



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

**HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS EN
SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE TÉRMINOS,
CAMPECHE, MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN BIOLOGÍA
PRESENTA**

GABRIELA VALDÉS LAGUNES

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2013



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

**HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS EN
SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE TÉRMINOS,
CAMPECHE, MÉXICO**

TESIS POR:

GABRIELA VALDÉS LAGUNES

COMITÉ TUTORAL:

Directora

Dra. Laura Georgina Calva Benítez

Asesoras

Dra. María del Rocío Torres Alvarado

Dra. Nathalie Cabirol

**LA MAESTRÍA EN BIOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
METROPOLITANA PERTENECE AL PADRÓN NACIONAL DE
POSGRADOS DE CALIDAD DEL CONACyT.**



EL MAR

*NECESITO del mar porque me enseña:
no sé si aprendo música o conciencia:
no sé si es ola sola o ser profundo
o sólo ronca voz o deslumbrante
suposición de peces y navíos.
El hecho es que hasta cuando estoy dormido
de algún modo magnético circulo
en la universidad del oleaje.
No son sólo las conchas trituradas
como si algún planeta tembloroso
participara paulatina muerte,
no, del fragmento reconstruyo el día,
de una racha de sal la estalactita
y de una cucharada el dios inmenso.*

*Lo que antes me enseñó lo guardol Es aire,
incesante viento, agua y arena.*

*Parece poco para el hombre joven
que aquí llegó a vivir con sus incendios,
y sin embargo el pulso que subía
y bajaba a su abismo,
el frío del azul que crepitaba,
el desmoronamiento de la estrella,
el tierno desplegar de la ola
despilfarrando nieve con la espuma,
el poder quieto, allí, determinado
como un trono de piedra en lo profundo,
substituyó el recinto en que crecían
tristeza terca, amontonando olvido,
y cambió bruscamente mi existencia:
di mi adhesión al puro movimiento*

Pablo Neruda

DEDICATORIA

*A mis padres Rita Beatriz Lagunes Domínguez y Jesús Valdés Palacios.
Gracias por la dicha de compartir con ustedes una vida bella y feliz desde mi
infancia hasta el presente, por todos los momentos hermosos que día a día
iluminan mi existencia con su sonrisa, por la libertad de perseguir mis sueños y
llegar hasta donde he querido, por sus consejos, por su confianza, por su apoyo
incondicional y por su inmenso amor... ¡ Los amo infinitamente!*

*A la memoria de María Aurora Valdés Palacios, Manuela Palacios Castillo y
Ramos Domínguez Velázquez.*

Al majestuoso mar... fuente de vida, belleza y perfección.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo formó parte del programa JEST (Joint Environmental Study of Terminos Lagoon) IRD-UAM-I. Agradezco al IRD (Institute de Recherche pour le Développement) su apoyo para las colectas en campo y al Laboratorio de Ecosistemas Costeros de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa el proporcionarme el material y equipo necesarios para la realización de mis labores.

Al Dr. José Alejandro Zavala Hurtado, al Dr. Abel Sentíes Granados, a la Dra. Carmen de la Paz Pérez Olvera y al Dr. Miguel Ángel Armella Villalpando por su comprensión y apoyo en todo momento.

A mi comité tutorial conformado por la Dra. Laura Georgina Calva Benítez, la Dra. María del Rocío Torres Alvarado y la Dra. Nathalie Cabirol, gracias por su tiempo y por sus valiosos comentarios.

A la Dra. María Guadalupe Ponce Vélez y a la M. en C. Dora Silvia Díaz Ruíz por aceptar ser parte del jurado, por el tiempo dedicado a la revisión de la tesis y por sus acertados comentarios.

Al Dr. Francisco Varona Cordero por su disposición en aclarar mis dudas cuando se lo solicité y por facilitarme el programa Statistica 6.0.

Al Ing. Alberto Pérez Rojas, al Dr. Antonio Z. Márquez García, al Dr. Lionel Denis, al Dr. Omar Tapia y al Dr. Ovel García por su ayuda, además de su valiosa amistad.

A Yosú Aldabe y Karla Carrillo (CentroGeo), Rosario Valdés y Gabriel Quintero (INEGI), Francisco Calzeta (SCT) y Vequi Caballero (CRIP Cd. del Carmen) por proporcionarme la información requerida para complementar esta investigación.

A mis compañeros y amigos M. en B. Balbina Angélica Méndez Montaña, Hidrobiól. Dolores Díaz Félix, M. en C. Edna Salamanca Quevedo y M. en B. Juan Carlos Cruz Toledo por su apoyo en el laboratorio y por compartir sus experiencias.

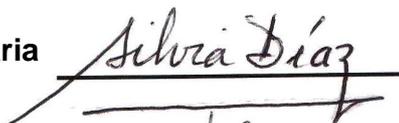
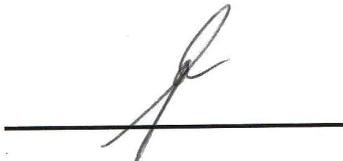
A todas las bellas mujeres que me ofrecieron su ayuda y palabras de aliento haciendo cada momento más agradable con su presencia. Gracias Dolores Díaz Félix, Donají González Nieto, Edna Salamanca Quevedo, Jazmín Cortés Martínez, Lauraceli Romero Ortiz, Mariela Ochoa, Monserrat Origel Moreno, Nayeli Ismene Armendariz, Ofelia Castañeda López, Sandrine Chiflett, Teresa Aquino Terrazas, Violeta Luna Caballero y Virginia Pérez Aguilar.

UN AGRADECIMIENTO MUY ESPECIAL a mi hermano Jesús por soportarme y ayudarme siempre en tantos aspectos de la vida.

**El jurado designado por la
División de Ciencias Biológicas y de la Salud
de la Unidad iztapalapa aprobó la Tesis que presentó**

GABRIELA VALDÉS LAGUNES

El día 14 de Noviembre de 2013

Dra. María del Rocío Torres Alvarado	Presidenta	 _____
M. en C. Dora Silvia Díaz Ruíz	Secretaria	 _____
Dra. Nathalie Cabirol	Vocal	 _____
Dra. María Guadalupe Ponce Vélez	Vocal	 _____

CONTENIDO

RESUMEN	14
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN	17
MARCO TEORICO	20
ANTECEDENTES	26
JUSTIFICACIÓN	28
OBJETIVOS	31
GENERAL.....	31
PARTICULARES.....	31
HIPÓTESIS	32
GENERAL.....	32
PARTICULARES.....	32
ÁREA DE ESTUDIO	34
METODOLOGÍA	41
MUESTREO EN CAMPO.....	41
ANÁLISIS EN LABORATORIO.....	43
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS.....	46
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA	48
PROFUNDIDAD.....	49
TEMPERATURA.....	54
SALINIDAD.....	56

OXÍGENO DISUELTO.....	59
pH.....	62
CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTOS.....	66
TEXTURA DE LOS SEDIMENTOS.....	67
CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO.....	76
HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS TOTALES.....	82
NIVELES DE CONTAMINACIÓN POR HAP TOTALES EN LOS SEDIMENTOS DEL SISTEMA LAGUNAR.....	88
NIVELES DE HAP EN LOS SEDIMENTOS DEL SISTEMA LAGUNAR DE ACUERDO A SU PESO MOLECULAR.....	92
IDENTIFICACIÓN DEL ORIGEN DE LOS HAP.....	102
ÍNDICES MOLECULARES Y RAZONES DE DIAGNÓSTICO.....	101
ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	112
CALIDAD SEDIMENTARIA.....	123
ÍNDICES DE EFECTOS DE RANGO BAJO (ERL) Y EFECTOS DE RANGO MEDIO (ERM).....	123
EFFECTOS DE HAP EN ORGANISMOS ACUÁTICOS.....	126
RIESGOS POTENCIALES EN ORGANISMOS Y EN LA SALUD HUMANA.....	128
CONCLUSIONES.....	133
REFERENCIAS.....	136

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Estructura química de los HAP prioritarios.....	24
Figura 2.	Área de estudio.....	35
Figura 3.	Estaciones de muestreo en la Laguna de Términos, Campeche.	42
Figura 4.	Variación temporal de la profundidad en la Laguna de Términos.....	49
Figura 5.	Variación espacial de la profundidad en la Laguna de Términos.	50
Figura 6.	Precipitación promedio mensual (mm) en el estado de Campeche, México (CNA, 2008, 2009).....	53
Figura 7.	Variación temporal de la temperatura en la Laguna de Términos.....	54
Figura 8.	Variación espacial de la temperatura en la Laguna de Términos.....	55
Figura 9.	Variación temporal de la salinidad en la Laguna de Términos.....	57
Figura 10.	Variación espacial de la salinidad en la Laguna de Términos.....	59
Figura 11.	Variación temporal del oxígeno disuelto en la Laguna de Términos.....	60
Figura 12.	Variación espacial del oxígeno disuelto en la Laguna de Términos.....	61
Figura 13.	Variación temporal del pH en secas y lluvias en la Laguna de Términos.....	62
Figura 14.	Variación espacial del pH en secas y lluvias en la Laguna de Términos.....	63
Figura 15.	Variación temporal del contenido de arenas en la Laguna de Términos.....	67
Figura 16.	Variación temporal del contenido de limos en la Laguna de Términos.....	68
Figura 17.	Variación temporal del contenido de arcillas en la Laguna de Términos.....	69

Figura 18.	Porcentaje de arenas, limos y arcillas en los sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes.....	70
Figura 19.	Distribución espacial y porcentaje de arenas, limos y arcillas en los sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes.....	71
Figura 20.	Porcentaje de arenas, limos y arcillas en los sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de secas.....	72
Figura 21.	Distribución espacial y porcentaje de arenas, limos y arcillas en la Laguna de Términos durante la época de secas.....	73
Figura 22.	Porcentaje de arenas, limos y arcillas en la Laguna de Términos durante la época de lluvias.....	74
Figura 23.	Distribución espacial y porcentaje de arenas, limos y arcillas en los sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.....	75
Figura 24.	Variación del contenido de carbono orgánico en la Laguna de Términos.....	77
Figura 25.	Distribución espacial de carbono orgánico en los sedimentos de la Laguna de Términos.....	79
Figura 26.	Variación temporal de la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos totales en sedimentos de la Laguna de Términos.....	82
Figura 27.	Niveles de HAP totales y su variación espacial en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes.....	83
Figura 28.	Niveles de HAP totales y su variación espacial en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de secas.....	84
Figura 29.	Niveles de HAP totales y su variación espacial en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.....	85
Figura 30.	Porcentaje de HAP por anillos bencénicos en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes.....	92
Figura 31.	Porcentaje de los 16 HAP individuales en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes.....	93

Figura 32.	Porcentaje de HAP por anillos bencénicos en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época secas.....	94
Figura 33.	Porcentaje de los 16 HAP individuales en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de secas.....	95
Figura 34.	Porcentaje de HAP por anillos bencénicos en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.....	96
Figura 35.	Porcentaje de los 16 HAP individuales en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.....	97
Figura 36.	Niveles de HAP individuales (ngg^{-1}) y su variación temporal en las diferentes épocas climáticas.....	98
Figura 37.	Concentración promedio de los HAP individuales en los sedimentos de la Laguna de Términos.....	99
Figura 38.	Fuentes de aporte de HAP mediante la proporción de diagnóstico $\text{FI}/(\text{FI}+\text{Pir})$ vs $\text{Ind}/(\text{InP}+\text{BgP})$ en las localidades de muestreo durante la época de nortes.....	107
Figura 39.	Fuentes de aporte de HAP mediante la proporción de diagnóstico $\text{FI}/(\text{FI}+\text{Pir})$ vs $\text{Ind}/(\text{InP}+\text{BgP})$ en las localidades de muestreo durante la época de secas.....	109
Figura 40.	Fuentes de aporte de HAP mediante la proporción de diagnóstico $\text{FI}/(\text{FI}+\text{Pir})$ vs $\text{Ind}/(\text{InP}+\text{BgP})$ en las localidades de muestreo durante la época de lluvias.....	110
Figura 41.	Fuentes de aporte de HAP mediante la proporción de diagnóstico $\text{FI}/(\text{FI}+\text{Pir})$ vs $\text{Ind}/(\text{InP}+\text{BgP})$ en las localidades de muestreo durante tres épocas climáticas N=nortes, S=secas y L= lluvias, en la Laguna de Términos.....	111
Figura 42.	Análisis de componentes principales (ACP) cargas de los HAP en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes.....	114
Figura 43.	Análisis de componentes principales (ACP) en las localidades de muestreo de la Laguna de Términos durante la época de nortes.....	116
Figura 44.	Análisis de componentes principales (ACP) cargas de los HAP en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de secas.....	117

Figura 45.	Análisis de componentes principales (ACP) en las localidades de muestreo de la Laguna de Términos durante la época de secas.....	119
Figura 46	Análisis de componentes principales (ACP) cargas de los HAP en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.....	120
Figura 47	Análisis de componentes principales (ACP) en las localidades de muestreo de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.....	121
Figura 48.	HAP individuales en relación a ERL y ERM (Long <i>et al.</i> 1995) para sedimentos de la Laguna de Términos.....	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Propiedades físicas y químicas de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).....	21
Tabla 2.	Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo en la Laguna de Términos, Campeche.....	42
Tabla 3.	Parámetros ambientales de la columna de agua en diferentes épocas climáticas en la Laguna de Términos, Campeche.....	48
Tabla 4.	Estacionalidad en la descarga de los ríos, la precipitación y la evaporación en la Laguna de Términos (m^3s^{-1}).....	51
Tabla 5.	Condiciones de salinidad de acuerdo al sistema de Venecia (1959).....	56
Tabla 6.	Parámetros fisicoquímicos promedio en la Laguna de Términos en diferentes periodos.....	65
Tabla 7.	Características ambientales de los sedimentos en diferentes épocas climáticas en la Laguna de Términos, Campeche.....	66
Tabla 8.	Carbono orgánico promedio en algunas lagunas costeras del Golfo de México.....	81
Tabla 9.	Niveles de contaminación por HAP de acuerdo con Baumard <i>et al.</i> (1998) en sedimentos de la Laguna de Términos.....	88
Tabla 10.	HAP totales (ngg^{-1} peso seco) en sedimentos de diversos sistemas costeros del mundo y del Golfo de México.....	91
Tabla 11.	Índices moleculares para determinar el origen de los HAP en sedimentos de la Laguna de Términos.....	103
Tabla 12.	Índices moleculares para sedimentos de la Laguna de Términos durante diferentes épocas climáticas.....	105
Tabla 13.	Criterios de contaminación por HAP (ngg^{-1}) en sedimentos marinos y costeros.....	124

RESUMEN

Se evaluó la concentración de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) prioritarios en sedimentos de la Laguna de Términos en tres épocas climáticas: nortes (noviembre de 2008), secas (marzo de 2009) y lluvias (octubre de 2009). Los sedimentos fueron procesados siguiendo el método propuesto por la (UNEP/IOC/IAEA (1992) y analizados por medio de cromatografía de gases. El promedio de HAP totales en el sistema lagunar fue de 1581 nng^{-1} (851.54 nng^{-1} en nortes, 1608.67 nng^{-1} en secas y 2185 nng^{-1} en lluvias). Los niveles de contaminación encontrados fueron moderados en la zona este y altos en la zona oeste de la laguna. La evaluación del origen de los HAP mediante el uso de índices moleculares y análisis de componentes principales determinaron un predominio de fuentes pirolíticas en comparación con las fuentes petrogénicas, siendo dominantes las emisiones provenientes de la combustión de coque, carbón y emisiones vehiculares. La calidad ecotoxicológica de los sedimentos se evaluó utilizando el enfoque de niveles guía para los cuales el Acenaftileno, el Acenafteno, el Fenantreno, el Pireno y el Criseno presentaron concentraciones entre ERL (rango de efectos bajos) y ERM (rango de efectos medios) lo cual predice la ocurrencia ocasional de efectos adversos principalmente sobre la flora y la fauna bentónica asociada. Los compuestos que excedieron el ERM fueron el Fluoreno, el Antraceno, el Benzo(a)antraceno, el Benzo(a)pireno y el Dibenzo(a,h)antraceno, lo cual podría indicar la aparición frecuente de efectos adversos en los organismos.

De los HAP más abundantes encontrados, el Benzo(a)pireno es reconocido carcinogénico en organismos y en humanos, mientras que el Benzo(a)antraceno y el Dibenzo(a,h)antraceno han sido clasificados como carcinógenos en organismos y como probables carcinógenos en humanos.

Palabras clave: hidrocarburos aromáticos policíclicos, sedimentos, lagunas costeras, Golfo de México.

ABSTRACT

The concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) priority were assessed in sediments of the lagoon of Terminos in three seasons: northerlies (November 2008), dry (March 2009) and rainy (October 2009). The sediments were processed following the method proposed by UNEP/IOC/IAEA (1992) and analyzed by gas chromatography. The average total PAHs in the lagoon system was 1581 ng g^{-1} (851.54 ng g^{-1} in northerlies, $1608.67 \text{ ng g}^{-1}$ in dry, 2185 ng g^{-1} in rain). Contamination levels found were moderate in the east and high in the west of the lagoon system. The assessment of the origin of PAHs using molecular indices and principal component analysis identified a predominance of pyrolytic sources on petrogenic sources, being dominant emissions from the combustion of coke, coal and vehicle emissions. The sediment ecotoxicological quality was assessed using the guide-level approach for which the Acenaphthylene, the Acenaphthene, Phenanthrene, Pyrene and Crisene had levels between ERL (effects range low) and ERM (effects range median) which predicts the occasional occurrence of adverse effects on the flora mainly and associated benthic fauna. The compounds that exceeded the ERM were fluorene, Anthracene, Benzo(a)anthracene, Benzo(a)pyrene and Dibenzo(a,h)anthracene, which could indicate the frequent occurrence of adverse effects on organisms. In most abundant PAHs found, Benzo(a)pyrene is recognized carcinogen on organisms and humans, while the Benzo(a)anthracene and Dibenzo(a,h)anthracene have been classified as carcinogen on organisms and probable human carcinogens.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, sediments, coastal lagoons, Gulf of Mexico.

INTRODUCCIÓN

En México se ha estimado que los humedales costeros cubren 1,567,300 ha (Contreras y Warner, 2004). Dentro de este tipo de ecosistemas se incluyen a las lagunas costeras las cuales son cuerpos acuáticos litorales separados del mar por algún tipo de barrera y con el eje mayor paralelo a la línea de costa (Lankford, 1977). Además la comunicación con el mar puede ser permanente o efímera y son el resultado del encuentro entre dos masas de agua de diferentes características (Contreras, 2010). Son sistemas muy dinámicos en los que, debido a su ubicación entre ambientes marinos y terrestres, se llevan a cabo una gran variedad de procesos físicos, químicos y ecológicos (Ridway y Shimmield, 2002). Son ecosistemas importantes en muchos aspectos: son sitios con alta productividad primaria y altos niveles de diversidad (Bricker *et al.*, 2008; Gamito, 2008), proveen una gran variedad de hábitats para numerosas especies (Lotze, 2010), son áreas de resguardo, alimentación, reproducción y alevinaje de diversos organismos (Contreras, 2010), regulan el proceso de intercambio de material entre los ríos y los ambientes costeros (Das *et al.*, 2010) y proveen servicios ambientales (Pinto *et al.*, 2010) como la producción de recursos pesqueros y como atractivo turístico (Ramsar, 2004). Sin embargo, la mayoría de las lagunas costeras han sido afectadas por las actividades humanas como la industria y la agricultura, y sometidas a un acelerado proceso de urbanización (Contreras y Warner, 2004), lo cual genera desechos que alteran la calidad del agua (Panigrahi, 2006) y provocan efectos nocivos en el funcionamiento de estos ecosistemas (Collavini *et al.*, 2001).

Las lagunas costeras del Golfo de México son altamente productivas y proveen de alimento y servicios básicos a las poblaciones aledañas, sin embargo, actualmente esta región está siendo sometida a un acelerado desarrollo industrial y económico lo cual ha incrementado la contaminación por xenobióticos (Taylor *et al.*, 2003).

Entre una larga lista de contaminantes, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son de preocupación especial debido a su alta toxicidad y a su alta estabilidad en el ambiente (Vagi *et al.*, 2005). Los HAP están ampliamente repartidos en los océanos y en las zonas costeras, en las aguas de los ríos y en los sedimentos (Neff, 1979; Botello *et al.*, 1995), donde pueden establecer relación con los organismos acuáticos y bioacumularse a niveles que pueden perjudicar las funciones biológicas normales y biomagnificarse a través de las redes tróficas provocando impactos en el medio ambiente, en las poblaciones de vida silvestre y riesgos para la salud humana (Calamari, 2002).

El área de protección de flora y fauna Laguna de Términos en el estado de Campeche, tiene gran importancia científica, social y económica por su biodiversidad, la abundancia de recursos naturales renovables de interés comercial, la actividad pesquera, la producción de alimento por cultivo, las actividades de explotación y exploración de petróleo entre otras (Ayala *et al.*, 2003). Por lo anterior, la preocupación por los niveles de deterioro ambiental y el efecto de las actividades antropogénicas en esta región se ha hecho cada vez más evidente (Lara *et al.*, 1990), siendo necesario realizar estudios de contaminantes que contribuyan al desarrollo de una gestión ambiental eficiente (Hernández *et al.*, 2006).

El presente estudio tuvo como objetivo determinar los niveles de hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos superficiales de la Laguna de Términos en 15 estaciones de muestreo durante época de nortes, secas y lluvias con la finalidad de explicar la variación temporal y la distribución espacial de dichos contaminantes en el sistema lagunar, así como identificar sus fuentes de origen, principales rutas de entrada e inferir posibles riesgos para la biota acuática y la salud humana.

MARCO TEÓRICO

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos conformados por hidrógeno y carbono, se dividen en dos clases principales: alifáticos y aromáticos. Los hidrocarburos alifáticos (alcanos, alquenos, alquinos y análogos cíclicos) constituyen mezclas complejas en las que están presentes hidrocarburos tanto autóctonos por causa biogénica, como alóctonos de naturaleza petrogénica (Blanco *et al.*, 2006). Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) constituyen una amplia clase de compuestos orgánicos persistentes (COP) que están formados por dos o más anillos bencénicos fusionados (Calva, 1997). Los anillos pueden estar en forma recta, angulada o racimada (Mastandrea *et al.*, 2005) y pueden dividirse a su vez en dos clases: los de bajo peso molecular (128-202 g/mol) que tienen de dos a tres anillos bencénicos y los de peso molecular alto (202-278 g/mol) que tienen de cuatro a seis anillos bencénicos. Sus características físicas y químicas varían de acuerdo a su peso molecular (Tabla 1) influyendo en su distribución y persistencia en el ambiente, así como en sus efectos sobre los sistemas biológicos (Menzie *et al.*, 1992; Nikolaou *et al.*, 2009).

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).

HAP *	¹ Peso molecular (g/mol)	¹ Punto de ebullición (°C)	¹ Punto de fusión (°C)	² Coefficiente de partición (log Kow)	² Presión de vapor (KPA)	² Solubilidad en agua (MG/L)
Naf (2)	128	218	80	3.37	0.012	31.0
Aci (2)	152	-	-	4.07	0.004	3.5
Ace (2)	154	278	95	3.92	5.81x10 ⁻⁴	3.9
Flu (2)	166	295	114	4.18	4.16x10 ⁻⁵	1.98
Fen (3)	178	340	101	4.57	9.04x10 ⁻⁵	1.3
Ant (3)	178	354	216	4.54	2.26x10 ⁻⁴	0.073
Fln (3)	202	375	110	5.22	0.0012 Pa	0.26
Pir (4)	202	393	151	5.18	3.33x10 ⁻⁷	0.14
B(a)A (4)	228	400	162	5.91	2.93x10 ⁻⁵	0.04
Cris (4)	228	448	255	5.86	8.38x10 ⁻⁸	0.002
B(b)F (4)	252	481	168	5.80	6.66x10 ⁻⁸	0.0012
B(k)F (4)	252	480	217	6.00	7.86x10 ⁻¹²	6.0x10 ⁻⁴
B(a)P (5)	252	496	179	6.04	7.45x10 ⁻¹⁰	3.8x10 ⁻³
InP (5)	276	536	164	7.00	1.33x10 ⁻¹²	5.3x10 ⁻²
DbA (5)	276	524	266	6.75	1.33x10 ⁻¹¹	5.0x10 ⁻⁴
Bghi (6)	278	550	277	6.50	1.39x10 ⁻¹¹	3x10 ⁻⁴

Datos tomados de 1) Méndez, 2012; 2) Jones y Voogt, 1999.

Naf-Naftaleno, Aci-Acenaftileno, Ace-Acenafteno, Flu-Fluoreno, Fen-Fenantreno, Ant-Antraceno, Fln-Fluoranteno, Pir-Pireno, B(a)A-Benzo(a)antraceno, Cris-Criseno, B(b)F-Benzo(b)fluoranteno, B(K)F-Benzo(K)fluoranteno, B(A)P- Benzo(a)pireno, InP-Indeno(1,2,3-cd)pireno, DbA-Dibenzo(a,h)antraceno, Bghi-Benzo(ghi)perileno.

* El número entre paréntesis indica el número de anillos que presenta el compuesto.

Los HAP se generan a través de procesos naturales y antropogénicos. Los primeros incluyen vulcanismo e incendios forestales, así como la transformación microbiana o química que ocurre en los sedimentos a partir de las moléculas biogénicas precursoras como terpenos, pigmentos y esteroides (diagénesis) y la cual produce a largo plazo combustibles fósiles (Culotta *et al.*, 2006; Hunt, 1996). Los HAP provenientes de las actividades antropogénicas se dividen en dos tipos:

Petrogénicos: Se forman mediante procesos a baja temperatura (menos de 200 °C), incluyendo la alteración térmica de la materia orgánica tal como sucede en la

formación de combustibles fósiles, y se caracterizan por la presencia de compuestos de dos y tres anillos bencénicos y una alta proporción de productos alquilados y la formación preferencial de isómeros con alta estabilidad termodinámica (Simpson, 1996; Readman *et al.*, 2002; Maskaoui y Hu, 2009). Estos contaminantes llegan a los ecosistemas acuáticos mediante derrames, transformación, extracción, distribución, separación, transporte y refinación del petróleo (Neff, 1979).

Pirolíticos: se forman mediante procesos de combustión incompleta de materia orgánica a temperatura elevada (500-800 °C), y se caracterizan por la dominancia de compuestos de peso molecular alto (cuatro, cinco y seis anillos bencénicos), una baja proporción de productos alquilados y la rápida formación de isómeros cinéticamente favorecidos (Simpson, 1996; Readman *et al.*, 2002). Las emisiones de HAP de origen pirolítico provienen de fuentes de combustión fijas y móviles. Las principales fuentes fijas son las instalaciones de generación de calor y energía (termo y carboeléctricas), calefacción con carbón y madera, quemadores de gas, incineración de residuos orgánicos municipales e industriales, quema intencional de vegetación en general y diversos procesos industriales (coque, craking de petróleo, fundidoras, producción de asfalto, entre otras). Las fuentes móviles son aquellas en donde se queman combustibles fósiles utilizados en medios de transporte terrestre marítimo y aéreo (Nadal *et al.*, 2004; Cram *et al.*, 2004).

La entrada de HAP en los ambientes marinos y costeros se lleva a cabo a través de varias rutas, incluyendo depósito atmosférico, escorrentía de ríos, tráfico de vehículos, residuos de insumos agrícolas, descargas domésticas, municipales e industriales y vertido directo de petróleo y sus productos (Witt, 1995; Li *et al.*, 2001).

Los HAP son compuestos no polares o muy débilmente polares que tienen afinidad por las fases orgánicas hidrofóbicas presentando una baja solubilidad en el agua (McBride, 1994) lo cual permite su rápida adsorción a la materia particulada y su acumulación en los sedimentos; en particular los HAP de procesos pirolíticos están fuertemente asociados a éstos debido a su peso molecular alto que los hace más resistentes a la fotooxidación, a la degradación microbiana y a la volatilización que los HAP de origen petrogénico (De Luca *et al.*, 2004).

Existen más de cien HAP diferentes pero sólo dieciséis de ellos han sido clasificados como contaminantes prioritarios por la *Environmental Protection Agency* (EPA por sus siglas en inglés), la *Organización Mundial de la Salud* (OMS) y *Comunidad Económica Europea* (CEE) (Dabestani e Ivanov, 1999) debido a su extensa distribución en el ambiente y a sus propiedades tóxicas, mutagénicas y carcinogénicas (Culotta *et al.*, 2006; Maskaoui y Hu, 2009; Nadal *et al.*, 2004) (Fig.1). En general, los HAP de peso molecular bajo tienen una toxicidad aguda, mientras algunos de los más pesados muestran potencial carcinogénico (Witt, 1995).

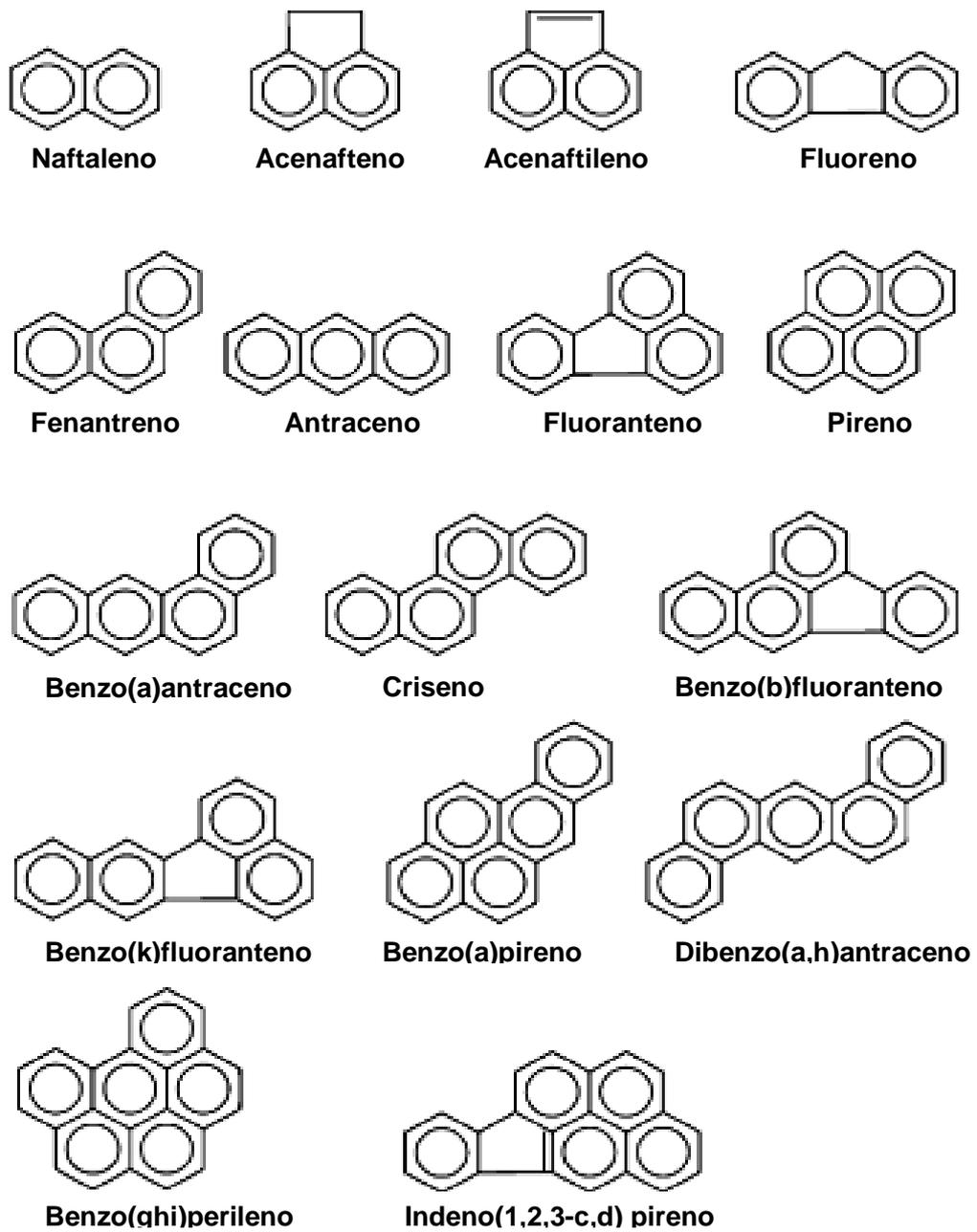


Figura 1. Estructura química de los HAP prioritarios

Los HAP también presentan fenómenos de acumulación en la biota acuática y pueden ser transferidos a lo largo de las cadenas alimentarias lo cual provoca efectos adversos a los organismos y a la salud humana (Hong *et al.*, 1995; Vagi *et al.*, 2005). Los HAP causan genotoxicidad en bivalvos y peces (White, 2002), neurotoxicidad en mamíferos (Saunders *et al.*, 2002), así como la disminución de las tasas de supervivencia y reproducción en organismos acuáticos expuestos durante largos periodos de tiempo (Peterson *et al.*, 2003).

