan directamente al ambiente marino a partir de vertederos identificables. Para la mayoría de los ecosistemas costeros son las descargas municipales, los efluentes industriales directos, embarcaciones de transporte de derivados de petróleo y refinerías en zonas costeras. Estos efluentes están dominados por HAPs de 2 y 3 anillos y están asociados principalmente a ingresos de origen petrogénico.

De acuerdo con lo anterior, McElroy *et al.* (1989) reportaron que la mayor parte de las aportaciones de HAPs al ambiente marino se asocian con actividades antropogénicas: residuos de áreas industriales y urbanizadas así como extracción y transporte de hidrocarburos mar adentro. Kennicutt *et al.* (1988) mostraron que las variaciones en la concentración de compuestos orgánicos volátiles e hidrocarburos de alto peso molecular, en las costas estadounidenses del Golfo de México están asociadas a la presencia de instalaciones industriales a flote, costeras y centros de población.

Las fuentes no puntuales son aquellas que no descargan directamente al ambiente marino y se clasifican de la siguiente manera:

El lavado de tierras urbanas. Este término se refiere al agua que “lava” la superficie urbanizada durante las tormentas y de esta manera los contaminantes son transportados a los ambientes acuáticos.

Atmósfera. Las fuentes de HAPs que emiten a la atmósfera incluyen la combustión de combustibles fósiles, gasolinas, madera, carbón etc; así como también, la volatilización de ciertas fracciones de petróleo hacia la atmósfera. Estos contaminantes serán introducidos a los ambientes acuáticos a través de

los procesos de deposición seca y húmeda. Las distribuciones de HAPs en aire muestran un amplio rango de concentraciones y generalmente están dominadas por fenantreno, fluoranteno y pireno; los HAPs dominantes son los de 3 y 4 anillos bencénicos, lo que sugiere una mezcla de fuentes pirolíticas y petrogénicas.

Precipitaciones. Los HAPs que son aportados por las lluvias coinciden con los encontrados en el aire que son el naftaleno, fenantreno, fluoranteno y pireno. Esto sugiere que al igual que en la atmosfera las fuentes son mixtas pirolíticas y petrogénicas.

Comparando la distribución de HAPs de acuerdo a su origen, Kucklick *et al.* (1997) mostraron que los factores que condicionan la distribución de HAPs en sedimentos estuarinos, presentan condiciones distintas dependiendo de la fuente de generación (natural o antropogénica), en el caso de los HAPs derivados de pirólisis su distribución está definida por la cercanía de núcleos de población, es decir que las concentraciones alejadas de la costa serán menores y aumentaran cerca de la costa.

El aumento en cuanto a las concentraciones de HAPs en sedimentos es de varios órdenes al comparar sitios acuáticos cercanos a núcleos urbanos con áreas costeras sin presencia de actividades industriales. También se modifica el espectro de HAPs aumentando la presencia de aquellos derivados de la pirólisis (Piazza, *et al.*, 2008).

II.3 Comportamiento de los HAPs en ambientes acuáticos

Los HAPs se consideran compuestos orgánicos persistentes (COPs), por lo que pueden permanecer en el ambiente durante largos periodos sin alterar sus propiedades tóxicas, debido a su lenta biodegradabilidad (Ramos *et al.*, 1989). Por ello estos contaminantes se encuentran disponibles para los organismos que habitan los ambientes acuáticos.

Como regla general, la persistencia del compuesto aumenta al aumentar el tamaño de la molécula. Por ejemplo, la relativa baja persistencia del naftaleno y otros compuestos de bajo peso molecular indican su escasa capacidad de bioacumulación, mientras que los compuestos de mayor peso molecular, como el benzo(a)pireno, son altamente persistentes y por lo tanto bioacumulables. Así se ha observado que en sistemas acuáticos el benzo(a)pireno presenta una vida media superior a 300 semanas frente a las 5 semanas que presenta el naftaleno.

La biodisponibilidad de los HAPs varía de acuerdo a los diferentes orígenes y también depende de muchos otros parámetros relacionados con las características fisicoquímicas de los compuestos, así como de las características del sedimento y de los organismos.

Una vez que estos contaminantes son introducidos al ambiente acuático pueden ocurrir diversos procesos físico-químicos y biológicos que determinaran el destino de estos contaminantes en el ambiente, en la figura II.3-1 se muestran dichos procesos, que se describirán a continuación, así como también, las fuentes o aportes de estos compuestos al ambiente acuático, que fueron descritas anteriormente.

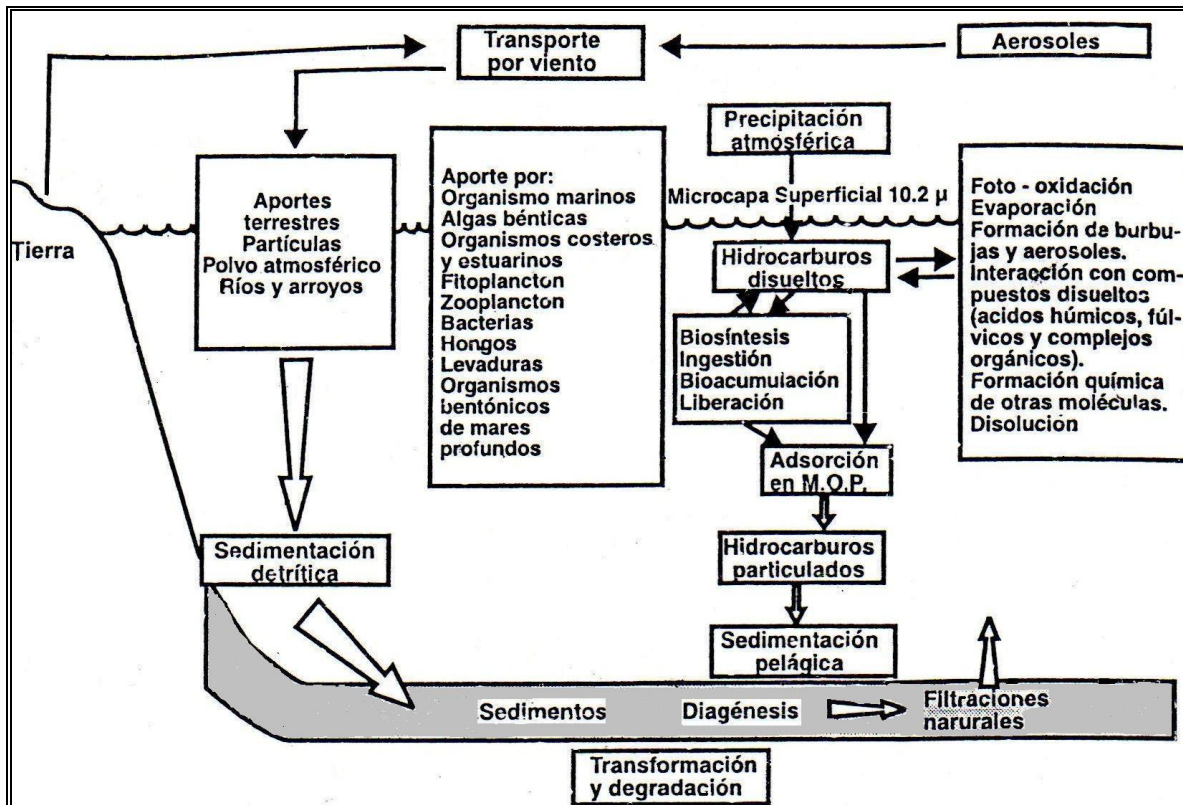


Figura II.3-1. Procesos físico-químicos y biológicos de HAPs en ambientes acuáticos y sus principales aportes. (Fuente: Botello et al., 1996).

Evaporación. Está determinada por la cantidad de compuestos volátiles que forman parte del petróleo, así cuando hay un mayor porcentaje de hidrocarburos ligeros, mayor será la evaporación, la cual se incrementa con altas temperaturas y fuertes vientos. Por ejemplo la gasolina se puede evaporar en unas pocas horas y los crudos ligeros llegan a perder hasta el 40% de sus componentes durante el primer día. En contraste los crudos pesados presentan bajas tasas de evaporación.

Dispersión. Los contaminantes orgánicos de bajo peso molecular se encuentran dispersos en la fase líquida y los contaminantes de alto peso molecular se encuentran preferentemente retenidos en la fase orgánica de los sedimentos. En ambientes marinos la dispersión está determinada por la acción de las olas y la turbulencia de la superficie de mar que actúan sobre el petróleo para fraccionarlo en pequeñas partículas las cuales permanecen en suspensión hasta dispersarse o sufrir una biodegradación.

Disolución. El grado de disolución del petróleo depende de su composición, temperatura del agua, turbulencia y dispersión. Por lo tanto, los compuestos más pesados son prácticamente insolubles, en tanto los más ligeros, principalmente los aromáticos como el benceno, son ligeramente solubles. Sin embargo estos

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

compuestos son también más volátiles y son perdidos por evaporación más rápido.

Oxidación. Se lleva a cabo cuando los hidrocarburos reaccionan con el oxígeno transformándose en productos solubles o bien se combinan para formar breas o alquitranes. Muchas de esas reacciones dependen de la radiación solar.

Sedimentación. Consiste en el hundimiento de las partículas de petróleo cuando se adhieren a los sedimentos o a la materia orgánica. Las aguas someras que tienen sedimentos o sólidos suspendidos, propician condiciones favorables para la sedimentación.

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.

En el caso de los HAPs, debido a que son hidrofóbicos muestran un comportamiento dual en sus procesos de incorporación a sedimentos: depositación (Baker *et al.*, 1991) y partición (Kennicutt *et al.*, 1988), lo que origina que las concentraciones y los tipos de HAPs detectados en un área específica estén definidos por su origen (Singh *et al.*, 1993) y por sus propiedades fisicoquímicas individuales, las cuales también definen las características de unión al sedimento, principalmente el coeficiente de partición octanol/agua (K_{ow}).

Los HAPs debido a su baja solubilidad en agua y al hecho de ser compuestos hidrofóbicos tienden a ser adsorbidos rápidamente a la materia orgánica, particularmente la contenida en los sedimentos, por lo tanto, las más altas concentraciones de HAPs se encuentran en sedimentos cercanos a regiones costeras urbanas e industrializadas (Chun-Hua *et al.*, 2009).

Por ello, las condiciones que se presentan en las lagunas costeras como la alta concentración de sólidos suspendidos con contenidos importantes de materia orgánica favorecen el ingreso de HAPs de alto peso molecular a los organismos (Baumard *et al.*, 1999).

Aunque la presencia de HAPs en sedimentos costeros está definida por la composición del sustrato y tamaño de partícula además de la concentración de carbono orgánico, que favorece la afinidad de los HAPs a la partícula de sedimento, sobre todo en los casos de limos y arcillas se han reportado ejemplos de ausencia de afinidad en sedimentos marinos (Readman *et al.*, 1986) así como en partículas de sedimentos estuarinos en suspensión. En las lagunas costeras del Golfo de México existe evidencia de que la concentración de HAPs está definida por la influencia de los aportes continentales independientemente del tipo y composición del sustrato presente (Botello y Calva, 1998).

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

En el caso de la laguna de Sontecomapan, ubicada en el sur del estado de Veracruz, los estudios desarrollados por Calva *et al.* (2002) detallan la estratificación sedimentaria de HAPs, con concentraciones en decremento conforme a la profundidad, y en la que predominan los compuestos aromáticos de 4 a 6 anillos lo que sugiere un origen por pirólisis de compuestos orgánicos y combustibles fósiles, provenientes de motores de combustión interna, descargas continentales y transporte atmosférico.

Los resultados anteriores contrastan con los presentados por Chun-Hua *et al.* (2009), para un área de marisma del sureste asiático, en la cual la concentración de HAPs se incrementa con la profundidad del sedimento, sugiriendo que los HAPs derivados de motores diesel de embarcaciones se acumulan principalmente en sedimentos profundos.

Biodegradación. El agua de mar contiene un amplio rango de microorganismos marinos (hongos, bacterias y levaduras), los cuales pueden utilizar al petróleo como una fuente de carbono y por lo tanto de energía. Los factores que afectan la tasa de biodegradación son la temperatura, la disponibilidad de oxígeno y los nutrientes (nitrógeno y fósforo). Por lo general la biodegradación es mucho mayor en regiones tropicales o subtropicales que en zonas frías o templadas.

Los tiempos de residencia de hidrocarburos fósiles en los sedimentos puede ser de 3 a 10 años, según la velocidad de degradación de éstos; en zonas costeras tropicales la velocidad de degradación puede ser mucho mayor por la presencia de nutrientes, luz, temperatura, oxígeno y substrato, así como de bacterias y la oxidación fotoquímica que inducen altas tasas de biodegradación. La degradación microbiana es el mejor proceso de degradación, esta depende de las condiciones medio ambientales (pH, temperatura, oxígeno), población microbiana (número y tipo de microorganismos), grado de aclimatación, accesibilidad de nutrientes, estructura química y naturaleza del compuesto químico degradado. Estos compuestos serán biodegradados o biotransformados en complejos metabolitos menores (Haritash y Kaushik, 2009).

Filtraciones naturales. Si bien existe una fracción de HAPs derivada de emisiones naturales de hidrocarburos, principalmente en áreas oceánicas abiertas, en éstas se encuentran concentraciones mínimas en comparación a los sitios costeros con presencia de actividades humanas, siendo diferentes también la composición de HAPs y la proporción de los mismos (Boitsov *et al.*, 2009).

II.4 Identificación del origen de HAPs

La determinación de las fuentes y composición de los HAPs que pueden estar disponibles para la biota, proporciona información valiosa e incluso necesaria para la evaluación del impacto sobre un ecosistema, además de permitir la formulación de estrategias de control de contaminantes (Yunker *et al.*, 2002).

Con este propósito se han desarrollado índices moleculares basados en las concentraciones de compuestos individuales orientados a evaluar los diferentes orígenes de los HAPs; sin embargo, es necesaria la consideración simultánea de varios índices para tener una mejor evaluación (Baumard *et al.*, 1999).

Los HAPs de masa molecular 178 y 202 se utilizan comúnmente para distinguir entre fuentes petrogénicas o de combustión (Budzinski *et al.*, 1997; Soclo *et al.*, 2000). Para la masa molecular 178 (An/178) usualmente una proporción de antraceno respecto a antraceno más fenantreno ($\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Phe}) < 0.10$ indica petróleo mientras que una proporción ($\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Phe}) > 0.10$ indica predominancia de origen por combustión.

Para la masa molecular 202 (Fla/202) una proporción de fluoranteno respecto a fluoranteno más pireno ($\text{Fla}/\text{Fla}+\text{Pir}$) con valor de 0.5 usualmente define el punto de transición petróleo/combustión (Budzinski *et al.*, 1997), pero en la práctica este límite parece ser menos definitivo que 0.10 para An/178.

Usualmente se sugiere que la proporción $\text{Fla}/\text{Fla}+\text{Pir} < 0.40$ indica un origen petrogénico (diesel, carbón, aceites); entre 0.40 y 0.50 indica combustión de combustibles fósiles líquidos (combustible para vehículos y crudo), mientras que los valores de este índice superiores a 0.50 son atribuidos a la quema de pasturas, maderas y carbón (Yunker *et al.*, 2002).

Los HAPs de masas moleculares 228 (BaA/228) donde se emplea la relación del benzo(a)antraceno respecto a la proporción de criseno y trifenileno ($\text{BaA}/\text{BaA}+\text{Cry}/\text{trifenileno}$) son utilizados con menos frecuencia como indicadores de HAPs parentales. Debido a que raramente se encuentran antraceno o indeno en bajas concentraciones en las muestras de combustión, una proporción $\text{BaA}/\text{BaA}+\text{Cry}/\text{trifenileno}$ superior a 0.35 indica combustión, valores entre 0.2 y 0.35 señalan petróleo o combustión y un valor inferior a 0.2 refiere petróleo (Yunker *et al.*, 2002).

II.5 Bioacumulación de HAPs en organismos acuáticos (bivalvos y peces).

Los trabajos de Moore y Dwyer publicados en 1974 son los primeros en indicar que los hidrocarburos del petróleo y en especial su fracción aromática pueden ser absorbidos y acumulados por los organismos acuáticos a partir de fuentes petrogénicas directamente o pirolíticas.

En el caso de ambientes marino costeros como la Laguna de Tampamachoco, los bivalvos están continuamente expuestos a una variedad de contaminantes asociados con la fase disuelta y particulada (Chu *et al.*, 2002), así como diversas especies nectónicas y planctónicas que gradualmente bioacumulan y transfieren al siguiente eslabón trófico los HAPs ingeridos, lo que origina que potencialmente puedan ser ingeridos por seres humanos con consecuencias adversas sobre la salud.

En los ambientes acuáticos, los moluscos, son considerados monitores del cambio causado por la contaminación ambiental debido a su tolerancia y adaptabilidad, dentro de este grupo, los bivalvos son estimados como los mejores bioindicadores de la calidad de los ecosistemas, no solo por su forma de vida y hábitos tróficos, sino también porque son una fuente importante de alimento, tal es la situación de los ostiones *Crassostrea virginica*, *C. gigas*, *C. cortesiensis* (Ávila-Pérez y Zarazúa-Ortega, 1993).

En 1985 se inició en los Estados Unidos de América el programa Mussel Watch que tenía como objetivo el monitoreo de la calidad de los cuerpos de agua interiores y costeros mediante la evaluación de los diferentes tipos de contaminantes en diferentes bivalvos: *Mytilus edulis* y *Crassostrea virginica* en la costa del este, *C. virginica* en la del Golfo, *C. rhizophorae* en el Caribe, *M. edulis* y *M. californianus* en la costa oeste y en Alaska, y el mejillón zebra, *Dreissena polymorpha*, en los Grandes Lagos. El proyecto original se diseñó para monitorear el estado y cambios temporales en metales y contaminantes orgánicos, incluidos HAPs, PCBs, pesticidas y metales traza. Pero también para el monitoreo de las poblaciones de bivalvos (NOAA, 2004). Además, en todo el mundo se ha convertido en un riesgo para la salud el consumo de bivalvos, dada su capacidad de bioacumulación, no sólo de los contaminantes mencionados, sino también de bacterias y patógenos de origen humano, así como de ficotoxinas (Richards, 2003).

Los contaminantes químicos pueden entrar en los organismos marinos de varias maneras: la absorción directa del agua contaminada a través de la dermis o las branquias, el consumo de sedimentos contaminados, o el consumo de organismos previamente contaminados. Una vez que estos contaminantes entran en un organismo, tienden a permanecer en el tejido animal y pueden acumularse con exposiciones posteriores. Como los organismos contaminados son consumidos, los contaminantes pueden pasar de un organismo a otro. El contaminante químico por lo general se concentran en tejidos con alto contenido de grasa o en el músculo, o en sistemas de órganos específicos, en función de

la naturaleza lipofílica de la sustancia química específica y cómo el producto químico es metabolizado. La exposición de hidrocarburos en organismos marinos, también es a menudo evaluada midiendo la concentración de HAPs en tejidos, sin embargo los peces metabolizan eficientemente los HAPs y a menudo sólo cantidades mínimas de los productos originales se detectan en los tejidos (McDonald *et al.*, 1992). A diferencia de los peces, los moluscos bentónicos filtradores como los ostiones tienden a concentrar metales y contaminantes orgánicos, y presentan limitada capacidad para metabolizar y depurar contaminantes acumulados (Kim *et al.*, 2001).

Otros factores que influyen en la bioacumulación de HAPs en peces fueron reportados por Quintero y Díaz (1994), los cuales cuantificaron HAPs en tres especies de peces marinos, mostrando la existencia de variaciones estacionales en la concentración media de dichos compuesto, relacionadas con el contenido graso del músculo del ejemplar como consecuencia de los ciclos reproductivos y con sus hábitos alimenticios. Wade *et al.* (1989), cuantificaron las concentraciones de HAPs en tejido de organismos marinos, encontrando mayores concentraciones en organismos del bentos (sésiles) que en organismos con capacidad de desplazamiento. Resultados similares reportan Senthil *et al.* (2008), para tejidos de ostras los cuales alcanzan concentraciones superiores a las de sedimento en las mismas áreas.

II.6 Efectos biológicos y toxicidad de los HAPs sobre los organismos acuáticos

Los HAPs son altamente liposolubles y por lo tanto fácilmente adsorbidos en el tracto intestinal de los organismos distribuyéndose posteriormente en distintos tejidos, principalmente en tejidos adiposos (Cram *et al.*, 2004).

A nivel celular, diversos estudios han demostrado que en el interior de la célula, los HAPs son incorporados mediante dos procesos:

- 1) la oxidación de un electrón que produce radicales catiónicos reactivos y
- 2) la mono-oxigenación que origina dioles epóxicos.

Los HAPs incorporados a los procesos celulares son catalizados principalmente por el sistema enzimático citocromo P450, convirtiendo a los HAPs en moléculas más polares y solubles en agua para ser excretados fuera del organismo, sin embargo, el metabolismo de los HAPs puede generar intermediarios reactivos que producen genotoxicidad (Yu, 2002).

No todos los HAPs son carcinógenos o mutagénicos y su toxicidad es variable. Los HAPs de bajo peso molecular (BPM), muestran una significativa toxicidad aguda y otros efectos adversos en los organismos, pero no presentan evidencias de carcinogenicidad.

Los HAPs de alto peso molecular (APM), son significativamente menos tóxicos, es decir que su toxicidad es subletal; no obstante se ha demostrado que son carcinógenos, mutagénicos o teratogénicos para una gran variedad de especies, incluyendo peces y otros organismos acuáticos, anfibios, aves y mamíferos (Eisler, 1987).

Asimismo, la toxicidad (aguda y subletal) de los HAPs se puede incrementar significativamente si los organismos son expuestos a la radiación UV (fototoxicidad), formándose especies reactivas que dañan los constituyentes celulares, resultando en un proceso de toxicidad aguda o en genotoxicidad (Arfsten *et al.*, 1996).

II.7 Antecedentes de estudios realizados en el área de estudio y zonas aledañas

Los estudios sobre la contaminación en la laguna de Tampamachoco fueron iniciados por Botello en 1978, al analizar la presencia de hidrocarburos fósiles en ostión y sedimentos de las lagunas de Pueblo Viejo, Tamiahua y Tampamachoco, entre otras, determinando que las dos primeras presentaron las concentraciones más altas de HAPs en lo que se refiere al estado de Veracruz.

Posteriormente, Botello *et al.* (1992) demostraron que los problemas de contaminación son graves en las lagunas de Pueblo Viejo y Tampamachoco y que en dichos sistemas ha disminuido la productividad considerablemente debido a que reciben aportes de fuentes antropogénicas de contaminantes orgánicos, inorgánicos y biológicos, los cuales ponen en riesgo a la salud humana.

En otro estudio Botello y Calva (1998), publicaron los resultados de la cuantificación de las concentraciones de HAPs en sedimentos de las lagunas de Pueblo Viejo, Tamiahua y Tampamachoco; encontrando la mayor concentración en la laguna de Pueblo Viejo.

En otro estudio realizado por Botello, Calva y Ponce (2001), en lagunas costeras del estado de Veracruz, se detectó la presencia de compuestos de HAPs principalmente de 4 y 5 anillos de benceno, lo que demuestra un origen antropogénico.

Por otro lado, Borabe *et al.* (2006) presentaron los resultados de la evaluación de la presencia de HAPs en sedimentos y ostiones en la laguna Pueblo Viejo y en el canal de Chijol, los cuales se encuentran asociados con el sistema estuarino-lagunar del río Pánuco.

En el mismo año, Ávila-Chávez estudió la distribución espacial y temporal de los hidrocarburos en la zona marina frente a la desembocadura del río Pánuco, determinando la presencia de hidrocarburos en agua y sedimento, los cuales alcanzaron elevadas concentraciones, por lo que se considera que el área de estudio presenta serios problemas de contaminación por hidrocarburos y que la descarga del río Pánuco es el principal aporte de estos contaminantes a dicha zona.

III. JUSTIFICACION

La importancia del estudio de los hidrocarburos del petróleo y en especial de su fracción aromática radica en que son contaminantes químicos con acción carcinogénica y mutagénica, potencialmente tóxicos para los organismos acuáticos (Neff, 2002 y Mastandrea *et al.*, 2005), mismos que pueden ser absorbidos y acumulados por éstos a partir de fuentes petrogénicas y pirolíticas.

El interés en la detección y cuantificación de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y sus derivados, es que éstos están asociados al aumento en la incidencia de diversos tipos de cáncer en el ser humano, cuando entran por cualquier vía al organismo (Mastandrea *et al.*, 2005).

La carencia de información sobre los hidrocarburos en ambientes acuáticos y el continuo aporte de dichos contaminantes provenientes de diversas fuentes hacia los cuerpos acuáticos, hace necesario realizar un estudio ambiental integral y una evaluación del aporte de los hidrocarburos hacia la laguna, con la finalidad de determinar las concentraciones actuales de HAPs en sedimentos y organismos, como paso previo para el establecimiento de políticas, condicionamientos y restricciones para su aprovechamiento y consumo.

Por tal motivo, la presencia de los HAPs en la laguna de Tampamachoco constituye una fuente potencial de daños a los organismos acuáticos y eventualmente al hombre, debido a que en esta zona convergen diversos factores ambientales, sociales y económicos como son:

- La presencia de una fuente emisora de gases de combustión de hidrocarburos pesados derivados de la generación de energía eléctrica, en la ribera lagunar.
- La presencia de instalaciones de recepción, almacenado y distribución de combustibles ligeros.
- La descarga de aguas residuales urbanas directamente al cuerpo lagunar provenientes de asentamientos irregulares y a través del aporte del río Tuxpan.
- El desarrollo de actividades de extracción de moluscos y peces para el consumo humano sin regulación sanitaria aparente.
- El comercio de los moluscos y peces a nivel estatal, sin una verificación previa de la calidad para el consumo humano.
- La realización de obras de dragado en el canal que atraviesa la laguna de Norte a Sur.

Debido a lo anterior, la razón para realizar este estudio radica en que a pesar de la importancia ecológica y económica de la laguna de Tampamachoco y el potencial daño que representan los HAPs para la salud pública, debido al contacto con sustrato, agua y la ingesta de elementos potencialmente

contaminados, no se ha realizado un seguimiento periódico de las condiciones de presencia en el sustrato y en el tejido de ejemplares acuáticos destinados al consumo humano, así como de los factores que modifican el aporte y permanencia de los mismos.

Para definir los potenciales efectos en la salud humana por la acción de los HAPs debemos considerar diversos elementos propios de los sistemas costeros lagunares y la influencia humana, entre los que destacan la influencia de las lluvias que pueden ocasionar un mayor aporte de tóxicos de origen continental, provenientes de la parte superior de la cuenca, aunque también un menor tiempo de residencia y disponibilidad para la ingestión por los distintos organismos, la presencia de fuentes de emisión naturales o antropogénicas, el tipo de HAPs aportados al sistema y los factores que regulan los procesos de degradación de los mismos.

Para lograrlo en el presente trabajo, se determinan los tipos de HAPs presentes, el origen de los mismos, las concentraciones en tejido de ejemplares acuáticos, y en sedimentos y la existencia de diferencias en la distribución de las concentraciones de HAPs, considerando el sustrato lagunar y el perteneciente al cauce del río Tuxpan.

La cuantificación de hidrocarburos se realiza considerando el régimen hídrico de ambas temporadas: secas y lluvias, puesto que las potenciales fuentes de origen de hidrocarburos, encontradas en el sitio, mantienen una actividad continua durante todo el año, incluyendo la actividad portuaria a granel, la generación de energía eléctrica, la recepción y almacenamiento de gasolinas así como el vertido al río Tuxpan de aguas residuales sin tratar la mayor parte provenientes de la ciudad de Tuxpan de Rodríguez Cano.

Por otra parte los procesos naturales que pueden definir las condiciones de dispersión y presencia en el medio presentan condiciones estacionales, incluyendo el volumen de descarga del río Tuxpan, los ciclos mareales, corrientes costeras y el oleaje.

La razón de realizar la detección y cuantificación de la presencia de HAPs en tejido de peces susceptibles de ser utilizados para el consumo humano, es para obtener información sobre el riesgo a la salud humana por su ingesta.

El muestreo en sedimentos se realiza para obtener datos sobre la disponibilidad de HAPs en el medio, además la cuantificación de HAPs en sedimentos aporta las siguientes ventajas e información adicional:

- Concentran contaminantes por periodos más largos que los organismos.
- Presentan nulo o poco desplazamiento siendo más fáciles de analizar que los organismos, permitiendo el muestreo continuo obteniendo tendencias de concentración.
- Son el hábitat de muchos organismos.

- Dan información más precisa sobre áreas pequeñas y distribución regional de ciertos contaminantes que la biota.
- Brindan información en escala de tiempo, de manera previa a la introducción de un contaminante, durante su aporte y posterior a la conclusión del aporte.
- En áreas con un alto rango de variación de las condiciones fisicoquímicas, son el mejor medio para obtener datos comparables, espacial y temporalmente.

Hay que considerar las siguientes desventajas de los datos obtenidos únicamente con la cuantificación en sedimentos y que pueden ser compensados con el muestreo en ejemplares vivos:

- Los niveles reales o potenciales de contaminantes en los sedimentos son usualmente el resultado de un proceso de transformación antes de que el contaminante esté incorporado.
- En algunas áreas, la erosión, sedimentación alternada y remoción del sedimento da como resultado un registro geológico fragmentado.
- Son susceptibles a la remoción súbita por medios físicos.
- En áreas de baja depositación, la “bioturbación” puede alterar la historia deposicional de los contaminantes.
- Los sedimentos usualmente no concentran contaminantes en el mismo grado que lo hacen los organismos, lo cual dificulta la detección de aportes antropogénicos a cierta distancia del origen del aporte.

IV. OBJETIVOS

IV.1 Objetivo general

- Realizar una evaluación del aporte de los HAPs sobre la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan mediante el análisis de dichos compuestos en sedimentos superficiales y tejidos de organismos.

IV. 2 Objetivos particulares

- **Identificar** y cuantificar los 16 tipos de HAPs que establece la EPA presentes en sedimentos y tejidos de organismos encontrados en la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, durante las épocas de secas y lluvias con la finalidad de observar si existen variaciones en las concentraciones de estos compuestos a lo largo del año.
- **Definir** el origen de los HAPs presentes en los sedimentos (por ejemplo petrogénicos, pirolíticos) que ingresan al sistema, con base en los índices moleculares establecidos para evaluar los diferentes orígenes de los HAPs.
- **Cuantificar** el contenido de materia orgánica y granulometría de los sedimentos superficiales, para determinar la relación que existe entre dichos parámetros y la presencia de HAPs en el área de estudio.
- **Determinar** si los HAPs encontrados en sedimentos representan un riesgo para los organismos que habitan dichos sistemas de acuerdo al tipo y concentración que presenten y con base en los criterios de calidad sedimentaria establecidos para determinar las concentraciones a partir de las cuales se pueden observar los efectos dañinos en los organismos provocados por la toxicidad que contengan los sedimentos.

IV. 3 Hipótesis planteadas

- H: Es probable encontrar variaciones en el tipo y concentración de HAPs en sedimentos y en tejido de organismos durante las dos épocas de muestreo, debido a las variaciones pluviométricas que se presentan a lo largo del año, por lo tanto, se espera encontrar mayores concentraciones en la temporada de lluvias debido al arrastre de contaminantes de la porción superior del río Tuxpan y zonas urbanas.
- H: El origen probable de los HAPs encontrados en sedimentos de la laguna de Tampamachoco y la porción estuarina del río Tuxpan es de tipo pirolítico principalmente, debido a la presencia de diversas fuentes generadoras de HAPs en la zona y por su cercanía con la ciudad de Tuxpan de Rodríguez Cano.

- H: Debido a que los HAPs presentan altos coeficientes de partición octanol/agua (K_{OW}) y de adsorción al carbono orgánico (K_{OC}), dichos compuestos tienden a adsorberse sobre partículas de sedimentos (principalmente limos y arcillas) y de materia orgánica, por lo tanto se espera que la concentración de materia orgánica y condición granulométrica modifiquen la acumulación sedimentaria de HAPs, significativamente.
- H: Las concentraciones actuales de HAPs en tejidos de organismos de la laguna representan un riesgo para los organismos acuáticos y eventualmente al hombre debido a la presencia de diversas fuentes generadoras de HAPs en la zona como: la central termoeléctrica, las instalaciones de petróleos mexicanos, la descarga de aguas residuales urbanas, entre otros.

V. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Ubicación geográfica

El sistema estuario-lagunar de Tuxpan-Tampamachoco se encuentra al norte del estado de Veracruz, al noreste de la población de Tuxpan, entre los 20° 18' de latitud norte y los 97° y 98' de longitud oeste.

El área estimada hacia 1992 es de 57.5 km², con una longitud aproximada de 10km y 3km en su parte más ancha, su volumen hacia 1992 era de 80.5 km³ para el mes de mayo, con un incremento de nivel de 0.30m para el mes de septiembre, lo que equivale a un aporte de 17.25 km³ de agua a la laguna (Botello *et al.*, 1994). Las dimensiones más usuales se presentan en la tabla V-1.

