



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

00361
24
2e

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

" EVALUACION DE LOS NIVELES DE METALES
PESADOS E HIDROCARBUROS AROMATICOS
POLINUCLEARES EN LA ZONA COSTERA DEL
GOLFO DE MEXICO ."

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS
(B I O L O G I A)
P R E S E N T A :
BIOL. MARIA GUADALUPE PONCE VELEZ



DIRECTOR DE TESIS:
DR. ALFONSO VÁZQUEZ BOTELLO

MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUCCIÓN	3
2 ANTECEDENTES	7
2.1 METALES PESADOS	7
2.2 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES	9
3 OBJETIVOS	12
4 DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO	13
4.1 VERACRUZ Y TABASCO	13
4.2 TAMAULIPAS	18
5 MATERIALES Y MÉTODOS	22
5.1 METALES PESADOS	22
5.1.1 CONCENTRACIÓN TOTAL	22
5.1.2 CONCENTRACIÓN BIODISPONIBLE	25
5.2 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES	25

5.3 DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO	29
5.4 DETERMINACIÓN DE CARBONATOS	29
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
6.1 METALES PESADOS	31
6.1.1 CONCENTRACIÓN TOTAL	31
6.1.1.1 PLATAFORMA CONTINENTAL DE VERACRUZ	31
6.1.1.2 PLATAFORMA CONTINENTAL DE TABASCO	45
6.1.1.3 PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS	56
6.1.2 CONCENTRACIÓN BIODISPONIBLE	73
6.1.2.1 PLATAFORMA CONTINENTAL DE VERACRUZ	73
6.1.2.2 PLATAFORMA CONTINENTAL DE TABASCO	76
6.1.2.3 PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS	80
6.2 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES	91
6.2.1 PLATAFORMA CONTINENTAL DE VERACRUZ	91
6.2.2 PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS	117
7 CONCLUSIONES	134
8 LITERATURA CITADA	138

DEDICATORIA

A Hugo, mi esposo por su dedicación y profesionalismo para mejorar este manuscrito, por compartir conmigo los eventos que construyeron este esfuerzo y más que nada por realizar juntos un gran sueño: el fruto de la vida, **NUESTRA HIJA.**

AGRADECIMIENTOS

Deseo manifestar mi más profundo agradecimiento al Dr. Alfonso Vázquez Botello por haber dirigido este trabajo, pero sobre todo por su invaluable apoyo y amistad durante todos estos años.

Expreso mi reconocimiento a los miembros del jurado Dra. Guadalupe Judith De La Lanza Espino, Dr. Arturo Carranza Edwards, Dra. Ma. Luisa Machain Castillo, M. en C. Alicia de la Luz Durán González y Dra. Marisa Mazari Hiriart, por su asesoría, recomendaciones, acertadas críticas y consejos para el mejoramiento de esta contribución.

Agradezco al Dr. Gilberto Díaz González sus enseñanzas, el compartir conmigo su experiencia analítica y principalmente su respaldo para el desarrollo de esta investigación así como su gran amistad y compañerismo.

A la M. en C. Yolanda Pica Granados y a las Biólogas Aurora González Fierro y Leticia Ríos Quiroz por su apoyo y asistencia en los análisis ambientales y de forma preponderante agradezco su calidez, armonía y sincera amistad.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todo el personal del Laboratorio de Contaminación Marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, por su amistad y apoyo para lograr un ambiente de trabajo cordial y dinámico sin el cual no es posible la realización de cualquier investigación.

Al Ing. Aram Narinian Valenzuela por su asesoría y apoyo en la impresión final del manuscrito además de su disposición y amistad.

RESUMEN

El presente trabajo fue desarrollado en la plataforma continental de Veracruz, Tabasco y Tamaulipas durante las campañas oceanográficas OGMEX 1, 2, 3, 4, 7 y 8 de 1987-1989 en el Golfo de México. El objetivo principal fue evaluar los niveles de Metales Pesados en su concentración total y biodisponible, así como los Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (HAP); de forma complementaria se determinó el contenido de materia orgánica y carbonatos para conocer la interacción que pudiera existir entre estos constituyentes sedimentológicos y los contaminantes analizados.

Los metales pesados en su concentración total (en $\mu\text{g g}^{-1}$) se comportaron de la forma siguiente: Zn (63.1) > Cr (51.4) > Ni (45.2) > Cu (16.7) > Co (14.0) > Pb (8.6) > Cd (6.0); los niveles más altos de Ni, Zn y Cr se registraron en la plataforma continental de Tabasco, los de Cu, Co y Pb fueron para el sur de Veracruz y el Cd para Tamaulipas. Solamente existió una relación estadística significativa entre el Pb y los carbonatos de los sedimentos de Tamaulipas. Ningún elemento se correlacionó con la materia orgánica. En su fracción biodisponible, los metales pesados estudiados presentaron el patrón siguiente: Pb (8.0) > Zn (6.3) > Ni (6.1) > Co (4.4) > Cr (3.3) > Cu (2.4) > Cd (2.0); las concentraciones biodisponibles más altas de Co, Ni, Zn, Cr y Cd se registraron en Tabasco y para Cu y Pb fue en el sur de Veracruz. Las formas biodisponibles de Co, Cd, Cu, Cr y Ni se asociaron con el contenido de carbonatos solamente en Tamaulipas, mientras que en Tabasco, la única relación importante fue entre el Cd y los carbonatos. Entre los elementos evaluados tanto en su forma total como biodisponible, las mejores relaciones estadísticas fueron Ni-Cr, Cd-Co, Co-Cr y Cr-Zn manifestando mecanismos de adsorción similares entre estos elementos.

En Veracruz se obtuvo el valor total máximo de HAP con $92.5 \mu\text{g g}^{-1}$ seguido por Tamaulipas con un nivel de $75.5 \mu\text{g g}^{-1}$. Los hidrocarburos más abundantes a lo largo del estudio fueron: criseno, benzo(a)antraceno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, benzo(b)fluoranteno y pireno, dominando aquellos formados por 4, 3 y 5 anillos bencénicos, lo cual refleja principalmente un origen pirolítico y los compuestos son derivados de las actividades continentales, sin dejar de mencionar que la presencia de HAP ligeros, como el naftaleno, evidencia que provienen de derrames de petróleo recientes.

La circulación costera que existe en las regiones del sur del Golfo de México (Veracruz y Tabasco) es predominantemente sureste-suroeste y en el área de Tamaulipas sigue una dirección noreste-noroeste hacia los Estados Unidos; es esta dinámica la que contribuye a la distribución de los materiales que existen en sus aguas, entre ellos los contaminantes, provenientes del continente y aportados a la zona costera principalmente por los grandes sistemas fluvio-lagunares como el Grijalva-Usumacinta, Términos, Coatzacoalcos, Papaloapan, Madre, entre otros, así como lo generado en el Caribe Central.

ABSTRACT

This work was developed in the continental shelf of Veracruz, Tabasco and Tamaulipas during the oceanographic campaigns OGMEX 1, 2, 3, 4, 7 and 8 in 1987-1989 in the Gulf of Mexico. The main goal of this study was to evaluate levels of heavy metals in total and bioavailable concentration and also in polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). Complementary, contents of organic matter and carbonates were determined to know the possible interaction between these sedimentologic constituents and the analyzed pollutants.

Heavy metals in total concentration (in μgg^{-1}) showed the following behavior : Zn (63.1) > Cr (51.4) > Ni (45.2) > Cu (16.7) > Co (14.0) > Pb (8.6) > Cd (6.0); maximum levels of Ni, Zn and Cr were registered in the Tabasco's continental shelf, those of Cu, Co and Pb were found in the south of Veracruz and Cd for Tamaulipas. Only for the sediments of Tamaulipas there was a statistical significative relation between Pb and the carbonates. No element was correlated with organic matter. Heavy metals in their bioavailable fraction showed the following pattern : Pb (8.0) > Zn (6.3) > Ni (6.1) > Co (4.4) > Cr (3.3) > Cu (2.4) > Cd (2.0); specifically Co, Ni, Zn, Cr and Cd showed the maximum levels for this heavy metal fraction in Tabasco; similarly, Cu and Pb maximum levels arose in the south of Veracruz. Bioavailable forms of Co, Cd, Cu, Cr and Ni were associated with carbonate contents just in Tamaulipas; on the other hand, in Tabasco the unique important relation was between Cd and carbonates. Among the evaluated elements in total or bioavailable form the best statistical relations were Ni-Cr, Cd-Co, Co-Cr and Cr-Zn showing similar sorption mechanisms between them.

In Veracruz was obtained the maximum total value of PAH with $92.5 \mu\text{gg}^{-1}$, followed by Tamaulipas with a $75.5 \mu\text{gg}^{-1}$ level. The more abundant hydrocarbons along this study were : chrysene, benz(a)anthracene, benzo(k)fluoranthene, benzo(a)pyrene, benzo(b)fluoranthene and pyrene, prevailing those formed by 4, 3 and 5 aromatic (benzene) rings, this fact basically means a pyrolitic origin, and all of these compounds are due to continental activities; it is worthful to mention that the presence of light PAH such as naphthalene, means that they proceed from very recent oil spills.

The coastal circulation in the regions at the south of the Gulf of Mexico (Veracruz and Tabasco) is prevalingly southeast-southwest and in the Tamaulipas area it follows a northeast-northwestern direction to the United States; this dynamic contributes to the distribution of these materials in the sea water, including the pollutants proceeding from the continent and brought to the coastal zone by the great fluvial and lagoon systems such as the Grijalva-Usumacinta, Términos, Coatzacoalcos, Papaloapan, Madre, and also the contribution generated by the central Caribbean.

1 INTRODUCCIÓN

Las grandes regiones acuáticas como el Golfo de México, representan un potencial enorme de riquezas: energética, mineral, biológica, turística, entre otras. El Golfo de México se trata, sin lugar a dudas, de la mayor y más importante de las cuencas de aguas protegidas de la costa Atlántica del Continente Americano (Botello *et al.*, 1992). En él existe una combinación compleja de procesos tectónicos, costeros, depósitos fluviales por lo cual conforma una de las zonas estuarinas más valiosas de la tierra; en la costa estadounidense se han identificado 207 estuarios repartidos de la siguiente forma: Lousiana 43 %, Florida 26 %, Texas 19 %, Mississippi 6 % y Alabama 6 % (Thayler y Ustach, 1980); en el litoral mexicano se encuentran 23 grandes sistemas lagunares-estuarinos: Tamaulipas 41 %, Veracruz 19 %, Tabasco 3 % y Campeche 37 % (Contreras, 1988).

La dinámica oceanográfica de esta región caracterizada por la Corriente de Lazo que se genera a partir de la Corriente del Caribe y transporta materiales en sus aguas desde la zona ecuatorial, afecta la distribución de las masas de agua dentro del Golfo de México, así como la circulación costera del mismo. Las grandes descargas fluvio-lagunares presentes en este litoral como son el sistema Grijalva-Usumacinta, la Laguna de Términos, el río Coatzacoalcos, la Laguna Madre, entre otros, aportan de igual forma materiales tanto abióticos como biológicos hacia la zona oceánica adyacente cuya distribución está determinada en buena medida por las corrientes costeras y superficiales prevalecientes.

En el Golfo de México el crecimiento industrial ha ocasionado problemas de contaminación en su zona costera. Los metales pesados e hidrocarburos del petróleo son dos grupos de elementos y mezclas complejas que, dependiendo de

su concentración y su forma química, representan contaminantes potenciales y reales de nuestros litorales.

En años recientes el papel de los metales pesados en los problemas de contaminación ambiental se ha incrementado. Muchos de ellos se presentan de forma natural en el ambiente; en niveles bajos son esenciales para que los organismos acuáticos tengan un metabolismo normal. Sin embargo, los desechos industriales, urbanos y agrícolas han elevado estas cantidades naturales de metales en el medio acuático (OECD, 1975; Krishnaja *et al.*, 1987; Laws, 1993).

El inicio de las actividades de exploración y explotación petroleras en Tamaulipas durante la década de los 50's, así como el desarrollo de éstas en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche desde los 70's, han provocado un vertimiento de hidrocarburos y elementos asociados derivados de dichas maniobras hacia la zona costera inmediata contribuyendo al deterioro de la misma.

Las características de los metales pesados y los hidrocarburos han sido descritas ampliamente en la literatura (Speers y Whitehead, 1969; LaFlamme y Hites, 1978; Neff, 1979; Förstner y Wittman, 1981; Salomons y Förstner, 1984; NRC, 1985) y solamente cabe señalar que ambos grupos una vez que alcanzan la zona costera, están sujetos a diversos procesos que pueden disminuirlos, transformarlos, favorecer su almacenamiento y distribución, entre los más comunes; en el Golfo de México las condiciones climatológicas y ambientales como las tasas de evaporación, las lluvias, los vientos intensos, la circulación costera predominantemente hacia el N-NW, el tipo de sedimentos que en su mayoría son lodos finos, forman parte del marco ambiental en el cual los metales pesados y los hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) se distribuyen.

En los sistemas acuáticos, particularmente los costeros, el papel que juega la materia orgánica en la adsorción de sustancias disueltas y/o particuladas como los

metales pesados y los HAP ha sido ampliamente estudiado ya que para el caso de los elementos traza se ha observado que particularmente son los ácidos fúlvicos los que intervienen de forma preponderante en el transporte de estos elementos en el medio acuoso, mientras que la fracción húmica es más relevante en el transporte y retención de los metales en las descargas sedimentarias debido a que su presencia en éstas es mayor (Jenne, 1976; Förstner y Wittman, 1981; Fergusson, 1990). Para los HAP se ha establecido en diferentes contribuciones que la mayoría de estos hidrocarburos presentes en el ambiente se derivan de la combustión incompleta de la materia orgánica a temperaturas altas (Suess, 1976); los HAP son más abundantes en la fracción particulada y una vez que llegan a los sedimentos del fondo, son persistentes y pueden acumularse en concentraciones altas siendo afines a los componentes orgánicos del mismo (Neff, 1979).

Debido a este comportamiento descrito en diversas ocasiones en la literatura y considerando que en la región costera del sur del Golfo de México drenan caudales tan importantes como el Grijalva-Usumacinta-Términos y en la porción norte Pánuco, Soto La Marina, Madre, aportando considerables cantidades de materiales en suspensión, puede suponerse que existan relaciones entre la materia orgánica del sedimento, los metales pesados y los hidrocarburos aromáticos polinucleares ahí presentes.

El tipo de sedimentos que existe en el fondo de un sistema acuático, influye sobre la acumulación de sustancias alóctonas. En el Golfo de México se han caracterizado diversas provincias morfotectónicas así como sedimentológicas. En el margen suroccidental de la Península de Yucatán y hacia el oeste se presentan arcillas y limos terrígenos, los cuales son arrastrados hacia la Bahía de Campeche por corrientes costeras; el sureste se caracteriza por sedimentos finos, lodos terrígenos, provenientes de los aportes fluviolagunares y pueden favorecer la residencia de materiales inorgánicos como los metales pesados y orgánicos como los hidrocarburos; en el noroeste del Golfo, los sedimentos son finos al igual que en la

porción sur (Carranza-Edwards y Aguayo-Camargo, 1992; Carranza-Edwards *et al.*, 1993).

En los sedimentos marinos se encuentran HAP acumulados a partir de la materia suspendida presente en la columna de agua donde están adsorbidos, a través de los procesos de sedimentación alcanzan el fondo marino por lo que permanecen con poca alteración durante periodos prolongados; la acumulación de estos compuestos puede ser significativa ya que sus niveles llegan a ser hasta 1,000 veces más altos que los presentes en el agua, principalmente aquellos aromáticos formados por 4 y 5 anillos bencénicos debido a su poca solubilidad y a su alto peso molecular (Neff, 1979). Además, cerca de los estuarios y de la plataforma continental adyacente se establecen centros industriales; estas regiones costeras se convierten en trampas eficientes de sedimentos, lo cual puede interferir con las descargas de los desechos provenientes de las diferentes actividades humanas (Kennish, 1992). Grandes cantidades de sedimentos se remueven de la zona costera para favorecer la navegación y son vertidos en el litoral o en alta mar contribuyendo de esta forma a que los contaminantes emerjan en lugares donde nunca llegarían por procesos naturales. Estas características de desarrollo urbano e industrial, así como un uso excesivo de la zona costera, son una realidad en el Golfo de México posibilitando la remoción y disponibilidad a partir de los sedimentos de sustancias potencialmente tóxicas como los metales pesados y los HAP.

El interés del presente trabajo fue evaluar el contenido de metales pesados e hidrocarburos aromáticos polinucleares en los sedimentos de la plataforma continental del sur y noroeste del Golfo de México, abarcando los litorales de Veracruz, Tabasco y Tamaulipas, así como estimar los niveles de materia orgánica y carbonatos para conocer la relación existente entre estos constituyentes sedimentarios y los contaminantes evaluados; además, con la información obtenida sobre la constitución de los HAP, discutir sus posibles fuentes de origen, su potencialidad tóxica y el riesgo que representan para el ecosistema costero.

2 ANTECEDENTES

2.1 METALES PESADOS.

El grupo de los metales pesados, oligoelementos, metales traza, o metaloides como es considerado por los diversos autores, ha sido estudiado desde diferentes puntos de vista en cuestiones de contaminación e impacto sobre los ambientes costeros. En el Golfo de México se han llevado a cabo diversas investigaciones encaminadas a evaluar la presencia de estos elementos en los diferentes compartimentos de los ecosistemas. De esta forma Páez-Osuna *et al.* (1987) detectaron la presencia de metales traza en los sistemas fluviolagunares que drenan a la Laguna de Términos, Campeche, ambiente muy importante del sur del Golfo de México. Encontraron que un gran contribuyente fluvial aporta a este sistema lagunar aproximadamente el 99 % de la materia suspendida y con ella la mayor proporción de Fe, Cu, Cd, y Co, lo cual provoca que esta zona lagunar sea rica en estos elementos y exporte parte de este material a la plataforma continental adyacente.

De la misma manera y dentro del campo de la contaminación marina, Botello y Villanueva (1988) realizaron un estudio sobre los procesos geoquímicos y de contaminación en un sistema estuarino del sur del Golfo de México a lo largo de 10 años; esta área se encuentra influenciada por las actividades petroleras y los autores comentan la tendencia que existe hacia una contaminación por petróleo así como por desechos urbanos. Ponen de manifiesto la incertidumbre sobre si los metales pesados han sufrido un incremento significativo de sus niveles debido a estas actividades.

Ponce (1988) en su trabajo sobre los niveles de metales pesados en sedimentos y ostiones de un sistema lagunar del sur del Golfo de México, hace referencia a estudios previos realizados en esta región mexicana desde la década de los 70's y

al realizar una comparación, observa que en esta área del Golfo está ocurriendo un proceso de contaminación por metales pesados principalmente de Cr y Pb derivados de las actividades humanas e industriales.

Rosales-Hoz *et al.* (1992) estudiaron la distribución de los metales en los sedimentos recientes del sureste del Golfo de México. Sus resultados sugieren que los sedimentos en esta área se mueven hacia el noreste (Veracruz) a partir de la zona de descarga de los ríos Grijalva y Usumacinta; de igual forma observaron que elementos como Fe, Mn, Zn, Ni y Cr provienen de estos ríos denotando un origen detrítico de tipo continental.

Una de las últimas revisiones realizadas sobre la presencia de metales potencialmente tóxicos en el litoral del Golfo de México y Mar Caribe es la que presentan Villanueva y Botello (1992) sobre las concentraciones de Hg, Pb, Cd y Cr en agua, sedimentos y el ostión *Crassostrea virginica* desde 1972 y señalan que las actividades humanas e industriales han incrementado significativamente los niveles de metales pesados en estos ambientes mexicanos.

De los pocos estudios desarrollados sobre los sedimentos de la plataforma continental del Golfo de México, se encuentra el de Ríos-Quiroz (1993) donde se reporta una gran afinidad de Cu, Cr, Co, Zn, Ni, Pb y Cd por los carbonatos del sedimento, así como una abundancia de las formas totales y biodisponibles de Pb y Zn lo cual pone de manifiesto el efecto de las actividades humanas sobre este ambiente.

En 1994 Rosales-Hoz y colaboradores evaluaron el efecto que pueden tener las actividades relacionadas con la explotación petrolera sobre la presencia de metales en sedimentos en la Sonda de Campeche. Estos autores reportan que el Cr detectado proviene del sistema fluvial Grijalva-Usumacinta mientras que los niveles

de Ba reflejaron un efecto de las actividades petroleras sobre la región; no detectaron Cd y el Pb se encontró en concentraciones bajas ($18 \mu\text{g g}^{-1}$).

2.2 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES (HAP).

Los estudios encaminados a evaluar la presencia de hidrocarburos del petróleo en el medio marino, son numerosos y día con día las metodologías han ido perfeccionándose para poder realizar investigaciones más finas, tanto en la identificación de los compuestos como en sus concentraciones, para conocer el riesgo subletal que la presencia de estas sustancias complejas reviste para los ecosistemas. Se presenta la información generada por diversos autores en relación a la existencia de estos compuestos en el Golfo de México.

En 1980, Soto y colaboradores evaluaron la población de camarones peneidos en relación a los hidrocarburos del petróleo en el Banco de Campeche, al sur del Golfo de México. De las determinaciones realizadas en la biota y en los sedimentos, así como la identificación de las fuentes de materia orgánica que sustentan este ecosistema bentónico, no observaron daño visible en la población evaluada; los organismos pueden nutrirse utilizando una cadena de alimentación detritívora basada en el material vegetal exportado por los sistemas lagunares y fluvio-deltáicos presentes en esta región.

También se han evaluado los hidrocarburos en su fase disuelta en la columna de agua en la zona costera del Golfo de México y Mar Caribe, donde Celis y colaboradores (1987) no detectaron una variación significativa de las concentraciones de hidrocarburos a lo largo de 5 años con la detección de puntos aislados donde el incremento es importante debido principalmente al tráfico de buques-tanque provenientes del Caribe central.

Otro aspecto de los hidrocarburos que representa un riesgo y un impacto hacia los litorales son las breas y alquitranes que han sido evaluados por Cortés-Vázquez *et al.* (1987) en la zona costera del Golfo de México. Los autores registraron niveles importantes en la Sonda de Campeche, además del efecto que tienen las condiciones climáticas y de circulación costera sobre la distribución y residencia de las breas en los litorales, procesos estrechamente relacionados con lo que ocurre en el fondo marino.

Un estudio muy completo es el de Wade *et al.* (1988) realizado en el norte del Golfo de México. Se analizaron compuestos orgánicos como HAP, plaguicidas organoclorados, esteroides y bifenilos policlorinados (PCB) en sedimentos y moluscos bivalvos en zonas donde previamente se han detectado fuentes puntuales de aportes. Reportaron niveles de HAP similares tanto en sedimentos como en organismos, aunque la dominancia de los compuestos fue diferente evidenciando diversos orígenes de los hidrocarburos y de los mecanismos de acumulación por la biota.

Posteriormente, también en el norte del Golfo de México, Wade *et al.* (1989) evaluaron a las comunidades que habitan las zonas de filtraciones naturales de hidrocarburos. Encontraron cantidades significativas de HAP en organismos como mejillones y poliquetos. La distribución de los aromáticos que los autores encontraron, indica que la biota de estas regiones está expuesta a los HAP presentes en los sedimentos y el agua que los circunda con el riesgo ambiental que esto implica.

En la plataforma continental de Texas, en el norte del Golfo de México, Brooks y colaboradores (1990), evaluaron las concentraciones de HAP en sedimentos cercanos a la costa de una zona de plataformas de pozos petroleros. Los niveles más altos de HAP se localizaron dentro de los 25 m alrededor del punto de descarga

de la plataforma de pozos donde observaron una dominancia de aromáticos formados por 2 anillos bencénicos evidenciando aportes recientes.

Botello *et al.* (1991) analizaron la presencia de hidrocarburos del petróleo en sedimentos de la plataforma continental del sureste del Golfo de México. Encontraron grupos de HAP en tipo y niveles que correspondieron tanto a residuos de procesos de alta temperatura (pirólisis de combustibles fósiles) como a actividades petroleras tales como descargas directas, operaciones de tanqueros, procesos de refinerías y derrames accidentales.

Vázquez *et al.* (1991) estudiaron la distribución de hidrocarburos del petróleo y metales pesados asociados como el Ni y el V en los sedimentos de la plataforma continental de Veracruz. Estos autores notaron una predominancia de HAP sobre los hidrocarburos alifáticos y atribuyeron la presencia de estos compuestos a las infiltraciones naturales de petróleo en el medio marino.

González *et al.* (1992) evaluaron la presencia de hidrocarburos alifáticos en sedimentos y organismos del Banco de Campeche en el sur del Golfo de México, ya que ésta es una de las áreas más productivas de petróleo en nuestro país. Encontraron que el comportamiento de los hidrocarburos en los sedimentos refleja una contaminación por este energético.

En 1993, Botello y colaboradores presentaron un estudio sobre los niveles de HAP en ambientes costeros del sur del Golfo de México. Reportan una influencia directa de las actividades petroleras sobre las concentraciones altas de estos compuestos; además, detectaron HAP de tipo pirolítico tanto en lagunas costeras como en la plataforma continental adyacente.

3 OBJETIVOS

Los objetivos particulares del presente trabajo son los siguientes:

- 1.- **Determinar las concentraciones totales y biodisponibles de metales pesados (Cu, Co, Ni, Zn, Cr, Pb y Cd) presentes en los sedimentos costeros de la plataforma continental del sur y noroeste del Golfo de México.**
- 2.- **Evaluar los niveles de Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (HAP) presentes en los sedimentos de la plataforma continental del sur y noroeste del Golfo de México.**
- 3.- **Identificar los HAP presentes en la plataforma continental de Veracruz y Tamaulipas para poder discutir sus fuentes de origen.**
- 4.- **Relacionar el contenido de materia orgánica y carbonatos con los metales pesados y HAP evaluados para conocer la interacción geoquímica que puede darse entre ellos.**
- 5.- **Con la información obtenida, identificar cuál de las regiones estudiadas presenta problemas de contaminación por metales pesados y HAP.**

4 DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO

Las zonas de estudio se ubican en la plataforma continental de los estados de Veracruz, Tabasco y Tamaulipas.

4.1 VERACRUZ Y TABASCO.

Comprende la zona entre los 18° 10' y 18° 40' de latitud norte y los 93° 50' y 94° 30' de longitud oeste en la zona de influencia de los ríos Coatzacoalcos, Tonalá y el Grijalva-Usumacinta, así como del sistema lagunar Carmen-Machona (Tabla 1; Figs. 1 y 2). Las colectas se realizaron durante los cruceros oceanográficos OGMEX 1, 2, 3 y 4 (Veracruz) y 7 (Tabasco) durante marzo, agosto y diciembre de 1987, abril de 1988 y enero de 1989, respectivamente.

La plataforma continental en la zona de Coatzacoalcos, Ver., alcanza una amplitud de 130 Km hacia su porción oriental en dirección de la Laguna de Términos. Los sedimentos de esta región están dominados por lodos terrígenos cuya presencia se debe principalmente a la gran cantidad de ríos que desembocan en esta provincia del Golfo de México, éstos contribuyen a la formación de una franja de limos arenosos terrígenos cercanos a la costa con un contenido de carbonatos menor al 25 % (Pica-Granados *et al.*, 1991). Frente a la costa del río Coatzacoalcos se define una franja arenosa de aproximadamente 10 x 30 Km y abarca 15 Km hacia mar adentro hasta alcanzar los 35 m de profundidad, en una dirección E-W en la que las condiciones climáticas como lluvias, vientos y variación en el volumen de descarga y transporte de los ríos, provocan irregularidades en la distribución de los sedimentos en determinada época del año (Pérez-Ramos, 1988).

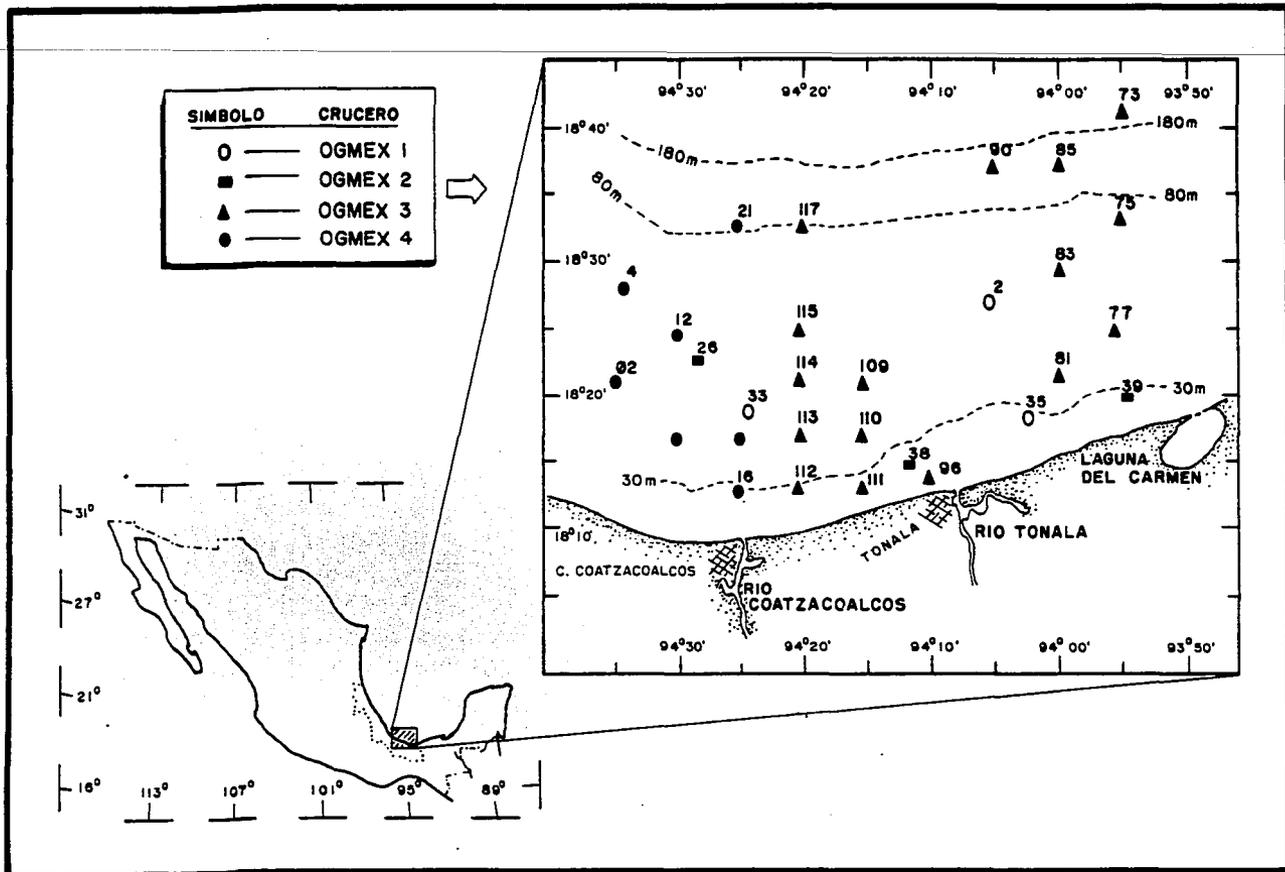


FIGURA I. AREA DE ESTUDIO Y LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES DE COLECTA EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE VERACRUZ. CAMPAÑA OCEANOGRAFICA OGMEX 1,2,3,4.

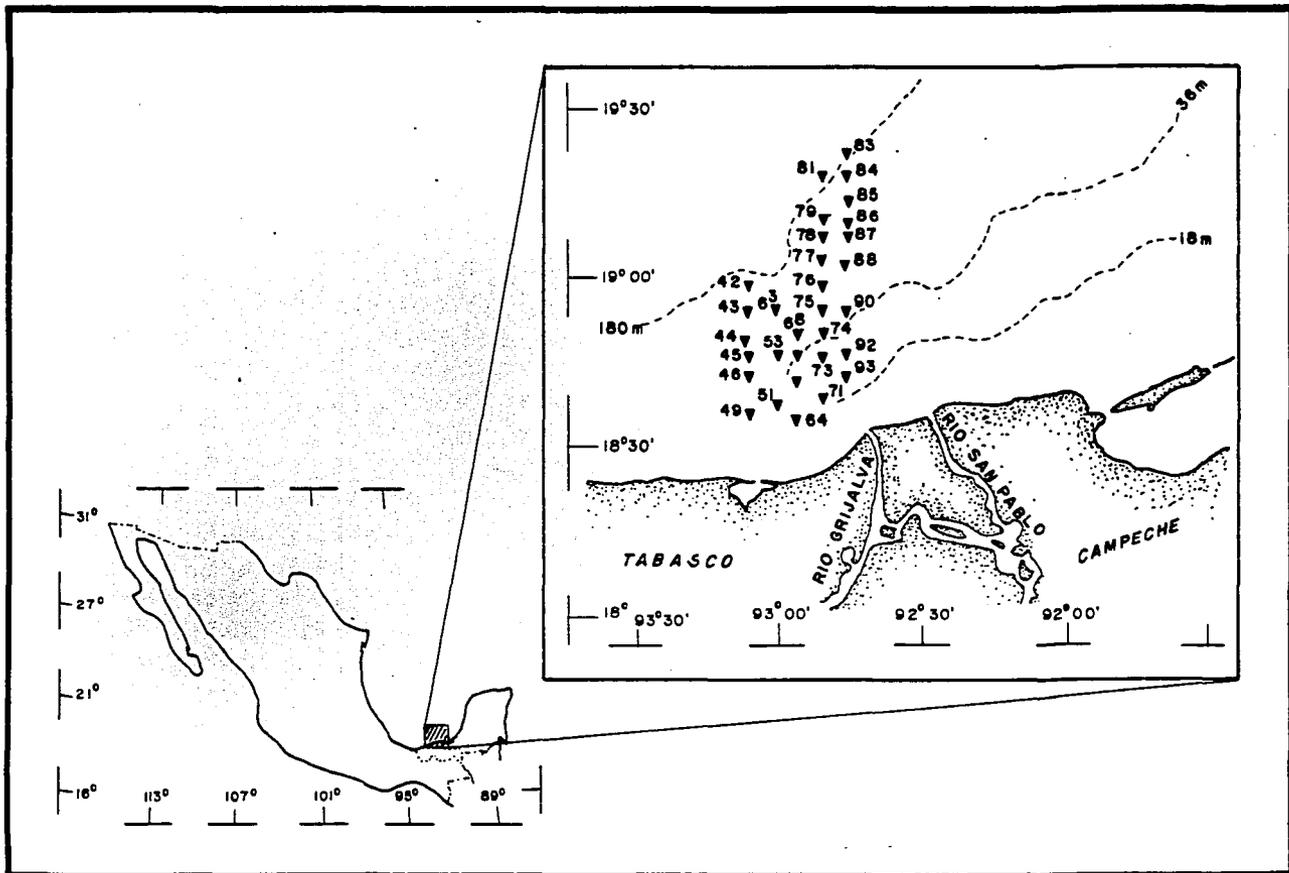


FIGURA 2. ZONA DE ESTUDIO Y UBICACION DE LOS SITIOS DE COLECTA EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TABASCO. CAMPAÑA OCEANOGRÁFICA OGMEX 7.