El Departamento de Salud y Servicios Humanos (*DHHS* por sus siglas en inglés) determinó que el Benzo(a)antraceno, el Benzo(b)fluoranteno, el Benzo(k)fluoranteno, el Benzo(a)pireno, el Dibenzo(a,h)antraceno, el Criseno y el Indeno(1,2,3-c,d)pireno son reconocidos carcinogénicos en organismos, así mismo, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (*USEPA*) los ha determinado como probables carcinogénicos en humanos (ATSDR, 1995).

Aunado a lo anterior, la Agencia Internacional para la investigación del Cáncer (*IARC* por sus siglas en inglés), ha ubicado al Benzo(a)pireno en el grupo 1 (carcinógeno para humanos); el Dibenzo(a,h)antraceno en el grupo 2A (probablemente carcinógeno para humanos; mientras que en el grupo 2B (posiblemente carcinógeno para el ser humano) están el Benzo(a)antraceno, el Benzo(b)fluoranteno, el Benzo(k)fluoranteno, el Criseno, el Naftaleno y el Indeno(1,2,3-cd)pireno. Por último, el Acenafteno, el Benzo(ghi)perileno, el Fenantreno, el Fluoreno, el Antraceno, el Pireno y el Fluoranteno no son clasificables como carcinógenos humanos (Grupo 3) (IARC, 2012).

ANTECEDENTES

Respecto a los estudios publicados de contaminación en la Laguna de Términos, Páez-Osuna *et al.* (1987) estudiaron las concentraciones de metales traza en el sistema fluvial de la laguna y determinaron que el río Palizada es el que más contribuye al aporte de metales pesados hacia la laguna con respecto a los demás ríos que drenan en ella. Por otro lado, Ponce y Botello (1991) encontraron que los niveles de metales pesados en sedimentos son bajos excepto para el cadmio y el plomo, mientras que en la ostión *Crassostrea virginica* encontraron niveles más altos para el zinc, cromo y plomo, siendo el primero de ellos esencial para el metabolismo y los dos restantes se consideran potencialmente tóxicos representando un riesgo para los organismos y para la salud humana. Aunado a lo anterior, Vázquez *et al.* (1993) reportaron un aumento significativo en las concentraciones de cobre y plomo en esa misma especie de ostión.

Los estudios referentes a plaguicidas organoclorados incluyen los publicados por Gold-Bolchout *et al.* (1993), quienes evaluaron la concentración de pesticidas organoclorados en el río Palizada, encontrando niveles altos de estos contaminantes en los sedimentos, mientras que en organismos, la almeja *Rangia cuneata* presentó niveles elevados de DDD y Aroclor 1254; en el ostión *Crassostrea virginica* hallaron niveles más altos de endrin y aldrin, mientras que en camarones juveniles de la especie *Penaeus setiferus* registraron la menor concentración de pesticidas. Así mismo, Carvalho *et al.* (2009) encontraron altas concentraciones de DDT en las cercanías de Ciudad del Carmen y en los ríos afluentes a la Laguna de Términos.

En cuanto a los trabajos existentes de contaminación por hidrocarburos fósiles en *Crassostrea virginica* están los reportados por Botello (1979; 1980), quien menciona que los niveles más altos se encontraron en organismos localizados cerca de complejos petroquímicos y refinerías de petróleo e indica que los hidrocarburos del petróleo se relacionaron con los ambientes costeros. Por su parte Becerra (1984) encontró un promedio de 85000 ngg⁻¹ en el ostión *Crassostrea virginica*. Respecto a HAP en esa misma especie de ostión Gold *et al.* (1995) encontraron un promedio de 320 ngg⁻¹, mientras que Noreña *et al.* (1999) reportaron una concentración promedio de 1900 ngg⁻¹ con intervalo de 2470 a 42500 ngg⁻¹. Por su parte Gold *et al.* (2007) realizaron un estudio de efectos biológicos también en *C. virginica* encontrando niveles de HAP similares a los reportados anteriormente (Gold *et al.*, 1995; Noreña *et al.*, 1999) para las mismas estaciones de muestreo indicando una entrada constante de estos contaminantes hacia la laguna.

Por otro lado, Álvarez-Legorreta *et al.* (1994) determinaron concentraciones altas de hidrocarburos totales en almejas de la especie *Rangia cuneata*, así como en sedimentos de la laguna de Pom, área adyacente a la Laguna de Términos, lo cual es motivo de preocupación respecto a los efectos en la pesquería de este recurso. Sin embargo, a la fecha, no hay estudios publicados acerca de contaminación por HAP en sedimentos de la Laguna de Términos.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente uno de los principales problemas ambientales que se presenta en las áreas marinas y costeras del Golfo de México es la contaminación proveniente de los asentamientos humanos, las actividades agrícolas, turísticas o industriales; así como de la extracción, procesamiento y transporte de petróleo y gas (Rivera y Borges, 2006).

El Golfo de México es una de las regiones petroleras más importantes del mundo, primordialmente la región de la Sonda de Campeche situada en el sector suroeste y en donde se encuentran las principales plataformas de Petróleos Mexicanos (PEMEX). Cabe señalar que la fuente de petróleo que se encuentra en la cuenca de la Sonda de Campeche representa aproximadamente el 70% del total de las reservas y producción petroleras mexicanas (Guzmán y Mello, 1999) y aporta cerca del 95% del petróleo crudo y el 80% del gas natural nacional (INE, 1997). En esta región, las actividades de exploración, explotación, derrames y transporte de hidrocarburos fósiles han sido considerables en las últimas tres décadas (Soto *et al.*, 2004).

En el Estado de Campeche más de 156,000 hectáreas corresponden a lagunas costeras, de las cuales la Laguna de Términos es de importancia especial debido a su riqueza biológica, por lo cual fue declarada Reserva Natural en 1994 (Carvalho *et al.*, 2009). Su relevancia está relacionada con la extensión de los manglares, humedales y recursos de importancia comercial como peces y camarones (INE, 1997). Sin embargo, el crecimiento de los asentamientos humanos en la región y el subsecuente desarrollo económico han incrementado el estrés ecológico en el ecosistema (Díaz de León *et al.*, 2004). Los principales factores sociales y

económicos que impactan a la región son la agricultura, la ganadería, la extracción de petróleo, la pesca y la acuicultura (INE, 1997; Arriaga *et al.*, 2002).

Ciudad del Carmen es el principal centro de población, con aproximadamente 150,000 habitantes y varias industrias relacionadas con la extracción de petróleo. Las actividades agrícolas, especialmente la producción de arroz y la alimentación de ganado en las cuencas de los principales ríos pueden originar contaminantes orgánicos que posteriormente serán vertidos y diseminados en el sistema lagunar (Carvalho *et al.*, 2009). Por otro lado, existe el riesgo permanente de derrames petroleros que afecten a la Laguna de Términos. Se sabe que frecuentemente existen pequeñas fugas en tuberías en la zona de Pantanos de Centla y debido a la interacción ecológica de estas dos reservas, afecta a los ecosistemas naturales de ambas. Asimismo, la explotación petrolera continua modificando ecosistemas naturales debido a la necesidad de instalar infraestructura para la extracción, conducción de gas, transporte vía terrestre y acuática y otras necesidades inherentes a esta industria (Pronatura, 2005).

De acuerdo con el Gobierno del Estado de Campeche (2004) otro factor que ha impactado, es la infraestructura portuaria, con la descarga de aguas residuales en zona de muelles, así como de residuos industriales que afectan la calidad del agua en la Laguna de Términos. Entre los contaminantes que son vertidos en el sistema lagunar están los HAP constituyentes naturales del petróleo crudo, así como aquellos que resultan de los procesos de combustión incompleta de diversos tipos de materia orgánica, de los cuales un gran porcentaje de su generación reside en la combustión de madera y petróleo (Grice *et al.*, 2007).

Por lo expuesto anteriormente, la evaluación de HAP en los sedimentos de la Laguna de Términos es importante ya que su identificación, cuantificación, distribución y sus fuentes de origen proporcionarán información sobre la salud del ecosistema en relación con dichos contaminantes y se inferirán los posibles efectos biológicos que pueden producir.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Analizar los HAP en los sedimentos superficiales de la Laguna de Términos, así como su variación espacio-temporal en diferentes épocas climáticas (nortes, secas y lluvias).

Objetivos Particulares

- Identificar y cuantificar los HAP en sedimentos de la Laguna de Términos, Campeche.
- Determinar el posible origen de los HAP presentes en los sedimentos e identificar las principales rutas de entrada de estos contaminantes hacia la laguna.
- Establecer las posibles relaciones entre los HAP en sedimentos y las variables ambientales como profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, pH, textura del sedimento y contenido de carbono orgánico en sedimentos.
- Inferir los posibles efectos biológicos que los HAP pueden producir en los organismos bentónicos, así como los riesgos potenciales de salud pública.

HIPÓTESIS

Hipótesis General

- Los HAP que ingresan a los ecosistemas costeros son generados principalmente por las actividades antropogénicas, siendo el depósito atmosférico, las descargas domésticas e industriales y la escorrentía de los ríos las rutas de entrada más importantes de estos contaminantes a dichos ambientes.

Hipótesis Particulares

- Si el aporte de HAP en los ecosistemas costeros se debe principalmente a las actividades humanas; entonces en la Laguna de Términos habrá presencia de estos contaminantes en los sedimentos, especialmente en áreas cercanas a Ciudad del Carmen en donde existe un constante tráfico de vehículos, actividades portuarias, municipales, domésticas e industriales.
- Si los ríos constituyen también una importante ruta de entrada de contaminantes hacia los ecosistemas costeros; entonces la Laguna de Términos al ser receptora de los sistemas fluviolagunares Pom-Atasta, Río Palizada, Río Chumpán y Río Candelaria, igualmente estará afectada por el aporte de HAP que estos ríos acarrearán desde zonas aledañas.

- Si en la Laguna de Términos hay presencia de HAP entonces se acumularán principalmente en sedimentos finos y su adsorción a éstos también estará en función del contenido de carbono orgánico de dichos sedimentos.
- Si las lagunas costeras muestran variaciones en sus características fisicoquímicas debido a la mezcla de agua dulce proveniente de las descargas fluviales y pluviales y del agua de origen marino, lo cual está en función de los cambios estacionales (nortes, secas y lluvias); entonces si el aporte de HAP también está afectado por dichos cambios, por lo tanto habrá diferencias en las concentraciones de estos contaminantes entre las épocas climáticas.

ÁREA DE ESTUDIO

La Laguna de Términos se localiza entre los meridianos 91°15' y 92°00' de longitud oeste y los paralelos 18° 25' y 19°00' de latitud norte en el Estado de Campeche (Ponce y Botello, 1991) y es la laguna costera más grande en México. Se ubica en el extremo oriental del extenso y complejo delta del río Usumacinta que se extiende aproximadamente 125 Km a lo largo de la costa sur del Golfo de México. El sistema lagunar tiene dos bocas de conexión permanente con el mar: la del Carmen y la de Puerto Real; y cuatro sistemas fluvio-lagunares asociados que contribuyen a la afluencia de agua dulce hacia su interior: el río Candelaria y el río Mamantel que confluyen en la laguna secundaria Panlau en la zona sureste; el río Chumpán que desemboca en la laguna secundaria Balchacah en la región sur. Respecto a la porción occidental, el río Palizada desagua en la cadena de lagunas Viento Este-Vapor, mientras que el río San Pedro-San Pablo desemboca en la cadena de lagunas secundarias Pom-Atasta cerca de la boca del Carmen. Tanto el río Palizada como el río San Pedro-San Pablo son tributarios del Usumacinta, el cual se extiende a los estados vecinos de Tabasco y Chiapas y a las tierras altas de Guatemala (Bach *et al.*, 2005) (Fig. 2).

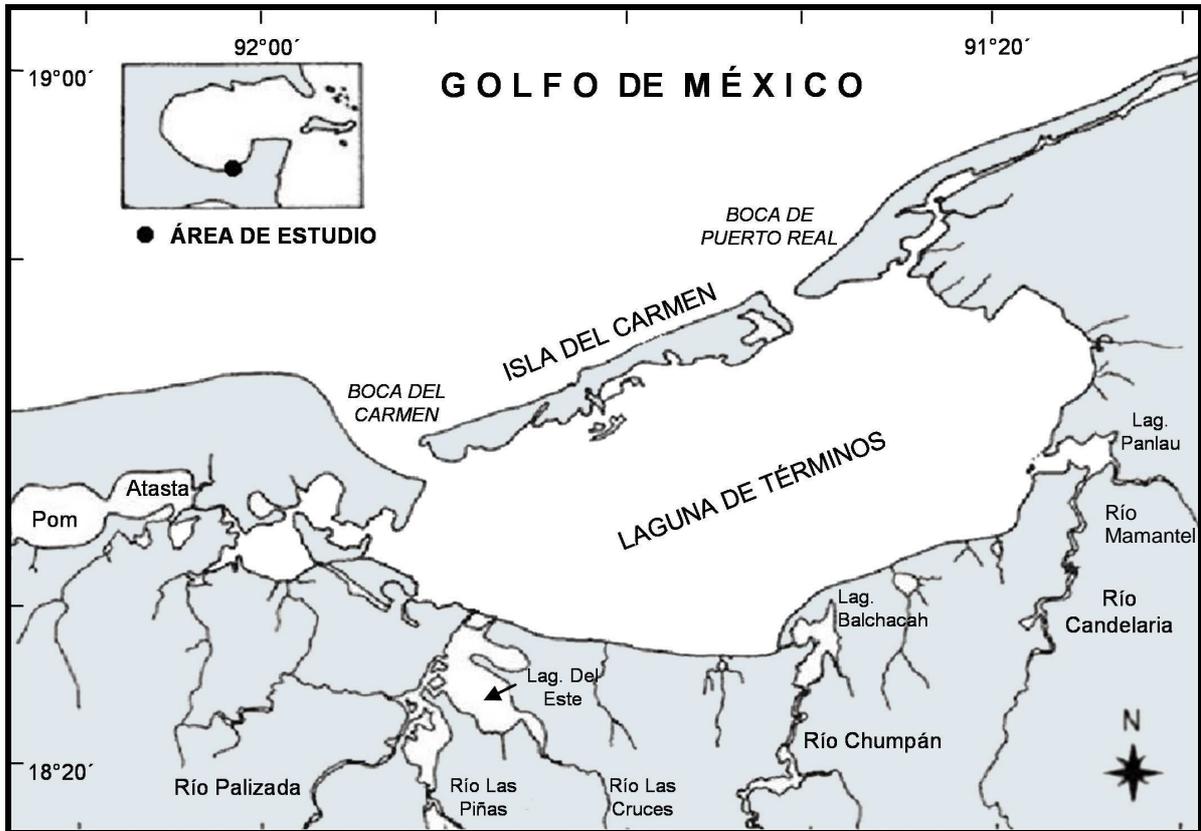


Figura 2. Área de Estudio.

Laguna de Términos tiene una longitud de 70 km y en su parte más ancha mide 30 km; ocupa un área aproximada de 2500 km² y tiene una profundidad promedio de 3.5 m. El clima de la región es húmedo tropical con precipitaciones anuales que van desde 1100 hasta 2000 mm. Los vientos dominantes son del este. La corriente litoral y la descarga de los ríos provocan que el agua del Golfo entre a la laguna mediante la Boca de Puerto Real y salga por la Boca del Carmen (Fuentes-Yaco *et al.*, 2001). Tanto la Boca del Carmen como la Boca de Puerto Real tienen un canal profundo en su lado oriental (entre 14 y 18m). La Boca de Puerto Real tiene un ancho promedio

de 3.2 km y presenta aguas transparentes y un notable delta interior. La Boca del Carmen, con un ancho promedio de 3.8 km esta influenciada por las aguas del río Palizada, con abundantes terrígenos finos en suspensión que producen turbidez y forman un delta exterior. Esta es la boca de conexión con mayor variación ambiental (INE, 1997). En las bocas de la laguna la salinidad es de 32-35 ups, excepto durante las inundaciones cuando la salinidad en la Boca del Carmen puede disminuir a 20 ups o menos (Botello, 1978; Yañez-Arancibia *et al.*, 1985).

Por otro lado, Páez-Ozuna *et al.* (1987) establecieron que las principales fuentes de sedimento en la laguna son los aportes fluviales y calcáreos, predominando los primeros en la parte sur y oeste y los segundos en la Boca de Puerto Real (70% de CaCO_3) y adyacentes a la Isla del Carmen. Así mismo, Bach *et al.* (2005), determinaron que el sistema lagunar puede separarse en dos áreas distintas. La zona occidental que recibe la mayor parte del desagüe de los ríos y en la cual predominan los sedimentos lodosos y la zona oriental en donde abundan los sedimentos calcáreos.

Las épocas climáticas que se han registrado para la región son secas (marzo a mayo), lluvias (junio a octubre) y nortes (noviembre a febrero) (Fuentes-Yaco *et al.*, 2001; Ayala-Pérez *et al.*, 2003). El río Palizada, descarga aproximadamente el 75% del total de agua dulce que llega a la laguna y durante la mayor parte del año, el agua que desemboca de este río fluye casi directamente a la plataforma de Campeche. Los otros dos ríos, el Chumpán y el Candelaria, descargan volúmenes proporcionalmente pequeños de agua. Se cree que la circulación dentro de la laguna de Términos ocurre principalmente debido a cambios en la marea en ambas bocas

principales (Puerto Real y del Carmen), así como a patrones de viento estacionales (Bach *et al.*, 2005). Durante la mayor parte del año, en las estaciones secas y lluviosas predominan los vientos del este y sureste y hay un flujo de agua neto de este a oeste provocando el movimiento de agua que entra a través de la Boca de Puerto Real y sale a través de la Boca del Carmen (Kferve, 1986; Bach *et al.*, 2005). Sin embargo, durante la época de nortes, el viento aumenta de magnitud y cambia de dirección; proviene del noroeste y, en consecuencia la circulación invierte de dirección y se vuelve turbulenta (INE, 1997; Bach *et al.*, 2005).

La Laguna de Términos fue decretada como Área de Protección de Flora y Fauna Silvestre el 6 de junio de 1994 (CONANP, 2000). En cuanto a la vegetación acuática existen más de 250,000 ha de manglar, con árboles que llegan a medir más de 30 m de altura. Las cuatro especies de manglar reportadas en México se encuentran presentes en esta área: *Rizophora mangle* o mangle rojo se localiza en los márgenes de los ríos, lagunas y la costa en suelos inundados; *Laguncularia racemosa* o mangle blanco se ubica en suelos inundados con altos niveles de salinidad; *Avicennia germinans* o mangle negro crece en suelos arenosos que están inundados sólo en algunas épocas del año o en años con altas precipitaciones; *Conacarpus erectus* o botoncillo se halla en suelos arenosos y arcillosos con bajas salinidades e inundaciones en época de lluvias (Pronatura, 2005). Las cuatro especies de manglar se encuentran bajo la categoría de protección especial en la Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2001). La vegetación acuática sumergida se puede encontrar en diversos lugares de la laguna. *Eichornia crassipens*, el jacinto acuático, cubre grandes extensiones en la parte del Sistema fluviolagunar Palizada-Del Este;

los tifales (*Typha sp.*), así como los carrizales (*Phragmites sp.*) se pueden encontrar en diversos sistemas, siendo más abundante en el Palizada-Del Este. Existen otros tipos de vegetación sumergida en aguas con bajas salinidades como: *Vallisneria americana*; *Myriophyllum exalbescens* y *Potamogeton illinoensis*. También existen comunidades de pastos marinos dominadas por las especies *Thalassia testudinum*, *Halodule wrightii* y *Syringodium filiforme*, y se ha encontrado *Ruppia maritima* en el interior del sistema Candelaria-Panlau. Asimismo, existen macrófitas como *Coccoloba humboldtii* y *Schizachyrium* que se distribuyen principalmente en la línea de costa de Isla del Carmen hasta el delta de Puerto Real, así como a lo largo de la zona litoral de las lagunas del este y sureste (ParksWatch, 2003; Pronatura, 2005).

La fauna está bien representada debido a la alta productividad y diversidad de las asociaciones vegetales. Existen reportes de 1,468 especies tanto terrestres como acuáticas. Respecto a estas últimas, en el sistema lagunar existen 15 familias de crustáceos, *Limulus polyphemus* o cacerolita de mar es una especie amenazada. Por otra parte, siete especies tienen importancia comercial: camarón blanco (*Litopenaeus setiferus*), camarón rosado (*Farfantepenaeus duorarum*), camarón café (*F. aztecus*), camarón siete barbas (*Xiphopenaeus kroyeri*) y tres especies de jaibas (*Callinectes sapidus*, *C. rathbunae* y *C. similis*). Las tres primeras especies de camarones están estrechamente ligadas a la laguna por sus estrategias biológicas y como sitio de refugio y alimento para las larvas y preadultos (ParksWatch, 2003).

Los moluscos están representados por 83 familias, con un total de 207 especies de las cuales, *Crassostrea sp* tiene mayor importancia comercial en la región (INE, 1997; DOF, 2010).

Respecto a los peces, Ayala *et al.* (2003) identificaron un total de 107 especies agrupadas en 76 géneros y 37 familias. Las especies más características son *Anguilla rostrata*, *Belonesox belizanus*, *Dorosoma anale*, *Gambusia echeagarayi*, *G. sexradiata*, *Ictalurus meridionales* y *Lepisosteus tropicus* (Yañez *et al.*, 1985).

La fauna más conspicua de la Laguna de Términos son las aves. Se han registrado 40 familias con 279 especies. Se considera que esta área alberga al 33% de las aves migratorias que se mueven por la ruta del Mississippi, por lo menos en alguna parte del año, usando sus ecosistemas naturales para la alimentación, descanso o reproducción. Muchas de estas aves se encuentran amenazadas o en peligro de extinción tal como la cigüeña jaribú (*Jaribu micteria*). Otras especies que utilizan los humedales son: la cigüeña americana (*Mycteria americana*) con estatus de protección especial (NOM-059-SEMARNAT-2001) pato golondrino (*Anas acuta*), cerceta azul (*Anas cyanoptera*), pato chalcuán (*Anas americana*), pato boludo-menor (*Aythya affinis*) y loro frente blanca (*Amazona albifrons*), el martín pescador (*Chloroceryle sp.*) entre otras. Las aves residentes son un total de 110 especies (INE, 1997; ParksWatch, 2003; Robadue *et al.*, 2004).

Por otro lado se han registrado siete familias de anfibios, con 19 especies en pantanos y una en sistemas fluvio lagunares (INE, 1997).

Los humedales de la región de Campeche y Tabasco (Pantanos de Centla) son de gran importancia para los reptiles acuáticos como el cocodrilo de agua dulce (*Crocodylus acutus*), el lagarto de pantano (*C. moreletii*) y el caimán (*Caiman fuscus*) que habitan los pantanos, las zonas de manglar y los alrededores de la Laguna de Términos (Valtierra, 2001). Tanto los cocodrilos como las tortugas marinas son

especies de interés comercial por lo que sus poblaciones han sido severamente disminuidas; entre las tortugas marinas que visitan la zona de las playas de la laguna se encuentran la tortuga de carey (*Eretmochelys imbricata*), la tortuga blanca (*Chelonia mydas*) y la tortuga lora (*Lepidochelys kemp*), las dos primeras con estatus de peligro de extinción (NOM-059-SEMARNAT-2001) y la última bajo protección especial (INE, 1997; ParksWatch, 2003).

Entre los mamíferos acuáticos destacan la nutria de río *Lutra longicaudis*, el manatí (*Trichechus manatus*) con estatus de peligro de extinción (NOM-059-SEMARNAT-2001), y el delfín nariz de botella (*Tursiops truncatus*) bajo protección especial (ParksWatch, 2003; Robadue *et al.*, 2004).

METODOLOGÍA

Muestreo en campo

Se realizaron tres salidas a campo, lo cual permitió abarcar las diferentes épocas climáticas de la región. El primer muestreo se llevó a cabo en noviembre de 2008 (nortes), el segundo se efectuó en marzo de 2009 (secas) y el tercero en octubre de 2009 (lluvias).

Se establecieron 15 estaciones de muestreo (Tabla 2) distribuidas en el sistema lagunar y principalmente ubicadas en áreas sujetas a influencia antropogénica como la descarga de los ríos, las bocas de comunicación con el mar y cercanas a Ciudad del Carmen (Fig. 3).

En la columna de agua se evaluaron *in situ* la profundidad con un disco de Secchi, la temperatura mediante un termómetro de cubeta (-35°C-50°C), la salinidad con un refractómetro marca American Optical, el pH se midió con un potenciómetro marca Conductronic pH120. Los datos de oxígeno disuelto (OD) fueron proporcionados por el IRD (*Institute de Recherche pour le Développement*).

Las muestras de sedimentos superficiales se colectaron con una draga tipo Eckman (3L), posteriormente con una espátula metálica se tomaron tres submuestras, dos de ellas para el análisis granulométrico y de carbono orgánico (las cuales se depositaron en bolsas de plástico), y una para el análisis de HAP (la cual se colocó en frascos de vidrio previamente lavados y enjuagados con acetona y hexano y secados a 200 °C por 18 horas). Los sedimentos fueron preservados a ($\approx 4^{\circ}\text{C}$) para ser transportados y conservados hasta su posterior análisis en el laboratorio.

Tabla 2. Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo en la Laguna de Términos, Campeche.

Estación	Localidad	Coordenadas	
		Norte	Oeste
1	Gasolinera Puerto Isla del Carmen	18°33'32.8"	91°50'34.8"
2	Boca del Carmen	18°37'43.1"	91°49'40.6"
3	Entre Boca del Carmen y Sistema Atasta	18°35'30.00"	91°50'20.0"
4	El Rastro	18°38'00.0"	91°48'01.8"
5	Estero Pargo	18°38'26.8"	91°46'11.2"
6	Cerca a Isla Cayo	18°38'04.0"	91°41'51.3"
7	Cerca a Isla Pájaros	18°42'20.0"	91°34'10.0"
8	Punta San Julián	18°44'16.0"	91°30'42.1"
9	Boca de Puerto Real Este	18°46'53.4"	91°29'47.4"
10	Centro Este	18°40'13.0"	91°26'34.0"
11	Influencia Río Candelaria	18°34'30.0"	91°22'40.0"
12	Centro Oeste	18° 33'37.9"	91°36'09.6"
13	Desembocadura del Río Chumpán	18°29'20.3"	91°33'21.2"
14	Desembocadura del Río Palizada	18°29'31.5"	91°47'30.4"
15	Estero Atasta	18° 33'42.0"	91° 34'10.0"

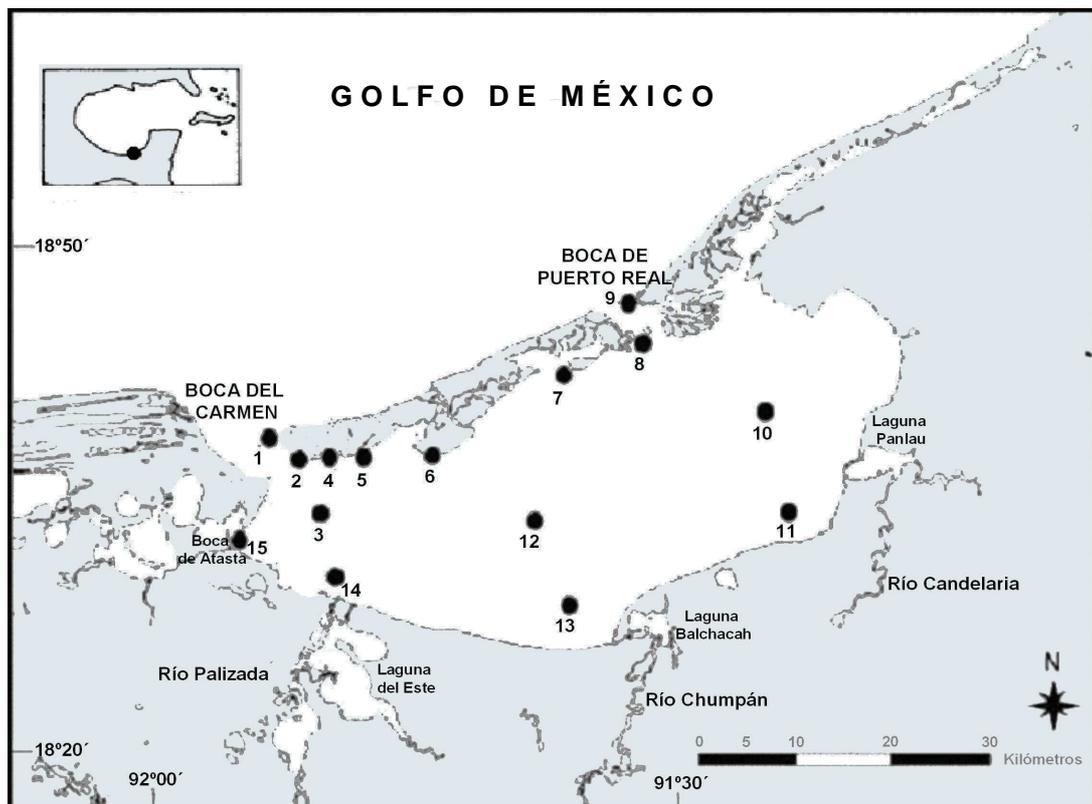


Figura 3. Estaciones de muestreo en la Laguna de Términos, Campeche.

Análisis de laboratorio

Para caracterizar el tamaño de grano de los sedimentos, se separó la fracción gruesa (>0.0625 mm), de la fracción lodosa mediante tamizado húmedo.

Las arenas se cuantificaron como fracción total, mientras que la proporción limo/arcilla se analizó por medio de la Técnica de pipeteo propuesta por Folk (1974).

Para la determinación del contenido de carbono orgánico (CO) en los sedimentos, éstos fueron secados en estufa Binder a 40°C durante 48 horas y posteriormente se tamizaron en una malla de 0.25mm.

La evaluación del porcentaje de CO se basó en la técnica propuesta por Gaudette *et al.* (1974), la cual consiste en una reacción exotérmica y oxidación con dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado, seguida por la titulación del exceso de dicromato con sulfato ferroso amoniacal (0.5 N). Las muestras se analizaron por duplicado y se procesaron dos blancos de igual forma.

Para el análisis de los HAP, los sedimentos fueron secados a temperatura ambiente y se tamizaron en una malla de 0.25mm. La extracción, purificación y cuantificación de los HAP se efectuó con el método propuesto por la UNEP/IOC/IAEA (1992). Se tomó una submuestra de 5 g (peso seco) del sedimento tamizado para realizar la extracción en un equipo Soxhlet utilizando papel filtro Wathman No. 2. Se agregaron 250 ml de una mezcla hexano-diclorometano (50:50) al matraz de balón y se efectuó la extracción durante 8 horas. Posteriormente, los extractos de cada muestra fueron rotoevaporados hasta un volumen aproximado de 2ml.

La purificación y separación de las fracciones alifáticas y aromáticas se realizó por cromatografía de adsorción en columnas de 30 cm de largo y 2 cm de diámetro interno, las cuales se empacaron en el siguiente orden: fibra de vidrio, sílica, alúmina y sulfato de sodio anhidro. La sílica y la alúmina se activaron a 200 °C durante 4 horas y se desactivaron al 5% con agua desionizada. La fracción de hidrocarburos alifáticos (F1) se consiguió eluyendo la muestra con 20 ml de hexano. Para la obtención de la fracción de hidrocarburos aromáticos (F2) las eluciones se hicieron con 20 ml de hexano-diclorometano (90:10), más 20 ml de hexano-diclorometano (50:50). Cada una de las fracciones fueron rotoevaporadas hasta 2 ml, posteriormente se colocaron en viales y se llevaron a sequedad.

Como control de calidad se incluyó el análisis de blanco de reactivos (1 por cada 5 muestras problema) para eliminar la posible contaminación que existiera a lo largo del proceso metodológico. Así mismo, para cada lote de muestras se corrió paralelamente un duplicado con Octadeceno (200µl) y O-Terfenil (200µl) para conocer la eficiencia del método.

Aunado a lo anterior, para validación de los análisis químicos fue procesado el material de referencia sedimentario IAEA-417 para HAP, mediante el cual se determinó el porcentaje de recuperación de cada compuesto individual y se obtuvo un intervalo de (66%-107%).

La cuantificación de los HAP se realizó en un cromatógrafo de gases (Agilent modelo 6890 Plus), equipado con un detector de ionización de flama y una columna capilar de sílice fundida HP-5MS de 30 m x 0.25 mm D.I. x 0.25 μm de grosor de capa de metil fenil silicona 5% y se usó helio como gas acarreador. Las muestras se inyectaron en el modo splitless a 325 °C. El programa de temperatura utilizado fue el siguiente: temperatura inicial del horno fue de 80°C durante 1 min, calentando a 160°C aumentando a 25 °C min^{-1} , posteriormente se llevó a 300°C con un incremento de 3°C min^{-1} , y por último a 325°C con una tasa de 25°C min^{-1} , mantenida por 1 min. La temperatura del detector de flama fue 325 °C. Para la cuantificación e identificación de HAP se empleó una muestra estándar con 16 HAP: Naftaleno, Acenaftileno, Acenafteno, Fluoreno, Fenantreno, Antraceno, Fluoranteno, Criseno, Pireno, Benzo(a)antraceno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(k)fluoranteno, Benzo(a)pireno, Indeno(1,2,3-cd)pireno, Dibenzo(a,h)antraceno y Benzo(ghi)perileno.