La laguna carece de rasgos batimétricos notables, a excepción del canal que va en dirección norte-sur y que se prolonga hasta su comunicación con el estuario Tuxpan, con una profundidad promedio de 2.5m. En la parte norte de la laguna existen dos canales, el nuevo y el viejo, con aproximadamente 4m de profundidad que se enlazan con la barra de Galindo y la laguna de Tamiahua, a 40km de la desembocadura del río. La comunicación con el mar es casi directa, pues ésta desemboca sobre el estuario Tuxpan, cuyo encuentro con el océano se localiza aproximadamente a 2km.

Tabla V-1 Dimensiones de la laguna de Tampamachoco en 1992 (Botello *et al.*, 1994).

Perímetro (km)	Área (km ²)	Eje long (km)	Eje transversal (km)	Prof. Max (m)	Prof Mín (m)	Prof promedio (m)	Vol. Medio (km ³)	Excedencia a +0.3 m (km ³)
20	57.5	9.9	3	-2.6	-0.6	-1.5	80.5	17.25

Clima

Según García (1988), el clima para la región donde se localiza el área de estudio es de tipo Aw 2(e), es decir, cálido subhúmedo, con régimen de lluvias en verano y en invierno, distribuyéndose en la llanura costera hasta una altitud máxima de 1000m.

En esta región la temperatura promedio del mes más frío es de 18°C y la media anual mayor a 22°C. y se presentan dos estaciones lluviosas separadas por una corta temporada seca en el verano y una larga de noviembre a abril.

El porcentaje de precipitación invernal se encuentra entre 5% y 10.2% y la temperatura ambiente oscila entre 33.5°C en los meses de julio, agosto y septiembre, mientras que en enero es de 10°C.

La relación precipitación-temperatura tiene un valor mayor a 43.2 y menor a 55.3; el porcentaje de precipitación invernal es menor a 5% del total anual; razón por la cual se le considera como un régimen de lluvias intermedio.

Así mismo, la precipitación media es de 1287,0mm y el período de lluvias abarca de junio a octubre con un volumen de 932,6mm (72,46% del total anual). De noviembre a mayo se registra el restante 27,54% del total anual (354,4mm). El mes más lluvioso es septiembre con 282,8mm, mientras que los meses de menor lluvia son de diciembre a febrero con 35,43mm de precipitación mensual en promedio.

Volumen promedio (m³)

El volumen se rige por la dinámica de las mareas, consecuentemente, para calcular el volumen aproximado la laguna Tampamachoco, debe tomarse en cuenta el efecto de la marea, que es del orden 15-30cm para el Golfo de México, a excepción de aquellas mareas vivas, por lo que en promedio existe un desplazamiento de agua de 3,2 millones de metros cúbicos. El volumen se ve influenciado además de los diferentes escurrimientos pluviales, la comunicación indirecta de la laguna de Tamiahua a través de los canales y la estrechez de la comunicación entre la laguna y el estuario, lo que genera que las corrientes a través de este canal sean considerables (Contreras, 1983); por lo tanto, se calcula que la laguna de Tampamachoco tiene un volumen aproximado de 80.5 millones de metros cúbicos.

Composición de los sedimentos.

Los sedimentos colectados en Tampamachoco varían de arenas muy finas a limos muy finos con transición a arcillas (3.0 Ø - 9.0 Ø) muy mal clasificados. Estos conjuntos de sedimentos presentan comportamientos bimodales en su distribución, siendo esto resultado de las mezclas de arenas fluviales y/o litorales con lodos lagunares. Su ubicación dentro del diagrama ternario de Shepard, ocupa grupos como arenas arcillosas, limos arcillosos y limos areno arcillosos.

Las arenas se localizan en las partes este y oeste de la laguna, en bajos de arenas con fragmentos de conchas y materia vegetal, denotando intensos períodos de azolvamiento que han servido como sustrato a la vegetación de mangle. Por otro lado los sedimentos limo-arcillosos se encuentran en el fondo lagunar, en el canal que comunica con la laguna de Tamiahua y hacia su desembocadura con el río Tuxpan, en el estero Jácome.

Velocidad de corrientes en la Laguna de Tampamachoco

Durante el transcurso de la medición efectuada durante 2007 por el Departamento de Oceanografía de la CFE, se presentaron velocidades de corriente de baja intensidad, con un valor medio de 0.126 m/s y máximo de hasta 0.38 cm/s, con una desviación estándar de 0.05 cm/s.

En la Tabla V-2 se presentan estos valores. Cabe mencionar que durante este periodo de registros se manifestó la presencia del Huracán Dean por la zona. A pesar de la presencia de este fenómeno meteorológico, en la corriente no se observaron cambios relevantes.

Haciendo el conteo de la distribución de velocidades, se determinó que dominaron las corrientes de 10 a 15cm/s con el 44.43 % de frecuencia, seguidas por las corrientes de 5 a 10 y de 15 a 20cm/s con 23.86 y 15.23% respectivamente.

Las mayores velocidades se tienen en los intervalos de 35 a 40cm/s con el 0.06%, para el de 30 a 35cm/s se tiene el 0.72%, el de 25 a 30cm/s el 2.69% y para el intervalo 20 a 25cm/s con el 6.75%. Las velocidades menores de 5cm/s se registran en 6.25%.

Tabla V-2. Velocidad y Dirección de Corriente y Niveles de Marea, Laguna de Tampamachoco, Ver.
(Fuente: Muestreo GEIC-CFE, 2007).

Valor	Velocidad de la corriente (m/s)	Dirección de la corrientes respecto al Norte Geográfico	Profundidad (marea) (metros)
Mínimo	0.02	0	3.901
Medio	0.12	109.1	4.590
Máximo	0.38	359	5.226
Rango	0.37	359	1.325

Dirección de la corriente en la laguna de Tampamachoco

En cuanto a la dirección de la corriente por ser una zona de canal y con influencia de la marea, se presentan los flujos hacia diferentes sectores, dominando la trayectoria hacia el ENE con casi el 21%, seguida de NE con el 14.51 y el SE con 12.68%. También se presentaron velocidades con dirección hacia el E y ESE con casi el 10% para cada sector. El resto de las corrientes se distribuyen en los otros sectores, alcanzando casi el 1% las direcciones totalmente opuestas al flujo principal (Figura V-1).

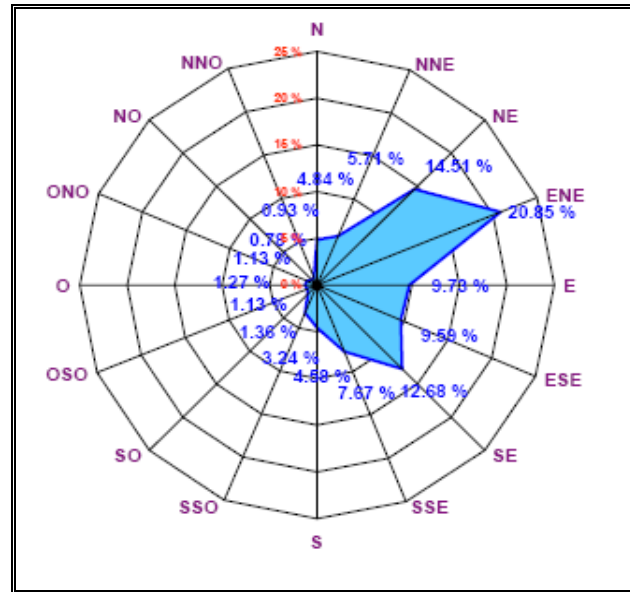


Figura V-1 Rosa de corrientes, Laguna de Tampamachoco, Tuxpan, Ver.

Usos principales

La laguna de Tampamachoco tiene diversos usos, entre los que destacan el desarrollo de la acuicultura, debido a las condiciones de la zona costera, por lo que los pescadores del lugar la aprovechan en forma directa, para la captura de peces o para el cultivo ostrícola en forma natural, ya sea para el autoconsumo o como fuente de ingresos. A continuación se señalan otros usos de la laguna:

- a) Pesca de subsistencia
- b) Pesca comercial
- c) El cuerpo acuático en su totalidad es utilizado como vía de comunicación empleando pequeñas embarcaciones de remo (Fotografía V-1) y fundamentalmente lanchas de motor.



Fotografía V-1 Transporte y pesca en la laguna de Tampamachoco

- d) Como lugar recreativo
- e) Como receptor de las descargas de aguas negras y de tipo industrial

Debido a la alta salinidad el agua de este lugar no es apropiada para riego, excepto en las partes y estaciones del año cuando su salinidad es baja o media.

Sistema hidrográfico

La hidrografía de la región está integrada por ríos, pozos, lagunas, esteros y corrientes menores. Entre los primeros se encuentran los ríos Cazones, Tecolutla, Nautla, Misantla y Cilipa. Las lagunas más importantes son: Tamiahua, Laguna Grande y Chica, San Agustín y por último las corrientes pequeñas que forman los grupos de arroyos paralelos entre un río y otro, muchos de los que se alimentan las lagunas o esteros mencionados.

El área de estudio se encuentra en la vertiente hidrológica del Golfo de México y dentro de la Región Hidrológica (RH 27) Tuxpan-Nautla, la cual colinda al norte y oeste con la RH 26 Pánuco; al sur con la RH 18 Balsas; al sureste con la RH 28 Papaloapan y al este con el Golfo de México.

Particularmente, el área de estudio se ubica en: la cuenca de la laguna de Tamiahua, con una superficie de 3 570,15 km²; la cuenca del río Tuxpan con una superficie de 6 067,81 km² y la Cuenca del río Cazones con una superficie de 3 996,91 km².

El área de estudio abarca las siguientes subcuencas de la laguna Tamiahua: Encarnación con una superficie de 691,80 km², Cerro Azul con una superficie de 429,18 km², Buenavista con una superficie de 1594,55 km² y Cazones con una superficie de 476,94 km².

Río Tuxpan

El río Tuxpan nace en el estado de Hidalgo con el nombre de río Pantepec a una elevación de 2750 msnm, a 8 km al oeste de Tenango de Doria. En sus inicios recibe las aguas de los ríos Blanco y Pahuatlán que confluyen sobre la corriente principal por la margen derecha a 300 y 200 msnm respectivamente.

El río Tuxpan es de tipo perenne y es utilizado para la navegación, recreación, abastecimiento de agua para el uso doméstico, pecuario y agrícola. También es receptor de aguas residuales.

Aguas abajo y sobre el margen izquierdo concurren los arroyos Rancho Nuevo y Beltrán cuyo principal afluente es el arroyo Grande. Estas corrientes descargan al colector entre los 100 y 80 msnm aproximadamente, donde se inicia la planicie costera.

El río Tuxpan desemboca en el Golfo de México en el sitio denominado Barra de Tuxpan, en el que se forma por su margen derecha el estero Jácome.

Volumen de escorrentía por unidad de tiempo

El potencial acuífero de Veracruz está íntimamente relacionado con la permeabilidad y porosidad de los suelos y las rocas presentes en la llanura costera del Golfo Norte; debido a estas características, el potencial acuífero es menor ya que las unidades más abundantes son las de material rocoso con permeabilidad baja integradas por lutitas y areniscas del Terciario que datan

desde el Paleoceno hasta el Oligoceno. Los gastos que se pueden extraer son reducidos debido a que los estratos de lutitas y areniscas son impermeables.

El comportamiento geohidrológico en la zona del proyecto se presenta con un coeficiente de escurrimiento del 5 al 10%.

Velocidad de corrientes en el río Tuxpan

De acuerdo a los datos obtenidos por el Departamento de Oceanografía de la GEIC-CFE durante 2007, en el segmento del río Tuxpan correspondiente al área de desembocadura, se presentan velocidades de corriente de alta intensidad, con un valor medio de 0.39m/s y máximo de hasta 1.038m/s, con una desviación estándar de 0.20 m/s. En la Tabla V-4 se presentan estos valores. Cabe mencionar que durante este periodo de registros, se presentó un evento extraordinario, con un incremento en el flujo y la velocidad de la corriente del río a consecuencia del paso del huracán Dean por la zona. Durante la presencia del fenómeno meteorológico el día 22 de agosto de 2007, el comportamiento de velocidad de la corriente del río estuvo oscilando de 0.03 m/s a las 10:30 horas hasta de casi 0.60 m/s para las 15:30 horas, influenciadas principalmente por la fluctuación de la marea. La velocidad máxima que se registró fue para el día 31 de agosto a las 23:45 horas con velocidad de 1.038 m/s, y la mínima que se presentó posterior a ésta fue de 0.25m/s a las 16:45 horas del día 01 de septiembre.

Tabla V-4 Velocidad y Dirección de Corriente y Niveles de Marea. Río Tuxpan, Ver. (Fuente: Muestreo GEIC-CFE, 2007)

Valor	Velocidad de la corriente (cm/s)	Dirección de la corrientes respecto al Norte Geográfico	Profundidad (marea) (metros)
Mínimo		0	-4.123
Medio	0.395	59.4	-4.600
Máximo	1.038	335	-5.371
Rango	1.034	335	-1.248

Mediante un conteo de distribución de velocidades, se determinó que predominaron las corrientes de 20 a 30cm/s con el 24.75% de frecuencia, seguidas por las corrientes de 0.30 a 0.40 y 0.10 a 0.20 m/s, en orden de importancia, con porcentajes de ocurrencia de 17.87 y 13.13% respectivamente. De acuerdo al orden de magnitud las mayores velocidades se tienen en los intervalos de 70 a 80 con el 6.5%, para el de 0.80 a 0.90 se tiene el 2.28%, el de 0.90 a 1.00 el 1.3% y para el intervalo 1.00 a 1.10m/s con el 0.14%.

Dirección de la corriente en el río Tuxpan

En la Figura V-2 se presenta una síntesis de los resultados tabulares correspondientes a la dirección de la corriente obtenida durante el periodo de registros efectuado durante 2007, encontrándose un valor medio de 59.4° perteneciente al sector NE. Este resultado de la dirección, concuerda con la dirección principal del flujo del río hacia la descarga al mar.

Durante el periodo de registros, se detectó una dirección del flujo predominante hacia el ENE (Este-Noreste) con más del 62% de los datos adquiridos, siguiéndole en importancia las que van hacia el NE y posteriormente las del E con con poco más del 35% y 1%, respectivamente, para un total entre estas tres direcciones de casi el 100% de los datos recabados. En definitiva, destacan las direcciones del cuadrante superior derecho, con una ausencia notoria de todos los demás sectores de dirección.

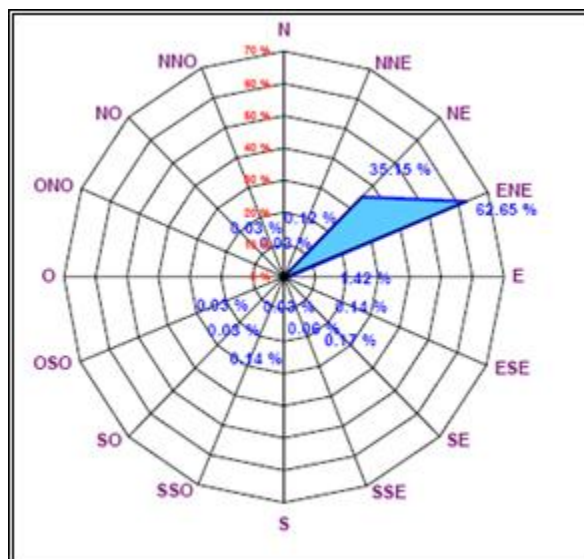


Figura V-2 Rosa de corrientes, río Tuxpan, Ver

Aprovechamiento

A lo largo de la cuenca del río Tuxpan se encuentran diferentes pueblos e industrias que utilizan las aguas del río: para uso doméstico, pecuario, riego, recreativo, para descargas de desechos y como zona navegable. Para riego, la calidad es aceptable en general, con algunas limitaciones en ciertos lugares donde los cultivos deben de ser moderadamente tolerantes a las sales. Este recurso es aprovechado por medio de bordos y pequeñas presas o en forma directa del río.

Descargas residuales

De acuerdo a la información obtenida por la Comisión Nacional de Agua, las descargas residuales que recibe la cuenca del río Tuxpan son de tipo industrial y de servicios municipales (Tabla V-5). Dentro del primer tipo, las de PEMEX y de

la Sociedad Cooperativa de Astilleros de Tuxpan son las más importantes. No todos los desechos son vertidos directamente al río, gran parte de ellos son depositados en ríos, esteros y lagunas que se comunican parcial o totalmente con la cuenca.

Tabla V-5 Establecimientos que descargan sus aguas residuales en el río Tuxpan

No	Nombre o razón social	Lugar de descarga	Tipo
1	PEMEX tanque deshidratador No. 1	Jaliapa, Castillo de Teayo (río las Cañas)	Industrial
2	Junta Federal de Agua Potable y Alcantarillado	Castillo de Teayo (río las Cañas)	Servicios municipales
3	La Manta de Tampamachoco	Río Tuxpan	Venta de pescado
4	Sistema Federal de Agua Potable y Alcantarillado	Estero la Calzada	Servicios municipales
5	Frigorífico de Tuxpan	Río Tuxpan	Matanza de ganado
6	Gasolinera Rafael Díaz	Estero de Tenechaco	Gasolinera
7	Reclusorio Regional	Río Tuxpan	Servicios municipales
8	Fraccionamiento Jardines de Tuxpan	Río Tuxpan	Servicios municipales
9	Terminales marítimas	Estero de Tampamachoco	Servicios municipales
10	Sociedad Cooperativa de Producción Pesquera de Tuxpan, S.C.L	Río Tuxpan	Pesca marítima y de venta
11	Sociedad Cooperativa de Astilleros de Tuxpan S.C.L	Río Tuxpan	Reparaciones navales
12	Embotelladora Mexicana de Tampico	Río Tuxpan	Elaboración de refrescos embotellados
13	Parque industrial de Tuxpan (Fomdeport)	Río Tuxpan	Parque industrial
14	Hielera de Tuxpan	Río Tuxpan	Fábrica de hielo
15	Hotel los Mangos	Río Tuxpan	Servicios municipales
16	PEMEX Terminales de carga	Río Tuxpan	Almacenamiento de petróleo crudo y sus derivados

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

Frente Marino de la Desembocadura del Río Tuxpan

La extensión marina del área de estudio comprende una porción de la plataforma continental entre los 0 y -25 msnm en promedio que abarca una porción de sustrato marino arenosos con presencia aislada de arrecifes de coral, la condición más evidente es la de una elevada homogeneidad espacial de las condiciones físicas y químicas con excepción de las áreas de descarga de los ríos.

La fisiografía costera del área de estudio presenta únicamente costas arenosas con una suave pendiente, en la parte norte, destaca la presencia de una barra arenosa que sirve de margen exterior para la laguna costera de Tampamachoco. Esta barra se ve interrumpida en las bocas de Tampachiche y Tuxpan.

Condiciones de marea

El régimen de mareas es regularmente diurno con las siguientes características:

- Pleamar máxima registrada: 0.833 m
- Nivel de pleamar media: 0.833 m
- Nivel medio del mar: 0.000 m
- Nivel de la marea media: -0.033 m
- Nivel de bajamar media: -0.284 m
- Bajamar mínima registrada: -0.782 m

Aunque la altura de mareas es pequeña a lo largo del golfo (<0.5m en promedio), es importante en las zonas de mezcla de ambientes estuarinos con movimiento de agua y sedimentos, particularmente en las desembocaduras fluviales, los esteros, brazos deltaicos y bocas de lagunas.

Condiciones atmosféricas

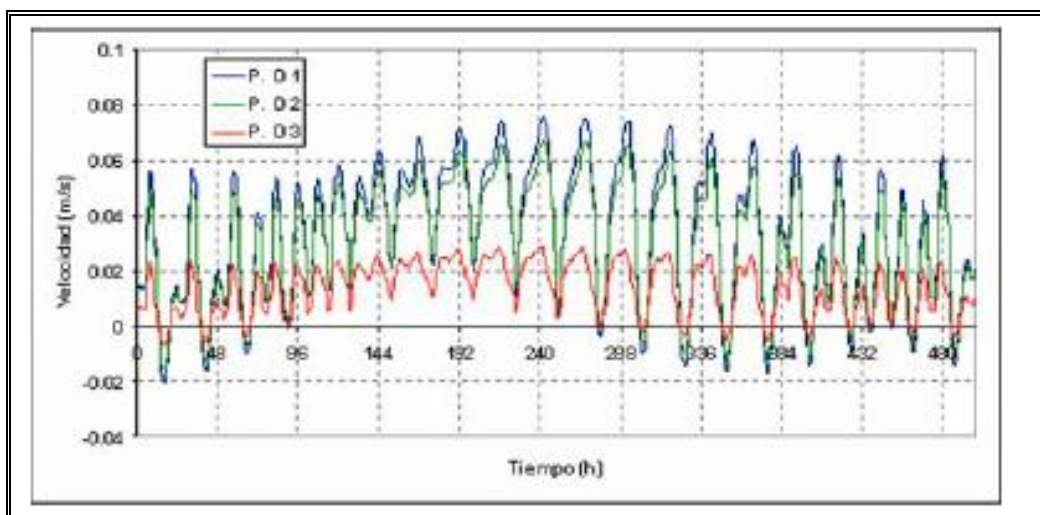
El golfo constituye un área favorable en el desarrollo de ciclones tropicales en el verano, mismos que son acompañados de oleaje y mareas de tormenta. Aproximadamente el 35% de los ciclones que se originan en el mar Caribe afectan a las costas de México (Ortiz-Pérez *et al.*, 1996).

Los vientos dominantes son las oleadas o rachas constantes de los alisios que provienen del sector nororiental durante todo el año, generando olas con períodos típicos de entre cinco y siete segundos, cuyas crestas oscilan alrededor de 1.5 m de altura. De esta forma, el oleaje incide predominantemente del este-noreste con una frecuencia de un poco más del 60% del total anual.

Hidrodinámica lagunar y estuarina. La condición hidrodinámica está directamente influenciada por la descarga del río Tuxpan y en menor medida por la variación de la señal de marea y su interacción con la laguna.

Como se muestra en los resultados definidos en tres puntos de observación las corrientes generadas por la descarga del río definen la condición de aporte y se refleja en las variaciones de velocidad a lo largo del tiempo ya que las mayores velocidades y volúmenes de agua se dan para la condición de refluo.

En el tramo entre la entrada del río y el paso a la laguna de Tampamachoco las velocidades máximas van de 0.062 a 0.025 m/s (Grafica V-1).



Gráfica V-1 Velocidades calculadas mediante modelado hidrodinámico en puntos de control de paso. (Fuente: Muestreo PEMEX-Refinación, 2007).

En la Figura V-3 se presenta el patrón de corrientes para la condición de pleamar durante 2007. En esta condición el rango de velocidades oscila entre 0.01 y 0.10m/s, las máximas magnitudes de velocidad se observan en la boca de comunicación entre la laguna y el puerto así como en el área de influencia del río aguas arriba del puerto; en el área del canal de entrada a la laguna las magnitudes de corriente varían de 0.02 a 0.03m/s. Este rango de velocidades corresponde a la condición de máxima influencia de la marea al interior del puerto que es cuando se tiene la mayor amplitud de marea del registro simulado (marea viva).

Por el cambio de pendiente en la curva de propagación de marea (entrante a saliente), se observa que en ese instante de tiempo las bajas velocidades registradas en la porción del río entre la desembocadura y el acceso a la laguna favorecen que parte del flujo de agua que se propaga (con mayor velocidad) del río hacia el mar sea re direccionado hacia la laguna incrementando las velocidades de corriente y el nivel de superficie libre en esa región. Las velocidades de corriente que se propagan del río y que son mayores que las generadas por marea, se encausan para la condición de marea saliente mostrada en la Figura V-4 en general se observa un incremento en las velocidades en la porción del río entre la desembocadura y la laguna (0.04 a 0.7

m) debido a que las corrientes generadas por la descarga del gasto se incrementan por la condición de marea que está en fase de saliente.

Otro aspecto importante es que bajo esta condición se delimita un canal de refluo desde la zona de la laguna hasta la desembocadura de las escolleras donde claramente el rango de velocidades es mayor que el generado por la corriente del río. En la Figura V-5 se observa la formación de dicho canal de refluo, el cual se distribuye por el canal principal de navegación en el puerto y se encausa hacia la escollera norte, situación por la cual en la zona de proyecto las velocidades son menores, pues ésta queda confinada por el canal.

El patrón de corrientes en la zona de estudio para la condición de bajamar (Figura V-5) está totalmente dominado por la descarga del río. A pesar de que la marea cambia de fase (saliente a entrante), las corrientes netas siguen teniendo dirección de refluo, es decir el sistema sigue exportando agua, pues el volumen importado por el efecto de la marea hacia el río es poco significativo comparado con el que está exportando resultado de la descarga del río. Como se muestra en la Figura V-5 el rango de velocidades que se desarrolla en el canal principal alcanza 0.05 m/s. Bajo estas circunstancias se tiene la menor influencia de la laguna en el patrón de circulación del sistema.

En el caso de marea entrante (Figuras V-6 a 10), las velocidades desarrolladas por la penetración de la onda de marea son del orden de 0.02m/s, que comparadas con las velocidades que se generan aguas arriba por efecto del río (0.05m/s) resultan 40% menores a éstas. Esta interacción de corrientes resulta en una convergencia de flujos justo en el canal de acceso a la laguna, tiempo en el cual nuevamente el río vuelve a direccionar el flujo hacia la laguna, incrementando las velocidades en esa región.

La convergencia de flujos permanece por 4 horas, después de este tiempo el sistema nuevamente vuelve a exportar agua.

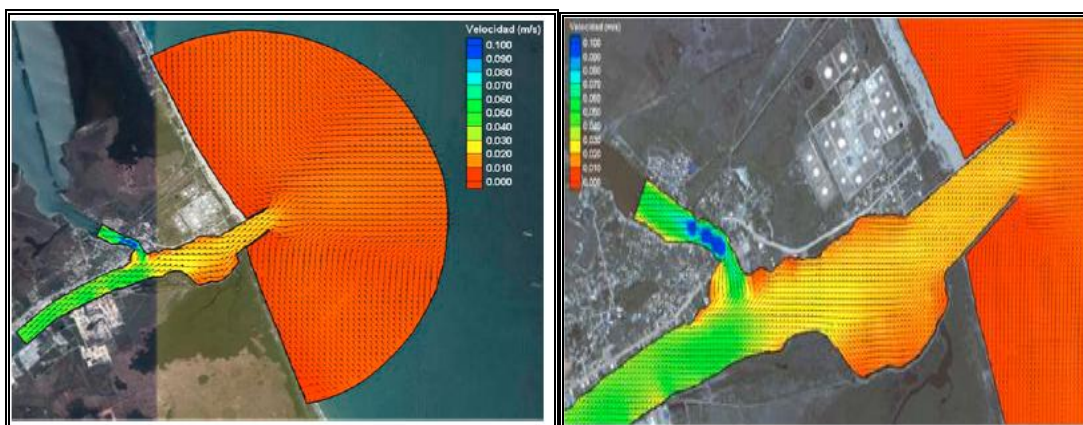


Figura V-3

Figura V-4

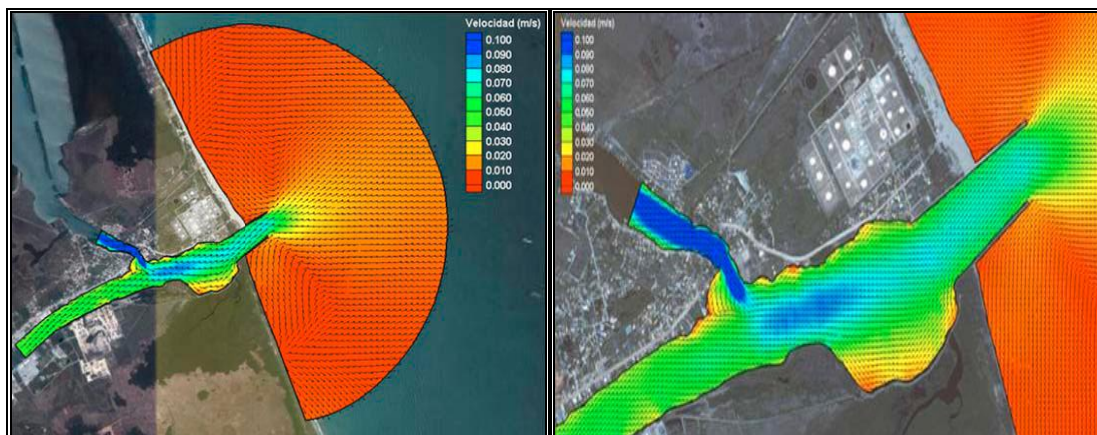


Figura V-5

Figura V-6

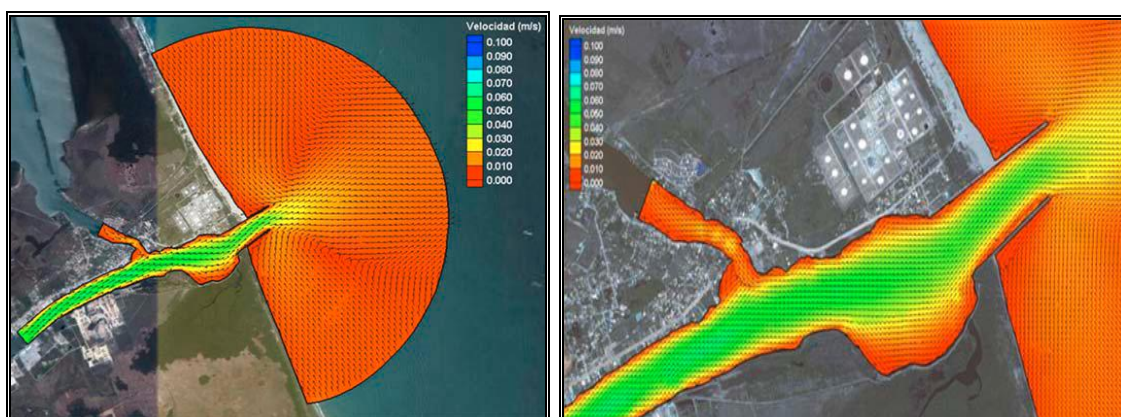


Figura V-7

Figura V-8

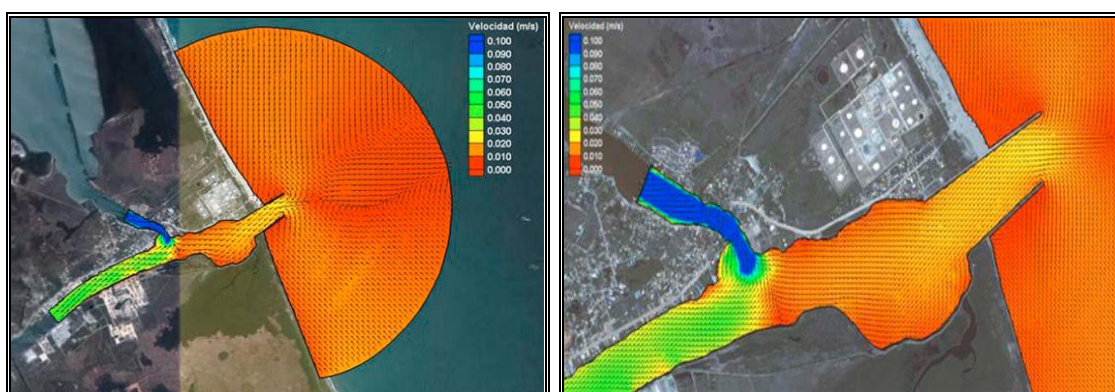


Figura V-9

Figura V-10

(Fuente: Muestreo PEMEX-Refinación ,2007).

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

VI. ESTADO ACTUAL DE LA LAGUNA DE TAMPAMACHOCO Y DESEMBOCADURA DEL RIO TUXPAN

El sistema costero lagunar conformado por la desembocadura del río Tuxpan, la laguna de Tampamachoco y la zona costera asociada donde existe influencia de la descarga continental, ha sido sometido a cambios sustanciales en las características de las comunidades originales terrestres y acuáticas, estructura y composición florística y faunística, y condiciones topobatiométricas de los cuerpos lagunares y cauce del río Tuxpan, como consecuencia de diversos procesos antropogénicos desde los tiempos prehispánicos, cuando Tuxpan surge como poblado sobre la margen derecha del río conocido como Pantepec. Tiempo después las inundaciones obligaron a que se trasladara a su actual localización durante el siglo XVIII (GEIC-CFE, 2007).

Debido al asentamiento en 1908 de las instalaciones petroleras que son hoy propiedad de PEMEX, se originó un crecimiento lineal al cauce del río, inducido por el desarrollo portuario.

El desarrollo de los núcleos humanos en el área de estudio comprende las siguientes etapas históricas:

- En 1908 inició la operación de las primeras instalaciones petroleras en el área de estudio, y el desarrollo incipiente de la actividad portuaria a granel.
- En 1938 la Isla de los Potreros estaba deshabitada, así que se adquirió en su totalidad para instalar la terminal marítima de PEMEX, lo cual ante la ausencia de normatividad ambiental no presentó ningún problema en cuanto a los usos de suelo.
- Para 1952 se instaló la terminal marítima y se convirtió en un polo de atracción. En sus cercanías aparecieron asentamientos humanos, en la actualidad el desarrollo urbano es intenso, debido a movimientos constantes de población.
- En 1985 inició la construcción de la primera etapa de la termoeléctrica “Adolfo López Mateos”, la cual inicia operaciones el 27 de septiembre de 1989, continuando su ampliación hasta el año 1996, con lo cual existió un desarrollo económico para la población asentada en las inmediaciones del área de estudio.
- Por otra parte, se construyó en 1989 la colonia Franco Cruz Hernández para trabajadores de PEMEX-Refinación, totalmente consolidada en la actualidad. Actualmente en el entorno de la terminal existe una gran presión para la ocupación de usos urbanos de manera ilícita, originándose que hacia el poniente la tendencia de crecimiento de la colonia Tampamachoco se esté dando sobre terrenos de PEMEX-Refinación.