TABLA 1 LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE COLECTA DE SEDIMENTOS EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL SUR DE VERACRUZ (OGMEX 1,2,3 Y 4) Y TABASCO (OGMEX 7).

VERACRUZ

CRUCERO Y ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
OGMEX 1		
2	18° 28'	94° 05'
33	18° 19'	94° 23'
35	18° 18'	94° 03'
OGMEX 2		
26	18° 22'	94° 28'
38	18° 14'	94° 13'
39	18° 20'	93° 52'
OGMEX 3		
73	18° 41'	93° 55'
75	18° 33'	93° 55'
77	18° 25'	93° 56'
81	18° 22'	94° 00'
83	18° 29'	93° 60'
85	18° 37'	93° 60'
90	18° 37'	94° 05'
96	18° 14'	94° 10'
109	18° 21'	94° 15'
110	18° 17'	94° 15'
111	18° 13'	94° 15'
112	18° 13'	94° 20'
113	18° 17'	94° 20'
114	18° 21'	94° 20'
115	18° 25'	94° 20'
117	18° 33'	94° 20'
OGMEX 4		
2	18° 21'	94° 35'
4	18° 28'	94° 34'
12	18° 25'	94° 30'
14	18° 17'	94° 30'
16	18° 13'	94° 25'
17	18° 17'	94° 25'
21	18° 33'	94° 25'

TABASCO

CRUCERO Y ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
OGMEX 7		
42	18° 57'	93° 05'
43	18° 53'	93° 05'
44	18° 48'	93° 06'
45	18° 45'	93° 05'
46	18° 41'	93° 05'
48	18° 34'	93° 05'
51	18° 36'	93° 00'
53	18° 45'	93° 00'
63	18° 53'	93° 02'
64	18° 49'	92° 55'
65	18° 45'	92° 55'
66	18° 40'	92° 55'
68	18° 33'	92° 55'
71	18° 37'	92° 50'
73	18° 45'	92° 50'
74	18° 49'	92° 50'
75	18° 53'	92° 50'
76	18° 57'	92° 50'
77	19° 01'	92° 50'
78	19° 05'	92° 50'
79	19° 09'	92° 50'
81	19° 17'	92° 50'
83	19° 21'	92° 45'
84	19° 17'	92° 45'
85	19° 13'	92° 45'
86	19° 09'	92° 45'
87	19° 06'	92° 45'
88	19° 01'	92° 45'
90	18° 53'	92° 45'
92	18° 45'	92° 45'
93	18° 41'	92° 45'

En el litoral del estado de Tabasco, se encuentran dos áreas someras ubicadas a cada lado de la desembocadura del río Grijalva, formadas por arenas limosas terrígenas. Subsecuentes a éstas, sobre la plataforma continental, se ha detectado una zona de sedimentos formada por arenas gruesas terrígenas cuya presencia es una evidencia del avance y retroceso del nivel del mar, y de la existencia de antiguas desembocaduras de ríos; junto a estos sedimentos gruesos y sobre el talud continental se extiende hacia el mar profundo una región de sedimentos lodosos (Lecuanda y Ramos, 1985). El contenido de carbonatos en el área de influencia del Grijalva es del 25 % y hacia zonas más profundas oscila entre 25-50 % (Campos, 1981).

El sur de Veracruz, específicamente el área de influencia del río Coatzacoalcos, se ubica en la segunda Unidad Morfotectónica del Golfo de México; se considera una costa de mar marginal al igual que el área de Tabasco (Unidad Morfotectónica 3) ya que genéticamente son costas primarias de depósito subaéreo, principalmente por el depósito de ríos y la presencia de deltas; como ejemplos están los ríos Coatzacoalcos y Tonalá en Veracruz, y el Grijalva-Usumacinta en Tabasco (Pica-Granados *et al.*, 1991). Según Antoine (1972) pertenecen a la provincia 5 donde la plataforma continental es amplia en dirección a la Península de Yucatán (110-130 Km en Punta Frontera, Tabasco) y los sedimentos son carbonatados de tipo biogénico.

En la porción de Tabasco, frente a la desembocadura de los ríos Grijalva, San Pedro y San Pablo, la plataforma continental es casi horizontal y se observa un cambio de inclinación hacia los 45 m de profundidad y la zona oceánica. La parte centro-oriental del Banco de Campeche es la más productiva en materia orgánica primaria y puede ser transportada por las corrientes hacia el occidente del mismo banco (área de estudio), y acumularse en esa región (Bessonov *et al.*, 1971). Estas condiciones favorecen que en el sur del Golfo de México los contaminantes existentes en la zona oceánica, alcancen regiones más someras y afecten los ecosistemas costeros.

Oceanográficamente, la influencia de la Corriente de Lazo es mayor durante el verano y afecta las características de temperatura y salinidad de las masas de agua de la zona, lo cual repercute sobre la residencia de compuestos como metales pesados y HAP. Las corrientes costeras pueden provocar un desplazamiento W-E del material suspendido proveniente de los ríos Grijalva-Usumacinta; de igual forma, se crea una circulación ciclónica dando como resultado afloramientos de aguas profundas, las cuales se asocian con bajas concentraciones de material suspendido formado principalmente por componentes biológicos (Pica-Granados y Pineda-López, 1991; Carranza-Edwards *et al.*, 1993).

Las características de las masas de agua en la parte sur del Golfo de México son homogéneas en salinidad, temperatura y oxígeno por lo que es factible considerar que la influencia de éstas sobre los sedimentos, está controlada por corrientes superficiales (Pérez-Ramos, 1988). Los grandes caudales que drenan en el sur del Golfo de México influyen, junto con los sistemas lagunares, en los procesos sedimentarios a través del aporte de material suspendido hacia la plataforma continental; el volumen de su descarga anual estimado es de 13 Km^3 (S.R.H., 1976), con un acarreo promedio de este material aproximadamente de $244 \times 10^3 \text{ m}^3$. Los valores máximos se han registrado para julio y noviembre (Pérez-Ramos, 1988).

4.2 TAMAULIPAS.

Se colectaron 18 muestras de material sedimentario durante la campaña oceanográfica OGMEX 8 en el área comprendida entre los $21^{\circ} 50'$ y $25^{\circ} 41'$ de latitud norte y los $97^{\circ} 13'$ y $96^{\circ} 25'$ de longitud oeste, es decir, la plataforma continental del estado de Tamaulipas durante septiembre de 1989 (Tabla 2; Fig. 3).

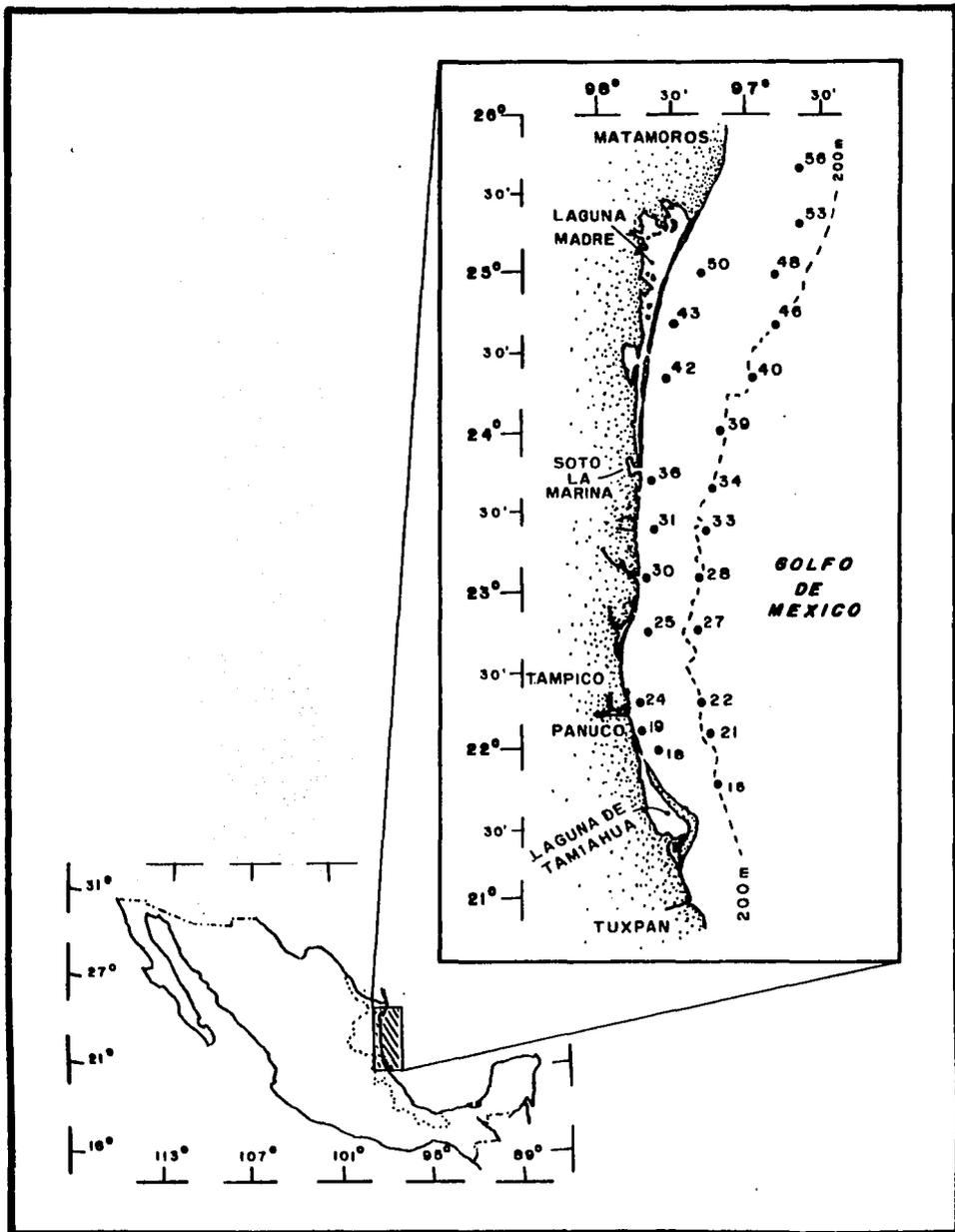


FIGURA 3. REGION DE ESTUDIO Y LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES DE COLECTA EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS. CAMPAÑA OCEANOGRAFICA OGMEX 8.

**TABLA 2 LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE COLECTA DE SEDIMENTOS
EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS (OGMEX 8).**

TAMAULIPAS

CRUCERO Y ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
OGMEX 8		
15	21° 50'	97° 13'
18	21° 58'	97° 36'
19	22° 10'	97° 42'
21	22° 09'	97° 21'
22	22° 23'	97° 24'
24	22° 22'	97° 45'
25	22° 40'	97° 41'
27	22° 40'	97° 25'
28	22° 60'	97° 26'
30	23° 00'	97° 41'
31	23° 20'	97° 41'
33	23° 15'	97° 23'
34	23° 40'	97° 20'
36	23° 41'	97° 40'
39	24° 00'	97° 12'
40	24° 20'	97° 00'
42	24° 20'	97° 27'
43	22° 42'	97° 30'
48	24° 40'	98° 52'
48	25° 00'	97° 04'
50	25° 00'	97° 24'
53	25° 20'	96° 40'
56	25° 41'	96° 25'

La plataforma continental de Tamaulipas pertenece a la provincia 4 de los rasgos geomorfológicos del Golfo de México (Antoine, 1972); su amplitud va desde 70-82 Km en su extremo norte debido al aporte de sedimentos por los sistemas fluvio lagunares y se angosta hasta 33-37 Km en el paralelo 20.

Los sedimentos están dominados por lodos terrigenos cuya presencia se debe principalmente a la gran cantidad de ríos que desembocan en esta provincia del Golfo, éstos contribuyen a la formación de una franja de limos arenosos terrigenos cercana a la costa en la porción sur con un contenido de carbonatos menor al 25 % (Lecuanda y Ramos, 1985).

Para la zona específica de Tamaulipas, se ha reportado la presencia de sedimentos arenosos en la zona costera, seguidos por limos y arcillas a profundidades mayores y lejos de la costa. Las arenas de esta región pueden provenir de la gran planicie costera continental (Pica-Granados *et al.*, 1991).

Las costas de Tamaulipas pertenecen a la primera Unidad Morfotectónica según la clasificación hecha por Carranza-Edwards *et al.* (1975). Se considera una costa de mar marginal protegida por los arcos insulares del Caribe y Cuba. Geomorfológicamente, presentan costas primarias por depósito subaéreo como en el caso de la Laguna Madre, Tamps., y costas secundarias por depositación marina que dan origen a la formación de costas de barrera ejemplificadas por la Laguna de Tamiahua, Ver. (Pica-Granados *et al.*, 1991).

5 MATERIALES Y MÉTODOS

El material sedimentario fue recolectado durante las campañas oceanográficas OGMEX (Oceanografía del Golfo de México) abordo del buque oceanográfico "Justo Sierra" de la UNAM, realizadas en marzo, agosto y diciembre de 1987; abril de 1988, enero y septiembre de 1989.

5.1 METALES PESADOS.

5.1.1 CONCENTRACIÓN TOTAL.

Los análisis de metales pesados en sedimentos fueron realizados siguiendo la metodología propuesta por Páez-Osuna y Osuna-López, 1990 (Fig. 4).

El material de laboratorio utilizado para el análisis de metales pesados fue lavado de la siguiente manera: se sumergió durante tres días en una solución de HCl 2N, posteriormente se transfirió a una solución de HNO₃ 2N durante un período similar; al final fue lavado con agua bidestilada para retirar el exceso de solución ácida y almacenado en bolsas de plástico.

Los sedimentos se colectaron con una draga tipo Van-veen y para evitar contaminar el material, solamente se tomó la porción sedimentaria que no entró en contacto con la draga; posteriormente, la muestra fue colocada en bolsas de plástico y congelada a 4 °C hasta realizar los análisis en el laboratorio.

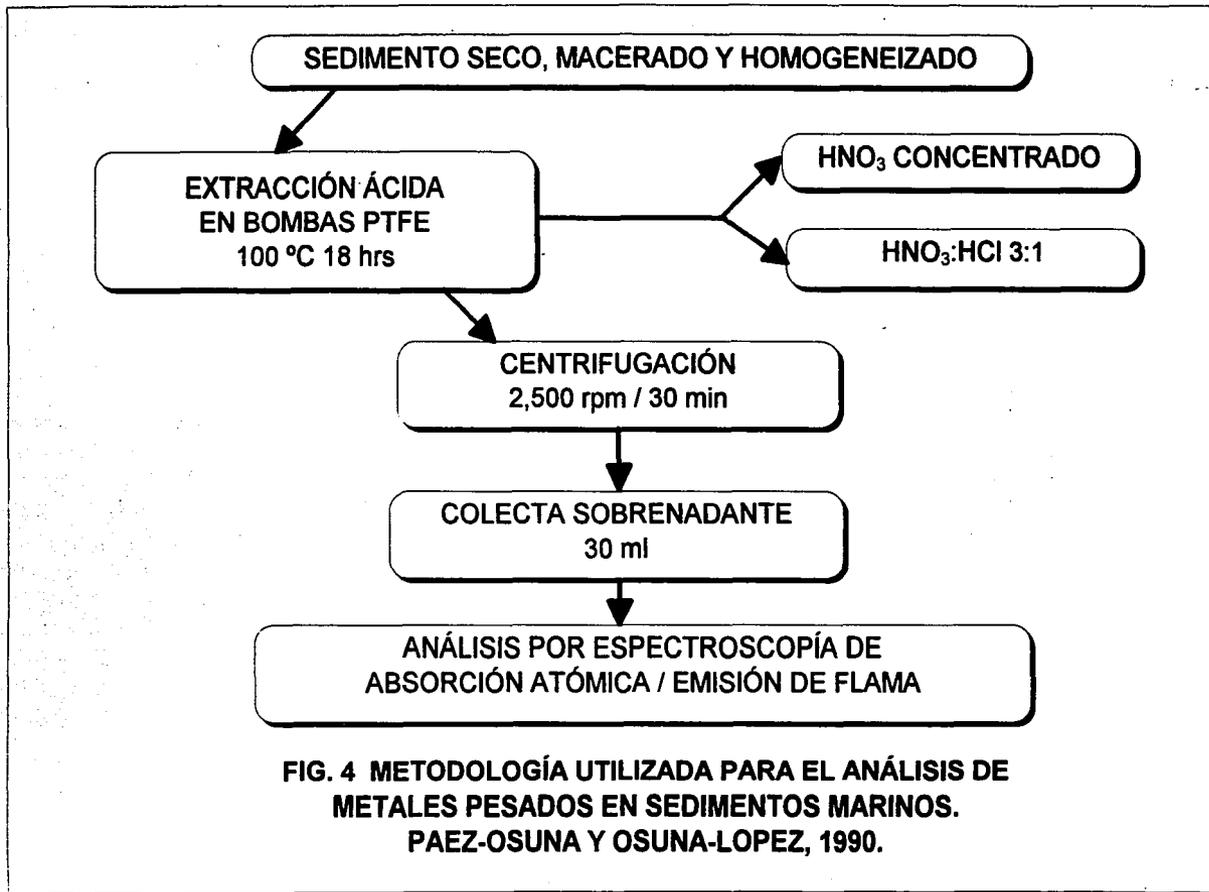


FIG. 4 METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL ANÁLISIS DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS MARINOS. PAEZ-OSUNA Y OSUNA-LOPEZ, 1990.

El sedimento fue descongelado a temperatura ambiente y se secó en una estufa de laboratorio a 70 °C. A continuación, se maceró y homogeneizó con ayuda de un mortero de porcelana y un tamiz de plástico de 0.25 mm de luz de malla, respectivamente. Posteriormente, se tomó una submuestra de 2.0 - 2.5 g para sedimentos con alto contenido de carbonatos y de 0.25 g para sedimentos con bajo contenido o sin carbonatos. Por último, se hizo una digestión ácida con HNO₃ concentrado en el primer caso y agua regia invertida (HNO₃:HCl 3:1) en el segundo, utilizando un sistema cerrado como las bombas de teflón (PTFE) a una temperatura de 100 °C durante 18 horas.

Las muestras digeridas fueron centrifugadas a 2,500 rpm / 30 min, el residuo fue lavado con agua bidestilada. Los sobrenadantes se almacenaron en frascos de plástico con un volumen de aforo de 30 ml. Se realizó un blanco de reactivos por cada lote de 8 muestras problema.

Las determinaciones de los metales pesados, se realizaron utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica marca Shimadzu modelo AA-630-02-12. Se elaboró una curva de calibración con las soluciones estándares de cada elemento para realizar los cálculos respectivos; en la Tabla 3 se muestran los límites de detección del espectrofotómetro para cada uno de los metales analizados.

TABLA 3 LÍMITES DE DETECCIÓN ANALÍTICOS PARA LOS METALES PESADOS Y LOS HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES (HAP), DETECTADOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL GOLFO DE MÉXICO. (VALORES EN µgg⁻¹).

Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd	HAP
0.48	0.54	0.80	0.48	0.56	0.48	0.18	0.00002

5.1.2 CONCENTRACIÓN BIODISPONIBLE.

El procedimiento de recolección, secado, macerado y homogeneización del material sedimentario fue similar al empleado para la determinación de la concentración total.

Se tomó una submuestra de 3.0 g de sedimento seco y se digirió en un matraz erlenmeyer con 20 ml de ácido acético al 25 % v/v, agitando durante 2-3 min.; finalmente fue mantenido en reposo durante 24 horas a temperatura ambiente.

Posteriormente se realizó una centrifugación de forma similar a la empleada para determinar la concentración total y el aforo fue de 25 ml (Loring y Rantala, 1977).

Las determinaciones en el espectrofotómetro de absorción atómica se realizaron de forma similar a las efectuadas para la concentración total.

5.2 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES (HAP).

Las muestras de sedimentos se colectaron usando una draga tipo Van-veen y fueron colocadas en frascos de vidrio previamente lavados para evitar una contaminación exógena. Para evitar que los HAP presentes en la muestra sufran una degradación microbiana, fue adicionado metanol y posteriormente se sometieron a congelación (4 °C) hasta el análisis de laboratorio.

Los análisis para la identificación y cuantificación de HAP se llevaron a cabo siguiendo la metodología propuesta por CARIPOL/IOCARIBE (1986) (Fig. 5).

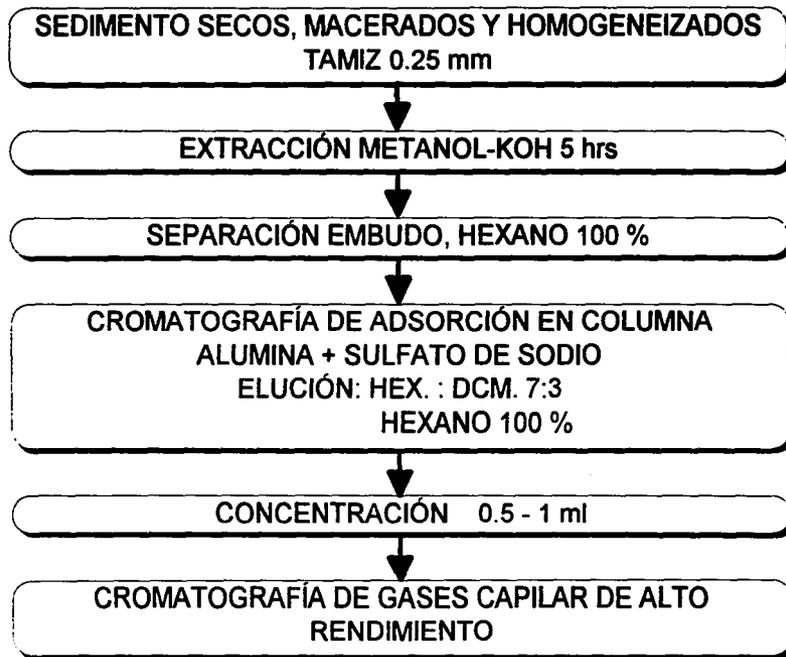


FIG. 5 METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL ANÁLISIS DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES (HAP) EN SEDIMENTOS MARINOS. CARIPOL / IOCARIBE, 1986.

Los sedimentos se descongelaron a temperatura ambiente y se secaron a 50 °C. Las muestras secas se maceraron y homogeneizaron con un tamiz de 0.25 mm de apertura de malla para no tener interferencia con tamaños de grano variables. Se tomó una submuestra de 10 g para extraerse con 200 ml de potasa metanólica en reflujo por 5 horas; en esta etapa se procesó un blanco de reactivos.

El extracto se decantó en un embudo de separación, y a continuación se realizó una extracción en dos partes: cada una con 25 ml de hexano, conservando únicamente la fase hexánica.

La fase orgánica se concentró hasta aproximadamente 1 ml, este extracto se purificó por cromatografía de adsorción en columna empacada con alúmina desactivada al 5 % y sulfato de sodio anhidro. La fracción aromática se obtuvo de la elución con una mezcla hexano:diclorometano 7:3 y con diclorometano al 100 %. Esta fracción se concentró a 0.5 - 1 ml, se trasvasó a frasco vial y se llevó a sequedad para su análisis por cromatografía de gases capilar de alto rendimiento.

El análisis cromatográfico se realizó utilizando un cromatógrafo de gases marca Hewlett Packard modelo 5890 bajo las siguientes condiciones de trabajo:

- Detector:** Ionización de Llama (FID).
- Columna:** Capilar de 25 m x 0.25 mm (d.i.) x 0.52 µm de grosor de capa de sílice fundida y fenilmetil silicón al 5 %.
- Gas Acarreador:** Nitrógeno (99 % de pureza) y un flujo de 1 ml / min.
- Gas Auxiliar:** Nitrógeno (99 % de pureza) y un flujo de 30 ml / min.

Gases para el Detector: Aire (99 % de pureza) y un flujo de 300 ml / min.

Hidrógeno (99 % de pureza) y un flujo de 30 ml / min.

Temperatura del Inyector: 300 °C.

Temperatura del Detector: 300 °C.

Programa de Temperatura:

Temperatura Inicial: 60 °C.

Tiempo Inicial: 0.5 min.

Rampa 1: 10 °C / min.

Temperatura Final 1: 170 °C.

Tiempo Final 1: 0.0 min.

Rampa 2: 6 °C / min.

Temperatura Final 2: 300 °C.

Tiempo Final 2: 22 min.

Tiempo de Purga: 1.0 min.

Se analizaron los sedimentos para identificar 15 HAP en el siguiente orden de aparición cromatográfica:

- | | |
|-----------------|---------------------------|
| 1. Naftaleno | 9. Benzo(a)antraceno |
| 2. Acenaftileno | 10. Criseno |
| 3. Acenafteno | 11. Benzo(b)fluoranteno |
| 4. Fluoreno | 12. Benzo(k)fluoranteno |
| 5. Fenantreno | 13. Benzo(a)pireno |
| 6. Antraceno | 14. Indeno(1,2,3cd)pireno |
| 7. Fluoranteno | 15. Benzo(ghi)perileno |
| 8. Pireno | |

Esta secuencia se puede observar en el cromatograma de la mezcla estándar proveniente de Chemical Service, E.U. (Fig. 6) y el límite de detección del equipo cromatográfico fue de $0.00002 \mu\text{gg}^{-1}$ (Tabla 3).

5.3 DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO.

Se evaluó el contenido de carbono orgánico en el material sedimentario, a través de la titulación del exceso de dicromato de potasio usado en la oxidación de la materia orgánica con una solución 0.5 N de sulfato ferroso y se expresó como el porcentaje de carbono orgánico (Gaudette *et al.*, 1974).

5.4 DETERMINACIÓN DE CARBONATOS.

Se calculó midiendo el volumen de CO_2 desplazado al reaccionar la muestra sedimentaria con una solución de HCl al 50 % v/v. Para su realización se utilizó una modificación del Calcímetro de Bernard siguiendo la técnica de Alvarez (1983) y Santiago (1989).

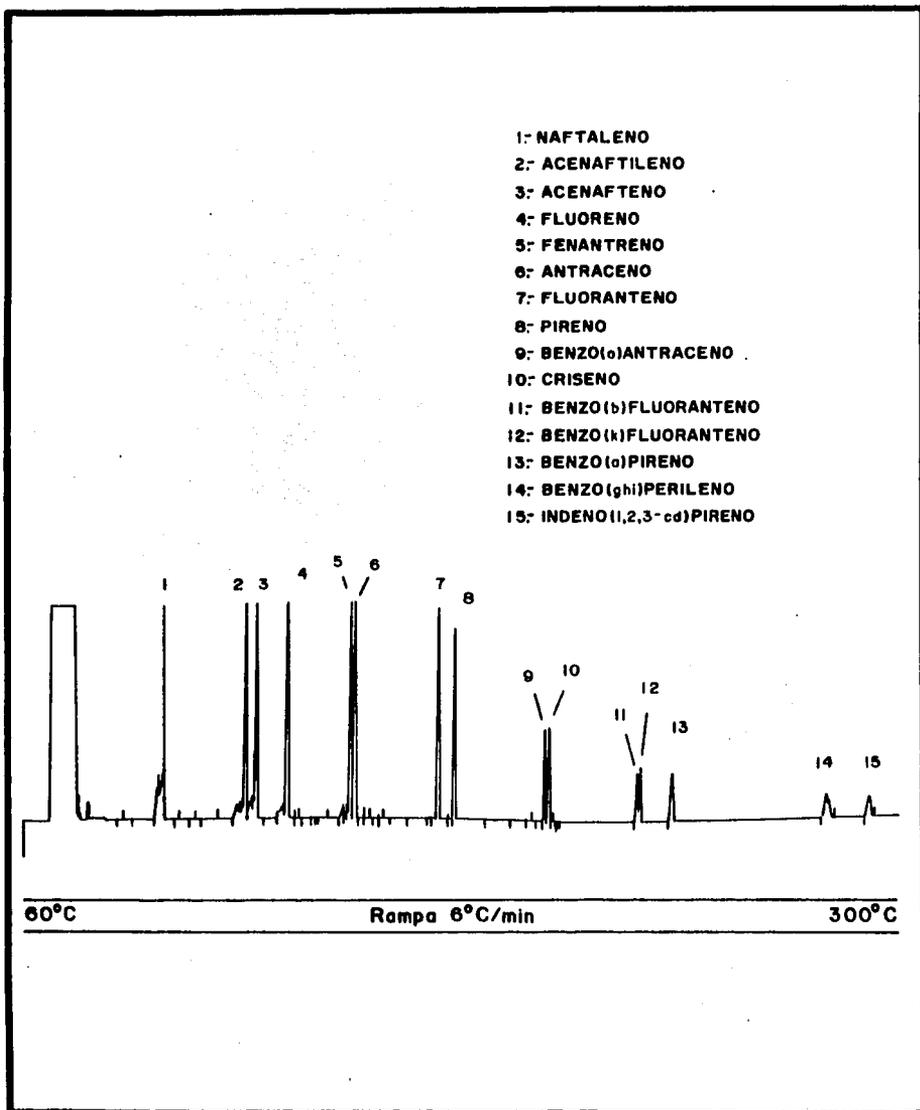


FIGURA 6. CROMATOGRAMA DE LOS HIDROCARBUROS AROMATICOS POLINUCLEARES ANALIZADOS. MEZCLA ESTANDAR CON UNA CONCENTRACION DE 100ug/ml.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 METALES PESADOS.

6.1.1 CONCENTRACIÓN TOTAL.

En este estudio se hizo la evaluación de los metales traza Cu, Co, Ni, Zn, Cr, Pb y Cd en los sedimentos de la plataforma continental de los estados de Veracruz, Tabasco y Tamaulipas en su forma total y biodisponible.

6.1.1.1 PLATAFORMA CONTINENTAL DE VERACRUZ.

Los niveles de metales pesados totales registrados para los sedimentos de la plataforma continental del sur de Veracruz en las épocas de primavera, verano, finales de otoño de 1987 y primavera de 1988 (campanías OGMEX 1, 2, 3 y 4) se presentan en la Tabla 4. El Zn presentó el valor promedio más alto con 33.18 ppm, seguido por el Co con 21.18 ppm; las concentraciones más altas de estos elementos se detectaron en la zona ubicada entre los ríos Coatzacoalcos y Tonalá cubriendo una profundidad de 27 a 80 m (OGMEX 3 estaciones 110, 112, 114, 115 y 117). Las descargas de estos ríos contribuyen al incremento en la concentración de estos metales. Para el Zn se obtuvo un valor máximo de 185.9 ppm y para aquellos elementos químicos asociados con los procesos de extracción y refinación del petróleo, como Ni, Cr y Pb, los niveles altos fueron 84.8, 50.3 y 37.7 ppm, respectivamente.

TABLA 4 NIVELES DE METALES PESADOS TOTALES EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL SUR DE VERACRUZ (OGMEX 1,2,3 Y 4). VALORES EN μgg^{-1} .