Análisis Estadístico de los Resultados

Se analizó la variabilidad temporal y espacial de los factores fisicoquímicos en agua (profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y pH) y en sedimentos (tamaño de grano, contenido de CO y concentración de HAP).

Para observar la variabilidad temporal de los factores fisicoquímicos e identificar diferencias entre las épocas climáticas se elaboraron diagramas de caja y bigote los cuales muestran la mediana de los datos (línea horizontal de la caja), los cuartiles 25 y 75 (márgenes inferior y superior de la caja), los límites de los bigotes son los percentiles 5 y 95 (en este trabajo también se incluyen los valores extremos) (Burke *et al.*, 2002).

Para verificar la significancia de dichas diferencias se aplicaron análisis de varianza de una vía (ANOVA) para los datos paramétricos y Kruskal-Wallis para los datos no paramétricos con un nivel de significancia de 95% ($p < 0.05$), utilizando como factor la época climática (nortes, secas y lluvias). Los análisis fueron llevados a cabo mediante el programa estadístico NCSS 2001.

Asimismo, se realizaron análisis de correlación de Pearson ($p < 0.05$) para determinar relaciones entre las variables estudiadas en cada época climática.

Para el análisis espacial de los factores fisicoquímicos se elaboraron diagramas de barras, así como gráficos para la representación de datos porcentuales utilizando para ambos casos el programa Excel XP.

Para determinar las fuentes de origen de los HAP se aplicaron diversos índices de diagnóstico y para su representación gráfica se elaboraron diagramas de dispersión mediante el paquete STATISTICA versión 6.0* para Windows.

Por último, las fuentes de HAP, así como su localización geográfica fueron evaluadas estadísticamente con análisis de componentes principales (ACP), utilizando el paquete STATISTICA versión 6.0 para Windows.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA

Los parámetros fisicoquímicos registrados en la columna de agua se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros ambientales de la columna de agua en diferentes épocas climáticas en la Laguna de Términos, Campeche.

Nortes (noviembre de 2008)					
Variables	Máximo	Mínimo	Promedio	DE	CV
Profundidad (m)	4.3	1.2	2.76	1.01	36.6
Temperatura (°C)	26	24	24.85	0.68	2.7
Salinidad (ups)	26.3	0.2	14.28	8.23	57.6
Oxígeno (mg/l)	8.1	5.4	6.98	0.99	14.27
pH	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Secas (marzo de 2009)					
Variables	Máximo	Mínimo	Promedio	DE	CV
Profundidad (m)	4.17	0.1	2.22	1.62	72.97
Temperatura (°C)	29	24.5	26.37	1.28	4.85
Salinidad (ups)	34	0	29.63	9.43	31.83
Oxígeno (mg/l)	6.4	5.8	6.07	0.18	3.02
pH	8.2	7.8	7.98	0.15	1.92
Lluvias (octubre de 2009)					
Variables	Máximo	Mínimo	Promedio	DE	CV
Profundidad (m)	5	1	2.11	1.58	74.9
Temperatura (°C)	29	26	27.13	0.83	3.1
Salinidad (ups)	37	5	30.47	8.57	28.1
Oxígeno (mg/l)	7.3	5.7	6	0.36	5.7
pH	9.1	7.7	8	0.5	6.02

* D.E = desviación estándar, C.V.= coeficiente de variación, N.D= no disponible.

Profundidad

Respecto a la variación temporal de la profundidad en el sistema lagunar, el análisis estadístico no reveló diferencias significativas ($p>0.05$) entre las distintas épocas climáticas (Fig. 4).

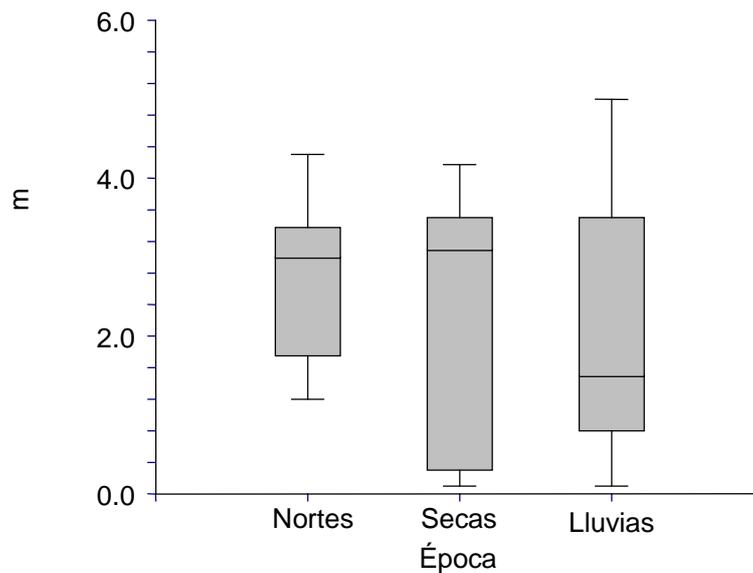


Figura 4. Variación temporal de la profundidad en la Laguna de Términos.

Durante la época de nortes hubo una profundidad promedio de 2.7m (1.2m-4.3m), en secas fue de 2.2m (0.1m-4.1m) y en lluvias de 2.1(1m-5m); las estaciones con menor profundidad fueron la E2 (Boca del Carmen) y la E5 (Estero Pargo), el sitio más profundo fue la E12 (Centro Oeste) (Fig. 5).

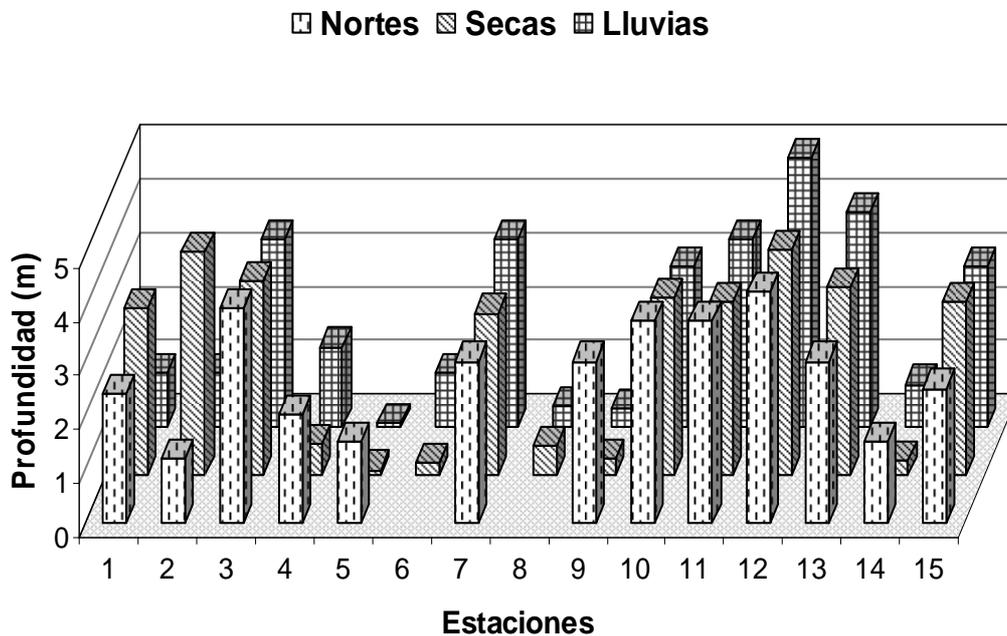


Figura 5. Variación espacial de la profundidad en la Laguna de Términos.

David y Kjerfve (1998) determinaron que la frecuencia de las mareas explica el 70% de la variabilidad del nivel del agua en la laguna, mientras que la variabilidad restante la atribuyen a los fenómenos meteorológicos. Los cambios espaciales en la profundidad debido a la influencia de las mareas se presentan diariamente a lo largo de un día lunar el cual tiene una duración de 24 horas y 50 minutos. El tipo de marea en la Laguna de Términos es mixto diurno (diurnas y semidiurnas), lo que indica que en un día lunar se presentan dos pleamares y una bajamar o dos bajamares y una pleamar con un promedio de 0.43m (rango 0.3 a 0.7m) (Yañez y Day, 2005). Estas fluctuaciones en la marea provocan que el 50% del volumen de agua de la laguna sea renovado cada 9 días (David y Kjerfve, 1998).

La profundidad de la columna de agua en la Laguna de Términos también está influenciada por la variabilidad estacional en la descarga de los principales ríos que drenan en ella, aunado a los factores de precipitación y evaporación (Yañez y Day, 2005; David y Kjerfve, 1998). El río Palizada es el que aporta el mayor volumen de agua dulce con un promedio anual de $394 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y tiene gran influencia en la porción oeste (1/3) del sistema lagunar, mientras que el río Chumpán, el río Candelaria y el río Mamantel en conjunto descargan un promedio anual de $122 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el área este (2/3) de la laguna.

En la Tabla 4 se presenta la variabilidad de las descargas de los ríos en diferentes épocas climáticas así como los datos de precipitación y evaporación en la Laguna de Términos.

Tabla 4. Estacionalidad en la descarga de los ríos, la precipitación y la evaporación en la Laguna de Términos (m^3s^{-1}).

Área y Época climática	(+) Descarga	(+) Precipitación	(-) Evaporación	(=) Afluencia de agua dulce
Oeste (1/3)*				
Nortes	453	27	18	462
Secas	250	12	35	227
Lluvias	480	45	33	492
Este (2/3)**				
Nortes	140	53	35	158
Secas	50	24	70	4
Lluvias	175	91	66	200

*Río Palizada

** Río Chumpán+Río Candelaria+ Río Mamantel.

Datos tomados de Yañez y Day, 2005.

Durante este estudio se evaluó una profundidad promedio de 2.3m lo cual concuerda con lo reportado por Parkwatch (2003) quienes registraron un promedio entre 1.5 y 4m.

Respecto a la variabilidad de la profundidad entre las épocas climáticas, a pesar de no encontrarse diferencias estadísticamente significativas en este parámetro, es importante mencionar que se identificó un comportamiento atípico, ya que en la época de secas y en la época de lluvias se determinó una profundidad media similar (2.2m y 2.1m respectivamente). Lo anterior pudo deberse a la menor precipitación promedio registrada en el Estado de Campeche durante el 2009 (94.45 mm) en comparación con el 2008 (129.75 mm) (CNA, 2008, 2009).

De acuerdo con el INE (1997) y Bach *et al.* (2005) en la región de la Laguna de Términos el aumento de la precipitación a lo largo del año, se inicia en junio, cuando sobrepasa los 100mm/mes, y se mantiene en ese rango hasta septiembre-octubre, periodo que se considera predominantemente como la época de lluvias; posteriormente, se observa una ligera disminución en la precipitación durante los meses de noviembre a febrero (época de nortes) y se registran los valores mínimos de febrero a mayo (época de secas). En la Figura 6 se observa claramente este comportamiento durante el 2008; mientras que en el 2009 hubo una disminución en la precipitación sobre todo en el mes de octubre cuando se llevó a cabo el muestreo correspondiente a época de lluvias.

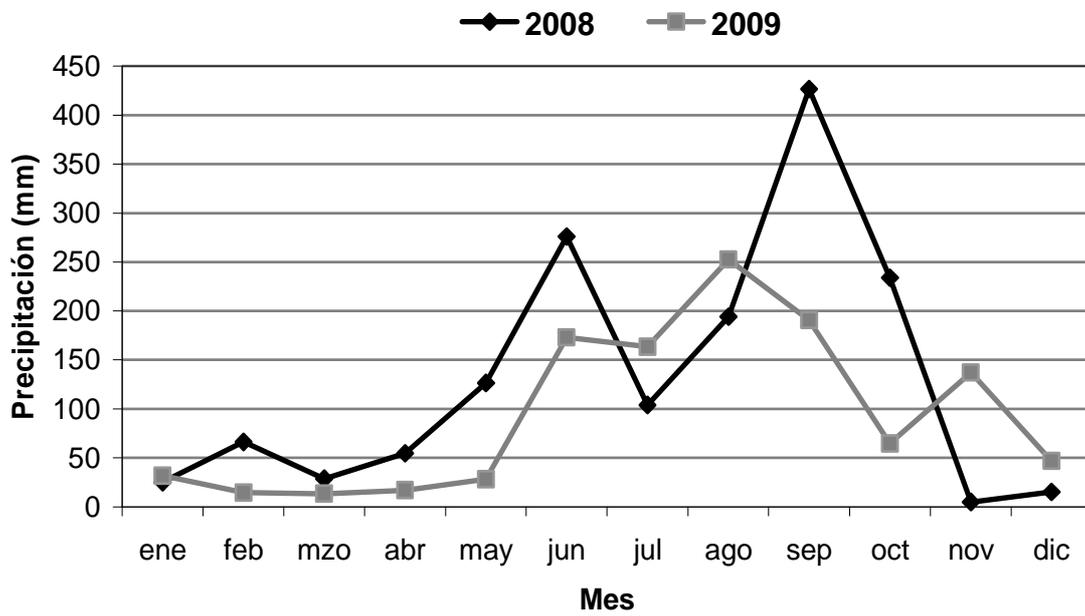


Figura 6. Precipitación promedio mensual (mm) en el estado de Campeche, México (CNA, 2008, 2009).

Temperatura

Respecto a la variación temporal de la temperatura se encontraron diferencias significativas entre las épocas climáticas ($p < 0.05$) (Fig. 7).

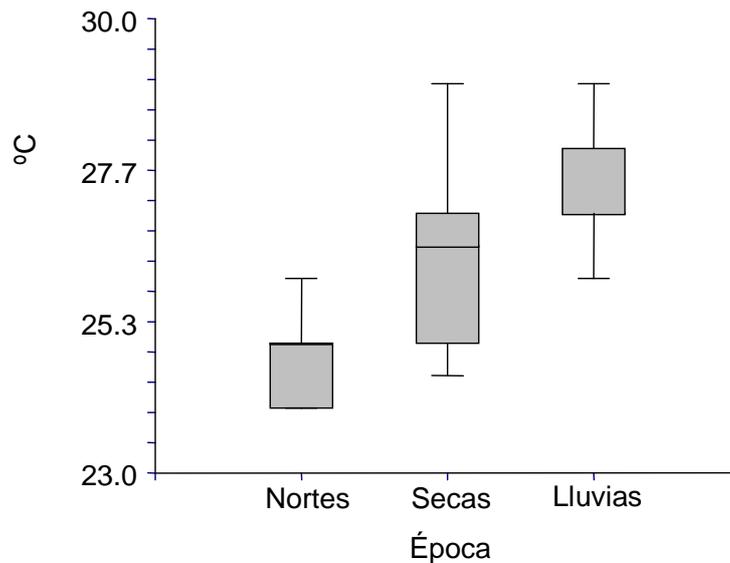


Figura 7. Variación temporal de la temperatura en la Laguna de Términos.

En la época de nortes la temperatura media fue 24.8°C (24°C-26°C); las estaciones con la temperatura mínima fueron la E5 (Estero Pargo), E12 (Centro Oeste), E14 (Desembocadura del Río Palizada) y la E15 (Estero Atasta) y la máxima se registró en la E2 (Boca del Carmen) y la E3 (Entre Boca del Carmen y Sistema Atasta). La menor temperatura promedio registrada durante esta época climática se debe a que es frecuente la ocurrencia de frentes fríos, acompañados de fuertes vientos y lluvia que provocan una importante disminución de la temperatura ambiente y del agua (Ayala *et al.*, 2003). En la época de secas el promedio fue de 26.3°C y fluctuó de 24.5°C en la Boca del Carmen (E2) hasta los 29°C en un sitio cercano a Isla Cayo

(E6). En lluvias hubo un promedio de 27.1 °C (26°C-29°C) en la E3 (Entre Boca del Carmen y Sistema Atasta) y en la E5 (Estero Pargo) respectivamente (Fig. 8).

El INE (1997) estableció que los valores máximos de temperatura en la Laguna de Términos se presentan en general durante la época de secas, debido a la elevada insolación en el cuerpo lagunar, a la mayor tasa de evaporación y a la menor profundidad, sin embargo durante este estudio la temperatura promedio fue mayor en lluvias (27.1°C) que en secas (26.3°C). Lo anterior pudo deberse al déficit de precipitaciones registrado en el Estado de Campeche durante el 2009 (CNA, 2009).

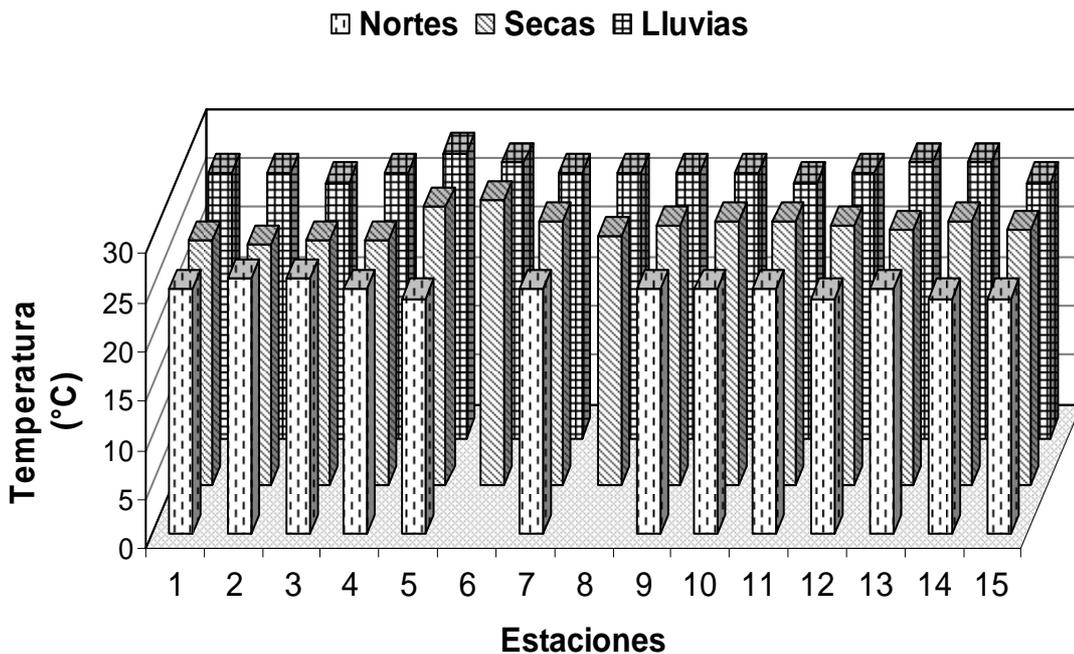


Figura 8. Variación espacial de la temperatura en la Laguna de Términos.

Salinidad

Los gradientes de salinidad son una característica común en las lagunas costeras ya que se presenta un intercambio de agua con el océano y la recepción de agua dulce proveniente de los ríos. A partir de estas propiedades dentro del cuerpo acuático se manifiestan condiciones hidrológicas diferentes: una zona marina (la directamente influida por la marea), una mixohalina (donde se lleva acabo la mezcla) y una dulceacuícola (dominada por las corrientes de agua continental) y esta distribución variará según la época climática de que se trate (Contreras, 2010).

De acuerdo con el sistema Venecia (Anonymus, 1959) las condiciones de salinidad se clasifican como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de salinidad de acuerdo al sistema de Venecia (1959).

Salinidad (ups)	
Eurihalino	> 30
Polihalino	18-30
Mesohalino	5-18
Oligohalino	0.5-5
Limnético	0-0.5

El análisis estadístico reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) en la salinidad entre las épocas climáticas estudiadas (Fig. 9).

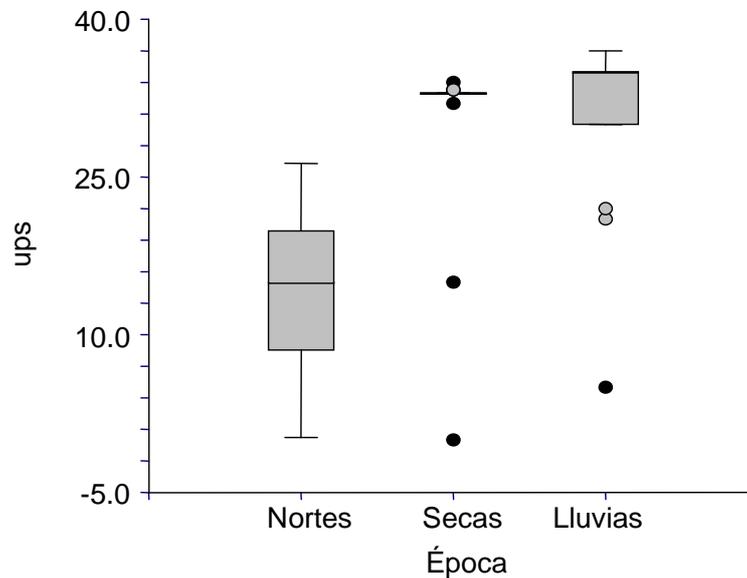


Figura 9. Variación temporal de la salinidad en la Laguna de Términos.

Durante la época de nortes se registró la salinidad promedio menor (14.2 ups) tal vez debido a lluvias ocasionales asociadas a los nortes así como a la mezcla del agua de diferente origen mediante la acción del viento. Según el sistema de clasificación de Venecia (Tabla 5) durante la temporada de nortes se presentaron condiciones polihalinas en las estaciones situadas a lo largo de la parte norte de la laguna E1 (Gasolinera Puerto Isla del Carmen), E4 (El Rastro), E5 (Estero Pargo), E7 (Cerca a Isla Pájaros), E9 (Boca de Puerto Real Este). Así mismo, se encontraron condiciones mesohalinas en la E2 (Boca del Carmen), E3 (Entre Boca del Carmen y Sistema Atasta), ubicadas en la zona noroeste y en la E10 (Centro Este), E11 (Influencia Río Candelaria), E12 (Centro Oeste) y E13 (Desembocadura del Río Chumpán) las cuales se ubican en la porción media del cuerpo lagunar. En cuanto a

la E14 (Desembocadura del Río Palizada) presentó características oligohalinas, mientras que la E15 (Estero Atasta) se registró como limnética. En la época de secas la salinidad aumentó a 29.6 ups debido a la mayor evaporación ocasionada por temperaturas más altas y la poca profundidad de la laguna lo que propició la dominancia de condiciones eurihalinas en la mayor parte de ésta con excepción de la E15 (Estero Atasta) donde se encontraron características mesohalinas y la E14 (Desembocadura del Río Palizada) que presentó condiciones limnéticas. En la época de lluvias, contrario a lo que se esperaba se registró la mayor salinidad promedio (30.4 ups) lo cual se atribuye a la menor precipitación en el área de estudio durante el mes de octubre por lo cual se comportó de manera similar a la época de secas ya que también prevalecieron condiciones eurihalinas en la laguna excepto en la E3 (Entre Boca del Carmen y Sistema Atasta) y la E15 (Estero Atasta) con características polihalinas y la E14 con condiciones oligohalinas.

En la figura 10 se muestra la variación espacial de la salinidad la cual durante la época de nortes tuvo un promedio de 14.2 ups con un intervalo de 0.2 ups a 26.3 ups en la E15 (Estero Atasta) y la E1 (Gasolinera Puerto Isla del Carmen), respectivamente. En lo referente a la época de secas la salinidad media fue de 29.6 ups con un mínimo de 0.0 ups en la E14 (Desembocadura del Río Palizada) y un máximo de 34 ups en la E8 (Punta San Julián). Respecto a la época de lluvias hubo un promedio de 30.4 ups con el valor mínimo de 5.0 ups también en la E14 (Desembocadura del Río Palizada) y el máximo de 37.0 ups nuevamente en la E8 (Punta San Julián).

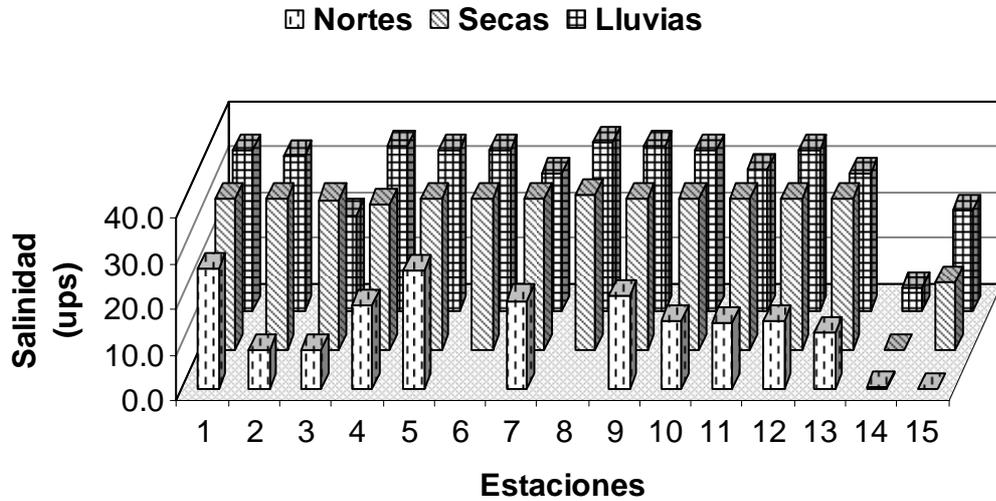


Figura 10. Variación espacial de la salinidad en la Laguna de Términos.

En general, en el sistema lagunar los valores más elevados de salinidad se encuentran en la parte norte lo cual comprueba el origen oceánico de esta masa de agua; mientras que los valores menores se encuentran en las áreas principalmente influenciadas por el Río Palizada. Lo anterior es consistente con lo reportado con Botello (1978) quien mencionó que la salinidad en la laguna de Términos puede variar estacionalmente respecto a la distancia del Palizada.

Oxígeno Disuelto (OD)

El análisis estadístico mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) en la concentración de OD entre las épocas climáticas (Fig. 11).

La mayor concentración promedio de OD se presentó durante la temporada de nortes (6.9 mg/l) debido a que la presencia de vientos del norte provocan un mayor

oleaje y mezcla aumentando la concentración de este gas en la columna de agua aunado a que la menor temperatura y la menor salinidad durante esta época climática permite mayor solubilidad del oxígeno en el agua (Millero, 1996). En secas y en lluvias la concentración promedio fue la misma (6.0 mg/l).

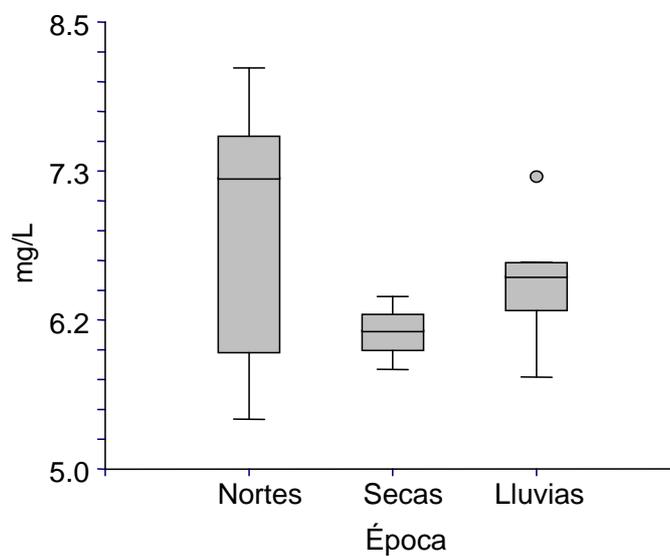


Figura 11. Variación temporal del oxígeno disuelto en la Laguna de Términos.

La época de nortes presentó una concentración promedio de 6.9 mg/l de oxígeno disuelto con un intervalo 5.4mg/l a 8.1mg/l en la E13 (Desembocadura del Río Chumpán) y en la E2 (Boca el Carmen) respectivamente. La época de secas tuvo un promedio de 6.0 mg/l con un mínimo de 5.8 mg/l tanto en la E2 (Boca del Carmen) como en la E6 (Cerca a Isla Cayo) y un máximo de 6.4 mg/l en la E7 (Cerca a Isla

Pájaros). En lluvias el promedio fue 6.0 mg/l con 5.7 mg/l en la E9 (Boca de Puerto Real Este) y 7.3 mg/l en la E3 (Entre Boca del Carmen y Sistema Atasta) (Fig. 12).

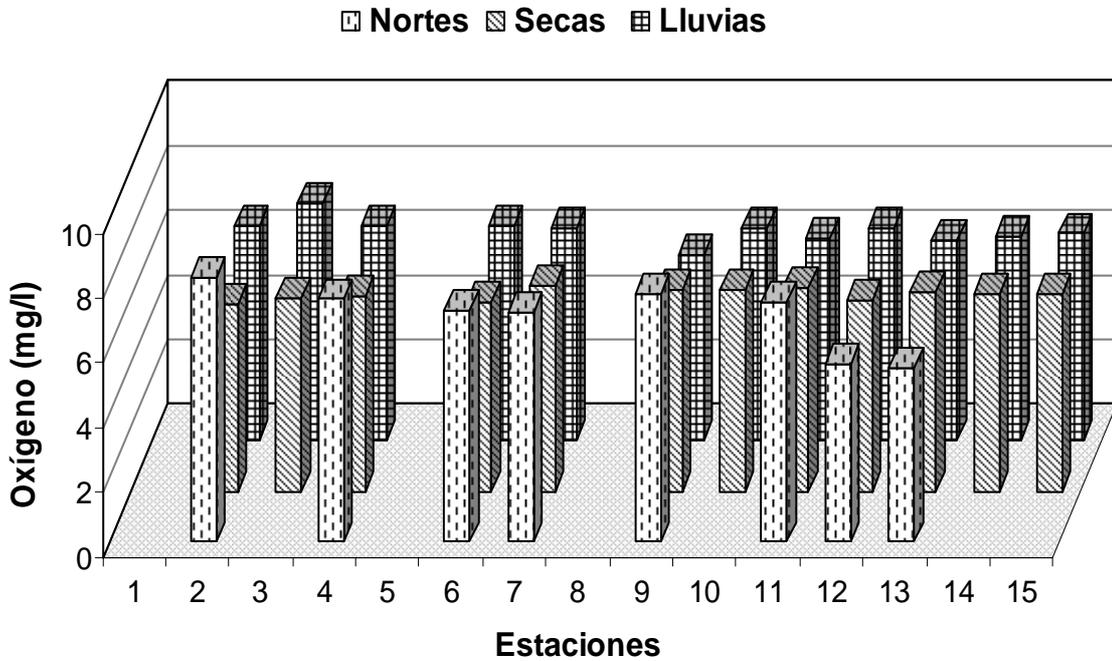


Figura 12. Variación espacial del oxígeno disuelto en la Laguna de Términos.

En general las concentraciones de OD en el sistema lagunar fueron mayores que la concentración mínima permisible de 5.0 mg/L para la protección de vida acuática (CNA, 2003), lo que indica que existen condiciones adecuadas para la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos.

pH

En las lagunas costeras el pH depende de la influencia marina, los escurrimientos, la precipitación, vegetación circundante, circulación, actividad biológica de algunos organismos y del origen de los suelos.

En aguas marinas el pH es alcalino y presenta un valor promedio de 8.2, mientras que en aguas continentales tiende a valores neutros de 7.0. Por lo anterior, los registros de pH naturales en una laguna varían en este intervalo. Los pH bajos (menores a 7) se relacionan con procesos de descomposición de materia orgánica, mientras que valores cercanos a 5 se asocian con desechos provenientes de actividades industriales (Contreras, 2010).

El análisis estadístico no reveló diferencias significativas ($p > 0.05$) en el pH entre secas y lluvias. (Fig. 13).

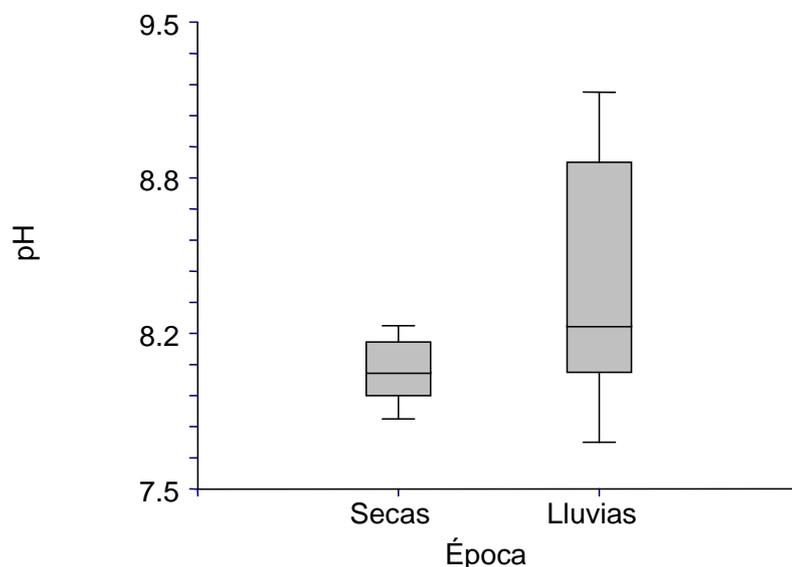


Figura 13. Variación temporal del pH en secas y lluvias en la Laguna de Términos.