Al crecimiento urbano e industrial se añade la actividad agropecuaria en el grupo de mayor impacto, puesto que desde 1960, ha sido una actividad preponderante en la región, por lo que se han eliminado grandes extensiones de terrenos forestales, particularmente de selva mediana subperennifolia, la cual ha sido totalmente reemplazada por pastizales, cultivos y plantaciones, así como vegetación secundaria en los márgenes del río y la laguna.

Las demás comunidades vegetales originales también han sido drásticamente afectadas, no obstante aún se mantienen relictos con diferentes grados de perturbación.

Respecto a los recursos pesqueros, si bien no tiene el mismo impacto en valor, sí tiene una mayor connotación por el importante número de familias que dependen directamente de ella; a pesar del esfuerzo registrado por parte del municipio de Tuxpan en los últimos años, mantiene un rezago técnico y financiero aunado a una sobreexplotación del recurso y deterioro evidente del sistema lagunar.

Actualmente la producción ribereña enfrenta serios problemas de descapitalización y se nota una ausencia de intereses comunes y de organización entre los pescadores, que les impide ser sujetos de crédito y acceder a otro tipo de beneficios. Además, la mayoría trabaja aún con antiguas técnicas de captura y manejo, desconociendo los estándares de calidad en los productos y las posibilidades de tratamiento y procesamiento que les permitirá venderlos en mejores condiciones y, en algunos casos, seguir operando.

Todo diagnóstico de la actividad obliga a señalar que la presencia de la paraestatal PEMEX en Tuxpan cambió el panorama pesquero en forma sustancial. Esto ha tenido implicaciones de orden biológico, productivo y social.

Directamente al embalse se drenan descargas de instalaciones de PEMEX, las aguas negras de la unidad habitacional de PEMEX situada en la margen oriente del estero de la Mata. (Fotografía VI-1)



Fotografía VI-1 Instalaciones de PEMEX en la Isla de los Potreros, Tuxpan

Por otra parte también se reporta que las descargas residuales que recibe la cuenca del río Tuxpan en la zona de influencia del estuario y en la comunicación con la laguna son de tipo industrial derivadas del área de muelles y servicios de empresas de construcciones petroleras y de servicios municipales lo cual trajo como consecuencia la delimitación de áreas restringidas a la pesca.

Algunas de estas alteraciones son atribuidas a la operación de la central termoeléctrica “Adolfo López Mateos”, llamada comúnmente central termoeléctrica Tuxpan (CTT) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que se encuentra ubicada a 18 km de la Ciudad de Tuxpan, Veracruz, a seis kilómetros al norte de la desembocadura del río Tuxpan (Fotografía VI-2)



Fotografía VI-2 Panorámica de la CT “Adolfo López Mateos”

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

Diversos medios informativos, han reportado con frecuencia, que la contaminación de la laguna se debe a la operación de la CTT la cual vierte de manera operacional o accidental algún tipo de contaminantes capaces de generar daño al ecosistema, sin embargo la emisión de aguas residuales se realiza al mar y no hacia la laguna.

De acuerdo al panorama descrito la aportación de HAPs hacia la laguna de Tampamachoco puede ser originada por diversas fuentes locales o remotas, derivadas de las instalaciones industriales, aporte de la parte superior de la cuenca, aguas residuales de origen urbano, derrames de hidrocarburos así como emisión de gases de combustión.

VII. METODOLOGÍA

VII.1 Periodicidad de colecta y ubicación de estaciones

Se realizaron dos muestreos en la laguna de Tampamachoco, uno durante el mes de marzo de 2009 y otro el mes de agosto del mismo año, con el objeto de obtener muestras en diferentes épocas climáticas (secas y lluvias).

Las siete estaciones del estudio, están distribuidas siguiendo el mismo patrón con el que se establecieron las del estudio de Botello y Calva (1998) en el sistema lagunar de Tampamachoco. La ubicación de las estaciones al interior de la laguna se realizó a lo largo de un curso navegable, debido a lo somero en algunas partes (E1, E2, E3 y E4), adicionalmente se ubicaron tres estaciones en el curso inferior del río Tuxpan, en la boca de la laguna (E5), ribera del estero Tumilco (E6) y área de muelles (E7). El diseño de muestreo se elaboró con la finalidad de evaluar las diferentes áreas de la laguna y una porción del río Tuxpan, cada una de las estaciones se encuentra sujeta a diversas presiones antropogénicas.

La estación 1 del estudio actual corresponde con la estación 2 del estudio de Botello y Calva (1998) y se sitúa en la parte norte de la laguna sobre el canal navegable, donde se presenta la influencia de dos canales, el nuevo y el viejo, con aproximadamente 4m de profundidad que se enlazan con la barra de Galindo y la laguna de Tamiahua, por lo que es probable encontrar una acumulación de hidrocarburos en esta zona. También cabe mencionar que se realizan actividades pesqueras a lo largo del canal, por lo que circulan lanchas de motor en la zona.

Las estaciones 2 y 3 del estudio actual corresponden a las estaciones 3 y 4 del estudio de Botello y Calva (1998) y es el sitio con mayor influencia de la central termoeléctrica, por lo que es probable encontrar una acumulación de hidrocarburos provenientes de esta fuente. En el estudio actual ambas estaciones se colocaron a lo largo del curso del canal de navegación debido principalmente al azolve del área lagunar, lo cual no permitió que la ubicación de la estación 3 fuera similar a la de la estación 4 del estudio anterior. Otra fuente es la presencia de lanchas de motor en la zona.

Adicionalmente en este estudio se muestreó la estación 4, donde termina el canal navegable y comienza la boca de la laguna, esta zona se encuentra influenciada por las instalaciones de PEMEX y las descargas de aguas residuales originadas por asentamientos humanos, además del tránsito de lanchas de motor.

La estación 5 y 6 del estudio actual corresponde a la estación 1 del estudio de Botello y Calva (1998) esta área se encuentra influenciada por la zona de descarga de la laguna hacia el río Tuxpan, la escorrentía del mismo río hacia el mar y la influencia del mar hacia la zona estuarina por efecto de las mareas.

También debe mencionarse que esta zona es de intenso tránsito de buques y es el sitio de almacenaje de petróleos mexicanos.

La estación 7 se ubica en el cauce del río Tuxpan, en el área de de muelles, donde se presenta un intenso tránsito de barcos, además de la influencia de las descargas (industriales y domesticas) de la cuenca del río Tuxpan y de diversos asentamientos en la zona.

En cada estación se recolectaron muestras de sedimentos superficiales y de organismos (ostiones y peces). En la figura VII.1-1; se muestra la ubicación de la red de estaciones de muestreo en la laguna y en la tabla VII.1-1 se observa la localización de dichas estaciones y las fuentes probables de HAPs.

Tabla VII.1-1. Ubicación de las estaciones de muestreo y fuentes probables de HAPs.

Estación	Latitud (N)	Longitud (W)	Profundidad (m)	Fuente probable de HAPs
1	21°01.47	97°21.28	-3.38	<ul style="list-style-type: none"> • La influencia de los canales, el nuevo y el viejo que se conectan con la barra de Galindo y la laguna de Tamiahua • Lanchas de motor • Emisiones de gases provenientes de la ciudad de Tuxpan
2	21°0.445	97°21.01	-1.0	<ul style="list-style-type: none"> • La central termoeléctrica • Lanchas de motor • Emisiones de gases provenientes de la ciudad de Tuxpan
3	20°59.51	97°21.47	-3.0	<ul style="list-style-type: none"> • La central termoeléctrica • Lanchas de motor • Emisiones de gases provenientes de la ciudad de Tuxpan
4	20°58.41	97°20.25	-1.0	<ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones de PEMEX • Descargas de aguas residuales • Lanchas de motor • Emisiones de gases provenientes de la ciudad de Tuxpan
5	20°58.10	97°19.41	-3.0	<ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones de PEMEX • Tránsito de buques • Descarga de la laguna • Influencia del mar • Descargas (industriales y domesticas) de la cuenca del río Tuxpan

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

				<ul style="list-style-type: none"> • Emisiones de gases provenientes de la ciudad de Tuxpan
6	20°57.56	97°19.11	-10.0	<ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones de PEMEX • Transito de buques • Descarga de la laguna • Influencia del mar • Descargas (industriales y domesticas) de la cuenca del rio Tuxpan • Emisiones de gases provenientes de la ciudad de Tuxpan
7	20°57.25	97°20.29	-8.0	<ul style="list-style-type: none"> • Transito de barcos • Área de muelles • Descargas (industriales y domesticas) de la cuenca del rio Tuxpan • Emisiones de gases provenientes de la ciudad de Tuxpan

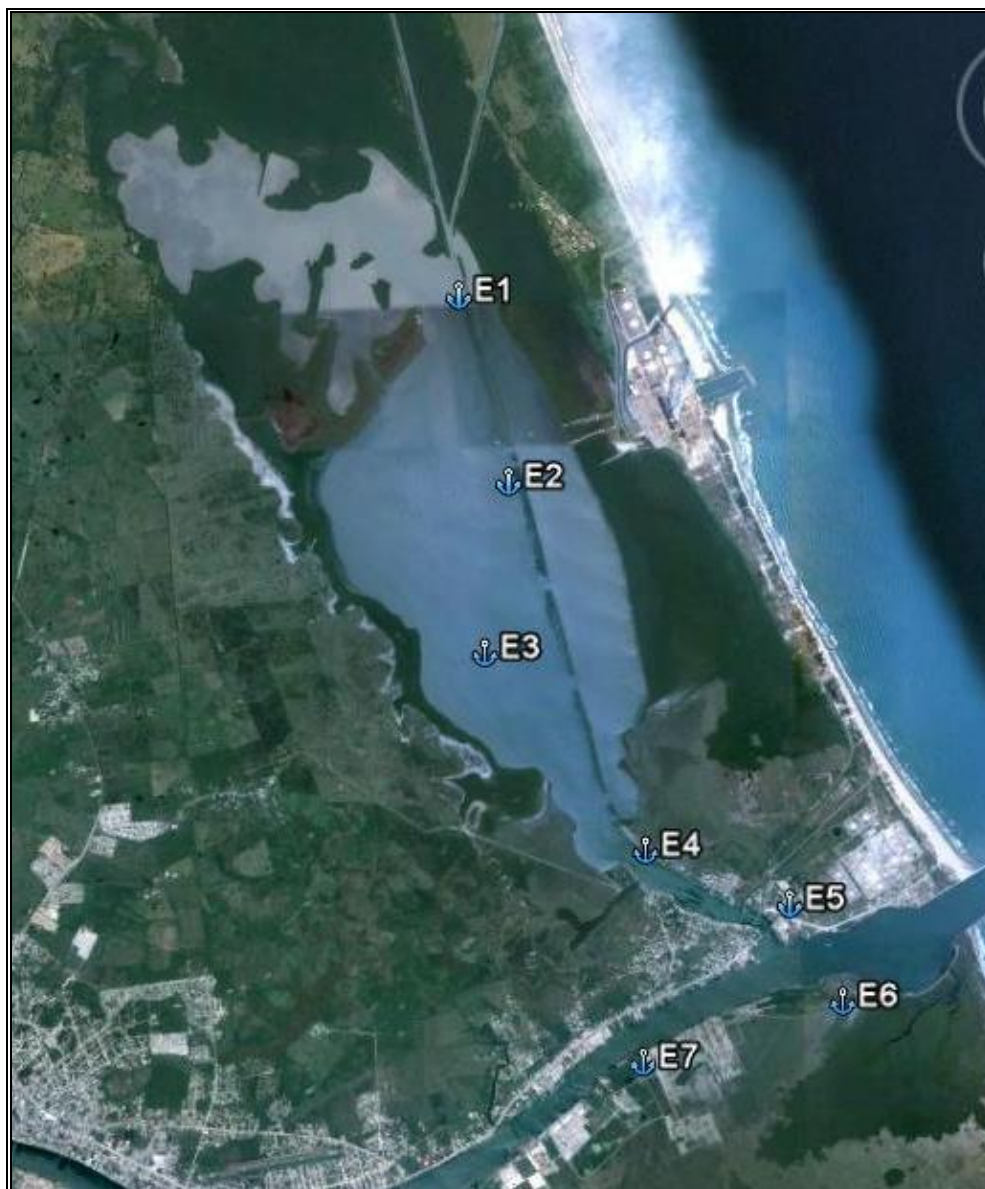


Figura VII.1-1. Localización de las estaciones de muestreo en la laguna de Tampamachoco en Tuxpan, Veracruz.

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

VII. 2 Colecta de Muestras

Colecta de los sedimentos

Los sedimentos se colectaron con una draga Van Veen, obteniendo los 10 primeros centímetros de la columna sedimentaria; con ayuda de una espátula metálica se tomó una porción de la muestra colectada y se colocó en frascos de vidrio tapados con papel aluminio, (previamente lavados con detergente neutro de laboratorio y enjuagados con agua corriente, agua destilada, acetona y hexano, posteriormente se colocaron en una estufa de laboratorio a 200°C durante 18-24 horas y posteriormente se enjuagaron con hexano grado cromatográfico, para evitar contaminación exógena) y finalmente las muestras colectadas en los frascos fueron colocadas en una hielera para ser transportadas al laboratorio donde se conservaron congeladas hasta el momento de su análisis (Fotografía VII.2-1).



Fotografía VII.2-1 Extracción de muestra de sedimento superficial mediante draga

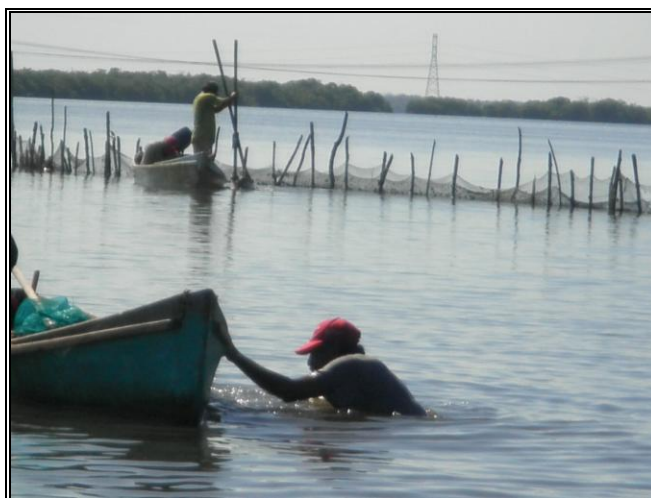
Colecta de los organismos

Los organismos como los moluscos se colectaron manualmente y los peces con artes de pesca (atarraya, agallera); después fueron colocados en frascos de vidrio o bolsas de plástico según el caso y se congelaron hasta su análisis en laboratorio (Fotografía VII.2-2).

De acuerdo a los hábitos alimenticios de cada una de las especies colectadas se clasifican en niveles tróficos (1º, 2º, 3º y 4º orden). Los organismos de 1º orden son filtradores como los ostiones que se alimentan de organismos microscópicos (plancton). Los organismos de 2º orden son los herbívoros, detritívoros y omnívoros, se alimentan de sedimento, detritus, plancton, de 3ª orden que se alimentan de los niveles anteriores, además de detritus y los de 4º orden que son exclusivamente carnívoros, por lo que los contaminantes llegan a ellos biomagnificados, en la tabla VII.2-1 se muestra la clasificación de las especies colectadas de acuerdo a su nivel trófico.

Tabla VII.2-1. Clasificación de las especies colectadas de acuerdo a su nivel trófico.

Nivel trófico	Especies
1º Orden	<i>Crassosrea virginica</i>
2º Orden	<i>Mugil curema</i> <i>Diapterus auratus</i> <i>Hyporhamphus unifasciatus</i> <i>Polydactilus octonemus</i> <i>Oreochromis niloticus</i>
3º Orden	<i>Bagre marinus</i> <i>Cathorops melanopus</i> <i>Ariopsis felis</i> <i>Selene vómer</i> <i>Trichiurus lepturus</i> <i>Eugerres plumieri</i> <i>Archosargus probatocephalus</i> <i>Micropogonias furnieri</i> <i>Bairdiella chrysoura</i> <i>Bairdiella ronchus</i>
4º Orden	<i>Caranx hippos</i> <i>Lutjanus griseus</i> <i>Elops saurus</i> <i>Centropomus pectinatus</i> <i>Centropomus parallelus</i> <i>Oligoplites saurus</i>



Fotografía VII.2-2 Colecta manual de ostiones

Parámetros hidrográficos complementarios:

En los muestreos de marzo y agosto se realizaron mediciones in situ en la columna de agua, en la superficie y en el fondo de: temperatura,

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

salinidad/conductividad, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno y pH con el equipo Hydrolab YSI modelo 556 MPS.

VII.3 Determinación analítica de HAPs en sedimentos y organismos

Análisis de sedimentos

La metodología utilizada para realizar el análisis de HAPs en sedimento fue la propuesta por la UNEP/IOC/IAEA (1992), la cual se muestra de manera resumida en el Diagrama VII.3-1. El primer paso para el análisis fue el secado de los sedimentos húmedos a temperatura de 40-50°C y después se homogenizaron las muestras en un mortero de porcelana y fueron tamizadas a través de una malla de 250 µm.

La extracción se realizó mediante reflujo de solventes orgánicos en dispositivos Soxhlet y para esto se tomó una submuestra del sedimento tamizado de 5g peso seco, con un disco de papel filtro Whatman No. 2, previamente lavado como soporte y se colocó en el equipo Soxhlet, se agregó 250mL de una mezcla de hexano:diclorometano (50:50). El tiempo de extracción fue durante 8 horas. Posteriormente, los extractos fueron reducidos en volumen, en un rotoevaporador hasta obtener aproximadamente 5-8mL.

La limpieza de los extractos se realizó con el objetivo de eliminar los compuestos polares incluidos en la matriz sedimentaria y presentes como interferentes en el análisis, a fin de lograr cromatogramas claros y bien definidos, los extractos fueron percolados en columnas de vidrio (2 cm de diámetro interno por 30 cm de longitud) rellenas con fibra de vidrio + hexano + 5g de sílica + 10g de alúmina, estas dos últimas fueron desactivadas al 5% con agua tridestilada + sulfato de sodio anhidro + hexano. Los extractos se eluyeron en el momento con 20mL de hexano para obtener la fracción 1 (hidrocarburos alifáticos) y la fracción 2 (HAPs) que son el objeto de este estudio, se obtuvieron eluyendo con 20ml de una mezcla hexano:diclorometano (8:2) + 20mL de una mezcla hexano:diclorometano (50:50). Las fracciones obtenidas se evaporaron en un rotaevaporador hasta un volumen de 2-5mL y los extractos se trasvasaron a viales y con nitrógeno de alta pureza se llevó a sequedad. Finalmente se analizaron por cromatografía de gases capilar de alta resolución, dicho procedimiento se describe más adelante.

Como control de calidad se incluyó, el análisis de blancos de reactivos, de proceso y de solventes (1 por cada 5 muestras problema) y se le realizó el mismo tratamiento que a las muestras analizadas.

Análisis de organismos

La metodología utilizada para realizar el análisis de HAPs en organismos fue la propuesta por UNEP/FAO/IOC/IAEA (1993), la cual se muestra de manera resumida en el diagrama VII.3-2. Como primer paso para el análisis de los organismos se tomaron como mínimo 25 individuos de la misma especie, en el caso de los ostiones y en caso de los peces se realizó una disección de cada organismo para obtener el tejido muscular y en seguida se realizó el secado de

los tejidos a temperatura de 50°C y posteriormente se homogenizaron las muestras en un mortero de porcelana.

La extracción se inició tomando una alícuota de 3g del tejido homogenizado y se colocó en el equipo Soxhlet usando un papel filtro como soporte. El proceso de extracción incluyó un paso de saponificación para eliminar el gran componente lipídico de los tejidos. Para esto se agregaron 250mL de Metanol en un matraz de balón de 500mL y se extrajeron por 8 horas. Posteriormente se les añadieron 20mL de KOH 0.7M + 30mL de agua tridestilada al matraz y se continuó la extracción por 2 horas más.

Luego, los extractos se trasvasaron cuantitativamente hacia embudos de separación de 1L y se añadieron 90mL de hexano cromatográfico, se agitó, y luego de la formación de las dos fases (metanólica y hexánica), se recogió en un balón de 250mL la fase hexánica (superior). Este procedimiento de extracción se repitió 2 veces más en cada caso. Al final, se filtró mediante fibra de vidrio y Na_2SO_4 la porción hexánica en el embudo.

Por último, la fase hexánica se concentró en un rotaevaporador hasta aproximadamente 5mL. Las fases siguientes del análisis correspondieron a la limpieza de los extractos que fue descrita anteriormente para sedimentos y la fase cromatográfica que se describirá más adelante.

VII.4 Determinación de materia orgánica, y análisis granulométrico

El análisis del carbono orgánico se realizó por el método volumétrico, oxidando el carbono del sedimento con un volumen conocido de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) de concentración estándar en ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) (Gaudette *et al.*, 1974).

Se analizaron por duplicado las muestras de sedimentos, para ello se utilizó 0.1g de sedimento seco y tamizado en una malla de 0.2mm, posteriormente se trataron con 5mL de $K_2Cr_2O_7$ 1N, seguido por 10mL de H_2SO_4 concentrado durante 30min. Una vez finalizada la oxidación del carbono en el sedimento, se agregó 100mL de agua destilada, 5mL de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 85%, 0.1g de fluoruro de sodio (NaF) y 5 gotas de indicador de difenilamina ($C_{12}H_{10}NH$), después se tituló con disolución de sulfato ferroso ($FeSO_4$). Se llevó en paralelo la titulación en duplicado de los blancos, usando las mismas cantidades de disoluciones y reactivos. Por último se realizaron los cálculos para determinar el porcentaje de carbono orgánico.

El análisis granulométrico de los sedimentos colectados en cada sitio de muestreo se realizó empleando el equipo Beckman Coulter modelo LS230 (Small Volume Modulo Plus), cuyo fundamento consiste en medir el tamaño de partículas por difracción de un haz de luz láser en un rango de 0.04 hasta 2000 μ m, se utiliza para determinaciones de partículas de sedimentos menos que 2mm, procedentes tanto de sedimentos marinos como de agua dulce. Los sedimentos son tratados previamente con agua oxigenada para eliminar la materia orgánica y posteriormente se realiza el análisis (Laboratorio de sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM).

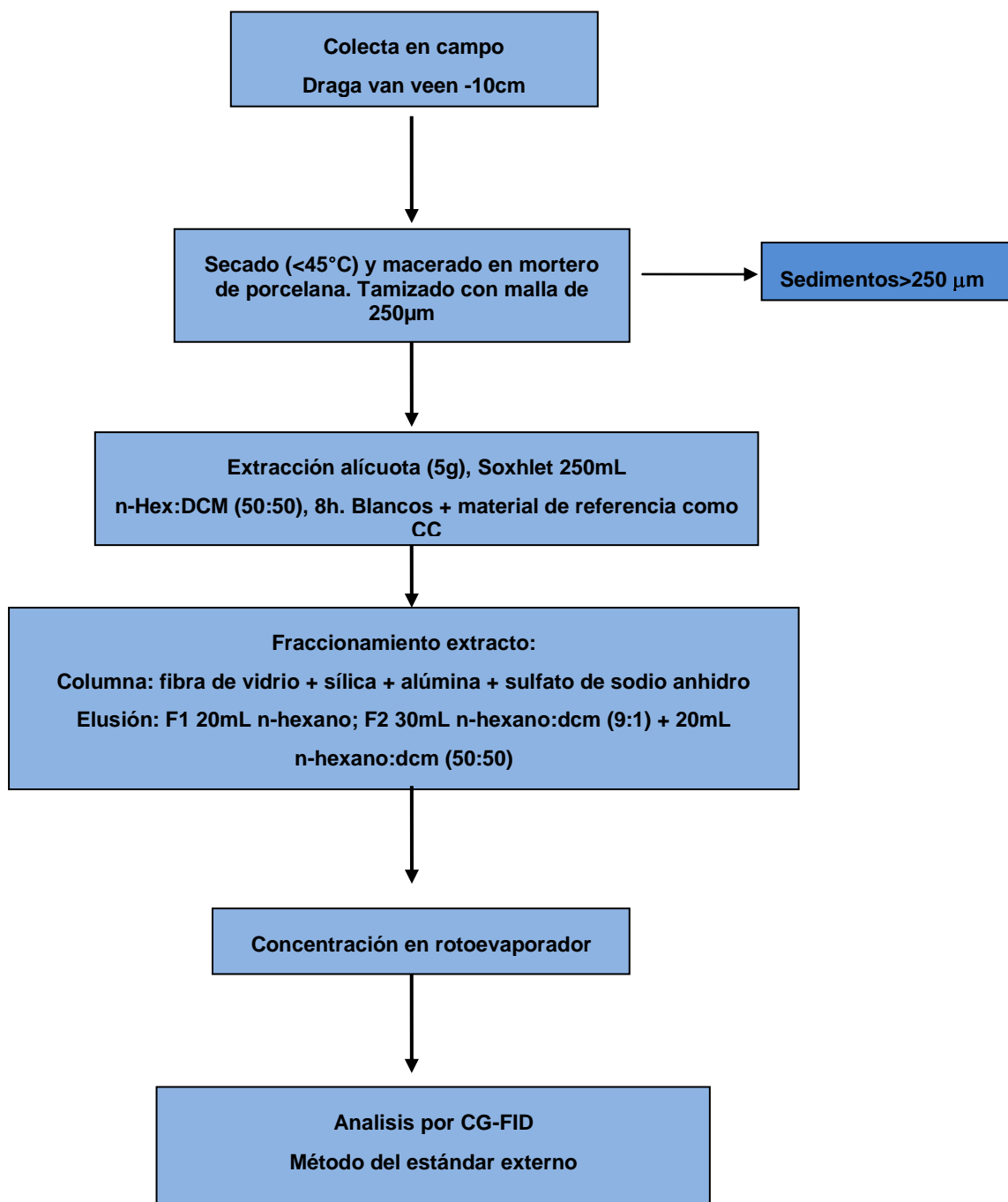


Diagrama VII.3-1. Metodología para el análisis de hidrocarburos del petróleo en muestras de sedimentos superficiales marinos.

(UNEP/IOC/IAEA, 1992).

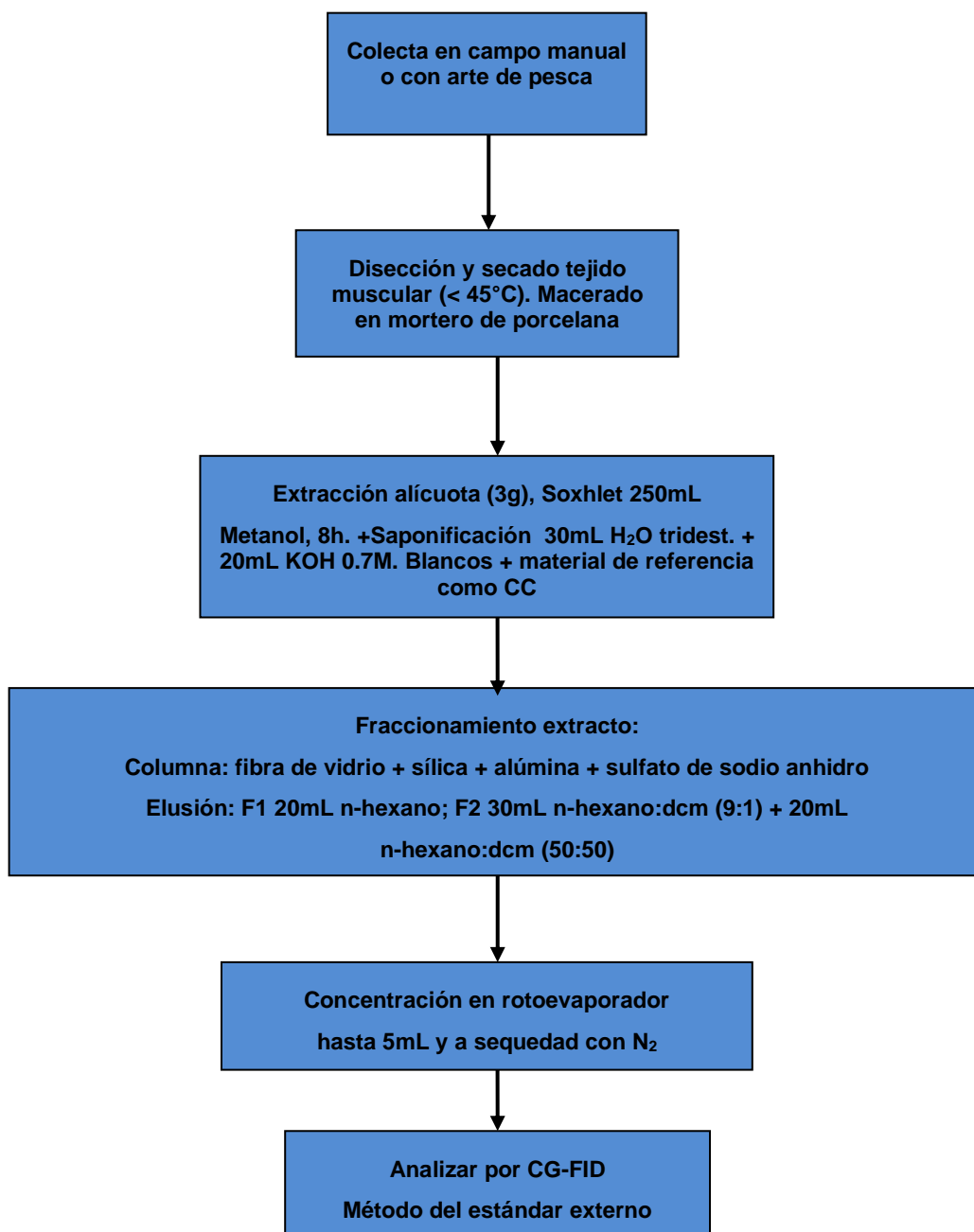


Diagrama VII.3-2. Metodología para el análisis de hidrocarburos del petróleo en muestras de organismos marinos.

(UNEP/IAEA/FAO/IOC, 1993).

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

VII. 5 Determinación de hidrocarburos por medio de cromatografía de gases

La cromatografía de gases (CG) se ha definido como un método físico de separación en el cual los componentes a separar se distribuyen entre dos fases, una de las cuales constituye la fase estacionaria, de gran área superficial, y la otra es un fluido (fase móvil) que pasa a través o a lo largo de la fase estacionaria. Este método se realiza en un cromatógrafo de gases, que consta de diversos componentes como el gas portador, el sistema de inyección de muestra, la columna (generalmente dentro de un horno), y el detector.

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

Análisis cromatográfico

El análisis final para sedimentos y organismos, se realizó en un cromatógrafo de gases marca Hewlett Packard modelo 5890 Serie II, equipado con detector de ionización de llama y columna capilar de 30m de longitud, 0.25mm de diámetro interno, 0.25µm de grosor de capa de fenil metil silicón al 5%. El gas acarreador utilizado fue el helio, el gas auxiliar fue el nitrógeno y los gases usados para la flama del detector FID, fueron aire e hidrógeno en una proporción de 10:1. Las muestras fueron inyectadas en modo splitless y el límite de detección del equipo cromatográfico fue de 0.01µg/g; la cuantificación se hizo mediante el método del estándar externo, realizando una curva de calibración con una mezcla de estándares de 16 compuestos: Naftaleno, Acenaftileno, Acenafteno, Fluoreno, Fenantreno, Antraceno, Fluoranteno, Pireno, Benzo(a)antraceno, Criseno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(k)fluoranteno, Benzo(a)pireno, Indeno(123cd)pireno, Dibenzo(ah)antraceno y Benzo(ghi)perileno.

Las condiciones de operación del cromatógrafo de gases se muestran en la tabla VII.5-1:

Tabla VII.5-1 Condiciones operativas para la cromatografía de gases

Cromatógrafo de gases	Hewlett Packard modelo 5890 Serie II
Detector	Ionización de flama
Columna	Capilar de 30m x 0.25mm (D int) x 0.25 µm de grosor de capa de fenil metil silicón al 5%
Temperatura	Detector: 320°C Inyector: 320°C
Rampa de temperatura	Temperatura inicial: 90°C Tiempo inicial: 0.5 min Rampa 1: 18°C/min Temperatura final: 212°C Tiempo final 1: 3 min Rampa 2: 12°C/min Temperatura final 2: 270°C Tiempo final 2: 7 min Rampa 3: 1.5°C/min Temperatura final 3: 300°C Tiempo final 3: 12 min
Tiempo de corrida	54 min
Gas acarreador	Helio (99.99%) de pureza flujo de 1ml/min
Gas auxiliar	Nitrógeno (99.99%) de pureza flujo de 30ml/min
Gases para el detector	Aire flujo de 300 ml/min Hidrógeno flujo de 30ml/min
Volumen de inyección	1µl, splitless

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

$$\text{Concentración final} = \left(\frac{A_m - A_b}{A_{std}} \right) (C_{std}) \left(\frac{V_{Lstd}}{V_{Lm}} \right) \left(\frac{V_R}{P_m} \right)$$

Donde:

- **Am:** Área de la muestra

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

- **Ab:** Área del blanco
- **Astd:** Área del estándar
- **Cstd:** Concentración del estándar
- **VLstd:** Volumen del estándar
- **VLm:** Volumen de la muestra
- **VR:** Volumen de reconstitución
- **Pm:** Peso de la muestra

La cuantificación se realizó a través de la inyección de los compuestos individuales empleados y verificando el tiempo de retención correspondiente al analito. En la siguiente tabla (VII.5-2) se muestran los tiempos de retención de los HAPs.