CRUCERO Y ESTACIÓN	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
OGMEX 1							
2	12.36	17.05	5.40	8.91	0.01	N.D.	1.44
33	13.51	21.48	20.38	29.60	N.D.	15.59	1.22
35	8.92	17.93	6.67	8.05	4.50	N.D.	1.22
OGMEX 2							
26	9.95	17.26	18.59	8.91	7.62	N.D.	1.16
38	13.07	22.80	16.69	31.22	3.00	6.55	1.33
39	8.82	21.20	8.35	22.54	N.D.	14.33	1.20
OGMEX 3							
73	9.27	21.02	25.41	42.02	23.34	21.12	2.11
75	1.63	19.11	12.91	13.45	12.05	14.33	1.16
77	6.31	15.31	N.D.	0.76	5.66	N.D.	1.16
81	10.77	20.15	3.36	28.40	N.D.	N.D.	1.38
83	10.52	15.95	4.96	N.D.	7.04	N.D.	5.96
85	13.95	19.87	17.81	40.20	18.41	N.D.	1.28
90	17.34	21.44	15.11	43.22	28.98	N.D.	2.13
96	12.05	23.66	3.64	30.77	4.20	N.D.	1.50
109	12.96	19.79	7.23	8.52	5.21	N.D.	3.42
110	19.61	27.61	9.36	N.D.	25.36	N.D.	1.36
111	10.99	20.45	5.95	27.12	N.D.	8.83	1.28
112	53.14	35.04	84.76	185.86	26.72	37.66	1.77
113	12.52	21.86	5.67	30.64	17.13	N.D.	1.62
114	20.35	28.05	20.50	47.80	20.43	N.D.	2.78
115	39.30	27.43	81.17	63.69	50.26	14.75	1.16
117	91.25	24.06	30.51	27.26	32.11	N.D.	3.27
OGMEX 4							
2	20.63	18.22	20.37	40.49	N.D.	19.33	1.34
4	8.96	19.49	8.48	34.67	N.D.	9.97	1.27
12	30.88	18.81	18.15	11.12	14.42	14.12	1.45
14	14.87	18.97	12.82	18.63	4.37	N.D.	2.79
16	9.08	19.74	3.85	22.64	N.D.	6.45	1.29
17	15.09	18.47	16.14	27.68	14.37	9.22	1.16
21	12.05	21.88	15.87	41.59	18.05	20.14	1.55
PROMEDIO							
	17.94	21.18	17.86	33.18	15.60	15.17	1.79
DESV. STD.							
	17.43	4.16	19.72	33.82	12.17	8.03	1.03
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN LINEAL (r)							
MATERIA ORGÁNICA	0.1031	0.2784	0.0952	0.2776	0.3003	0.4529	0.0652
CARBONATOS	-0.1321	0.0705	-0.0172	0.0642	-0.0412	0.1519	0.0691
N.D. ⇒ NO DETECTADO (< 0.50 μgg^{-1})							

En tercer lugar, el Cu presentó una concentración promedio de 17.9 ppm (Fig. 7) con valores entre 1.6 y 91.3 ppm para una distribución geográfica similar a la del Zn y del Co, evidenciando una acumulación de este elemento en una zona lejana a la costa.

En el sur de Veracruz el Ni registró un nivel promedio de 17.86 ppm con un intervalo que va desde valores no detectables hasta 84.8 ppm, distribuyéndose de forma análoga a los tres elementos anteriores (Tabla 4; Fig. 7).

Para los sedimentos de la plataforma continental del sur de Veracruz, los metales potencialmente tóxicos como Cr, Pb y Cd tuvieron valores promedio de 15.6, 15.17 y 1.79 ppm, respectivamente (Fig. 7). La distribución de las concentraciones siguió un patrón similar al descrito para los elementos anteriores. Cabe mencionar que el Pb, solamente fue detectado en el 48 % de las estaciones de muestreo donde la distribución geográfica observada (de los niveles de Pb) describe una zona de indetectabilidad, localizada bajo la influencia directa del río Coatzacoalcos; hacia el sistema Carmen-Machona se localizaron sitios de colecta que registraron una concentración determinada de Pb (OGMEX 3 estaciones 73, 75, 111, 112, 115 y OGMEX 4 estaciones 2, 4, 12, 16, 17 y 21) (Tabla 4).

Otra área con niveles altos de metales fue la ubicada lejos de la costa (140 m de profundidad) en dirección del sistema lagunar Carmen-Machona (OGMEX 3 estaciones 73 y 90); en esta zona hubo una heterogeneidad en las concentraciones totales registradas, debido a que existieron lugares donde se pudo registrar un nivel de metales, mientras que en otros no fue posible hacerlo conformando un mosaico (OGMEX 3 estaciones 77 y 83) (Tabla 4).

La distribución de las concentraciones de metales pesados en el sur de Veracruz donde existe una influencia directa del río Coatzacoalcos, es afectada por la dinámica física que impera en la región. Hechos como la presencia de una zona de

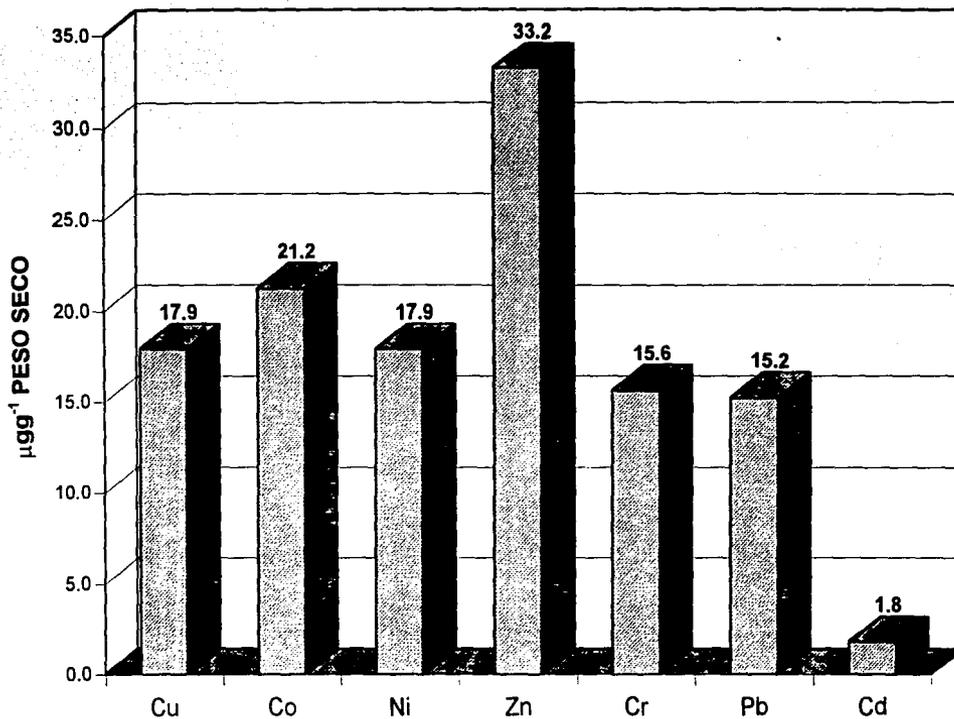


FIG. 7 NIVELES DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL SUR DE VERACRUZ. CONCENTRACIÓN TOTAL.

no detección de Pb, la localización de los valores mayores de metales y materia orgánica en áreas alejadas de la costa, están relacionados con las características oceanográficas particulares del Golfo de México, ya que en esta región existen descargas fluviales importantes como las provenientes de los ríos Papaloapan y Coatzacoalcos, las cuales favorecen la presencia de frentes oceanográficos provocados por las plumas de estos ríos. Las plumas son zonas de alta turbulencia generadas en la frontera de las masas de agua salobre proveniente del vertimiento fluvial sobre las aguas saladas del mar; y puede considerarse como una capa de agua superficial de baja salinidad que fluye hacia afuera de un estuario dispersándose en una superficie amplia de la plataforma continental (Shirasago-German, 1991); en estos frentes existe una línea definida de espuma y desperdicios flotantes que provoca una restricción en la dispersión de los contaminantes y permite la acumulación de ellos a lo largo de la línea del frente (Simpson y James, 1986; Cruz-Abrego *et al.*, 1991).

De igual forma, se ha observado que la propia descarga del Coatzacoalcos genera una zona de sedimentos arenosos inmediata a la desembocadura; hacia mar abierto ésta se ve rodeada por sedimentos lodosos con un contenido mayor de materia orgánica (Cruz-Abrego *et al.*, 1991); este tipo de sedimento fino contribuye con una mayor cantidad de metales pesados. Además, en la zona de descarga del Coatzacoalcos se ha observado un proceso de mezcla vertical intenso desde la superficie al fondo, lo cual puede provocar una resuspensión sedimentaria (Padilla *et al.*, 1986); se ha reportado para la plataforma continental comprendida entre Tampico y Veracruz una predominancia de sedimentos terrígenos arcillosos y mezclas de componentes calcáreos con la presencia de corrientes litorales en dirección NW-SE; Campos (1986) afirma que existe una relación inversamente proporcional entre el tamaño de grano del sedimento y la profundidad de la plataforma continental entre Veracruz, Ver., y Frontera, Tab. Además, se localiza un abanico hidrodinámico en las cercanías de la desembocadura del río Coatzacoalcos y la concentración de terrígenos es mayor respecto al componente calcáreo. En la

zona de influencia de este río, predominan los sedimentos arenosos con intrusiones de sedimentos lodosos, esta mezcla fina en áreas someras se debe posiblemente, a la influencia de sedimentos lodosos provenientes de la Laguna del Ostión, Ver. (Pérez-Ramos, 1988).

Todas estas características ambientales específicas de la región sur de Veracruz, provocan tanto la distribución de las concentraciones totales de metales pesados observada en este estudio, como los niveles detectados.

El comportamiento general que describieron las concentraciones totales de metales pesados presentes en los sedimentos de la plataforma continental del sur de Veracruz, puede resumirse en el orden siguiente:

Zn > Co > Cu > Ni > Cr > Pb > Cd

Este gradiente es atribuible a los posibles orígenes de cada uno de estos elementos y a las industrias existentes en Veracruz. Empresas como las fabricantes de papel, refinerías de petróleo, relacionadas al área textil, metalúrgicas, metalmecánicas, utilizan los metales evaluados en esta contribución. El INEGI (1992) en su censo industrial, para este estado registra 8,491 establecimientos de los cuales 3,842 están dedicados a la producción de alimentos, bebidas y tabaco; éstas arrojan en sus desechos cantidades elevadas de Cu y Zn (Klein *et al.*, 1974); 947 empresas relacionadas al área textil, incluyendo a la industria del cuero (730), utilizan metales como Cr y Zn; también se registran aquellas industrias de la madera y productos derivados (1,314), así como fabricantes de papel y sus productos (14) donde se emplean y desechan elementos como Cr, Cu, Hg, Pb, Ni y Zn; en el área de producción de sustancias químicas, de productos derivados del petróleo, del carbón, del plástico y del hule se registraron 100 establecimientos cuyas actividades están relacionadas con cantidades importantes de Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Ni, Sn y Zn; la fabricación de cemento, cal, yeso y otros productos de este tipo abarca 253

empresas las cuales arrojan a la atmósfera Pb y Zn en mayores proporciones, y As, Se, Hg y Cd en cantidades menores (Goldberg, 1976); las actividades encaminadas a la fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipo se agrupan en 1,331 establecimientos y de este número, 1,009 se dedican específicamente a la elaboración de estructuras metálicas, tanques, calderas y herrerías donde el grupo de los elementos aquí evaluados, entre otros, es utilizado y desechado al ambiente. Como puede observarse, las fuentes de los metales detectados existen en esta región del Golfo de México y son responsables de los niveles registrados así como de la dominancia de unos elementos sobre otros.

Similarmente se realizó el análisis de la materia orgánica en los sedimentos ya que uno de los objetivos planteados al inicio de este trabajo contempla relacionar este componente sedimentológico con los niveles totales de metales pesados, para poder inferir si existe o no relación geoquímica entre ellos en la zona de estudio. En el sur de Veracruz los valores de carbono orgánico sedimentario oscilaron entre 0.02 y 2.16 % con un promedio de 0.54 %. Cabe señalar que los niveles de materia orgánica registrados para esta región fueron homogéneos, excepto durante el verano donde se observó un decremento (0.25 %) (Tabla 5). La distribución de este parámetro conformó dos áreas de acumulación de materia orgánica proveniente en su mayor parte de las descargas de los ríos Tonalá, Coatzacoalcos, Grijalva-Usumacinta, y de los sistemas lagunares de Términos y Carmen-Machona; una de estas áreas se localizó en zona profunda (75-140 m) cubriendo prácticamente toda la región de estudio (OGMEX 3 estaciones 73, 85, 90 y 117; OGMEX 4 estación 21); otra se ubicó a profundidades intermedias entre 38 y 43 m (OGMEX 3 estaciones 109 y 114; OGMEX 4 estación 33) y una más muy cerca de la costa (25 y 27 m de profundidad) entre los ríos Tonalá y Coatzacoalcos (OGMEX 3 estaciones 111 y 112); este patrón pone de manifiesto que la distribución de la materia orgánica en los sedimentos de esta región va en dirección hacia mar abierto, con zonas puntuales sobre la plataforma continental donde la influencia de los grandes ríos del

TABLA 5 NIVELES DE MATERIA ORGÁNICA Y CARBONATOS EN LOS SEDIMENTOS EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL SUR DE VERACRUZ (OGMEX 1,2,3 Y 4).

CRUCERO Y ESTACIÓN	MATERIA ORGÁNICA (% CARBONO ORGÁNICO)	CARBONATOS (%)
OGMEX 1		
2	0.29	5.78
33	0.61	4.82
35	0.35	4.18
OGMEX 2		
26	0.09	5.14
38	0.16	9.96
39	0.51	7.39
OGMEX 3		
73	1.31	15.74
75	0.53	9.64
77	0.22	6.43
81	0.57	7.06
83	0.14	7.39
85	0.79	15.10
90	1.23	6.11
96	0.43	4.17
109	0.84	2.57
110	0.38	9.32
111	0.61	4.17
112	0.86	5.46
113	0.48	7.87
114	0.77	12.21
115	0.19	4.81
117	0.85	6.42
OGMEX 4		
2	0.14	5.14
4	0.52	7.39
12	0.10	4.49
14	0.14	11.88
16	0.02	1.29
17	0.44	9.96
21	2.16	12.91
PROMEDIO		
	0.54	7.41
DESV. STD.		
	0.45	3.58

Golfo (ya mencionados), así como de los sistemas lagunares, son importantes debido al aporte de materia orgánica y por tanto de contaminantes asociados.

En la literatura se ha establecido que la afinidad de los metales pesados hacia las sustancias orgánicas y sus productos de descomposición, es de gran importancia para el comportamiento de estos elementos traza en los sistemas acuáticos ya que el material orgánico puede adsorber entre el 1 y el 10 % del peso seco de los elementos Co, Cu, Fe, Pb, Mn, Mo, Ni, Ag, V y Zn (Swanson *et al.*, 1966; Förstner y Wittman, 1981). A pesar de esto y de la homogeneidad en las concentraciones de materia orgánica registrada para el sur de Veracruz, no se presentaron correlaciones estadísticas significativas entre los elementos estudiados y la materia orgánica presente (Tabla 4). Ha sido discutido por investigadores como Curtis (1966) el por qué ciertos metales como Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, U, V, pueden mostrar una asociación positiva con el carbono orgánico en los sedimentos, mientras que otros elementos no presentan correlación significativa e incluso la pueden registrar negativa. Este autor establece que la correlación positiva ocurre cuando los iones metálicos interactúan en solución con la materia orgánica disuelta, que en su momento será concentrada por adsorción sobre partículas tales como las arcillas; la no correlación puede resultar cuando no existe interacción entre los metales y la materia orgánica disuelta por lo que esta última es adsorbida sobre las partículas; finalmente si existe competencia entre los iones metálicos y los compuestos orgánicos disueltos por la adsorción a los sitios de enlace, se produce una correlación negativa entre ellos (Jonasson, 1977). A pesar de que con frecuencia se ha observado un alto grado de correlación positiva entre el contenido de materiales orgánicos y la concentración total de los metales pesados en los sedimentos acuáticos, esto no necesariamente involucra un enlace preferencial de los metales por las sustancias orgánicas, ya que existen diversos mecanismos como son la adsorción por las arcillas y la precipitación de los óxidos de Fe y Mn, los cuales producen una acumulación simultánea del material orgánico así como de los metales, particularmente en las fracciones finas del sedimento. Además, en zonas

con una contaminación elevada por metales pesados, también existe una acumulación importante de sustancias orgánicas derivadas de desechos industriales, domésticos y rurales (Förstner y Wittman, 1981).

El comportamiento estadístico registrado entre la concentración total de los metales pesados estudiados en los sedimentos del sur de Veracruz y la materia orgánica ahí presente, pudiera explicarse considerando los procesos planteados por Curtis (1966) Jonasson (1977) y Förstner y Wittman (1981) donde la forma de llegar al fondo es independiente para cada uno de estos componentes. Adicionalmente, las concentraciones altas de metales que manifiestan una correlación significativa con la materia orgánica pueden considerarse de origen biológico interpretando el proceso inverso; es decir, una no correlación, equivale a un origen probablemente de tipo terrestre ó humano (Rosales-Hoz *et al.*, 1992).

Los procesos o formas en que estos elementos son adsorbidos al material particulado de la columna de agua en algunos de ellos, son similares y pueden explicar la relación tan estrecha observada a través de herramientas estadísticas. Por ejemplo, para el caso del Zn se han planteado dos mecanismos de adsorción: uno en medios ácidos relacionado con sitios de intercambio catiónico, y otro en medios alcalinos a través de quimioadsorción, relacionado íntimamente con los ligandos orgánicos. Las arcillas, los óxidos e hidróxidos y el pH son los factores más importantes que controlan la solubilidad del Zn, de menor importancia son el acomplejamiento orgánico y la precipitación de este metal en forma de hidróxido, carbonato y sulfuro; el Zn también puede estar como estructura en la matriz del silicato y ser inamovible (por ejemplo, montmorilonita). La fracción del Zn asociada con óxidos de Fe y Mn es la más disponible para los organismos (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

Para el Cu se ha visto que sus iones pueden fácilmente precipitar con varios aniones tales como sulfuro, carbonato e hidróxido. Sin embargo, las formas más comunes de Cu son los quelatos orgánicos solubles; la biodisponibilidad de las formas solubles de Cu depende muy probablemente del peso molecular de los complejos de Cu y de las cantidades presentes (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

En el caso del Ni se ha establecido que a pesar de que la materia orgánica es capaz de movilizar al Ni a partir de carbonatos y óxidos, también provoca una disminución en la adsorción de este metal sobre las arcillas suspendidas, el enlace de este elemento a los ligandos orgánicos podría ser débil: los ligandos acomplejantes tales como sulfatos y los ácidos orgánicos reducen la adsorción del Ni.

Recientemente, el Ni se ha convertido en un contaminante serio que es aportado debido a las emisiones de las operaciones de procesos de metales y al aumento de la combustión del carbón y el petróleo; también son fuentes importantes la aplicación o descarga de aguas negras o sus lodos y algunos fertilizantes fosforados: el Ni en las descargas de aguas residuales puede presentarse principalmente en formas orgánicas queladas, estar muy disponible hacia los organismos, principalmente la vegetación y por tanto ser altamente fitotóxico (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

De forma natural en los sedimentos y suelos, el Co está fuertemente determinado por la formación de los óxidos de Fe y Mn (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). En la naturaleza el Co se presenta en dos estados de oxidación: Co^{2+} y Co^{3+} y en la formación del complejo aniónico $\text{Co}(\text{OH})^-$. Durante el intemperismo, el Co es relativamente móvil en ambientes oxidantes debido a una adsorción alta sobre los óxidos de Fe y Mn, así como por las arcillas y no migra en una fase soluble. La movilidad del Co está muy relacionada al tipo de materia orgánica que exista: los quelatos orgánicos de Co son móviles y se intercambian, por lo que pueden estar disponibles para los organismos.

El Cr, un elemento de transición potencialmente tóxico, presenta estados de oxidación altamente variables (de +2 a +6) y forma complejos aniónicos y catiónicos, por ejemplo, $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$, CrO_4^{2-} , CrO_3^{3-} . Bajo una oxidación progresiva, el Cr forma el ión cromato (CrO_4^{2-}) que es móvil y se adsorbe fácilmente por arcillas e hidróxidos, esta adsorción es dependiente del pH; la materia orgánica estimula la reducción de Cr^{6+} a Cr^{3+} . El Cr^{6+} es muy soluble y por tanto altamente tóxico para los organismos; de esta forma, la variabilidad en los estados de oxidación del Cr en sedimentos y suelos es de gran importancia ambiental.

Se ha observado para el Pb que cuando se presenta en forma de sulfuro se oxida lentamente y es capaz de formar carbonatos e incorporarse a las arcillas, en óxidos de Fe, Mn y en la materia orgánica. El Pb tiene la capacidad de reemplazar al K, Ba, Sr y Ca en los minerales y particularmente en los sitios de adsorción. A pH alto, este metal puede precipitar como hidróxido, fosfato o carbonato así como favorecer la formación de complejos orgánicos los cuales son más estables; el incremento en la acidez puede aumentar la solubilidad del Pb pero su movilización es menor que la acumulación en las capas sedimentarias ricas en materia orgánica.

Otro metal con características tóxicas y que representa un riesgo para la calidad ambiental de los ecosistemas es el Cd el cual es químicamente similar al Zn; bajo condiciones de oxidación fuerte, el Cd forma minerales (CdO , CdCO_3), también es común que se acumule en depósitos de fosfatos y biolitas (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

Es factible suponer que estos elementos son adsorbidos sobre las partículas sedimentarias, ya sea que provienen del continente a través de las descargas fluviales que son abundantes en esta región del Golfo de México, o también debido al transporte atmosférico que los arrastra hasta la zona costera y oceánica donde se depositan y acumulan. Se ha reportado en la literatura que dentro de los diferentes

tipos de arcillas, la montmorilonita es la que presenta una capacidad de intercambio superficial mayor. Particularmente alta para las sustancias orgánicas, especialmente los ácidos húmicos (Förstner y Wittman, 1981); si se toma en cuenta que para el Golfo de México, Scafe y Kunze (1971) reportan que la montmorilonita es el mineral arcilloso más abundante en los sedimentos del Golfo de México, esto puede representar una fuente importante de metales.

Se ha propuesto por Jenne (1976) que el papel más importante de las arcillas minerales en la adsorción de elementos traza sobre los sedimentos, es el de un sustrato mecánico para que ocurra la precipitación y floculación de sustancias orgánicas y minerales secundarios, entre éstos, los óxidos de Fe y Mn han mostrado una gran afinidad por los elementos traza involucrando mecanismos de adsorción y coprecipitación. Estos procesos pueden ocurrir en la zona de estudio ya que en el trabajo de Rosales-Hoz y colaboradores (1992), para la región de la descarga del sistema Grijalva-Usumacinta, observaron una relación entre la distribución del Mn y de metales asociados como Ni, Cu y Cr los cuales pueden originarse a partir del material detrítico que llega al ambiente marino a través de estos ríos.

Aunado a este proceso debe considerarse que para las épocas de colecta de esta contribución, correspondieron una gama de valores en los volúmenes de descarga de los ríos; el Coatzacoalcos disminuye su volumen entre enero y mayo (<20-30 Km³), aumentando bruscamente hacia junio-julio (30-85 Km³) y se ha registrado su nivel máximo en septiembre (118 Km³) decreciendo hacia diciembre (Shirasago-German, 1991), por lo que la generación de frentes oceánicos con las características derivadas de los mismos, así como el efecto sobre la dinámica del fondo y los materiales asociados tanto a las masas de agua como a los sedimentos, varían en su comportamiento e intensidad.

Por otro lado, el análisis del contenido de carbonatos, al igual que el de la materia orgánica, contribuye con información valiosa para inferir sitios probables de

acumulación de compuestos y sustancias como los metales pesados. En los sedimentos del sur de Veracruz, los porcentajes de carbonatos oscilaron entre 1.29 y 15.74 % (Tabla 5); su distribución siguió un patrón similar al observado para la materia orgánica, es decir, una zona profunda (60-140 m) donde probablemente el material carbonatado derivado de las comunidades arrecifales de la Península de Yucatán e incluso del Mar Caribe, contribuye a los niveles altos de carbonato en esta región del Golfo (Campos, 1981; Pica-Granados *et al.*, 1991); otra área somera (26-43 m) localizada frente a las descargas del Coatzacoalcos y del Tonalá donde se ha reportado la presencia de sedimentos gruesos como gravas y arenas mezcladas con lodos (Carranza-Edwards y Aguayo-Camargo, 1992). Esta región pertenece a la quinta provincia geomorfológica, cuya característica más sobresaliente es que el tipo de sedimentos actuales es una evidencia de los cambios en el nivel del mar y de la existencia de antiguas desembocaduras de ríos (Bouma, 1972; Lecuanda y Ramos, 1985). Campos (1981) reporta un contenido de carbonatos aproximadamente del 25 % para esta zona del Golfo.

No se registró correlación estadística significativa entre los carbonatos y los niveles totales de metales pesados (Tabla 4); en la literatura han existido una serie de opiniones encontradas sobre la adsorción de estos elementos sobre los carbonatos; Krauskopf (1956), considerando los contenidos relativamente bajos de la mayoría de metales pesados en carbonatos, sugirió que la adsorción no tiene un papel preponderante; actualmente se conoce un poco más acerca de estos procesos de adsorción: la energía que tienen las sustancias, generalmente es suficiente para afectar la adsorción, al menos en el orden de magnitud observado para arcillas como la caolinita (Suess, 1973). Investigaciones con sedimentos lacustres mostraron que la coprecipitación con minerales carbonatados puede ser un mecanismo importante para metales como Zn y Cd (Deurer *et al.*, 1978). Además, Jenne (1976) ha propuesto que cuando los carbonatos se presentan como un gran componente de la fracción fina de los sedimentos, o bien cuando los elementos traza se encuentran en concentraciones suficientemente altas para saturar la adsorción de otros elementos,

la concentración de las formas químicas de Zn, Cd y Ni dependen directamente de la precipitación de carbonatos minerales, lo cual es resultado de un aumento en el pH. Por ejemplo, Bower *et al.* (1978) observaron que los compuestos de Cd, provenientes de una descarga de una fábrica de baterías Cd-Ni, fueron relativamente menos móviles debido a la formación de las fases CdCO_3 insoluble en el desecho alcalino.

Se ha visto en los sistemas naturales que los óxidos de Mn son los sólidos con mayor capacidad para adsorber metales pesados (Fergusson, 1990); de forma experimental Groth (1971) ha mostrado que elementos como Co, Zn y Cu coprecipitan junto con los hidróxidos de Fe/Mn en un 67, 86 y 98 %, respectivamente; además, observó que la coprecipitación con carbonatos es un mecanismo importante de eliminación de la columna de agua de metales como Zn y Cd, cuando el contenido de carbonatos es alto y los óxidos de Fe / Mn o las sustancias orgánicas son menos abundantes.

En el sur de Veracruz, los niveles registrados de carbonatos no son altos ya que el 82.8 % estuvo por debajo del 10 % de contenido y por tanto, los mecanismos de adsorción, precipitación y acumulación, tanto de este componente sedimentológico como de los elementos traza estudiados, son independientes como se ha establecido en estudios anteriores (Krauskopf, 1956; Groth, 1971; Jenne, 1976).

6.1.1.2 PLATAFORMA CONTINENTAL DE TABASCO.

Durante esta campaña oceanográfica se observó que el Cr registró la concentración total promedio más alta con 101.71 ppm y un intervalo de 57.78 (est. 42) a 157.24 ppm (est. 63) (Tabla 6), y ocupó el primer lugar de esta contribución.

TABLA 6 NIVELES DE METALES PESADOS TOTALES EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TABASCO (OGMEX 7). VALORES EN $\mu\text{g g}^{-1}$.

CRUCERO Y ESTACIÓN	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
OGMEX 7							
42	24.64	11.92	72.10	106.58	57.78	N.D.	10.12
43	17.43	13.28	52.69	74.71	71.54	27.23	4.00
44	22.92	6.19	73.46	118.19	115.30	N.D.	7.15
45	17.28	14.95	75.05	101.06	121.00	N.D.	10.19
46	12.33	12.37	45.68	64.24	62.00	0.90	2.00
48	6.01	14.91	52.43	76.73	105.43	N.D.	6.66
51	9.30	5.84	56.70	76.78	60.66	N.D.	6.74
53	20.76	4.97	104.52	109.62	130.50	N.D.	10.89
55	28.65	11.01	89.64	121.54	104.72	N.D.	8.38
63	19.96	11.69	123.23	107.54	157.24	N.D.	8.90
64	16.68	16.55	102.73	66.45	115.71	5.60	4.09
65	6.09	13.70	76.12	53.35	83.00	N.D.	2.62
66	N.D.	16.02	79.70	56.53	100.87	N.D.	8.87
68	6.74	26.09	153.81	87.91	108.14	N.D.	8.21
71	2.27	16.04	122.96	70.45	147.96	N.D.	8.88
73	5.38	23.59	110.64	73.08	114.11	N.D.	11.85
74	5.76	9.73	63.72	47.29	77.94	N.D.	2.81
75	N.D.	25.64	139.13	84.40	124.73	N.D.	7.41
76	16.90	22.42	146.07	104.09	142.79	N.D.	13.92
77	20.80	16.11	77.55	77.64	83.30	6.09	2.94
78	18.32	15.58	73.16	78.78	78.27	5.22	3.71
79	20.35	15.53	73.21	81.77	82.46	6.79	4.13
81	32.70	11.00	85.49	107.13	70.60	N.D.	12.82
83	19.21	15.04	70.59	76.34	87.73	6.44	4.81
84	33.53	12.47	105.40	127.85	109.83	N.D.	11.66
85	20.96	7.42	82.26	104.89	97.73	N.D.	9.96
86	15.48	15.70	67.70	70.74	64.60	4.33	4.07
87	18.71	14.39	72.36	73.99	75.70	5.75	4.22
88	18.21	15.96	83.74	79.45	86.65	4.01	4.82
90	18.58	9.11	130.00	92.01	148.83	N.D.	10.24
92	13.12	15.33	103.80	61.04	122.03	1.41	3.84
93	17.37	18.80	147.42	67.50	145.40	3.50	4.14
PROMEDIO	16.88	14.35	91.03	84.36	101.70	6.44	7.03
DESV. STD.	7.77	5.16	29.85	20.81	28.73	6.81	3.38
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN LINEAL (r)							
MATERIA ORGÁNICA	0.4563	0.1769	0.2019	0.2218	0.1420	0.0203	-0.0939
CARBONATO	0.5362	-0.0346	0.1032	0.3943	-0.1694	-0.1407	0.0889
N.D. ⇒ NO DETECTADO (< 0.46 $\mu\text{g g}^{-1}$)							

En segundo lugar se encuentra el Ni con una concentración total promedio de 91.03 ppm (45.68 en la estación 46 a 153.81 ppm en la estación 68). El Zn ocupa el tercer lugar en esta campaña con un valor promedio de 84.36 ppm y un intervalo de 47.29 (est. 74) a 127.85 ppm (est. 84). En orden decreciente se encuentra el Cu y el Co con valores promedio muy similares: 16.88 y 14.35 ppm, respectivamente (Fig. 8); el Pb no fue detectado en un 62.5 % de las muestras analizadas y tuvo un nivel máximo de 27.23 ppm en la estación 43 y un mínimo por arriba del valor no detectable de 0.90 ppm en la estación 46; el Cd presentó una concentración total promedio de 7.03 ppm, uno de los valores más altos obtenidos en todo el estudio; los niveles oscilaron entre 2.00 (est. 46) a 13.92 ppm (est. 76).

El comportamiento decreciente de los valores de los metales estudiados es el siguiente (Fig. 8):

Cr > Ni > Zn > Cu > Co > Cd > Pb

Es importante mencionar que hubo dos zonas de distribución de las concentraciones más altas de los elementos evaluados: una de ellas localizada cerca de la costa hacia el borde occidental del río Grijalva (estaciones 46, 48, 51, 66, 68, 71 y 93) donde los metales Cr, Ni, Co y Cd fueron los predominantes; la otra área se ubicó lejos de la costa con profundidades mayores a 120 m (estaciones 81, 83, 84 y 85). Particularmente el sitio 84 registró los niveles mayores de Cr, Ni, Zn, Cu y Cd, destacando el hecho de que el Pb no se registró en concentraciones importantes en ambas zonas. Esta región marítima recibe la influencia de las plataformas de extracción petrolera ubicadas en alta mar en la Sonda de Campeche.

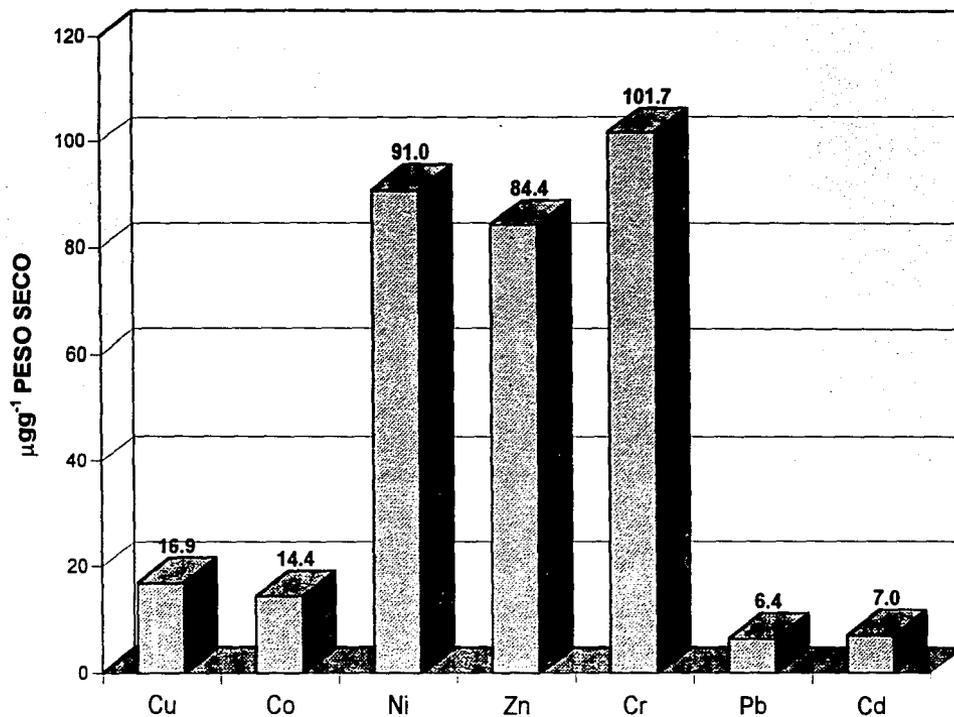


FIG. 8 NIVELES DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TABASCO. CONCENTRACIÓN TOTAL.