Durante secas el pH promedio fue de 7.98 con el valor mínimo de 7.8 en la E7 (Cerca a Isla Pájaros) y el máximo de 8.2 en las E2 (Boca del Carmen), E3 (Entre Boca del Carmen y Sistema Atasta) y E14 (Desembocadura del Río Palizada); En época de lluvias el pH promedio fue de 8 con un mínimo de 7.7 en la E3 y un máximo de 9.2 en la E13 (Desembocadura del Río Chumpán) en esta época hubo un comportamiento similar al de la época de secas debido al déficit de precipitaciones durante el mes de muestreo lo que provocó mayor influencia marina en la laguna (Fig. 14). En ambas épocas los valores oscilaron entre neutro y ligeramente básico, dicha oscilación se encontró dentro de los valores naturales de pH.

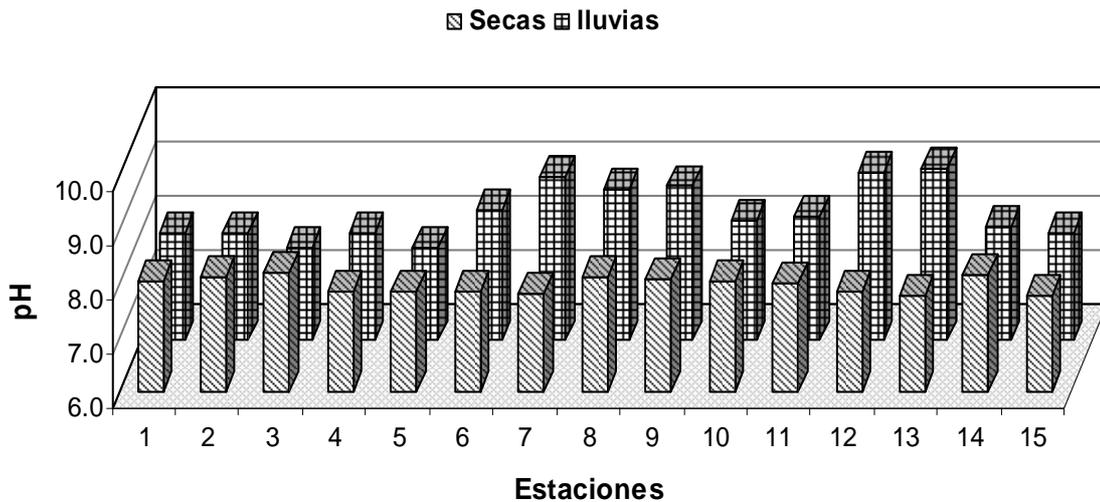


Figura 14. Variación espacial del pH en secas y lluvias en la Laguna de Términos.

En general, las variables ambientales determinadas en la columna de agua que presentaron diferencias estacionales fueron la temperatura, la salinidad y el oxígeno disuelto; tales diferencias ($p < 0.05$) tuvieron lugar en la época de nortes; lo anterior concuerda con lo reportado por Ayala *et al.* (2003) quienes mencionan que en la

región la temporada de nortes es la que presenta mayor variabilidad ambiental ya que, durante esta época es frecuente la ocurrencia de frentes fríos, vientos fuertes y lluvias ocasionales, además de un aumento en los procesos de mezcla de agua de diferente origen, provocando una importante disminución de la temperatura y la salinidad, y un incremento en la concentración de oxígeno disuelto en el sistema lagunar.

En la tabla 6 se describen los parámetros ambientales promedio de la laguna en diferentes periodos; así Botello (1978) reportó distintos valores en la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto entre secas y lluvias. Sin embargo en este estudio la similitud entre los parámetros ambientales tanto en secas como en lluvias concuerda con lo reportado por Ayala *et al.* (2003), quienes además sugirieron que en la región de la laguna de Términos debe llevarse a cabo un trabajo de monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua y de registros meteorológicos que permita fundamentar la estabilidad del sistema o identificar cambios inducidos por el hombre o por fluctuaciones de gran escala. Respecto a esto último es importante mencionar la presencia del Fenómeno “La Niña” que tuvo lugar durante 2009 y el cual de acuerdo con el WFP (2009) ocasionó la disminución del número de tormentas en el Atlántico incluyendo el Caribe y el Golfo de México, a lo cual se podría atribuir el déficit de lluvias en la laguna de Términos durante dicho periodo, y por lo tanto la semejanza entre los parámetros ambientales registrados en secas y en lluvias durante este estudio.

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos promedio en la Laguna de Términos en diferentes periodos.

Autor	Variable	Nortes	Época	
			Secas	Lluvias
+Botello, 1978	Temperatura		29.9	24.96
	Salinidad		33.44	19.09
	Oxígeno		4.85	5.35
	pH		8.2	8.2
*Ayala <i>et al.</i> 2003	Temperatura	27.4	30.22	27.11
	Salinidad	19.42	28.96	26.89
	Oxígeno	6.63	6.35	6.77
	pH	8.34	8.99	9.13
**Este estudio	Temperatura	24.85	26.37	27.13
	Salinidad	14.28	29.63	30.47
	Oxígeno	6.98	6.07	6
	pH		7.98	8

+ 1974 * 1997-1999 ** 2008-2009

CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTOS

Las características evaluadas en los sedimentos fueron el porcentaje de arenas, limos y arcillas así como el contenido de carbono orgánico (C.O.) y la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) totales, las cuales se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Características ambientales de los sedimentos en diferentes épocas climáticas en la Laguna de Términos, Campeche.

Variables	Nortes (noviembre de 2008)			DE	CV
	Máximo	Mínimo	Promedio		
Arenas (%)	87.22	16.16	48.67	21.93	45.1
Limos (%)	59.08	3.2	26.71	19.35	72.4
Arcillas (%)	49.41	9.58	24.61	10.62	43.2
CO (%)	2.26	0.2	1.15	0.66	57.4
HAP Totales (ngg ⁻¹)	1610	540	851.54	312.32	36.7

Variables	Secas (marzo de 2009)			DE	CV
	Máximo	Mínimo	Promedio		
Arenas (%)	88.82	30.58	63.18	17.45	27.62
Limos (%)	51.71	0.03	19.83	16.44	82.90
Arcillas (%)	26.6	11.15	16.99	3.64	21.42
CO (%)	1.78	0.12	0.91	0.49	53.85
HAP Totales (ngg ⁻¹)	8210	340	1608.67	1904.32	118.38

Variables	Lluvias (octubre de 2009)			DE	CV
	Máximo	Mínimo	Promedio		
Arenas (%)	88.68	0.89	59.73	29.11	48.7
Limos (%)	95.56	0.09	15.96	25	156.6
Arcillas (%)	56.39	2	24.32	19.5	80.2
CO (%)	2.72	0.1	1.15	0.73	63.5
HAP Totales (ngg ⁻¹)	5142	180	2185	1553	71.1

* D.E = desviación estándar, C.V.= coeficiente de variación.

Textura de sedimentos

El análisis estadístico no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) en el contenido de las arenas, los limos y las arcillas entre las épocas climáticas estudiadas.

Durante nortes las arenas tuvieron un promedio de 48.67% (16.16%-87.22%), en secas el promedio fue 63.18% (30.58%-88.82%) y en lluvias de 58.59% (0.89%-88.68%) (Fig. 15).

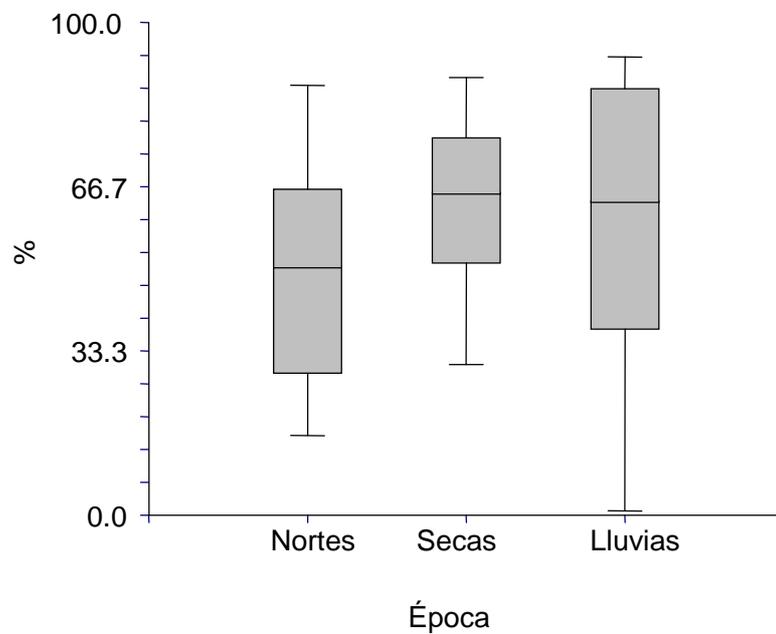


Figura 15. Variación temporal del contenido de arenas en la Laguna de Términos.

En cuanto a la variación temporal de los limos, en nortes se registró un promedio de 26.71%(3.20%-59.08%), en secas fue de 19.83%(0.03%-51.71%) y en lluvias de 17.42%(0.09%-95.56%) (Fig. 16).

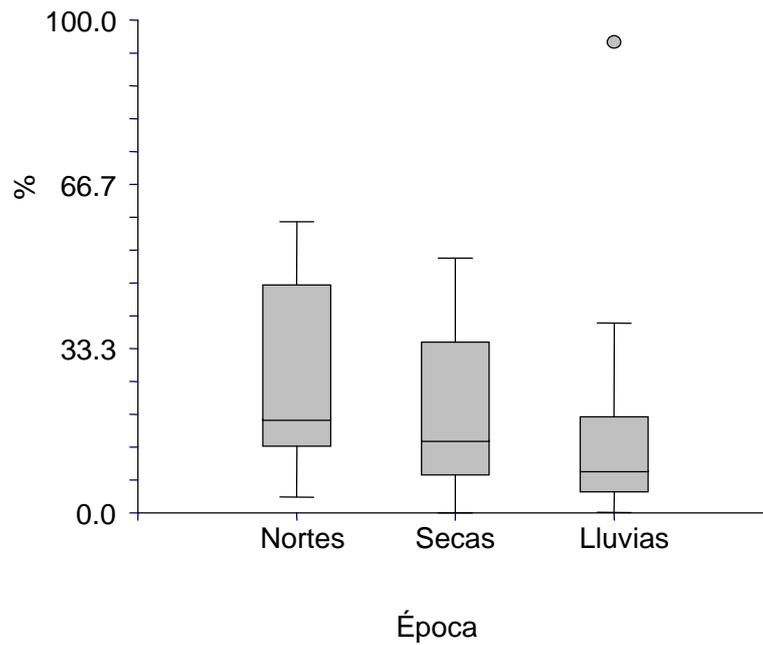


Figura 16. Variación temporal del contenido de limos en la Laguna de Términos.

Respecto a las arcillas, en época de nortes el promedio fue 24.61% (9.58%-49.41%), en secas los valores obtenidos fueron 16.99%(11.15%-26.60%) y en lluvias 23.99% (2%-56.39%) (Fig. 17).

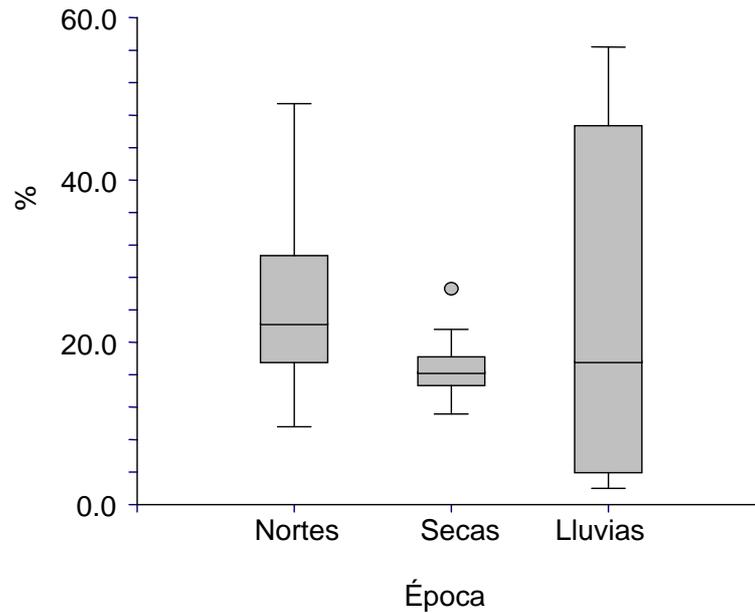


Figura 17. Variación temporal del contenido de arcillas en la Laguna de Términos.

Durante la época de nortes predominaron las arenas con un promedio de 48%, seguido por los limos con un 27% y las arcillas con 25% (Fig. 18).

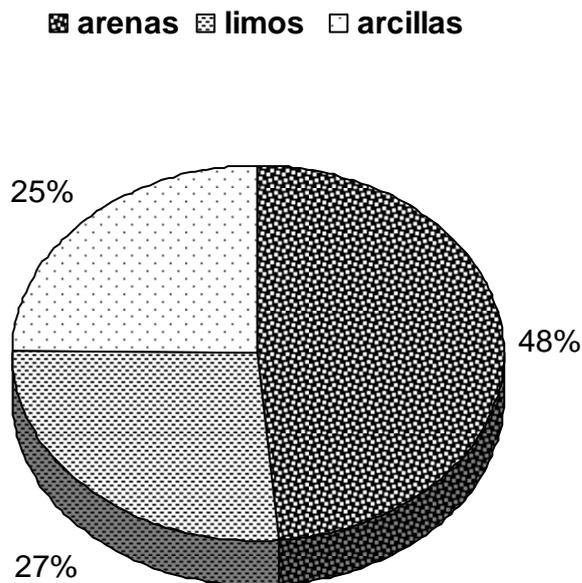


Figura 18. Porcentaje de arenas, limos y arcillas en los sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes

En la figura 19 se muestra la proporción de los diferentes tipos de sedimentos en las estaciones de muestreo durante la época de nortes. Las arenas presentaron un intervalo de 16.1% a 87.2% en la E15 (Estero Atasta) y E1 (Gasolinera Puerto Isla del Carmen) respectivamente. Los limos variaron de 59% en la E3 (Entre Boca del Carmen y Sistema Atasta) a 3.2 % en la E1; mientras que las arcillas tuvieron de 49% en Estero Pargo (E5) y a 9.5% en la E1.

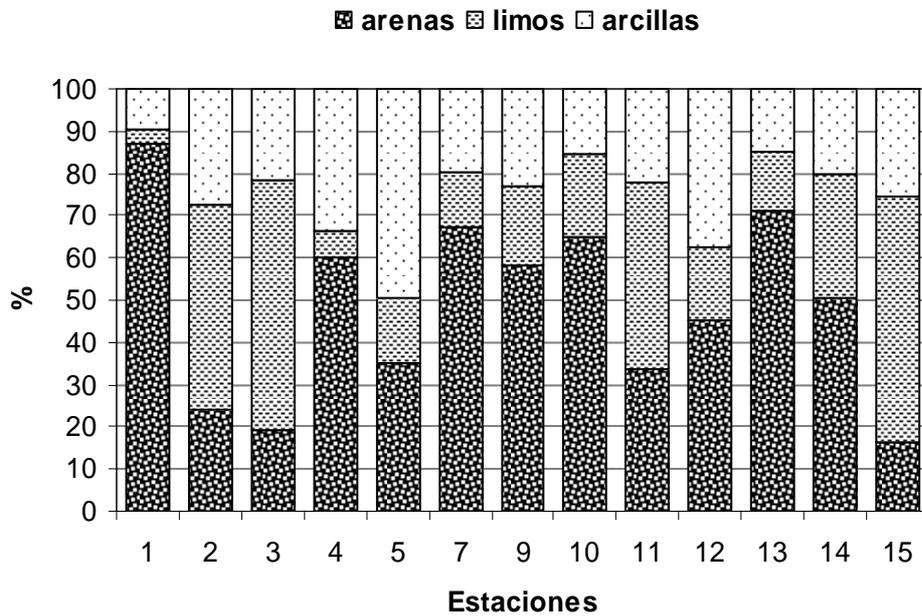


Figura 19. Distribución espacial y porcentaje de arenas, limos y arcillas en los sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes

La mayoría de las localidades de muestreo tuvieron una composición arenosa con excepción de la E2 (Boca del Carmen), la E3 (Entre Boca del Carmen y Sistema Atasta), E11 (Influencia Río Candelaria) y E15 (Estero Atasta) en las cuales predominaron los limos. Finalmente la E5 (Estero Pargo) tuvo una composición predominantemente arcillosa. Cabe mencionar que la E2 a pesar de estar ubicada en la Boca del Carmen, un área de alta energía en la cual deberían abundar las arenas, dominaron los limos tal vez debido a la influencia del río Palizada el cual aporta gran cantidad de limos y arcillas en el extremo suroeste y en conjunto con el sistema Atasta, son dos de los cuatro aportes de agua dulce más importantes hacia la

laguna. Lo anterior puede corroborarse ya que durante nortes se registraron condiciones mesohalinas en el área de la Boca del Carmen mientras que el análisis de Pearson mostró una correlación significativa e inversamente proporcional entre los limos y las arenas ($r=-0.86$, $p=0.00$), así como entre los limos y la salinidad ($r=-0.76$ y $p=0.002$).

En cuanto a la época de secas también predominaron las arenas con un promedio de 63 % seguido por los limos con 20 % y por último las arcillas con 17 % (Fig. 20).

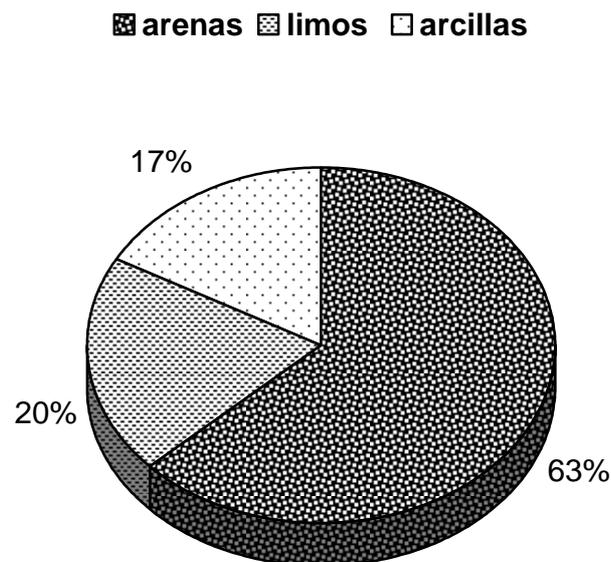


Figura 20. Porcentaje de arenas, limos y arcillas en los sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de secas.

En la figura 21 se aprecia la composición de los sedimentos en las estaciones de muestreo durante la época de secas. Las arenas oscilaron de 30.5% en la E1 (Gasolinera Puerto Isla del Carmen) hasta 88.8% en la E9 (Boca de Puerto Real Este). En cuanto a los limos, en la E9 no hubo presencia de éstos mientras que en la E1 se registró la mayor cantidad con 51.7%, lo anterior corrobora la relación inversa obtenida entre los limos y las arenas durante este muestreo ($r=-0.97$, $p=0.00$). Finalmente, las arcillas tuvieron menor porcentaje (11.1%) en la E9 y el mayor en la E11 (Influencia del Río Candelaria) con el 26.6%.

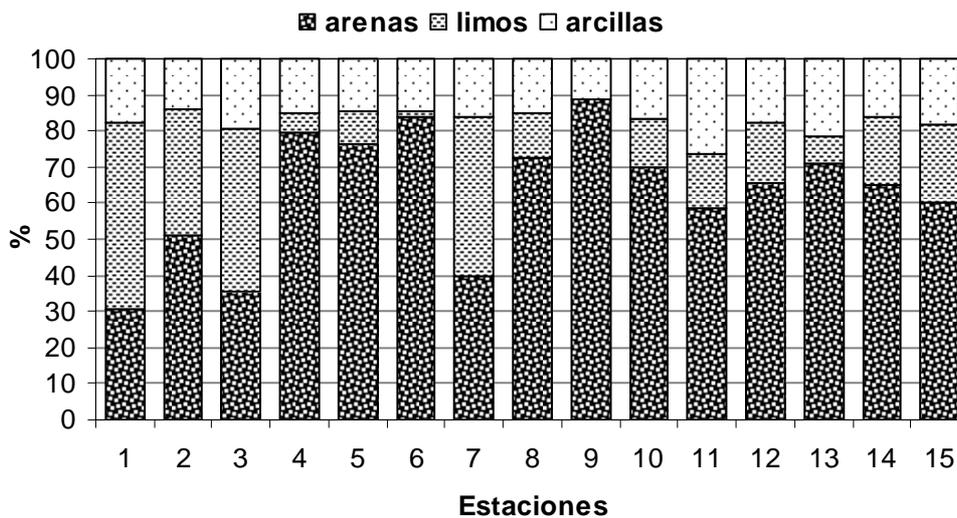


Figura 21. Distribución espacial y porcentaje de arenas, limos y arcillas en la Laguna de Términos durante la época de secas.

En la época de lluvias también predominaron las arenas. En la figura 22 se muestra que estas ocuparon un promedio del 60%, mientras que las arcillas un 24 % y por último los limos con 16 %.

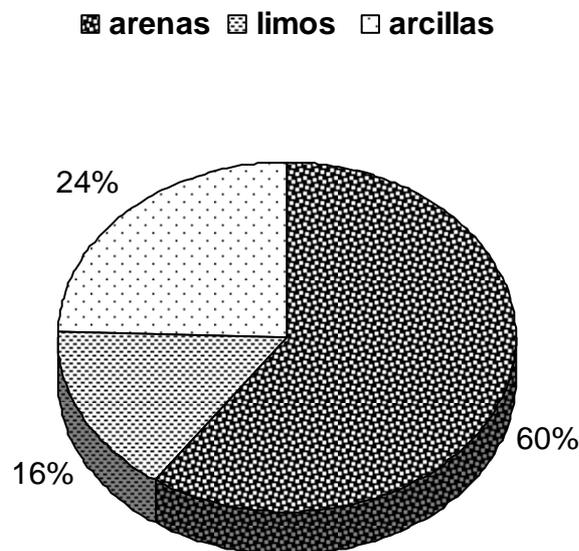


Figura 22. Porcentaje de arenas, limos y arcillas en la Laguna de Términos durante la época de lluvias.

Las arenas presentaron un intervalo de 0.8 en la E15 (Estero Atasta) a 93% en la E4 (El Rastro). Otros porcentajes altos de arena se presentaron en la Gasolinera Puerto Isla del Carmen, en Estero Pargo y en la Boca de Puerto Real (E1, E5 y E9). Los limos fueron abundantes en la E15 con 95.5% mientras que en la E9 y la E11 no hubo presencia de éstos.

Al igual que en los otros muestreos, durante esta época climática se encontró una relación inversa entre las arenas y los limos ($r=-0.75$, $p=0.00$).

Por último las arcillas tuvieron un intervalo desde 2% tanto en la E4 (El Rastro) como en la E5 (Estero Pargo) hasta 56.3 % en el centro oeste (E12) (Fig. 23).

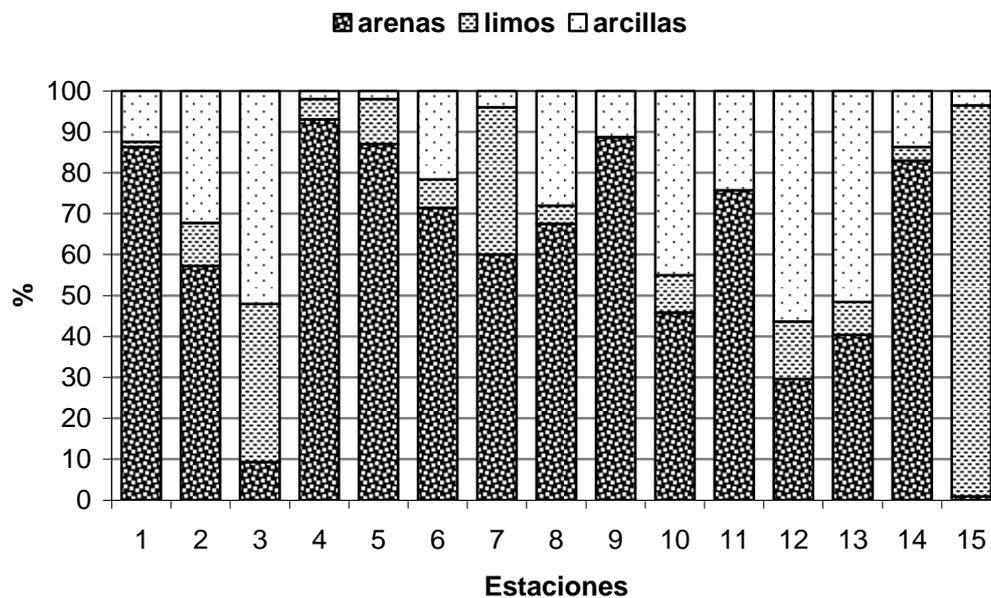


Figura 23. Distribución espacial y porcentaje de arenas, limos y arcillas en los sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.

El análisis granulométrico mostró que en el sistema lagunar el componente principal son las arenas, presentándose los mayores porcentajes en las bocas de comunicación con el mar así como en zonas cercanas a éstas o con mayor influencia marina, lo anterior se corrobora con lo reportado por Flemming (2000) quien mencionó que los sedimentos arenosos indican depositación bajo condiciones de alta energía. Así mismo, Calva y Torres (2011a) en la Laguna de Términos encontraron altos porcentajes de arena en zonas cercanas a la Boca de Puerto Real, lo anterior es consistente con los resultados obtenidos en este estudio. Respecto a la fracción fina, los limos tuvieron 21% en promedio, mientras que las arcillas un 22% estos sedimentos estuvieron asociados a aportes fluviales o bien a zonas protegidas, someras en la cuales se depositan bajo condiciones de baja energía.

Carbono orgánico en sedimentos.

La materia orgánica en los estuarios y lagunas costeras proviene de fuentes autóctonas y alóctonas (Eatherall *et al.*, 1998). Las primeras incluyen el fitoplancton, fitobentos, bacterias, macroalgas, pastos, marismas, detritus de manglares y excreciones y restos de animales (peces, crustáceos, moluscos, entre otros) (Flores *et al.*, 1990); las fuentes alóctonas incluyen el material continental erosionado y lixiviado, los aportes antropogénicos como las descargas industriales y municipales que llegan a los ambientes litorales principalmente a través de los ríos y drenajes (Preston y Prodduturu, 1992). Y su caracterización química a involucrado la evaluación del CO el cual representa una fracción de ésta (Libes, 1992). La determinación de CO en sedimentos ha sido utilizada como indicador de contaminación ya que sus niveles son proporcionales a los de la materia orgánica, la cual tiene afinidad por metales traza y compuestos orgánicos (EPA, 2002).

Los sedimentos con alto contenido de CO se caracterizan por aportes alóctonos, mientras que los sedimentos con porcentajes bajos de CO son atribuidos a fuentes autóctonas. (Stephen *et al.*, 2008).

El exceso de CO en los sedimentos es interpretado como el incremento de aportes orgánicos provenientes de las actividades humanas, por lo anterior la EPA (2002) utiliza las siguientes categorías de evaluación de impacto antropogénico de acuerdo al contenido de CO en los sedimentos: bajo impacto (1%), impacto intermedio (1-3%), alto impacto (>3%).

La variación temporal del CO en el sistema lagunar no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las diferentes épocas climáticas.

En nortes el CO promedio fue de 1.15%(0.2%-2.26%), en secas disminuyó a 0.91% (0.12-1.78) y en lluvias nuevamente aumentó a 1.15%(0.1-2.72) (Fig. 24).

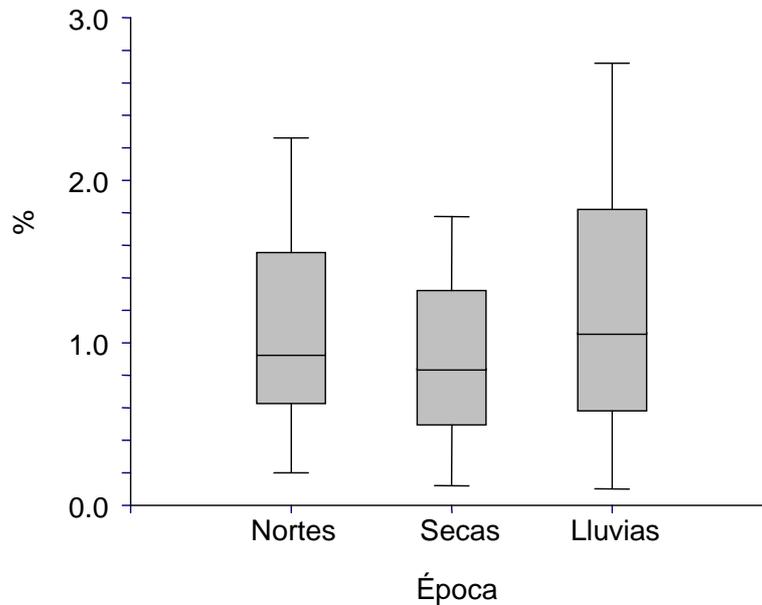


Figura 24. Variación del contenido de carbono orgánico en la Laguna de Términos.

En la figura 25 se muestra la distribución espacial del CO en las diferentes épocas climáticas estudiadas. Así, el CO promedio en la época de nortes fue 1.15% con intervalo de 0.2% en la E4 (El Rastro) a 2.26% en la E5 (Estero Pargo), en esta última localidad existen productores primarios como *Thalassia testudinum* y *Rizophora mangle*, lo cual de acuerdo con Gutiérrez *et al.* (2000) los valores altos de CO en las zonas estuarinas se asocian con el aporte de materia orgánica derivada de la presencia de pastos marinos y manglar; aunado a lo anterior, en dicha localidad se encontraron sedimentos finos en los que se incrementa la capacidad de adsorción debido al aumento del área superficial de las partículas (Pope *et al.*, 2000), además de ser una zona protegida, somera y con escasa circulación donde es más factible la

sedimentación del CO. Asimismo, se consideró la posible entrada de material orgánico alóctono a través de los sistemas fluviales ya que se observó la presencia de lirio acuático desde la desembocadura del río Palizada hasta la boca de Atasta que según Calva y Torres (2011b) esta planta además es un indicador de contaminación por descargas de aguas residuales. Aunado al hecho de que el Palizada es uno de los ríos más importantes ya que su aporte de agua dulce a la laguna de Términos representa el 70% del total que ingresa (Pronatura, 2005).

En lo referente a la época de secas se registró un promedio de 0.91% con intervalo de 0.12% en la E6 (Cerca a Isla Cayo) y 1.78 en la E1 (Gasolinera Puerto Isla del Carmen), la mayor cantidad de CO en esta localidad pudo deberse a la dominancia de sedimentos limosos durante esta época climática a pesar de tratarse de una zona marina donde normalmente abundan las arenas. El análisis de Pearson mostró una correlación positiva entre el CO y los limos ($r=0.49$ y $p=0.05$) y una relación negativa con las arenas ($r=-0.52$, $p=0.04$) lo que de acuerdo con Al-Ghadban (1990) corrobora en este caso la afinidad del CO con los sedimentos finos.

Finalmente en la época de lluvias el CO promedio fue 1.15% y el intervalo varió de 0.1% en la E9 (Boca de Puerto Real Este) a 2.72% en la E15 (Estero Atasta) esta última se localiza en la desembocadura del sistema fluviolagunar Pom-Atasta, un sitio con presencia de manglar el cual representa aporte de material orgánico aunado a la abundancia de los limos (95.56 %) facilitando la adsorción de CO. Lo anterior se corroboró con la correlación positiva entre el CO y los limos ($r=0.67$ y $p=0.01$) durante esta época climática.

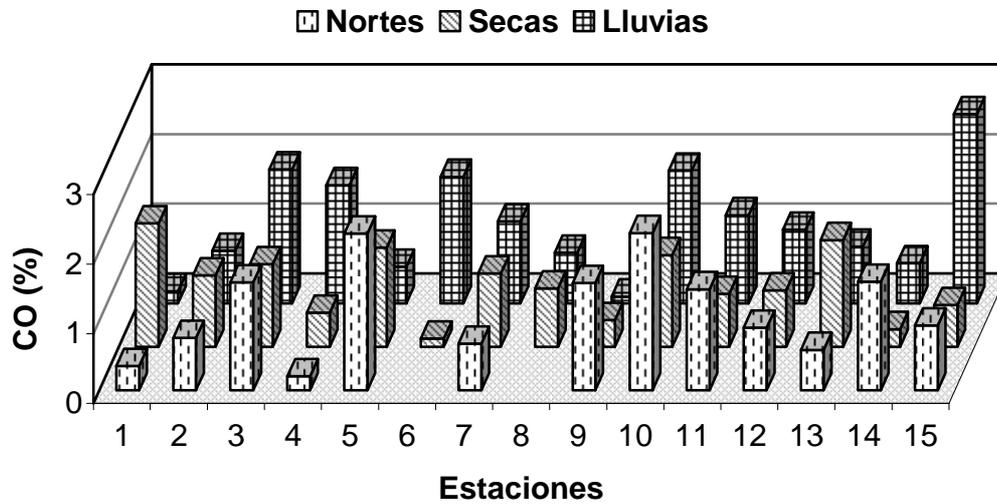


Figura 25. Distribución espacial de carbono orgánico en los sedimentos de la Laguna de Términos.