Tabla VII.5-2. Tiempos de retención de hidrocarburos policíclicos aromáticos, tomados de un cromatograma estándar.

Compuesto	Nombre corto	Tiempo	Compuesto	Nombre corto	Tiempo
Naftaleno	Nap	5.62	Benzo(a)antraceno	BaA	19.43
Acenaftileno	Acy	7.961	Criseno	Cry	19.62
Acenafteno	Ace	8.263	Benzo(b)fluoranteno	BbF	25.392
Fluoreno	Flu	9.191	Benzo(k)fluoranteno	BkF	25.551
Fenantreno	Phe	11.497	Benzo(a)pireno	BaP	27.565
Antraceno	Ant	11.611	Indeno(123cd)pireno	Ind	36.128
Fluoranteno	Fla	14.735	Dibenzo(ah)antraceno	DahA	36.371
Pireno	Pir	15.349	Benzo(ghi)perileno	BghiP	38.177

Control de proceso

Previamente se introduce al equipo cromatográfico una tabla de calibración de soluciones primarias de 16 HAPs de concentración conocida y preparadas con soluciones independientes, se utiliza una mezcla de estándares certificados marca Chem Service; 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, porciento de recuperación, límite de detección del equipo, límite de

detección de método y cuantificación. Los valores obtenidos se muestran en la tabla VII.5-3.

Controles de calidad utilizados

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

Blanco instrumental: Se trata de una corrida cromatográfica en las condiciones del método cromatográfico del análisis previsto, sin inyección de muestra o solvente, que permitió chequear la presencia o ausencia de impurezas en la columna. Este tipo de examen se realizó después de cada corrida de muestras, o inmediatamente después de una muestra con altos niveles.

Blanco de solvente: Se trata de la inyección de solvente puro (calidad cromatográfica) en el cromatógrafo para comprobar la ausencia de impurezas (o al menos de los analitos de interés). Esta prueba se realizó cada día durante los análisis cromatográficos.

Compuestos de referencia: Se refiere al material o sustancia en el cuál uno o más valores de sus propiedades son suficientemente homogéneos y bien definidos, para ser utilizadas para la calibración de aparatos, la evaluación de un método de medición o para asignar valores a los materiales. Se utilizaron compuestos de referencia de la marca Hewlett Packard para verificar que el equipo se encuentre en buenas condiciones, éstos son una mezcla de compuestos que en un tiempo récord indican cómo funciona el equipo.

Porcentaje de recuperación: Es la proporción de la cantidad de analito, presente en la porción de la muestra o adicionado a ésta, que es cuantificada por el método de ensayo.

Límite de detección del método (MDL): El MDL es definido como la concentración mínima de una sustancia que puede ser medida e informada con un 99% de confianza de que la concentración del analito es > 0 , y que es medida en una matriz determinada que contiene el analito. El procedimiento para la determinación del MDL requiere el análisis de al menos 7 réplicas de una muestra que contiene el analito de interés a un nivel de 1 a 5 veces el nivel de MDL esperado. El MDL mínimo debe estar en el rango 2.5 a 5 veces de señal instrumental /ruido instrumental.

Límite de cuantificación: Es la cantidad más pequeña que podemos reportar con un nivel de incertidumbre aceptable.

Los valores obtenidos de los controles de calidad mencionados se muestran en la tabla VII.5-3. A continuación se presentan los cromatogramas de un estándar, de un blanco y del hexano que se obtuvieron durante el proceso del análisis por CG. (Figuras VII.5-1 a 3).

Tabla VII.5-3 Límites de detección (LMD), de cuantificación (LMC), coeficiente de variación (CV) y curva de calibración de HAPs. Sedimentos y organismos costeros.

Compuesto	LMD ($\mu\text{g/g}$)	LMC ($\mu\text{g/g}$)	CV (%)	Curva de calibración (r, $p < 0.05$)	Porcentaje de Recuperación
Nap	0.01	0.02	4	0.9932	75
Acy	0.01	0.02	11	0.9926	85
Ace	0.01	0.02	7	0.9927	85
Flu	0.01	0.02	9	0.9926	90
Phe	0.01	0.02	18	0.9886	95
Ant	0.01	0.01	11	0.9886	95
Fla	0.01	0.01	14	0.9917	95
Pir	0.01	0.01	8	0.9903	95
BaA	0.01	0.02	14	0.9810	98
Cry	0.01	0.02	17	0.9878	98
BbF	0.01	0.01	14	0.9859	96
BkF	0.01	0.01	15	0.9854	96
BaP	0.01	0.02	16	0.9854	100
Ind	0.01	0.02	17	0.9895	100
DahA	0.01	0.02	16	0.9890	96
BghiP	0.01	0.02	16	0.9895	100

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

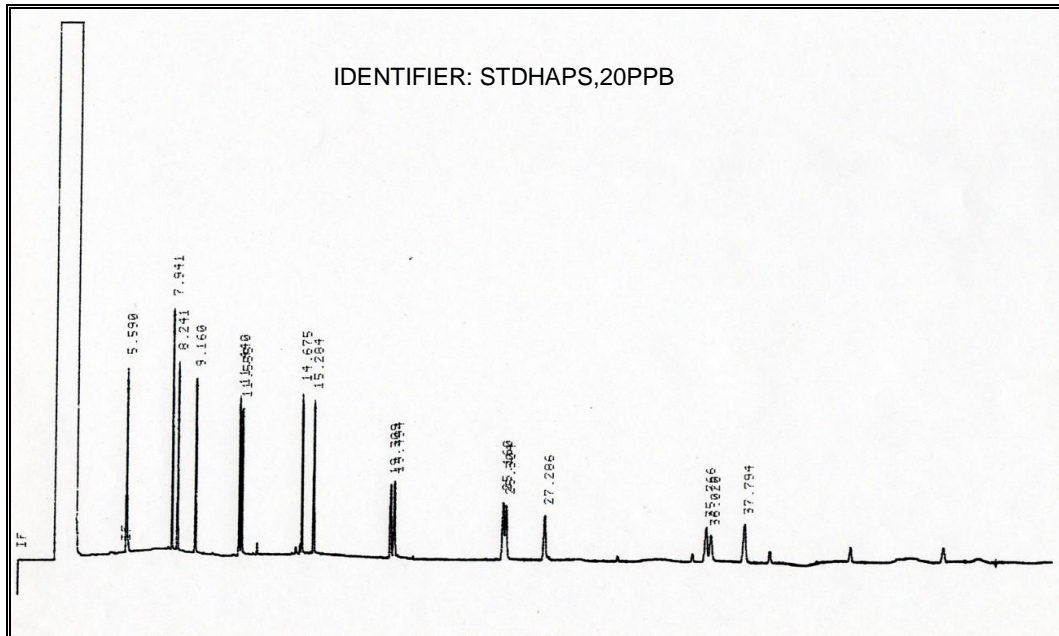


Figura VII.5-1 Cromatograma de un estándar para el análisis de HAPs.



Figura VII.5-2. Cromatograma de un blanco obtenido durante el análisis de HAPs.

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

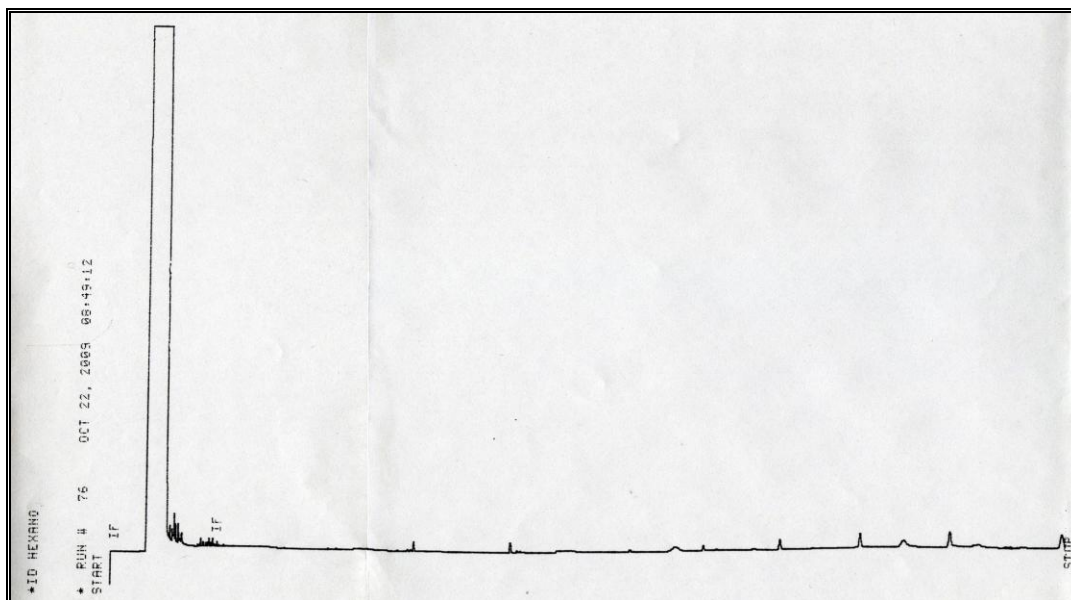


Figura VII.5-3. Cromatograma del hexano utilizado durante el proceso.

VII.6 Análisis estadístico

Las distintas metodologías para describir y comparar estadísticamente los valores obtenidos fueron desarrolladas en el programa statgraphics plus 5.1. A continuación se describen los fundamentos metodológicos de las pruebas efectuadas y se da una explicación detallada de cada una:

Gráficos de caja y bigote. Los diagramas de Caja-Bigotes (boxplots o box and whiskers) son una presentación visual que describe varias características importantes, al mismo tiempo, tales como la dispersión y simetría.

Para su realización se representan los tres cuartiles y los valores mínimo y máximo de los datos, sobre un rectángulo, alineado horizontal o verticalmente.

Una gráfica de este tipo consiste en una caja rectangular, donde los lados más largos muestran el recorrido intercuartílico. Este rectángulo está dividido por un segmento vertical que indica donde se posiciona la mediana y por lo tanto su relación con los cuartiles primero y tercero (el segundo cuartil coincide con la mediana).

Esta caja se ubica a escala sobre un segmento que tiene como extremos los valores mínimo y máximo de la variable. Las líneas que sobresalen de la caja se les llaman bigotes. Estos bigotes tienen un límite de prolongación, de modo que cualquier dato o caso que no se encuentre dentro de este rango es marcado e identificado individualmente.

Dentro de cualquier gráfico de caja y bigote tenemos que:

- **Q₁**, el cuartil primero es el valor mayor que el 25% de los valores de la distribución.
- **Q₂**, el segundo cuartil es, evidentemente, la mediana de la distribución, es el valor de la variable que ocupa el lugar central en un conjunto de datos ordenados.
- **Q₃**, el tercer cuartil, es el valor que sobrepasa al 75% de los valores de la distribución.

Modelo de regresión lineal múltiple. La regresión lineal permite trabajar con una variable a nivel de intervalo o razón, así también se puede comprender la relación de dos o más variables y nos permitirá relacionar mediante ecuaciones, una variable en relación a otras variables.

Este modelo se utilizó para determinar si existe alguna correlación entre la concentración total de HAPs, así como de manera individual los compuestos más abundantes como el criseno y el benzo(a)antraceno como variables dependientes y la MO, arcillas, limos y arenas como variables independientes.

VIII. RESULTADOS

VIII.1 Parámetros físico-químicos

Temperatura

Este parámetro varía durante el ciclo diurno, por época y por localidad; en el muestreo de marzo se registró un intervalo de 25.94 a 27.63°C en superficie y de 24.40 a 27.41°C en el fondo; en las estaciones 6 y 7 si se observó una diferencia entre la superficie y el fondo significativa (1.51 y 2.67°C respectivamente). En el muestreo de agosto la variación térmica osciló entre 26.10 a 29.79°C superficiales y escasas diferencias con el fondo en la mayoría de las estaciones, sin embargo en las estaciones 6 y 7 se registró una diferencia de 4.36 y 4.32°C, respectivamente, entre la superficie y el fondo, lo que hace pensar en la influencia del río de aguas más frías que las marinas más calientes, coadyuvada por el tipo de marea.

Salinidad

En el muestreo realizado durante el mes de marzo la salinidad varió de 36.24 a 23.49 ups en superficie y de 36.26 a 32.30 ups en el fondo. Esta distribución fue resultado de gradientes entre el aporte fluvial y marino, observándose la penetración de la cuña salina, siendo más evidente en las estaciones 6 y 7, registrándose levemente hasta las estaciones 4 y 5. Las mayores salinidades se observaron hacia el interior de la laguna en la estación 1. El muestreo realizado durante el mes de agosto que se considera como época de lluvias, el intervalo salino fue mayor, desde 37.34 a 16.80 ups superficiales, con un gradiente halino consecuencia de la influencia del río; haciéndose ostensible la cuña salina nuevamente en las estaciones 6 y 7 y la condición más salina en la estación 1. Dicho incremento en agosto ha sido resultado de un atraso de la lluvia.

Oxígeno

Dado que este es un parámetro no conservativo, varía durante la hora del día (fotosíntesis-respiración), por la resuspensión de sedimentos con materia orgánica que consume oxígeno en su degradación, e incluso por las descargas de los asentamientos urbanos en las márgenes de la laguna y del río), registrándose de 10.48 (150.3% de saturación) a 3.38mg/L (51.1% de saturación) en superficie y de 7.90 (111.9% de saturación) a 3.10mg/L (47.6% de saturación) en el fondo; esta última condición de hipoxia del fondo se pudo deber a la resuspensión de sedimentos con carga orgánica que consumen el gas en especial en la estación 1, en las estaciones 6 y 7 fue donde se alcanzó una alta sobresaturación superficial (150.3% y 115.7% respectivamente); ambas localidades se ubican en el río. Todas las sobresaturaciones son resultado de una activa fotosíntesis.

En el muestreo de agosto las concentraciones de este gas señalaron menor intervalo de variación; entre 5.08 a 9.65mg/L superficiales con un abatimiento en el fondo de 3.14mg/L (hipoxia) particularmente en las estaciones 6 y 7 a pesar

de que en superficie estas localidades fueron las de mayor sobresaturación (140.4 a 126.2% respectivamente), además de la 4 y 5.

Cabe señalar que los menores contenidos de oxígeno disuelto en el fondo coincidieron con las estaciones del río con menor salinidad, lo que pudo ser resultado de una bajamar (Predicción de mareas González, 2009) con arrastre de materia orgánica procedente de los asentamientos portuarios y urbanos en las márgenes del río.

Potencial de hidrógeno (pH)

En marzo este parámetro varió de 8.28 a 7.80 en superficie y de 8.14 a 7.75 en el fondo; niveles normales para una laguna costera. Los pHs ligeramente más alcalinos se observaron cerca de la boca, consecuencia de la influencia marina. En el muestreo de agosto el intervalo fue de 7.58 a 8.36 superficiales. Destacaron los más bajos en las estaciones 6 y 7 normalmente registrados en aguas fluviales que coincidieron con las salinidades más bajas, contenidos de oxígeno bajos asociados con la bajamar también. En la Tabla V-3 se observan los valores máximos, mínimos y promedio de los parámetros anteriores que se registraron en la laguna de Tampamachoco durante la colecta realizada en marzo y agosto del 2009.

Tabla VIII.1-1. Valores máximos, mínimos y promedio para los parámetros registrados en la laguna de Tampamachoco durante la colecta realizada en el año 2009.

Parámetro		Marzo			Agosto			Unidad
		Max	Min	Prom	Max	Min	Prom	
Temperatura	Sup	27.63	25.94	26.85	29.79	26.10	27.88	°C
	Fondo	27.41	24.4	26	29.14	24.68	25.99	
Salinidad	Sup	36.24	23.49	31.66	37.34	16.80	23.8	UPS
	Fondo	36.26	32.76	34.80	37.60	25.84	34.41	
Oxígeno disuelto	Sup	10.48	3.38	6.03	9.65	5.08	7.42	mg/L
	Fondo	7.91	3.10	5.28	6.12	3.15	4.51	
pH	Sup	7.80	8.28	8.14	8.10	8.36	8.20	Unidades de pH
	Fondo	7.75	8.14	7.96	7.06	8.15	7.79	

La dispersión de partículas químicas en sistemas costeros está regulada por complejas interacciones entre procesos físicos y químicos tales como la circulación costera, la adsorción a partículas, y diferentes procesos de transporte (Gustaffson *et al.*, 1998). Es sabido además, que el destino ambiental de los compuestos orgánicos hidrofóbicos (PCBs, Dioxinas, HAPs, pesticidas, etc.) está determinado, en última instancia, por las características fisicoquímicas de cada

compuesto y del medio que los contiene (salinidad, coeficiente de partición, contenido de materia orgánica, etc) (Baker *et al.*, 1991).

En sedimentos numerosos factores ambientales (oxígeno, disponibilidad de nutrientes, temperatura y pH) afectan las actividades de los microbios, incluyendo su habilidad para degradar HAPs y otros xenobióticos. (Kerr y Capone, 1988).

VIII.2 HAPs identificados y cuantificados en sedimentos.

Los sedimentos superficiales de la laguna de Tampamachoco y el río Tuxpan, se evaluaron durante el 2009 en dos épocas climáticas: secas (marzo) y lluvias (agosto). En la tabla VIII.2-1 se muestran los resultados de los compuestos detectados y no detectados durante el mes de marzo de los 16 HAPs analizados, así como también, los criterios de calidad sedimentaria estimados, establecidos y utilizados internacionalmente para ambientes costeros, los cuales son, la concentración umbral (TEL o ISQG por sus siglas en inglés) a partir de la cual se pueden observar efectos dañinos al bentos provocados por la toxicidad intrínseca que tengan los sedimentos al contener este tipo de contaminantes orgánicos; la concentración a partir de la cual es probable que se ocasionen efectos deletéreos a la comunidad bentónica (ERL por sus siglas en inglés) y la concentración que provoca daños frecuentes al bentos (ERM, por sus siglas en inglés) (Long *et al.*, 1995; CCME, 1999 y Buchman, 2008).

Como se puede observar en la grafica VIII.2-1, la frecuencia de los compuestos detectados fue de 21 (19%) y de los compuestos no detectados fue de 91 (81%) es decir, que la mayoría de los compuestos se encuentran por debajo del límite de detección del método empleado. La estación 1 presentó la mayor cantidad de HAPs detectados (7 compuestos), seguida por la estación 5 (4 compuestos) el resto de las estaciones presentaron menos de 4 compuestos.

Analizando los resultados de cada compuesto identificado durante la colecta de marzo se observó que el Cry (4 anillos) se encontró en todas las estaciones muestreadas, seguido por el BaA (4 anillos) que se encontró en 4 de las estaciones muestreadas. El resto de los compuestos fueron detectados en 2 o menos estaciones o no fueron detectados.

Las concentraciones de los compuestos detectados estuvieron en un rango de 0.01µg/g (la concentración mínima detectable) y de 3.05µg/g (la máxima). Los sitios de colecta con las concentraciones totales más elevadas durante la época de secas fueron: la estación 6 con 3.08µg/g, seguida por la estación 2 con 1.18µg/g, el resto de las estaciones presentaron concentraciones totales en un rango de 0.58 a 0.05µg/g (Gráfica VIII.2-2).

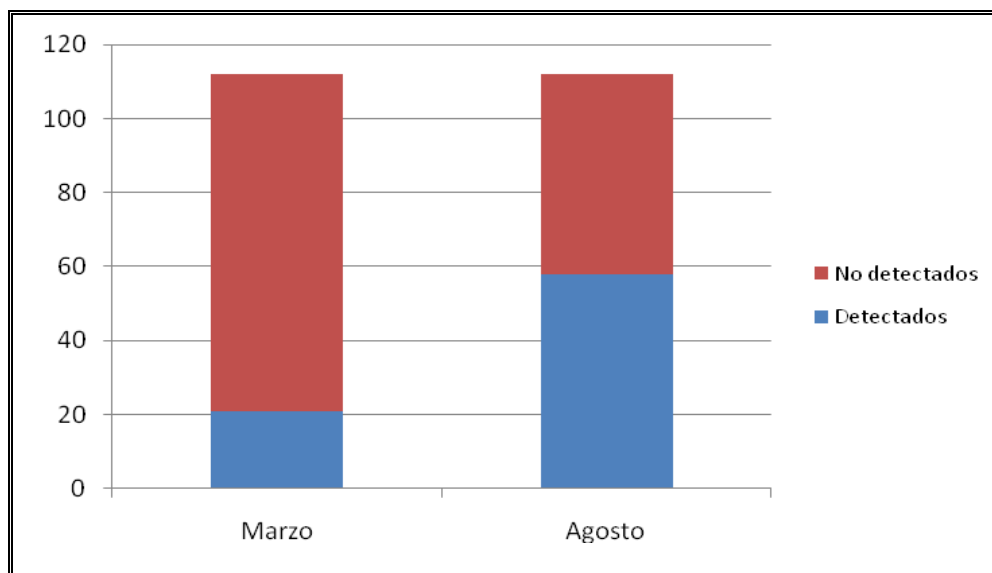
Tabla VIII.2-1. Concentraciones de HAPs en sedimentos superficiales del sistema lagunar Tampamachoco-río Tuxpan, Ver; en marzo, 2009 (valores en µg/g peso seco) y criterios de calidad sedimentaria. En amarillo las concentraciones detectadas.

No. ANILLOS	COMPUESTO	ESTACIONES							ERL	ERM
		1	2	3	4	5	6	7	(Long <i>et al.</i> 1995; Buchman, 2008)	
2	Nap	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.16	2.10
2	Acy	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.04	0.64
2	Ace	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.02	0.50
2	Flu	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.02	0.54
3	Phe	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	0.24	1.50
3	Ant	N.D.	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	0.09	1.10
3	Fla	N.D.	N.D.	N.D.	0.11	0.05	N.D.	N.D.	0.60	5.10
4	Pir	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.67	2.60
4	BaA	0.04	0.84	N.D.	N.D.	0.04	0.03	N.D.	0.26	1.60
4	Cry	0.07	0.34	0.05	0.30	0.06	3.05	0.43	0.38	2.80
4	BbF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	*	*
4	BkF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	*	*
5	BaP	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.43	1.60
5	Ind	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	*	*
5	DahA	0.22	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.13	0.06	0.26
6	BghiP	0.17	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	*	*
CONCENTRACIÓN TOTAL (ΣHAPs)		0.58	1.18	0.05	0.44	0.16	3.08	0.56	4.02	44.8

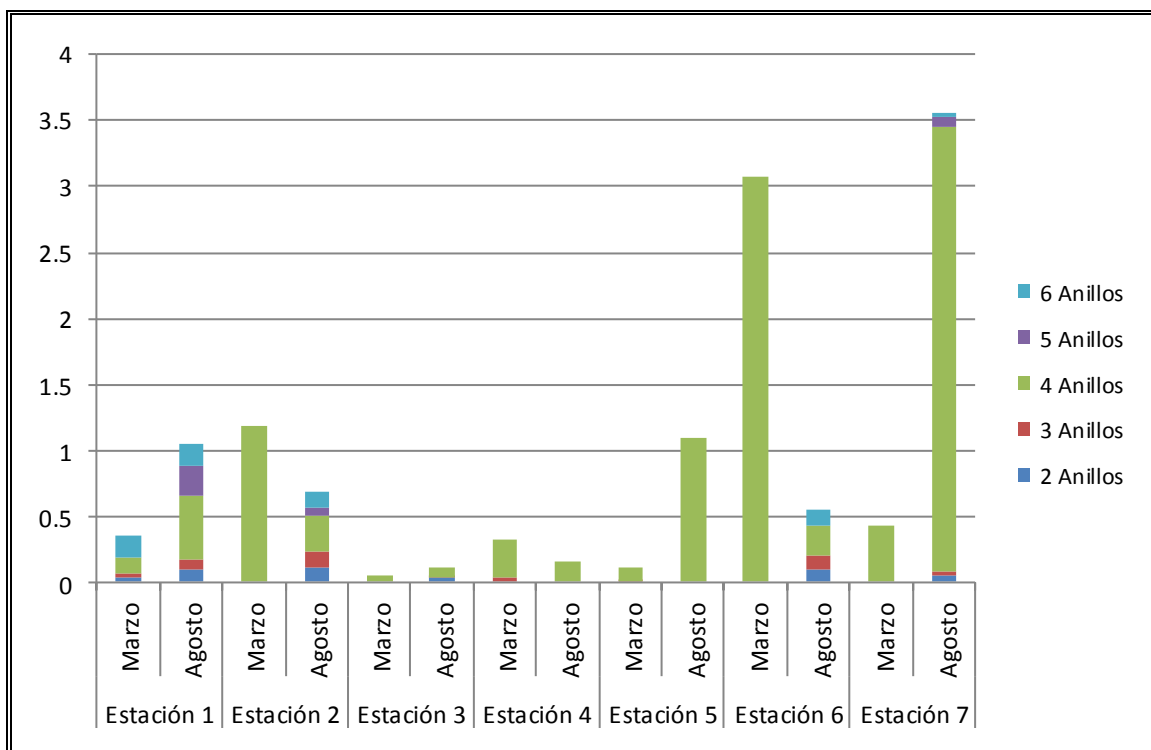
N.D. < 0.01µg/g. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE HAPs: 1.14 ± 0.45 µg /g. EFECTOS BIOLÓGICOS ADVERSOS FRECUENTES (Long *et al.*, 1995): 4.02 - 44.8 µg/g. ERL= Efectos de Rango Bajo; ERM= Efectos de Rango Medio

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.



Gráfica VIII.2-1. Frecuencia de detección de HAPs por estación y compuesto en los meses de marzo y agosto.



Gráfica VIII.2-2. Concentraciones totales de HAPs por estación para los meses de marzo y agosto (Valores en $\mu\text{g/g}$ peso seco).

En la tabla VIII.2-2 se muestran los resultados de los compuestos detectados y no detectados durante el mes de agosto de los 16 HAPs analizados y en la grafica VIII.2-1 se observa la frecuencia de los compuestos detectados que fue de 58 (52%) y de los compuestos no detectados fue de 54 (48%) a diferencia del

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

mes de marzo la mayoría de los compuestos están por encima del límite de detección de $0.01\mu\text{g/g}$. La mayor cantidad de HAPs se encontró en la estación 1 y 2 con 12 compuestos detectados, seguidos por la estación 6 y 7 con 10 compuestos y la estación 3 con 8.

Analizando los resultados por compuesto, se observó que el Cry y el BaA se encontraron en todas las estaciones, el Fla se presentó en 6 estaciones, el Acy, Phe y Flu se presentaron en 5 estaciones y el Ace, DahA y BghiP se presentaron en 4 estaciones. El resto de los compuestos fueron detectados en 3 o menos estaciones o no fueron detectados. La concentración mínima detectada fue de $0.01\mu\text{g/g}$ y la máxima de $3.37\mu\text{g/g}$.

Durante la época de lluvias las concentraciones totales más elevadas fueron: la estación 7 con $3.67\mu\text{g/g}$ que fue la concentración más alta registrada durante los muestreos realizados (en la Fig. VIII.2-1 se muestra el cromatograma obtenido de dicha muestra), seguida por la estación 5 con $1.11\mu\text{g/g}$ y la estación 1 con $1.07\mu\text{g/g}$. El resto de las estaciones presentaron concentraciones totales en un rango de 0.18 a $0.98\mu\text{g/g}$ (Gráfica VIII.2-2).

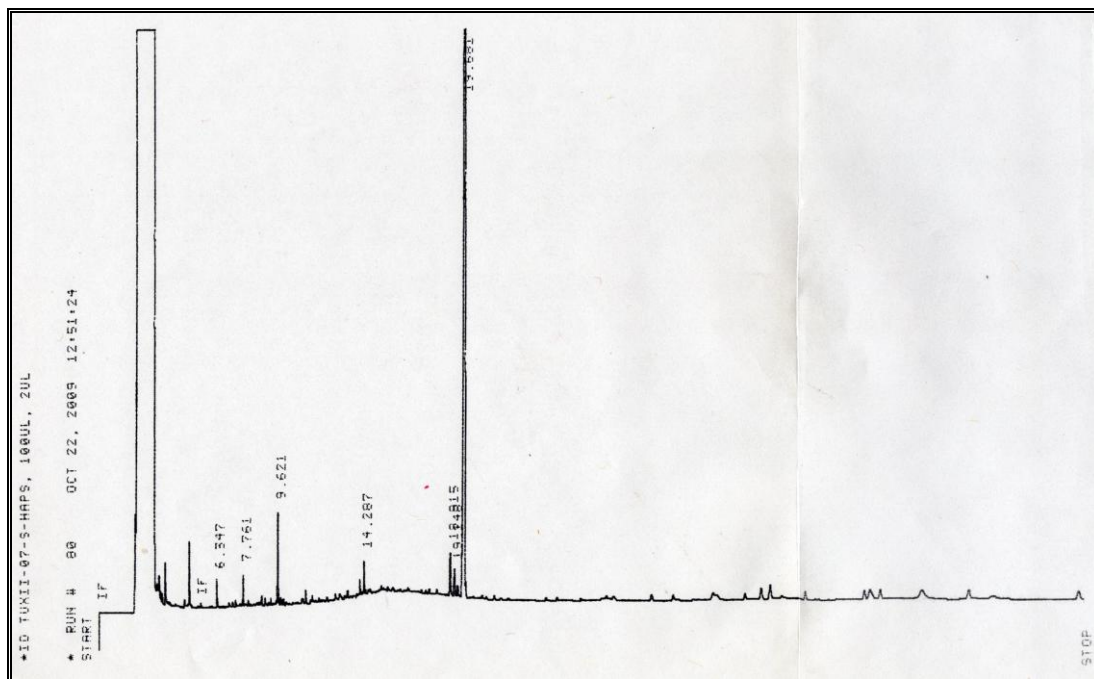


Figura VIII.2-1. Cromatograma de compuestos detectados en la muestra de sedimento colectada en la estación 7.

Tabla VIII.2-2. Concentraciones de HAPs en sedimentos superficiales del sistema lagunar Tampamachoco-río Tuxpan, Ver. en agosto, 2009. En amarillo las concentraciones detectadas. Valores en µg/g peso seco.

No. ANILLOS	COMPUESTO	ESTACIONES							TEL o ISQG	ERL	ERM
		1	2	3	4	5	6	7			
		(Long <i>et al.</i> 1995; Buchman, 2008)									
2	Nap	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.04	0.16	2.10
2	Acy	0.04	0.05	0.02	N.D.	N.D.	0.03	0.03	0.01	0.04	0.64
2	Ace	0.01	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	0.02	0.01	0.01	0.02	0.50
2	Flu	0.03	0.04	0.01	N.D.	N.D.	0.04	0.01	0.11	0.02	0.54
3	Phe	0.07	0.10	0.01	N.D.	N.D.	0.08	0.03	0.09	0.24	1.50
3	Ant	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	0.05	0.09	1.10
3	Fla	0.02	0.06	0.01	0.03	0.02	N.D.	0.05	0.11	0.60	5.10
4	Pir	0.04	0.02	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.15	0.67	2.60
4	BaA	0.17	0.20	0.02	0.03	0.09	0.10	0.10	0.08	0.26	1.60
4	Cry	0.22	0.06	0.04	0.12	1.00	0.07	3.27	0.11	0.38	2.80
4	BbF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	*	*	*
4	BkF	0.05	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.06	N.D.	*	*	*
5	BaP	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.09	0.43	1.60
5	Ind	0.24	0.05	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.08	*	*	*
5	DahA	N.D.	0.23	0.04	N.D.	N.D.	0.27	0.06	0.01	0.06	0.26
6	BghiP	0.16	0.13	N.D.	N.D.	N.D.	0.12	0.03	*	*	*
CONCENTRACIÓN TOTAL (ΣHAPs)		1.07	0.98	0.16	0.18	1.11	0.82	3.67	1.68	4.02	44.8

N.D. < 0.01µg/g. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE HAPs: 1.14 ± 0.45 µg/g. EFECTOS BIOLÓGICOS ADVERSOS FRECUENTES (Long *et al.*, 1995): 4.02 - 44.8 µg/g. **ERL**= Efectos de Rango Bajo; **ERM**= Efectos de Rango Medio.

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

Comparando los resultados durante los muestreos realizados en la época de secas (marzo) y de lluvias (agosto) se observó que en marzo la concentración promedio fue de $0.86 \pm 0.39 \mu\text{g/g}$ y en época de lluvias fue de $1.14 \pm 0.45 \mu\text{g/g}$.

Durante los muestreos realizados en los meses de marzo y agosto se encontraron un total de 14 compuestos de HAPs en concentraciones detectables, de los 16 HAPs analizados, de los cuales 9 se encontraron en la temporada de secas y 14 en la temporada de lluvias, variando el número total de estaciones donde se detectaron y los compuestos de HAPs presentes, como se detalla en la tabla VIII.2-3.