Se observa claramente como en la plataforma continental de Tabasco aumenta la concentración del Cr en los sedimentos respecto a lo detectado para el sur de Veracruz. El aumento en los niveles de este metal, así como del Ni, ha sido reportado para sistemas lagunares del sur de Veracruz, Tabasco y Campeche donde las actividades relacionadas con la industria petrolera, principalmente la exploración y extracción del crudo, son las más importantes de la región (Ponce-Vélez y Botello, 1991; Villanueva y Botello, 1992).

Para esta zona del Golfo de México, Rosales-Hoz *et al.* (1992) reportan valores de Cr entre 125 y 325 ppm ubicando los más altos en dirección de la Laguna de Términos; estas concentraciones son mayores respecto a lo registrado en este estudio ya que el nivel máximo de este elemento fue de 157.2 ppm. Para el caso del Ni estos autores obtuvieron valores entre 25 y 175 ppm, los niveles más altos se localizaron frente a la desembocadura de los ríos San Pedro y San Pablo y los registrados en este estudio son muy similares ya que su valor máximo fue de 153.8 ppm. En ese mismo trabajo los niveles de Zn reportados por los autores, fluctuaron entre 20 y 120 ppm en un gradiente decreciente del río Grijalva hacia la Laguna de Términos, esto es, en dirección oriente y fueron semejantes a los detectados en esta contribución (máximo de 127.9 ppm). Estos investigadores comentan la existencia de un movimiento de sedimentos hacia el NE y encontraron una correlación alta entre las concentraciones de Si, Fe y Zn lo cual sugiere que estos elementos provienen principalmente de material terrígeno. También observaron que la distribución del Mn y metales asociados como Ni y Cr, puede originarse a partir del material detrítico que ingresa al ambiente marino a través de los ríos en forma iónica, o como una película de hidróxido adherida a este material. Una vez en el medio marino, el Mn se hidroliza, precipita y acarrea algunos elementos asociados (Cu, Ni y Cr) hacia la columna sedimentaria; tanto el aporte de sedimentos fluviales como la distribución de Mn detectada por estos autores en esta región del Golfo de México, sugieren que el aporte de estos elementos se origina fundamentalmente a partir de material terrígeno. Cabe destacar que en el trabajo de Rosales-Hoz *et al.* (1992) no se

detectaron metales como Cu, Cd, V y Pb, los cuales (a excepción del V) si fueron registrados en esta investigación, resaltando el hecho de haber obtenido niveles altos de Cd (máximo 13.9 ppm) para sedimentos de plataforma continental.

Para el Cu, en un estudio realizado en sedimentos del Estrecho Torres (plataforma continental), localizado entre Nueva Guinea y Australia, Baker y Harris (1991) encontraron que las concentraciones más altas de este elemento (> 40 ppm) se detectaron en sedimentos arenosos, mientras que los niveles disminuyeron hasta 20 ppm del estuario hacia mar abierto, denotando una zona de influencia fluvial con la manifestación de un delta mezclado arenoso y lodoso de origen terrestre; este comportamiento es similar a lo observado para la plataforma continental de Tabasco en la desembocadura del Grijalva y los autores antes mencionados reportan que las concentraciones más bajas (< 5 ppm) las detectaron en sedimentos arenosos predominantemente carbonatados y este patrón, para el caso de Tabasco, no fue observado ya que los sitios de colecta con menor cantidad de Cu (2.3-9.3 ppm) (estaciones 48, 51, 65, 66, 68, 71, 73, 74, 75) no tuvieron los niveles más altos de carbonatos (3.2-10.3 %) (Tablas 6 y 7).

Para el Pb, Baker y Harris (1991) reportan que las menores concentraciones (<1 ppm) se localizaron en sedimentos carbonatados de plataforma continental, y en el caso de Tabasco este comportamiento no es tan claro ya que 11 sitios de colecta tuvieron un contenido de carbonatos mayor al 10 % (10.3-16.7 %), mientras que el 50 % de las estaciones no presentó este componente (Tablas 6 y 7).

Además, la distribución de las estaciones en el área de estudio ocupa longitudinalmente la región del río Grijalva y la Laguna Mecocacán cuyos aportes pueden contribuir con material en suspensión que lleve adsorbidos a los elementos analizados; por lo que cabe mencionar la dimensión de la descarga fluvial que impera en esta región del Golfo. Se ha reportado un volumen anual del río Grijalva de 8.3 Km³ y del río Usumacinta de 55.4 Km³ (S.R.H., 1976); los niveles anuales de

material en suspensión acarreados para cada sistema son de 130 y $844 \times 10^3 \text{ m}^3$ respectivamente (Pérez-Ramos, 1988), es decir, el río Usumacinta aporta 6.5 veces más que el Grijalva por lo que el sistema en su conjunto es la fuente principal tanto de sedimentos, como de material en suspensión y disolución en esta región del Golfo de México.

Se ha reportado una gran contribución fluvial al ambiente marino por el sistema Grijalva-Usumacinta y su influencia sobre la zona costera y oceánica puede oscilar entre 15 y 25 millas náuticas dependiendo de la época del año, ya que se ha visto una descarga máxima durante el otoño provocando la generación de frentes de pluma de río con las características particulares derivadas como gradientes de salinidad, temperatura, y densidad de las masas de agua; lo que origina una zona de "trampa" donde diversos materiales, entre ellos los contaminantes, permanecen más tiempo hasta que el fenómeno disminuye o desaparece (Padilla *et al.*, 1986; Cruz-Abrego *et al.*, 1991; Shirasago-German, 1991). Ahora bien, en esta área del Golfo, la plataforma continental es amplia, posee alrededor de 90 m al norte del Grijalva y 11 m frente al río San Pedro-San Pablo (afluentes del Usumacinta); se ha reportado una composición sedimentológica correspondiente a la de un delta con proporciones altas de carbono orgánico y lodo (Cruz-Abrego *et al.*, 1991); sin embargo, Pérez-Ramos (1988) en un estudio específico sobre los sedimentos de la plataforma continental del Golfo de México, reporta que en el área del Usumacinta se encuentra una concentración de arena inmediata a su desembocadura y hasta una profundidad de 20 m, ocurriendo en dicha zona una remoción de sedimentos finos lodosos en dirección NE-SW, los cuales se distribuyen alrededor de esta franja arenosa y pueden encontrarse entre los 15 y 90 m de profundidad, lo cual influye de manera importante sobre la distribución de la materia orgánica, los carbonatos, así como sustancias y compuestos asociados entre los que figuran los metales pesados evaluados en el presente trabajo.

De forma complementaria se evaluó el contenido de materia orgánica en esta zona del Golfo de México. Registró un valor promedio de 1.05 % con el nivel más pequeño en la estación 66 (0.53 %) y el más alto en la 93 (1.73 %) (Tabla 7). Rosales-Hoz *et al.* (1992) reportan concentraciones de materia orgánica para esta región, entre 0.5 y 1.5 % de carbono orgánico, estos niveles son similares a los obtenidos en esta contribución. Al igual que para el caso del sur de Veracruz, en la plataforma continental de Tabasco no fue posible registrar alguna correlación importante con los metales estudiados ya que el coeficiente mayor se presentó para la asociación con el Cu con un valor de 0.4563 (Tabla 6). Los argumentos expuestos anteriormente, para tratar de explicar los mecanismos de adsorción y acumulación de los metales pesados y la materia orgánica existentes en los ambientes costeros, son válidos para lo observado en esta región de Tabasco. Del mismo modo, se conoce que los materiales orgánicos poseen una capacidad alta de acumulación de metales, observándose que aquellas concentraciones altas de estos elementos que tienen una correlación significativa con la materia orgánica, pueden considerarse como biogénicos derivándose que los metales no correlacionables serían de tipo antropogénico, detrítico y terrígeno, entre otros (Rosales-Hoz *et al.*, 1992).

El contenido de carbonatos también fue evaluado para los sedimentos de la plataforma continental de Tabasco. Los niveles de este parámetro registraron una media de 8.82 % con un valor mínimo de 3.2 % en la estación 66, y el máximo de 16.68 % en el sitio 42; un patrón inverso en el caso del primer punto en relación con la materia orgánica (Tabla 7). Valores similares de carbonatos (10-15 %) han sido detectados en otros estudios para la misma zona geográfica (Rosales-Hoz *et al.*, 1992). Cabe recordar que esta área se encuentra en el límite de dos provincias geológicas contrastantes del sur del Golfo de México: la terrígena cuyo límite geográfico es la Laguna de Términos en Campeche y la carbonatada o calcárea que se inicia en este sistema lagunar y prosigue hacia la Península de Yucatán. Asimismo, se ha reportado que los sedimentos del sureste del Golfo de México están formados esencialmente por un sistema de arcillas y carbonatos; considerando la

TABLA 7 VALORES DE MATERIA ORGÁNICA Y CARBONATOS EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TABASCO (OGMEX 7).

CRUCERO Y ESTACIÓN	MATERIA ORGÁNICA (% CARBONO ORGÁNICO)	CARBONATOS (%)
OGMEX 7		
42	1.14	16.68
43	1.22	5.77
44	0.96	8.34
45	0.96	5.13
48	0.98	1.28
48	0.93	6.42
51	0.55	5.77
53	1.15	7.70
55	0.83	8.34
63	1.42	8.98
64	0.86	7.70
65	0.67	4.49
66	0.53	3.20
68	0.90	10.26
71	0.64	5.77
73	0.80	6.41
74	0.79	9.62
75	1.10	9.62
76	1.02	5.13
77	1.15	8.34
78	1.44	9.62
79	1.47	10.90
81	1.28	12.83
83	1.00	14.76
84	0.99	14.11
85	1.16	12.19
86	0.80	12.83
87	1.07	10.90
88	1.56	10.90
90	1.22	8.34
92	1.16	7.05
93	1.73	12.83
PROMEDIO	1.06	8.82
DESV. STD.	0.29	3.51

concentración de estos últimos, se puede observar una región de transición ubicada frente a la Laguna de Términos con valores menores al 50 % en su porción occidental, y mayores a este nivel hacia el oriente; a partir de la desembocadura del Grijalva y hacia mar abierto, el contenido de carbonatos es menor al 25 % debido principalmente al aporte fluvial de este gran sistema (Carranza-Edwards *et al.*, 1993; Rosales-Hoz *et al.*, 1994).

Con los carbonatos, la mejor relación lineal encontrada con los metales, fue para el Cu con $r=0.5362$ (Tabla 6); Chester (1990) ha observado que los sedimentos carbonatados son biogénicos y no contienen metales traza a excepción del Sr y Mg; en el área de estudio se ha registrado un mayor contenido de sedimentos arenosos que lodosos (Pérez-Ramos, 1988), por lo que sus constituyentes son más terrígenos que biogénicos con una gran abundancia de cuarzo provenientes de las grandes descargas presentes en esta región del Golfo.

En la literatura se ha estipulado que los carbonatos, así como los fosfatos, son materiales inorgánicos significativos en los sedimentos y que los iones metálicos pueden coprecipitar con el CaCO_3 , conforme este compuesto se forma en el ambiente acuático. También, los metales pesados constituyen carbonatos insolubles y pueden precipitar de manera independiente (Fergusson, 1990). La acumulación de los metales evaluados no presentó un patrón de adsorción con los carbonatos como lo reflejan los coeficientes obtenidos y los procesos explicados para el sur de Veracruz donde se presentaron relaciones similares, pueden ser considerados para Tabasco. Además, Baker y Harris (1991) encontraron que a partir del análisis de regresión lineal realizado con niveles totales de Cu, Pb, Zn y parámetros sedimentológicos como tamaño de grano y carbonatos; las distribuciones observadas de estos elementos químicos en sedimentos de plataforma continental, son independientes tanto del tamaño de grano, del contenido de carbonatos, así como de la distancia a la desembocadura del río principal de su

zona de estudio y este comportamiento, específicamente con los carbonatos, es el mismo que se registró para este estudio.

La dinámica de circulación costera estrechamente relacionada con los vientos dominantes en esta región del Golfo de México, propicia la formación de giros ciclónicos que pueden contribuir a la distribución de los sedimentos provenientes del continente y de regiones orientales como el Banco de Campeche, la Península de Yucatán y la cuenca del Mar Caribe, que gracias a la Corriente de Yucatán y de Lazo afectan el sur, suroeste y siguen hacia el norte del Golfo (Carranza-Edwards *et al.*, 1993). Estas condiciones sedimentológicas y ambientales, favorecen que los metales pesados una vez que llegan a la zona costera y oceánica alcancen el fondo y puedan almacenarse en sus sedimentos.

Al igual que en Veracruz, en el caso de Tabasco llaman la atención los niveles tan altos detectados para Cd ya que oscilaron entre 2.62 y 13.92 ppm ($x = 7.03$ ppm) rebasando lo reportado por otros autores para sistemas lagunares del Golfo de México (Villanueva y Botello, 1992); es necesario mencionar que este elemento se encuentra presente en rocas magmáticas y sedimentarias y no excede de 0.3 ppm, siendo común que se concentre en depósitos arcillosos y en las sedimentarias asociadas con material orgánico, tales como nódulos marinos de Mn y las fracciones más finas de este material rocoso, así como en depósitos de fosforita; en la literatura se manifiesta alguna asociación entre este elemento y la materia orgánica; por ejemplo, en el carbón los niveles están entre 0.01 y 22 ppm, en la turba entre 0.37 y 190 ppm y en el petróleo crudo 0.01-16 ppm, por lo que en esta zona del Golfo de México, donde ocurren yacimientos petroleros importantes y la materia orgánica existente es abundante, puede pensarse que este elemento esté asociado con el petróleo, además del aporte continental vía atmosférica, donde puede generarse en procesos de galvanizado, ya que las cubiertas con Cd son anticorrosivas en ambientes tropicales marinos, utilizándose ampliamente en la construcción de vehículos; también se usa en la elaboración de amalgamas (Cd-Ni), soldaduras (Al-

Cu) y en protectores contra el fuego, en la industria química se aprovechan sus formas orgánicas como catalizadores en reacciones de polimerización, además los pigmentos que contienen este metal se usan en plásticos, pinturas, tintas y cerámica (OECD, 1975; Fergusson, 1990). El INEGI (1992) tiene registrados para Tabasco 1,264 establecimientos industriales, de los cuales 562 se relacionan con la producción de alimentos, bebidas y tabaco, 168 están dedicados al área textil y específicamente 140 soportan la industria del cuero; actividades industriales involucradas con la madera y sus productos suman 206 empresas. Para el área de sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, del hule y del plástico se registran 15 industrias, de éstas 33 son los establecimientos dedicados a la fabricación de cemento, cal, yeso y otros productos; existen 157 empresas relacionadas con la fabricación de estructuras metálicas, tanques y calderas incluyendo herrerías; estos asentamientos industriales utilizan y vierten elementos químicos como los evaluados en este trabajo y ya se han descrito para el sur de Veracruz. Por lo tanto, los niveles promedio detectados en los sedimentos de la plataforma continental de Tabasco son alarmantes si pensamos en que esto refleja una amplia distribución de los metales, así como un aporte y acumulación continuos en la zona costera.

6.1.1.3 PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS.

En este crucero (OGMEX 8) que abarca el litoral de Tamaulipas, se observa que el Zn registró la concentración total promedio mayor con 71.67 ppm y un intervalo de 17.27 (est. 30) a 115.69 ppm (est. 39); se pudo observar la influencia de sistemas costeros, como son el río Soto La Marina y la Laguna Madre, sobre la plataforma continental adyacente.

TABLA 8 NIVELES DE METALES PESADOS TOTALES EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS (OGMEX 8). VALORES EN $\mu\text{g g}^{-1}$.

CRUCERO Y ESTACIÓN	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
OGMEX 8							
15	11.24	9.89	21.87	57.89	41.62	5.95	3.46
18	4.71	8.59	11.60	31.28	14.92	0.54	5.42
19	17.29	0.23	18.16	77.05	16.06	N.D.	11.98
21	17.98	6.61	33.95	94.21	N.D.	N.D.	10.68
22	24.36	6.04	34.91	103.84	64.10	N.D.	12.10
24	6.32	N.D.	7.00	33.68	N.D.	N.D.	9.70
25	10.13	3.25	15.34	32.14	N.D.	N.D.	18.02
27	21.81	13.20	33.38	100.34	12.11	N.D.	9.92
28	22.35	7.46	76.09	100.84	18.90	N.D.	9.00
30	5.15	8.62	10.22	17.27	32.15	N.D.	8.77
31	15.74	2.98	30.90	90.12	N.D.	N.D.	12.46
33	12.97	11.14	24.27	66.39	40.22	6.93	3.10
34	24.98	11.67	44.63	105.87	16.01	N.D.	12.94
36	7.19	N.D.	1.86	27.62	N.D.	N.D.	3.00
39	23.44	11.36	40.75	115.69	N.D.	N.D.	13.23
40	21.64	4.43	42.85	102.18	58.54	N.D.	11.68
42	3.20	3.65	6.11	18.90	10.86	N.D.	2.77
43	5.63	3.00	19.84	50.60	N.D.	N.D.	7.84
46	11.46	10.00	24.26	59.40	42.98	3.47	3.13
48	19.91	3.37	37.52	103.13	70.20	N.D.	13.01
50	14.57	N.D.	15.78	43.04	28.10	N.D.	10.72
53	24.82	1.95	43.15	113.48	49.71	N.D.	4.49
56	23.47	0.27	22.39	103.45	74.96	N.D.	12.85
PROMEDIO	16.23	6.39	26.82	71.67	36.97	4.22	9.14
DESV. STD.	7.48	4.02	16.71	33.93	21.71	2.85	4.26
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN LINEAL (r)							
MATERIA ORGÁNICA	-0.1102	-0.2146	-0.3140	-0.1406	0.2319	0.4239	-0.1808
CARBONATO	-0.4763	0.0974	-0.3226	-0.4823	-0.1470	-0.9060	-0.0685
N.D. ⇒ NO DETECTADO ($< 0.48 \mu\text{g g}^{-1}$)							

En segundo lugar se encuentra el Cr con 36.97 ppm con un mínimo de 10.86 ppm (est. 42) y un máximo de 74.96 ppm (est. 56); cabe mencionar que de las 23 estaciones de colecta en esta campaña, el Cr no fue detectado en 7 sitios (30.4 %) (Tabla 8).

El Ni ocupó el tercer lugar con 26.82 ppm de concentración total promedio y los valores oscilaron entre 1.86 (est. 36) y 76.09 ppm (est. 28); en orden decreciente, sigue el Cu con un promedio de 15.23 ppm (3.20-24.98 ppm) y posteriormente el Cd con 9.14 ppm con un intervalo de 2.77 (est. 42) a 18.02 ppm (est. 25); este metal, de los clasificados como tóxico y de alto riesgo ambiental, presenta en este litoral valores muy altos sobre todo si se toma en cuenta que son sedimentos de plataforma continental porque normalmente se reportan concentraciones del orden de 1-5 ppm; el valor máximo se registró cerca de la costa y con influencia de la Ciudad de Tampico-Madero que descarga hacia el mar sus desechos, así como toda una serie de asentamientos industriales principalmente de tipo petroquímico que definitivamente presentan un efecto sobre la zona costera adyacente, sin descartar la asociación que tiene este elemento con el petróleo crudo debido a que en esta zona del Golfo de México existen yacimientos y filtraciones naturales de este energético (Geyer y Giammona, 1980).

Los valores más altos de la mayoría de los metales evaluados se distribuyeron a lo largo de la isobata de los 200 m desde la zona de influencia del río Pánuco y la Laguna de Tamiahua, Ver., hasta el límite con los Estados Unidos, frente a la Ciudad de Matamoros donde la descarga del sistema lagunar Madre, que sufre la influencia de la circulación costera predominantemente N-NW, afecta a la plataforma continental adyacente.

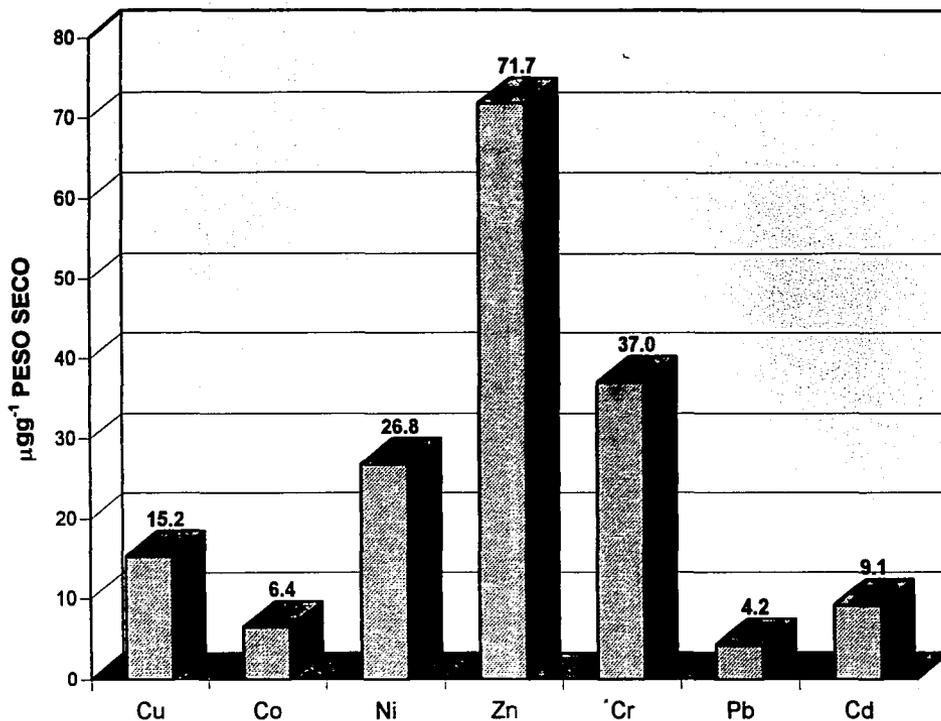
El Co presentó 6.39 ppm de nivel total promedio con valores que van de 0.23 (est. 19) a 13.20 ppm (est. 27) y finalmente está el Pb con una media de 4.22 ppm y un intervalo de 0.54 (est. 18) a 6.93 ppm (est. 33); este metal sólo pudo detectarse en

4 de las 23 estaciones de colecta, lo cual representa el 17.4 % de los sitios analizados siendo una población de muestra muy baja (Tabla 8); aparentemente esto daría una ventaja ambiental ya que el Pb es otro de los metales potencialmente tóxicos y refleja un impacto del desarrollo industrial del hombre sobre el ambiente.

El comportamiento decreciente de las concentraciones totales de los elementos analizados en los sedimentos de la plataforma continental de Tamaulipas (OGMEX 8) es el siguiente (Fig. 9):

Zn > Cr > Ni > Cu > Cd > Co > Pb

También, fueron evaluados los niveles de materia orgánica en esta región noroccidental del Golfo de México. En Tamaulipas se encontró un nivel promedio de materia orgánica de 1.15 %, las concentraciones oscilaron entre 0.14 % en sitios ubicados lejos de la costa a profundidades aproximadamente de 200 m (estaciones 27 y 40), 3.23 % hacia el extremo norte del área de estudio en dirección de la Ciudad de Matamoros (estación 56). En el borde norte de la Laguna Madre (estaciones 50 y 53) (Tabla 9), es importante señalar que el sitio 27 a pesar de estar ubicado cerca de la Ciudad de Tampico, registró niveles bajos de materia orgánica, mientras que la ubicación de la estación 56 localizada cerca de la frontera con Estados Unidos, puede reflejar la descarga de aguas residuales de los centros urbanos fronterizos mexicanos y estadounidenses, así como el efecto de la circulación costera que tiende hacia el norte del Golfo de México.



**FIG. 9 NIVELES DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS
DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS.
CONCENTRACIÓN TOTAL.**

Cabe señalar que aquellos lugares donde se registraron niveles altos de materia orgánica (1.17-3.23 %) reciben los aportes fluviales de los sistemas Pánuco-Tamesí y Soto La Marina, los cuales desembocan en las inmediaciones de Tampico y la Laguna de Morales, respectivamente; el río Bravo cuyo efluente se localiza a la altura de la ciudad fronteriza de Matamoros influye en el límite norte. Por otro lado, los sistemas lagunares de la Laguna Madre, la cual abarca desde la región central del estado hasta su extremo norte, tienen un aporte que alcanza la zona oceánica del noroeste del Golfo de México. Es importante recordar que en esta región se presenta un tipo de circulación oceánica anticiclónica donde se propicia un hundimiento de la masa de agua y se puede favorecer la sedimentación de los materiales suspendidos, por lo tanto, todo aquello exportado por los sistemas costeros de la región, llega a la plataforma continental utilizando posiblemente menos tiempo lo que contribuye a la riqueza y riesgo de los sedimentos.

Los metales analizados durante esta campaña no mostraron una buena correlación lineal con la materia orgánica, el coeficiente más alto fue con el Pb ($r = 0.4239$) (Tabla 8), este comportamiento ha sido observado en la plataforma continental del sur de Veracruz y Tabasco y se ha discutido anteriormente.

Los carbonatos en la plataforma continental de Tamaulipas presentaron un valor promedio de 10.7 %, registrando el mínimo en la estación 50 (1.28 %) y el máximo en la 30 (75.1 %) (Tabla 9); ambos sitios se encuentran muy cerca de la costa, el primero de ellos frente a la Laguna Madre al norte de la zona de estudio, y el segundo entre la descarga del río Soto La Marina y la Ciudad de Tampico-Madero. Los sistemas mencionados pueden contribuir a los altos niveles de carbonatos al igual que la Laguna de Tamiahua, Ver., en donde las comunidades bentónicas, principalmente malacológicas, son abundantes y sus exoesqueletos enriquecen de carbonatos los sedimentos; este parámetro sedimentológico así como la materia orgánica, ocuparon los valores más altos durante este estudio.

TABLA 9 DISTRIBUCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y CARBONATOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS (OGMEX 8).

CRUCERO Y ESTACIÓN	MATERIA ORGÁNICA (% CARBONO ORGÁNICO)	CARBONATOS (%)
OGMEX 8		
15	1.22	7.05
18	1.38	27.59
19	0.53	12.19
21	0.47	8.98
22	0.73	4.49
24	1.67	7.70
25	1.15	13.47
27	0.14	3.41
28	0.68	5.77
30	0.50	75.10
31	1.30	8.34
33	1.82	8.34
34	1.18	3.21
36	1.39	6.41
39	1.15	3.85
40	0.17	8.34
42	1.48	6.41
46	1.17	10.26
48	0.61	3.85
50	1.64	1.28
53	1.70	4.15
56	3.23	5.13
PROMEDIO	1.15	10.70
DESV. STD.	0.68	15.35

Del análisis de correlación lineal efectuado entre los elementos estudiados y los niveles de carbonatos presentes en estos sedimentos costeros, solamente con el Pb se observó un coeficiente significativo ($r = -0.9060$) (Tabla 8) denotando con esto una explicación plausible de por qué este elemento sólo se detectó en el 17 % de los sitios de colecta al interactuar inversamente con los carbonatos, es decir, la presencia alta de éstos obstaculiza o impide la adsorción de este metal sobre los sedimentos.

En el estado de Tamaulipas existen 3,126 industrias registradas durante el censo industrial de 1989 (INEGI, 1992), de esta cifra, 1,386 caen en el campo de producción de alimentos, bebidas y tabaco, 247 están dedicadas al rubro textil y en particular es escaso el número de industrias relacionadas con el cuero, pieles y sus derivados (4); existen 16 manufactureras de celulosa, papel y sus productos, otras 82 están involucradas en la producción de sustancias químicas, productos derivados del petróleo, del carbón, del hule y del plástico; las industrias fabricantes de cemento, cal y yeso son 159, mientras que las del área metálica básica solamente suman 10. Se tiene un registro de 610 empresas encaminadas a la elaboración de productos metálicos, maquinaria y equipo, de los cuales 415 se encargan de la fabricación de estructuras metálicas, tanques, calderas y herrerías. Al igual que para Veracruz y Tabasco, estas industrias en Tamaulipas constituyen en gran medida las fuentes productoras de los metales detectados en este trabajo y sus medios de transporte principales son tanto las descargas fluviales como las atmosféricas.

El transporte atmosférico de los metales y elementos de transición, es una ruta de entrada de éstos hacia la zona costera; la combustión de carbón y de otros combustibles fósiles, así como diversos procesos industriales, son fuentes importantes de elementos metálicos que pueden formar compuestos volátiles o presentarse en forma particulada; el depósito atmosférico de elementos traza, principalmente de metales pesados, contribuye a la contaminación de los componentes de la biosfera: agua, suelos, flora y fauna. Los contaminantes

inorgánicos traza contenidos en el aire, tienen una dispersión amplia y un transporte a gran distancia de su fuente de origen (Kabata-Pendias y Pendias, 1992), por lo que los niveles de metales pesados registrados en esta zona del Golfo de México son resultado tanto del material terrígeno aportado por los sistemas fluvio-lagunares que afectan la plataforma continental adyacente, como por la descarga atmosférica que transporta estos elementos en ocasiones a grandes distancias de su origen.

En general, a lo largo de esta investigación se observó que la distribución de las concentraciones totales de metales pesados presentó el orden decreciente siguiente (Tabla 10):

Zn > Cr > Ni > Cu > Co > Pb > Cd
(63.1) (51.4) (45.2) (16.7) (14.0) (8.6) (6.0)

Los niveles más altos de Ni, Zn y Cr se registraron en los sedimentos colectados en la plataforma continental de Tabasco, su fuente primordial es el material terrígeno aportado por los grandes sistemas fluviolagunares como el Grijalva-Usumacinta-Términos; mientras que los de Cu, Co y Pb fueron para la plataforma continental del sur de Veracruz, donde la descarga del río Coatzacoalcos, así como la introducción atmosférica vierten al medio marino lo proveniente de las zonas industriales presentes en este estado como Pajaritos, Minatitlán, Cosoleacaque, Cangrejera, entre otros; para el Cd, el máximo fue obtenido para la zona costera de Tamaulipas sin dejar de lado que el valor promedio de Tabasco también fue elevado (7.03 ppm) (Fig.10), este elemento está asociado fuertemente a ambientes donde existe petróleo crudo como es el caso de estos dos estados. Asimismo, el grado de industrialización registrado en el Golfo de México es mayor en Veracruz, seguido por Tamaulipas y finalmente por Tabasco, dando como resultado diferentes grados de alteración ambiental en el Golfo de México.

TABLA 10 CONCENTRACIONES PROMEDIO DE METALES PESADOS TOTALES EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE VERACRUZ, TABASCO Y TAMAULIPAS. VALORES EN μgg^{-1} .

AREA	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
VERACRUZ	17.94	21.18	17.86	33.18	15.60	15.17	1.79
TABASCO	16.88	14.35	91.03	84.36	101.71	6.44	7.03
TAMAULIPAS	15.23	6.39	26.82	71.67	36.97	4.22	9.14
PROMEDIO	16.68	13.97	45.24	63.07	61.43	8.81	5.99
DESV. STD.	1.37	7.40	39.91	26.65	44.84	5.79	3.78

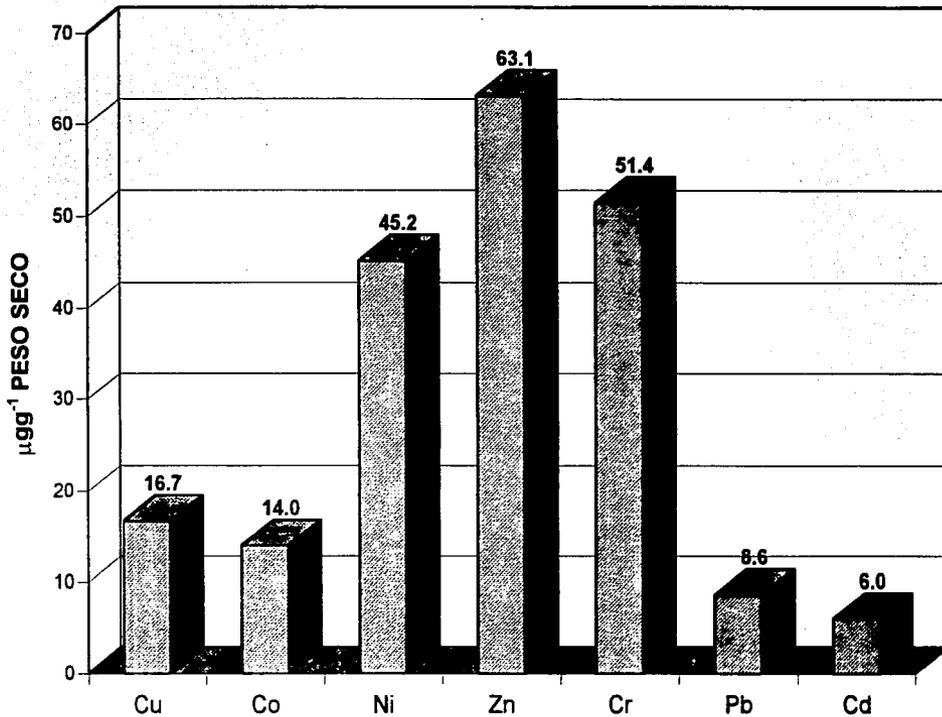


FIG. 10 COMPORTAMIENTO GENERAL DE LOS NIVELES DE METALES PESADOS EN LAS ÁREAS DE ESTUDIO. CONCENTRACIÓN TOTAL.