En general, los resultados en este estudio coinciden con lo reportado por Calva y Torres (2011b) respecto a que las localidades con mayor contenido de CO en la laguna de Términos se ubican principalmente en zonas protegidas, someras y de escasa circulación, con presencia de pastos marinos y/o manglar en donde abundan los sedimentos finos. Lo anterior es consistente con lo reportado por Stephen *et al.* (2008) quienes mencionan que el CO de fuentes autóctonas se encuentra en mayor cantidad en los sedimentos finos.

Basado en las categorías de evaluación de impacto antropogénico de CO en sedimentos de la EPA (2002), los porcentajes de CO observados en laguna de Términos indican bajo impacto antropogénico, por lo tanto se considera que la fuente principal de CO en la laguna deriva de los productores primarios como pastos

marinos, manglar y fitoplancton. Sin embargo, no deben descartarse aportes alóctonos a través de los sistemas fluviales especialmente del río Palizada o de efluentes industriales y municipales de Ciudad del Carmen.

A continuación en la tabla 8 se muestra el contenido de CO promedio registrado en distintas lagunas del Golfo de México (Calva *et al.*, 2006), de las cuales La Mancha (Ver.) tuvo el mayor (3.93%), mientras que para la Laguna de Pueblo Viejo (Tamps.) se determinó el valor mínimo con 1.04%. Respecto a la Laguna de Términos, durante este estudio se obtuvo un promedio de 1.08%, siendo uno de los cuerpos lagunares con menor porcentaje de CO del Golfo de México. Lo anterior coincide con lo reportado por Calva y Torres (2011a) quienes mencionan que la Laguna de Términos tiene bajos porcentajes de CO al encontrar una concentración promedio de 0.77% en áreas con pastos marinos. Aunado a lo anterior, Grenz *et al.* (2010) mencionan que en la Laguna de Términos se hallan bajos porcentajes de CO probablemente por la presencia de una mayor cantidad de sedimentos arenosos, los cuales no son adsorbentes óptimos de materia orgánica; además de que es un sistema sujeto a una mayor influencia de los movimientos de agua tanto de entrada como de salida del sistema.

Tabla 8. Carbono orgánico promedio en algunas lagunas costeras del Golfo de México.

Sistema lagunar	CO %	Referencia
Pueblo Viejo, Tamps.	1.04	Botello y Calva (1998)
Tamiahua, Ver.	1.28	Botello y Calva (1998)
Tampamachoco, Ver.	1.62	Botello y Calva (1998)
Salada, Ver.	1.68	Botello <i>et al.</i> (2001)
El Llano, Ver.	1.70	Botello <i>et al.</i> (2001)
La Mancha, Ver.	3.93	Botello <i>et al.</i> (2001)
Mandinga, Ver.	1.36	Botello <i>et al.</i> (2001)
Alvarado, Ver.	2.55	Botello <i>et al.</i> (1994)
Alvarado, Ver.	1.77	Calva y Torres (2011)
Sontecomapan, Ver.	1.50	Calva y Botello (1999)
La Grande-La Chica, Ver.	1.8	Méndez (2012)
Del Carmen, Tab.	1.27	Botello <i>et al.</i> (1994)
Machona, Tab.	1.16	Botello <i>et al.</i> (1994)
Términos, Camp.	1.08	Este estudio

Hidrocarburos aromáticos policíclicos totales

El análisis estadístico reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) en la concentración de HAP en los sedimentos entre las diferentes épocas climáticas (Fig.26).

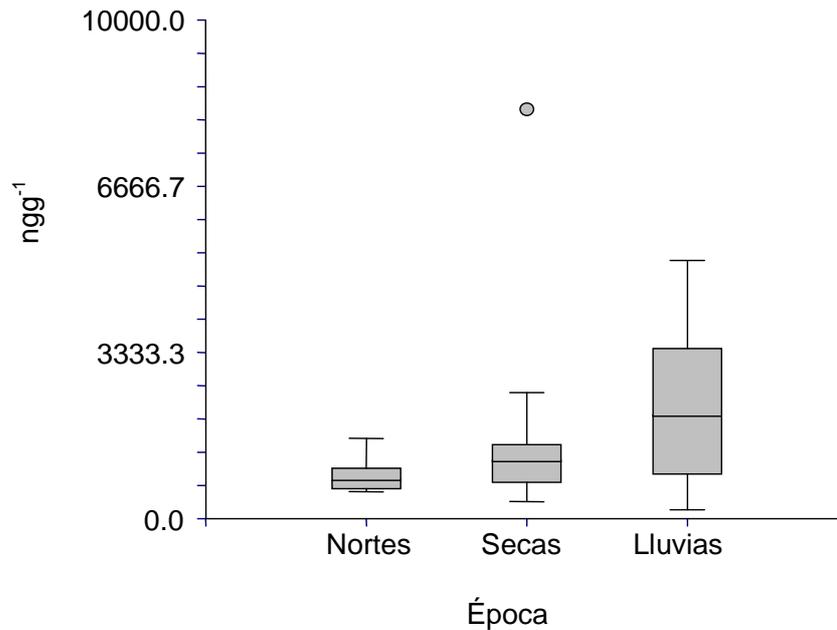


Figura 26. Variación temporal de la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos totales en sedimentos de la Laguna de Términos.

En la época de nortes, el promedio de HAP totales fue 851.54 ngg^{-1} , con un intervalo de variación de 543.03 ngg^{-1} en la E10 (Centro Este) a 1610 ngg^{-1} en la E15 (Estero Atasta). Otros áreas con concentraciones altas de HAP ($>1000 \text{ ngg}^{-1}$) fueron la desembocadura del río Palizada (E14) y la Boca del Carmen (E2). Lo anterior reveló el mayor grado de contaminación en la porción oeste de la laguna durante esta época climática (Fig. 27).

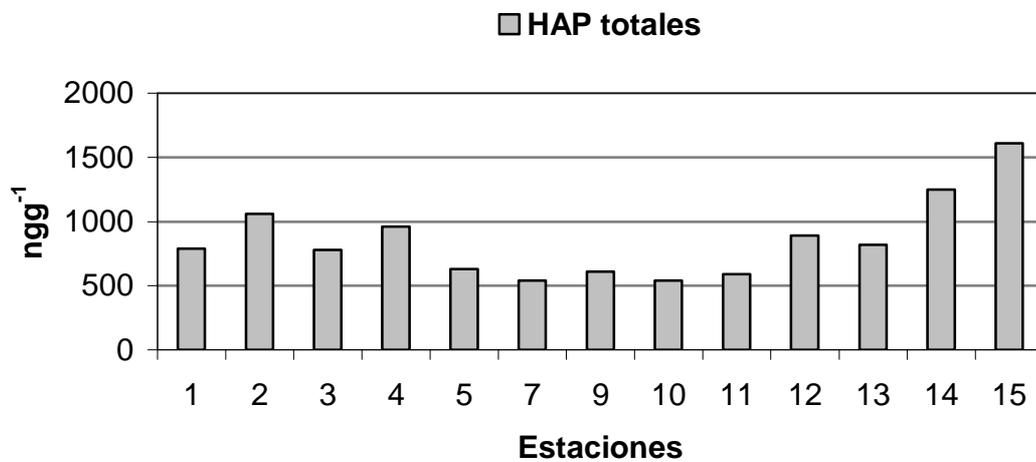


Figura 27. Niveles de HAP totales y su variación espacial en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes.

En lo referente a la época de secas el promedio de HAP totales fue 1608.67 ngg^{-1} con un mínimo de 340 ngg^{-1} en la E11 (Influencia Río Candelaria) y el máximo de 8210 ngg^{-1} en la E13 (Desembocadura del Río Chumpán). Otras localidades con niveles elevados ($>1000 \text{ ngg}^{-1}$) fueron la E2 (Boca del Carmen), la E6 (Cerca a Isla Cayo), E5 (Estero Pargo), la E12 (Centro Oeste), E1 (Gasolinera Puerto Isla del Carmen) y E4 (El Rastro) también ubicadas en el área oeste de la laguna, mientras que en la porción este tuvieron niveles elevados la E10 (Centro Este) y la E8 (Punta San Julián), lo cual una vez más manifestó la predominancia de estos contaminantes en el área occidental del sistema lagunar (Fig. 28).

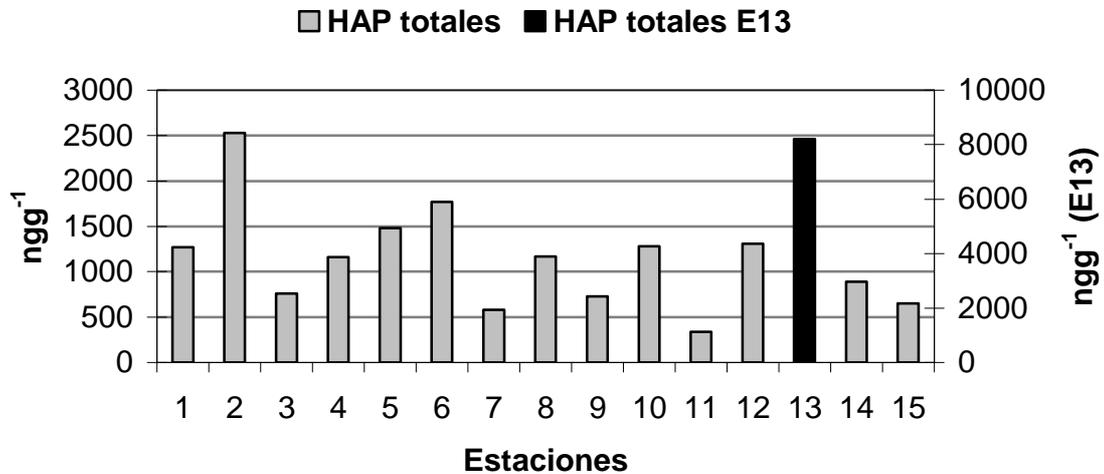


Figura 28. Niveles de HAP totales y su variación espacial en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de secas.

En lo correspondiente a la época de lluvias se detectaron los niveles más elevados de contaminación por HAP totales, tanto espacial como estacionalmente en comparación con las otras épocas climáticas estudiadas. El promedio de HAP totales fue 2185 ngg^{-1} con un intervalo de 180 ngg^{-1} en la E10 (Centro Este) a 5180 ngg^{-1} en la E6 (Cerca a Isla Cayo). También destacaron la E14 (Desembocadura del Río Palizada) con 5142 ngg^{-1} , la E5 (Estero Pargo), la E2 (Boca del Carmen), la E1 (Gasolinera Puerto Isla del Carmen), la E4 (El Rastro), la E15 (Estero Atasta) y la E3 (entre Boca del Carmen y Boca de Atasta) ubicadas en la zona oeste, mientras que en la porción este se distinguen la E8 (Punta San Julián), E9 (Boca de Puerto Real Este) y la E7 (Cerca a Isla Pájaros) (Fig. 29).

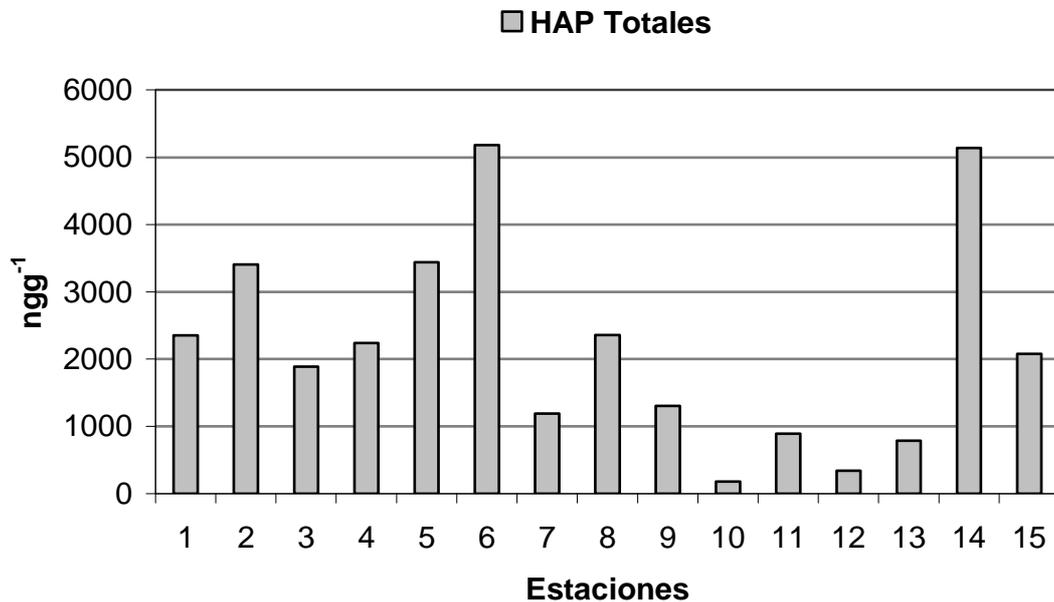


Figura 29. Niveles de HAP totales y su variación espacial en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.

Kim *et al.* (1999) señalaron que la concentración de HAP en los sedimentos de los ecosistemas acuáticos suele estar afectada por el contenido de CO y la cantidad de limos y arcillas. Posteriormente Yang (2000) mencionó que los sedimentos con alto contenido de CO se caracterizan por valores elevados de HAP.

Sin embargo, durante la época de nortes la prueba de Pearson no mostró correlación entre la concentración de HAP con los sedimentos finos ni con el CO.

Al realizar la misma prueba para la época de secas y para la época de lluvias tampoco se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre la concentración de HAP con el tipo de sedimento ni con el porcentaje de CO. Estos resultados contradicen la teoría de la adsorción. Algunos trabajos similares respecto

a la falta de afinidad entre los HAP y el contenido de CO en ecosistemas estuarinos son los reportados por Calva y Botello (1999). Tam (2001), Pietzsch *et al.* (2010) y Arias *et al.* (2010), mientras que en sistemas marinos se citan Al-Ghadban *et al.* (1994) y Kamal *et al.* (2007).

Tam *et al.* (2001) señalaron que la falta de afinidad entre el CO y los HAP indica que la concentración y la distribución de estos contaminantes están determinadas más por la aportación directa, en lugar que por el tipo de sedimento. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos en el presente trabajo, ya que la Laguna de Términos tiene sedimentos predominantemente arenosos, bajo contenido de CO y concentraciones elevadas de HAP, lo que revela la entrada directa de dichos contaminantes.

Los niveles de HAP encontrados en la Laguna de Términos evidencian la presencia de actividades antropogénicas, siendo la zona oeste del sistema lagunar la más afectada. Ponce y Botello (1991) encontraron un patrón similar en la distribución de metales pesados en esta misma laguna y mencionan que la presencia de dichos compuestos se asocian a las actividades humanas predominantes en la porción oeste como son el tráfico intenso de lanchas, la pesca, las descargas urbanas y agrícolas, así como las maniobras petroleras; además de la importancia de las descargas fluviales como fuente de aporte de contaminantes. Aunado a lo anterior, Paez-Osuna (1987) menciona que el aporte de material suspendido del Río Palizada hacia la laguna es del 98.6% con respecto a los demás ríos que drenan en ella.

En relación a lo anterior cabe mencionar que durante la temporada de nortes el análisis de Pearson mostró una relación inversa y significativa ($r=-0.74$ y $p<0.05$) entre los HAP y la salinidad lo cual reitera la importancia de los aportes fluviales en esta época climática. Las contribuciones más notables podrían atribuirse a las descargas fluviales provenientes del sistema Atasta y del río Palizada, ya que cerca de las desembocaduras de ambos se encontraron los niveles más elevados de contaminantes durante esta época climática.

En lo referente a la temporada de secas, no se encontró relación significativa entre la concentración de HAP con la salinidad como tampoco la hubo durante la época de lluvias. Sin embargo, en esta última se identificó una relación inversa entre los HAP y la profundidad ($r=-0.70$, $p=0.01$), lo anterior podría deberse a que durante la época de lluvias se registró la menor profundidad promedio en el sistema lagunar debido al déficit de precipitaciones en el área de estudio durante el 2009, lo cual permitió que los HAP se precipitaran, adsorbieran y se acumularan con mayor rapidez en lugares poco profundos, los cuales en su mayoría fueron arenosos ya que también se determinó una relación inversa entre la profundidad y las arenas ($r=0.64$, $p=0.02$), lo que nuevamente hace suponer que las altas concentraciones de HAP encontradas en la laguna pueden estar más relacionados al aporte directo de estos contaminantes que al tipo de sedimento.

NIVELES DE CONTAMINACIÓN POR HAP TOTALES EN LOS SEDIMENTOS DEL SISTEMA LAGUNAR

De acuerdo con Baumard *et al.* (1998) los niveles de contaminación por HAP totales se clasifican como: bajo (B) = 0-100 nng⁻¹, moderado (M) = >100-1000 nng⁻¹, Alto (A) = >1000-5000 nng⁻¹, muy alto (MA) = > 5000 nng⁻¹.

Con base en lo anterior, en la tabla 9 se exponen los niveles de HAP registrados durante el presente estudio.

Tabla 9. Niveles de contaminación por HAP de acuerdo con Baumard *et al.* (1998) en sedimentos de la Laguna de Términos.

Estación	Nortes	Secas	LLuvias	Promedio
1	M	A	A	A
2	A	A	A	A
3	M	M	A	A
4	M	A	A	A
5	M	A	A	A
6	N.C.	A	MA	A
7	M	M	A	M
8	N.C.	A	A	A
9	M	M	A	M
10	M	A	M	M
11	M	M	M	M
12	M	A	M	M
13	M	MA	M	A
14	A	M	MA	A
15	A	M	A	A

*N.C.=no calculado(sin datos) M=moderado A=alto MA=muy alto

La Laguna de Términos presentó niveles de contaminación moderados en la zona este y altos en la zona oeste; mientras que la concentración promedio para el sistema lagunar (1581 ngg⁻¹) indicó un grado de contaminación alto. De acuerdo con Long *et al.* (1995) la cantidad de HAP determinada durante este estudio es

característica de zonas con impacto antrópico con probables procesos de introducción crónica de estos contaminantes. Aunado a lo anterior, Gold *et al.* (2007) compararon la concentración de HAP en el ostión *Crassostrea virginica* durante noviembre de 2002 con los niveles obtenidos por Noreña *et al.* (1999) en esa misma especie y mencionan que la similitud en las concentraciones indica la entrada constante de estos contaminantes hacia la Laguna de Términos.

En comparación con otros sistemas costeros del mundo y de México (Tabla 9) la concentración promedio de HAP en la Laguna de Términos fue menor que aquellas encontradas en áreas costeras como Puerto Victoria (Hong Kong), Puerto Barcelona (España), Puerto Nápoles (Italia), Bahía Casco y Bahía de San Francisco (EUA) las cuales son áreas que reciben gran cantidad de contaminantes por actividades urbanas e industriales (Xiao *et al.*, 2008). Asimismo el nivel promedio es comparable con el estuario de Bahía Blanca, Argentina en el cual ha habido un rápido proceso de urbanización e industrialización (Arias *et al.*, 2010); sin embargo, presenta una concentración mayor que el El Río Perla y el Estuario Río Perla en China (Xiao *et al.*, 2008), así como la Bahía Guaratuba en Brasil (Pietzsch *et al.*, 2010).

En lo correspondiente a otras lagunas del Golfo de México, cabe señalar que para la Laguna de Sontecomapan en Veracruz se ha reportado el nivel promedio más alto con 11700 ngg⁻¹ seguida de las lagunas Salada y La Mancha de la misma entidad, ambas con un promedio de 6700 ngg⁻¹, posteriormente la Laguna Mandinga (5700 ngg⁻¹), Laguna El Llano (5000 ngg⁻¹), Laguna Tampamachoco (4500 ngg⁻¹), Laguna Pueblo Viejo (3700 ngg⁻¹) y Laguna Tamiahua (3400 ngg⁻¹). En el estado de Tabasco se presenta una disminución en la concentración de HAP con 2890 ngg⁻¹ en la

Laguna Mecoacán y 2840 ngg^{-1} en la Laguna Carmen-Machona. Por otra parte, el promedio de HAP totales en la Laguna de Términos durante este estudio (1581 ngg^{-1}) fue ligeramente mayor que el reportado para el Sistema Lagunar La Grande-La Chica, Ver. (1250 ngg^{-1}), siendo estos dos sistemas los que presentan las menores concentraciones con respecto a otras lagunas con influencia antropogénica del Golfo de México (Tabla 10).

Tabla 10. HAP totales (ngg^{-1} peso seco) en sedimentos de diversos sistemas costeros del mundo y del Golfo de México.

Sistema	Promedio	Intervalo	Referencia
Puerto Victoria, Hong Kong	5277	700-26100	Hong <i>et al.</i> 1995
Bahía Kyenoggi, Korea	120	9.1-1400	Kim <i>et al.</i> 1999
Río Perla, China	1028	217-2680	Xiao <i>et al.</i> 2008
Estuario Río Perla, China	321	191-622	Xiao <i>et al.</i> 2008
Puerto Barcelona, España	5050	-	Baumard <i>et al.</i> 1998
Puerto Nápoles, Italia	3142	-	Sprovieri <i>et al.</i> 2007
Bahía Casco, EUA	2900	16-20748	Kennicut <i>et al.</i> 1994
Bahía de San Francisco, EUA	7457	2653-27680	Pereira <i>et al.</i> 1996
Bahía Guaratuba, Brasil	495	1.5-3130	Pietzsch <i>et al.</i> 2010
Estuario Bahía Blanca, Argen.	1500	15-10260	Arias <i>et al.</i> 2010
Golfo de México			
Laguna Pueblo Viejo, Ver.	3700	2050-5210	Botello y Calva, 1998
Laguna Tamiahua, Ver.	3400	580-8140	Botello y Calva, 1998
Laguna Tampamachoco, Ver.	4500	670-9390	Botello y Calva, 1998
Laguna Salada, Ver.	6700	1100-11600	Botello <i>et al.</i> 2001
Laguna El Llano, Ver.	5000	600-12400	Botello <i>et al.</i> 2001
Laguna La Mancha, Ver.	6700	3800-11300	Botello <i>et al.</i> 2001
Laguna Mandinga, Ver.	5700	2200-18200	Botello <i>et al.</i> 2001
Laguna Sontecomapan, Ver.	11700	<10-41500	Calva <i>et al.</i> 2002
Sistema lagunar La Grande-La Chica, Ver.	1250	800-1800	Méndez, 2012
Laguna Carmen Machona, Tabs.	2840	10-1230	Botello <i>et al.</i> 1993
Laguna Mecoacán, Tabs.	2890	10-890	Botello <i>et al.</i> 1993
Laguna de Términos, Camp.	1581	180-8210	Este Estudio
Plataforma Continental			
Tamaulipas	4450	230-29560	Botello <i>et al.</i> 1993
Veracruz	3300	100-12400	Botello <i>et al.</i> 1993
Tabasco	1050	450-3120	Botello <i>et al.</i> 1993
Campeche	250	90-470	Botello <i>et al.</i> 1993

NIVELES DE HAP EN LOS SEDIMENTOS DEL SISTEMA LAGUNAR DE ACUERDO A SU PESO MOLECULAR

HAP individuales en los sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de Nortes.

Durante la época de nortes los mayores porcentajes de HAP individuales correspondieron a los compuestos con 4, 5 y 6 anillos aromáticos 16%, 54% y 14 % respectivamente. Los compuestos de bajo peso molecular (2-3 anillos bencénicos) representaron el 7% y 9% (Fig. 30).

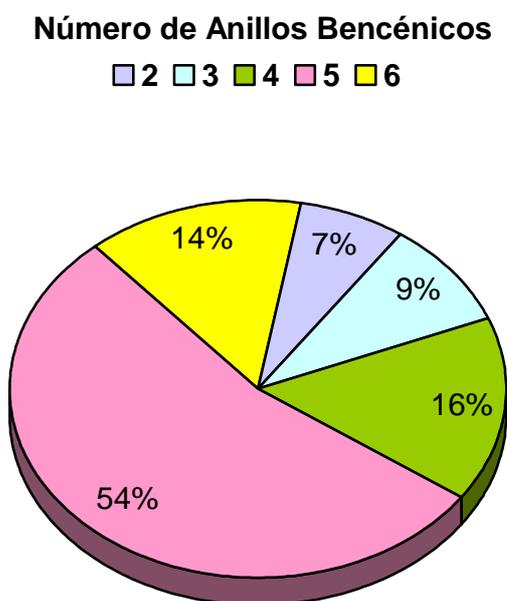


Figura 30. Porcentaje de HAP por anillos bencénicos en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes.

En la figura 31 se muestran los compuestos individuales que dominaron en los sedimentos superficiales de la laguna de Términos durante esta época climática, se encontraron en orden decreciente: Benzo(a)pireno (25%) > Indeno(1,2,3-cd)pireno (15%) > Benzo(ghi)perileno(14%) > Dibenzo(a,h)antraceno (13%).

■ Naf ■ Aci ■ Ace ■ Flu ■ Fen ■ Ant ■ Fln ■ Pir
■ B(a)A ■ B(b)F ■ Cris ■ B(k)F ■ B(a)P ■ InP ■ DbA ■ BghiP

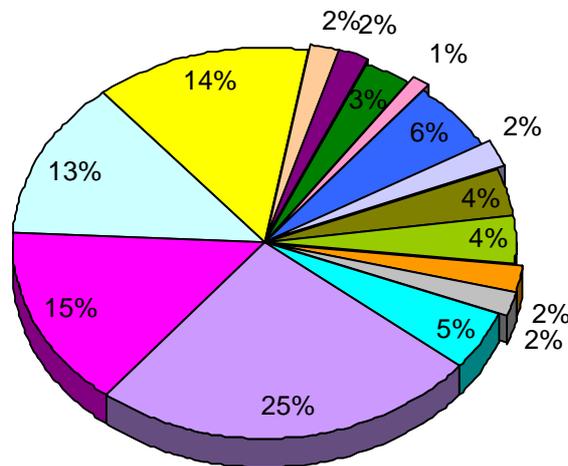


Figura 31. Porcentaje de los 16 HAP individuales en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes.

HAP individuales en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de secas.

En la temporada de secas los HAP más abundantes fueron los conformados por 4, 5 y 6 anillos bencénicos con 17%, 28% y 44% respectivamente, mientras que los compuestos de peso molecular bajo (2 y 3 anillos) contribuyeron con el 6% y 5% (Fig. 32).

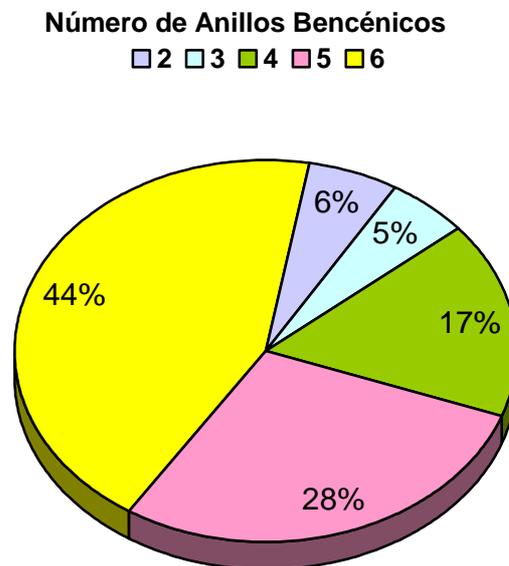


Figura 32. Porcentaje de HAP por anillos bencénicos en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época secas.

En relación al porcentaje de cada HAP durante esta época climática, en la Figura 33 se ilustra que el Benzo(ghi)perileno fue el más abundante con un porcentaje de 47%, después el Benzo(a)pireno (13%), luego el Benzo(a)antraceno (9%), seguido del Indeno(1,2,3-cd)pireno (8%).

■ Naf ■ Aci ■ Ace ■ Flu ■ Fen ■ Ant ■ Fln ■ Pir ■ B(a)A
■ B(b)F ■ Cris ■ B(k)F ■ B(a)P ■ InP ■ DbA ■ BghiP

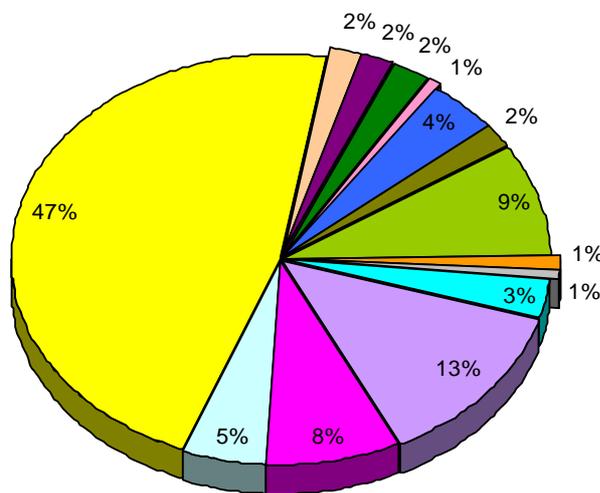


Figura 33. Porcentaje de los 16 HAP individuales en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de secas.

HAP individuales en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.

La época de lluvias también se caracterizó por la dominancia de HAP de 4, 5 y 6 anillos bencénicos con valores de 42%, 31% y 10% respectivamente (Fig. 34).

Número de Anillos Bencénicos
■ 2 ■ 3 ■ 4 ■ 5 ■ 6

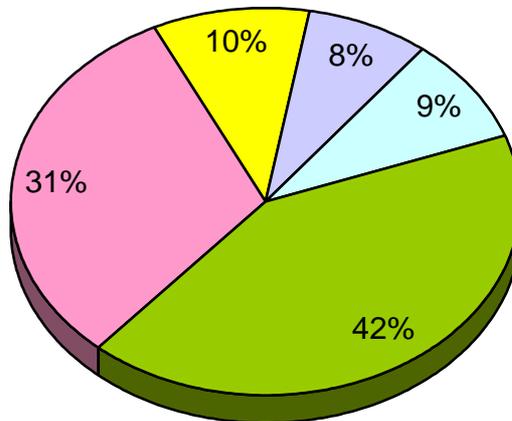


Figura 34. Porcentaje de HAP por anillos bencénicos en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.

Durante esta época climática hubo mayor heterogeneidad entre los contaminantes individuales. Los compuestos más abundantes en orden decreciente fueron: Criseno (19%)> Dibenzo(a,h)antraceno (15%)> Benzo(ghi)perileno (10%)> Indeno(123-cd)pireno (9%) y Benzo(a)antraceno(9%) (Fig. 35).

■ Naf ■ Aci ■ Ace ■ Flu ■ Fen ■ Ant ■ Fln ■ Pir ■ B(a)A
■ B(b)F ■ Cris ■ B(k)F ■ B(a)P ■ InP ■ DbA ■ BghiP

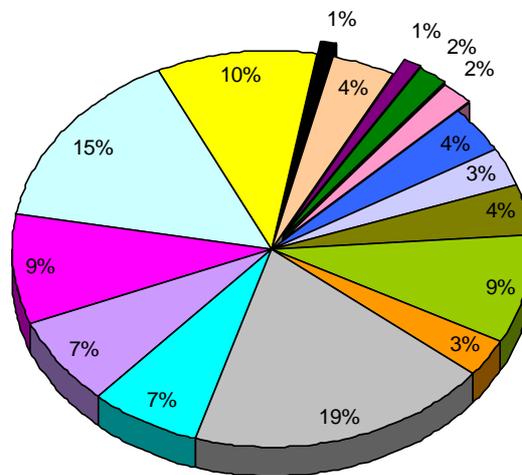


Figura 35. Porcentaje de los 16 HAP en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.

En la figura 36 se presentan los niveles de HAP individuales y su variación temporal. En general los compuestos tuvieron menor concentración durante la época de nortes; aumentaron en la época de secas y finalmente presentaron los niveles más elevados durante la época de lluvias, a excepción del Fenantreno, Benzo(a)antraceno, el Benzo(a)pireno y el Benzo(ghi)perileno los cuales predominaron en la temporada de secas.

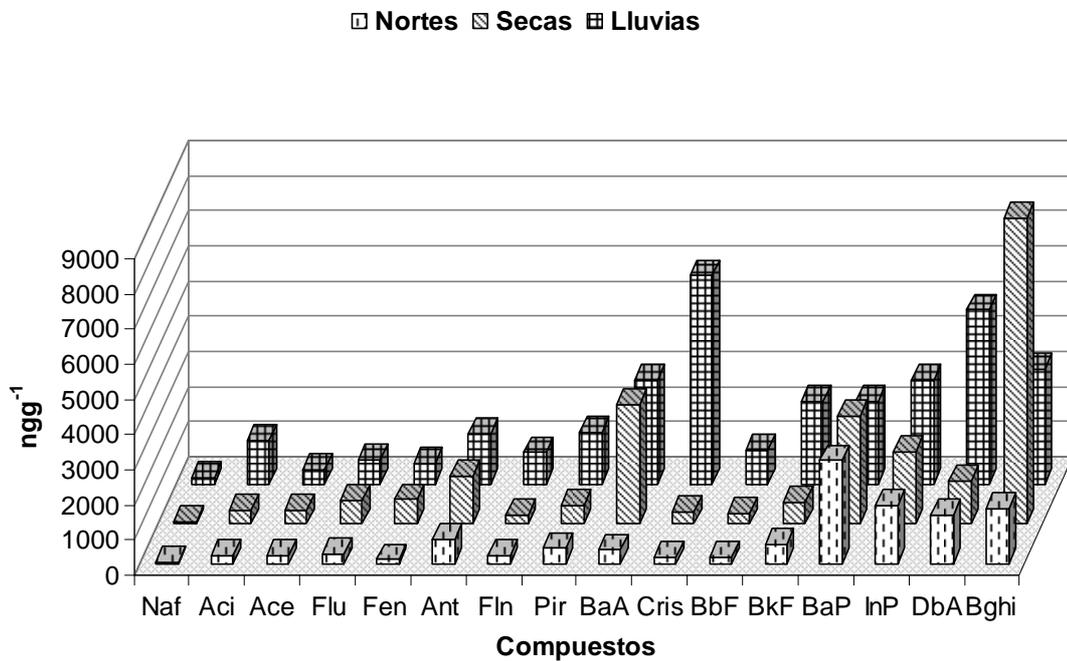


Figura 36. Niveles de HAP individuales (ngg⁻¹) y su variación temporal en las diferentes épocas climáticas.