Tabla VIII.2-3. Compuestos de HAPs presentes y no. total de estaciones donde se detectaron los compuestos en marzo y agosto.

COMPUESTO	No. ESTACIONES/ MARZO (SECAS)	No. ESTACIONES/ AGOSTO (LLUVIAS)
Ant	1	3
Ace	0	4
Acy	0	5
BaA	4	7
BghiP	1	4
BkF	0	2
Cry	7	7
DahA	2	5
Phe	2	5
Fla	2	6
Flu	1	5
Ind	0	3
Nap	0	1
Pir	1	3

El total de compuestos HAPs encontrados fue diferente en los dos eventos de muestreo, durante el mes de agosto se encontraron 5 HAPs adicionales (Nap, Acy, Ace, Ind y BkF) a los encontrados en marzo, además, dos compuestos encontrados en tejido de organismos: BbF y BaP no fueron detectados en las dos épocas de muestreo.

Durante el mes de marzo se identificaron menos compuestos de HAPs que durante el mes de agosto; los HAPs detectados se encontraron por lo general en menor concentración que en el mes de agosto.

La tasa de incremento de la concentración entre los meses de marzo y agosto es distinta entre los diversos compuestos de HAPs, y es debida a la presencia puntual de concentraciones elevadas durante el mes de agosto para algunos compuestos de HAPs, más que a un aumento progresivo en todas las estaciones.

De acuerdo con el número de anillos de los HAPs, los compuestos que se encontraron en mayor cantidad fueron:

- Los de 4 anillos bencénicos (pireno, benzo(a)antraceno, criseno, y benzo(k)fluoranteno) con un promedio de 0.15µg/g durante marzo y 0.16µg/g durante agosto.
- Seguidos por el único compuesto de 6 anillos bencénicos analizado (el benzo(ghi)perileno) con un promedio de 0.02µg/g durante marzo y 0.06µg/g durante agosto.
- En tercer lugar los compuestos de 5 anillos (indeno(123-cd)pireno, dibenzo(ah)antraceno, benzo(ghi)perileno) con un promedio de 0.02µg/g durante marzo y 0.05µg/g durante agosto.
- En cuarto lugar los compuestos de 3 anillos (fenantreno, antraceno, fluoranteno) con un promedio de 0.01µg/g durante marzo y 0.03µg/g durante agosto.
- En último lugar los compuestos de 2 anillos (naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno) con un promedio de 0.001µg/g durante marzo y 0.01µg/g durante agosto.

Durante ambos muestreos se presentaron compuestos de HAPs con valores únicos de concentración, en marzo se detectó el Fla (est. 1) con 0.03µg/g, el Ant (est. 4) con 0.03µg/g y el Pir (est. 1) con 0.02 µg/g. durante el mes de agosto se detectó el Nap (est. 1) con 0.02µg/g.

Trece de los compuestos analizados durante ambas épocas del año, se detectaron o aumentaron su concentración durante el mes de agosto y solamente uno el benzo(a)antraceno mostró un decremento en la concentración total cuantificada (Tabla VIII.2-4).

Tabla VIII.2-4. Listado de HAPs con variación de concentración entre estaciones para los meses de marzo (marcado con amarillo) y agosto (marcado con verde). Valores en µg g-1 peso seco.

COMPUESTO	ESTACION							MAX	SUMA	DIFERENCIA
	1	2	3	4	5	6	7			
Nap										
Nap	0.02							0.02	0.02	0.02
Acy										
Acy	0.04	0.05	0.02			0.03	0.03	0.05	0.17	0.17

Ace											
Ace	0.01	0.02				0.02	0.01		0.02	0.06	0.06
Flu	0.03								0.03	0.03	
Flu	0.03	0.04	0.01			0.04	0.01		0.04	0.13	0.10
Phe	0.03				0.01				0.03	0.04	
Phe	0.07	0.10	0.01			0.08	0.03		0.10	0.29	0.25
Ant				0.03					0.03	0.03	
Ant		0.02		0.00		0.03			0.03	0.05	0.02
Fla				0.11	0.05				0.11	0.16	
Fla	0.02	0.06	0.01	0.03	0.02		0.05		0.06	0.19	0.03
Pir	0.02								0.02	0.02	
Pir	0.04	0.02	0.01						0.04	0.07	0.05
BaA	0.04	0.84			0.04	0.03			0.84	0.95	
BaA	0.17	0.20	0.02	0.03	0.09	0.10	0.10		0.20	0.71	-0.24
Cry	0.07	0.34	0.05	0.30	0.06	3.05	0.43		3.05	4.30	
Cry	0.22	0.06	0.04	0.12	1.00	0.07	3.27		3.27	4.78	0.48
BkF											
BkF	0.05					0.06			0.06	0.11	0.11
Ind											

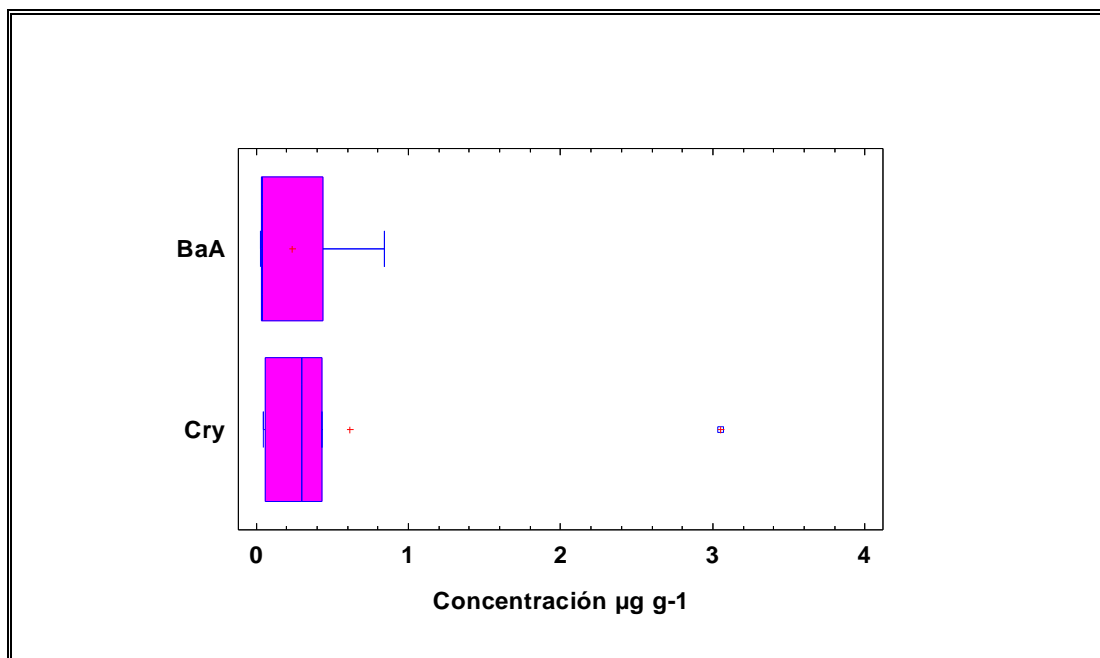
Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

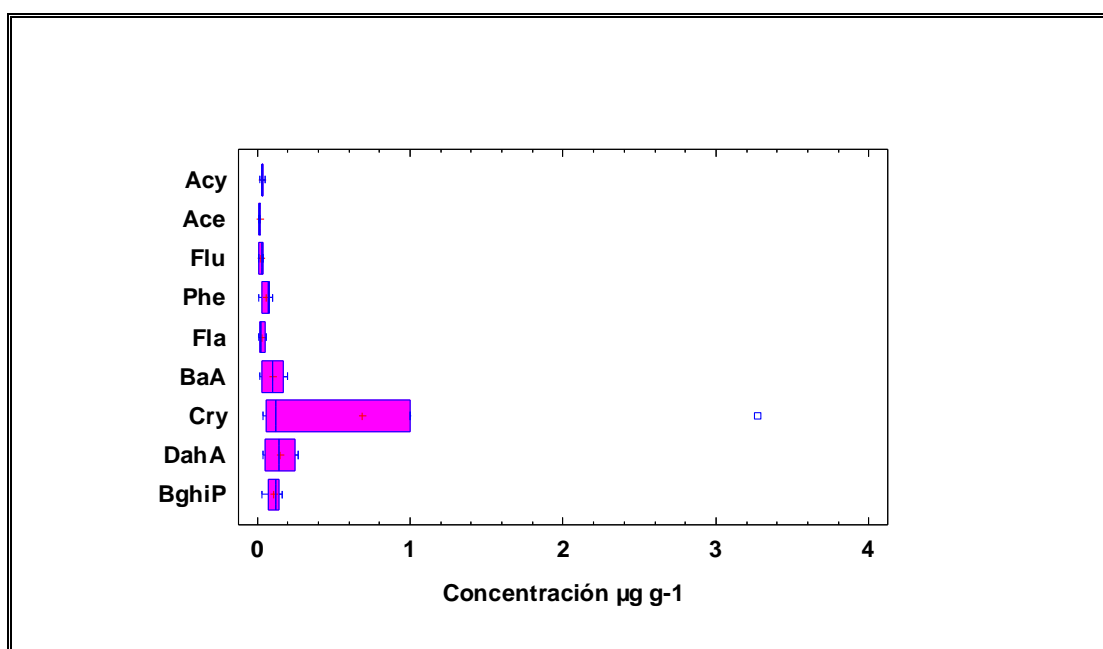
Ind	0.24	0.05					0.08		0.24	0.37	0.37
DahA	0.22						0.13		0.22	0.35	
DahA		0.23	0.04				0.27	0.06	0.27	0.60	0.25
BghiP	0.17								0.17	0.17	
BghiP	0.16	0.13					0.12	0.03	0.16	0.44	0.27

En la gráfica VIII.2-3 podemos observar la descripción de las características más importantes de los compuestos con mayor presencia en los sedimentos de marzo, el Cry que se detectó en 7 estaciones y el BaA en 4 estaciones, el resto de los compuestos se detectaron en menos de tres estaciones, es decir, que la mayoría de los compuestos estuvieron por debajo del límite de detección, por lo que se consideró que no existieron datos suficientes para realizar un análisis estadístico. En este diagrama se observa que el Cry presentó un promedio y distribución de valores diferente al BaA, originado por un valor único extremo que sobrepasa el rango de valores donde se ubican la mayoría de los datos.

En el caso del mes de agosto, se encontró una mayor presencia de compuestos (Acy, Ace, Flu, Phe, Fla, BaA, Cry, DahA, BghiP), estos compuestos se detectaron en por lo menos 4 estaciones y se observó que el aumento de compuestos de HAPs encontrados no modifica sensiblemente las concentraciones detectadas, el Cry continua siendo el único compuesto con un promedio e intervalo de variación estadísticamente diferente al resto de compuestos, con un único valor extremo (Gráfica VIII.2-4).

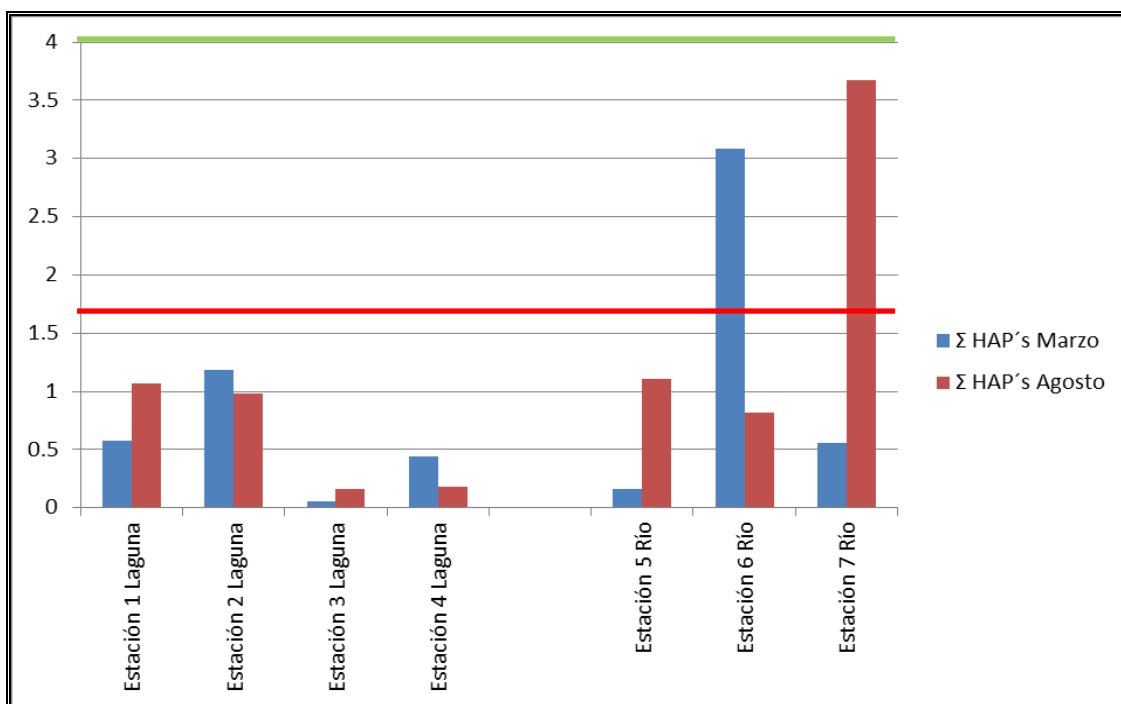


Gráfica VIII.2-3. Compuestos superiores al límite de detección en más de tres estaciones de muestreo durante marzo.



Gráfica VIII.2-4. Compuestos superiores al límite de detección en más de tres estaciones de muestreo durante agosto.

Con respecto a las diferencias de tipo y concentración de HAPs por ubicación de las estaciones de muestreo diferenciamos dos grupos: al interior de la laguna de Tampamachoco (1 a 4) y las ubicadas en el cauce del río Tuxpan (5 a 7). (Gráfica VIII.2-5).



Gráfica VIII.2-5. Concentraciones totales de HAPs en las estaciones ubicadas en la laguna de Tampamachoco (1 a 4) y en el cauce del río Tuxpan (5 a 7) para los meses de marzo y agosto. La línea roja es la concentración umbral (TEL o ISQG) y la línea verde es la concentración probable de daño (ERL) (Long *et al.* 1995; Buchman, 2008).

Las cuantificaciones realizadas muestran que la mayor concentración total de HAPs se presenta en dos estaciones ubicadas en el cauce del río Tuxpan (6 y 7) que además presentan la mayor variación entre la temporada de secas y la de lluvias.

La cantidad de compuestos identificados también varía entre las estaciones ubicadas al interior de la laguna y en el cauce del río Tuxpan, en marzo se identificaron 9 compuestos en la laguna y solamente cinco en el río; con excepción del criseno el resto de los compuestos identificados en el río Tuxpan, se encontraron en concentraciones menores a las cuantificadas para el mismo compuesto en sedimentos de la laguna.

En la gráfica VIII.2-5 podemos apreciar con una línea roja el criterio de calidad sedimentaria establecido internacionalmente, que indica la concentración umbral (TEL o ISQG) a partir de la cual se pueden observar los efectos dañinos al bentos provocados por la toxicidad que contengan los sedimentos (TEL=1.68). Como podemos observar la estación 6 de marzo rebasa dicho criterio con una concentración total de 3.1 μg/g y también la estación 7 de agosto con una concentración total de 3.7 μg/g. Otros criterios internacionales son la concentración probable de daño (ERL=4.02) y la concentración que frecuentemente daña al bentos (ERM=44.8) (Long *et al.*, 1995; CCME, 1999; Buchman, 2008). Estos dos últimos criterios están por encima de las

concentraciones obtenidas en ambos muestreos, en la gráfica VIII.2-5 se observa con una línea color verde la concentración probable de daño (ERL).

Comparando los promedios de las concentraciones más abundantes obtenidas para cada compuesto con los criterios sedimentarios establecidos internacionalmente, se observa que la concentración promedio de criseno que fue de 0.61 µg/g en marzo y 0.68 µg/g en agosto, superó considerablemente en ambas colectas a las concentraciones establecidas por el TEL (0.11 µg/g) y el ERL (0.38 µg/g). El benzo(a)antraceno superó en ambas colectas (0.14 y 1.10 µg/g durante marzo y agosto respectivamente) el TEL de 0.08 µg/g. El dibenzo(ah)antraceno con una concentración promedio de 0.05 y 0.09 µg/g durante las colectas de marzo y agosto respectivamente superó a la concentración establecida por el TEL de 0.01 µg/g y en la colecta de agosto superó también la concentración del ERL de 0.06 µg/g.

VIII.3 Comparación de las concentraciones actuales con un estudio anterior y con trabajos realizados en la zona

En un estudio realizado entre 1994 y 1995 en la misma zona de estudio para evaluar los contenidos de HAPs en sedimentos, Botello y Calva (1998) reportan una concentración promedio de 4.48 ± 1.84 µg/g, con el máximo (9.39 µg/g) en el sitio con influencia de la central termoeléctrica que aproximadamente corresponde a la zona de las estaciones actuales 2 y 3 y el mínimo (0.67 µg/g) lo registraron en el área norte de la laguna (la estación 1, 2009). La frecuencia de los compuestos detectados fue de 28 (47%) y de los no detectados fue de 32 (53%). Los compuestos que tuvieron mayor presencia en las estaciones de muestreo fueron: el Fla, Phe, Pir, Cry y Flu. La concentración mínima detectada fue de 0.03 µg/g y la máxima de 4.81 µg/g (Tabla y figura VIII.3-1).

Estos autores detectaron mayor diversidad de HAPs y al benzo(a)pireno, considerado como cancerígeno para los organismos, en el sitio lagunar que tiene influencia de la termoeléctrica (estaciones 2 y 3, 2009); también mencionan que el área de la desembocadura de la laguna en el río Tuxpan reflejó un patrón industrial y de tráfico marítimo en la composición, presencia y contenidos de HAPs. Las fuentes principales obtenidas en ambos estudios coinciden en ser las pirolíticas con la presencia minoritaria de componentes petrogénicos.

Comparando las concentraciones totales de HAPs obtenidas en las dos colectas realizadas durante 2009 con las concentraciones reportadas por Botello y Calva en 1988 en la laguna de Tampamachoco (Tabla VIII.3-1), se obtiene que las concentraciones de compuestos HAPs cuantificadas en 1988 son significativamente distintas y superiores que las cuantificadas en 2009 para ambos periodos de colecta (marzo y agosto).

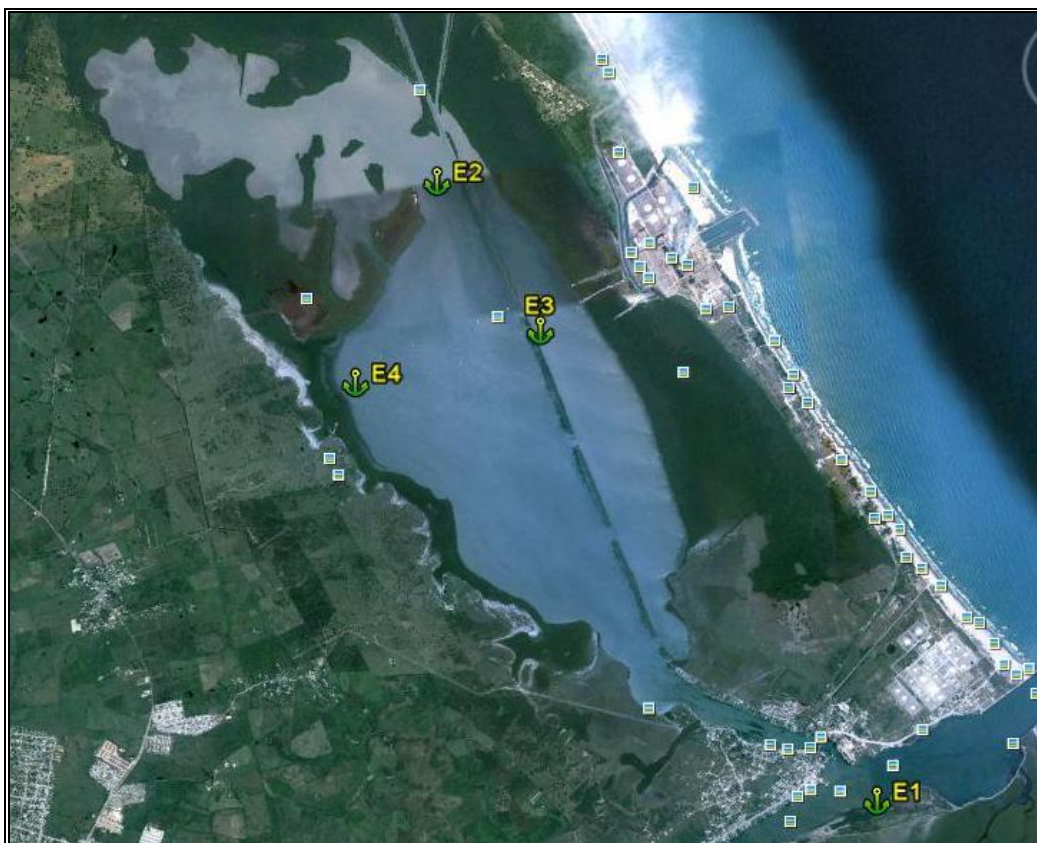


Figura VIII.3-1. Mapa de estaciones de muestreo en el estudio de Botello y Calva (1998) en la laguna de Tampamachoco.

Tabla VIII.3-1. Concentraciones de HAPs reportadas por Botello y Calva (1998) en la laguna de Tampamachoco.

No. anillos	COMPUESTO	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4	Total
2	Nap	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2	Acy	N.D.	N.D.	0.40	0.21	0.61
2	Ace	0.15	N.D.	0.03	N.D.	0.18
2	Flu	0.17	0.22	0.03	N.D.	0.42
3	Phe	0.15	N.D.	0.16	3.00	3.31
3	Ant	0.33	N.D.	N.D.	N.D.	0.33
3	Fla	0.30	0.45	0.21	0.14	1.10
4	Pir	0.81	N.D.	1.62	0.91	3.34
4	BaA	0.69	N.D.	4.81	N.D.	5.50
4	Cry	0.20	N.D.	0.23	0.16	0.59
4	BbF	N.D.	N.D.	0.35	0.29	0.64
4	BkF	0.35	N.D.	1.13	N.D.	1.48
5	BaP	N.D.	N.D.	0.42	N.D.	0.42
5	Ind	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
6	BghiP	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	ΣHAPs	3.15	0.67	9.39	4.71	17.92

N.D. <0.01 µg/g

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

Aunque los valores individuales extremos cuantificados durante marzo y agosto de 2009, son superiores al promedio de los valores registrados en 1998, la mayoría de los compuestos cuantificados en 2009 se encontraron en concentraciones menores.

Comparando el estudio realizado en el sistema lagunar de Tampamachoco con trabajos realizados en diverso cuerpos acuáticos de México se observa que las concentraciones promedio obtenidas en este estudio son menores que las reportadas en otros estudios como se muestra en la tabla VIII.3-2.

Tabla VIII.3-2. Concentraciones de HAPs reportadas en diversos cuerpos acuáticos de México.

Lugar	Concentración Promedio de HAPs ($\mu\text{g/g}$)	Referencia
Laguna de Tampamachoco Ver.	0.86	Marzo, 2009 (Estudio actual)
Laguna de Tampamachoco Ver.	1.14	Agosto, 2009 (Estudio actual)
Laguna de Tampamachoco Ver.	4.48	Botello y Calva, 1998
Laguna de Pueblo Viejo Ver.	3.7	Botello y Calva, 1998
Laguna de Tamiahua Ver.	2.99	Botello y Calva, 1998
Laguna de Sontecomapan, Ver	7.54	Calva y Botello, 1999
Laguna La Mancha Ver.	6.72	Botello et al., 2001
Laguna Salada Ver.	6.65	Botello et al., 2001
Laguna de Mandinga Ver.	5.67	Botello et al., 2001
El Llano Ver.	5.0	Botello et al., 2001
Laguna de Mecoacán Tab.	5.90	Mendoza, 2006
Estero Urias Sin.	3.92	Piña, 2008
Bahía Chetumal Quin.	1.45	Noreña et al., 2007
El Yucateco, Tab	5.3	Marzo, 2007 (Botello et al., 2007)
El Yucateco, Tab	2.4	Agosto, 2007 (Botello et al., 2007)

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

VIII.4 Identificación del origen de los HAPs en sedimentos utilizando los índices moleculares.

Con el fin de inferir las posibles fuentes de origen de los HAPs encontrados en las muestras de sedimentos de la laguna de Tamapamachoco y río Tuxpan, se calcularon los índices $Ant/Ant+Phe$, $Fla/Fla+Pir$ y $BaA/BaA+Cry$ (Budzinsky *et al.*, 1997, Soclo *et al.*, 2000; Yunker *et al.*, 2002). En la tabla VIII.4-1 se observan los índices moleculares calculados para determinar el origen y grado de contaminación en los sedimentos de las colectas de marzo y agosto en el área de estudio.

De acuerdo con el cálculo de los índices mencionados, se graficaron en pares los índices moleculares para la identificación de fuentes en las muestras de sedimentos de las estaciones muestreadas. En la grafica VIII.4-1 (A) se muestra la relación del índice $Fla/Fla+Pir$ con el $BaA/BaA+Cry$ y en la (B) con el índice $Ant/Ant+Phe$.

En la colecta de marzo se observa que en la estación 1 y 2 el origen es mixto, en la estación 4 y 5 es por combustión probable de pasto, madera y carbón; la estación 6 el origen es petrogénico; para agosto la estación 1 presenta un origen mixto con tendencia petrogénica, la estación 2 presenta un origen mixto, la estación 3, 4 y 5 es mixto con tendencia pirogénica, la estación 6 el origen es pirogénico y en la estación 7 es mixto.

Considerando la presencia y la concentración de benzo(a)pireno (CCME, 1999), para ambas colectas los sitios evaluados se consideran limpios por no haber detectado este compuesto ($<0.01\mu\text{g/g}$), mientras que al tomar el parámetro de la sumatoria de los HAPs, el comportamiento que se observa es que para marzo, la estación 6, localizada sobre el cauce del río Tuxpan en la desembocadura de la laguna, se clasificó como altamente contaminada y en la estación 2, en la parte norte de la laguna, como contaminado por estos compuestos orgánicos; las estaciones 1 y 4 de marzo se clasificaron como poco contaminados y las estaciones 3 y 5 como no contaminados; para agosto se observó que las estaciones 5 y 7 en la desembocadura de la laguna y en el cauce del río Tuxpan, se clasificaron como altamente contaminadas, las estaciones 1, 2 y 6 en la parte norte de la laguna las dos primeras y en el cauce del río, se clasificaron como contaminadas y las estaciones 3 y 4 como no contaminadas.

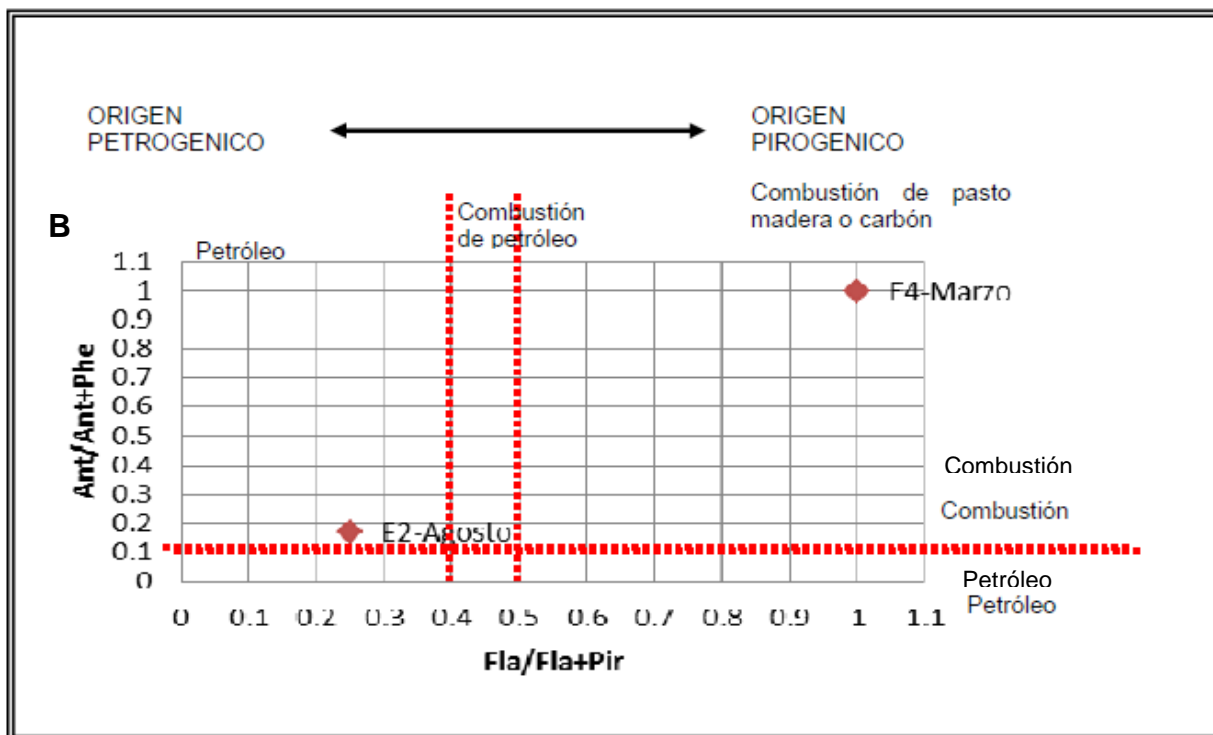
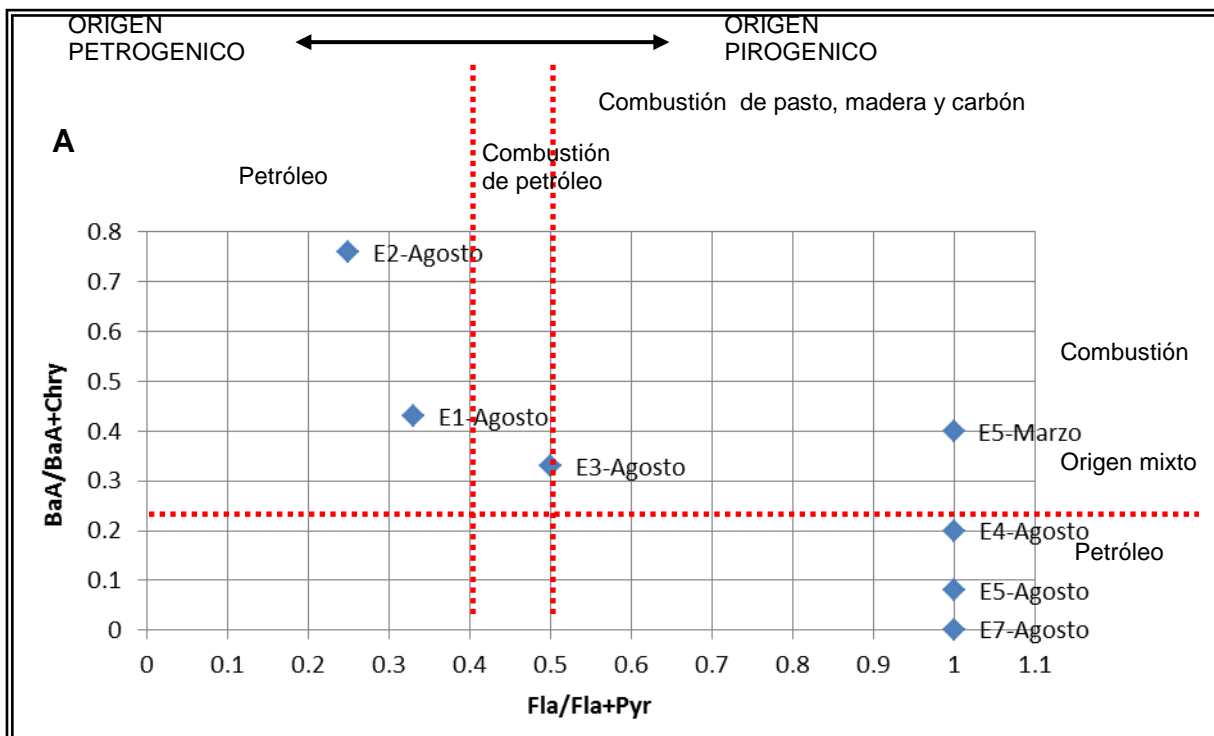
Tabla VIII.4-1. Índices moleculares calculados para las estaciones de muestreo del sistema lagunar Tampamachoco-río Tuxpan, Ver. marzo y agosto, 2009, en rosa estaciones dentro de la laguna, en azul estaciones en el río.