La relación entre los metales pesados en ambientes acuáticos ha sido estudiada con el fin de conocer los posibles mecanismos de acumulación de estos elementos en los sedimentos; es así que al correlacionar linealmente las concentraciones totales de los metales estudiados, se encontraron las asociaciones siguientes: Co-Cd (0.85), Ni-Cr (0.77), Co-Cr (0.75), Co-Ni (0.70), Cd-Cr (0.68), Ni-Cd (0.61) y Pb-Zn (0.51) (Tabla 11). Las relaciones resultaron positivas, lo que significa una acumulación proporcionalmente directa entre ellos; la mayoría de los metales de transición como los aquí evaluados (excepto el Pb) se presentan en forma de silicatos u óxidos, como metales puros o asociados a carbonatos y sulfuros minerales, el tipo de enlace de estos metales difícilmente puede determinarse ya que ellos usualmente existen en cantidades traza; aunado a esto, los elementos que registraron coeficientes de correlación significativos, comparten características que influyen su comportamiento en el medio marino: son calcófilos ya que presentan una mayor afinidad por el S comparado con el O; el Zn, Ni, Cr y Cu se asocian a los óxidos de Fe/Mn con los que precipitan y llegan al fondo donde son liberados; de las relaciones obtenidas, puede inferirse que estos elementos, a excepción del Cu, se llevan consigo a otros metales como Co, Pb y Cd presentes en la columna de agua. Förstner y Wittman (1981) establecen que existe un grado alto de correlación entre Fe, Cr, Ni, Co y Mn y en menor magnitud con el Cu, manifestando la influencia de la litología del área de colecta, este fenómeno se presentó durante el presente estudio como lo demuestran las relaciones estadísticas obtenidas entre los elementos estudiados.

Asimismo, algunos de estos metales comparten características químicas como el hecho de ser fuertes aceptores de electrones (Cr y Co), de carácter intermedio (Ni, Cu, Zn y Pb) y aceptores débiles (Cd), lo cual repercute en la forma química en que estos elementos se presentan en la naturaleza: por ejemplo, el Pb tiene preferencia sobre las bases débiles como S^{2-} y la mayoría de los metales evaluados en este trabajo (excepto el Cr) se clasifican como muy tóxicos y relativamente disponibles (Wood, 1974); son considerados como aceptores poco fuertes formando enlaces

TABLA 11 ÍNDICES DE CORRELACIÓN LÍNEAL ENTRE LAS CONCENTRACIONES TOTALES DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL GOLFO DE MÉXICO. (ESTUDIO COMPLETO).

	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
Cu	1.00						
Co	-0.10	1.00					
Ni	-0.15	0.70	1.00				
Zn	0.30	0.08	0.14	1.00			
Cr	-0.22	0.75	0.77	0.25	1.00		
Pb	0.37	-0.13	-0.19	0.51	-0.03	1.00	
Cd	-0.08	0.85	0.81	-0.05	0.88	-0.17	1.00

estables con donadores electrónicos del mismo tipo como los grupos SH⁻ que son los sitios activos de muchas proteínas (Förstner y Wittman, 1981); además la mayoría de estos metales son utilizados en campos muy diversos tales como refinерías de petróleo, industrias productoras de fertilizantes y acereras, fabricantes de papel, textiles, productos cementeros, entre otros; adicionalmente, se ha observado que negocios como lavanderías, fábricas de helados y bebidas, tintorerías, aportan las mayores cantidades de Cu, Cr, Ni, Zn y Cd en sus desechos (Klein *et al.*, 1974). También es importante mencionar que las concentraciones de Cu, Pb, Zn y Cd pueden provenir de efluentes domésticos debido a la corrosión que existe en el sistema de drenaje y alcantarillado urbano del Golfo de México; probablemente toda esta dinámica influye sobre las relaciones estadísticas observadas.

En estudios realizados sobre la evaluación de niveles de sustancias consideradas contaminantes, es recomendable establecer un cuadro comparativo donde se contemplen datos reportados tanto para la misma zona geográfica (si existen), como para otras regiones del mundo con características similares para poder estimar el grado de contaminación que puede estarse presentando.

En la Tabla 12 se puede observar que al comparar los niveles de esta investigación con otras regiones del mundo, las concentraciones detectadas para la plataforma continental del sur de Veracruz y Tabasco, estuvieron dentro del intervalo reportado para sedimentos del Golfo Arabe, Golfo de Jordania, Kuwait, Costa Inglesa, entre otros (Taylor, 1974 *vide* Sadiq y Zaidi, 1985; Anderlini *et al.*, 1982; Sadiq y Zaidi, 1985; Tariq *et al.*, 1993), regiones donde existen complejos industriales importantes; el metal que no siguió este patrón fue el Cd ya que en la plataforma continental de Tamaulipas se registró un valor promedio de 9.1 ppm, equiparable o superior a lo reportado para los lugares como los antes mencionados donde las actividades petroleras y marítimas son muy intensas. Los sedimentos de la plataforma continental de Tabasco tuvieron concentraciones de Ni, Zn, Cr y Cd similares a los

encontrados en los sedimentos costeros del medio oriente (Arabia y Jordania), cuyo común denominador son las actividades petroleras.

En relación con las zonas costeras del Golfo de México estudiadas por los diferentes autores, se puede notar que los niveles de los metales esenciales Cu y Co obtenidos en este estudio se ubican en los límites menores (< 22 ppm) respecto a los valores que existen en las lagunas costeras y ríos que son producto de las actividades industriales, petroleras y urbanas propias de la región como el caso de los ríos Coatzacoalcos y Blanco, y la Laguna del Ostión en Veracruz; el Zn registrado para Tabasco y Tamaulipas en este trabajo se encontró en niveles altos, similares a las zonas impactadas antes mencionadas. Los metales potencialmente tóxicos Ni, Cr y Cd detectados para Tabasco se equiparan a los sistemas lagunares de Alvarado y Del Ostión, y fluviales como el río Tonalá en Veracruz, cuya explotación es intensa principalmente en actividades pesqueras, recreativas y petroleras, además de estar ubicados cerca de importantes zonas urbanas e industriales del estado.

Al comparar las concentraciones obtenidas en este estudio con sedimentos de la plataforma continental del Golfo de México, reportados por otros autores, puede notarse que los niveles de Ni, Zn y Cr de esta investigación son similares al intervalo de concentraciones reportado para la Sonda de Campeche por Rosales y colaboradores (1992) y el Cr se encuentra por debajo de ellos; estos autores observaron un efecto fundamental de la descarga del sistema Grijalva-Usumacinta, la Laguna de Términos y la influencia de la zona de plataformas petroleras en esta región del Golfo; en el trabajo de Ríos-Quiroz (1993) realizado en el sur de la plataforma continental de Veracruz se observa una similitud entre los valores de los metales estudiados para esta área de México (Tabla 12).

TABLA 12 COMPARACIÓN DE METALES PESADOS TOTALES EN SEDIMENTOS RECIENTES DE DIVERSAS REGIONES DE MÉXICO Y EL MUNDO. (VALORES EN ppm)

LOCALIDAD	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd	REFERENCIA
MAR ÁRABE, PAKISTAN	24.40	-	76.40	65.30	32.30	7.90	0.44	TARIQ et al. 1983
GOLFO ÁRABE, KUWAIT	-	-	15.0 - 139	12.0 - 123	17.0 - 121	17.0 - 48	1.2 - 3.9	ANDERLINI et al. 1982
GOLFO ÁRABE, AR. SAUD.	-	-	22.5 - 64	4.2 - 22.6	3.4 - 35.0	0.6 - 4.2	2.5 - 5	SADIQ Y ZAIDI, 1985
GOLFO DE JORDANIA	6.9 - 25.6	23.1 - 42.8	28.8 - 62	23.8 - 194.9	11.7 - 123.0	96.3 - 183	3.8 - 13.7	ABU-HILAL, 1983
BAHIA NARRAGANSETT, USA	-	-	20.00	110.50	-	49.00	1.30	EISLER et al. 1977*
COSTA INGLESA	-	-	9.60	29.60	-	43.50	0.50	TAYLOR, 1974*
ESTRECHO TORRES, AUSTRALIA	8.20	-	-	23.00	-	2.80	-	BAKER Y HARRIS, 1981
GOLFO DE MÉXICO (PC)	-	-	8.00	21.00	-	6.20	0.80	RÖTH Y HORNUNG, 1977*
LAG. MADRE, TAMPS.	-	-	-	-	-	-	0.04	PULICH, 1980
LAG. TAMPAMACHOCO, VER.	-	-	-	-	9.55	3.94	0.01	ROSAS et al. 1983
LAG. TAMPAMACHOCO, VER.	49.10	-	26.90	38.70	55.01	43.01	1.40	PÉREZ - HERNÁNDEZ, 1994
LAG. MANDINGA, VER.	-	-	-	-	7.40	3.30	0.02	ROSAS et al. 1983
RIO BLANCO, VER.	27.10	25.40	35.90	90.00	83.00	31.60	1.60	ALVAREZ, 1983
RIO BLANCO, VER.	-	-	-	-	-	90.00	-	BADILLO, 1986
LAG. ALVARADO VER.	-	-	-	-	109.80	20.20	-	ROSALES et al. 1986a
RIO PAPALOAPAN, VER.	-	-	-	-	68.20	17.40	-	ROSALES et al. 1986b
LAG. DEL OSTIÓN, VER.	50.30	42.80	68.80	112.40	141.00	-	-	VILLANUEVA, 1987
RIO COATZACOALCOS, VER.	24.70	21.60	34.70	85.50	67.00	43.40	1.60	VILLANUEVA, 1987
RIO TONALA, VER.	22.20	25.40	98.40	66.50	-	-	-	VILLANUEVA, 1987
LAG. CARMEN-MACHONA, TAB.	-	-	-	-	30.50	6.50	0.30	ROSAS et al. 1983
LAG. DE LAS ILUSIONES, TAB.	-	-	-	-	-	158.70	-	VALENCIA, 1989
LAG. DE ATASTA, CAMP.	-	-	-	-	1.00	0.30	0.02	ROSAS et al. 1983
LAG. DE TÉRMINOS, CAMP.	-	-	45.50	40.00	-	-	-	BOTELLO, 1983
LAG. DE TÉRMINOS, CAMP.	7.40	12.30	50.90	20.40	47.20	33.90	1.40	PONCE - VÉLEZ Y BOTELLO, 1991
LAG. DE BOJORQUEZ, Q. ROO	38.30	-	87.30	57.20	-	-	-	DE LEÓN Y PEÑA, 1987
SUR DE VERACRUZ (PC)	15.60	21.00	18.00	29.70	11.50	26.40	1.60	RIOS - QUIROZ, 1993
SONDA DE CAMPECHE (PC)	-	-	25.0 - 175	20.0 - 120.0	100.0 - 325	-	-	ROSALES et al. 1992
SONDA DE CAMPECHE (PC)	-	-	-	-	66.0 - 366	18.00	-	ROSALES et al. 1994
PLAT. CONT. VERACRUZ	17.90	21.20	17.90	33.20	15.60	15.20	1.80	ESTE ESTUDIO
PLAT. CONT. TABASCO	16.90	14.40	91.00	84.40	101.70	6.40	7.00	ESTE ESTUDIO
PLAT. CONT. TAMAULIPAS	15.20	6.40	26.80	71.70	37.00	4.20	9.14	ESTE ESTUDIO

- ⇒ NO REPORTADO POR LOS AUTORES
 PC ⇒ PLATAFORMA CONTINENTAL
 * ⇒ CITADOS POR SADIQ Y ZAIDI (1985)

Es importante mencionar que las concentraciones de Cd registradas para la plataforma continental de Tamaulipas durante este trabajo, rebasaron en casi un orden de magnitud a los niveles presentados en la Tabla 12, seguido muy de cerca por lo detectado para la plataforma continental de Tabasco; esto manifiesta la influencia que tienen las actividades desarrolladas en continente (y en menor escala en alta mar) sobre la zona costera adyacente y su dinámica. Asimismo, debe mencionarse que los niveles de Pb obtenidos en este estudio, se encuentran por debajo de los reportados para ambientes alterados como los de Veracruz, sin dejar de considerar que debe vigilarse constantemente el comportamiento de este metal en el medio acuático por la potencialidad tóxica que presenta y el riesgo para la biota acuática y el hombre.

Después de esta comparación, puede decirse que en las diferentes porciones evaluadas de la plataforma continental del Golfo de México, existen niveles de metales pesados similares a los reportados para sistemas costeros (lagunas y ríos, principalmente) con una gran influencia de las actividades industriales, petroleras y urbanas que se llevan a cabo en este litoral mexicano y cuyos desechos finalmente alcanzan y perturban la plataforma continental y la zona oceánica adyacentes.

La plataforma continental es un ambiente costero donde coexisten lo proveniente del continente y lo presente en el océano, además ocurren procesos abióticos importantes como la acumulación y la transformación de los materiales terrestres, fluviales y estuarinos en los sedimentos y la columna de agua, así como el efecto conjunto de las condiciones físicas, dinámicas de las masas de agua, dando como resultado que en esta plataforma existan grandes recursos pesqueros sobre todo de especies de moluscos, crustáceos y peces así como reservas energéticas importantes de petróleo, gas y minerales como ocurre en el Golfo de México. Asimismo, la fragilidad de los recursos biológicos es muy grande debido al equilibrio tan delicado que existe entre el flujo de materiales y energía a través del continente y el océano, de ahí que las actividades del hombre encaminadas a la explotación de

los recursos minerales y energéticos deben realizarse con una planificación y control adecuados, de lo contrario se provocarán problemas de contaminación e impacto sobre el ambiente marino, como está ocurriendo en el Golfo de México.

6.1.2 CONCENTRACIÓN BIODISPONIBLE.

La concentración biodisponible de los elementos metálicos es la fracción existente en los sedimentos que representa mayor riesgo hacia la vida. La biodisponibilidad de los contaminantes asociados a los sedimentos puede ser definida como "la fracción de la concentración total del contaminante en el agua intersticial y sobre las partículas sedimentarias que está disponible o que es accesible para su bioacumulación" y esta última es "la acumulación de un contaminante a través de todas las rutas disponibles que tenga un organismo" (Landrum y Robbins, 1990). Por esta razón la evaluación de la fracción biodisponible es de suma importancia en los estudios de contaminación costera.

6.1.2.1 PLATAFORMA CONTINENTAL DE VERACRUZ.

Los niveles biodisponibles mayores promedio de los metales evaluados, se registraron para el Pb (10.68 ppm), Zn (6.52 ppm) y Cu (2.81 ppm) (Tabla 13). En general se observó el orden siguiente (Fig. 11):



El Pb es un metal de alto riesgo debido a los daños que provoca en los organismos y en el hombre. Los sedimentos del sur de Veracruz ocuparon el primer lugar de este elemento en su forma biodisponible; además, no presentó relación alguna con la materia orgánica ($r = -0.0001$) y con los carbonatos su coeficiente fue de 0.0089 (Tabla 13), lo que significa que no mostró un patrón definido de adsorción sedimentaria y es difícil predecir sus posibles rutas en la plataforma continental, así como su peligrosidad para los organismos costeros.

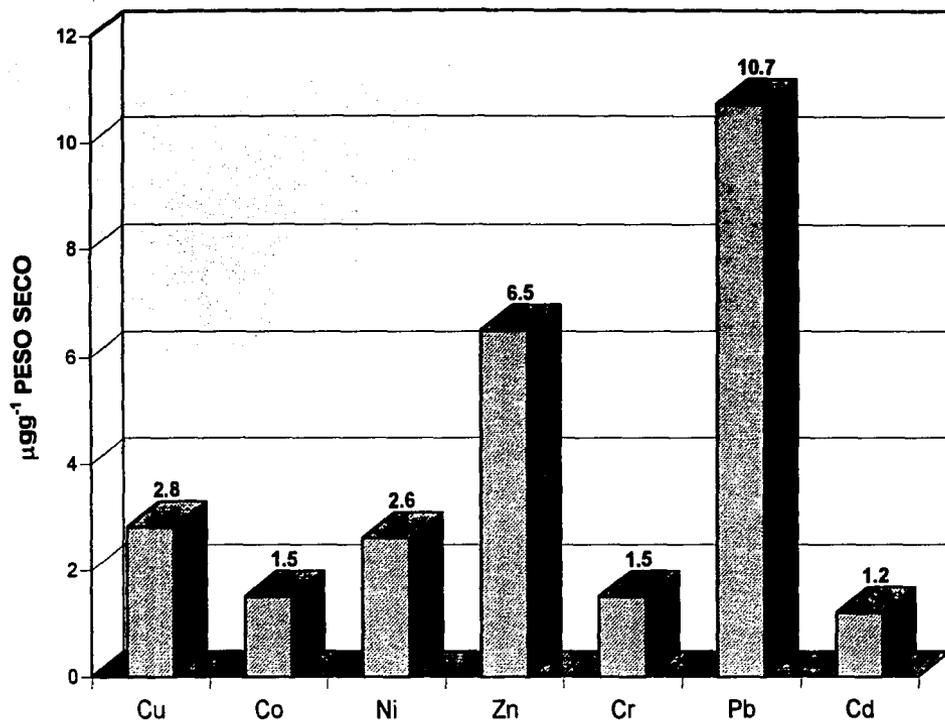


FIG. 11 NIVELES DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL SUR DE VERACRUZ. FRACCIÓN BIODISPONIBLE.

TABLA 13 NIVELES DE METALES PESADOS BIODISPONIBLES EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL SUR DE VERACRUZ (OGMEX 1,2,3 Y 4). VALORES EN μgg^{-1} .

CRUCERO Y ESTACIÓN	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
OGMEX 1							
2	5.77	0.44	1.48	2.66	0.74	2.29	N.D.
33	1.27	1.65	2.81	5.65	1.60	4.06	1.00
35	2.08	0.83	2.36	N.D.	0.55	2.03	N.D.
OGMEX 2							
26	3.59	0.51	3.08	2.74	N.D.	2.62	1.00
38	1.63	2.10	2.46	5.75	1.54	2.52	2.00
39	0.44	1.60	2.33	5.38	1.89	3.67	N.D.
OGMEX 3							
73	0.67	1.89	3.50	4.72	1.48	6.09	2.00
75	1.20	1.46	2.39	4.52	1.33	3.60	1.00
77	5.75	0.55	1.10	2.04	0.68	N.D.	1.00
81	0.43	2.17	3.47	4.77	2.41	3.71	N.D.
83	2.81	0.80	1.07	1.74	0.53	3.03	1.00
85	0.85	2.40	3.24	4.15	1.55	N.D.	1.00
96	0.36	2.04	14.13	6.27	1.57	3.41	N.D.
109	5.41	0.14	0.95	2.03	0.14	2.45	N.D.
110	0.81	1.89	2.98	7.30	1.50	N.D.	1.00
111	0.95	1.76	1.63	5.83	0.98	N.D.	1.00
112	4.21	1.90	2.04	7.06	1.09	2.69	1.00
113	0.71	1.91	2.45	5.86	1.21	3.70	1.00
114	0.67	1.87	2.81	5.08	0.94	4.59	2.00
115	2.53	0.70	2.53	3.52	0.98	2.66	N.D.
117	0.81	1.22	2.30	2.90	0.81	N.D.	1.00
OGMEX 4							
2	9.94	N.D.	N.D.	13.92	1.19	36.98	N.D.
12	N.D.	1.98	0.04	N.D.	N.D.	35.00	N.D.
14	5.95	1.98	0.03	19.82	N.D.	38.65	N.D.
16	N.D.	N.D.	0.03	15.55	7.58	34.40	N.D.
17	3.34	2.18	3.20	5.96	1.60	3.32	1.00
21	7.95	1.99	3.98	17.89	N.D.	33.39	N.D.
PROMEDIO	2.81	1.52	2.63	6.52	1.47	10.68	1.20
DESV. STD.	2.64	0.66	2.59	4.91	1.42	13.94	0.41
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN LINEAL (r)							
MATERIA ORGÁNICA	0.0455	0.2713	0.1960	0.1491	-0.2877	-0.0001	0.3058
CARBONATOS	-0.1233	0.5503	0.0474	0.1372	-0.2085	0.0089	0.5786
N.D. ⇒ NO DETECTADO (Cd < 0.18 μgg^{-1} ; Ni < 0.80 μgg^{-1} ; Restantes < 0.46 μgg^{-1})							

Los sitios de colecta que presentaron los valores más altos conformaron dos áreas en la zona del sur de Veracruz: aquella localizada en el borde occidental del sistema lagunar Carmen-Machona (OGMEX 3, estaciones 73, 81 y 85) con características oceanográficas diferentes ya que presentaron profundidades entre 35 y 140 m; la otra franja se ubicó hacia el oriente del cauce del río Coatzacoalcos, probablemente siguiendo el transporte fluvial que este caudal produce en mar abierto y abarcó desde zona somera (29 m) hasta profundidades de 80 m (OGMEX 4, estaciones 2, 14, 16, 17 y 21). De igual forma se obtuvo una pequeña área influenciada por el río Tonalá (OGMEX 2, estaciones 2 y 38; OGMEX 3, estación 96) con concentraciones biodisponibles altas de la mayoría de los metales (Tabla 13).

De las correlaciones lineales entre los metales biodisponibles y la materia orgánica, no fue observada alguna relación importante ($r < 0.5$), con los carbonatos los coeficientes más altos fueron para la asociación con el Co ($r = 0.5503$) y con el Cd ($r = 0.5786$) que estadísticamente no revelan una relación muy estrecha.

6.1.2.2 PLATAFORMA CONTINENTAL DE TABASCO.

En los sedimentos de la plataforma continental de Tabasco evaluados durante este estudio, se encontró que de las formas metálicas biodisponibles analizadas, el Ni ocupó el primer lugar con 10.3 ppm, siendo el mínimo de 5.24 ppm (est. 46) y el máximo de 14.12 ppm (est. 75). Después está el Zn con 7.48 ppm de promedio y un intervalo de concentraciones de 4.86 ppm (est. 73) a 13.89 ppm (est. 74); le sigue el Pb con 6.44 ppm de concentración biodisponible promedio, con una oscilación entre 0.85 ppm (est. 66) y 17.42 ppm (est. 79) (Tabla 14).

TABLA 14 NIVELES DE METALES PESADOS BIODISPONIBLES EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TABASCO (OGMEX 7). VALORES EN $\mu\text{g g}^{-1}$.

CRUCERO Y ESTACIÓN	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
OGMEX 7							
42	2.28	6.65	8.95	6.31	5.11	8.30	2.83
43	2.21	6.54	8.18	7.02	4.94	6.74	2.13
44	2.08	6.75	7.53	12.75	5.31	4.74	2.29
45	1.94	6.31	7.04	6.95	4.87	4.43	2.14
46	1.82	6.29	5.24	10.57	4.68	3.23	2.19
48	1.85	5.58	8.34	7.03	4.23	1.95	1.79
51	1.93	6.66	10.04	7.94	4.84	2.32	2.32
53	2.23	6.60	8.49	8.98	5.08	4.51	2.62
55	2.22	6.48	9.13	11.70	5.22	13.57	2.58
63	2.08	6.14	11.43	6.53	4.90	7.67	2.98
64	2.24	6.50	11.02	6.44	5.02	2.95	2.71
65	1.49	5.22	7.18	5.28	3.91	2.17	1.24
66	1.63	5.04	9.77	6.07	4.36	0.85	1.73
68	2.88	6.23	13.71	6.50	5.45	3.41	2.46
71	2.09	5.31	13.93	6.41	4.95	3.25	2.06
73	1.64	4.85	11.61	4.86	5.04	3.62	1.92
74	1.87	5.10	11.40	13.89	4.06	1.50	1.60
75	1.99	6.22	14.12	6.26	5.87	5.88	2.42
76	2.45	5.87	12.46	6.77	6.21	7.56	2.17
77	1.99	4.72	8.59	5.69	4.82	11.51	2.29
78	2.21	5.21	9.23	5.98	5.24	15.45	3.00
79	2.27	5.15	10.92	6.22	5.22	17.42	2.93
81	1.96	5.79	9.54	5.28	4.90	8.57	3.11
83	2.16	6.60	11.16	6.32	5.03	15.70	3.25
84	2.18	6.04	9.98	5.81	4.77	9.38	3.41
85	2.38	5.23	10.26	7.36	4.88	7.78	3.40
86	2.25	5.86	10.10	5.60	5.04	6.91	2.93
87	2.44	6.02	9.92	5.94	5.91	7.53	2.98
88	2.18	6.07	11.86	13.25	5.71	7.70	2.70
90	1.82	5.82	12.03	12.68	5.31	2.32	1.81
92	2.05	5.79	12.43	6.06	5.24	1.44	2.04
93	2.90	6.32	14.00	5.00	6.95	5.80	2.61
PROMEDIO	2.12	5.91	10.30	7.48	5.10	6.44	2.46
DESV. STD.	0.31	0.60	2.18	2.61	0.60	4.41	0.54
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN LINEAL (r)							
MATERIA ORGÁNICA	0.4147	0.0967	0.1656	0.0673	0.5622	0.4726	0.4589
CARBONATO	0.5125	0.1715	0.3026	-0.1369	0.3100	0.5255	0.7309

El Co es el elemento siguiente en este orden con un promedio de 5.91 ppm, registrándose el mínimo en la estación 77 (4.72 ppm) y el máximo en la estación 44 (6.75 ppm). Sigue el Cr con 5.1 ppm de valor promedio, fluctuando entre 3.91 ppm (est. 65) y 6.95 ppm (est. 93). El Cd y el Cu registraron valores promedio muy similares con 2.46 y 2.12 ppm respectivamente, los máximos estuvieron en las estaciones 84 y 93 y los mínimos en la 65 y 46 (Tabla 14).

El comportamiento de las concentraciones promedio de los metales biodisponibles fue el siguiente (Fig. 12):

Ni > Zn > Pb > Co > Cr > Cd > Cu

Al tratar de relacionar las fracciones biodisponibles de los metales estudiados con la materia orgánica, no fue posible establecer una correlación significativa ya que los coeficientes más altos se observaron para el Cr (0.5622) y para el Pb (0.4726). Con los carbonatos, solamente el Cd manifestó una afinidad como lo demuestra su coeficiente que tuvo un valor de 0.7309 (Tabla 14); este hecho resulta importante debido a que con esta interacción, la peligrosidad del Cd disminuye por la insolubilidad de la forma carbonatada metálica.

Esta región del sur del Golfo de México está directamente bajo la influencia de la descarga del sistema fluvial Grijalva-Usumacinta que invade la Sonda de Campeche y por la dinámica de la circulación costera, su distribución tiende hacia el oeste; este caudal contribuye con sedimentos y material en suspensión, tanto disuelto como particulado, hacia el occidente del Golfo de México y entre este aporte es factible que se encuentren elementos como los evaluados, lo cual se ha explicado ampliamente en el apartado de la concentración total.

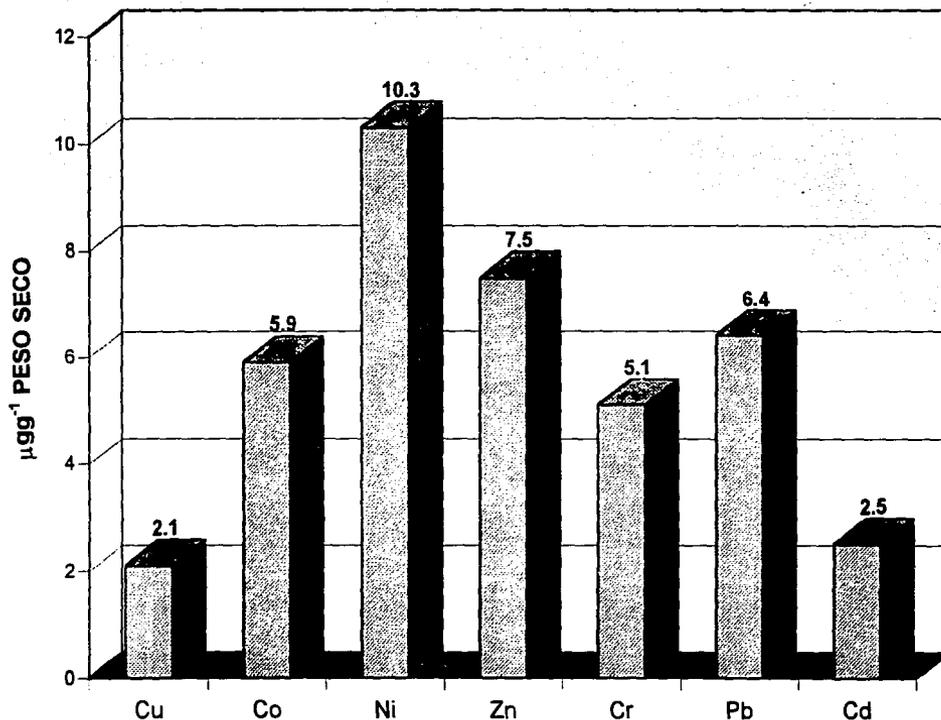


FIG. 12 NIVELES DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TABASCO. FRACCIÓN BIODISPONIBLE.

6.1.2.3 PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS.

El Pb ocupa el primer lugar en la concentración promedio de biodisponibilidad en los sedimentos de la plataforma continental de Tamaulipas con un valor de 6.77 ppm, y un intervalo entre 1.92 ppm (est. 36) y 10.92 ppm (ests. 21 y 28). En segundo lugar se encuentra el Co con 5.72 ppm de promedio, y una fluctuación de 2.9 ppm (est. 24) a 12.0 ppm (est. 30) (Tabla 15).

El Ni registró un valor promedio de 5.39 ppm con un mínimo de 2.47 ppm (est. 36) y un máximo de 9.95 ppm (est. 30). El Zn tuvo 4.79 ppm de concentración promedio con valores desde 2.92 ppm (est. 27) hasta 10.94 ppm (est 19); el Cr presentó 3.31 ppm de media con concentraciones que oscilaron entre 2.61 ppm (est. 43) y 5.03 ppm (est. 30). El Cd y el Cu obtuvieron niveles promedio similares con 2.3 y 2.27, ppm respectivamente; con mínimos de 0.8 y 1.61 ppm en la estación 48 y máximos de 5.66 y 4.28 ppm en la estación 30 (Tabla 15).

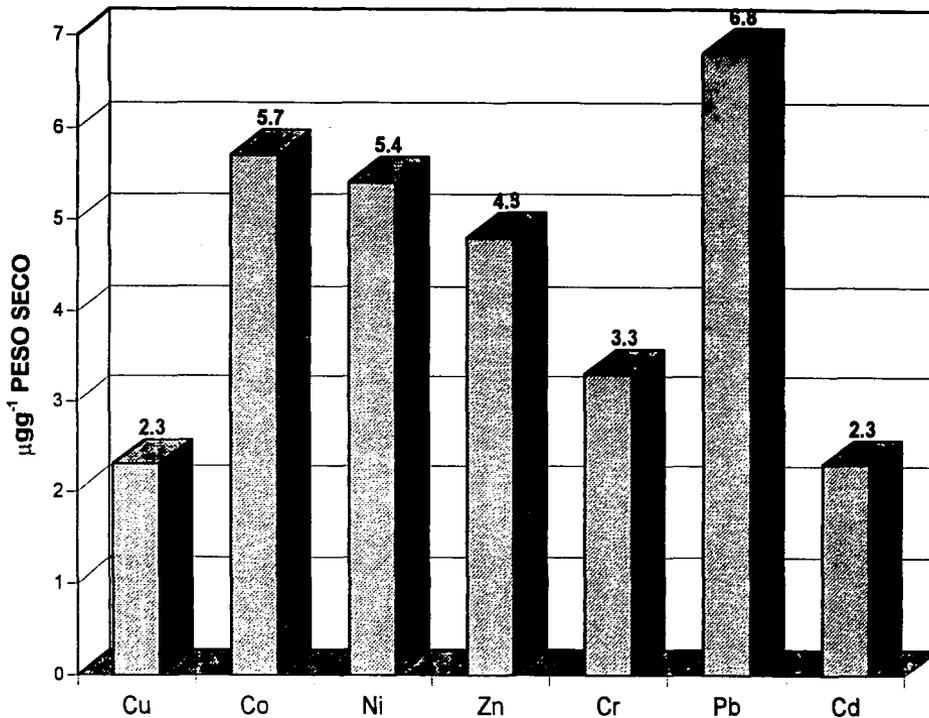
Se observó la secuencia siguiente de dominancia de los elementos analizados (Fig. 13):

Pb > Co > Ni > Zn > Cr > Cd > Cu

Es importante señalar que la zona más cercana a la línea de costa desde la boca de comunicación con el mar en la Laguna de Tamiahua, Ver., al sur del área de estudio, hasta la región media de la Laguna Madre (estaciones 18, 19, 25, 30, 33 y 42) presentó las concentraciones más altas de la mayoría de los metales analizados (Tabla 15).