En lo referente a la concentración promedio de HAP individuales en el sistema lagunar los compuestos más abundantes fueron en orden decreciente:

Benzo(ghi)perileno > Benzo(a)pireno > Dibenzo(a,h)antraceno > Benzo(a)antraceno > Indeno(1,2,3-cd)pireno > Criseno (Fig. 37).

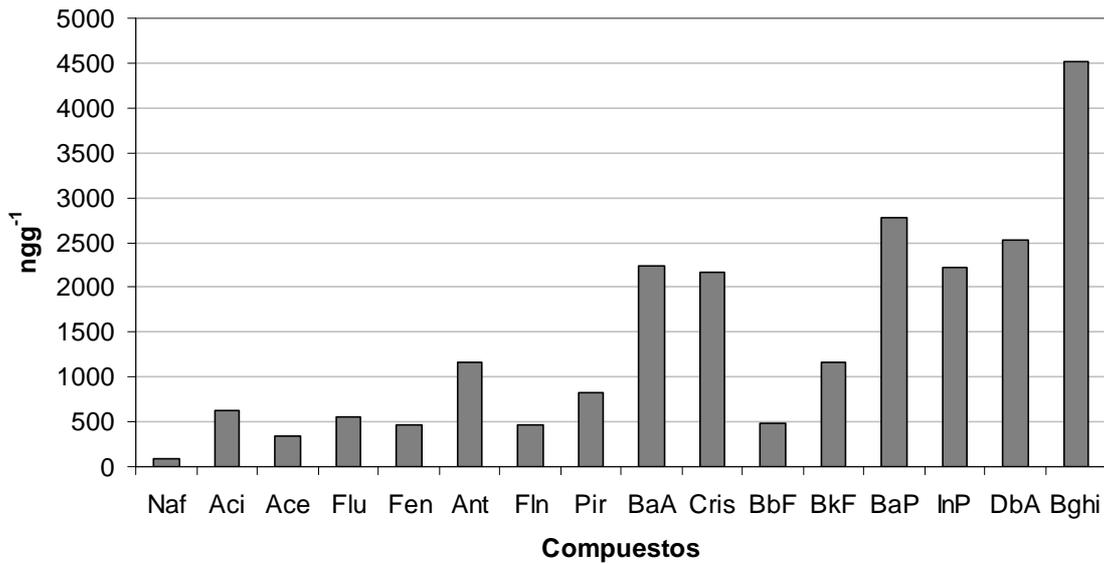


Figura 37. Concentración promedio de los HAP individuales en los sedimentos de la Laguna de Términos.

La dominancia de estos compuestos de alto peso molecular en los sedimentos, indica que el área se encuentra afectada por actividades humanas, especialmente por procesos pirolíticos. Lo anterior es consistente con lo expuesto por Anyakora *et al.* (2005) quienes señalan que las actividades humanas son la mayor fuente de HAP en ecosistemas acuáticos, siendo los estuarios y las áreas costeras los que presentan mayor grado de contaminación.

De acuerdo con Sanders *et al.* (2002) los HAP de 4 a 6 anillos bencénicos provienen principalmente de fuentes pirolíticas como la combustión de madera y de combustibles fósiles, emisiones vehiculares e incendios forestales.

Para el caso particular de los HAP más abundantes durante las diferentes épocas climáticas; el Benzo(a)pireno y el Dibenzo(a,h)antraceno son compuestos que se derivan de la combustión de combustible fósil llegando al ambiente mediante emisiones vehiculares (Xiao *et al.*, 2008; Dickhut *et al.*, 2000), el Indeno(1,2,3-cd)pireno también es característico de emisiones vehiculares, así como de la quema de carbón (Dickhut *et al.*, 2000), el Benzo(ghi)perileno es un HAP típico generado por la combustión de petróleo (Zhang *et al.*, 1993).

El Benzo(a)antraceno y el Criseno se originan por la combustión de carbón (Wang-Li *et al.* 2010), sin embargo este último también ha sido encontrado en el petróleo crudo (Curtz y Rendón, 2007). Lo anterior coincide con lo reportado por Ponce y Botello (2005) quienes refieren que las fuentes de HAP presentes en los diversos ambientes marinos y costeros del Golfo de México son los procesos pirolíticos, originados por la combustión de combustibles fósiles a altas temperaturas.

La presencia de HAP en los ambientes marinos y costeros se asocia primordialmente a las actividades humanas. Los compuestos dominantes en los sedimentos de la Laguna de Términos fueron de origen pirolítico. Asimismo las mayores concentraciones de estos contaminantes se encontraron en la región oeste del sistema lagunar, lo cual es consistente con lo reportado por Ponce y Botello (1991)

quienes mencionan que en la región oeste de la Laguna de Términos predominan las actividades humanas como el tráfico intenso de lanchas, la pesca, las descargas urbanas y agrícolas, así como las maniobras petroleras. Aunado a ello, en dicha área se encuentra Ciudad del Carmen que es el centro de población más importante con 169,466 habitantes (INEGI, 2011 comunicación personal con Gabriel Quintero) y con presencia de diversas industrias (Carvalho *et al.*, 2009) así como infraestructura portuaria con la descarga de aguas residuales en zona de muelles y residuos industriales que afectan la calidad del agua en la Laguna de Términos (Gobierno del Estado de Campeche 2004). Además de que están aumentando los servicios relacionados con la expansión de Ciudad del Carmen (Bach *et al.*, 2005) aunado a que años atrás se construyeron puentes para conectar los dos extremos de la Isla del Carmen con tierra firme, lo cual provoca la afluencia de vehículos de diferente tipo que podrían aportar contaminantes a la laguna por vía atmosférica.

Por otro lado, las áreas usadas para la ganadería a lo largo del extremo sur de la laguna disminuyeron la cobertura de manglar para convertirlo en sitio de operaciones ganaderas y durante la última década surgieron actividades como la acuicultura y el turismo a pequeña escala (Bach *et al.*, 2005).

IDENTIFICACIÓN DEL ORIGEN DE LOS HAP

Las posibles fuentes petrogénicas o pirolíticas en sedimentos pueden determinarse por medio de índices calculados a partir de las proporciones de determinados HAP individuales (Zhang *et al.*, 2004).

Los índices utilizados durante este estudio para establecer el origen de los HAP en los sedimentos de la Laguna de Términos fueron:

- Bajo peso molecular/ Alto peso molecular (LMW/HMW)
- Fenantreno/Antraceno (Fen/Ant)
- Fluoranteno/Pireno (Fl/Pir)
- Criseno/Benzo(a)Antaceno (Cris/BaA)

Así mismo, para determinar las fuentes de HAP, para clasificar las localidades de muestreo y estimar la importancia de los HAP derivados de fuentes de combustión y petróleo se utilizaron las proporciones de diagnóstico:

- Fluoranteno/Fluoranteno + Pireno (Fl/Fl+Pir)
- Indeno(123-cd)Pireno/ Indeno(123-cd)Pireno+Benzo(ghi)Perileno (InP/InP+BgP)

Los índices citados anteriormente se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Índices moleculares para determinar el origen de los HAP en sedimentos de la Laguna de Términos.

Índice	Pirólítico	Petrogénico	Referencia
(LMW/HMW)	<1	>1	Soclo <i>et al.</i> 2000; Magi <i>et al.</i> 2002.
(Fen/Ant)	<10	>15	Soclo <i>et al.</i> 2000 Baumard <i>et al.</i> 1998
(FI/Pir)	>1	<1	Soclo <i>et al.</i> 2000 Baumard <i>et al.</i> 1998
(Cris/BaA)	<1	>1	Soclo <i>et al.</i> 2000
FI/(FI+Pir)	0.4-0.5 combustión de petróleo 0.5-0.65 combustión de biomasa y carbón	<0.4	Yunker <i>et al.</i> 2002 Bucheli <i>et al.</i> 2004
InP/(InP+BgP)	0.20-0.50 combustión de petróleo 0.5-0.61 combustión de biomasa y carbón	<0.20	Yunker <i>et al.</i> 2002 Bucheli <i>et al.</i> 2004

A continuación en la tabla 12 se presentan los valores obtenidos de los índices moleculares para determinar el origen de los HAP en las tres épocas climáticas estudiadas. Así durante la época de nortes, se determinó que en todas las estaciones de muestreo los índices LMW/HMW (<1), Fen/Ant (<10) denotaron un origen pirolítico, asimismo el índice (Cris/BaA) (<1) mostró la predominancia de compuestos pirolíticos excepto en la E5 (Estero Pargo), la cual se caracterizó por la abundancia de compuestos petrogénicos (>1). Por otra parte, la razón FI/Pir manifestó la presencia de compuestos petrogénicos en todas las localidades (Tabla 11). Lo anterior hace suponer que existe una mezcla de HAP tanto de tipo pirolítico como petrogénico, lo cual coincide con lo reportado por Xiao *et al.* (2008) quienes mencionan que dichos compuestos se encuentran juntos en el ambiente. Sin embargo, de acuerdo a los índices obtenidos y además al mayor porcentaje de HAP de alto peso molecular observado durante la época de nortes, se puede decir que existe predominancia de HAP de fuentes pirolíticas.

Tabla 12. Índices moleculares para sedimentos de la Laguna de Términos durante diferentes épocas climáticas.

Estación	LMW/HMW	Fen/Ant	NORTES			
			Fl/Pir	Cris/BaA	Fl/(Fl+Pir)	InP/(InP+BgP)
1	0.06	N.D.	0.72	0.86	0.42	0.51
2	0.22	0	0.29	0.20	0.23	0.67
3	0.07	0.26	0.70	0.05	0.41	0.56
4	0.10	0	0.72	0.13	0.42	0.58
5	0.07	0.06	0.04	4.81	0.04	0.57
6	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
7	0.58	0.32	0.76	0	0.43	0.42
8	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
9	0.16	0.19	0.25	0.12	0.20	0.55
10	0.22	0.91	0.63	0.10	0.39	0.55
11	0.07	0	0.11	0.28	0.10	0.47
12	0.55	0.09	0.54	0.10	0.35	0.62
13	0.09	0	0.11	0.18	0.10	0.31
14	0.08	0	0.14	0.21	0.12	0.35
15	0.19	0.17	0.84	0.26	0.46	0.63
Promedio	0.19	0.17	0.45	0.56	0.28	0.52

Estación	LMW/HMW	Fen/Ant	SECAS			
			Fl/Pir	Cris/BaA	Fl/(Fl+Pir)	InP/(InP+BgP)
1	0.21	0.79	0.46	0	0.32	0.40
2	0.96	0.80	2.19	0.20	0.69	1
3	0.25	0.03	0.21	0.34	0.18	0.62
4	0.06	0.54	0	N.D.	0.00	0.55
5	0.17	0.47	0	6.57	0	0.63
6	0.16	3.63	N.D.	0	N.D.	1.00
7	0.30	0.01	0.02	0	0.02	0.40
8	0.31	0.25	0.01	0	0.01	0.65
9	0.27	0.41	0.08	0	0.08	1.00
10	0.18	0.09	0	0.03	0.00	0.41
11	2.06	0.04	0.57	1.94	0.36	N.D.
12	0.06	0.34	0	0	0.00	0.40
13	0	N.D.	N.D.	0	N.D.	0.02
14	0.17	0	0.35	0.08	0.26	0.24
15	0.65	0	0.20	N.D.	0.17	0.91
Promedio	0.39	0.53	0.32	0.70	0.16	0.59

Continuación de tabla 12.

Estación	LMW/HMW	Fen/Ant	FI/Pir	LLUVIAS		
				Cris/BaA	FI/(FI+Pir)	InP/(InP+BgP)
1	0.27	0.79	0.71	0	0.42	N.D.
2	0.36	0.01	2.55	0	0.72	0.12
3	0.06	0.06	0.18	0	0.16	0.20
4	0.17	0.95	3.72	9.14	0.79	0.79
5	0.11	0.26	0.27	42.23	0.21	0.17
6	0.03	0	0.28	0.35	0.22	0.53
7	0.46	0.05	0.59	0	0.37	0.21
8	0.22	1.02	0.26	0	0.20	0.57
9	0.58	0.47	0.99	0.05	0.50	1
10	2.13	0.54	N.D.	0	N.D.	N.D.
11	0.20	0.32	N.D.	0	N.D.	N.D.
12	0.12	0	0.43	0.15	0.30	N.D.
13	0.39	1.14	0	0	0	N.D.
14	0.05	0.37	1.62	41.90	0.62	0.68
15	0.13	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1
Promedio	0.35	0.43	0.97	6.7	0.38	0.53

*N.C. = no calculado (sin datos) N.D.=no determinado (fuera de rango)

Para determinar las fuentes de HAP en el sistema lagunar se aplicó la proporción de diagnóstico ($FI/(FI+Pir)$ vs $lnP/ln(P+BgP)$).

En la figura 38 se muestra que durante la época de nortes, el petróleo y la combustión de éste fueron las fuentes más importantes en los ríos (E11, E13 y E14), mientras que en las E2, E5, E9, E10 y E12 hubo contribución de fuentes petrogénicas, así como fuentes pirolíticas debido a la combustión de biomasa y carbón. La E7 se caracterizó por la combustión de petróleo; y por último, en las localidades E1, E3, E4, E15 ubicadas de Boca del Carmen al Sistema Atasta las principales fuentes de HAP fueron la combustión tanto de petróleo, como de biomasa y carbón.

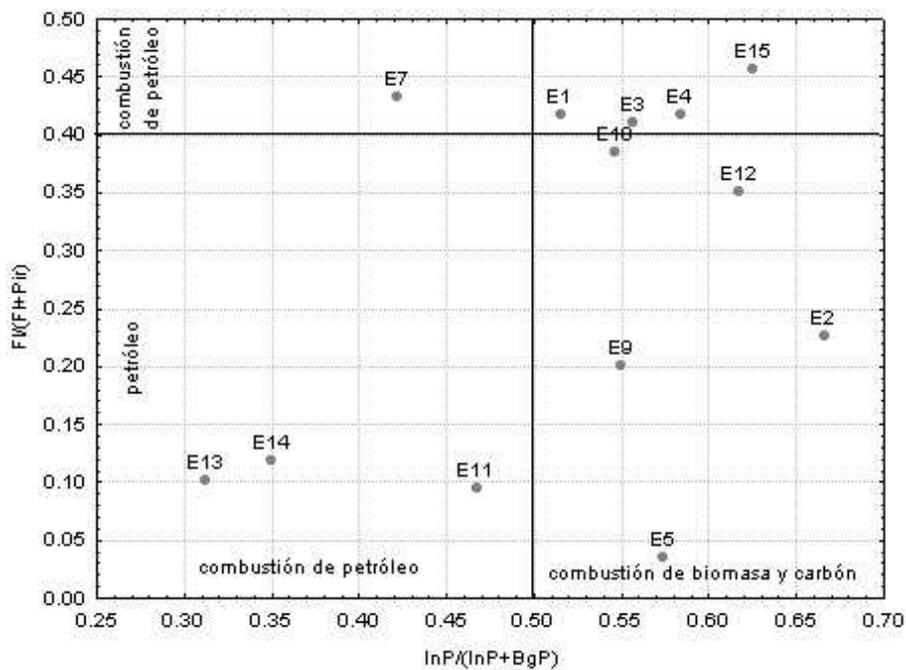


Figura 38. Fuentes de aporte de HAP mediante la proporción de diagnóstico $FI/(FI+Pir)$ vs $lnP/(lnP+BgP)$ en las localidades de muestreo durante la época de nortes.

Durante la época de secas el índice LMW/HMW (<1) también reveló origen pirolítico en todas las estaciones de muestreo excepto en la E11 (>1); el índice Fen/Ant (<10) determinó fuentes pirolíticas en todas las localidades; mientras que FI/Pir (<1) detectó HAP petrogénicos excepto en la E2 (>1) donde se registraron fuentes pirolíticas. El Cris/BaA (<1) manifestó fuentes pirolíticas en la mayoría de las localidades y sólo en la E5 y la E11 se reconocieron fuentes petrogénicas (>1).

En la figura 39 se muestra que en las estaciones de muestreo 1, 7, 10, 12 y 14 hubo aportes petrogénicos así como HAP provenientes de la combustión de petróleo. Por otra parte las localidades 3, 4, 5, 8, 9 y 15 presentaron HAP provenientes de fuentes pirolíticas, tanto por combustión de petróleo así como de biomasa y carbón, mientras que en la E2 sólo se detectaron compuestos provenientes de la combustión de biomasa y carbón. Las estaciones 6, 11 y 13 no fueron evaluadas en este análisis debido a que no fue posible determinar su rango.

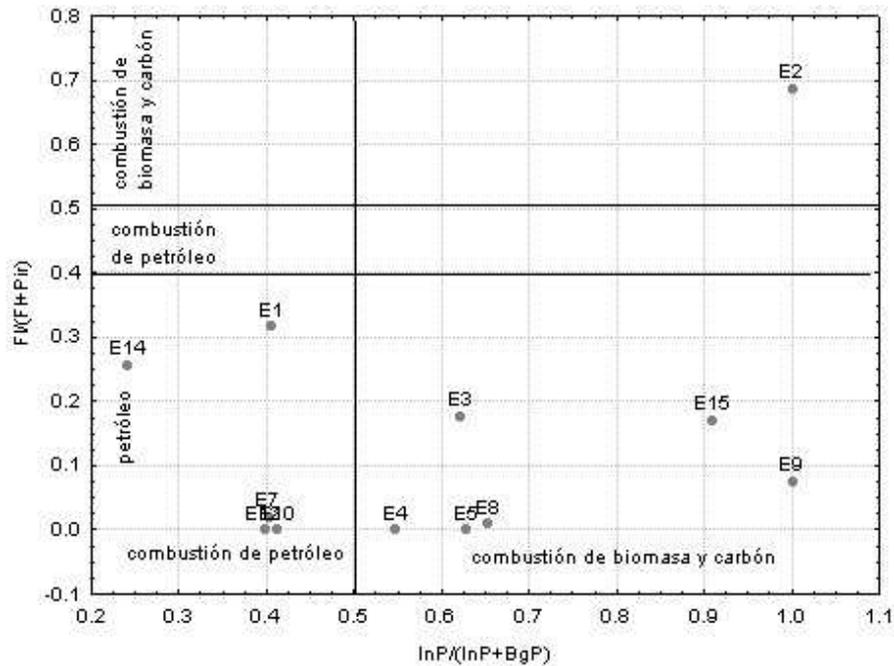


Figura 39. Fuentes de aporte de HAP mediante la proporción de diagnóstico $FI/(FI+Pir)$ vs $Ind(lnP+BgP)$ en las localidades de muestreo durante la época de secas.

Respecto a la época de lluvias el índice LMW/LHW (<1) reveló fuentes pirolíticas y sólo en la E10 se determinaron HAP petrogénicos (>1); para el caso de Fen/Ant (<10) todas fueron pirolíticas. En cuanto al FI/Pir las únicas pirolíticas fueron la E2, la E4 y la E14 (>1) y todas las demás petrogénicas. Por último $Cris/BaA$ reveló aportes petrogénicos en las E4, E5 y E14 (>1) y fuentes pirolíticas en las demás localidades de muestreo (>1).

En la figura 40 se muestra que durante la época de lluvias los HAP de fuentes petrogénicas únicamente se presentaron en la E3 y en la E5; mientras que en la E7 se detectaron aportes petrogénicos y por combustión de petróleo. La E2, la E6 y la E8 presentaron también contaminantes de fuentes petrogénicas, así como pirolíticas por la combustión de biomasa y carbón. Las estaciones en donde se determinaron HAP de emisiones únicamente pirolíticas fueron la E9 por combustión de petróleo así como de biomasa y carbón; y por último la E4 y la E14 solo por combustión de biomasa y carbón. En cuanto a las E1, E10, E11, E12, E13 y E15 no fue posible llevar cabo este análisis debido a que estuvieron fuera de rango.

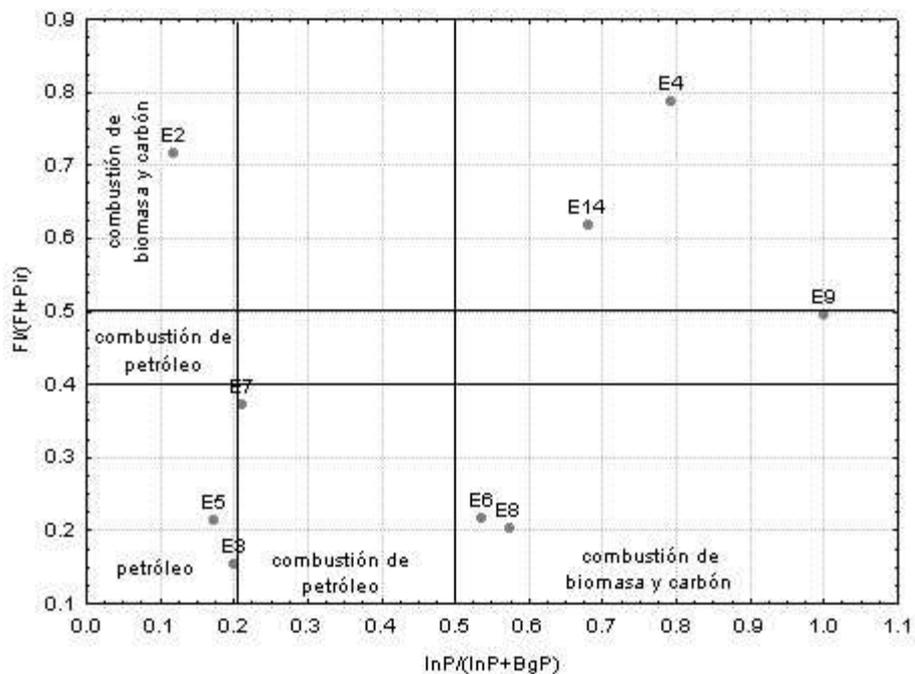


Figura 40. Fuentes de aporte de HAP mediante la proporción de diagnóstico $\text{FI}/(\text{FI}+\text{Pir})$ vs $\text{InP}/(\text{InP}+\text{BgP})$ en las localidades de muestreo durante la época de lluvias.

De manera general, en la figura 41 los índices utilizados mostraron que en el sistema lagunar existe una mezcla de HAP tanto de origen petrogénico como pirolítico, habiendo una dominancia de fuentes pirolíticas, lo cual indica que los compuestos más abundantes en la laguna derivan de la combustión incompleta de materia orgánica como madera y carbón; así como de la combustión de combustibles fósiles.

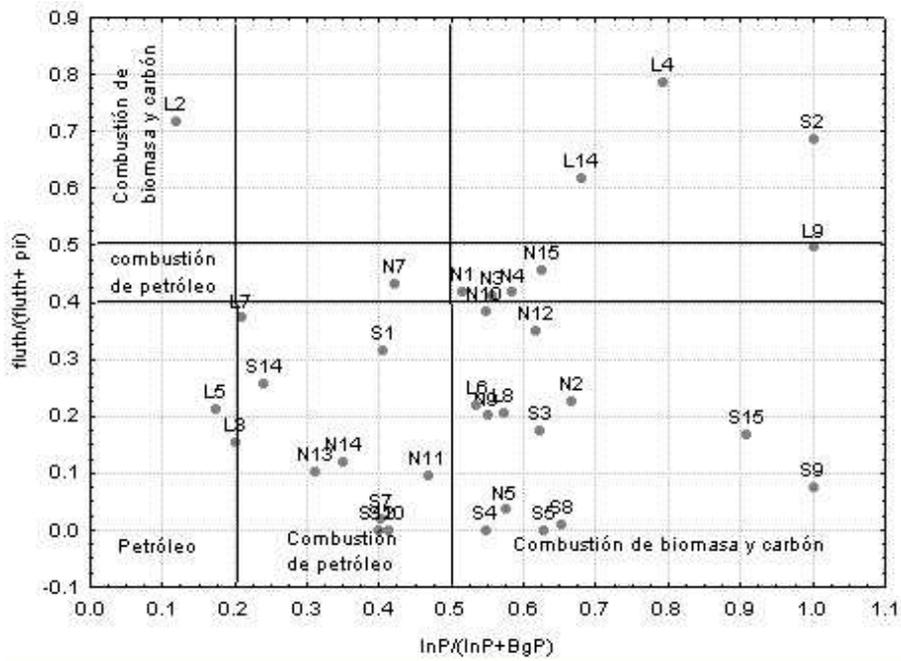


Figura 41. Fuentes de aporte de HAP mediante la proporción de diagnóstico FI/(FI+Pir) vs Ind/(InP+BgP) en las localidades de muestreo durante tres épocas climáticas N=nortes, S=secas y L= lluvias, en la Laguna de Términos.

Análisis de Componentes Principales

Los índices de diagnóstico sólo proporcionan información cualitativa de la contribución de diversas fuentes de HAP. La aplicación del análisis de componentes principales ACP permite la evaluación cuantitativa agrupando los HAP de fuentes de origen y rutas de entrada similares (Xiao *et al.*, 2008).

Durante la época de nortes el 53.34 % de la varianza fue explicada por dos componentes; el primero explicó el 29.07%, mientras que el segundo el 24.26% (Fig.42).

De acuerdo con Siddiqui *et al.* (2009) en general el petróleo y sus productos contienen una alta concentración de HAP de dos y tres anillos bencénicos. Por otro lado, la composición de los HAP de fuentes pirolíticas varía dependiendo de la temperatura de combustión. Así, en una temperatura baja a moderada como en la combustión de madera o carbón, abundan compuestos de bajo peso molecular; mientras que en los procesos a alta temperatura tal como las emisiones vehiculares, son dominantes los compuestos de alto peso molecular.

Con base en lo anterior, el ACP permitió identificar cuatro grupos de HAP (Fig. 40); el factor 1 representa cargas positivas para compuestos de 2+3+4 anillos bencénicos, tales compuestos son Fluoreno, Fenantreno, Fluoranteno y Pireno lo que indica que el grupo ubicado a la derecha de la gráfica se caracteriza por compuestos de origen pirolítico (Siddiqui *et al.*, 2009). De acuerdo con Wei *et al.* (2011) el Fluoranteno y el Pireno son indicadores de combustión de carbón, mientras que el Fenantreno y el Fluoreno son típicos indicadores de combustión de coque. Así, el factor 1 indica fuentes de combustión principalmente de carbón y coque.

El segundo grupo sólo está conformado por Benzo(a)antraceno y Benzo(b)fluoranteno con cargas importantes en el factor 2 y puede considerarse representativo de fuentes pirogénicas incluyendo quema de carbón y emisiones vehiculares (Larsen y Baker, 2003; Dong y Lee, 2009; Wang-Li *et al.*, 2010). El tercer grupo se ubica en la parte central de la gráfica teniendo cargas positivas para el factor 2; dicho conjunto está conformado por compuestos de fuentes petrogénicas como el Naftaleno (Budzinski *et al.*, 1997; Tam *et al.*, 2001), el Acenafteno y el Acenaftileno (Jiang *et al.*, 2009), así como compuestos asociados a procesos de combustión como el Criseno (combustión de carbón), el Benzo(k)fluoranteno y el Benzo(a)pireno (emisiones vehiculares) (Wang-Li *et al.*, 2010; Xiao *et al.*, 2008). Aunado a lo anterior, Fang *et al.* (2003) opinan que el Benzo(k)fluoranteno se origina particularmente de emisiones vehiculares de diesel. Por lo anterior, el tercer grupo se trata de una mezcla de HAP tanto de tipo petrogénico como pirolítico.

Por último, el grupo localizado a la izquierda de la gráfica está representado por aquellos compuestos de mayor peso molecular siendo el Dibenzo(a,h)antraceno, el Indeno(123-cd)pireno y el Benzo(ghi)perileno característicos de procesos de combustión incluyendo quema de carbón y emisiones vehiculares (Wang-Li *et al.*, 2010; Xiao *et al.*, 2008).

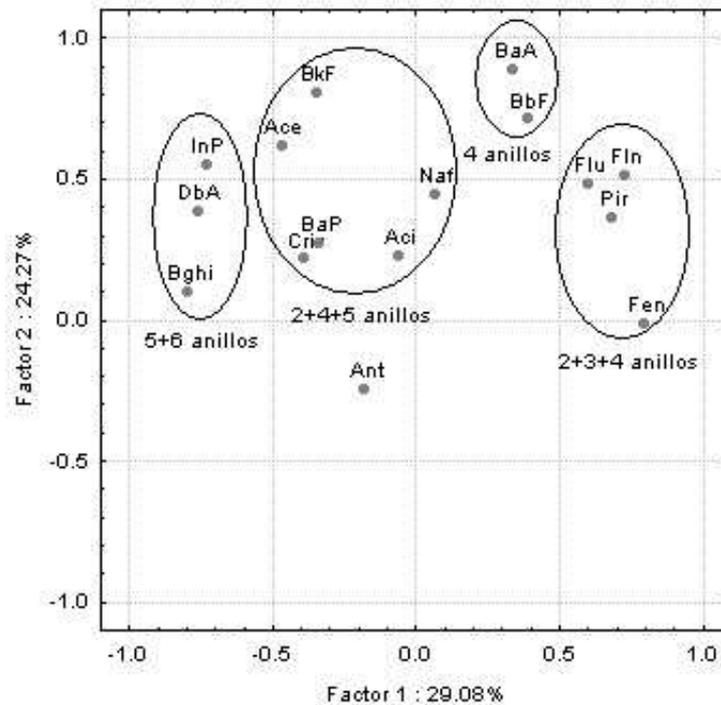


Figura 42. Análisis de componentes principales (ACP) cargas de los HAP en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de nortes.

Por otro lado, en la figura 43 se presenta la caracterización de las localidades de muestreo de acuerdo al primer y al segundo componente. Así, durante la época de nortes se identificaron principalmente tres grupos de muestras. El primer grupo, conformado por la E12 (Centro Oeste), E10 (Centro Este), E9 (Boca de Puerto Real Este), E7 (Cerca a Isla Pájaros) y E3 (Entre Boca del Carmen y Boca de Atasta) contribuyeron de manera importante en el aporte de los HAP presentes en el componente 1, los cuales son atribuidos a procesos de combustión de carbón y coque. Por otra parte, las localidades de muestreo con mayor contribución para el segundo componente, aquel conformado por la mezcla de HAP de ambos orígenes

pero con fuerte contribución pirolítica fueron la E1 (Gasolinera Puerto Isla del Carmen), así como el grupo formado por la E2 (Boca del Carmen), la E4 (El Rastro) localizadas cerca de Ciudad del Carmen; así como la E14 (Desembocadura del Río Palizada) y la E15 (Estero Atasta) entradas importantes de agua dulce hacia la laguna. Lo anterior confirma una vez más la influencia de las actividades humanas en la zona oeste de la laguna de Términos, en donde se encuentra Ciudad del Carmen que es el mayor centro de población con presencia de diversas industrias y con un intenso tráfico de embarcaciones y otros vehículos, además de la importancia del río Palizada y principalmente del Sistema Atasta durante esta época climática como rutas de entrada de HAP al sistema lagunar.

Por último el tercer grupo, conformado por la E5 (Estero Pargo), la E11 (Influencia Río Candelaria) y la E13 (Desembocadura del Río Chumpán) indica que en dichas localidades la contaminación fue muy baja.

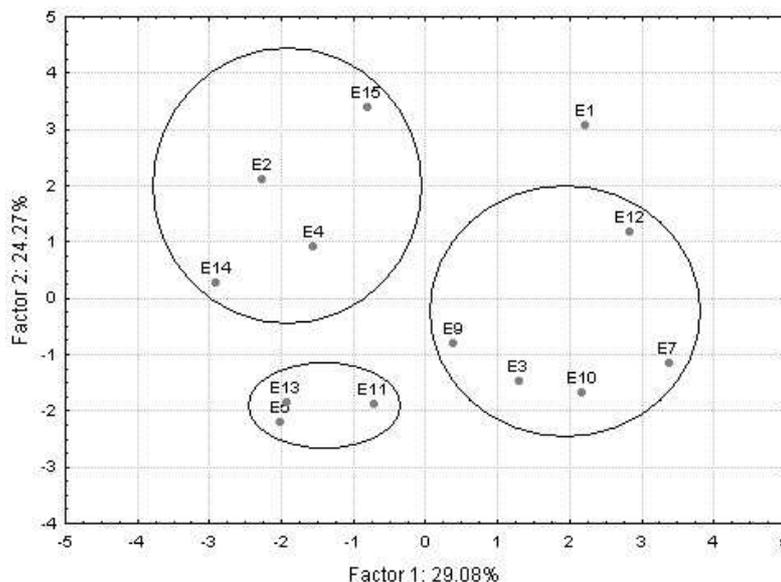


Figura 43. Análisis de componentes principales (ACP) en las localidades de muestreo de la Laguna de Términos durante la época de nortes.