	Valores	Mes	Est 1	Est 2	Est 3	Est 4	Est 5	Est 6	Est 7
Ant/Ant+Phe^a	>0.1 Combustión <0.1 Petróleo	Marzo	N.C.	N.C.	N.C.	1.0 (combustión)	N.C.	N.C.	N.C.
		Agosto	N.C.	0.17 (combustión)	N.C.	N.C.	N.C.	0.27 (combustión)	N.C.
Fla/Fla+Pir^a	<0.4 Petróleo 0.4-0.5 Combustión de CFL >0.5 Combustión de PMC	Marzo	N.C.	N.C.	N.C.	1.0 (combustión de PMC)	1.0 (combustión de PMC)	N.C.	N.C.
		Agosto	0.33 (petróleo)	0.25 (petróleo)	0.50 (combustión de CFL)	1.0 (combustión de PMC)	1.0 (combustión de PMC)	N.C.	1.0 (combustión de PMC)
BaA/BaA+Cry^b	<0.2 Petróleo 0.2-0.35 Origen mixto >0.35 Combustión	Marzo	0.36 (origen mixto)	0.71 (origen mixto)	N. C.	N.C.	0.4 (combustión)	0.009 (petróleo)	N.C.
		Agosto	0.43 (origen mixto)	0.76 (origen mixto)	0.73 (origen mixto)	0.2 (origen mixto)	0.2 (origen mixto)	0.58 (combustión)	0.02 (petróleo)
Grado de contaminación por ΣHAPs^c		Marzo	PC	CONT	NOC	PC	NOC	A	PC
		Agosto	CONT	CONT	NOC	NOC	A	CONT	A

N.C.=No Calculado (sin datos); a= Yunker *et al.* (2002); b= Budzinsky *et al.* (1997), Soclo *et al.* (2000); c=Maliszewska-Kordybach (1996) valores en µg/g; A= altamente contaminado (>1.0 µg/g de ΣHAPs); CONT= contaminado (0.6-1.0 µg/g de ΣHAPs); PC =poco contaminado (0.2-0.6µg/g de ΣHAPs); NOC=no contaminado (<0.2 µg/g de ΣHAPs). CFL= combustión de combustible fósil líquido; PMC= combustión de pasto, madara y carbón.

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.



Grafica VIII.4-1. Relaciones del índice molecular Fla/Fla+Pir con los índices BaA/BaA+Cry (A) y Ant/Ant+Phe (B), determinados en los sedimentos de los diferentes sitios de muestreo.

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

VIII.5 Granulometría de los sitios de colecta de sedimentos

En la tabla VIII.5-1 se muestran los resultados del análisis granulométrico de los sedimentos de la laguna durante las dos colectas. Este sistema se caracteriza por un substrato limo-arcilloso, donde podemos encontrar una fracción variable de gravas y arenas. Dichas partículas se consideran como un material mal clasificado, simétrico en su mayoría y platicúrtico a mesocúrtico principalmente.

Tabla VIII.5-1. Granulometría del sustrato colectado durante los muestreos de marzo y agosto de 2009.

	MUESTRA	PORCIENTOS (%)				PARAMETROS ESTADISTICOS			
		GRAVA	ARENA	LIMO	ARCILLA	MZ	σ_1	SK ₁	K _G
M A R Z O	EST 1		2.347	66.290	31.363	7.029	1.967	0.079	0.868
	EST 2		2.742	68.419	28.839	6.885	1.973	0.142	0.859
	EST 3		3.910	63.651	32.439	6.919	2.110	0.069	0.785
	EST 4	30.978	56.666	9.391	2.965	1.536	2.536	-0.314	0.802
	EST 5		4.047	66.015	29.938	6.809	2.065	0.107	0.797
	EST 6		0.705	57.685	41.610	7.522	1.932	-0.037	0.885
	EST 7		0.379	57.387	42.234	7.670	1.793	0.012	0.934
A G O S T O	EST 1		0.830	66.795	32.375	7.155	1.895	0.074	0.900
	EST 2		0.125	62.989	36.886	7.419	1.824	0.091	0.865
	EST 3		0.944	64.593	34.463	7.163	1.976	0.063	0.830
	EST 4	15.697	72.589	8.064	3.650	2.813	1.686	0.063	4.615
	EST 5		78.533	15.319	6.148	3.495	1.406	0.723	2.465
	EST 6		0.517	63.384	36.099	7.372	1.838	0.060	0.906
	EST 7		0.468	59.910	39.622	7.564	1.784	0.043	0.915

Para las muestras de sedimento colectadas también se determinó el porcentaje de carbono orgánico (Tabla VIII.5-2).

Tabla VIII.5-2. Carbono orgánico en sedimentos durante marzo y agosto.

Estaciones	Marzo	Agosto
1	3.86	1.3
2	2.63	0.72
3	1.53	0.55
4	0.79	0.25
5	0.8	0.44
6	0.64	0.65
7	0.78	0.7

Los datos obtenidos se integran en las tablas VIII.5-3 y 4, para establecer correlaciones entre la composición orgánica del sedimento el tamaño de partícula y las concentraciones de HAPs por estación.

Tabla VIII.5-3. Datos de Sedimentos para análisis estadísticos. Tampamachoco, Ver. marzo, 2009.

Estaciones	CO (%)	Gravas	Arenas (%)	Arcillas (%)	Limos (%)	Lodos (arcillas+limos) (%)	HAPs (μgg^{-1})
1	3.86		2.347	31.363	66.29	97.653	0.58
2	2.63		2.742	28.839	68.419	97.258	1.18
3	1.53		3.91	32.44	63.65	96.09	0.05
4	0.79	30.978	56.666	2.965	9.391	12.356	0.44
5	0.8		4.047	29.938	66.015	95.953	0.16
6	0.64		0.705	41.61	57.685	99.295	3.08
7	0.78		0.379	42.234	57.387	99.621	0.56

Tabla VIII.5-4. Datos de sedimentos para análisis estadísticos. Tampamachoco, Ver. agosto, 2009.

Estaciones	CO (%)	Gravas	Arenas (%)	Arcillas (%)	Limos (%)	Lodos (arcillas+limos) (%)	HAPs ($\mu\text{g g}^{-1}$)
1	1.3		0.83	32.375	66.795	99.17	1.07
2	0.72		0.125	36.886	62.989	99.875	0.98
3	0.55		0.94	34.46	64.59	99.056	0.16
4	0.25	15.697	72.589	3.65	8.064	11.714	0.18
5	0.44		78.533	6.148	15.319	21.467	1.11
6	0.65		0.517	36.099	63.384	99.483	0.82
7	0.7		0.468	39.622	59.91	99.532	3.67

Con los valores disponibles se procedió a establecer un análisis de correlación múltiple considerando como variable dependiente la concentración de HAPs totales por estación, y como variables independientes los porcentajes de carbono orgánico, arcillas, limos y arenas para los valores obtenidos en ambos meses.

Los valores de correlación indican que no existen asociaciones significativas entre ninguna de las variables independientes y la dependiente (tablas VIII.5-5 y 6). También se realizó un análisis de correlación múltiple por compuesto, en el mes de marzo se utilizó el Cry como variable dependiente y se observó que no se encontró ninguna correlación con las variables independientes (tabla VIII.5-7). Durante el mes de agosto se utilizó el Cry y el BaA como variables dependientes y tampoco se encontró correlación con las variables independientes.

Tabla VIII.5-5. Análisis estadístico de correlación múltiple para la variable dependiente concentración de HAPs del mes de marzo.

Dependent variable: HAPs µg					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	111.892	205.803	0.543687	0.6830	
Arcillas %	-1.1425	2.26349	-0.504753	0.7024	
Arenas %	-1.7269	3.19108	-0.541165	0.6842	
CO %	-95.7165	137.315	-0.697059	0.6125	
Limos %	-1.06194	1.88861	-0.562289	0.6739	
MO %	142.671	205.121	0.695548	0.6131	
Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	4.07191	5	0.814382	0.33	0.8566
Residual	2.44966	1	2.44966		
Total (Corr.)	6.52157	6			
R-squared = 62.4375 percent					
R-squared (adjusted for d.f.) = 0.0 percent					
Standard Error of Est. = 1.56514					
Mean absolute error = 0.532167					
Durbin-Watson statistic = 2.6311					
Lag 1 residual autocorrelation = -0.474401					

Tabla VIII.5-6. Análisis estadístico de correlación múltiple para la variable dependiente concentración de HAPs del mes de agosto.

Multiple Regression Analysis					

Dependent variable: HAPs µg					

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	

CONSTANT	-9.27085	2.89965	-3.19723	0.1930	
Arcillas %	0.385942	0.0561347	6.87528	0.0920	
Arenas %	0.0978387	0.0309937	3.15673	0.1953	
CO %	140.409	53.3446	2.63212	0.2311	
Limos %	-0.0836963	0.0502719	-1.66487	0.3443	
MO %	-206.962	79.8867	-2.59069	0.2345	

Analysis of Variance					

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value

Model	8.32426	5	1.66485	18.01	0.1745
Residual	0.0924237	1	0.0924237		

Total (Corr.)	8.41669	6			
R-squared = 98.9019 percent					
R-squared (adjusted for d.f.) = 93.4114 percent					
Standard Error of Est. = 0.304013					
Mean absolute error = 0.0741202					
Durbin-Watson statistic = 2.13836					
Lag 1 residual autocorrelation = -0.0898438					

Tabla VIII.5-7. Análisis estadístico de correlación múltiple para los valores de Cry como variable dependiente en sedimentos de marzo.

Multiple Regression Analysis					
Dependent variable: Cry					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	72.191	177.78	0.406068	0.7240	
CO %	-0.191385	0.553744	-0.34562	0.7626	
Arcillas %	-0.70056	1.95492	-0.358357	0.7544	
Arenas %	-1.11191	2.75645	-0.403383	0.7257	
Limos %	-0.700748	1.6317	-0.429459	0.7094	
Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	3.34204	4	0.835509	0.45	0.7761
Residual	3.72053	2	1.86027		
Total (Corr.)	7.06257	6			
R-squared = 47.3204 percent					
R-squared (adjusted for d.f.) = 0.0 percent					
Standard Error of Est. = 1.36392					
Mean absolute error = 0.43168					
Durbin-Watson statistic = 2.65152 (P=0.0271)					
Lag 1 residual autocorrelation = -0.557961					

Tabla VIII.5-8. Análisis estadístico de correlación múltiple para los valores de BaA como variable dependiente en sedimentos de agosto.

Multiple Regression Analysis					
Dependent variable: BaA					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	-0.225459	0.64677	-0.348592	0.7607	
CO %	0.130476	0.103699	1.25822	0.3353	
Arcillas %	0.00895307	0.0127594	0.701683	0.5555	
Limos %	-0.00207582	0.0092983	-0.223247	0.8441	
Arenas %	0.0026163	0.00719803	0.363474	0.7511	
Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.0153881	4	0.00384703	0.71	0.6573
Residual	0.0108976	2	0.00544879		
Total (Corr.)	0.0262857	6			
R-squared = 58.5418 percent					
R-squared (adjusted for d.f.) = 0.0 percent					
Standard Error of Est. = 0.0738159					
Mean absolute error = 0.0264614					
Durbin-Watson statistic = 2.64556 (P=0.0153)					
Lag 1 residual autocorrelation = -0.413762					

Tabla VIII.5-9. Análisis estadístico de correlación múltiple para los valores de Cry como variable dependiente en sedimentos de agosto.

Multiple Regression Analysis					
Dependent variable: Cry					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	-6.65841	8.62022	-0.772418	0.5207	
CO %	1.71669	1.38211	1.24208	0.3401	
Arenas %	0.0803692	0.0959361	0.837737	0.4903	
Arcillas %	0.424732	0.170059	2.49756	0.1298	
Limos %	-0.155966	0.123929	-1.25852	0.3352	
Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	6.56592	4	1.64148	1.70	0.4035
Residual	1.93583	2	0.967913		
Total (Corr.)	8.50174	6			
R-squared = 77.2302 percent					
R-squared (adjusted for d.f.) = 31.6907 percent					
Standard Error of Est. = 0.983826					
Mean absolute error = 0.401325					
Durbin-Watson statistic = 2.86582 (P=0.0033)					
Lag 1 residual autocorrelation = -0.532664					

VIII.6 HAPs cuantificados en tejidos de organismos acuáticos.

En la tabla VIII.6-1 se muestran los resultados de los compuestos detectados y no detectados en las 15 especies de organismos analizados durante el mes de marzo y en la grafica VIII.6-1 se observa la frecuencia de los compuestos detectados que fue de 65 (19%) y la de los compuestos no detectados que fue de 271 (81%), es decir que la mayoría de los compuestos están por debajo del límite de detección de 0.01µg/g. La especie que presento mayor cantidad de compuestos con un total de 8 fue *Bagre marinus*, seguida por *Mugil curema* con 6, el resto de las especies presentaron menos de 6 compuestos detectados.

Los compuestos que se detectaron en la mayoría de las especies analizadas fueron el BbF en 14 especies, el Fla en 8 especies y el Cry en 6 especies, por lo tanto para fines estadísticos sólo se consideraran los compuestos antes mencionados. La concentración mínima detectada fue de 0.02µg/g y la máxima de 86.1µg/g.

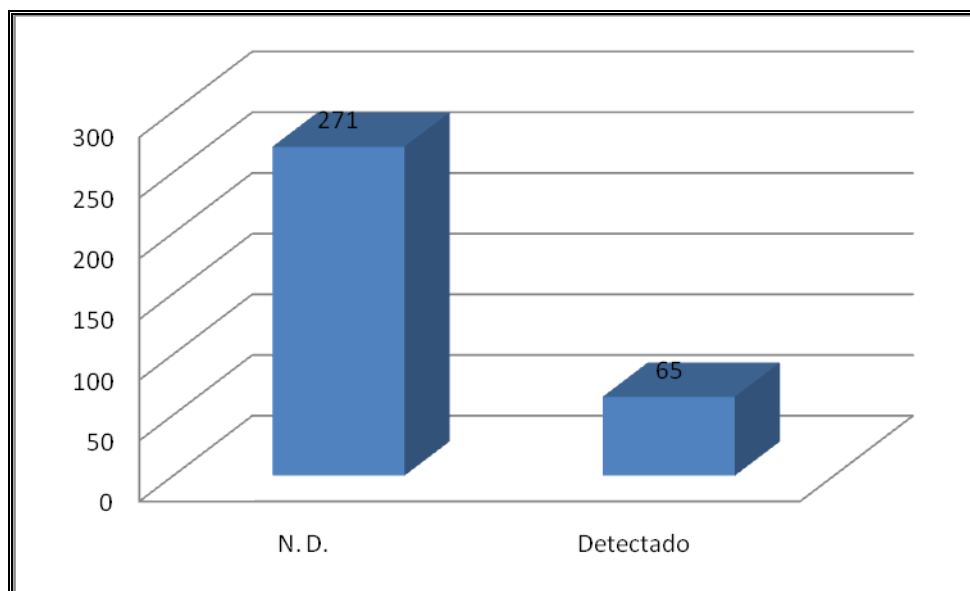
Tabla VIII.6-1. Concentraciones de HAPs en organismos del sistema lagunar Tampamachoco-río Tuxpan Ver. En marzo, 2009. Valores en $\mu\text{g/g}$ peso seco. En amarillo concentraciones detectadas.

No. Anillos	Compuesto	<i>B. ronchus</i>	<i>B. chrysourea</i>	<i>B. marinus</i>		<i>D. auratus</i>				<i>E. plumieri</i>	<i>C. pectinatus</i>	<i>C. parallelus</i>	<i>C. hippos</i>	<i>M. curema</i>			<i>M. furnieri</i>	<i>O. niloticus</i>	<i>A. probat</i>	<i>L. griseus</i>	<i>S. vomer</i>	<i>C. virginica</i>
		Gurrubata	Gurrubata	Bagre bandera		Mojarra blanca				Mojarra rayada	Robalo	Chucumite	Jurel	Lebrancha			Gurrubata	Tilapia	Sargo	Pargo prieto	Pez luna	Ostión
		E-1	E-2	E-1	E-4	E-2	E-3	E-5	E-6	E-3	E-3	E-4	E-4	E-2	E-4	E-5	E-5	Cooper	Cooper	Cooper	Cooper	E-2
2	Nap	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2	Acy	N.D.	N.D.	N.D.	0.04	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2	Ace	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2	Flu	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
3	Phe	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.12	N.D.	0.11	0.08	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
3	Ant	N.D.	N.D.	N.D.	0.22	N.D.	0.07	N.D.	N.D.	N.D.	0.06	N.D.	N.D.	ND	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
3	Fla	N.D.	N.D.	0.21	0.79	0.17	0.16	0.08	N.D.	N.D.	0.10	0.04	0.07	0.51	0.54	2.41	0.21	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.14
4	Pir	N.D.	N.D.	N.D.	0.48	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.13	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.04
4	BaA	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.18	0.11	0.30	0.12	1.27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
4	Cry	N.D.	N.D.	N.D.	0.15	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.35	N.D.	0.13	0.08	0.12	0.34	1.38	0.22	N.D.	N.D.	N.D.
4	BbF	2.92	1.30	28.2	0.90	4.94	8.04	5.25	6.31	5.74	5.03	8.17	51.57	19.50	19.73	40.05	20.19	5.26	3.71	3.11	8.95	N.D.
4	BkF	N.D.	N.D.	N.D.	86.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
5	BaP	N.D.	N.D.	N.D.	0.16	0.47	N.D.	0.15	N.D.	0.36	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
5	Ind	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.84	N.D.	0.31	N.D.	0.58	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
5	DahA	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
6	BghiP	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.33	N.D.	0.25	N.D.	0.41	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
ΣHAPs		2.92	1.30	28.4	88.8	6.75	8.27	6.04	6.31	7.09	5.19	9.56	51.64	20.57	20.46	43.01	20.94	7.91	3.93	3.11	8.95	0.18

N.D. <0.01 $\mu\text{g g}^{-1}$

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.



Grafica VIII.6-1. Frecuencia de HAPs detectados y no detectados en organismos de marzo.

En marzo se analizaron 14 especies de peces y una de molusco, de las cuales la que presentó la mayor concentración total fue *B. marinus*, en ejemplares capturados en la estación 4 con $88.87\mu\text{g/g}$, en la figura VIII.5-1 se muestra el cromatograma obtenido. El compuesto que se encontró en mayor cantidad en dicha especie fue el benzo(k)fluoranteno con $86.13\mu\text{g/g}$.

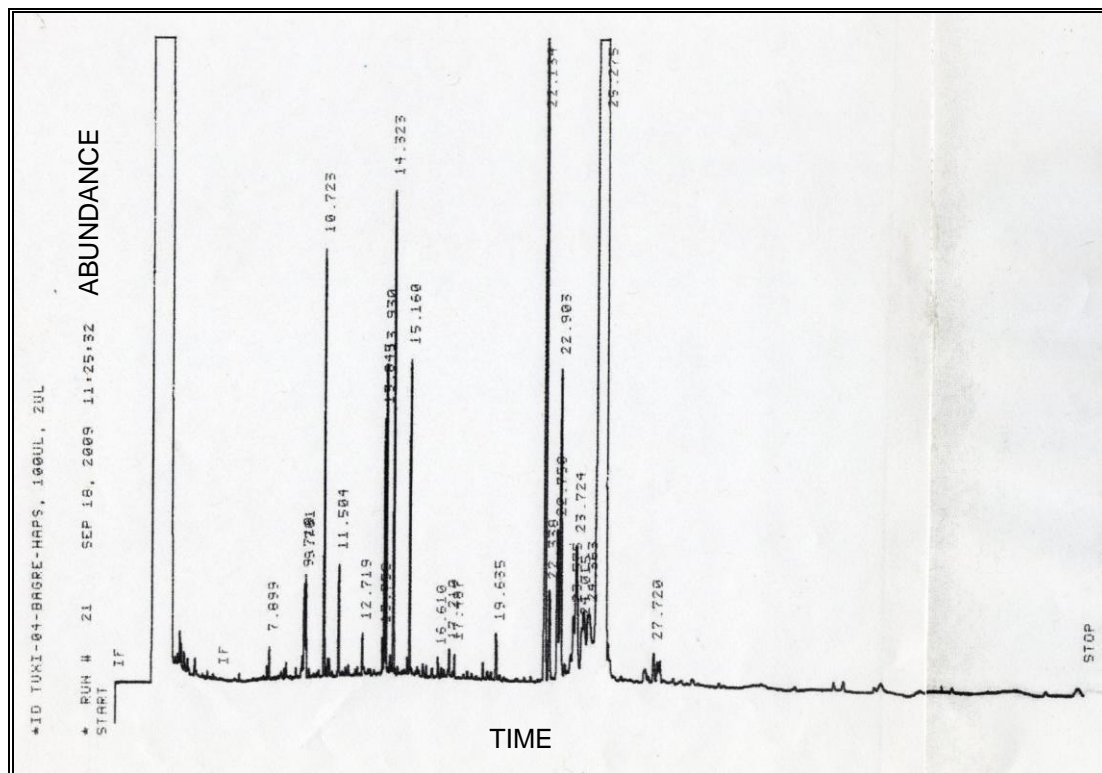


Figura VIII.6-1. Cromatograma de compuestos detectados en tejido de ejemplares de *Bagre marinus* en la estación 4 durante la colecta de marzo.

En segundo lugar las muestras de tejido de *C. hippos* (Est. 4) presentaron una concentración total de $51.64\mu\text{g/g}$, el compuesto dominante fue el benzo(b)fluoranteno con $51.57\mu\text{g/g}$.

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

En tercer lugar *M. curema* (Est. 5) con un total de 43.0µg/g y el compuesto dominante fue el benzo(b)fluoranteno con una concentración de 40.05µg/g.

En cuarto lugar *M. furnieri* (Est. 5) presentó una concentración de 20.94 µg/g y el compuesto dominante fue el benzo(b)fluoranteno con 20.19 µg/g.

En quinto y sexto lugar *M. curema* presentó concentraciones de 20.57 µg/g (Est. 2) y 20.46 µg/g (Est. 4) respectivamente y el compuesto dominante fue el benzo(b)fluoranteno en ambas estaciones (Est. 4, se detectó 19.73 µg/g y en la Est. 2, 19.5 µg/g).

El resto de las especies de peces presentaron concentraciones menores de 10 µg/g en un rango de 1.30 a 9.56 µg/g (Tabla VIII.6-2).

Tabla VIII.6-2. Número de especies analizadas, no. total de estaciones donde se encontraron los ejemplares y concentración máxima de HAPs (µg/g) detectadas en tejidos de especies de la laguna de Tampamachoco y río Tuxpan en marzo.

ESPECIE	No. DE ESPECIES ANALIZADAS	No. DE ESTACIONES DONDE SE ENCONTRARON LOS EJEMPLARES	CONCENTRACION MAXIMA ENCONTRADA EN UN EJEMPLAR
<i>B. ronchus</i>	1	1	2.92
<i>B. chrysourea</i>	1	1	1.3
<i>B. marinus</i>	2	2	86.13
<i>D. auratus</i>	15	4	8.04
<i>E. plumieri</i>	1	1	5.74
<i>C. pectinatus</i>	1	1	5.03
<i>C. parallelus</i>	2	1	8.17
<i>C. hippos</i>	1	1	51.57
<i>M. curema</i>	3	3	40.05
<i>M. furnieri</i>	1	1	20.19
<i>O. niloticus</i>	1	1	5.26
<i>A. probatocephalus</i>	1	1	3.71
<i>L. griseus</i>	1	1	3.11
<i>S. vómer</i>	1	1	8.95
<i>C. virginica</i>	30	1	0.14

En la tabla VIII.6-3 se muestran los resultados de los compuestos detectados y no detectados en las 12 especies de organismos analizados durante el mes de agosto y en la grafica VIII.5-2 se observa la frecuencia de los compuestos detectados que fue de 79 (26%) y los compuestos no detectados que fue de 225 (74%) por lo tanto, la mayoría de los compuestos están por debajo del límite de detección de 0.01µg/g. La especie que presentó mayor cantidad de

compuestos con un total de 8 fue *Caranx hippos*, seguida por *Mugil curema*, *Trichiurus lepturus* y *Hyporhamphus unifasciatus* con 6 compuestos, el resto de las especies presentaron menos de 6 compuestos detectados.

Los compuestos que se detectaron en la mayoría de las especies analizadas fueron el BbF en 12 especies, el Fla en 11 especies y el Cry en 7 especies, por lo tanto para fines estadísticos sólo se consideraran los compuestos antes mencionados. La concentración mínima detectada fue de 0.01 µg/g y la máxima de 17.22µg/g.

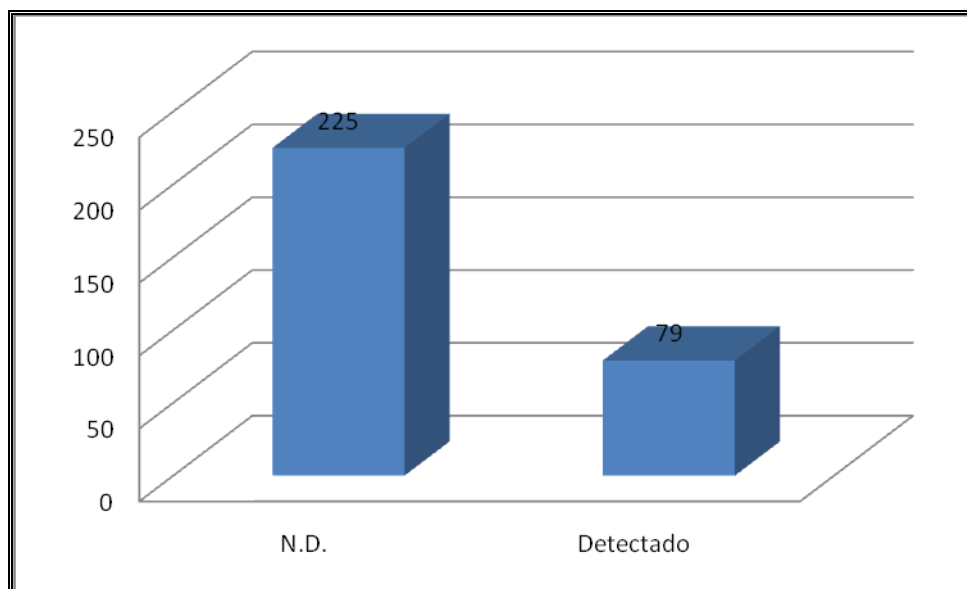
Tabla VIII.6-3. Concentraciones de HAPs en organismos del sistema lagunar Tampamachoco-río Tuxpan, Ver. En agosto, 2009. Valores en $\mu\text{g/g}$ peso seco. En amarillo concentraciones detectadas.

No. de anillos	COMPUESTO	<i>A. felis</i>	<i>B. marinus</i>	<i>E. saurus</i>		<i>D. auratus</i>	<i>C. melanopus</i>		<i>C. hippos</i>				<i>M. curema</i>		<i>O. saurus</i>	<i>T. lepturus</i>	<i>H. unifasciatus</i>	<i>P. octonemus</i>	<i>Crassostrea virginica</i>	
		Bagre	Bagre bandera	Macabí		Mojarra blanca	Bagre Bocachica		Jurel				Lebrancha		Quiebra cuchillos	Sable, cinta	Balacu	Barbudo, ratón	E-1	E-2
		E-1	E-2	E-2	E-7	E-7	E-2	E-4	E-3	E-4	E-6	E-7	E-2	E-5	E-6	E-6	E-8	E-8	E-1	E-2
2	Nap	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2	Acy	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.02	0.02	N.D.	N.D.	N.D.
2	Ace	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2	Flu	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.01	0.01	N.D.	N.D.	N.D.
3	Phe	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
3	Ant	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.04	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
3	Fla	0.05	0.07	0.05	0.03	0.03	0.02	N.D.	0.17	0.01	0.12	0.03	0.10	0.27	0.11	0.15	0.02	N.D.	N.D.	0.08
4	Pir	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	0.03	0.02	N.D.	N.D.	0.05	0.03	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	0.05
4	BaA	0.04	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.03	0.03	N.D.	N.D.	0.54	0.51	N.D.	0.05	0.03	N.D.	N.D.	N.D.
4	Cry	N.D.	N.D.	0.05	N.D.	0.15	N.D.	0.03	0.25	0.02	0.10	N.D.	0.15	0.34	N.D.	0.15	N.D.	N.D.	N.D.	0.06
4	BbF	12.17	10.34	2.26	2.42	1.67	7.30	3.08	12.57	17.22	12.41	12.9	7.98	16.4	3.81	5.62	4.70	4.40	0.19	0.86
4	BkF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	12.58	9.52	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
5	BaP	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
5	Ind	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.06	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.11	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
5	DahA	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
6	BghiP	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.07	0.08	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.07	N.D.	0.16	N.D.	N.D.	0.05	N.D.	N.D.
ΣHAPs		12.27	10.41	2.37	2.45	1.85	7.42	3.25	25.67	26.82	12.68	12.9	8.89	17.6	4.19	6.00	4.79	4.45	0.19	1.05

N.D. $<0.01 \mu\text{g g}^{-1}$

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.



Grafica VIII.6-2. Frecuencia de HAPs detectados y no detectados en organismos de agosto.

Durante el mes de agosto se colectaron y analizaron ejemplares pertenecientes a 11 especies de peces y una de molusco, dentro de las cuales, *C. hippos* presentó la mayor concentración total de HAPs con $26.82\mu\text{g/g}$ (Estación 4), el compuesto dominante en dicha estación fue el benzo(b)fluoranteno con $17.22\mu\text{g/g}$; en segundo, esta misma especie presentó una concentración de $25.67\mu\text{g/g}$ (Est. 3) y se detectaron 2 compuestos dominantes con casi la misma concentración el benzo(k)fluoranteno con $12.58\mu\text{g/g}$ y el benzo(b)fluoranteno con $12.57\mu\text{g/g}$.

En tercer lugar *M. curema* (Estación 5) presentó una concentración de $17.60\mu\text{g/g}$ y el compuesto con una mayor concentración fue el benzo(b)fluoranteno con $16.42\mu\text{g/g}$. En cuarto y quinto lugar *Caranx hippos* presentó concentraciones de $12.95\mu\text{g/g}$ (Estación 7) y $12.68\mu\text{g/g}$ (Estación 6) respectivamente, el compuesto dominante fue el benzo(b)fluoranteno con $12.92\mu\text{g/g}$ (Estación 7) y $12.41\mu\text{g/g}$ (Estación 6).

En sexto lugar *A. felis* (Est. 1) tuvo un total de $12.27\mu\text{g/g}$ y el compuesto dominante fue el benzo(b)fluoranteno con $12.17\mu\text{g/g}$. En séptimo lugar *B. marinus* mostró $10.41\mu\text{g/g}$ (Estación 2) y el compuesto dominante fue el benzo(b)fluoranteno con $10.34\mu\text{g/g}$. El resto de las especies de peces presentaron concentraciones por debajo de $10\mu\text{g/g}$ en un rango de 1.85 a $8.89\mu\text{g/g}$. La mayor concentración total durante agosto se detectó en ejemplares de la especie *C. hippos* (Tabla VIII.6-4).

Tabla VIII.6-4. Número de especies analizadas, no. de estaciones donde se encontraron los ejemplares y concentración máxima de HAPs ($\mu\text{g/g}$) detectadas en tejidos de especies de la laguna de Tampamachoco y río Tuxpan en agosto.

ESPECIE	No. DE ESPECIES ANALIZADAS	No. DE ESTACIONES	CONCENTRACION MAXIMA ENCONTRADA EN UN EJEMPLAR
<i>A. felis</i>	1	1	12.17
<i>B. marinus</i>	1	1	10.34

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

<i>E. saurus</i>	2	2	2.42
<i>D. auratus</i>	1	1	1.67
<i>C. melanopus</i>	2	2	7.3
<i>C. hippos</i>	4	4	17.22
<i>M. curema</i>	2	2	16.42
<i>O. saurus</i>	1	1	3.81
<i>T. lepturus</i>	1	1	5.62
<i>H. unifasciatus</i>	1	1	4.7
<i>P. octonemus</i>	1	1	4.4
<i>C. virginica</i>	50	2	0.86

Comparando los resultados durante ambos muestreos se observa que se detectaron un total de 13 compuestos de HAPs, en 22 especies de peces y una de molusco (Tabla VIII.6-5 y 6); de los 13 compuestos, 12 se presentan en marzo y 12 en agosto.

Tabla VIII.6-5. Compuestos HAPs encontrados en tejido de organismos y no. de especies donde de detectó el compuesto en marzo y agosto.

COMPUESTO	No. ESPECIES MARZO	No. ESPECIES AGOSTO
Acy	2	3
Flu	0	3
Phe	2	1
Ant	3	2
Fla	8	11
Pir	3	6
BaA	3	5
Cris	6	6
BbF	13	12
BkF	1	1
BaP	3	0
Ind	2	2
BghiP	2	4

Tabla VIII.6-6. Especies colectadas durante el muestreo de marzo y agosto.

ESPECIES COLECTADAS EN MARZO	ESPECIES COLECTADAS EN AGOSTO
<i>Archosargus probatocephalus</i>	<i>Ariopsis felis</i>
<i>Bairdiella chrysoura</i>	
<i>Bagre marinus</i>	
<i>Bairdiella ronchus</i>	
<i>Caranx hippos</i>	
<i>Centropomus parallelus</i>	<i>Cathorops melanopus</i>
<i>Centropomus pectinatus</i>	
<i>Crassostrea virginica</i>	
<i>Diapterus auratus</i>	
<i>Eugerres plumieri</i>	<i>Elops saurus</i>
<i>Lutjanus griseus</i>	<i>Hyporhamphus unifasciatus</i>
<i>Mugil curema</i>	
<i>Micropogonias furnieri</i>	<i>Oligoplites saurus</i>
<i>Oreochromis niloticus</i>	<i>Polydactylus octonemus</i>
<i>Selene vomer</i>	<i>Trichiurus lepturus</i>

En comparación con los HAPs detectados en sedimento, en las especies se encontraron ausentes tres compuestos en ambos muestreos, uno en marzo y uno en agosto (Tabla VIII.6-7).