TABLA 15 NIVELES DE METALES PESADOS BIODISPONIBLES EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS (OGMEX 8). VALORES EN $\mu\text{g g}^{-1}$.

CRUCERO Y ESTACIÓN	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
OGMEX 8							
15	2.29	4.41	5.77	4.68	3.15	9.75	2.39
18	3.21	7.99	6.15	6.07	4.55	5.96	4.27
19	2.76	4.75	5.30	10.94	3.95	8.31	2.93
21	1.91	5.16	5.08	4.40	2.80	10.92	2.17
22	1.94	4.57	5.59	3.27	2.96	6.45	1.87
24	1.79	2.90	2.85	5.12	3.53	3.72	1.98
25	2.99	7.43	7.14	4.00	4.36	5.74	3.85
27	1.88	4.73	4.75	2.92	3.50	6.19	2.25
28	1.79	5.79	5.43	4.59	2.74	10.92	2.27
30	4.28	12.00	9.95	3.36	5.03	5.37	5.66
31	2.66	6.74	4.85	5.63	3.03	9.40	2.34
33	1.98	6.37	6.29	6.08	3.07	8.93	1.96
34	1.94	4.74	4.79	3.49	2.93	6.54	1.92
36	1.69	3.96	2.47	3.09	2.76	1.92	1.69
39	1.72	5.17	5.15	3.78	2.71	7.96	1.56
40	2.07	6.23	7.17	4.08	3.15	6.31	2.27
42	3.07	7.69	7.08	3.87	3.95	5.03	3.52
43	2.09	4.71	3.19	4.72	2.61	3.63	1.31
46	2.30	6.40	7.86	4.96	3.34	8.25	1.67
48	1.61	5.05	4.21	5.19	2.88	5.00	0.80
50	2.62	5.17	2.83	4.91	3.22	2.23	1.59
53	1.91	4.61	4.71	5.42	2.78	8.01	1.40
56	1.64	5.05	5.30	5.48	3.19	9.25	1.20
PROMEDIO	2.27	6.72	5.39	4.79	3.31	6.77	2.30
DEV. STD.	0.65	1.84	1.75	1.63	0.65	2.54	1.11
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN LINEAL (r)							
MATERIA ORGÁNICA	-0.1616	-0.1603	-0.1934	0.1263	-0.0964	0.0143	-0.2649
CARBONATO	0.7926	0.8283	0.5666	-0.0496	0.7535	-0.1034	0.8189



**FIG. 13 NIVELES DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS
DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS.
FRACCIÓN BIODISPONIBLE.**

Al analizar las posibles relaciones con la materia orgánica, no se detectó alguna importante, la más alta fue para el Cd ($r = -0.2649$); con los carbonatos, se registraron cinco relaciones significativas: Co (0.8283), Cd (0.8189), Cu (0.7926), Cr (0.7535) y Ni (0.6566) (Tabla 15), todos ellos de manera directa se acumulan en los sedimentos dependiendo del contenido de carbonatos que exista; los mecanismos de adsorción e interacción con este componente de los sistemas acuáticos y su afinidad por las partículas suspendidas como las arcillas, ha sido discutido en la sección de niveles totales y se aplica para la fracción biodisponible.

Debe resaltarse el hecho de que en Tamaulipas, el Cd biodisponible se encuentra mayoritariamente en los sedimentos en su forma carbonatada al igual que el Cr y el Ni disminuyendo el riesgo que representan para los ecosistemas por su toxicidad.

Durante esta contribución, el comportamiento de las concentraciones biodisponibles de las diversas zonas de estudio se presenta en la Tabla 16 y el orden observado fue el siguiente (Fig. 14):

Pb > Zn > Ni > Co > Cr > Cu > Cd
(8.0) (6.3) (6.1) (4.4) (3.3) (2.4) (2.0)

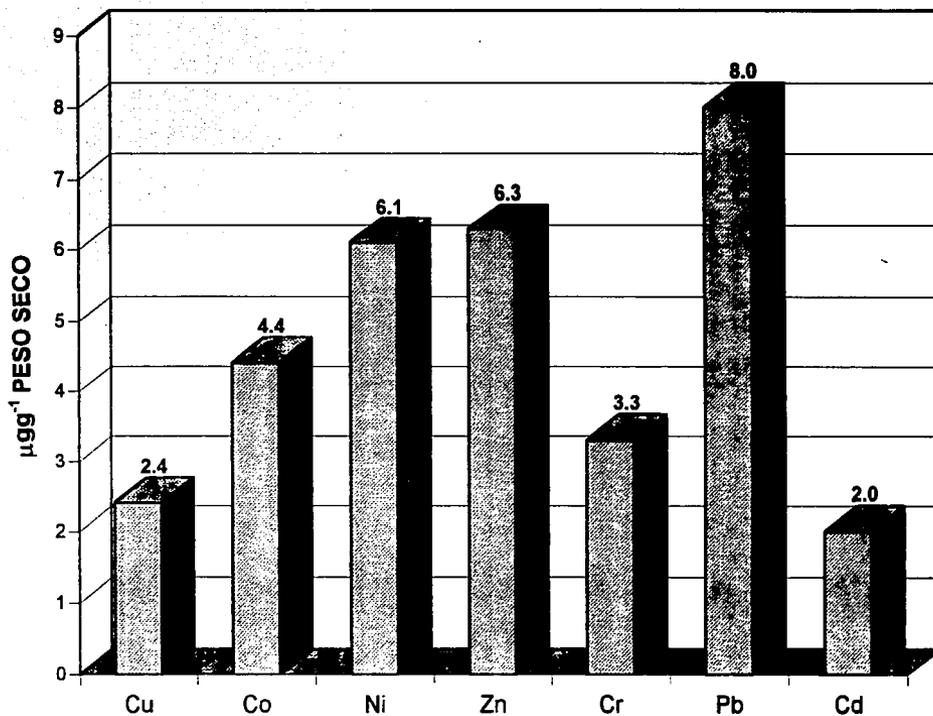


FIG. 14 COMPORTAMIENTO GENERAL DE LOS NIVELES DE METALES PESADOS EN LAS ÁREAS DE ESTUDIO. FRACCIÓN BIODISPONIBLE.

Al evaluar el desenvolvimiento de los resultados obtenidos en esta contribución, se tiene que en Tabasco se registraron las concentraciones más altas de Co, Ni, Zn, Cr y Cd, mientras que para Cu y Pb fue en el sur de Veracruz. Es importante señalar que los sedimentos de Tamaulipas ocuparon el segundo lugar para Co, Ni, Pb y Cd (Tabla 16). El origen de estos elementos químicos es el mismo que ya ha sido explicado en el apartado de la concentración total, esto es, en gran medida se derivan del aporte terrígeno fluvial de los grandes caudales del Golfo como en el caso de Tabasco y provienen también de descargas industriales, urbanas y agrícolas, estos elementos son generados en continente y transportados a través de escurrimientos, arroyos, ríos, lagunas y estuarios, así como por vía atmosférica, fenómeno que se observa para Veracruz y Tamaulipas, sin descartar la proporción que da el petróleo, abundante en gran parte de este litoral mexicano.

Esto pone de manifiesto que el sur del Golfo de México, la zona costera más industrializada y con mayor actividad petrolera de las costas mexicanas, está siendo impactada desde hace varios años por este desarrollo industrial y urbano, ya que metales potencialmente tóxicos como Pb, Cd, Cr y Ni se encuentran presentes en su forma biodisponible, la fase de mayor riesgo para cualquier ecosistema. No debe dejarse de lado el hecho de que el litoral de Tamaulipas ocupó el segundo lugar de los niveles disponibles de metales tóxicos como Pb y Cd, debido a que en esta región existen complejos industriales importantes recordando que precisamente aquí se inició la explotación petrolera y es factible que actualmente se observen los remanentes.

TABLA 16 CONCENTRACIONES PROMEDIO DE METALES PESADOS BIODISPONIBLES EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE VERACRUZ, TABASCO Y TAMAULIPAS. VALORES EN μgg^{-1} .

ÁREA	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
VERACRUZ	2.81	1.52	2.63	6.52	1.47	10.68	1.20
TABASCO	2.12	5.91	10.30	7.48	5.10	6.44	2.46
TAMAULIPAS	2.27	5.72	5.39	4.79	3.31	6.77	2.30
PROMEDIO	2.40	4.38	6.11	6.26	3.29	7.96	1.99
DESV. STD.	0.36	2.48	3.89	1.36	1.82	2.36	0.69

En la literatura referente a la interacción química que algunos elementos y compuestos pueden presentar, se contemplarían procesos de adición en sus características reactivas o tóxicas donde el riesgo ambiental que reviste por sí mismo un elemento o compuesto se incrementa al presentarse otro con el cual interactúa. De forma indirecta, a través de las correlaciones estadísticas, se pueden inferir los posibles procesos de acumulación conjunta que ocurren entre los diferentes elementos químicos en base a compartir características químicas estructurales, o bien a interacciones similares con los componentes existentes en el medio acuoso y sedimentario donde se encuentren. Por ello, se llevó a cabo un análisis de correlación lineal entre las fracciones disponibles de los metales estudiados. En la Tabla 17, se observa que las mejores relaciones fueron: Ni-Cr (0.89), Zn-Ni (0.65), Zn-Cr (0.59), Zn-Cd (0.52) y Cd-Co (-0.55); al igual que para la concentración total, se relacionaron elementos esenciales (Zn y Co) con aquellos que tienen toxicidad para la biota (Cd y Cr) en alguno de sus niveles y formas químicas; sin embargo, la relación Cd-Co es inversa y puede decirse que un elemento es desplazado por el otro cuando se lleva a cabo la adsorción sedimentaria.

Como ya se ha mencionado, Rosales *et al.* (1992) puntualizan que elementos como Ni y Cr se asocian con el Mn en la zona de influencia del sistema Grijalva-Usumacinta, o en aquellos lugares donde existen descargas fluviales importantes por lo que su origen puede ser terrestre, ocurriendo una precipitación una vez que el Mn se hidroliza llevándose consigo a estos metales asociados, y favorecen la precipitación de otros como Zn y Cd.

TABLA 17 ÍNDICES DE CORRELACIÓN LÍNEAL ENTRE LAS CONCENTRACIONES BIODISPONIBLES DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL GOLFO DE MÉXICO. (ESTUDIO COMPLETO)

	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
Cu	1.00						
Co	0.15	1.00					
Ni	0.13	0.13	1.00				
Zn	0.38	-0.20	0.65	1.00			
Cr	0.05	-0.01	0.89	0.59	1.00		
Pb	0.19	0.43	-0.07	0.04	-0.18	1.00	
Cd	0.07	-0.55	0.35	0.52	0.33	-0.44	1.00

Una vez que se obtuvieron tanto la concentración total como la fracción biodisponible de los metales pesados estudiados, se realizó una correlación entre ellas y las más significativas fueron: Nitot.-Crbiob. (0.80), Nitot.-Nibiod. (0.78), Crtot.-Crbiob. (0.71), Crtot.-Nibiod. (0.67), Cotot.-Cdbiod. (0.58), Cotot.-Crbiob. (0.54), Cotot.-Cobiod. (0.52), Crtot.-Znbiob. (0.51) y Cotot.-Znbiob. (0.50) (Tabla 18); este comportamiento estadístico refleja lo observado tanto para la concentración total como para la porción disponible, ya que el Ni y el Cr mostraron una interacción numérica que evidencia los mecanismos de adsorción compartidos por estos elementos, y de igual forma lo relevante que son estos metales en la precipitación y acumulación de otros como Co, Zn y Cd aún en la forma intercambiable como la biodisponible.

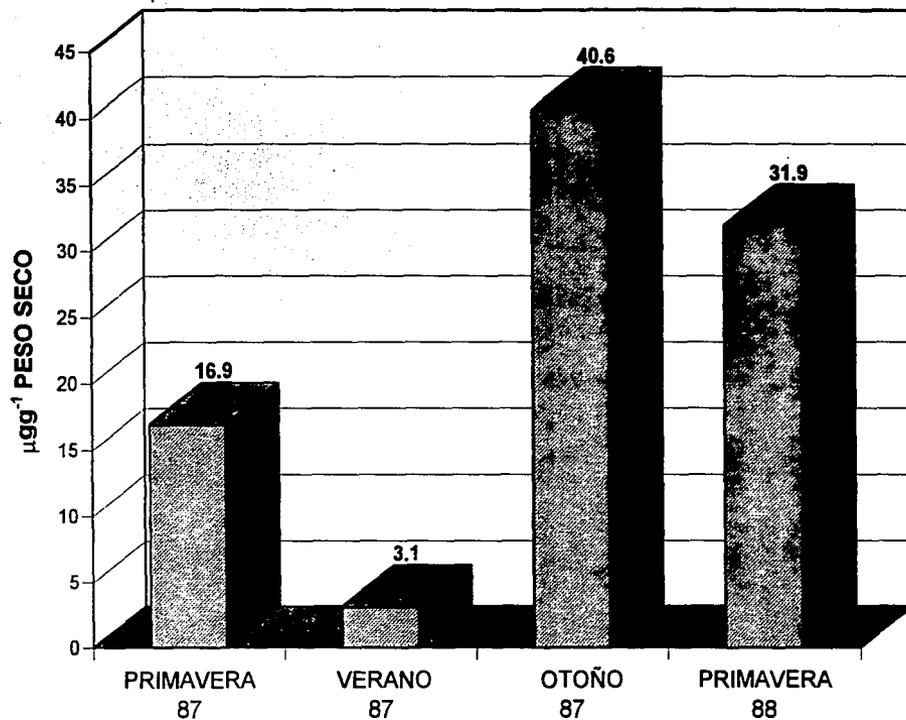
**TABLA 18 ÍNDICES DE CORRELACIÓN LINEAL ENTRE LAS CONCENTRACIONES
 TOTALES Y BIODISPONIBLES DE METALES PESADOS EN
 SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL GOLFO DE
 MÉXICO. (ESTUDIO COMPLETO).**

		BIODISPONIBLES						
		Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
T O T A L E S	Cu	-0.05	0.01	-0.07	-0.08	-0.12	0.20	-0.07
	Co	-0.12	-0.52	0.48	0.50	0.54	-0.31	0.58
	Ni	-0.13	-0.08	0.78	0.47	0.80	-0.26	0.36
	Zn	-0.06	0.02	0.16	0.18	0.21	0.14	-0.07
	Cr	-0.14	-0.29	0.67	0.51	0.71	-0.25	0.44
	Pb	0.08	0.04	-0.09	-0.01	-0.13	0.28	-0.09
	Cd	-0.06	-0.41	0.40	0.40	0.42	-0.26	0.49

6.2 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES (HAP).

6.2.1 PLATAFORMA CONTINENTAL DE VERACRUZ.

Los niveles totales mayores de HAP se registraron durante el otoño de 1987 (OGMEX 3) con un valor de 40.62 ppm (Fig. 15), presentándose 15 hidrocarburos con una predominancia del grupo de aromáticos constituidos por 4 anillos bencénicos, siendo el benzo(a)antraceno y el criseno los compuestos más abundantes ya que registraron una concentración de 15.73 y 8.55 ppm, respectivamente. En esta región del Golfo de México se pudo observar una zona de influencia de la descarga del sistema lagunar Carmen-Machona, así como de las plataformas petroleras de alta mar donde se presentó el 46.6 % de los HAP analizados (estaciones 77, 81 y 83). De igual forma, el río Tonalá manifestó su aporte a la plataforma continental adyacente ya que en los sedimentos de esta área se detectó alrededor del 66 % de los hidrocarburos buscados (estaciones 96, 109, 110, 112). Cabe mencionar que existieron sitios donde la presencia de HAP fue muy baja, como en la estación 111 donde solamente se registró al antraceno con un valor de 0.19 ppm, y la estación 113 donde no fue posible detectar los hidrocarburos ya que pudieron estar ausentes o bien encontrarse por debajo del límite de detección analítico (< 0.02 ppb) (Tabla 19). Otro hecho interesante durante esta época fue la escasez de HAP ligeros formados por dos anillos, se detectó sólo la presencia de 3 compuestos (acenaftileno, acenafteno y fluoreno) en niveles pequeños de 0.05 a 0.06 ppm en sitios cercanos a la costa y frente a la desembocadura del río Tonalá (estación 96); el naftaleno, el más sencillo de este grupo, fue registrado lejos de la costa (estación 115) donde los aportes recientes de petróleo en alta mar debidos a tanqueros o a transporte de corrientes desde zonas de derrames, pueden ser su fuente de origen.



**FIG. 15 NIVELES TOTALES DE HAP EN LOS SEDIMENTOS
DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL SUR DE
VERACRUZ.
1987 - 1988.**

Del mismo modo, el registro de hidrocarburos pesados formados por 6 anillos de peso molecular $276.34 \text{ g mol}^{-1}$, cuyo representante en este caso fue el benzo(ghi)perileno, únicamente se detectó en dos zonas contrastantes: cerca de la costa con la recepción de descargas provenientes del río Tonalá (estación 96), y lejos del litoral con una afectación de los aportes tanto del Tonalá como del Coatzacoalcos (estación 117); su concentración osciló entre 0.31 y 0.65 ppm (Tabla 19).

Los procesos de combustión incompleta (pirólisis) de diversos combustibles fósiles, pueden ser la fuente principal de aporte de estos compuestos del continente y desde ahí iniciar su migración hacia el mar y los sistemas acuáticos adyacentes (Schmeltz y Hoffmann, 1976). Los HAP de tipo pirolítico se pueden derivar durante la combustión incompleta de la materia orgánica a temperatura altas (Commins, 1969; Suess, 1976). La mezcla de HAP que resulta, depende de la composición química del combustible, de la temperatura de la pirólisis, del tiempo del proceso y de la presencia de carbono, hidrógeno y radicales acomplejantes en la mezcla (Woo *et al.*, 1978).

No debe dejarse de lado que al detectarse hidrocarburos aromáticos de dos anillos, ligeros, de peso molecular entre 128.2 y 166.2 g mol^{-1} , éstos pueden provenir de aportes recientes derivados de descargas de petróleo ya sea por actividades de los buques-tanque en alta mar o en puerto, por accidentes menores o de mediana magnitud, así como de las maniobras de extracción realizadas tanto en el continente como en la zona oceánica.

Una vez que los HAP llegan al ambiente acuático del Golfo de México y que de forma general se encuentran en mayor cantidad en la fracción particulada del agua, las partículas gradualmente se sedimentan llevándose consigo a los aromáticos. La floculación de partículas suspendidas del tamaño de arcillas, como sucede en un gradiente de salinidad creciente de un estuario, puede favorecer el incremento de la

tasa de depósito de las partículas (Denant y Saliot, 1991). Una vez depositados en los sedimentos, los HAP están menos sujetos a la oxidación fotoquímica o biológica, especialmente si el sedimento es anóxico. Esto es, los HAP de los sedimentos tienden a ser más persistentes y pueden acumularse en concentraciones altas respecto a lo que existe en el agua circundante. Por ejemplo, debido a los coeficientes de partición favorables y a una mayor persistencia de HAP sedimentarios respecto a los que están en solución, podemos esperar que los sedimentos casi siempre presentarán concentraciones de HAP mayores por un factor de 1,000 o más en relación al agua que rodea. Por tanto, el grupo de HAP de sedimentos puede servir como un índice de las tasas de ingreso de los HAP al ambiente acuático. Las muestras de sedimentos tienen un efecto integrador sustancial sobre los patrones temporales de entrada de HAP y ofrecen buena resolución geográfica, especialmente cuando los patrones de corriente, los orígenes de los sedimentos y las tasas de sedimentación se conocen (Dunn y Stich, 1976). Sin embargo, la composición del grupo de HAP en los sedimentos puede ser diferente al de la fuente de estos compuestos, y por lo tanto se puede encontrar una constitución del grupo de HAP disímil entre los presentes en el agua y aquéllos que forman parte de los sedimentos.

Para abril de 1988 (OGMEX 4) se registró una suma total de HAP de 31.84 ppm (Fig. 15), observándose que la emisión del río Coatzacoalcos ocasiona una dinámica particular en esta región del Golfo de México; es decir, existió una zona de la plataforma continental ubicada inmediatamente frente a la desembocadura del río (estaciones 16 y 17) donde la concentración de HAP fue baja (0.98 ppm), mientras que en dirección oeste y lejos de la costa (estaciones 2, 12, 14, 21) los niveles de estos hidrocarburos se incrementaron a valores entre 2.4 y 12.4 ppm (Tabla 19). Esto se debe, posiblemente a las condiciones oceanográficas como son las corrientes costeras en dirección N-NW, sedimentos finos como limos y arcillas, la disminución del efecto erosivo de la descarga fluvial del Coatzacoalcos, entre otros,

los cuales permiten el depósito de los materiales aportados por el río y se favorece su acumulación.

En este sentido, Neff (1979) ha establecido que una vez que los HAP llegan al ambiente acuático, su ciclo es relativamente simple: entran al agua de fuentes diversas, rápidamente se adsorben a la materia particulada orgánica e inorgánica; gran parte de los HAP particulados se depositan en sedimentos del fondo. La actividad biológica o el enriquecimiento en los sedimentos puede regresar una pequeña fracción de los aromáticos del sedimento a la columna de agua. Son fácilmente acumulados por la biota acuática a niveles más altos que los presentes en el medio. Las concentraciones relativas de HAP en ecosistemas acuáticos son generalmente más altos en los sedimentos, intermedios en la biota y bajos en el agua. Esta serie de rutas y procesos observados para los hidrocarburos aromáticos ocurre en la zona litoral del Golfo de México.

Los HAP provienen de aguas de desecho de tipo industrial y doméstico. Las fuentes industriales comúnmente citadas son: refinerías de petróleo, industrias que usan depósitos de hidrocarburos líquidos y sólidos para fabricar productos químicos, las industrias del plástico y colorantes, hornos de alta temperatura (especialmente los que utilizan electrodos de antracita), la industria de cal y muchas otras; como ya se ha visto en el apartado de metales pesados, en el Golfo de México existen numerosos establecimientos relacionados con estas actividades industriales (INEGI, 1992). Las concentraciones de benzo(a)pireno en aguas de desecho varían desde No Detectables hasta 1000 µg/l. Diversos HAP, algunos de ellos también carcinogénicos, han sido detectados en estos vertimientos. Las aguas de desecho doméstico incluyen aguas negras sin tratamiento y escurrimientos de lluvia que pueden contener cantidades significativas de HAP. En la mayoría de los casos, la concentración de estos hidrocarburos aumenta conforme se incrementa la contribución industrial hacia el drenaje (Borneff y Kunte, 1967).

Es extremadamente difícil estimar la cantidad de HAP que entran a las aguas dulces y marinas provenientes de efluentes industriales y domésticos. La información sobre las concentraciones de HAP en diversos efluentes, especialmente en aquéllos que han sufrido algún tratamiento, es muy incompleta y aún más aquella sobre el volumen total de aguas de desecho producidas de diferentes fuentes cada año. Mucha de la carga de HAP que entra al ambiente acuático en esta forma, es de fuentes no puntuales, haciendo la cuantificación más difícil. Sin embargo, las cantidades de HAP que ingresan a este ambiente por estas rutas, son indudablemente grandes (Harrison *et al.*, 1975).

Para marzo de 1987 (OGMEX 1) se registró una concentración total de HAP en el sur de Veracruz de 16.95 ppm (Fig. 15). En esta época se observó el 60 % de los compuestos analizados en la región cercana a la descarga del sistema lagunar Carmen-Machona (estaciones 2 y 35), y solamente un hidrocarburo, el criseno, fue encontrado en la zona afectada por el río Coatzacoalcos (estación 33). En agosto del mismo año (OGMEX 2) se detectó un valor total de HAP de 3.1 ppm, el más bajo para la región del sur de Veracruz; únicamente la zona localizada cerca de la Laguna Carmen-Machona presentó el 46.6 % de los hidrocarburos (estación 39) y las áreas ubicadas frente a la descarga de los ríos Tonalá (estación 38) y Coatzacoalcos (estación 26), tuvieron el 6.6 y 20 % de los compuestos aromáticos analizados, respectivamente (Tabla 19).

Generalmente se ha observado que las áreas costeras, especialmente zonas estuarinas y deltaicas, reciben grandes cantidades de descargas orgánicas originadas de diversas fuentes, tanto biológicas como industriales. Estas descargas son transportadas en forma de materia orgánica disuelta y particulada en la columna de agua, y así sufren una mezcla intensa y transformaciones severas por los procesos de biodegradación o fotooxidación. Dependiendo de la asociación de fases de las especies químicas, pueden ocurrir procesos de remineralización, de reciclaje

en la cadena de alimentación o bien de incorporación a los sedimentos, o se dirijan hacia el mar abierto (Gómez-Belinchon *et al.*, 1988; Buscail y Gadel, 1991).

Esta forma que presentan los autores de referir los aportes, procesos y rutas que siguen los compuestos orgánicos como los HAP generados en el continente y vertidos a la zona costera adyacente, a través de descargas fluviales y atmosféricas (Prahl *et al.*, 1984), se puede utilizar para explicar lo que ocurre en el sur del Golfo de México.

Evidentemente, resulta importante evaluar el impacto ambiental de un contaminante en mar abierto para poder vigilar el problema del depósito de los contaminantes, que generalmente requiere una predicción de la concentración futura de los compuestos en alguna localidad determinada, esto es importante para estimar los efectos sobre el hombre y la biota marina (Kennish, 1992). Sobre todo si se considera la relación y dependencia que tienen los núcleos de población con los sistemas costeros y sus recursos pesqueros en el Golfo de México y la existencia de sustancias consideradas riesgosas para el ambiente, como es el caso de los HAP detectados en esta contribución.

Las características ambientales de la región en estudio, como son los rasgos oceanográficos que presentan una circulación costera con tendencia E-W, y la presencia de giros ciclónicos en el sur del Golfo y anticiclónicos en el NW, dando como consecuencia afloramientos y hundimientos de las masas de agua con la subsecuente distribución de materiales en suspensión o provenientes del fondo, las tasas de evaporación registradas para la zona costera del Golfo, la mezcla de aguas dulces y marinas con salinidades contrastantes en la región de descargas importantes como lo es el sur del Golfo, contribuyen al control de las rutas de las sustancias químicas en el medio; MacKay *et al.* (1992) han puntualizado sobre estos aspectos que los factores que intervienen en el comportamiento de los compuestos en un ambiente pueden agruparse en dos: 1) condiciones ambientales como

temperatura, flujos y acumulaciones fluviales, descargas, composición natural del medio, y 2) propiedades fisicoquímicas tanto del medio como de los compuestos que influyen en el fraccionamiento, reacciones y asociación con matrices ambientales (acuosa, sedimentaria, biológica), transformación, conversión a otras especies químicas, entre otras. Estos factores existen en los ecosistemas costeros del Golfo de México y posibilitan la permanencia de compuestos como los HAP en los sedimentos marinos de esta región.

Las características oceanográficas de esta región del Golfo de México son el resultado en gran medida de los patrones de circulación, cuyo rasgo sobresaliente es la Corriente de Lazo con la generación de circulación ciclónica en la zona del Banco de Campeche; los giros ciclónicos se crean como resultado del flujo de la Corriente de Lazo, ya que cuando esta corriente presenta su máximo (abril-mayo y agosto), se da una mayor intromisión en el Golfo y al perder fuerza el meandro, comienza su estrangulamiento el cual va acompañado de una circulación ciclónica con el subsecuente afloramiento de masas de agua de fondo, con temperatura baja y cantidades altas de nutrimentos y otros materiales; estos giros son más intensos en otoño e invierno debido al decaimiento de la velocidad del flujo del Lazo y se ven favorecidos por los vientos predominantes con una componente noroeste (Monreal, 1984). Los ciclones también pueden originarse como respuesta a los anticiclones del oeste del Golfo (Pica-Granados y Pineda-López, 1991). Esta dinámica tiene un efecto sobre las corrientes costeras, el transporte de materiales como sedimentos y organismos, y el recambio de masas de agua tanto provenientes del Caribe como aportadas por los grandes caudales como el Grijalva-Usumacinta, Coatzacoalcos, Tonalá, Papaloapan, Términos, Carmen-Machona, entre los más importantes del sur del Golfo de México.

Dentro de este esquema deben considerarse fenómenos como evaporación, precipitaciones, vientos, que son los responsables del balance energético del Golfo y de alguna forma están relacionados con la presencia, remoción, transformación y

distribución de los materiales de los sistemas acuáticos particularmente de compuestos como los HAP. Se ha observado que durante la época de primavera, el Golfo de México presenta una ganancia mayor de calor ya que la temperatura y la humedad relativa de la atmósfera son altas permitiendo que la pérdida calórica por evaporación sea mínima (Pica-Granados y Pineda-López, 1991); estas condiciones favorecen la presencia de HAP de bajo peso molecular como los formados por dos anillos (naftaleno, acenaftileno, acenafteno y fluoreno) en la columna de agua, pero los procesos de fotooxidación y su subsecuente descomposición se ven favorecidos en las aguas subsuperficiales por las temperaturas altas, impidiendo su llegada al fondo y su acumulación en los sedimentos.

En el inicio del verano, el incremento en la temperatura del agua por incidencia solar, es mayor y comienza a decrecer por la presencia de huracanes y ciclones a mediados y finales de esta época del año. Paralelamente la corriente de Lazo se reduce iniciándose la formación de giros anticiclónicos que se dirigen al oeste, y de una circulación ciclónica en la región del Banco de Campeche. Es así, que en este periodo, las corrientes costeras se ven influenciadas por las aguas de fondo que emergen debido a los giros derivados del Lazo y presentan una tendencia de desplazamiento hacia el oeste transportando consigo, masas de agua y materiales en suspensión, tanto disueltos como particulados ya sean sedimentos, detrito orgánico, organismos y sustancias extrañas al ambiente como los contaminantes.

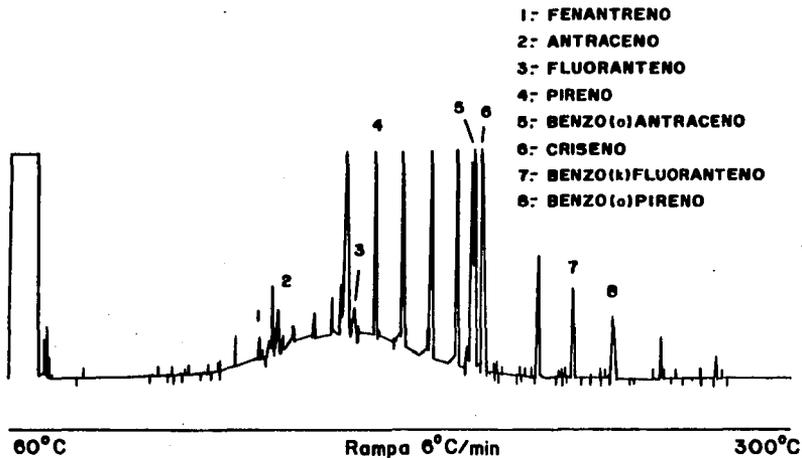
En el otoño la pérdida de calor continúa debido a que los huracanes se intensifican y la nubosidad obstaculiza y minimiza la incidencia solar y por tanto, el Golfo comienza a utilizar la energía almacenada en primavera-otoño. Se reduce el flujo del Lazo y se incrementa la formación de vórtices anticiclónicos.

En invierno, además de registrarse una nubosidad máxima, comienzan los frentes polares provocados por los vientos del norte, la temperatura y humedad decrecen y se da como consecuencia un aumento considerable en las tasas de evaporación de las masas de agua (Pica-Granados y Pineda-López, 1991); estas condiciones ambientales propician que los HAP de bajo peso molecular permanezcan poco tiempo en el agua y sean transferidos a la atmósfera, donde los vientos tan intensos pueden facilitar su transporte a otras regiones y su depósito ocurrirá si existen las condiciones ambientales adecuadas.

Uno de los objetivos de esta contribución fue identificar a los hidrocarburos presentes en los sedimentos de la plataforma continental del área de estudio. En el sur de Veracruz, el grupo de HAP de 4 anillos fue el más abundante con una suma total de 65.78 ppm, los compuestos dominantes fueron: criseno (25.75 ppm), benzo(a)antraceno (17.99 ppm), benzo(k)fluoranteno (11.67 ppm), (Fig. 16); los hidrocarburos de 3 y 5 anillos registraron un valor total similar entre ellos con 10.46 y 10.80 ppm, respectivamente; donde el benzo(a)pireno con 7.32 ppm y el fluoranteno con 6.74 ppm fueron los representantes más importantes de cada grupo (Tabla 20). De los compuestos mencionados, el 80 % (excepto el fluoranteno) ha sido reportado a poseer una capacidad carcinogénica y genotóxica, principalmente el benzo(a)pireno (Cavalieri *et al.*, 1993; Grimmer *et al.*, 1993; Phillips *et al.*, 1993). Es así, que la presencia de este HAP en los sedimentos de la plataforma continental de Veracruz pone de manifiesto el nivel de toxicidad que puede existir en la zona costera del Golfo de México con el riesgo ambiental que esto representa.