En cuanto a la época de secas el ACP explicó el 49.13% de la varianza; con 26.11% en el componente 1 y el 23.02% en el componente 2.

En la figura 44 se identificaron 4 grupos de compuestos, el primero de ellos tuvo la mayor carga para el factor 1, en dicho grupo predominaron compuestos de 2+3+4 anillos bencénicos incluyendo Fluoreno, Fenantreno, Fluoranteno, Antraceno y Criseno, principalmente provenientes de fuentes de combustión (Hwang *et al.*, 2003). Así mismo, el segundo grupo presentó fuerte correlación con el factor 2, dicho conjunto estuvo conformado por compuestos de dos y cuatro anillos bencénicos (Naftaleno, Acenaftileno, Acenafteno, Benzo(b)fluoranteno y Pireno), por lo cual se le identifica como una mezcla de HAP provenientes tanto de fuentes petrogénicas como pirolíticas. El tercer grupo también se presenta relacionado con el factor 2 y está

conformado por HAP de 4+5+6 anillos bencénicos; Benzo(k)fluoranteno, Benzo(a)pireno, Dibenzo(a,h)antraceno y Benzo(ghi)perileno) provenientes principalmente de emisiones vehiculares. Finalmente el cuarto grupo formado por Benzo(a)antraceno e Indeno(123-cd)pireno de 4 y 5 anillos aromáticos respectivamente, presentó cargas negativas para ambos factores, lo que indica una pobre correlación con los demás compuestos, lo anterior podría deberse a la entrada puntual de estos contaminantes hacia la laguna, los cuales se atribuyen a procesos de combustión de carbón y emisiones vehiculares.

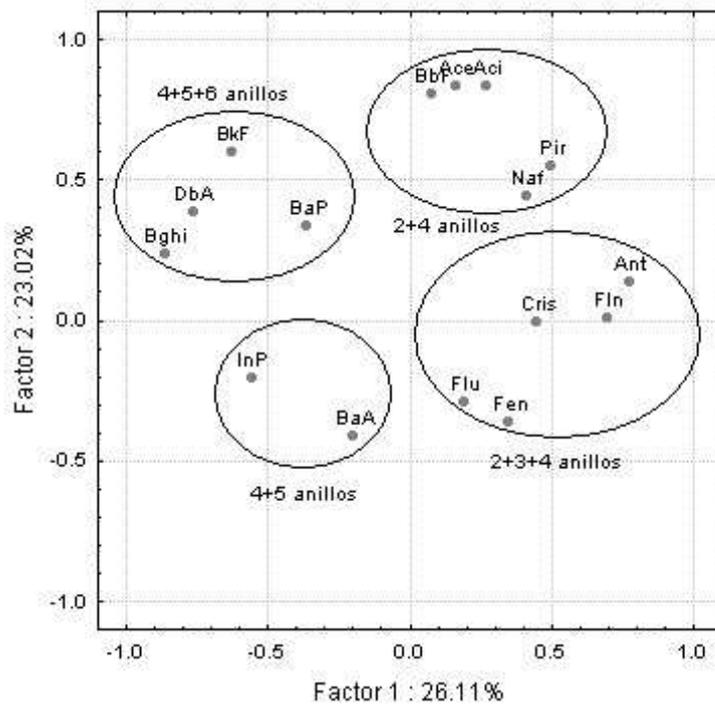


Figura 44. Análisis de componentes principales (ACP) cargas de los HAP en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de secas.

Respecto a las localidades de muestreo la figura 45 permite distinguir 2 grupos principales, el primero agrupa las localidades E2 (Boca del Carmen), E15 (Estero Atasta) ubicadas en el lado oeste de laguna, así como la E9 (Boca de Puerto Real Este) y la E11 (Influencia del Río Candelaria) ubicadas en el lado este; las cuales contribuyeron de manera importante con el componente 1, es decir estuvieron influenciadas por fuentes de combustión. Por otro lado, las localidades de muestreo con mayor contribución para el segundo componente, el cual está conformado por la mezcla de HAP de ambos orígenes, fue la E1 (Gasolinera Puerto Isla del Carmen) en la cual el aporte petrogénico podría deberse a las actividades de transporte marítimo y aceites vertidos (Huang *et al.*, 2011) ya que dicha localidad se encuentra en un área de astilleros además del servicio de carga de combustible para embarcaciones. Por otra parte, el grupo ubicado a la izquierda conformado por las localidades E3(Entre Boca del Carmen y Boca de Atasta), E4(El Rastro), E5 (Estero Pargo), E7(Cerca a Isla Pájaros), E8 (Punta San Julián), E10(Centro Este), E12 (Centro Oeste), E13 (Desembocadura del Río Chumpán) y E14 (Desembocadura del Río Palizada) ubicadas en la zona oeste de la laguna excepto E(7,8 y 10) fueron áreas afectadas por fuentes pirolíticas en particular emisiones vehiculares. Cabe mencionar que a diferencia de la época de nortes, en la época de secas en la desembocadura del río Chumpán (E13) se encontró gran cantidad de HAP de origen pirolítico. Por último, la E6 fue la localidad que más contribuyó al aporte de HAP del grupo 4, es decir InP y BaA la cual se consideró como una entrada puntual de estos contaminantes.

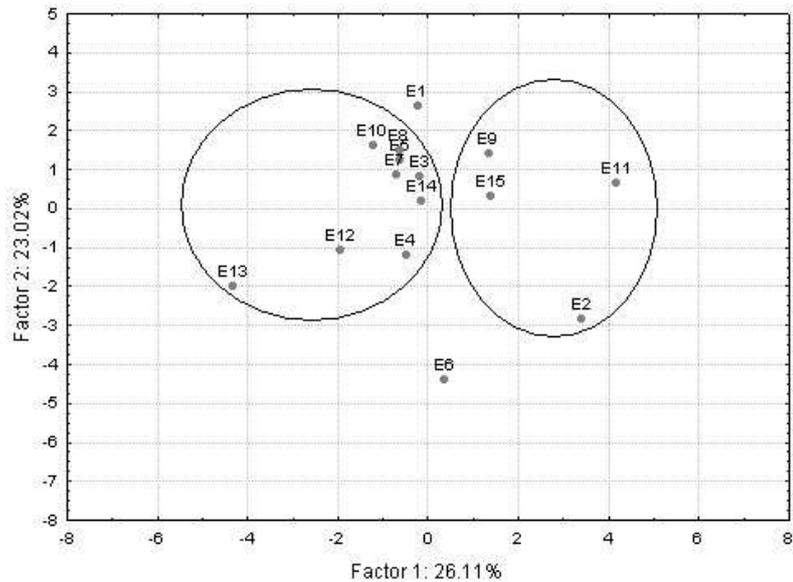


Figura 45. Análisis de componentes principales (ACP) en las localidades de muestreo de la Laguna de Términos durante la época de secas.

Finalmente para la época de lluvias también se eligieron los dos primeros componentes principales los cuales en conjunto explicaron el 51.14 % de la varianza. En la figura 46 se muestra que la mayoría de los compuestos estuvieron relacionados con el factor 2, en el cual se determinaron dos grupos. El primero de ellos estuvo conformado por Antraceno, Benzo(a)antraceno y Fenantreno, los cuales son atribuidos a fuentes de combustión. Asimismo, el segundo grupo se caracterizó por la presencia de compuestos de origen pirolítico, excepto el Naftaleno que es petrogénico. También se aprecia un tercer grupo formado principalmente por compuestos de bajo peso molecular, así como por el Benzo(a)pireno, los cuales estuvieron poco representados en las muestras, por tal motivo presentan carga negativa en relación con el factor 2. Por último, el Indeno(123-cd)pireno fue

encontrado con un patrón diferente al de los grupos principales, se trata de un compuesto de origen pirolítico que durante esta época climática se encontró en mayor concentración en la E15(Estero Atasta) tal vez debido a aportes locales. Lo anterior hace notar que durante la época de lluvias hubo mayor contribución de HAP de alto peso molecular y por lo tanto de origen pirolítico y que la presencia de HAP de fuentes petrogénicas fue muy escasa.

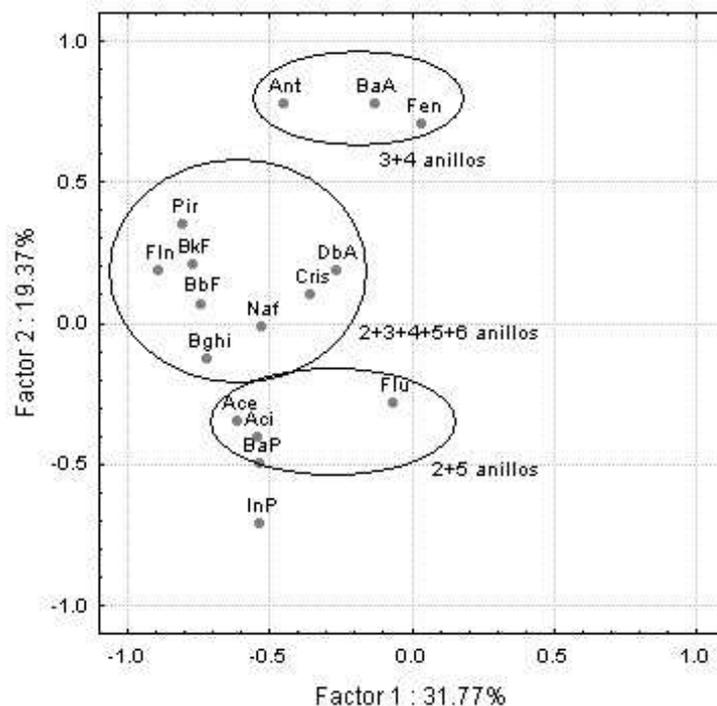


Figura 46. Análisis de componentes principales (ACP) cargas de los HAP en sedimentos de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.

En cuanto a las localidades de muestreo (Fig. 47) se observó que las E10 (Centro Este), E11 (Influencia Río Candelaria), E12(Centro Oeste) y E13 (Desembocadura Río Chumpán) están influenciadas por el aporte de HAP correspondientes al primer

grupo del factor 2, lo cual indica procesos de combustión por quema de carbón y coque principalmente, así como emisiones vehiculares; mientras que las E1(Gasolinera Puerto Isla del Carmen), E2(Boca del Carmen), E3(Entre Boca del Carmen y Sistema Atasta), E4(El Rastro),E5(Estero Pargo), E6(Cerca a Isla Cayo), E7(Cerca a Isla Pájaros), E8(Punta San Julián), y E9(Boca Puerto Real Este) estuvieron influenciadas por el aporte de compuestos del segundo grupo del factor 2, los cuales también son de origen pirolítico, principalmente por quema de carbón y emisiones vehiculares. Finalmente, la E15 (Estero Atasta) presentó la mayor cantidad de Indeno(123-cd)pireno, por tal motivo se cree que hubo aporte puntual de este compuesto en dicha área.

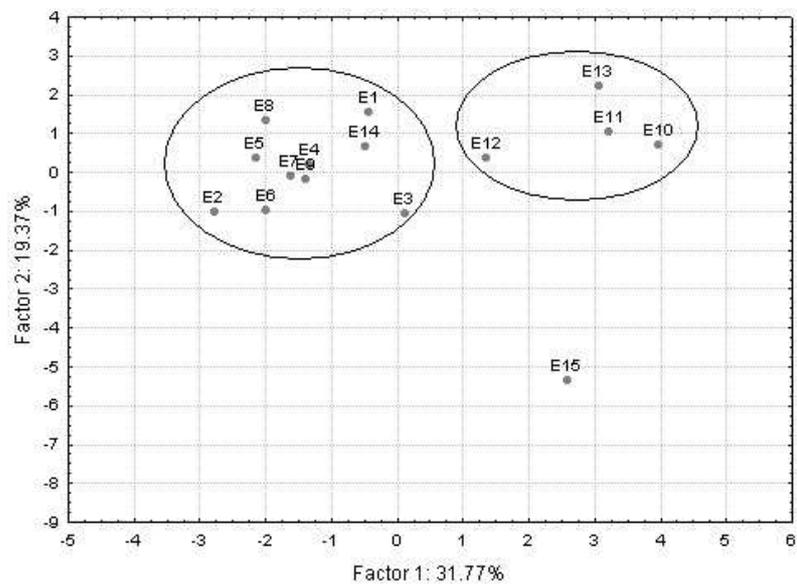


Figura 47. Análisis de componentes principales (ACP) en las localidades de muestreo de la Laguna de Términos durante la época de lluvias.

La mayor concentración de HAP detectada durante la época de lluvias podría deberse a que durante esta época climática existe un mayor aporte de agua dulce a través de los ríos hacia el sistema lagunar lo que provoca un mayor acarreo de contaminantes desde zonas aledañas, sin embargo, durante esta investigación el muestreo correspondiente a la temporada de lluvias (octubre de 2009) se llevó a cabo en un año atípico caracterizado por un déficit de precipitaciones provocado por la presencia del fenómeno “La Niña”, lo cual podría indicar que en este caso la concentración y la distribución de los HAP estuvieron determinadas más por el aporte atmosférico y efectos locales que por la época climática.

CALIDAD SEDIMENTARIA

Existen valores establecidos como guías de calidad sedimentaria derivados de diversos estudios ecotoxicológicos donde se ha medido la toxicidad intrínseca de los sedimentos marinos y costeros hacia diversos organismos biológicos (Long *et al.*, 1995; Buchman, 2008); dichos valores se conocen como efecto de rango bajo (ERL por sus siglas en inglés) y efecto de rango medio (ERM) e intentan definir concentraciones químicas para las cuales los efectos agudos sobre los sistemas biológicos son raros (debajo de ERL), ocasionales (entre ERL y ERM) y frecuentes (niveles por sobre ERM) (Arias *et al.*, 2010). Cabe mencionar que estos criterios fueron desarrollados y son utilizados por la Administración Atmosférica y Oceánica de Estados Unidos (NOAA; por sus siglas en inglés) (Long *et al.*, 1995).

Para el caso de HAP totales los criterios establecidos son ERL=4022 ng^{-1} y ERM=44792 ng^{-1} . En este estudio, la concentración total de HAP durante cada época climática fue 11070 ng^{-1} (nortes), 15920 ng^{-1} (secas) y 32782 ng^{-1} (lluvias) y estuvieron entre ERL y ERM, indicando que ocasionalmente podría haber efectos agudos en organismos biológicos.

Aunado a lo anterior, Long *et al.* (1995) también sugirieron criterios de ERL y ERM para cada compuesto en particular. En la tabla 13 se muestran los niveles de HAP individuales en el sistema lagunar en cada época climática y su comparación con dichos criterios. Así, durante la época de nortes, el Acenaftileno, el Acenafteno, el Fluoreno y el Benzo(a)antraceno presentaron valores entre ERL y ERM. Por otra parte el Benzo(a)pireno y el Dibenzo(a,h)antraceno excedieron el ERM.

En cuanto a la temporada de secas, el Acenaftileno, el Acenafteno y el Fenantreno tuvieron concentraciones entre ERL y ERM; mientras que los compuestos con niveles mayores a ERM fueron el Fluoreno, el Antraceno, el Benzo(a)antraceno, el Benzo(a)pireno y el Dibenzo(a,h)antraceno.

Respecto a la época de lluvias, hubo mayor cantidad de contaminantes que rebasaron los límites establecidos. Los compuestos con concentraciones entre ERL y ERM fueron el Naftaleno, el Acenafteno, el Fenantreno, el Fluoranteno y el Pireno; y por encima de ERM el Acenaftileno, el Fluoreno, el Antraceno, el Benzo(a)antraceno, el Criseno, el Benzo(a)pireno y el Dibenzo(a,h)antraceno.

Tabla 13. Criterios de contaminación por HAP (ngg^{-1}) en sedimentos marinos y costeros.

Compuestos	Época climática			Promedio	ERL (Long <i>et al.</i> 1995)	ERM
	Nortes	Secas	Lluvias			
Naf	26	73	181	93	160	2100
Aci	234	410	1241	629	44	640
Ace	227	384	408	340	16	500
Flu	283	684	716	561	19	540
Fen	112	700	609	473	240	1500
Ant	691	1359	1427	1159	853	1100
Fln	228	265	906	466	600	5100
Pir	436	539	1474	816	665	2600
B(a)A	391	3381	2954	2242	261	1600
Cris	186	365	5939	2163	384	2800
B(b)F	188	297	975	487	N.D.	N.D.
B(k)F	549	608	2356	1171	N.D.	N.D.
B(a)P	2924	3061	2366	2784	430	1600
InP	1652	2062	2952	2222	N.D.	N.D.
DbA	1385	1241	4968	2531	64	260
Bghi	1559	8702	3296	4519	N.D.	N.D.

N.D.=no disponible

ERL= efecto de rango bajo

ERM= efecto de rango medio

Por último, en la figura 48 se muestran las concentraciones de HAP individuales promedio en relación a los respectivos ERL y ERM en el sistema lagunar, lo cual permite tener un panorama amplio de la calidad sedimentaria en la Laguna de Términos, así como la ocurrencia de posibles efectos en los organismos acuáticos. En el sistema lagunar el Acenaftileno, el Acenafteno, el Fenantreno, el Pireno y el Criseno presentaron concentraciones entre ERL y ERM, lo cual de acuerdo con Arias *et al.* (2010) se predice la ocurrencia ocasional de efectos adversos principalmente sobre la flora y fauna bentónica asociada. Mientras que los compuestos que excedieron el ERM fueron el Fluoreno, el Antraceno, el Benzo(a)antraceno, el Benzo(a)pireno y el Dibenzo(a,h)antraceno, lo cual indica que dichos contaminantes pueden causar efectos deletéreos frecuentes en los organismos (Arias *et al.*, 2010). Aunado a que los dos últimos son reconocidos carcinógenos.

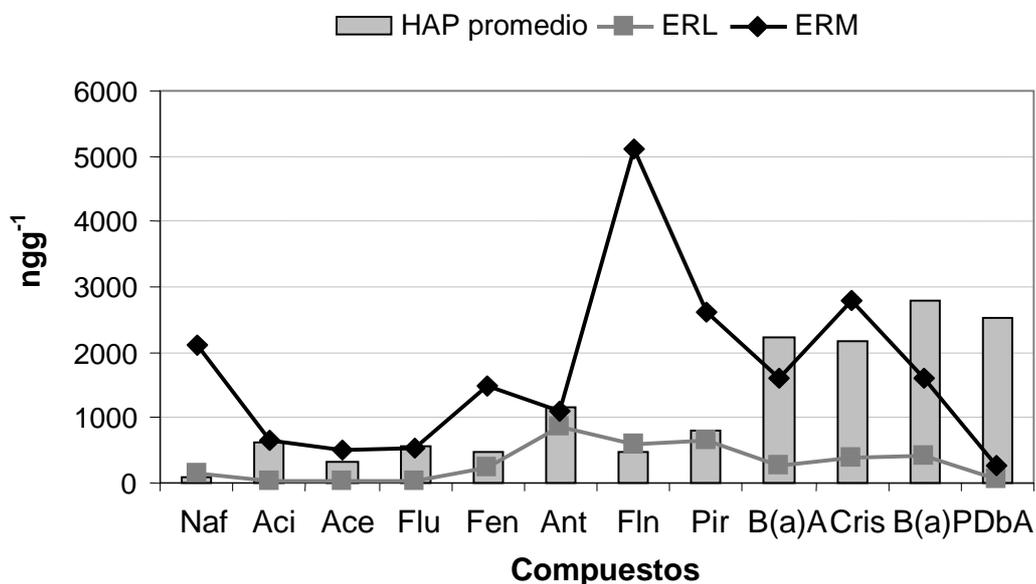


Figura 48. HAP individuales en relación a ERL y ERM (Long *et al.* 1995) para sedimentos de la Laguna de Términos.

Efectos de HAP en Organismos Acuáticos

Los efectos que los HAP pueden causar en los organismos son genotóxicos, mutagénicos y carcinogénicos y están en función de muchos factores como la etapa de desarrollo, el sexo, el estado nutricional y de salud, los hábitos alimenticios, la capacidad metabólica, el tipo y la concentración de contaminantes y el tiempo de exposición (Jaward *et al.*, 2012). A continuación se citan algunos ejemplos de dichas alteraciones en organismos acuáticos.

Respecto a los invertebrados, los HAP provocan la reducción de la tasa de crecimiento, la viabilidad de los gametos e irregularidades en el desarrollo larvario, estas alteraciones han sido notadas en moluscos (Botello *et al.*, 1995); aunado a ello Bellas *et al.* (2008) señalaron que el Naftaleno, el Fenantreno, el Fluoranteno y el Pireno causan efectos agudos en las primeras etapas del desarrollo larvario del mejillón *Mytilus galloprovincialis* (inhibición del desarrollo embrionario y toxicidad en embriones), mientras en otros invertebrados como el erizo *Paracentrotus lividus* afectan y reducen el crecimiento larval y en la ascidia *Ciona intestinales* el Naftaleno mostró toxicidad en embriones.

Respecto a los peces, Woo *et al.* (2006) determinaron que en la platija *Paralichthys olivaceus* el Benzo(a)pireno, el Fluoranteno, el Antraceno, el Pireno y el Fenantreno causan daños en el ADN de células sanguíneas. Otros efectos que la exposición de HAP puede causar en peces son apoptosis en eritrocitos de *Anguilla anguilla* (Nigro *et al.* 2002) y en células ováricas del bagre de canal *Ictalurus punctatus* (Weber y Janz, 2001). Considerando que la sangre de estos vertebrados acuáticos tiene una relación importante con la recuperación ante lesiones, la digestión, la distribución de

nutrientes en el cuerpo, así como funciones inmunes, el daño del ADN de células sanguíneas causado por HAP puede alterar las funciones vitales de los organismos (Lee *et al.*, 2011). Por otra parte, existen estudios como los de Troisi *et al.* (2006) y Johnson *et al.* (2008) quienes reportaron que los animales acuáticos como los peces y las aves expuestos a los HAP contienen una concentración mayor de metabolitos intermedios de estos contaminantes, los cuales pueden ser más tóxicos, mutagénicos o carcinogénicos que los poliaromáticos iniciales. La capacidad de los metabolitos reactivos tales como hidróxidos, epóxidos y dihidrodioles de algunos estos compuestos orgánicos se unen a las proteínas celulares y ADN, lo cual puede producir alteraciones bioquímicas y daño celular que provocan mutaciones, malformaciones durante el desarrollo, tumores y cáncer (Varanassi *et al.*, 1989). Por otro lado, Ray *et al.* (1991) reportaron la presencia aductos aromáticos de ADN en el hígado de belugas (*Delphinapterus leucas*) del estuario de Saint Lawrence en Canadá, el cual contiene niveles altos de contaminantes incluyendo HAP, los cuales se consideran uno de los posibles agentes causantes de tumores y cáncer en mamíferos marinos.

Por lo anterior, la contaminación de los ecosistemas marinos y costeros provoca impactos en las poblaciones a niveles que podrían reducir el crecimiento, la fecundidad y la sobrevivencia de los organismos acuáticos, lo cual induce cambios en la estructura de las comunidades teniendo efectos en la abundancia y en la diversidad de especies (Jiao, 2009; Robinet y Feunteun, 2002).

Debido a que los HAP son compuestos orgánicos persistentes también pueden bioacumularse, cuando la concentración de estos contaminantes en un organismo

acuático es mayor que en el agua debido a su absorción por todas las vías de exposición incluyendo la dieta, la superficie respiratoria (branquias) y la piel (Calamari, 2002). Lo anterior conlleva a otro proceso llamado biomagnificación el cual implica que los compuestos tóxicos (HAP) son transferidos a lo largo de la cadena trófica y su concentración en un organismo acuático es mayor que en los individuos de los cuales éste se alimenta (Calamari, 2002), en otras palabras, se presenta en bajas concentraciones en especies al principio de la cadena alimentaria y en mayor proporción a medida que se asciende en los niveles tróficos, afectando así a los grandes depredadores.

Riesgos potenciales en organismos y en la salud humana.

El riesgo del aporte de HAP de alto peso molecular en ecosistemas acuáticos está estrechamente vinculado con su integración a los sedimentos, donde puede establecer relación con organismos bentónicos de hábitos filtradores como el ostión o detritívoros como el camarón (Botello *et al.*, 1995). Botello y colaboradores observaron que los niveles de HAP contenidos en ostiones del puerto de Salina Cruz, Oaxaca son de 4 hasta 500 veces mas elevados que los presentes en sedimentos y en los camarones son de 15 a 65 000 veces mayores. Este proceso de bioacumulación es altamente significativo tratándose de compuestos de alta toxicidad, ya que pueden ser transferidos a lo largo de la cadena alimentaria afectando a los organismos acuáticos y poniendo en riesgo la salud humana al consumir pescados y mariscos contaminados. Se presta especial atención a los HAP considerados carcinógenos potenciales, ya que se encuentran en la lista de

contaminantes prioritarios en la USEPA, (Nikolaou *et al.*, 2009). Los HAP que rebasaron el ERM fueron el Fluoreno, el Antraceno, el Benzo(a)antraceno, el Benzo(a)pireno y el Dibenzo(a,h)antraceno, de los cuales el Benzo(a)pireno es reconocido carcinogénico en organismos y en humanos, mientras que el Benzo(a)antraceno y el Dibenzo(a,h)antraceno han sido clasificados como carcinógenos en organismos y como probables carcinógenos en humanos (ATSDR,1995; IARC, 2012).

La Laguna de Términos es un sitio muy importante desde la perspectiva de la producción y el crecimiento de organismos de relevancia comercial como moluscos, crustáceos y peces (Botello *et al.*, 2001).

Para el caso de HAP totales en ostión *Crassostrea virginica* en la laguna de Términos, Gold *et al.* (1995) encontraron un promedio de 320 ngg⁻¹, mientras que Noreña *et al.* (1999) obtuvieron una concentración promedio de 1900 ngg⁻¹ (2470 a 42500 ngg⁻¹). Posteriormente, Gold *et al.* (2007) encontraron una concentración de HAP similar a la reportada anteriormente por Noreña *et al.* 1999 por lo que deducen que existe una entrada constante de estos compuestos orgánicos hacia el sistema lagunar. Aunado a lo anterior, la mayor biodisponibilidad de poliaromáticos en la Laguna de Términos también podría estar relacionada con el bajo contenido de CO en los sedimentos, además de la mayor cantidad de arenas, lo cual no permite la adsorción óptima de contaminantes en los sedimentos quedando fácilmente disponibles para los organismos filtradores como *Crassostrea virginica*, una especie de importancia pesquera en el área de estudio, por lo cual, de acuerdo con Noreña *et al.* (1999) debería de ser un motivo de preocupación en una zona protegida donde

las ostras se crían para el consumo humano y se debe dar lugar a la aplicación de programas de vigilancia.

Por otra parte Jaward *et al.* (2012) realizaron un estudio de HAP en el estero de Urías en el estado de Sinaloa y reportaron niveles de 27 a 428 ngg⁻¹ en sedimentos y de 36 a 498 ngg⁻¹ en camarones juveniles *Litopenaeus vannamei*. Así mismo, determinaron que los HAP con mayor concentración en este ecosistema acuático fueron el Naftaleno, el Fenantreno y el Pireno, indicando que las concentraciones de HAP encontradas provocan una disminución en la tasa de crecimiento y en los niveles de proteínas de estos organismos, así como daños en el ADN sugiriendo el inicio de procesos carcinogénicos. Lo anterior debe tomarse en cuenta ya que durante este estudio se encontraron concentraciones mayores de HAP en los sedimentos (1581 ngg⁻¹) comparadas con aquellas reportadas en el estero Urías, aunado al hecho de que en la Laguna de Términos los HAP más abundantes como el Benzo(a)pireno y el Dibenzo(a,h)antraceno son carcinogénicos, por lo cual se infiere el riesgo potencial en crustáceos, incluidos aquellos de importancia comercial como el camarón blanco *Litopenaeus setiferus*, camarón rosado *Farfantepenaeus duorarum*, camarón café *F. aztecus*, camarón siete barbas *Xiphopenaeus kroyeri* los cuales podrían ser vulnerables a la exposición HAP ya que pasan sus estadios tempranos de desarrollo en Laguna de Términos la cual se considera como una de las áreas de crianza más importantes. Otros crustáceos de relevancia económica son tres especies de jaibas *Callinectes sapidus*, *C. rathbunae* y *C. similis*.

Por otra parte, Jaward *et al.* (2012) también estudiaron los efectos que la concentración de HAP causa en peces del estero Urías y establecieron que estos

provocan deformaciones (exogastrulación) en embriones de *Cupleidae ssp.* Lo anterior es importante ya que Ayala *et al.* (2003) reportaron 107 especies de peces en la Laguna de Términos las cuales podrían estar siendo afectadas por el aporte de HAP, además de que muchas de ellas son de importancia comercial, lo que representaría un riesgo para la salud humana al consumir productos pesqueros contaminados. De acuerdo con Vivés *et al.* (2001) la exposición humana a estos compuestos mediante la ingestión provoca su absorción y distribución en diversos órganos y tejidos especialmente aquellos ricos en lípidos. Una vez incorporados al organismo experimentan una oxidación enzimática llevada a cabo por el sistema de oxidasas de función mixta (MFO) ubicado mayoritariamente en el hígado que los convierte en epóxidos y dihidrodioles los cuales constituyen la forma genotóxicamente activa de los HAP y pueden formar aductos con proteínas y ácidos nucleicos celulares (Koss y Tesseraux, 1999). Los aductos con ADN pueden entonces dar lugar a una mutación genética con potenciales consecuencias tumorígenas malignas para el individuo expuesto, sin olvidar el riesgo de malformaciones que suponen para embriones y fetos (Environmental & Health Criteria, 1998). Sin embargo, es necesario realizar más estudios acerca del contenido de HAP en organismos de la Laguna de Términos para tener una idea clara de los posibles riesgos de salud pública.

Por otra parte, es importante mencionar la perspectiva de la biodiversidad ya que la Laguna de Términos es un ecosistema en el cual existe una compleja comunidad biótica que en los últimos años se ha visto afectada por la modificación y la destrucción de diversos hábitats por efecto de la deforestación, alteraciones en el

caudal de los ríos, sobreexplotación de recursos, asentamientos humanos irregulares (INE, 1997; Arriaga *et al.*, 2002) y la contaminación, principalmente urbana e industrial (Botello *et al.*, 1995). La concentración de HAP promedio (1581 ± 1528) en los sedimentos del sistema lagunar revela un nivel alto de contaminación que podría estar afectando la salud del ecosistema, la calidad del agua, la existencia de especies y el equilibrio ecológico.

CONCLUSIONES

En la Laguna de Términos no hubo correlación entre los HAP y el contenido de C.O, ni con el tipo de sedimento, esta falta de afinidad indica que la concentración y la distribución de los HAP están determinadas más por aportación directa de las actividades antropogénicas.

El promedio de HAP en sedimentos del sistema lagunar fue alto (1581 nng^{-1}) siendo característico de zonas con introducción crónica de estos contaminantes. Aunado a ello, la concentración de HAP presentó diferencias significativas entre las épocas climáticas con la menor cantidad registrada en nortes (851 nng^{-1}) seguido de la temporada de secas (1608 nng^{-1}) y presentando el nivel más alto durante la época de "lluvias" (2185 nng^{-1}) pese al déficit de precipitaciones provocado por el fenómeno de "La Niña" en el área de estudio.

Durante las diferentes épocas climáticas las concentraciones más altas de HAP fueron encontrados en la zona oeste de la laguna, donde se encuentra la mayor cantidad de poblaciones establecidas tanto en los márgenes de los principales ríos, así como Ciudad del Carmen, siendo la población más urbanizada e industrializada y la porción con mayor tráfico de vehículos de diferente tipo y mayor actividad pesquera. Aunado a lo anterior, la influencia de la corriente marina que entra por la Boca de Puerto Real y sale por la Boca del Carmen podría contribuir al transporte y acumulación de los HAP en dicha área del sistema lagunar.

Se identificó que el origen de los HAP presentes en los sedimentos del sistema lagunar es de dos tipos, petrogénicos y pirolíticos con dominancia de estos últimos, lo cual indica que la mayoría de estos contaminantes derivan de fuentes de combustión incompleta de materia orgánica como la madera, o bien por combustión de combustibles fósiles como el petróleo y el carbón.

La predominancia de HAP de peso molecular alto como Benzo(a)pireno, Indeno(123cd)pireno, Benzo(ghi)perileno, Dibenzo(ah)antraceno, Benzo(a)antraceno y Criseno corroboraron las fuentes pirolíticas por combustión de coque, carbón y especialmente emisiones vehiculares, provenientes de las actividades pesqueras, industriales, domésticas y agrícolas que se llevan a cabo en el área y en zonas aledañas, además de las emisiones provenientes de los automóviles que circulan por la carretera federal 180. Lo anterior indica la importancia de los aportes directos al sistema lagunar, así como la relevancia de la entrada de contaminantes por vía atmosférica.