Tabla VIII.6-7. Listado de HAPs ausentes en individuos de especies bentónicas y nectónicas muestreados durante los meses de marzo y agosto.

Marzo	Agosto
Nap	
Ace	
Flu	BaP
DahA	

Se cuantificaron dos compuestos con valor único estacional y espacial en dos especies distintas: *B. marinus* (E4) con 86.13 y *C. hippos* (E3) con 0.03.

Durante el mes de marzo se colectaron ejemplares de cuatro especies con un sólo tipo de HAP cuantificable, mientras que en el mes de agosto no existieron casos de acumulación de un sólo compuesto de HAP (Tabla VIII.6-8).

Tabla VIII.6-8. Lista de especies con bioacumulación de un solo compuesto para el mes de marzo.

ESPECIE	COMPUESTO
<i>B. ronchus</i>	BbF
<i>B. chrysourea</i>	
<i>L. griseus</i>	
<i>S. vómer</i>	

Durante el mes de marzo se detectaron concentraciones de varios tipos de HAPs en 11 especies, y en agosto fueron 12 las especies con presencia de más de un compuesto en sus tejidos, solamente ejemplares de cinco especies se colectaron en ambas épocas del año (Tablas VIII.6-9 y 10).

Tabla VIII.6-9. Lista de especies con bioacumulación de varios HAPs colectadas en el mes de marzo.

<i>B. marinus</i>	<i>D. auratus</i>	<i>E. Plumieri</i>	<i>C. Pectinatus</i>	<i>C. parallelus</i>	<i>C. hippos</i>	<i>M. curema</i>	<i>M. furnieri</i>	<i>O. niloticus</i>	<i>A. probatocephalus</i>	<i>C. virginica</i>
Acy						Acy				
						Phe				
Ant			Ant							
Fla			Fla							Fla
Pir						Pir				Pir
						BaA				
Cry				Cry		Cry				
BbF										
BkF										
BaP										
	Ind									
	BghiP									

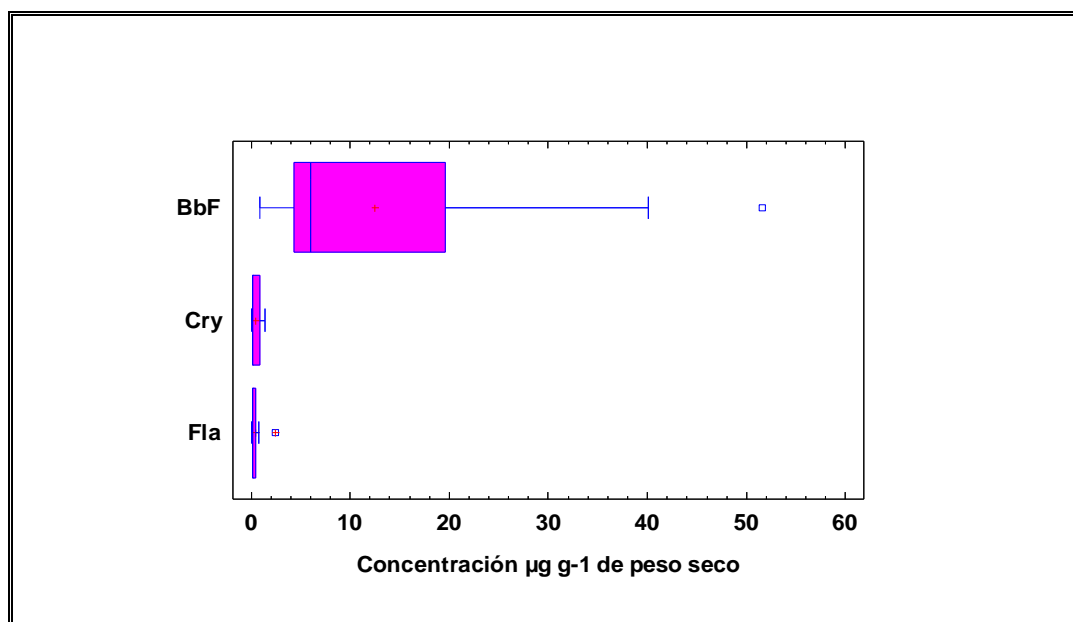
Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

Tabla VIII.6-10. Lista de especies con bioacumulación de múltiples HAPs colectadas en el mes de agosto.

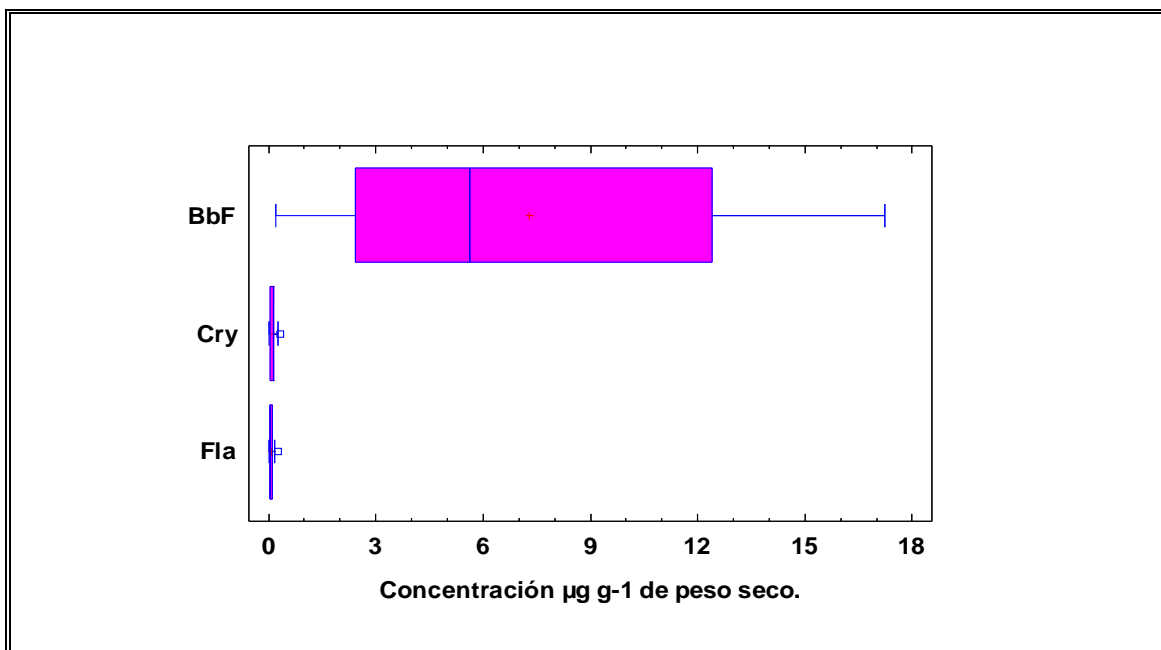
<i>A. felis</i>	<i>B. marinus</i>	<i>E. saurus</i>	<i>D. auratus</i>	<i>C. melanopus</i>	<i>C. hippos</i>	<i>M. curema</i>	<i>O. saurus</i>	<i>T. lepturus</i>	<i>H. unifasciatus</i>	<i>P. octonemus</i>	<i>C. virginica</i>
								Acy			
					Flu			Flu			
					Phe						
					Ant						
Fla											Fla
Pir				Pir					Pir		Pir
BaA				BaA				BaA			
			Cry					Cry			Cry
BbF											
						BkF					
					Ind						
					BghiP					BghiP	

El diagrama de distribución de valores de los tres compuestos más detectados en las especies colectadas durante marzo muestra que las concentraciones del Cry y Fla se ubican en un rango estrecho de variación, sin embargo el BbF tiene un rango de mayor amplitud, cabe mencionar que el BkF presentó una única concentración en *B. marinus* muy superior a las concentraciones medidas para el resto de los compuestos (Gráfica VIII.6-3).



Gráfica VIII.6-3. Distribución de valores para las concentraciones de los tres HAPs con mayor presencia en las especies colectadas durante el mes de marzo.

El diagrama de distribución de valores de los tres compuestos más abundantes en las especies de agosto muestra que las concentraciones del Cry y el Fla presentan un rango estrecho de variación, sin embargo el BbF sigue manteniendo un rango de mayor amplitud (Gráfica VIII.6-4).



Gráfica VIII.6-4. Distribución de valores para las concentraciones de los tres HAPs con mayor presencia en las especies colectadas durante el mes de agosto.

IX. DISCUSIÓN

IX.1 Presencia y concentración de HAPs en sedimentos

Los resultados muestran que en el mes de marzo el 81% de las mediciones realizadas para cada compuesto fueron no detectadas y sólo el 19% fueron detectadas; durante el mes de agosto se encontró que el 52% fueron detectadas y el 48% fueron no detectadas.

Ahora bien, de los compuestos analizados se encontró un total de 14 compuestos en sedimentos a lo largo del ciclo anual, de los cuales 9 se presentaron en la temporada de secas y 14 en la temporada de lluvias. Los HAPs que se presentaron en mayor concentración en ambas colectas fueron (de mayor a menor):

Cry>BaA>DahA>BghiP>Fla>Phe

De acuerdo al número de anillos de los HAPs, se observó que durante ambas colectas los compuestos dominantes se presentaron en el siguiente orden:

4 > 6 > 5 > 3 > 2

Hay que señalar que en ambas estaciones (secas y lluvias) predominan los compuestos de 4 anillos, con concentraciones variables, aunque siempre en mayor cantidad que el resto de los compuestos (Gráfica VIII.2-2). La presencia de una mayor cantidad de HAPs de 4 anillos indica un aporte continuo de hidrocarburos derivados de procesos pirolíticos en zonas cercanas al área de estudio.

Comparando los resultados obtenidos durante ambas colectas se observa que en el mes de marzo (secas) la cantidad de compuestos detectados y la frecuencia con que se detectaron en cada estación, fue menor que en el mes de agosto (lluvias), estas variaciones son debido probablemente al arrastre de contaminantes de la porción superior de la cuenca del río Tuxpan y de zonas urbanas causado por las lluvias, lo que origina que los contaminantes se acumulen principalmente en zonas donde la velocidad del flujo es menor.

Con respecto a su distribución en ambos periodos del año (secas y lluvias) las mayores concentraciones de HAPs en sedimentos se observaron en las estaciones ubicadas sobre el cauce del río Tuxpan aunque con patrones de presencia y proporción de compuestos distintos, exceptuando la predominancia del criseno (Fotografía IX.1-1).

Ambas estaciones se ubican en puntos con una velocidad de flujo menor a la del cauce central del río Tuxpan, por lo que funcionarían como sitios de depósito de sedimentos trasladados desde la porción superior de la cuenca.



Figura IX.1-1. Ubicación de las estaciones con la mayor concentración de HAPs cuantificados en marzo y agosto de 2009.

De esta manera, se observan dos áreas con respecto a la concentración de HAPs en sedimentos: la zona interior de la laguna con menor influencia del río Tuxpan y los aportes de la porción superior de la cuenca, y la zona exterior con mayor aporte fluvial y marino.

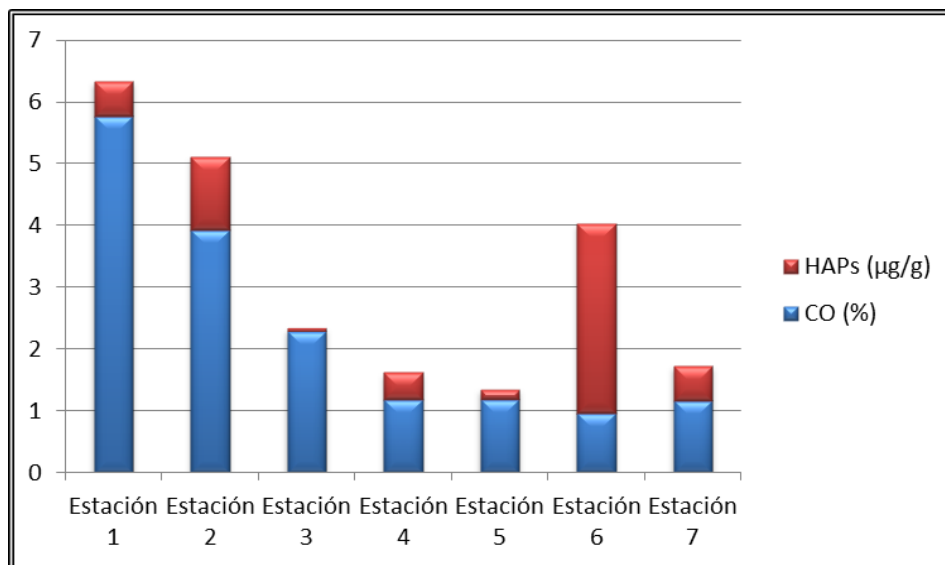
En el primer caso encontramos al interior de la laguna concentraciones inferiores y con menor intervalo de variación entre las temporadas de secas y lluvias que en el cauce del río Tuxpan, donde las mayores concentraciones muestran además una fluctuación de valores mayor.

Cabe mencionar que las estaciones ubicadas en el cauce del río Tuxpan se encuentran influenciadas por la zona de descarga de la laguna hacia el río Tuxpan, la esorrentía del mismo río hacia el mar y la influencia del mar hacia la zona estuarina por efecto de las mareas, en esta área, donde interactúan el río, la laguna y el mar, se establece una zona de choque con aguas de diferente salinidad y temperatura, lo cual puede generar una zona receptora de contaminantes. En las estaciones 6 y 7 ubicadas en esta zona, se reportó la salinidad, el contenido de oxígeno y los pHs más bajos, que normalmente se registran en aguas fluviales, lo que puede ser resultado de una bajamar, por lo tanto, es evidente que la presencia de contaminantes en la zona es debido, en gran medida al arrastre de contaminantes provenientes de la porción superior de la cuenca del río Tuxpan. En el trabajo de GESAMP, 2001 se reporta que los materiales suspendidos y los contaminantes transportados por los ríos tienden a depositarse, en las desembocaduras, donde el agua dulce se encuentra con el agua de mar y en otras áreas donde la circulación se ve impedida.

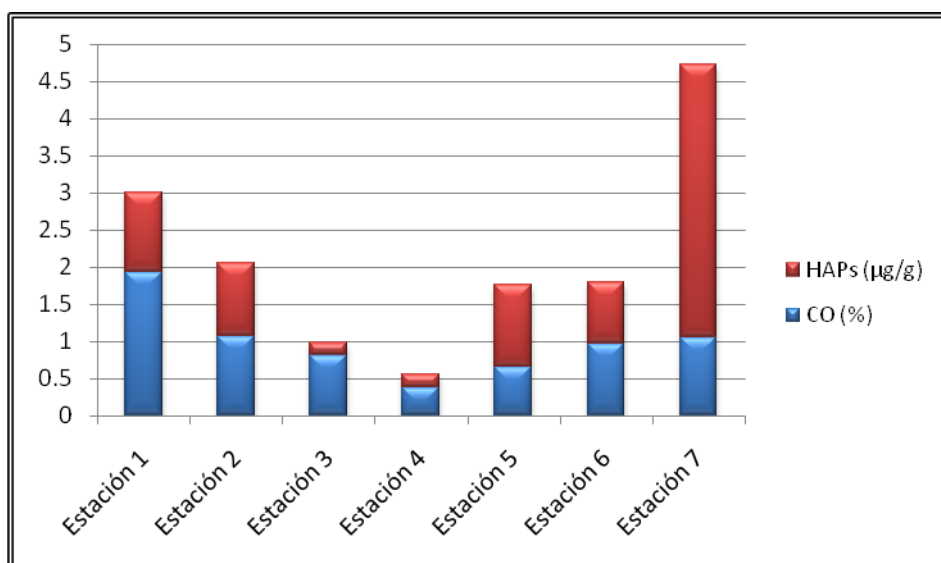
Otros factores importantes que generan contaminación de HAPs en la zona son: el intenso tránsito de buques debido a las actividades portuarias y que se localiza en el área de un sitio de almacenaje de petróleos mexicanos.

Aunque en los sedimentos lagunares generalmente los contenidos elevados de materia orgánica corresponden a reservorios significativos para HAPs (Pereira *et al.*, 1999; Wu *et al.*, 2003); ya que usualmente estos hidrocarburos se asocian con partículas finas como limos y arcillas (Bouloubassi *et al.*, 2001), diversos autores han reportado que existe una correlación positiva entre la concentración total de HAPs y el contenido de carbono orgánico total y han indicado que es un factor importante en el control de la absorción de los HAPs en los sedimentos (Ying *et al.*, 2008). En el caso de los muestreos efectuados durante 2009 no se observó correlación entre la concentración de HAPs en cada estación de muestreo con la cantidad de carbono orgánico (Gráficas IX.1-1 y 2), ni tampoco con el tamaño de partícula. Casos similares se han reportado en algunos trabajos donde no encontraron correlaciones significativas entre un contaminante orgánico con el carbono orgánico total o el tamaño de partículas sedimentarias (Petrona *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2007; Secco *et al.*, 2005; Ünlü y Alpar, 2006; Simpson *et al.*, 1996; Botello y Calva, 1998).

Este comportamiento puede deberse a diferentes factores que han sido reportados en la literatura por diversos autores, Botello y Calva, (1998) mencionan que en las lagunas costeras del Golfo de México existe evidencia de que la concentración de HAPs está definida por la influencia de los aportes continentales independientemente del tipo y composición del sustrato presente. Simpson *et al.* (1996) observó que para bajas a moderadas concentraciones de HAPs era posible encontrar correlaciones poco significativas y Ünlü y Alpar, 2006 mencionan que para niveles bajos de HAPs en sedimentos, las relaciones que pudieran existir entre las concentraciones totales de HAPs y CO son frecuentemente enmascaradas por los altos niveles de materia orgánica producidos en sedimentos con alta productividad y una variedad microfaunal bentónica. Petrona *et al.* (2003) mencionan que la ausencia de correlaciones significativas entre un contaminante con el carbono orgánico o el tamaño de partículas sedimentarias se debe probablemente a la influencia de múltiples fuentes de entrada o a las variaciones en las características del sedimento y composición mineralógica. Zhang *et al.* (2007) reportaron que las condiciones hidrodinámicas determinan los componentes del sedimento y el tamaño de grano; y por lo tanto, son los factores más importantes que influyen en la distribución de contaminantes en los sedimentos superficiales. Secco *et al.* (2005) sugieren que la distribución de contaminantes orgánicos se debe principalmente a la proximidad y la importancia de las fuentes, además de la variabilidad en las dinámicas de depositación de sus sedimentos.



Gráfica IX.1-1. Porcentajes de carbono orgánico y concentración de HAPs expresada en $\mu\text{g/g}$, para cada estación de muestreo en el mes de marzo.



Gráfica IX.1-2. Porcentajes de carbono orgánico y concentración de HAPs expresada en $\mu\text{g/g}$, para cada estación de muestreo en el mes de agosto.

En las estaciones más expuestas a la acción de la marea y el flujo del río Tuxpan se observa que el carbono orgánico tiende a disminuir en los sedimentos, sin embargo esta tendencia no se presenta en las concentraciones de HAPs en sedimento.

Comparativamente, la concentración total de HAPs cuantificada durante el presente estudio fue menor a la registrada hace 11 años para la laguna de Tampamacho por Botello y Calva, así como la diversidad de compuestos, coincidiendo únicamente el origen de los mismos (grafica VIII.3-1). Esta disminución puede deberse a las actividades de dragado que se han realizado a lo largo del canal, lo que pudo originar la remoción de los contaminantes contenidos en los sedimentos hacia fuera de la laguna. También se observó que las concentraciones de HAPs obtenidas en este

estudio son menores en comparación con otros trabajos realizados en diversos sistemas acuáticos de México.

IX.2 Origen de los HAPs detectados

De acuerdo al número de anillos de los compuestos detectados y con base en los índices moleculares calculados se observó que las fuentes pirolíticas fueron las dominantes, sin embargo, también se detectaron fuentes petrogénicas, por lo tanto, se considera un origen mixto con predominancia de fuentes pirolíticas en los sedimentos analizados.

Puesto que los HAPs de 4 anillos (criseno, benzo(a)antraceno, pireno) se originan principalmente a través de procesos desarrollados a altas temperaturas o pirólisis, principalmente la quema de combustibles fósiles y emisiones de la industria petrolera, podemos suponer que la presencia mayoritaria de los HAPs de 4 anillos aromáticos (alto peso molecular) tanto por cantidad de compuestos, persistencia temporal, concentraciones máximas y promedio cuantificadas, significa que el aporte de hidrocarburos derivados de los procesos pirolíticos cercanos a la laguna de Tampamachoco y río Tuxpan es continuo a lo largo del año aunque varía la cantidad total aportada en cada temporada, ya sea por causas naturales o regulación en los procesos de combustión que generan los HAPs.

En diversos trabajos, se ha reportado que la presencia y abundancia de compuestos de HAPs formados por 4 y 5 anillos aromáticos en sedimentos lagunares estuarinos recientemente depositados, es similar a la encontrada en las partículas atmosféricas, que usualmente provienen de las áreas urbanas y pueden llegar al ambiente acuático, por la depositación atmosférica y el posterior arrastre por lluvias o cauces de agua superficial de los efluentes urbanos e industriales (Wu *et al.*, 2003), condición que se cumple en el caso de la laguna de Tampamachoco donde se presentan las fuentes descritas.

La presencia de HAPs ha sido reportada en la mayor parte de los cuerpos de agua costeros del Golfo de México derivados de la pirólisis y de los hidrocarburos procesados en la mayor parte del Golfo, tanto en la costa mexicana como en las de Estados Unidos un ejemplo es la laguna Madre que presenta HAPs derivados de derrames de ductos e instalaciones industriales (Sharma, *et al.*, 1997).

Las fuentes principales de HAPs pirolíticos a nivel mundial, son la combustión de carbón en procesos industriales y de generación de energía eléctrica así como derivados de las emisiones de los motores diesel; estos hidrocarburos se asocian fuertemente a las partículas de hollín que eventualmente se depositan en el agua o en la zona terrestre aledaña y llegan al ecosistema acuático con los escurrimientos; hay que señalar que en la atmósfera y en la zona fótica del agua, los HAPs sufren fotooxidación además de la degradación microbiana que ocurre en la columna de agua y en los sedimentos dando como resultado distintos patrones de biodisponibilidad hacia los organismos pelágicos y bentónicos tanto en composición como en cantidad (Hartmann *et al.*, 2004).

En el caso de la laguna de Tampamachoco el origen pirolítico de los HAPs encontrados en la biota fue dominante (benzo(b)fluoranteno y criseno), registrándose una pequeña proporción de los compuestos de origen petrogénico.

En el trabajo realizado por Lipiatou *et al.* (1997) reportaron que en la columna de agua los HAPs de alto peso molecular presentan un tiempo de residencia mayor y por lo tanto los HAPs de bajo peso molecular son más fácilmente removidos de la columna de agua. Estos autores también reportaron que la depositación atmosférica de HAPs está dominada por los bezofluorantenos, por tal motivo en la columna de agua se encontraran mayor cantidad de estos compuestos.

IX.3 HAPs detectados en organismos

De manera general, se ha observado que los análisis de los sedimentos proporcionan información sobre los niveles de contaminación de los HAPs en la laguna, mientras que el contenido de estos hidrocarburos en los peces y bivalvos aporta datos sobre la carga disponible de estos en los organismos.

En este trabajo se evaluó el contenido de HAPs en el tejido muscular de varias especies de peces ya que algunos autores como Quintero y Díaz (1994) han reportado que en el tejido muscular de peces la vida media de los hidrocarburos es mayor que en otros tejidos. También, se evaluó el contenido de HAPs en una especie de un organismo bentónico (*C. virginica*) que es considerado un importante indicador de contaminación en ambientes acuáticos debido a su limitada capacidad para metabolizar y depurar contaminantes (Kim *et al.*, 2001) y en diversos estudios realizados por Wade *et al.* (1989) y Senthil *et al.* (2008) se reportó que las concentraciones de HAPs en organismos bentónicos fueron superiores a las de los peces e incluso que en los sedimentos. Sin embargo, en este estudio el organismo bentónico (*C. virginica*) presentó las menores concentraciones de HAPs en ambas colectas en comparación con los peces y los sedimentos, una razón muy probable es que los organismos colectados estaban en etapa juvenil, por lo que, estos organismos no habían acumulado en sus tejidos grandes cantidades de contaminantes como los organismos adultos.

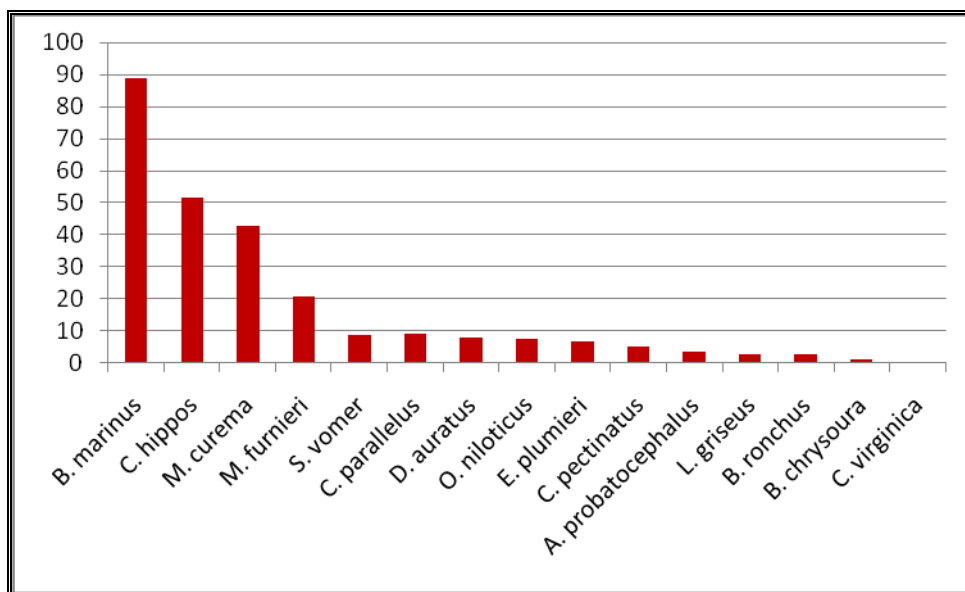
Ahora bien, el contenido de HAPs en tejido muscular de las especies de peces es resultado de una dinámica multifactorial ambiental y se ha reportado, que la ruta principal de ingreso de estos hidrocarburos es a través del alimento, así como también, el aporte hídrico que existe por la filtración que realizan para la captación de oxígeno en su proceso respiratorio y una vez que los HAPs entran en un organismo pueden acumularse y cuando estos organismos son consumidos por otros se genera un proceso de biomagnificación a través de las cadenas tróficas (Baqueiro-Cárdenas *et al.*, 2007). De acuerdo con esto, las especies colectadas en la laguna de Tampamachoco y río Tuxpan durante las dos colectas se clasificaron en 4 niveles tróficos como se muestra en la tabla VII.2-1 y se describe a continuación:

- De primer orden como los ostiones esencialmente filtradores, que asimilan microflora y microfauna (plancton) y que como parte de ese proceso son susceptibles a la ingestión de grandes cantidades de sedimento en suspensión y agua.

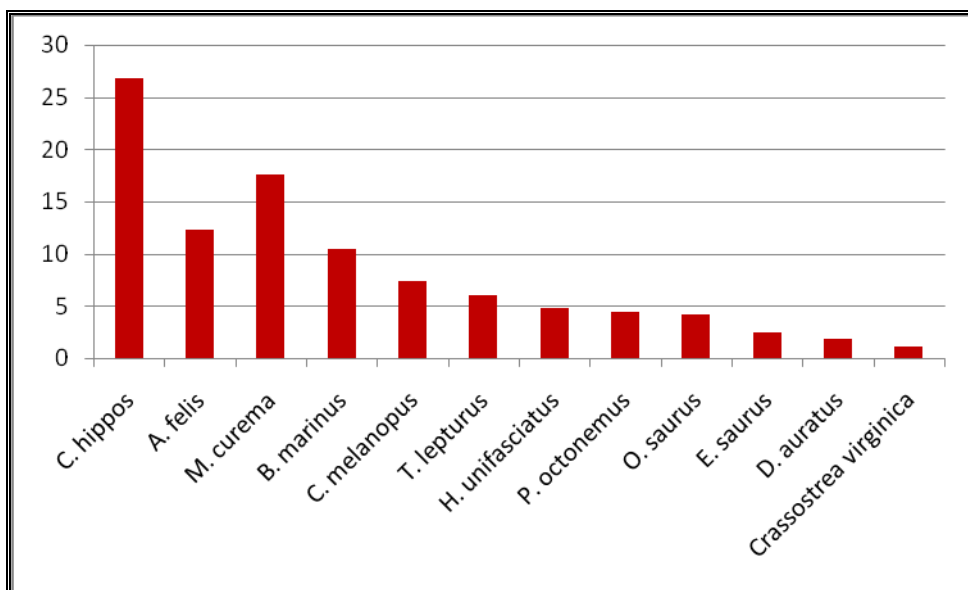
- De segundo orden representado por la lebrancha (*M. curema*) y la mojarra blanca (*D. auratus*), son herbívoros, detritívoros y omnívoros, su fuente principal de alimento es el sedimento, el detrito, la micro y meiofauna así como la comunidad microbiana de las partículas orgánicas.
- De tercer orden como el bagre (*B. marinus*), que se alimentan de una gran diversidad de elementos como los ya mencionados además de detritus y restos vegetales por lo que los contaminantes orgánicos llegan a ellos biomagnificados.
- De cuarto orden como el jurel (*C. hippos*) y el pargo (*L. griseus*) son exclusivamente carnívoros y se alimentan de las especies anteriores por lo que reciben la carga de xenobióticos más grande.

En este sentido, el esquema trófico formado por las especies capturadas en la laguna de Tampamachoco y río Tuxpan, explica el proceso de aporte e ingesta de los HAPs que son acumulados en consumidores primarios, y que se presentan de forma magnificada en los consumidores superiores. En el caso de las especies donde no se observó claramente este comportamiento probablemente es debido a las etapas del ciclo reproductivo de las especies, Quintero y Díaz (1994) reportaron que estas etapas originan variaciones en el contenido graso del tejido muscular y por lo tanto modificarán las concentraciones de HAPs cuantificadas.

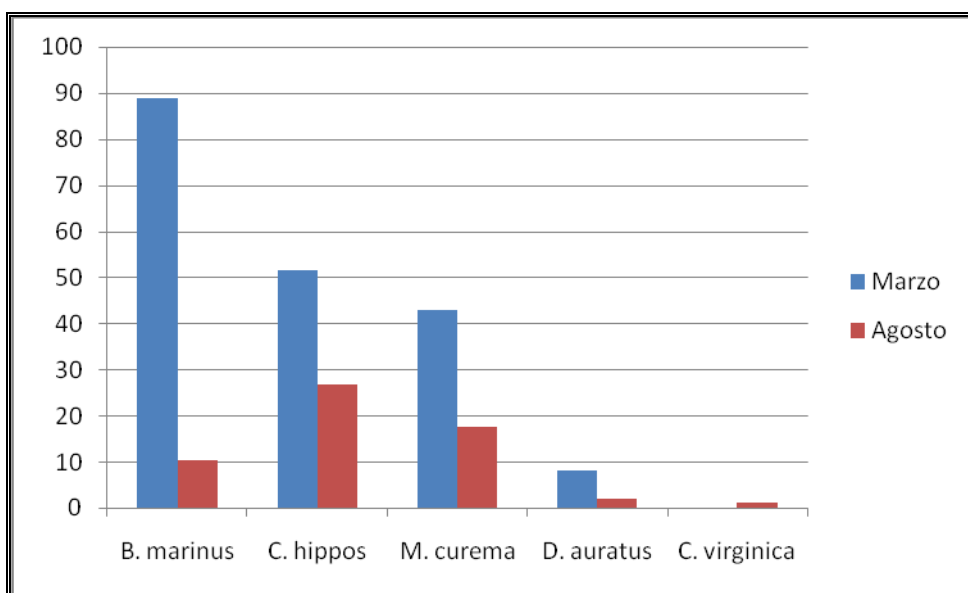
En el presente estudio, las especies de peces analizadas tuvieron las mayores concentraciones de HAPs en ambas colectas, con variaciones significativas de concentración entre marzo y agosto, tendiendo al decremento en la temporada de lluvias (Gráficas IX.3-1, 2 y 3).



Gráfica IX.3-1. Concentraciones totales de HAPs en tejido de organismos en el mes de marzo de 2009 expresada en µg/g.



Gráfica IX.3-2. Concentraciones totales de HAPs en tejido de organismos en el mes de agosto de 2009 expresada en µg/g.



Gráfica IX.3-3. Concentraciones totales de HAPs en especies que se colectaron en ambas colectas.