Los hidrocarburos más ligeros como el naftaleno, acenaftileno y fluoreno, formados por dos anillos bencénicos, fueron escasos en los sedimentos evaluados; los niveles fueron de 0.05, 0.06 y 0.2 ppm en la plataforma continental del sur de Veracruz (Tabla 19). Estos HAP presentan pesos moleculares bajos, entre 128.2 y 166.2 g mol^{-1} y los procesos de volatilización y biodegradación son eventos claves para estos hidrocarburos (Wild *et al.*, 1991); los cuales pueden contribuir a la pérdida de

A) OGMEX 1, ESTACION 2. INFLUENCIA DEL RIO TONALA Y LA LAGUNA CARMEN-MACHONA.



B) OGMEX 4, ESTACION 2. INFLUENCIA DEL RIO COATZACOALCOS.

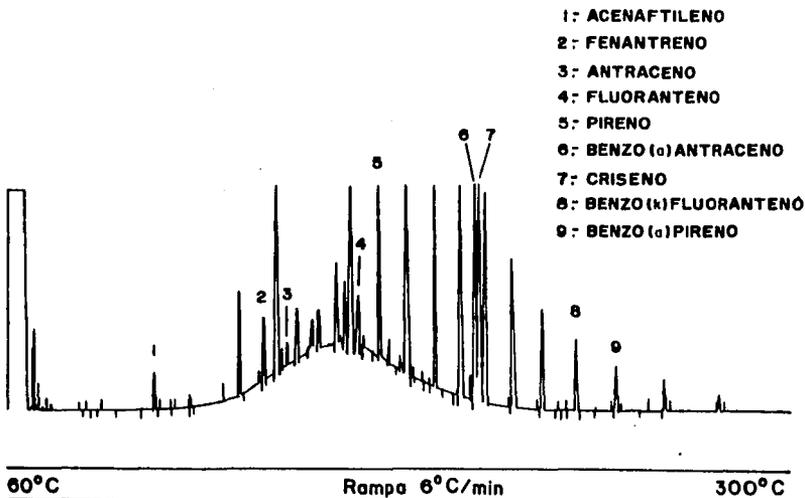


FIGURA 16. CROMATOGRAMAS DE SEDIMENTOS DEL SUR DE VERACRUZ.

TABLA 20 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL SUR DE VERACRUZ . VALORES EN $\mu\text{g g}^{-1}$.

OGMEX 1
PRIMAVERA 1987

No. ANILLOS	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN
4	CRISENO	7.80
4	BENZO(k)FLUORANTENO	2.32
5	BENZO(a)PIRENO	2.08
4	BENZO(b)FLUORANTENO	1.12
4	PIRENO	0.86

OGMEX 2
VERANO 1987

No. ANILLOS	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN
4	PIRENO	1.39
4	BENZO(a)ANTRACENO	0.54
5	BENZO(a)PIRENO	0.29
4	BENZO(b)FLUORANTENO	0.23
3	FLUORANTENO	0.21

OGMEX 3
OTOÑO 1987

No. ANILLOS	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN
4	BENZO(b)ANTRACENO	15.73
4	CRISENO	8.55
5	BENZO(a)PIRENO	4.01
4	BENZO(k)FLUORANTENO	3.96
3	FLUORANTENO	2.36

OGMEX 4
PRIMAVERA 1988

No. ANILLOS	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN
4	CRISENO	9.40
4	BENZO(k)FLUORANTENO	5.27
3	FLUORANTENO	3.91
6	BENZO(ghi)PERILENO	2.76
5	INDENO(1,2,3-cd)PIRENO	2.22

SUR DE VERACRUZ
INTEGRADO

No. ANILLOS	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN
4	CRISENO	25.75
4	BENZO(a)ANTRACENO	17.99
4	BENZO(k)FLUORANTENO	11.67
3	BENZO(a)PIRENO	7.32
5	FLUORANTENO	6.74

ellos en los sedimentos de la plataforma continental. Sin embargo, a pesar de estas condiciones, fue posible su detección en la zona de estudio reflejándose la existencia de aportes continuos de estos compuestos, ya que para alcanzar los sedimentos es necesario que exista una cantidad significativa de HAP ligeros, y/o que las condiciones ambientales permitan su adsorción a las partículas presentes en la columna de agua, con la posterior floculación y hundimiento, o precipitación de las mismas para integrarse al fondo. Además, la solubilidad tiende a disminuir conforme el número de anillos aromáticos o el peso molecular aumenta. El naftaleno tiene una solubilidad de aproximadamente 30 ppm, mientras que los HAP de 5 anillos la tienen de 0.5-5.0 ppb. De igual forma, se ha observado que la biodegradación es mayor en aquellos compuestos aromáticos con menor número de anillos (Woo *et al.*, 1978).

Como se ha visto, en los sedimentos de Veracruz existe una dominancia de aquellos hidrocarburos constituidos por 4 anillos aromáticos (Fig. 17); las fuentes principales de estos compuestos pueden ser los procesos de combustión incompleta o pirólisis de diversos combustibles fósiles desarrollados en el continente, y desde ahí a través del transporte atmosférico iniciar su migración hacia el mar y los sistemas acuáticos adyacentes; por ejemplo, el estudio de las distribuciones de los HAP indica que su origen en los sedimentos del Mediterráneo es predominantemente pirolítico (Raoux, 1991). Esto es, como la fuente pirolítica es conocida a estar principalmente caracterizada por un origen atmosférico, se supone que estos compuestos antropogénicos son introducidos al ambiente marino asociados a partículas atmosféricas muy finas con tamaños menores a 5 μm (Sicre *et al.*, 1987).

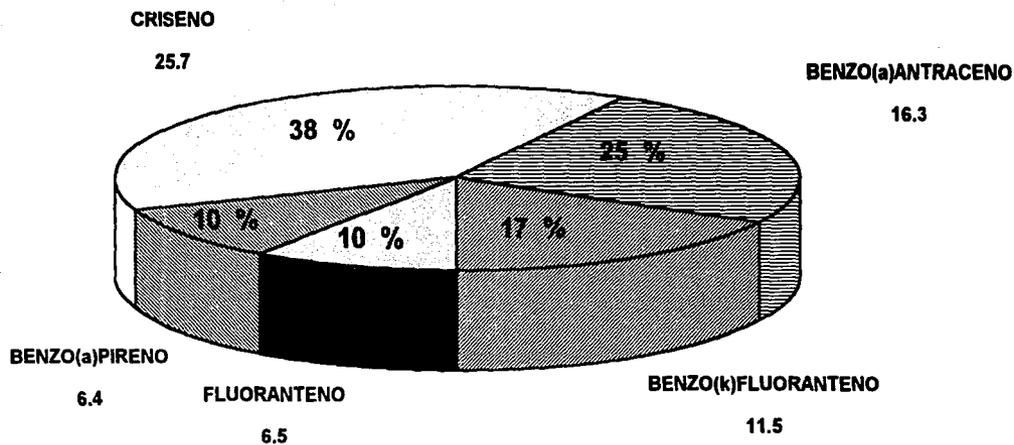


FIG. 17 COMPUESTOS DOMINANTES EN LOS SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL SUR DE VERACRUZ. CONCENTRACIÓN EN $\mu\text{g g}^{-1}$.

De forma general, se asume que virtualmente todos los HAP vertidos a la atmósfera están asociados con aerosoles y materia particulada (Suess, 1976). Los aromáticos de peso molecular más bajo (naftaleno-pireno), tienen presiones de vapor suficientemente altas para que puedan existir en concentraciones significativas en fase de vapor. Las presiones de vapor, y por lo tanto las concentraciones de vapor de equilibrio de los HAP, disminuyen conforme el peso molecular aumenta y conforme la temperatura del ambiente disminuye.

Los procesos atmosféricos que resultan en el depósito de los HAP particulados atmosféricos sobre la tierra y el agua, incluyen lluvia, precipitación seca y depósito en fase de vapor sobre las superficies (Hangebrauck *et al.*, 1964). Los primeros dos procesos son los mecanismos primarios para el depósito de HAP particulados atmosféricos. El tiempo de residencia de los aromáticos en la atmósfera y su dispersión por corrientes de viento, están gobernados por las condiciones físicas y meteorológicas de las partículas atmosféricas (Radding *et al.*, 1976). El tamaño de las partículas a las cuales los HAP son adsorbidos, es un factor determinante del tiempo de residencia de los HAP en la atmósfera, y por tanto de la magnitud de la dispersión. Las partículas que contienen a los HAP pueden permanecer en la atmósfera suficiente tiempo para dispersarse cientos o aún miles de kilómetros.

En el estado de Veracruz existe un desarrollo industrial importante localizado tanto en la parte central de la entidad como en la región costera. Complejos petroquímicos como Pajaritos, La Cangrejera, Minatitlán, Coatzacoalcos, así como ingenios azucareros, textiles, metalurgías, entre otros (INEGI, 1992); vierten sus desechos a caudales como los ríos Blanco, Papaloapan, Coatzacoalcos y Tonalá, o bien directamente al mar como en el caso del Puerto de Veracruz donde se realizan maniobras portuarias de altura con gran afluencia de barcos tanqueros que transportan petróleo a otras zonas de México y del mundo; asimismo, envían a la atmósfera una proporción de sus emisiones de desechos utilizando de esta forma

los dos mecanismos de transporte fundamentales para que los contaminantes lleguen al medio marino.

En otras evaluaciones ambientales como la realizada por Heit (1985), se establece al depósito atmosférico como la fuente principal de los HAP en sedimentos lacustres de Norteamérica provenientes de procesos pirolíticos; de igual forma, Johnson *et al.* (1985) observaron que los HAP producidos por combustión y transportados atmosféricamente, son la fuente principal de estos hidrocarburos en la Bahía Penobscot en Maine, Estados Unidos y sus niveles los equiparan con aquéllos de zonas altamente industrializadas.

Otra vía de ingreso de compuestos a la zona costera, la constituye la debida a descargas fluviales y en el Golfo de México existen caudales muy importantes como los ríos Coatzacoalcos, Grijalva-Usumacinta, Tonalá, Papaloapan, y también los sistemas lagunares exportan materiales hacia el océano como las lagunas de Términos, Carmen-Machona y Madre; en otros lugares se ha observado esta ruta como una de las más importantes en la introducción de HAP; por ejemplo, en 1990 Evans *et al.*, encontraron que los niveles de estos hidrocarburos se incrementaron debido a las descargas de fuentes puntuales durante la época de lluvias, a través de los escurrimientos y del depósito atmosférico.

La forma en que los HAP alcanzan el fondo de un sistema acuático una vez que llegan a este ambiente, tiene que ver con una serie de condiciones; Jaffé (1991) da una explicación de estos procesos y establece que los hidrocarburos tienden a asociarse con fases orgánicas como sedimentos y tejidos biológicos o a escapar hacia la atmósfera. La ruta exacta depende de varios parámetros fisicoquímicos y biológicos propios de los compuestos, tales como la presión de vapor, solubilidad, capacidad lipofílica, estabilidad química y resistencia a la biodegradación. También dependerá de las características del ambiente acuático, particularmente de la

temperatura, pH, contenido de materia orgánica, oxígeno disuelto, distribución del tamaño de partículas sedimentarias, corrientes y tipo de organismos (Fig. 18).

Desde hace tiempo, se conoce que las fuentes naturales de HAP en sedimentos, tales como la biosíntesis por microorganismos, plantas y la diagénesis de la materia orgánica, son pequeñas respecto a la fuente antropogénica (Hase y Hites, 1977). Las filtraciones de petróleo y los incendios forestales son fuentes de la mayoría de HAP que entran a los sistemas acuáticos, muy importantes desde antes de la Revolución Industrial (Youngblood y Blumer, 1975). Con el advenimiento de la industrialización y, en particular, la combustión de grandes cantidades de combustible fósil (y posteriormente de grandes derrames de petróleo), una diversidad de HAP en cantidades sustanciales fue descargada al ambiente. Incrementos abruptos en los niveles de HAP en los sedimentos del fondo, marcan el inicio de la revolución industrial (Hinga *et al.*, 1986). La presencia de una gama de 15 compuestos de este tipo en los sedimentos de esta zona del Golfo de México, pone de manifiesto el efecto de las actividades antropogénicas sobre el medio acuático.

Los sedimentos que conforman el sur de Veracruz describen una distribución donde existe una franja angosta de grava, arena y limos terrígenos rodeada por una zona amplia de arcillas calcáreas que alcanza hasta el Golfo central; esta característica se debe principalmente a las descargas importantes de los ríos Coatzacoalcos y Tonalá, y en menor grado al sistema lagunar de Carmen-Machona. Debido a un efecto mecánico, los sedimentos que poseen bajos contenidos de limos y arcillas reflejan una corriente de marea muy fuerte y corrientes de fondo importantes las cuales resuspenden y transportan sedimentos de grano más pequeño, a través de toda la plataforma continental (Phillips *et al.*, 1987); éstos se depositan bajo condiciones ambientales de calma y lejos de las descargas fluviales.

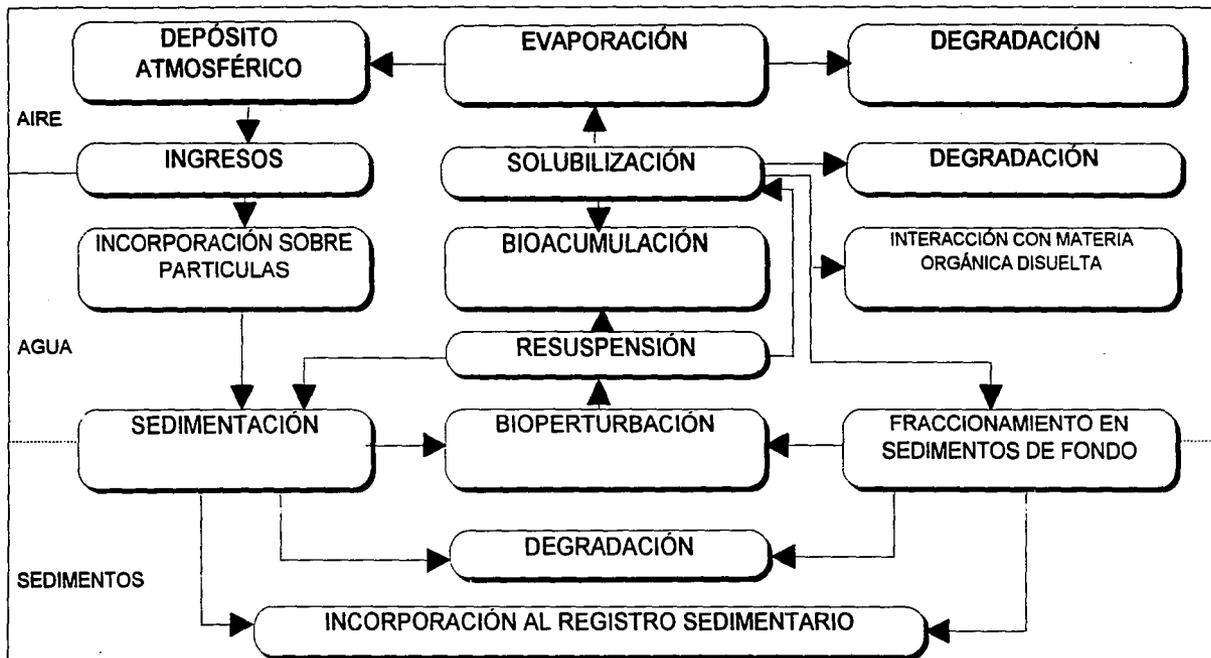


FIG. 18 DIAGRAMA DE LOS PROCESOS BIOGEOQUÍMICOS DE LOS CONTAMINANTES ORGÁNICOS HIDROFÓBICOS EN LOS AMBIENTES ACUÁTICOS. (JAFÉ.1991)

Se ha observado que en la vecindad de los deltas, los depósitos aluviales (mineral y orgánico) provocan una actividad biológica alta y la sedimentación de la materia orgánica varía entre 0.3 y 2.5 Kg/m³ por año. Esta materia orgánica está compuesta principalmente por agregados floculados que son asociaciones de partículas minerales, fibras vegetales, fitoplancton, mucus, zooplancton y bacterias. Este material puede hundirse y ser arrastrado por las corrientes junto con los lodos y emerger kilómetros lejos de la costa, lo cual explicaría encontrar niveles altos de materia orgánica y de contaminantes mar adentro (Hermin y Castanier, 1991). Este proceso fue observado en algunas estaciones del sur de Veracruz con la materia orgánica, los HAP y los carbonatos.

Una vez que contaminantes como los HAP se depositan en los sedimentos, pueden surgir diversas rutas de acumulación, transformación y degradación, entre otras; *In situ*, se ha observado una asociación preferencial de los HAP a los sustratos ricos en materia orgánica en los sedimentos o en los suelos (Raoux y Garrigues, 1991). Para los sedimentos finos, y gruesos el carbono orgánico particulado (COP) se correlaciona significativamente con el porcentaje de limo/arcilla; los sedimentos como los limos gruesos (tamaño de partícula de 63 µm o menos) se presentan proporcionalmente con mayor abundancia en la fracción limo/arcilla de los sedimentos finos que en la fracción de los sedimentos gruesos. Esto es, el COP está pobremente asociado con los limos gruesos (Readman *et al.*, 1986), y por ello se observa una correlación menor con los sedimentos finos.

Los estudios experimentales de Karickhoff *et al.* (1979) sobre la adsorción de diferentes contaminantes hidrofóbicos tales como los HAP sobre los sedimentos naturales, han mostrado una afinidad de estos compuestos disueltos hacia la materia orgánica asociada a la fracción de grano más fino del sedimento. Esto se ha confirmado por los estudios de adsorción de Rao *et al.* (1990).

De igual forma, Raoux y Garrigues (1991) han observado que si bien existe afinidad de los HAP hacia las partículas finas ricas en materia orgánica, no se ha comprobado claramente para sedimentos finos y gruesos. Esto concuerda con el estudio de Readman *et al.* (1986) para sedimentos lodosos estuarinos con niveles de HAP similares. También se ha observado una no afinidad similar para partículas estuarinas suspendidas (Hermann y Thomas, 1984; Readman *et al.*, 1987). El estudio de Stauffer *et al.* (1989) revela que la adsorción de los compuestos químicos orgánicos (particularmente los naftalenos) sobre los sedimentos con bajo contenido de carbono orgánico (<0.1 %), es independiente tanto del contenido de materia orgánica de estos materiales acuosos como de su porcentaje de arcillas o limos.

Los estudios de adsorción (Karickhoff *et al.*, 1979; Rao *et al.*, 1990) que mostraban una afinidad de los compuestos orgánicos hidrofóbicos hacia sedimentos ricos en materia orgánica, han sido realizados con compuestos disueltos. Por otro lado, el modelo propuesto *in situ* está basado en una incorporación de los HAP a los sedimentos en forma particulada. Por tanto, no existe contradicción entre estos resultados. Aun para los HAP introducidos en el medio marino en fase disuelta (esencialmente petrogénicos), su hidrofobicidad los hace asociarse a micropartículas suspendidas en la columna de agua, o a las macromoléculas disueltas. Consecuentemente esto confirma la incorporación de los HAP a los sedimentos como forma particulada.

Los trabajos más recientes sobre la adsorción de los HAP en sedimentos, han establecido que la distribución de los HAP en las arcillas y los limos más finos está dominada por compuestos de alto peso molecular (desde el perileno hasta el benzo(ghi)perileno: >252), mientras que las distribuciones de HAP de los limos gruesos, las arenas y el detrito vegetal están centrados en HAP de bajo peso molecular (desde fenantreno a criseno: menor a 252) (Raoux y Garrigues, 1991).

Estos argumentos obtenidos por los diversos autores mencionados, soportan el comportamiento observado de los HAP y la materia orgánica para los sedimentos del sur de Veracruz (OGMEX 1, 3 y 4). Este hecho se ve complementado por la escasa relación que presentaron los hidrocarburos con los carbonatos en el caso del sur de Veracruz (OGMEX 1 y 4), ya que a pesar de que el contenido de carbonatos en esta región de estudio fue importante, no se observó una relación significativa entre este componente sedimentario y los HAP presentes ($r = -0.0538$, $p < 0.05 \%$) (Tabla 19), cuya explicación plausible es muy similar a la dada para la materia orgánica; estos carbonatos se asocian comúnmente con sedimentos arenosos o bien con una presencia alta de restos calcáreos proveniente de organismos como moluscos bivalvos y corales. De igual forma al existir una dominancia de aquellos hidrocarburos formados por 4, 5 y 3 anillos bencénicos en ese orden de importancia, refleja que el tipo de sedimentos de las diversas áreas de estudio, constituye un mosaico desde arcillas y limos hasta limos gruesos carbonatados y arenas calcáreas.

El enriquecimiento relativo de HAP de peso molecular alto de la fracción fina de los sedimentos, puede explicarse como un mecanismo de partición que involucra la presencia de una fase orgánica asociada a las partículas más finas y disponible a los HAP particulados después de la difusión interna en esta última fracción. En esta fase orgánica, puede ser posible una liberación y disolución de los HAP más lipofílicos (Raoux, 1991).

Los contenidos altos de HAP del detrito de baja densidad, el cual presenta una dominancia de HAP de bajo peso molecular, cuyo comportamiento es opuesto al de las fracciones más finas, se deben a una trampa mecánica de los HAP particulados, totalmente independiente de las características químicas de los HAP.

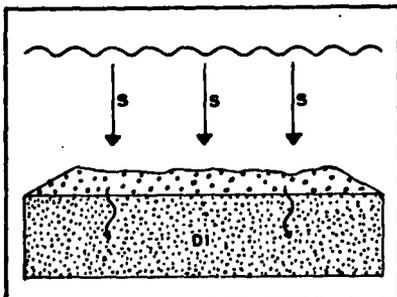
En relación al comportamiento descrito anteriormente, es importante señalar que Raoux y Garrigues (1991) establecen la necesidad de revisar cuidadosamente la teoría de adsorción basada en la hidrofobicidad de los HAP, ya que se ha encontrado en algunos trabajos como los mencionados, que los sedimentos con un alto contenido de estos hidrocarburos no siempre son ricos en carbono orgánico, o presentan una fracción limo/arcillosa predominante. Puede suponerse que la asociación de los HAP (derivados principalmente de fuentes pirolíticas) en los sedimentos, no es un resultado de su hidrofobicidad sino que es resultado de las características de los procesos sedimentarios diferentes los cuales afectan cada localidad específica (Raoux y Garrigues, 1991).

Para tener una visión más clara de los procesos, y considerando una fuente de origen pirolítica, los HAP así generados son transportados atmosféricamente como partículas finas (menor a 5 μm ; Sicre *et al.*, 1987) hacia la zona costera, donde la incorporación de estos hidrocarburos particulados al sedimento es solamente debido al mecanismo de sedimentación, el cual afecta las partículas presentes en la columna de agua. Esto significa que la incorporación de los HAP particulados es independiente de las características de los sedimentos, particularmente del contenido de materia orgánica.

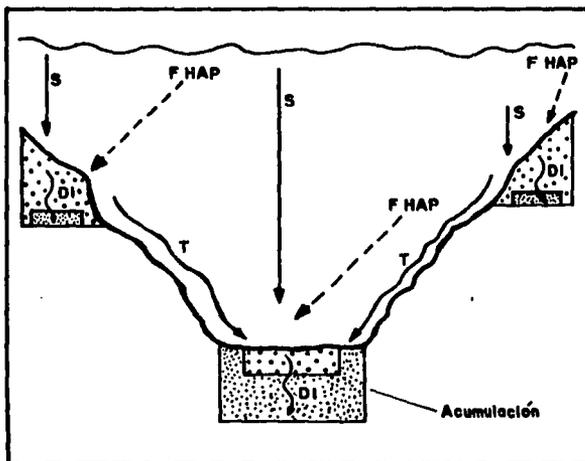
Esta incorporación es seguida por un mecanismo de difusión interna de los HAP particulados hacia la fracción más fina del sedimento, y en sistemas abiertos por el mecanismo de transferencia del material fino de los sedimentos someros a los profundos (Fig. 19) (Raoux y Garrigues, 1991).

Sin embargo, como las concentraciones totales de HAP observadas en las partículas atmosféricas están usualmente por arriba de 50 $\mu\text{g}\text{g}^{-1}$, y si se supone que el 1 % de éstas están efectivamente contaminadas, significa que la concentración de HAP de estas partículas es aproximadamente de 5 $\mu\text{g}\text{g}^{-1}$. Este resultado indica que solamente alguna cantidad del material fino contaminado por HAP, es

A) SISTEMA CERRADO: LUGAR SOMERO SIN VARIACIONES Y SEDIMENTOS LODOSOS.



B) SISTEMA ABIERTO: PROFUNDIDAD MAYOR, VARIACION SEDIMENTARIA MARCADA.



 Fracción Gruesa
 Fracción Fina

S = Sedimentación Directa
DI = Difusión Interna
T = Transferencia

FIGURA 19. MODELO SOBRE LOS MECANISMOS DE CONTAMINACION POR HIDROCARBUROS AROMATICOS POLINUCLEARES (HAP) EN SEDIMENTOS MARINOS. RAOUX Y GARRIGUES, 1991.

necesario para contaminar altamente un sedimento (5 ppm). Consecuentemente, la materia orgánica de un sedimento está casi exclusivamente asociada a las partículas finas no contaminadas (Wise *et al.*, 1985). Esto es, para una localidad en particular, la variable que controla la distribución de los HAP en los sedimentos es la proporción relativa entre el material contaminado por HAP y el flujo total de partículas finas.

Al igual que la materia orgánica, las características sedimentológicas son importantes de considerar porque intervienen en la retención de los contaminantes orgánicos como los HAP. En la plataforma continental del sur de Veracruz, los sedimentos del área comprendida entre la descarga del río Coatzacoalcos, Ver., y el sistema lagunar Carmen-Machona, Tab., presentan las características texturales y composicionales siguientes (Carranza-Edwards y Aguayo-Camargo, 1992): directamente frente a la desembocadura de este río, existe una pequeña zona de arcilla calcárea rodeada por dos franjas estrechas de arena y lodo (occidente) y grava, arena y limo (oriente); inmediatamente hacia mar abierto domina una extensa área de arcilla calcárea. En esta zona del Golfo de México, la influencia del sistema fluvial Grijalva-Usumacinta es determinante, ya que su cuenca tiene un área superior a los 70, 000 Km² y la descarga anual es mayor a los 60x10⁹ m³ (Carranza-Edwards *et al.*, 1993). Esto contribuye a establecer condiciones adecuadas para la adsorción y residencia de contaminantes, como los hidrocarburos aromáticos polinucleares provenientes del continente y de mar abierto.

Es así que la interacción del fondo con la masa de agua adyacente y su dinámica (corrientes, surgencias, hundimientos, entre otras características) son importantes, ya que la batimetría del área de estudio (30-140 m) favorece que ocurran estos procesos; los mecanismos oceanográficos afectan completamente al sistema y por lo tanto la distribución de los compuestos presentes depende de ellos en gran medida.

Se ha observado *in situ* en las investigaciones realizadas sobre la asociación entre la materia orgánica, los HAP y las partículas finas de los sedimentos, que puede presentarse un patrón diferente al comportamiento común que se ha establecido; especialmente cuando los niveles de estos hidrocarburos son altos. Johnson *et al.* (1985), encontraron una correlación significativa entre los HAP y el contenido de carbono orgánico, mientras que para las muestras con un contenido de HAP mayor a 2 ppm, los valores de las proporciones HAP/carbono orgánico son más elevados que el promedio calculado para todas las muestras. Este incremento de las proporciones mencionadas para niveles altos de HAP, también ha sido observado por Elder y Dresler (1988) y aparece en el estudio de Boehm y Farrington (1984).

La explicación más común para estos contenidos altos de HAP no esperados, es una asociación preferencial posible de los HAP hacia un material del tamaño de las arenas de baja densidad (Prahly y Carpenter, 1983). Es decir, en el caso de los sedimentos con un alto nivel de HAP, estos resultados diferentes contradicen la teoría de adsorción, la cual está basada en la afinidad de los HAP hacia materiales con un alto contenido de carbono o con una fracción limo/arcillosa predominante. Esto significa que la explicación usual para la asociación de los HAP con la matriz sedimentaria, basada en su hidrofobicidad, debe revisarse (Raoux y Garrigues, 1991).

Para una área específica, si la proporción relativa de material contaminado por HAP es constante, lo cual supone que las partículas contaminadas por HAP y las no contaminadas tienen un origen común (en particular transporte por ríos o depósitos de aerosoles atmosféricos); las variaciones espaciales y temporales del flujo sedimentario total implicarán que se encuentre una relación lineal entre los contenidos de HAP y de carbono orgánico de los sedimentos de localidades diferentes de esta área específica. En el sur de Veracruz no se observó una relación estadística significativa entre el contenido de HAP y la materia orgánica ($r = 0.247$, $p < 0.05$ %) (Tabla 19), probablemente este comportamiento se debe a lo

que se ha tratado de explicar en relación con los mecanismos de adsorción sedimentaria de los HAP y a las descargas discontinuas de estos hidrocarburos desde las fuentes de origen. Los diferentes procesos y características como los reportados por Raoux y Garrigues (1991), refiriéndose a la difusión interna de los HAP en sedimentos finos y gruesos de regiones someras y profundas (Fig. 19), además del contenido existente de estos compuestos en las partículas fluviales y atmosféricas son factores que determinan la adsorción de los hidrocarburos aromáticos en los sedimentos, así como su tiempo de residencia.

6.2.2 PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS.

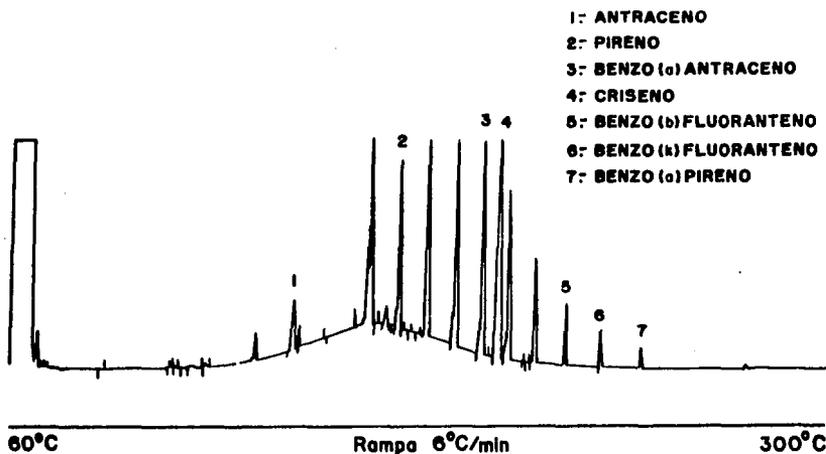
Esta colecta realizada en la plataforma continental de Tamaulipas durante septiembre de 1989 (época de otoño), registró una concentración total máxima de HAP frente a la desembocadura de la Laguna de Tamiahua (estación 18) de 29.56 ppm, y una mínima de 0.23 ppm hacia la isobata de los 200m en dirección de la Ciudad de Tampico-Madero (estación 22), así como cerca de la costa hacia el norte rumbo a la región del río Soto La Marina (estaciones 19 y 30) (Tabla 21).

Del análisis cromatográfico realizado en estos sedimentos, se observa que el criseno fue el compuesto más abundante con 46.82 ppm, seguido por el benzo(a)antraceno con 7.29 ppm y por el benzo(b)fluoranteno con 5.8 ppm (Fig. 20); todos ellos con carcinogenicidad reportada en la literatura (Mallet *et al.*, 1972; Brunnemann y Hoffmann, 1976; IARC, 1983) y con una vida media en sedimentos costeros mayor a los 5 años (MackKay *et al.*, 1992).

TABLA 21 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS (OGMEX 8). VALORES EN $\mu\text{g g}^{-1}$.

No. ANILLOS	COMPUESTO	ESTACIONES															TOTAL TAMAULIPAS		
		15	18	19	22	27	28	30	33	34	39	40	42	46	48	50		53	56
2	NAFTALENO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10	0.16	0.06	-	1.14	-	1.46
2	ACENAFTILENO	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.12	0.11	-	0.03	-	-	0.32
2	ACENAFTENO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.12	-	0.13
2	FLUORENO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.30	-	0.33
3	FENANTRENO	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.08	0.08	0.02	0.06	0.06	0.64	0.03	1.03
3	ANTRACENO	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	0.30	0.17	0.21	0.03	0.22	0.07	0.09	1.11
3	FLUORANTENO	-	-	0.29	0.04	-	-	-	-	-	-	0.25	0.07	0.09	0.17	0.11	0.25	0.30	1.67
4	PIRENO	0.45	-	-	0.09	-	-	-	-	-	-	0.46	0.30	0.55	0.14	0.58	0.43	0.11	3.12
4	BENZO(a)ANTRACENO	-	-	-	0.08	-	2.38	0.23	0.38	0.17	0.36	0.15	0.64	2.35	-	-	0.11	0.44	7.29
4	CRISENO	-	29.56	-	-	0.41	6.28	-	-	-	-	1.81	2.12	4.18	1.04	1.42	-	-	46.82
4	BENZO(b)FLUORANTENO	0.49	-	-	-	1.13	2.45	-	-	0.25	-	-	-	-	-	1.39	-	0.09	6.80
4	BENZO(k)FLUORANTENO	-	-	-	-	-	0.05	-	-	-	-	0.64	0.16	1.29	-	0.77	-	0.19	3.10
5	BENZO(a)PIRENO	0.09	-	-	-	-	0.86	-	-	-	-	0.48	-	1.15	-	0.73	-	-	3.31
5	INDENO(1,2,3-cd)PIRENO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	BENZO(ghi)PERILENO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	-	-	0.15
TOTAL POR ESTACIÓN		1.16	29.56	0.29	0.23	1.54	12.02	0.23	0.38	0.42	0.38	4.17	3.76	10.11	1.60	5.60	3.08	1.25	75.84
PROMEDO POR OGMEX		4.44																	
DESV. STD.		7.35																	
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN LINEAL (r) MATERIA ORGÁNICA - HAP \Rightarrow 0.0445 CARBONATOS - HAP \Rightarrow 0.1331																			
- \Rightarrow NO DETECTADO ($< 0.00002 \mu\text{g g}^{-1}$)																			

A) ESTACION 28. INFLUENCIA DE LA CIUDAD DE TAMPICO-MADERO Y EL RIO SOTO LA MARINA.