De los HAP más abundantes, el Benzo(a)pireno es reconocido carcinogénico en organismos y en humanos, mientras que el Benzo(a)antraceno y el Dibenzo(a,h)antraceno han sido clasificados como carcinógenos en organismos y como probables carcinógenos en humanos. Estos compuestos excedieron el ERM lo cual indica que pueden causar efectos adversos frecuentes en los organismos como la reducción de las funciones inmunes en peces así como la disminución de la tasa de crecimiento, en la viabilidad de los gametos e irregularidades en el desarrollo

larvario de invertebrados, lo cual podría afectar las pesquerías. Aunado a lo anterior la bioacumulación de HAP por los organismos acuáticos pone en riesgo la salud humana mediante el consumo de pescados y mariscos contaminados ya que una pesquería importante en la Laguna de Términos es la del ostión *Crassostrea virginica* un organismo filtrador en el que se han encontrado niveles altos de HAP.

Recomendaciones

Aunque no ha sido establecida una regulación relevante para la contaminación por HAP, sería recomendable realizar periódicamente el monitoreo de estos contaminantes en los sedimentos ya que puede proporcionar información útil para la evaluación de los efectos tóxicos de estos compuestos y para apoyar a las autoridades en la toma de decisiones.

Debido a la escasez de información, se sugiere realizar estudios acerca de la concentración, bioacumulación y efectos de los HAP en organismos como crustáceos y peces de la Laguna de Términos, los cuales podrían estar siendo afectadas por la contaminación, en especial durante los estadios tempranos de desarrollo.

Se recomienda implementar programas de regularización de las diferentes actividades antropogénicas para evitar el deterioro ambiental y llevar a cabo acciones de vigilancia de riesgos para la salud humana.

REFERENCIAS

Al-Ghadban, A.N. 1990. Holocene sediments in a shallow bay, southern coast of Kuwait, Arabian Gulf. *Marine Geology* 92:237-254.

Al-Ghadban, A.N., Jacob, G., Abdali, F. 1994. Total organic carbon in the sediments of the Arabian Gula and need for biological productivity investigations. *Marine Pollution Bulletin* 28(6):356-362.

Álvarez-Legorreta, T., Gold-Bouchot, G., Zapata-Pérez, O. 1994. Hydrocarbon concentrations in sediments and clams (*Rangia cuneata*) in Laguna de Pom, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 52:39-45.

Anonymous, 1959. Symposium on the classification of brackish waters. Venice 8-14th april 158. *archivio di Oceanografia e Limnologia* Volume 11. suplemento (Simposio sulla Classificazione della Acque salmastre. En Bulger, J., Hayden, P., Monaco, E., Nelson, M. y McCormick-Ray, G.1993. Biologically-Based Estuarine Salinity Zones Derived From a Multivariate Analysis. *Estuaries* 16(2):311-322.

Anyakora, C., Ogbeche, A., Palmer, P., Coker, H. 2005. Determination of polynuclear aromatic hydrocarbons in marine samples of Siokolo Fishing Settlement. *Journal of Chromatography* 1073 (1-2): 323-330.

Arias, A., Marcovecchio, J., Freije, R., Ponce, G. V. y Botello, V. A. 2010. Análisis de fuentes y toxicidad equivalente de sedimentos contaminados con PAHs en el estuario de Bahía Blanca, Argentina. *Hidrobiológica* 20(1):41-56.

Arriaga, L., Aguilar, V., Alcocer, J. 2002. Laguna de Términos-Patanos de Centra. En: Arriaga, L., Aguilar, V. y Alcocer, J. 2002. Aguas continentales y diversidad biológica de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

Ayala-Pérez, L.A., Ramos-Miranda, J y Flores-Hernandez, D. 2003. La comunidad de peces de la Laguna de Términos: estructura actual comparada. *Revista de Biología Tropical* 51(3-4): 783-793.

ATSDR (Agencia para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 1995. Resumen de salud pública. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP). departamento de salud y servicios humanos de los E.E.U.U www.atsdr.cdc.gov/es

Bach, L., Calderón, R., Cepeda, M.F. Oczkowski, A., Olsen, S.B., Robadue, D. 2005. Resumen del perfil de primer nivel del sitio Laguna de Términos y su cuenca, México. Coastal Resources Center, University of Rhode Island. Narragansett. 1-29 pp.

Baumard, P., Budzinsky, H., Michon, Q., Garrigues, P., Burgeot, T. y Bellocq, T. 1998. Origin and bioavailability of PAHs in the Mediterranean Sea from mussel and sediment records. *Estuarine Coastal & Shelf Science* 47: 77-90.

Becerra, T. N. C. 1984. Determinación de la concentración de hidrocarburos en *Crassostrea virginica* en la Laguna de Términos, Campeche. Tesis Profesional Facultad de Ciencias, UNAM.

Bellas, J., Saco, L., Nieto, O., Beiras, R. 2008. Ecotoxicological evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbons using marine invertebrate embryo-larval bioassays. *Marine Pollution Bulletin* 57: 493-502.

Blanco, C., Prego, R., Azpiróz, M., Domínguez, I. 2006. Caracterización de sedimentos en la ría de Laxe y su relación con el vertido del prestige. *Ciencias Marinas* 2B (32): 429-437.

Botello, A. V. 1978. Variación de los parámetros hidrológicos en las épocas de sequía y lluvias (mayo y noviembre de 1974) en la Laguna de Términos, Campeche, México. *Anales del Instituto de ciencias del mar y limnología (UNAM)* 5:159-178.

Botello, A. V. 1979. Niveles actuales de hidrocarburos fósiles en ecosistemas estuarinos del Golfo de México. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM)* 6:7-14.

Botello, A. V. 1980. Cuantificación de un derrame petrolero ocurrido en la Laguna de Términos, Campeche, México, 1976. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM)* 7:169-176.

Botello, A. V. y Ponce, G. V. 1993. Contaminación de lagunas costeras. *Serie Grandes Temas de la Hidrobiología* I: 112-118.

Botello, A. V. y Calva, B.L. 1998. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Pueblo Viejo, Tamiahua and Tampamachoco lagoons in the northern Gulf of Mexico. *Bulletin Environmental Contamination & Toxicology* 60(1):96-103.

Botello, A. V. Calva, B. L. y Ponce, G. V. 2001. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from coastal lagoons of Veracruz State Gulf of México. *Bulletin Environmental Contamination & Toxicology* 67:889-897.

Botello A.V., Villanueva S., Díaz G., Pica Y. 1995. Contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y organismos del Puerto de Salina Cruz, Oaxaca, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 11(1), 21-30.

Bricker, S.B., Longstaff. B., Dennison, W., Jones, A., Boicourt, K., Wicks, C., Woerner, J. 2008. Effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries: a decade of change. *Harmful Algae* 8(1):21-32.

Bucheli, T.D., Blum, F., Desaulles, A. Y Gustafsson, Ö. 2004. Polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon and molecular markers in soils of Switzerland. *Chemosphere* 56:1061-1076.

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.

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

Calamari, D. 2002. Assessment of persistent and bioaccumulating chemicals in the aquatic environment. *Toxicology* 181-182:183-186.

Calva, B. L. G. 1997 Contaminación por hidrocarburos fósiles en lagunas costeras. *Contactos* 3a. Época 21:16-22.

Calva, L.G. y Botello, A.V. 1999. Polycyclic aromatic hidrocarbons in sediments from Sontecomapan Lagoon, Veracruz, México. *Hidrobiológica* 9(1): 45-52.

Calva, B. L. Pérez, R. A. y Márquez, G. A. 2006. Contenido de carbono orgánico y características texturales de los sedimentos del sistema costero lagunar Chantuto-Panzacola, Chiapas. *Hidrobiológica* 16(2): 127-136.

Calva, B. L. y Torres, A. M. 2011b. Textura de sedimentos y carbono orgánico en el sistema costero lagunar Alvarado, Veracruz. *Contactos* 81:11-16.

Calva, B. L. y Torres, A. M. 2011a. Carbono orgánico y características texturales de sedimentos en áreas del pasto marino *Thalassia testudinum* en ecosistemas costeros del sureste del Golfo de México. *Universidad y Ciencia* 27(2):133-144.

Carvalho, P., Villeneuve, J., Cattini, C., Rendón, J. y Mota de Oliviera, J. 2009. Pesticide and PCB residues in the aquatic ecosystems of Laguna de Terminos, a protected area of the coast of Campeche, Mexico. *Chemosphere* 74:988-995.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2000. Áreas Naturales Protegidas de México. México, D.F. 64 p.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2003. Ley federal de derechos y normas aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Diario Oficial de la Federación, México. Enero 2:173-191.

Comisión Nacional del Agua (CNA). Precipitación media estatal 2008 y 2009
www.cna.gob.mx

Contreras, E. F. 2010. Ecosistemas costeros mexicanos una actualización. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, 514 pp.

Contreras, E. F y Warner B. G. 2004. Ecosystem characteristics and management considerations for coastal wetlands in Mexico. *Hydrobiologia* 511:233-245.

Collavani, F., Zonta, R., Bettioli, C., Fagarazzi, O.E., Zaggia, L. 2001. Metal and nutrient loads from the drainage basin to the Venice lagoon. In: Ministero Lavori Pubblici, Conzorcio Venezia Nuova, (eds) Determination of the pollutant load discharged into the Venice lagoon by drainage basin. Edited by CNR Istituto per lo studio della dinamica delle Grandi masse, Venice, July 2001, 48-45 pp.

Cram, S., Ortiz, R., y Paéz, R. Hidrocarburos aromáticos policíclicos, p. 173-199. In: A. F. Bremauntz, M. Yarto-Ramírez, y J. Castro-Díaz (Eds.). Las sustancias tóxicas persistentes en México. Instituto Nacional de Ecología, 257 pp.

Culotta, L., de Stefano, C., Gianguzza, A., Mannino, M. R., Orecchio, S., 2006. The PAH composition of surface sediments from Stagnone coastal lagoon, Marsala (Italy). *Marine Chemistry* 99: 117-127.

Cutz, V.F y Rendón-Von Osten, J. 2007. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's). *JAINA Boletín Informativo* 16(1):1-5.

Dabestani, R. & Ivanov, I. 1999. A compilation of physical, spectroscopic and photophysical properties of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Photochemistry and Photobiology* 70(1): 10-34.

Das, A., Justic, D., Swenson, E. 2010. Modeling estuarine-shelf exchanges in a deltaic estuary: Implications for coastal carbon budgets and hypoxia. *Ecological Modeling* 22(7):978-985.

David, T.L y Kjerfve, B. 1998. Tides and currents in a two-inlet coastal lagoon: laguna de Términos, México. *Continental Shelf Research* 18:1057-1079.

De Luca, G., Furesi, A., Leardi, R., Micera, G., Panzanelli, A., Piu, P. C., Sanna, G. 2004. Polycyclic aromatic hydrocarbons assessment in the sediments of the Porto Torres Harbor (Northern Sardinia Italy). *Marine Chemistry* 86:15-32.

Díaz-de-León, A., Álvarez, P., Mendoza, R., Fernández, J., Ramírez, O.M. 2004. Hacia un manejo integrado del Gran Ecosistema Marino del Golfo de México. En: Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. Margarita Caso, Irene Pisanty y Ezequiel Ezcurra (Compiladores), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Instituto de Ecología A.C. and Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Mexico. 937-1002 pp.

Dickhut. R., Canuel. E., Gustafson.K., Liu.K., Arzayus.K., Walker.S., Edgecombe, G., Gaylor, M., Macdonald, E. 2000. Automotive sources of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons associated with particulate matter in the Chesapeake Bay region. *Environmental Science & Technology* 34:4635-4640.

Dong, T. y Lee, B. 2009. Characteristics, toxicity, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Ulsan, Korea. *Chemosphere* 74:1245-1253.

DOF, Diario Oficial de la Federación. 2010. Acuerdo mediante el cuál se da a conocer la actualización de la Carta Nacional Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa, México), 2 de diciembre de 2010. Segunda sección, 101-102 pp.

Eatherall, A., Naden, S, y Cooper, M. 1998. Simulting carbon flux to the estuary: the first step. *Science of the Total Environment* 210(6):519-533.

Environmental Health Criteria, No. 202 WHO, Geneva (1998).

Environmental Protection Agency (EPA). 2002. Mid Atalntic Integrated Assessment (MAIA) Estuaries 19978-1998: Summary Report. EPA/620/r-02/003. 115p.

Fang, M.D., Lee, C.L., Yu, C.S. 2003. Distribution and source recognition od polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of Hsin-ta Harbour and adjacent coastal areas. Taiwan. *Marine Pollution Bulletin* 46:941-953.

Flemming, B.W. 2000. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams. *Continental Shelf Research* 20(10-11): 1125-1137.

Flores, V.F., González, F.F., Ramírez, F.F., Amezcua, L.A., Yañez, A.M., Álvarez, R.M y Day, J.W. 1990. Mangrove ecology, aquatic primary productivity, and fish community dynamics in the Teacapán-agua Brava Lagoon-Estuarine system (Mexican Pacific). *Estuaries* 13:219-230.

Folk, R. L. 1974. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Company. Austin Texas. 182 p.

Fuentes-Yaco, C., León, D., Monreal-Gomez, M. y Vera-Herrera, F. 2001. Environmental forcing in a tropical estuarine ecosystem: The Palizada River in southern Gulf of Mexico. *Marine and Freshwater Research*. 52:735-744.

Gamito, S. 2008. Three main stressors acting on the Ria Formosa lagoonal system (sothern Portugal): Physical stress, organic matter pollution and land-ocean gradient. *Estuarine. Coastal and Shelf Science* xx:1-11.

Gaudette, H., Fligh W., Toner L. y Folger, D. 1974. An Inexpensive tritration method for determination of organic carbon in recent sediments. *Journal Sedimentology & Petrology* 44(1):249-253.

Gobierno del Estado de Campeche. 2004. Propuestas del Estado de Campeche a la Ley de Coordinación Fiscal. Campeche, Camp. Mayo: 1-26 pp.

Gobierno del Estado de Campeche. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. 2005.
<http://e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/campeche/Mpios/04007a.htm>

Gold-Bouchot, G., Silva-Herrera, T. Y Zapata-Pérez, O. 1993. Chlorinated pesticides in the Río Palizada, Campeche, México. *Marine Pollution Bulletin* 26(11): 648-650.

Gold-Bouchot, G., Noreña-Barroso, E., Zapata-Pérez, O. 1995. Hydrocarbon concentrations in the American oyster, *Crassostrea virginica*, in Laguna de Términos, Campeche, México. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 54:222-227.

Gold-Bouchot, G., Zapata-Pérez, O., Ceja-Moreno, V., Rodríguez- Fuentes, G., Simá-Álvarez, R., Aguirre-Macedo, M., Vidal-Martínez; V. 2007. Biological effects of environmental pollutants in america oyster, *Crassostrea virginica*: a field study in Laguna de Terminos, Mexico. *Intenational Journal of Environment and Health* 1(2):171-184.

Grenz, C., Álvarez, C.S, Calva, B.L., Chifflet, S., Conan, P., Denis, L., Douillet P, Renaud Fichez, Gutierrez, F., Origel, M., Pinazo, C., Solis, V., Torres, A.R. 2010. JEST. Joint Environmental Study of terminos Lagoon. Informe Final. IRD (Institute de Recherche pour le Développement), Francia-Universidad Autónoma Metropolitana. 68p.

Grice, K., Nabbefeld, B., Maslen, E. 2007. Source and significance of selected polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments (Hovea-3 well, Perth Basin, Western Australia) spanning the Permian-Triassic boundary. *Organic Geochemistry* 38:1795-1803.

Gutiérrez, A. M., Fuente, M. G., Cervantes, A. M. Biomasa y densidad de dos especies de pastos marinos en el sur de Quinta Roo, México. *Revista Biología Tropical* 48(2-3):313-316.

Guzmán, V. A, Mello, M. 1999. Origin of oil in the Sureste Basin, Mexico. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 83:1068-1095.

Hernández, A., Hernández, P. Y Gordillo, A. 2006. Manual para la evaluación de impactos ambientales. INNCIVE Ediciones, Madrid, 770 p.

Hong, H., Xu, L., Zhang, L., Chen, J., Wong, Y., Wan, T. 1995. Environmental fate and chemistry of organic pollutants in the sediment of Xiamen Harbor and Victoria Harbor. *Marine Pollution Bulletin* 31: 229-236.

Huang, Y., Lee, Ch., Fang, M. 2011. Distribution and source differentiation of PAHs and PCBs among size and density fractions in contaminated harbor sediment particles and their implications in toxicological assessment. *Marine Pollution Bulletin* 62(2):432-439.

Hunt, M.J. 1996. Petroleum geochemistry and geology. Second Edition. W.H. Freeman and Company. E.U.A. 617 p.

Hwang, H.M. Wade, T.L. y Sericano, J.L. 2003. Concentrations and source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in pine needles from Korea, Mexico, and United States. *Atmospheric Environmet* 37:2259-2267.

IARC. 2012. Internacional Agency for Research on Cancer
[http:// monographs.iarc.fr/ENG/Classification/ClassificationsAlphaOrder.pdf](http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/ClassificationsAlphaOrder.pdf)

INE, 1997. Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos México. México, D.F. 201p.

Jaward, F. M., Alegría, H. A., Galindo, R. J., Hoare, A. 2012. Levels of PAHs in the waters, sediments, and shrimps of estero de Urias, an estuary in México, and their toxicological effects. *The Scientific World Journal* 1-9.

Jiang, Y., Wang, X., Wang, F., Jia, Y., Wu, M., Sheng, G., Fu, J. 2009. Levels, composition profiles and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil of Shanghai, China. *Chemosphere* 75(8):1112-1118.

Jiao, Y. 2009. Regime shift in marine ecosystems and implications for fisheries management, a review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 19:177-191.

Johnson, R.B., Olivero, V.J., Lu, J., Guette, F. J., Baldiris, A.R., O'Byrne, I., Aldous, K., Addink, R., Kannan, K. 2008. Polycyclic aromatic hydrocarbons and their hydroxylated metabolites in fish bile and sediments from coastal waters of Colombia. *Environmental Pollution* 151(3):452-459.

Jones, K. C. y de Voogt, P. 1999. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science. *Environmental Pollution* 100:209-221.

Kamal, Z., Tarek, O., Mohamed, H., Mohamed, A. 2007. Distribution and sources of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments, fish and bivalves of Abu Qir Bay (Egyptian Mediterranean Sea). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 78:373-379.

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

Kim, .B., Maruya, K.A., Lee, F., Lee, H., Kohn, C.H. y Tanabe, S. 1999. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Kyeonggi Bay, Korea. *Marine Pollution Bulletin* 38:7-15.

Kjerfve, B. 1986. Physical flow processes in Caribbean waters over a range of scales. In: Caribbean Coastal Marine Productivity. Marine Science 41. UNESCO, Paris. 38-47 pp.

Koss, G., Tesseraux, I. 1999. Hydrocarbons. In Toxicology. H, Marquardt, S.G. Schafer, R. McClellan, F. Welsh (Eds.). Academic Press California 603-609 pp.

Lankford, R.R. 1977. Coastal lagoon of Mexico. Their origin and classification. En: Wiley, M. (ed.) *Estuarine Processes*. Academic Press Inc. 182-215.

Lara, D. A., Villalobos, Z. G., Rivera, A. E. 1990. Catálogo bibliográfico de la región de la Sonda de Campeche. SEP-Universidad Autónoma de Campeche. Epomex Serie Científica 1.161p.

Larsen, R. y Baker, J. 2003. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods. *Environmental Science & Technology* 37:1873-1881.

Lee, H.J., Shim, W.J., Lee, J., Kim, G.B. 2011. Temporal and geographical trends in the genotoxic effects of marine sediments after accidental oil spill on the blood cells of striped beakperch (*Oplegnathus fasciatus*). *Marine Pollution Bulletin* 62:2264-2268.

Li K., Christensen E.R., Van Camp R.P., Imamoglu I. 2001. PAHs in dated sediments of Ashtabula River, Ohio, USA. *Environmental Science and Technology* 35:2896-2902.

Libes, S.M. 1992. An Introduction to Marine Biogeochemistry, John Wiley and Sons, Inc. New York, U.S.A. 734 p.

Long, E.R., Macdonald, D.D., Smith, S.I. y Calder, F.D. 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Manage* 19(1):81-97.

Lotze, H.K. 2010. Historical reconstruction of human-induced changes in US estuaries. *Oceanography and Marine Biology an Annual Review* 48:267-338.

Magi, E., Bianco, R., Ianni, C., Di Carro, M. 2002. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the Adriatic Sea. *Environmental Pollution* 199:91-98.

Maskaoui, K. & Hu, Z. 2009. Contamination and ecotoxicology risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in Shantou coastal waters, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 82(2): 172-178.

Mastandrea, C. Chichizola, C. Ludueña, B., Sánchez, H., Álvarez, H. y Gutierrez, A. 2005. Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores biológicos. *Acta Bioquímica Clínica latinoamericana* 39(1):27-36.

McBride, M.B. 1994. Environmental Chemistry of Soils. Oxford University Pres. 406 p.

Méndez, M.B.A. 2012. Evaluación de la contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos recientes y moluscos (bivalvos) en el sistema lagunar La Grande-La Chica, Veracruz, México. Tesis de Maestría, UAM-I.

Menzie, C., Potocki, B. y Santodonato, J. 1992. Exposure to carcinogenic polycyclic hydrocarbons in the environment. *Environmental Science & Technology* 26:1278-1284.

Millero, F.J. 1996. *Chemical Oceanography*. CRC Press. E.U.A. 469p.

Nadal, M., Schuhmacher, M., Domingo, J.L. 2004. Levels of PAH in soils and vegetation samples from Tarragona Country, Spain. *Environmental Pollution* 132:1-11.

Neff, J.M. 1979. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the aquatic environment: sources, fates and effects biological. London, UK: Applied Science Publishers, 262 p.

Nikolaou, A., Kostopoulou, M., Lofrano, G., Meric, S. 2009. Determination of PAHs in marine sediments: analytical methods and environmental concerns. *Global Nest Journal* 11(4):391-405.

Nigro, M., Frenzilli, G., Scarcelli, V., Regoli, F. 2002. Induction of DNA strand breakage and apoptosis in the eel *Anguilla anguilla*. *Marine Environmental Research* 54:517-520.

Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001, que determina las especies y subespecies de flora y fauna silvestre terrestre y acuática en peligro de extinción, amenazados, raros y las sujetas a protección especial, y que establece especificaciones para su protección.

Noreña-Barroso, E., Gold-Bouchot, G., Zapata-Pérez, O. y Sericano, J. 1999. Polynuclear aromatic hydrocarbons in american oysters *Crassostrea virginica* from the Terminos Lagoon, Campeche, Mexico. *Marine Pollution Bulletin* 38(8):637-645.

Páez-Osuna, F., Valdez, S., Alexander, H. y Fernandez, H. 1987. Trace metals in the fluvial system of Terminos Lagoon México. *Marine Pollution Bulletin* 18(6):294-297.

Panigrahi, S.N. 2006. Seasonal variability of phytoplankton productivity and related physio-chemical parameters in the Chilika lake and its adjoining sea. PhD. Thesis, Berhampur University, India, 1-286 pp.

Parks Watch.2003. Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos. http://www.parkwatch.org/parkprofiles/pdf/ltpa_spa.pdf.

Pereira, W.E., Hosterrler, F.D., Rapp, J.B. 1996. Distribution and fate of chlorinated insecticides 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.

Peterson, C.H., Rice, S.D., Short, J.W., Esler, D., Bodkin, J.L. Ballachey, B.E., Irons, D.B. 2003. Long-term ecosystem response to the Exxon Valdez oil spill. *Science* 302:2082-2086.

Pietzsch, R., Sambasiva, R.P., João, M.T. 2010. Polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments from a subtropical estuary in Brazil. *Marine Chemistry* 118:56-66.

Pinto. R., Patrício. J., Neto. J. M., Salas. F., Marques. J. C. 2010. Assessing estuarine quality Under the ecosystem services scope: ecological and socioeconomic aspects. *Ecological Complexity* 7(3):389-402.

Ponce, G. V. y Botello, A. V. 1991. Aspectos geoquímicos y de contaminación por metales pesados en la laguna de Términos, Campeche. *Hidrobiológica* 1(2):1-10.

Ponce, V. G. y Botello A.V. 2005. Niveles de hidrocarburos en el Golfo de México, p.269-298. En: A.V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). Golfo de México contaminación e impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología 696 p.

Poppe, J.L., Knebel, H.J., Mlodzinska, Z.J., Hastings, M.E., Seekins, B.A. 2000. Distribution of superficial sediment in Long Island Sound and adjacent waters: texture and total organic carbon. *Journal of Coastal Research* 16(3):567-574.

Preston, M.R. y Prodduturu, P. 1992. Tidal variations of particulate carbohydrates in the Mersey Estuary. *Estuarine, Coastal and Marine Science* 34:37-48.

Pronatura Península de Yucatán. 2005. Laguna de Términos: Un Estuario de Importancia Local, Regional y Nacional. María Fernanda Cepeda (Compiladora), CRC-URI, TNC-Programa Sureste de México, TNC-Gulf of Mexico Program y TNC – Sustainable Waters. Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, Comisión Nacional del Agua y USAID. 3-12 pp.

Ray, S., Dunn, B.P., Payne, J.F., Fancey, L. Helbig, R., Béland, P. 1991. Aromatic DNA-Carcinogen adducts in beluga whales from the Canadian Arctic and Gulf of St Lawrence. *Marine Pollution Bulletin* 22(8): 392-396..

Readman, J.W., Filman, G.I., Bartocci, J., Villeneuve J.P., Catinni, C. Y Mee, L.D. 2002. Petroleum and PAH contamination of the Black Sea. *Marine Pollution Bulletin* 44:48-62.

Ridgway, J. y Shimmiel, G. 2002. Estuaries as repositories of historical contamination and their impact on shelf seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 55(6):903-928.

Rivera, A.E. y Borges, S.G. 2006. El gran ecosistema marino del Golfo de México: Perspectivas para su manejo. *Jaina Boletín Informativo* 16(1):30-48.

Robinet, T.T. y Feunteun, E.E. 2002. Sublethal effects of exposure to chemical compounds: a cause for the decline in Atlantic eels? *Ecotoxicology* 11:265-277.

Robadue, D., Oczkowski, A., Calderón, R., Bach, M. y Cepeda, F. 2004. Characterization of the Región of the Terminos Lagoon, Campeche, México: Draft for discussion. Narragansett, RI: Coastal Resources Center, University of Rhode Island. PLUS Calderón, R. (2004). Draft 1 Siter Profile: The Laguna de Términos, México. Corpus Christi, TX: The Nature Conservancy.

Sanders, M., Sivertsen, S., Scott, G. 2002. Origin and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surficial sediments from the Savannah River. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 43:438-448.

Saunders, C.R., Ramesh.A., Shockley, D.C. 2002. Modulation of neurotoxic behavior in F-344 rats by temporal disposition of benzo(a)pyrene. *Toxicology Letters* 129:33-45.

Siddiqi, H.A., Ansari, F.A., Munshi, A.B. 2009. Assesment of hydrocarbons concentration in marine fauna due to Tasman Spirit oil spill along the Clifton beach at Karachi coast. *Environmental Monitoring and Assessment* 148:139-148.

Simpson, C., Mosi, A., Cullen, W., Reimer, K. 1996. Composition and distribución of polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in surficial marine sediments from Kitimat Harbor, Canada. *Science of the Total Environment* 181:265-278.

Soclo, H.H, Garrigues, P., Ewald, M. 2000. Origen of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in coastal marine sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France). *Marine Pollution Bulletin* 40:387-396.

Soto, L., Garcáí, S., Veneroni, D. 2004. Ambientes influidos por emanaciones naturales de hidrocarburos y gas en el suroeste del Golfo de México. *Universidad y Ciencia* Número Especial I: 51-58.

Sprovieri, M., Feo, M.L., Prevedello, L., Salvagio, M.D., Sammartino, S., Tamburrino, S. 2007. Heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in surface sediments of the Naples harbour (southern Italy). *Chemosphere* 67:998-1009.

Stephen, V., Smith, V., Silvia, E., Ibarra, O., Díaz, C. 2008. Sediment organic carbon in Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Estuaries and Coasts* 31:719-727.

Tam, N.F, Ke, L., Wang, X.H., Wong, YS. 2001. Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of mangrove swamps. *Environmental Pollution* 114:225-26.

Taylor, M.D., Klaine, S.J., Carvalho, F.P., Barcelo, D., Everaarts, J. 2003. Pesticide Residues in Coastal Tropical Ecosystems. Distribution, Fate and Effects. Taylor & Francis Publ., CRC Press, London. 576 p.

Troisi, G.M., Bexton, S., Robinson, I. 2006. Ployaromatic hydrocarbon and PAH metabolite burdens in oiled common guillemots (*Uria aalgaë*) stranded on the east coast of England (2001-2002). *Environmental Science & Technology* 40:7938-7943.

UNEP/IOC/IAEA (United Nations Environment Programme). 1992. Determination of petroleum hydrocarbons in sediments. References Methods for Marine Pollution Studies. 75 p.

Vagi, M.C., Kostopoulou, M.N., Petsas, A.S., Lalousi, M.E., Rasouli, Ch y Lekkas, T.D. 2005. Toxicity of organophosphorous pesticides to the marine alga *Tetraselmis suecica*. *Global Nest Journal* 7(2) 222-227.

Valtierra, M. 2001. Cocodrilos Mexicanos: Gigantes acorazados sobrevivientes del pasado. *Especies* 10:3-7.

Varanasi, U., Stein, J.E., Nishimoto, M. 1989. Biotransformation and disposition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in fish. In: Varanasi, U. (Ed.), *Metabolism of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Aquatic Environment*. CRC Press, Boca Raton, FL, 94-149 pp.

Vázquez, F., Sánchez, M., Virender, K. 1993. Trace metals in the oyster *Crassostrea virginica* of the Terminos Lagoon, Campeche, Mexico. *Marine Pollution Bulletin* 26(7):398-399.

Vivés, I., Grimalt, J.O., Guitart, J. 2001. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos y la salud humana. *Apuntes de Ciencia y Tecnología* 3:45-51.

Wang-Li, M., Yin-Fan, L., Hong, Q., De-Zhi, S., Li-Yan, L., De-Gao, W. 2010. Seasonal variations of sources of polycyclic aromatic Hydrocarbons (PAHs) to northeaestern urban city, China. *Chemosphere* 79:441-447.

Weber, L.P., Janz, D.M. 2001. Effect of beta-naphthoflavone and dimethylbenz(a)-anthracene on apoptosis and HSP70 expression in juvenile channel catfish (*Ictalurus punctatus*) ovary. *Aquatic Toxicology* 54:39-50.

Wei, W., Min-Juan, H., Yuan, K., Hong-sheng, W., Leung,A., Kwai,Ch.,Ming,H. 2011. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban surface dust of Guangzhou, China: Status, sources and human health risk assessment. *Science of the Total Environment* 409:4519-4527.

WFP (World Food Programmme) Centroamérica. Fenómeno El Niño. Boletín No. 1, Nov 2009.

http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/C25E65EFB12264DB8525767F007B0719-Informe_completo.pdf

White, P.A. 2002. The genotoxicity of prioritary polycyclic aromatic hydrocarbons in complex mixtures. *Mutation Research* 515:85-89.

Witt, G. 1995. Polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments of the Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin* 31: 237-248.

Woo, S., Kim, S., Yum, S., Yim, U., Lee, T. 2006. Cometassay for the detection of genotoxicity in blood cells of flounder (*Paralichthys olivaceus*) exposed to sediments and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Marine Pollution Bulletin* 52(12):1768 -1775.

Xiao, J., She, J., Bi, X., Guo, Y., Jia, M., Eddy, Y. 2008. Distribution, source apportionment, and transport of PAHs in sediments from the Pearl River delta and Northern south China Sea. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 55:11-20.

Yang, G.P. 2000. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the South China Sea. *Environmental Pollution* 108:163-171.

Yañez, A.A., Lara, D. A., Sánchez, G. P., Vargas, M.M., García, A.M., Álvarez, G.H., Tapia, G.M., Flores, H. D., Amescua, L.F. 1985. Ecología y evaluación de comunidades de peces en ecosistemas costeros: Interacciones estuario-plataforma en el sur el Golfo de México. 22:475-498. En: A. Yañez-Arancibia (Ed) Fish Community Ecology in Estuaries and Coastal Lagoons. Towards an Ecosystems Integration. UNAM press México, 654 p.

Yañez, A. A y Day, J. W. 2005. Ecosystem Functioning: The Basis for Sustainable Management Of Términos Lagoon, Campeche, Mexico. Jalapa, Veracruz, Mexico. Institute of Ecology A.C. 77p.

Yunker, M.B, McDonald, R., Vingarzan, R., Mitchell, R., Goyette, D., Sylvestre, S. 2002. PAHs in the Fraser River Basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic Geochemistry* 33:489-515.

Zhang, J., Cai, I. Yaun, D. y Chen, M. 2004. Distribution and sources of polynuclear aromatic hydrocarbons in Mangrove surficial sediments of Deep Bay, China. *Marine Pollution Bulletin* 49(5-6):479-486.

Zhang, X., Christensen, E., Gin, M. 1993. Polycyclic aromatic hidrocarbons in dated sediments from green Bay and Lake Michigan. *Estuaries* 16(3B):638-652.