En la época de lluvias los aportes (pluvial, fluvial y atmosférico) de agua al sistema lagunar son mayores, lo que origina el arrastre y depósito de contaminantes en zonas donde la velocidad de flujo es menor como ocurre en algunas de las estaciones muestreadas, lo que originó altas concentraciones en sedimentos y se esperaba encontrar una mayor cantidad de HAPs en la columna de agua debido a que el arrastre de partículas puede producir la resuspensión de los contaminantes adheridos a ellas y de esta forma pueden ser exportados hacia la zona costera, o ser mantenidos en suspensión por un periodo largo de tiempo (Espinosa *et al.*, 1995). En el caso de la laguna de Tampamachoco y río Tuxpan probablemente la mayoría de los contaminantes fueron depositados en zonas de baja velocidad de flujo o

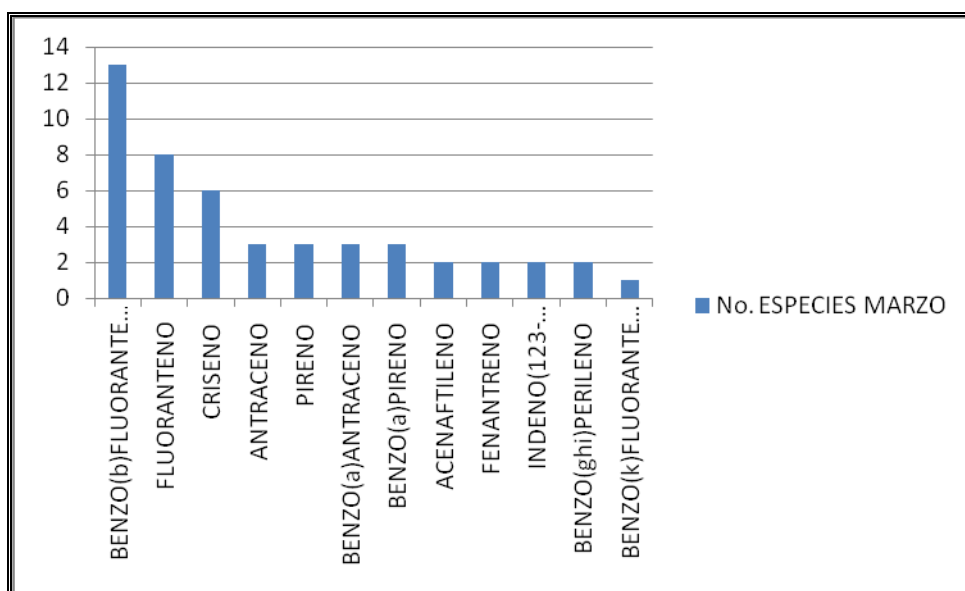
Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

exportados hacia la zona costera, por lo que, la biodisponibilidad de los HAPs disueltos o suspendidos en la columna de agua fue menor para las especies acuáticas como los peces y por lo tanto, las concentraciones detectadas fueron menores.

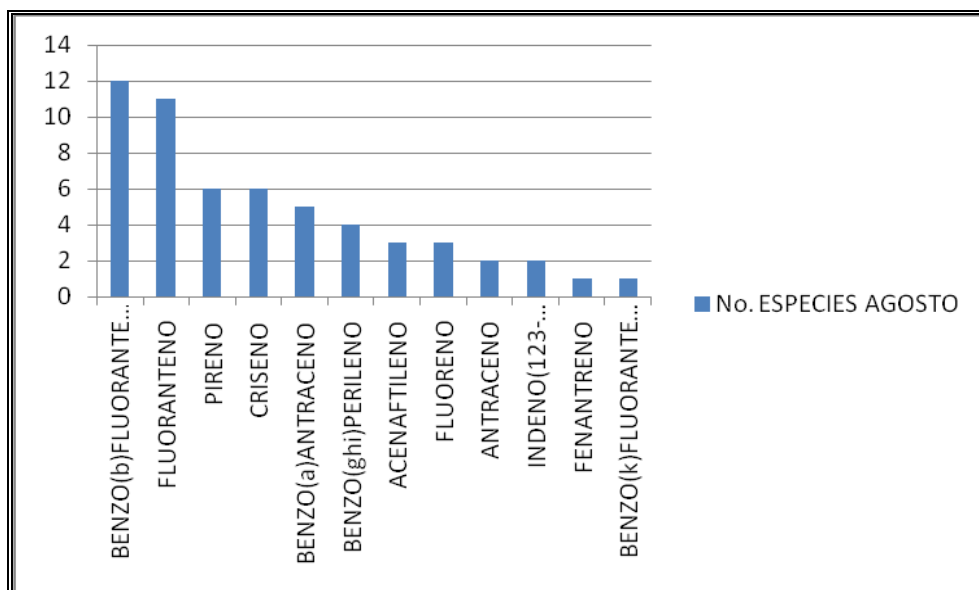
En la época de secas el aporte (pluvial, fluvial y atmosférico), el volumen de agua y la velocidad de flujo disminuyen, por lo tanto, las concentraciones en sedimentos son menores y se esperaría encontrar concentraciones mucho menores de HAPs en la fase disuelta del agua ya que se ha observado que cuando la velocidad de la corriente disminuye los contaminantes dispersos en la columna de agua se asientan y por lo tanto la biodisponibilidad para los peces es menor, sin embargo, en el presente trabajo en esta época se detectaron concentraciones mayores en peces, lo que indica que probablemente esto se debe a algún factor local como el tránsito de lanchas de motor y embarcaciones que circulan por el canal de la laguna y el río Tuxpan debido a las actividades pesqueras y portuarias, lo que origina que los HAPs acumulados en los sedimentos se mantengan en suspensión en la columna de agua y por lo tanto, estarán más biodisponibles para los peces.

La cantidad de compuestos detectados en las distintas especies fueron 12 en ambas temporadas, sin embargo, se detectaron mayores concentraciones en los peces de marzo, el benzo(b)fluoranteno, fue el compuesto que más se presentó en las diversas especies evaluadas y el más disponible para el consumo humano, el benzo(k)fluoranteno presentó la concentración más alta, sin embargo, se detectó en una sola especie, además de registrar fluoranteno, criseno y benzo(a)antraceno, considerados como carcinógenos potenciales y su consumo frecuente y abundante puede contribuir a incrementar el riesgo hacia la salud humana (Gráfica IX.3-4). Para el mes de agosto se mantiene la misma tendencia; el compuestos que más se detectó fue el benzo(b)fluoranteno, así como también, presentó la concentración total más alta, seguido por el fluoranteno y criseno (Gráfica IX.3-5).



Gráfica IX.3-4. Cantidad de especies con presencia de un compuesto HAP específico en el mes de marzo.

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.



Gráfica IX.3-5. Cantidad de especies con presencia de un compuesto HAP específico en el mes de agosto.

Los compuestos con las mayores concentraciones de HAPs en tejidos fueron también los más frecuentes en las distintas especies, el benzo(b)fluoranteno es el compuesto más disponible tanto por la presencia del mismo en diversas especies como por la concentración total encontrada en tejidos de especies acuáticas, el benzo(k)fluoranteno presenta altas concentraciones en tejido, aunque su incidencia en el número de especies que lo presentan es baja (Gráficas IX.3-5). El benzo(b)fluoranteno se ha reportado en otros trabajos como uno de los compuestos más abundantes en diversas especies de peces y probablemente es debido a que este compuesto es bioacumulado más fácilmente debido a que presenta una mayor afinidad hacia los tejidos lipídicos de los organismos que otros compuestos. Otra razón probable es que, como ya se mencionó la depositación atmosférica de HAPs está dominada por los bezofluorantenos como reportaron (Lipiatou *et al.*, 1997) y por lo tanto, estarán más disponibles en la columna de agua para los organismos acuáticos como los peces.

IX.4 Potenciales efectos de los HAPs detectados para la salud humana.

Es importante mencionar que los 14 compuestos detectados en sedimentos son considerados como contaminantes prioritarios por la EPA, la OMS y la CEE, debido a sus propiedades carcinogénicas, mutagénicas y teratogénicas (Neff, 2002), los cuales son: naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(k)fluoranteno, dibenzo(ah)antraceno, indeno(1,2,3-cd)pireno y benzo(ghi)perileno.

La mayoría de las concentraciones totales de HAPs encontradas en los sedimentos de las estaciones muestreadas, estuvo por debajo de la concentración umbral para provocar efectos adversos a la comunidad bentónica y salud humana, excepto la estación 6 en marzo y la 7 en agosto, ubicadas en el río Tuxpan, fueron los sitios con la mayor presencia de cancerígenos probables representados por el criseno.

De manera puntual, las concentraciones del criseno, benzo(a)antraceno, dibenzo(ah)antraceno, fluoranteno y fenantreno, fueron superiores a los criterios de calidad sedimentaria internacionales, además, los tres primeros aunado al indeno(123-cd)pireno representan un riesgo ambiental para el bentos y para aquellas especies que se alimentan o interactúan con estos compuestos.

En estudios similares de evaluaciones ambientales sobre contaminantes orgánicos persistentes, se agrupan a los HAPs considerados como cancerígenos potenciales en un listado de 7 compuestos (Cai *et al.*, 2007; IARC, 2009). Dentro de este grupo se encuentran el criseno que es un compuesto de alto peso molecular, de origen pirolítico, muy persistente y como ya se mencionó tiende a causar mayores impactos potenciales crónicos y carcinógenos. La toxicidad aguda es raramente reportada en humanos, peces, o la vida silvestre, como consecuencia de la exposición a bajos niveles de este compuesto. Los HAPs en general son asociados más frecuentemente con riesgos crónicos. Estos riesgos incluyen el cáncer y a menudo son el resultado de exposiciones a mezclas complejas de compuestos aromáticos, en lugar de exposiciones a bajos niveles de un solo compuesto (Irwin, 1997).

X. CONCLUSIONES

- Se observó una mayor presencia de compuestos durante el mes de agosto en comparación con el mes de marzo.
- Los compuestos encontrados en mayor cantidad fueron los de 4 anillos bencénicos, lo que indica un origen pirolítico en ambas temporadas y el compuesto que presentó las concentraciones mayores en sedimentos durante ambas colectas fue el criseno.
- El criseno es el único compuesto que mostró una diferencia estadísticamente significativa entre ambas estaciones. Esta diferencia es originada por un valor individual extremo.
- Las cuantificaciones desarrolladas muestran que la mayor concentración total de HAPs se presenta en dos estaciones ubicadas en el cauce del río Tuxpan (estaciones 6 y 7) que además presentan la mayor variación entre la temporada de secas y la de lluvias.
- Las fuentes pirolíticas fueron las dominantes en el origen de los hidrocarburos evaluados, sin dejar de lado la presencia de un componente petrogénico en los sedimentos, por lo que puede considerarse un origen mixto con predominancia de fuentes pirolíticas.
- No existen asociaciones significativas entre la proporción de carbono orgánico y la concentración de HAPs en sedimentos probablemente debido a que dicha concentración está definida por la influencia de los aportes continentales independientemente del tipo y composición del sustrato presente.
- En la mayoría de las muestras de sedimentos la concentración total de HAPs encontrados en sedimentos estuvo por debajo de la concentración umbral para provocar efectos adversos a la comunidad bentónica y salud humana, excepto las estaciones ubicadas en el río Tuxpan (estaciones 6 y 7) durante marzo y agosto, respectivamente.
- De manera puntual, las concentraciones del criseno, benzo(a)antraceno, dibenzo(ah)antraceno, fluoranteno y fenantreno, fueron superiores a los criterios de calidad sedimentaria internacionales, además, los tres primeros aunado al indeno(123-cd)pireno representan un riesgo ambiental para el bentos y para aquellas especies que se alimentan o interactúan con estos compuestos.
- El benzo(b)fluoranteno, fluoranteno y criseno fueron los hidrocarburos dominantes en los organismos analizados, dichos compuestos pueden representar un riesgo para la salud humana debido a su potencial carcinógeno.
- Las mayores concentraciones en organismos se detectaron en la época de secas y los organismos que presentaron las concentraciones más altas en sus tejidos fueron: *B. marinus*, *C. hippos* y *M. curema*; por lo tanto, el consumo de

estas especies debe ser restringido y debe de estar sujeto a un monitoreo continuo.

- La especie bentónica *C. virginica* (ostión) presentó concentraciones muy bajas en ambas colectas, en comparación con las especies de peces, esto se debió a que los ejemplares de ostión muestreados se encontraban en etapa juvenil, por lo que estos organismos no han acumulado en sus tejidos grandes cantidades de contaminantes.
- El esquema trófico formado por las especies capturadas en la laguna de Tampamachoco y río Tuxpan, explica el proceso de aporte e ingesta de compuestos potencialmente peligrosos que son acumulados en consumidores primarios, y que se presentan de forma magnificada en los consumidores superiores, aumentando la concentración en sus tejidos. Sin embargo, es importante considerar las etapas del ciclo reproductivo de las especies analizadas, ya que este factor origina variaciones en el contenido graso del tejido muscular, lo que se reflejará en las concentraciones de HAPs cuantificadas en dichos tejidos.
- La tendencia de acumulación de HAPs en las matrices ambientales evaluadas fue:

Peces > Sedimentos > Ostiones

XI. RECOMENDACIONES

- Es recomendable considerar específicamente las plumas de dispersión de la CT Adolfo López Mateos para cada época del año con el fin de determinar si dicha planta es o no la principal fuente de contaminación hacia la laguna.
- Se deben incluir puntos de control fuera del alcance de las potenciales fuentes de emisión que permitan establecer comparativos de concentraciones.
- El seguimiento de HAPs presentes debe enfocarse en aquellos compuestos persistentes en ambas temporadas y elevadas concentraciones, tanto en sedimentos como en tejido vivo.
- En las estaciones donde se detectaron compuestos como el criseno con una concentración fuera del rango de los demás compuestos analizados (estaciones 6 y 7) es recomendable realizar un muestreo por triplicado o por duplicado para corroborar que las mediciones sean representativas de la zona y no debido a algún factor externo.
- Es deseable analizar estratos de sedimento lagunar lo que permitirá definir con mayor precisión las variaciones a lo largo del tiempo.
- El proceso de captura se deberá enfocar en aquellas especies que presentaron altas concentraciones de HAPs en tejidos (*B. marinus*, *C. hippos* y *M. curema*), así como también en especies de interés comercial y es recomendable coleccionar por lo menos 2 ejemplares por especie en cada estación de muestreo.
- Es recomendable contar con datos más detallados de las especies de peces analizadas como sexo y la etapa de reproducción, lo que permitirá establecer con mayor precisión los procesos de bioacumulación de HAPs en dichos organismos.
- Es importante realizar estudios puntuales sobre determinadas especies de interés comercial como son las mojarra (*D. auratus*, *E. plumieri*), robalo (*C. pectinatus*), lebrancha (*M. curema*), ostión (*C. virginica*), ya que estas especies son las más consumidas por la población y por lo tanto se deben monitorear continuamente para poder determinar con mayor certeza si dichas especies representan o no un riesgo para la salud pública.
- Por lo tanto, es recomendable continuar con los análisis de HAPs en la laguna de Tampamachoco y cauce del río Tuxpan con el fin de establecer políticas, condicionamientos y restricciones para el consumo y aprovechamiento de los organismos que habitan dichos sistemas.

XII. REFERENCIAS

- Arfsten, D.P., D.J. Schaeffer, and D.C. Mulveny. 1996. The effects of near ultraviolet radiation on the toxic effects of polycyclic aromatic hydrocarbons in animals and plants: A review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 33:1-24.
- Arias, A. 2008. Comportamiento de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) en aguas, sedimentos y organismos de la zona interna del estuario de Bahía Blanca. Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Sur. 178pp.
- Ariese, F., Ernst, W.H.O., Sijim, D.T.H.M. 2001. Natural and synthetic organic compounds in the environment -A symposium reports. *Environ. Toxicol. Pharm.* 10(3):65-80.
- Ávila-Chávez, M. A. 2006. Distribución espacial y temporal de hidrocarburos del petróleo frente a la desembocadura del Río Pánuco. Tesis de Maestría, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. 113pp.
- Ávila-Pérez, P y Zarazú-Ortega, G. 1993. Concentración de metales pesados en ostiones (*Crassostrea virginica* Gmelin), del canal el Chijol, Veracruz, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 9(2):53-64.
- Baker, J. E., Eisenreich, S. J. and Eadie, B. J. 1991. Sediment Trap Fluxes and Benthic Recycling of Organic Carbon, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Polychlorobiphenyl Congeners in Lake Superior, *Environ. Sci. Technol.* 25, 500-509.
- Baqueiro-Cardenas, E., Borabe, L., Goldaracena-Islas G. y Rodríguez-Navarro J. 2007. Los moluscos y la contaminación. Una revisión. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 78:1S- 7S.
- Baumard, P., Budzinski, H., Garrigues, P., Burgeot, T., Michel, X., Bellocq, J., 1999. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) burden of mussels (*Mytilus* sp.) in different marine environments in relation with sediment PAH contamination, and bioavailability. *Mar. Env. Res.* 47:415-439.
- Boitsov, S., H.K.B. Jensen y J Klungsøyr. 2009. Natural background and anthropogenic inputs of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in sediments of South-Western Barents Sea. *Marine Environmental Research.* 68:236–245.
- Borabe, L., J. L. Sericano, A. García-Murillo y F. J. Carrillo-Romo. 2006. *Biomonitoreo de Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares en el sistema estuarino-lagunar del río Pánuco, México.* Taller/Simposio sobre ecosistemas costeros del Golfo de México y Mar Caribe: Hacia la integración de grupos de investigación. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Botello, A. V., 1978. Presencia de hidrocarburos fósiles en ecosistemas estuarinos del Golfo de México. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología*, UNAM. 6(1): 7-14.
- Botello A. V., G. Ponce-Vélez, O. A. Toledo, G. Díaz-González y S. F. Villanueva. 1992. Ecología, Recursos Costeros y Contaminación en el Golfo de México. *Ciencia y Desarrollo*, 8:28-49.

Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos de la laguna de Tampamachoco y una porción estuarina del río Tuxpan, Ver.

Torres-Sánchez, I.

- Botello, A. V. 1994. Reporte final del proyecto multidisciplinario: "Evaluación de las lagunas costeras de Pueblo Viejo, Tamiahua y Tampamachoco, Veracruz, para el aprovechamiento y conservación de su biodiversidad". UAM-Iztapalapa, División Ciencias Biológicas y de la Salud. México, 80 p.
- Botello, A. V., G. Ponce-Vélez y S. A. Macko. 1996. Niveles de concentración de hidrocarburos en el Golfo de México, pp.225-253. *En*: A. V. Botello, Rojas-Galavis, Benítez, J. A., Zarate-Lomelí (Eds.) *Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias*. EPOMEX, serie científica V. pp. 666. Universidad Autónoma de Campeche.
- Botello, A. V. y L. G. Calva. 1998. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Pueblo Viejo, Tamiahua, and Tampamachoco lagoons in the Southern Gulf of México. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 60: 96-103.
- Botello, A. V., Calva, L. G., Ponce, G. 2001. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from coastal lagoons of Veracruz State, Gulf of Mexico. *Bull. Env. Contam. Toxicol.* 67:889-897.
- Buchman, M.F., 2008. NOAA Screening Quick Reference Tables, NOAA OR&R Report 08-1. Seattle WA, Office of Response and Restoration Division, *National Oceanic and Atmospheric Administration*, 34 pp.
- Budzinski, H., Jones, I., Bellocq, J., Piérard, C., Garrigues, P. 1997. Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde Estuary. *Mar. Chem.* 58:85-97.
- Bouloubassi, I., Fillaux, J., Saliot, A., 2001. *Hydrocarbons in surface sediments from the Changjiang (Yangtze River) Estuary, East China Sea. Marine Pollution Bulletin* 42(12), 1335-1346.
- Canadian Council of Ministers of the Environment. 1999. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- Cai, Q.Y., Mo, C.H., Li, Y.H., Zeng, Q.Y., Katsoyiannis, A., Wu, Q.T., Férard, J.F. 2007. Ocurrente and assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from vegetable fields of the Peral River Delta, South China. *Chemosphere*, 68: 159-168.
- Calva, L. G. B. y A. V. Botello. 1999. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Sontecomapan Lagoon, Veracruz, México. *Hidrobiológica*, 9(1):45-52.
- Calva, L. G. B., A. V. Botello y I. Wong. 2002. Registro sedimentario de HAP en una laguna costera tropical del Golfo de México. *Hidrobiológica*, 12(2):137-146.
- Castillo-Rivera, M., J. A. Zavala-Hurtado y R. Zárate. 2002. Exploration of spatial and temporal patterns of fish diversity and composition in a tropical estuarine system of México. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 12:167-177.

- Chu, F. L., A. K. Volety, R. C. Hale y Y. Huang. 2002. Cellular responses and disease expression in oysters (*Crassostrea virginica*) exposed to suspended field-contaminated sediments. *Marine Environmental Research*, 53:17-35.
- Chun-Hua Li., Hong-Wei Zhou, Yuk-Shan Wong y Nora Fung-Yee. 2009. Vertical distribution and anaerobic biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in mangrove sediments in Hong Kong, South China. *Science of the Total Environment*, 407:5772-5779.
- Contreras, F. E. 1993. *Ecosistemas Costeros Mexicanos*. CONABIO-UAMI. 415pp.
- Cram, S., Ortiz, R. Páez; R. 2004. Hidrocarburos aromáticos policíclicos. En: Fernández, A., Yarto, M., Castro, J. (Ed.), *Las sustancias tóxicas persistentes*. SEMARNAT, INE. México. p. 173-199.
- Eisler, R. 1987. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Hazard to Fish, Wildlife and Invertebrates: A Synoptic Review. *Rep. 85(1.11)*, U.S. *Fish and Wildlife Service*, Washington, D.C.
- Espinosa, L. F., G. Ramirez y N.H. Campos. 1995. Analisis de residuos de organoclorados en los sedimentos de zonas de manglar en la cienega grande de Santa Martha y la Bahía de Chengue, Caribe Colombiano. *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betin*, 24:79-94.
- Furton K. G., Pentzke, G. 1998. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. En: Takayuki, S. (Ed.) *Chromatographic Analysis of Environmental and Food Toxicants*. Marcel Dekker Inc. Nueva York.
- García, E. 1988. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Inst. Geograf. 4ta, ed. México. UNAM. 220pp.
- Gambaro, A., M. Radaelli, R. Piazza, A. M. Stortini, D. Contini, F. Belosi, R. Zangrando y P. Cescon. 2009. Organic micropollutants in wet and dry depositions in the Venice Lagoon. *Chemosphere*, 76:1017-1022.
- Gaudette, H., W. Fligh, L. Toner y Folger. 1974. An Inexpensive tritration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *Journal of Sedimentology and Petrology*, 4(1):249-253.
- GEIC-CFE, 2007. Estudio para determinar la mejor opción de descarga de productos petrolíferos en la terminal marítima de Tuxpan, Ver. PEMEX.
- GESAMP (IMO/FAO/UNESCO-IOC/WMO/WHO/AIEA/UN/UNEP) Joint Group of Experts on the Scientific Aspects on Marine Environmental Protection), 2001. *Protecting the Oceans from Land-based Activities* GESAMP Reports and Studies (71):162
- González-Macías, C., I. Schifter, D. B. Lluch-Cota, L. Méndez-Rodríguez y S. Hernández-Vázquez. 2006. Distribution, enrichment and accumulation of heavy metals in coastal sediments of Salina Cruz Bay, México. *Environmental Monitoring and Assessment*, 118: 211–230.

- Gutiérrez, E. M. 1990. *Los residuos sólidos peligrosos: ¿Un riesgo sin solución?*. Ciencias, No. 20, UNAM.
- Gustafsson, O., F. Haghseta, C. Chan, J. McFarlane, P. M. Gschwend. 1997. Quantification of the dilute sedimentary soot phase: Implications for PAH speciation and bioavailability, *Environmental Science and Technology*, 31:203-209.
- Haritash, A.K. y C.P. Kaushik, 2009. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review. *Journal of Hazardous Materials* 169:1-15.
- Hartmann, C.P., Quinn, G.J., Cairns, W.R., King, W.J., 2004. The distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in Narragansett Bay surface sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 48: 351-358.
- IARC, 2009. International Agency for Research on Cancer Disponible en : <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/crthqr02a.php>
- Irwin, R.J., M. VanMouwerik, L. Stevens, M.D. Seese, and W. Basham. 1997. Environmental Contaminants Encyclopedia. National Park Service, Water Resources Division, Fort Collins, Colorado.
- Kennicutt M. C. J.M. Brooks, E. L Atlas & C. S Giam. 1988. Organic compounds of environmental concern in the Gulf of Mexico: a review. *Aquatic toxicology*, 11:191-212.
- Kerr, R. P. y Capone D. G. 1988. The effect of salinity on the microbial mineralization of two Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in estuarine sediments. *Marine Environmental and Research*, 26:181-198.
- Kim, Y., E. N. Powell, T. L. Wade, B. J. Presley y J. M. Brooks. 2001. The Geographic Distribution of Population Health and Contaminant Body Burden in Gulf of Mexico Oysters. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 4:30-46.
- Kucklick, J., R. S. Sivertsen, M. Sanders, & G. I. Scott. 1997. Factors influencing aromatic hydrocarbon distributions in South Carolina estuarine sediments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 213(1997) 13-29.
- Libes, S. M. 1992. *An Introduction to Marine Biogeochemistry*, John Wiley and Sons, Inc. New York, U.S.A. 734pp.
- Lipiatou E., I. Tolosa, R. Simó, I. Bouloubassi, J. Dachs, S. Marti, M. A. Sicre, J. M. Bayona, J. O. Grimalt, A. Saliott y J. Albaiges. 1997. Mass budget and dynamics of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Mediterranean Sea. *Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography*, 44:881-905.
- Liu, Y., Chen, L., Zhao, J., Huang, Q., Zhu, Z y Gao, H. 2008. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of rivers and an estuary in Shanghai, China. *Science Direct*, 154:298-395.
- Long, E.R., Macdonald, D.D., Smith, S.L., Calder, F.D., 1995. Incidence of adverse effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management* 19(1), 81-97.

- Maliszewska-Kordybach, B., 1996. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination. *Appl. Geochem.* 11, 121-127.
- Mastandrea, C., C. Chichizola y Luduena, B. 2005. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores biológicos. *Acta. Bioquím. Clín. Latinoam.* 39(1): 27-36.
- McDonald, S. J., C. Mahlon, H. Kennicutt y J. M. Brooks. 1992. Evidence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Exposure in Fish from the Antarctic Peninsula. *Marine Pollution Bulletin*, 25(9-12): 313-317.
- Mc Elroy, A. E., Farrington, J., Teal, J. 1989. En: Bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic environment. En: Varanasi, U. (Ed.) CRC Press, Boca Raton, Florida. p. 1-40.
- Menzie, C. A., B. B. Potocki y J. Santodonato. 1992. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment. *Environment Science Technology*, 26:1278-1284.
- Moore, S. F. y R. L. Dwyer. 1974. Effects of Oil on Marine Organisms: A critical assessment of published data. *Water Research*, 8:819-827.
- Neff, J. M. 2002. *Bioaccumulation in marine organisms*. Effect of contaminants from oil web produced water. Elsevier, The Netherlands, pp. 241-313.
- NOAA. 2004. National Status and Trends Program, Mussel Watch. <http://vertigo.hsrl.rutgers.edu/NST.html>
- Noreña-Barroso E., G. Gold-Bouchot y V. Ceja-Moreno. 2007. Temporal Variation of Persistent Organic Pollutant (POP) Residue Concentrations in Sediments from the Bay of Chetumal, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 79:141–146.
- Ortiz-Pérez, M. A., C. Valverde and N. P. Psuty (1996), "The impacts of sea-level rise and economic development on the low-lands of the Mexican Gulf Coast", in Botello, A. V., J. L. Rojas-Galaviz, J. Benítez y D. Zárate-Lomelí (eds.), Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias, EPOMEX, Serie científica 5, Universidad Autónoma de Campeche, pp. 459-470.
- PEMEX Refinación-Subdirección de Proyectos de Plantas Industriales de la Dirección Corporativa de Ingeniería y Desarrollo de Proyectos. 2007. *Estudios de Resistividad Eléctrica y Geofísica, Estudios de Mecánica de Suelos, Levantamiento Topográfico y Batimétrico, Estudio Oceanográfico y Estudios Ambientales para el Proyecto: Infraestructura para Incrementar la Capacidad del Sistema De Almacenamiento Y Distribución Tuxpan-México*. México D.F. 895 pp.
- Pereira, W.E., Hostettler, F.D., Rapp, J.B., 1996. Distributions and fate of chlorinated pesticides, biomarkers and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments along a contamination gradient from a point-source in San Francisco Bay, California. *Marine Environmental Research*. 41:299–314.

- Petrena J.E., A.S. Hursthouse, J.E. Matthews, I. M. Davies. 2003. An investigation of geochemical factors controlling the distribution of PCBs in intertidal sediments at a contamination hot spot, the Clyde Estuary, UK. *Applied Geochemistry*, 18:327–338.
- Piazza. R., A. C. Ruiz-Fernandez, M. Frignani, R. Zangrando, L. G. Bellucci, I. Moret y F. Páez-Osuna. 2008. PCBs and PAHs in surficial sediments from aquatic environments of Mexico City and the coastal states of Sonora, Sinaloa, Oaxaca and Veracruz (Mexico). *Environ. Geol.*, 54:1537-1545.
- Quintero, S y C. Díaz. 1994. Hidrocarburos aromáticos policíclicos en peces de aguas costeras canarias. *Sci. Mar.*, 58(4): 307-313.
- Ramos I., M. Fuentes, R. Mederos, J.O. Grimalt y J. Albaiges. 1989. Dissimilar microbial hydrocarbon transformation processes in the sediment water column of a tropical bay (Havana Bay, Cuba), *Marine Pollution Bulletin*, 20:262-268.
- Readman, J.W., R.F.C. Mantoura, C.A. Llewellyn, M.R. Preston y A.D. Reeves. 1986. The use of pollutant and biogenic markers as source discriminants of organic inputs to estuarine sediments. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 27:29–54.
- Richards, G.P. 2003. The evolution of molluscan shellfish safety. *In: Molluscan shellfish safety. Proceedings 4th International Conference Molluscan Shellfish Safety*, A. Villalba, B. Regueras, J. L. Romalde y R. Beiras (eds.) IOC, UNESCO. p. 221–256.
- Sharma V. K., K. Rhudy, R. Brooks, S. Hollyfield y F. Vazquez. 1997. Petroleum Hydrocarbons in Sediments of Upper Laguna Madre. *Marine Pollution Bulletin*, 34(4):229-234.
- Secco T., F. Pellizzato, A. Sfriso, B. Pavoni. 2005. The changing state of contamination in the Lagoon of Venice. Part 1: organic pollutants. *Chemosphere*, 58:279–290.
- Senthil, K., K. S. Sajwan, J. P. Richardson y K. Kannan. 2008. Contamination profiles of heavy metals, organochlorine pesticides, polycyclic aromatic hydrocarbons and alkylphenols in sediment and oyster collected from marsh/estuarine Savannah GA, USA. *Marine Pollution Bulletin*, 56:136–162.
- Sericano J. L., E. L. Atlas, T. L. Wade y J. M. Brooks. 1990. NOAA's status and trends mussel watch program: chlorinated pesticides and PCBs in oysters (*Crassostrea virginica*) and sediments from the Gulf of Mexico, 1986-1987. *Mar. Environ. Res.*, 29:161–203.
- Singh, A.K., M.F. Gin and E.R. Christensen, 1993. A source-receptor method for determining non-point sources of PAHs to the Milwaukee Harbor estuary. *Water Sci. Technol.* 28:91-102.
- Simpson C., Mosi A., Cullen W., Reimer K. 1996. Composition and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in surficial marine sediments from Kitimat Harbor, *Canada Science of The Total Environment*, 181(3): 265-278.

- Soclo, H.H., Garrigues, P.H., Ewald, M., 2000. Origin of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coastal Marine Sediments: Case Studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) Areas. *Marine Pollution Bulletin* 40(5), 387-396.
- UNEP/FAO/IOC/IAEA 1993. Guidelines for Monitoring Chemical Contaminants in the Sea using Marine Organisms. Reference Method No. 6. United Nations Experts Pollution (UNEP).
- UNEP/IOC/IAEA 1992. Determination of Petroleum Hydrocarbons in Sediments. Reference Method for Marine Pollution Studies no. 20. United Nations Experts Pollution (UNEP).
- Ünlü, S. y B. Alpar. 2006. Distribution and sources of hydrocarbons in surface sediments of Gemlik Bay (Marmara Sea, Turkey). *Chemosphere*, 64(5):764-777.
- Wade, T. L., M. C. Kennicutt y J. M. Brooks. 1989. Gulf of Mexico Hydrocarbon Seep Communities: Part III. Aromatic Hydrocarbon Concentrations in Organisms, Sediments and Water. *Marine Environmental Research*, 27:19-30.
- Wu, Y., Zhang, J., Zhu, Z., 2003. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the Yalujiang Estuary, North China. *Marine Pollution Bulletin*, 46:619-625.
- Yu, H. 2002. Environmental carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons: photochemistry and phototoxicity. *J. Env. Sci. Health*. 20(2):149-183.
- Yunker, M.B., Macdonald, R.W., Vingarzam, R., Mitchell, R.H., Goyette, D. Sylvestre, S., 2002. PAHs in the Fraser river basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH sources and composition. *Org. Geochem.* 33, 489-515.
- Zhang, P., J. Song, Z. Liu, G. Zheng, N. Zhang y Z. He. 2007. PCBs and its coupling with eco-environments in Southern Yellow Sea surface sediments. *Marine Pollution Bulletin*. 54:1105-1115.