B) ESTACION 50. INFLUENCIA DE LA COSTA Y DE LA LAGUNA MADRE.

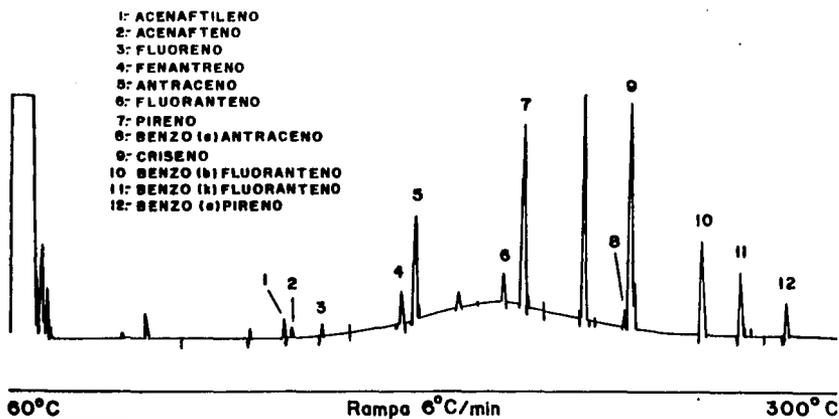


FIGURA 20. CROMATOGRAMAS DE SEDIMENTOS DE TAMAULIPAS.

Como puede observarse de este análisis, los compuestos aromáticos formados por 4 anillos fueron los dominantes en estos sedimentos y de forma similar que en el litoral de Veracruz, y posiblemente son de origen pirolítico aportados a la atmósfera por diversas fuentes existentes en continente, ya que el estado de Tamaulipas posee un importante desarrollo industrial, particularmente de tipo petroquímico en su costa; sin dejar de considerar que en esta región del Golfo de México existen filtraciones naturales de petróleo del subsuelo marino, lo cual llevó al inicio de la explotación petrolera mexicana en la llamada "franja de oro" de Tamaulipas, fenómeno que también ocurre en la porción norteamericana del mismo Golfo (Koons y Monaghan, 1976; Geyer y Giammona, 1980; Wade *et al.*, 1989).

Se observó el siguiente orden decreciente en la dominancia de los hidrocarburos aromáticos (Fig. 21):

**Criseno > Benzo(a)antraceno > Benzo(b)fluoranteno >
Benzo(a)pireno > Pireno > Benzo(k)fluoranteno**

Durante este crucero no se registró una correlación significativa entre los HAP y la materia orgánica presentes en los sedimentos, ya que se obtuvo un coeficiente de 0.0445. Con los HAP y los carbonatos no se observó un coeficiente de correlación lineal significativo ($r = 0.1331$) (Tabla 21), por lo que estos compuestos aromáticos no se ven afectados por los dos componentes sedimentológicos analizados.

Asimismo, debe considerarse la constitución sedimentaria de esta porción de la plataforma continental del Golfo; en Tamaulipas, los sedimentos ubicados cerca de la línea de costa están formados por limos terrígenos excepto en una pequeña zona (frente a la Laguna de Tamiahua, Ver.), donde existen gravas, arenas y limos calcáreos; conforme se avanza en la profundidad, se encuentra una plataforma constituida por arcilla de dos tipos: entre la Laguna Madre y la frontera con Estados Unidos es terrígena (zona norte), mientras que hacia el sur es de composición

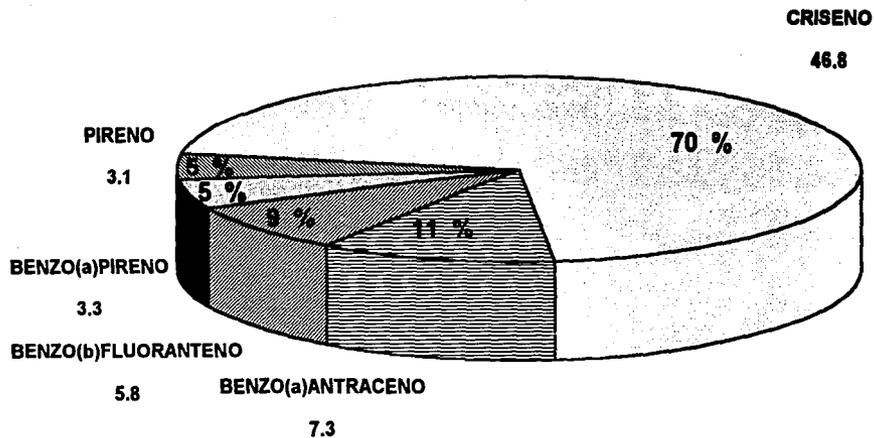


FIG. 21 COMPUESTOS DOMINANTES EN LOS SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE TAMAULIPAS. CONCENTRACIÓN EN $\mu\text{g g}^{-1}$.

calcárea (Carranza-Edwards y Aguayo-Camargo, 1992). En la distribución de los sedimentos en esta región del Golfo de México intervienen tanto las descargas de sistemas fluviales y lagunares como Tamiahua, Pánuco, Soto La Marina, Madre, Bravo que suministran sedimentos hacia el mar, como el nivel de la marea y la circulación costera derivada del Anticiclón Mexicano, el cual afecta las masas de agua y el fondo marino (Vázquez de la Cerda, 1987). Al igual que para Veracruz, las características de estos sedimentos pueden favorecer que los HAP que alcanzan la zona costera y oceánica permanezcan en ellos provocando un problema de contaminación como se ha establecido para otras regiones (Hites *et al.*, 1980).

De forma global, se puede resumir el comportamiento de los niveles de los HAP y el tipo de compuestos detectados a lo largo de esta contribución. En la Tabla 22, se presentan los datos referentes a la composición de HAP registrados en los sedimentos de la plataforma continental de Veracruz y Tamaulipas. Podemos observar que el criseno fue el hidrocarburo aromático dominante, con una concentración total durante el estudio completo de 72.57 ppm, seguido por el benzo(a)antraceno con 25.28 ppm, y por el benzo(k)fluoranteno con 14.77 ppm, esto es, existe una dominancia de compuestos formados por 4 anillos bencénicos (Fig. 22).

La dominancia de los HAP individuales a lo largo del estudio presentó el orden siguiente:

**Criseno > Benzo(a)antraceno > Benzo(k)fluoranteno >
Benzo(a)pireno > Benzo(b)fluoranteno > Pireno**

Al hacer el análisis comparativo entre las áreas de estudio se observó que Veracruz registró la mayor concentración total con 92.50 ppm, seguido por Tamaulipas con un nivel de 75.54 ppm de composición global (Fig. 23a).

TABLA 22 COMPOSICIÓN DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL SUR DE VERACRUZ Y TAMAULIPAS. VALORES EN $\mu\text{g g}^{-1}$.

No. ANILLOS	COMPUESTO	VERACRUZ				TOTAL	TAMAULIPAS	TOTAL ÁREAS ESTUDIO
		OGMEX 1	OGMEX 2	OGMEX 3	OGMEX 4		OGMEX 8	
		PRIMAVERA 1987	VERANO 1987	OTOÑO 1987	PRIMAVERA 1988		OTOÑO 1989	
2	NAFTALENO	-	-	0.05	-	0.05	1.46	1.51
2	ACENAFTILENO	-	-	0.06	0.64	0.70	0.32	1.02
2	ACENAFTENO	-	-	0.05	-	0.05	0.13	0.18
2	FLUORENO	-	0.08	0.05	0.08	0.21	0.33	0.54
3	FENANTRENO	0.11	0.11	0.56	0.76	1.54	1.03	2.57
3	ANTRACENO	0.23	0.09	1.26	0.60	2.18	1.11	3.29
3	FLUORANTENO	0.26	0.21	2.36	3.91	6.74	1.57	8.31
4	PIRENO	0.86	1.39	2.01	2.18	6.44	3.12	9.56
4	BENZO(a)ANTRACENO	0.73	0.54	15.73	0.99	17.99	7.29	25.28
4	CRISENO	7.80	-	8.55	9.40	25.75	46.82	72.57
4	BENZO(b)FLUORANTENO	1.12	0.23	0.49	2.09	3.93	5.80	9.73
4	BENZO(k)FLUORANTENO	2.32	0.12	3.96	5.27	11.67	3.10	14.77
5	BENZO(a)PIRENO	2.08	0.29	4.01	0.94	7.32	3.31	10.63
5	INDENO(1,2,3-cd)PIRENO	0.71	-	0.55	2.22	3.48	0.00	3.48
6	BENZO(gh)PERILENO	0.73	-	0.96	2.76	4.45	0.15	4.60
TOTAL POR OGMEX		16.95	3.06	40.65	31.84	92.50	75.54	168.04
- => NO DETECTADO (< 0.00002 $\mu\text{g g}^{-1}$)								

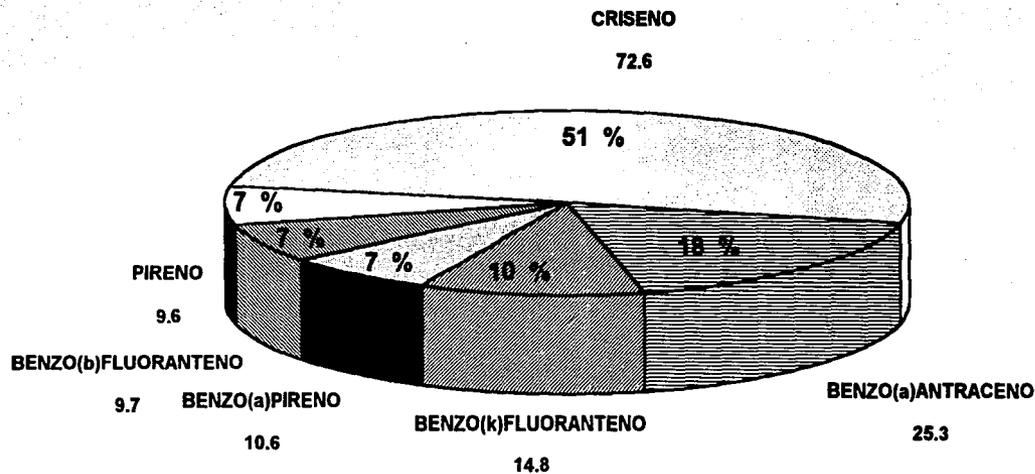
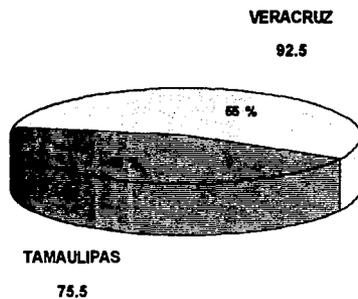


FIG. 22 COMPUESTOS DOMINANTES EN LOS SEDIMENTOS DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO. CONCENTRACIÓN EN $\mu\text{g g}^{-1}$.

a) NIVELES TOTALES



b) NÚMERO DE ANILLOS DOMINANTES

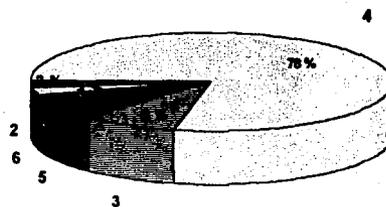


FIG. 23 COMPORTAMIENTO GENERAL DE LOS HAP EN RELACIÓN AL NIVEL TOTAL (a) Y A LA DOMINANCIA POR No. DE ANILLOS (b). CONCENTRACIÓN EN μgg^{-1} .

En esta contribución se manifestó una dominancia de los HAP formados por 4 anillos bencénicos como el criseno y el benzo(a)antraceno, sin dejar de considerar aquellos de 3 y 5 anillos como el antraceno, fluoranteno, benzo(a)pireno y el indeno(1,2,3-cd)pireno, estos últimos con potencialidad carcinogénica reportada (IARC, 1983). Este análisis se complementa si observamos el comportamiento de los compuestos en base a la constitución de anillos bencénicos para cada entidad; el grupo de 4 anillos ocupó el primer lugar en este estudio con un valor total de 131.91 ppm, en segundo lugar estuvo el grupo de 3 anillos con 14.17 ppm, seguido por el bloque de 5 anillos con un valor muy similar (14.11 ppm) (Tabla 23); los valores totales más bajos correspondieron al conjunto de 2 anillos, representado únicamente por el naftaleno (3.25 ppm). Este comportamiento en la composición de los HAP se resume como sigue (Fig. 23b):

NÚMERO DE ANILLOS

4 > 3 > 5 > 6 > 2

Esto significa probablemente un origen pirolítico para la mayoría de los hidrocarburos aromáticos detectados en este estudio, que alcanzan la zona costera a través del transporte atmosférico y de las descargas continentales importantes de sistemas como los ríos Coatzacoalcos, Tonalá, Tuxpan y Pánuco en Veracruz, Soto La Marina en Tamaulipas y lagunas costeras como Carmen-Machona en Tabasco, Tamiahua en Veracruz y Madre en Tamaulipas. Asimismo, se presentan compuestos de alto riesgo para la salud de los ecosistemas y del hombre, ya que en la actualidad no solamente se tiene reportado al benzo(a)pireno como un cancerígeno potente, sino a la mayoría de los HAP pesados (4 y 5 anillos bencénicos) detectados en este estudio como el benzo(a)antraceno, el benzo(b)fluoranteno, el criseno y el indeno(1,2,3-cd)pireno (IARC, 1983). De igual forma, se manifiestan aportes continuos de petróleo, ya que hubo detección de HAP ligeros como el naftaleno

TABLA 23 NIVELES DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES CONSIDERANDO EL NÚMERO DE ANILLOS BENCÉNICOS EN SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE VERACRUZ Y TAMAULIPAS. VALORES EN μgg^{-1} .

No. ANILLOS	VERACRUZ					TAMAULIPAS	TOTAL ÁREAS ESTUDIO
	OGMEX 1	OGMEX 2	OGMEX 3	OGMEX 4	TOTAL	OGMEX 8	
	PRIMAVERA 1987	VERANO 1987	OTOÑO 1987	PRIMAVERA 1988		OTOÑO 1989	
2	-	0.08	0.21	0.72	1.01	2.24	3.25
3	0.60	0.41	4.18	5.27	10.46	3.71	14.17
4	12.83	2.28	30.74	19.93	65.78	66.13	131.91
5	2.79	0.29	4.56	3.16	10.80	3.31	14.11
6	0.73	-	0.96	2.76	4.45	0.15	4.60
=> NO DETECTADO ($< 0.00002 \mu\text{gg}^{-1}$)							

cuyo tiempo de residencia en la columna de agua es pequeño, y esto dificulta su llegada a los sedimentos de la plataforma continental del Golfo de México.

Es posible que existan interacciones de tipo químico entre los propios HAP y que éstas intervengan en los procesos de adsorción, transformación o incluso en el desplazamiento por "competencia" química de unos hidrocarburos por otros. Por estas razones se realizó un análisis de correlación lineal entre los hidrocarburos aromáticos individuales de las áreas de estudio. En la Tabla 24 se aprecia que las parejas mejor asociadas fueron: Benzo(ghi)perileno-Indeno(1,2,3-cd)pireno ($r = 0.99$); Fluoreno-Acenafteno (0.91); Naftaleno-Acenafteno (0.90) y Naftaleno-Fluoreno(0.90), manifestando su afinidad entre los compuestos ligeros con los de estructura química y peso molecular similar al igual que los pesados. Otras importantes relaciones detectadas y que no siguieron este comportamiento fueron: Benzo(ghi)perileno-Acenaftileno (0.88); Indeno(1,2,3-cd)pireno-Benzo(k)fluoranteno (0.87); Benzo(ghi)perileno-Benzo(k)fluoranteno (0.87); Indeno(1,2,3-cd)pireno-Acenaftileno (0.86); en estos casos se encuentran relacionados HAP de 2 anillos aromáticos como el acenaftileno, con aquellos formados por 5 y 6 anillos como el benzo(ghi)perileno y el indeno(1,2,3-cd)pireno; lo cual sugiere dos tipos de aportes de hidrocarburos: crónico, favoreciendo la presencia de compuestos pesados y agudo (derrames ocasionales) suministrando los de tipo ligero, como ya se ha discutido.

De forma complementaria, se realizó un análisis de factores para observar el posible agrupamiento estadístico de los compuestos aromáticos que denotara alguna afinidad entre ellos y explicara su distribución durante el estudio. Se obtuvo que para el sur de Veracruz, los HAP ligeros de 2 anillos, así como el fenantreno y fluoranteno de 3 y los aromáticos pesados de 5 y 6 anillos, constituyeron un grupo que trata de explicar el 80 % del comportamiento de los datos de hidrocarburos aromáticos policíclicos; por otra parte, los HAP de 4 anillos junto con el antraceno de 3, formaron el segundo grupo donde radica el 20 % restante del patrón general

TABLA 24 ÍNDICES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES INDIVIDUALES DETECTADOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL GOLFO DE MÉXICO. ESTUDIO COMPLETO.

	NAFTALENO	ACENAFTILENO	ACENAFTENO	FLUORENO	FENANTRENO	ANTRACENO	FLUORANTENO	PIRENO	BENZO(a)ANTRACENO	CRISENO	BENZO(b)FLUORANTENO	BENZO(k)FLUORANTENO	BENZO(a)PIRENO	INDENO(1,2,3-cd)PIRENO	BENZO(ghi)PERILENO
NAFTALENO	1.00														
ACENAFTILENO	-0.01	1.00													
ACENAFTENO	0.90	-0.01	1.00												
FLUORENO	0.90	0.20	0.91	1.00											
FENANTRENO	0.64	0.64	0.68	0.82	1.00										
ANTRACENO	0.02	-0.05	-0.02	-0.05	-0.04	1.00									
FLUORANTENO	0.02	0.75	0.03	0.21	0.54	0.33	1.00								
PIRENO	0.12	-0.04	0.07	0.20	0.07	0.67	0.27	1.00							
BENZO(a)ANTRACENO	-0.03	-0.04	-0.04	-0.05	-0.08	-0.08	0.05	-0.10	1.00						
CRISENO	-0.04	-0.02	-0.07	-0.08	-0.05	-0.04	-0.07	-0.06	-0.06	1.00					
BENZO(b)FLUORANTENO	-0.08	-0.06	-0.06	-0.06	-0.09	0.30	0.05	0.28	-0.06	0.06	1.00				
BENZO(k)FLUORANTENO	-0.05	0.84	0.03	0.17	0.63	0.02	0.63	0.00	-0.08	0.01	-0.01	1.00			
BENZO(a)PIRENO	-0.05	0.00	0.10	-0.02	0.10	0.10	-0.13	0.14	-0.09	0.10	0.28	0.44	1.00		
INDENO(1,2,3-cd)PIRENO	-0.05	0.86	0.05	0.21	0.64	-0.09	0.70	-0.08	-0.05	-0.07	0.01	0.87	0.16	1.00	
BENZO(ghi)PERILENO	-0.05	0.88	0.05	0.21	0.64	-0.10	0.73	-0.09	-0.05	-0.07	0.01	0.87	0.14	0.99	1.00

de distribución de estos compuestos en esta región del Golfo de México. Esto sostiene que existen dos tipos de aportes de HAP: continuo, debido al transporte atmosférico y a las descargas fluviales y lagunares con hidrocarburos de tipo pirolítico de peso molecular alto, y numerosos anillos bencénicos; discontinuo, agudo y cada vez menos esporádico provocado por derrames accidentales de los pozos de extracción y del transporte marítimo del petróleo, así como de las maniobras en alta mar del lavado de buques-tanque que introducen hidrocarburos petrogénicos, ligeros, de mayor volatilidad y toxicidad para los organismos principalmente planctónicos, cuya frecuencia contribuye a que estos hidrocarburos alcancen los sedimentos costeros.

Para Tamaulipas se observó un patrón más coherente, ya que a pesar de no existir una buena definición de los grupos, los hidrocarburos pesados estuvieron relacionados entre ellos (4 y 5 anillos), separados de los aromáticos ligeros de 2 y 3 anillos. Esto es, también existen las dos vías de entrada de HAP mencionadas para el caso de Veracruz pero a diferencia de esta zona, en el Noroeste del Golfo de México no existió una mezcla de estas fuentes de aporte de hidrocarburos.

Es importante comentar que no se registraron correlaciones significativas entre los metales pesados y los HAP analizados en ninguna de las colectas realizadas, esto debe interpretarse cuidadosamente ya que los mecanismos de acumulación de estos compuestos y elementos, pueden diferir debido a condiciones ambientales particulares, así como a las características químicas propias de estas sustancias.

Para cualquier estudio relacionado con la evaluación de niveles de contaminantes, se recomienda realizar una comparación con otros sistemas costeros, tanto nacionales como de otras regiones del mundo donde existen actividades petroleras e industriales similares, así como con ambientes prístinos (sí existen), para estimar la existencia de un proceso de contaminación por un grupo determinado de sustancias y el riesgo ambiental que esto significaría.

En la Tabla 25, se puede observar que en relación con las 13 zonas mexicanas ahí mencionadas (incluyendo las de este estudio), los niveles de HAP totales más altos correspondieron a los sedimentos de la plataforma continental de Veracruz frente a las desembocaduras de los ríos Papaloapan y Jamapa, seguidos por el río Actopan (Vázquez *et al.*, 1991); la plataforma continental de Tamaulipas, que se ubica en el Noroeste del Golfo de México y constituye una de las áreas de estudio del presente trabajo, ocupó el tercer lugar ya que su concentración total máxima fue de 29.6 ppm (OGMEX 8, estación 18); en orden decreciente, siguieron los sistemas lagunares del centro-norte de Veracruz (Lagunas El Llano, La Mancha y Salada), aledaños a la planta nucleoelectrónica de Laguna Verde y relacionados con centros urbanos y vías de comunicación terrestres importantes de la región (Botello, 1994). Posteriormente, se encontró el nivel de HAP registrado en la plataforma continental del sur de Veracruz (OGMEX 4, estación 21) durante este estudio con un valor total máximo de 12.4 ppm, similar a los niveles detectados para las lagunas antes mencionadas. Cabe señalar que por la dinámica de los sistemas lagunares se esperaría que en ellos las concentraciones de compuestos orgánicos, como los HAP, superaran por mucho a lo que se encuentra en la plataforma continental adyacente.

De los niveles más pequeños de hidrocarburos aromáticos están los reportados para la plataforma continental de Tabasco y Campeche (González, 1990; Botello *et al.*, 1991), así como para las lagunas costeras Carmen-Machona y Mecoacán en Tabasco (Botello *et al.*, 1993) a pesar de que en esta región del Golfo de México se desarrolla una intensa actividad petrolera (Tabla 25).

Respecto a zonas costeras de otros países, en la Patagonia, Argentina se reportó un valor alto de HAP totales (125.7 ppm) (Moyano *et al.*, 1993), fue seguido por lo encontrado en la plataforma continental del norte del Golfo de México correspondiente a Estados Unidos con 36.7 ppm (Wade *et al.*, 1988). Otras áreas como son algunas zonas del Mar Mediterráneo, presentaron niveles entre 0.6-1.5

ppm para el Mar Adriático, y 3.4 ppm para el Báltico; similares a lo encontrado para la Sonda de Campeche en el Golfo de México (González, 1990; Botello *et al.*, 1991).

Es importante señalar que los niveles reportados por Pendoley (1992) para el Noroeste de Australia, corresponden a sedimentos no contaminados por HAP (0.002-0.005 ppm) y fueron rebasados en varios órdenes de magnitud por las diferentes zonas costeras del Golfo de México incluyendo las de esta investigación.

En los trabajos comparativos que se muestran en la Tabla 25, existe una concordancia entre el posible origen de los HAP presentes en los sedimentos analizados por los diversos autores en el Golfo de México. Se ha reportado que la constitución de los hidrocarburos aromáticos está dominada por aquéllos formados por 3 y 4 anillos bencénicos, en el caso de la plataforma continental de Tabasco y Campeche al igual que en las lagunas costeras de esta región del Golfo; este comportamiento general sugiere un origen pirolítico para la mayoría de los HAP que llegan a la zona costera de este litoral mexicano.

TABLA 25 NIVELES DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES EN SEDIMENTOS RECIENTES DE DIVERSAS ZONAS COSTERAS DE MÉXICO Y EL MUNDO. VALORES EN $\mu\text{g g}^{-1}$.

LOCALIDAD	CONCENTRACION	REFERENCIA
GOLFO DE MEXICO (PLAT. CONT. E.U.)	0.005 - 36.70	WADE et al. 1988
MAR Báltico	0.40 - 3.40	LAMPARCZYK et al. 1988
NW GOLFO ARÁBIGO	2E-4 - 0.08	AL - SAAD, 1987
MONTEVIDEO, URUGUAY	0.10 - 4.94	MOYANO et al. 1993
MAR ADRIÁTICO MEDIO	0.48 - 1.50	DUJMOV Y SUCEVIC, 1990
GOLFO DE MEXICO (PLAT. CONT. NORTE, E.U.)	0.18 - 6.80	WADE et al. 1989
NW DE AUSTRALIA	2E-3 - 5E-3	PENDOLEY, 1992
PATAGONIA, ARGENTINA	0.40 - 125.70	ESTEVEZ Y COMMENDATORE, 1993
MAR ADRIÁTICO NORTE	0.02 - 0.58	CARICCHIA et al. 1993
ISLAS ARRECIFALES, VER.	0.56 - 5.30	ECHANIZ, 1988
PLAT. CONT. VERACRUZ, (RÍO PAPALOAPAN)	142.00 - 233.00	VÁZQUEZ et al. 1991
PLAT. CONT. VERACRUZ, (RÍO JAMAPA)	142.00 - 233.00	VÁZQUEZ et al. 1991
PLAT. CONT. VERACRUZ, (RÍO ACTOPAN)	103.00 - 223.00	VÁZQUEZ et al. 1991
L. LA MANCHA, VER.	0.60 - 15.47	BOTELLO, 1994
L. EL LLANO, VER.	0.03 - 17.33	BOTELLO, 1994
L. SALADA, VER.	0.03 - 13.27	BOTELLO, 1994
L. CARMEN - MACHONA, TAB.	2.80	BOTELLO et al. 1993
L. MECOACÁN, TAB.	2.90	BOTELLO et al. 1993
PLAT. CONT. TABASCO	0.46 - 3.10	BOTELLO et al. 1991
PLAT. CONT. CAMPECHE	0.09 - 0.47	GONZÁLEZ, 1990
PLAT. CONT. VERACRUZ	0.09 - 12.40	ESTE ESTUDIO
PLAT. CONT. TAMAULIPAS	0.23 - 29.60	ESTE ESTUDIO

7 CONCLUSIONES

En relación a los objetivos planteados al inicio del presente trabajo y de acuerdo a los resultados obtenidos, se establecen las conclusiones siguientes:

1.- Los metales pesados en su concentración total (ppm) registraron el siguiente orden:

Zn > Cr > Ni > Cu > Co > Pb > Cd
(63.1) (51.4) (45.2) (16.7) (14.0) (8.6) (6.0)

Los niveles máximos de Ni, Zn y Cr se detectaron para los sedimentos de la plataforma continental de Tabasco, los de Cu, Co y Pb para el sur de Veracruz y el de Cd para Tamaulipas.

En su fracción biodisponible (ppm), los metales pesados tuvieron el comportamiento siguiente:

Pb > Zn > Ni > Co > Cr > Cu > Cd
(8.0) (6.3) (6.1) (4.4) (3.3) (2.4) (2.0)

En la plataforma continental de Tabasco se obtuvieron las concentraciones mayores de Co, Ni, Zn, Cr y Cd y en el sur de Veracruz para Cu y Pb.

2.- En los sedimentos del sur de Veracruz se registró la concentración total mayor de HAP con un valor de 92.99 ppm respecto al contenido de hidrocarburos aromáticos presente en Tamaulipas (75.54 ppm).

3.- Los HAP más abundantes en el sur de Veracruz fueron Criseno, Benzo(a)Antraceno, Benzo(k)Fluoranteno, Fluoranteno y Benzo(a)Pireno; en Tamaulipas se encontró una dominancia de Criseno, Benzo(a)Antraceno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(a)Pireno y Pireno.

Considerando la abundancia de los HAP, en la plataforma continental del Golfo de México fue registrado el patrón siguiente:

**Criseno > Benzo(a)Antraceno > Benzo(k)Fluoranteno >
Benzo(a)Pireno > Benzo(b)Fluoranteno > Pireno**

Aquellos compuestos aromáticos constituidos por 4 anillos bencénicos ocuparon los niveles máximos siguiendo el orden:

NÚMERO DE ANILLOS BENCÉNICOS

4 > 3 > 5 > 6 > 2

Este comportamiento de los HAP denota un origen pirolítico de la mayoría de los hidrocarburos detectados durante esta contribución, y en menor medida la existencia de aportes recientes de petróleo probablemente derivado de derrames en mar abierto así como por las actividades de extracción, transporte y lavado de embarcaciones.

4.- Los metales pesados en su concentración total, no mostraron alguna relación lineal estadística significativa ($r < 0.5$) con el contenido de materia orgánica en las diferentes zonas de la plataforma continental del Golfo de México, lo cual manifiesta que los mecanismos de adsorción y acumulación son independientes; los niveles de este material orgánico fueron mayores en Tamaulipas (1.15 %), seguidos por Tabasco (1.05 %) y Veracruz (0.54 %).

Del mismo modo, con los carbonatos no fue posible observar alguna asociación importante excepto para el Pb en el área de Tamaulipas, donde se puede considerar que existen mecanismos de acumulación sedimentaria inversos entre estos componentes.

Entre la fracción biodisponible de los metales pesados y el contenido de materia orgánica en los sedimentos, no fue posible obtener alguna relación considerable ($r < 0.5$). Con los carbonatos solamente se detectaron relaciones con el Cd para la plataforma continental de Tabasco y con el Cu, Co, Cr y Cd para Tamaulipas; esto puede significar la existencia de un mecanismo para favorecer la acumulación y residencia de estos elementos, ya que en esta región del Golfo de México el contenido de carbonatos fue el más alto de las áreas evaluadas con 10.74 %, seguido por Tabasco (8.82 %) y Veracruz (7.39 %).

De las relaciones estadísticas entre los metales pesados, se observó una asociación entre los metales potencialmente tóxicos como Pb y Cd con elementos considerados esenciales para los organismos como Co y Zn, así como aquellos que intervienen en actividades relacionadas con el petróleo como Ni y Cr.

Los HAP se asociaron de acuerdo a su constitución por anillos bencénicos y por su peso molecular, como ejemplos están las relaciones Benzo(ghi)Perileno-Indeno(1,2,3-cd)Pireno, Fluoreno-Acenafteno, Naftaleno-Fluoreno. También existió una buena relación estadística entre los hidrocarburos ligeros y los pesados: Benzo(ghi)Perileno-Acenaftileno e Indeno(1,2,3-cd)Pireno. Este comportamiento pone de manifiesto el origen pirolítico y los aportes recientes de petróleo como las fuentes principales de estos compuestos.

5.- Los metales potencialmente tóxicos como Cr, Pb, Cd y en menor grado Ni, registraron niveles altos para sedimentos de plataforma continental ya que se

pueden comparar a los reportados para ecosistemas fluvio-lagunares con cierto grado de alteración antropogénica como los ríos Coatzacoalcos, Tonalá, Papaloapan y la región de la Sonda de Campeche. Puede decirse que los metales detectados en esta contribución son generados por las diversas actividades industriales desarrolladas en el Golfo de México, principalmente aquellas relacionadas con la petroquímica, la fabricación del cemento, el área textil, la elaboración de papel y productos metálicos.

Los HAP registrados en este estudio se generan principalmente de procesos pirolíticos realizados en continente, y en menor grado en las plataformas de extracción petrolera de alta mar; alcanzan la zona costera a través del transporte atmosférico y las descargas fluvio-lagunares abundantes en el Golfo de México. Estos compuestos al igual que los metales, son distribuidos por las corrientes costeras derivadas de la Corriente de Lazo, circulación principal del Golfo.

Los HAP más abundantes en este trabajo, poseen, en su mayoría, características cancerígenas y genotóxicas de alto riesgo para la biota y la salud humana, al igual que los niveles elevados de Cd reflejando un impacto sobre los ecosistemas y sus recursos en el Golfo de México.

Finalmente, se deriva que las tres regiones de la plataforma continental del Golfo de México, evaluadas durante esta investigación, presentan niveles tanto de metales pesados como de HAP, los cuales manifiestan un proceso de contaminación provocado por los diversos complejos industriales y núcleos urbanos que existen en este litoral mexicano; y que representan un peligro para los ecosistemas y la salud humana.

8 LITERATURA CITADA

ABU-HILAL, A. 1993. Observations on heavy metal geochemical association in marine sediments of the Jordan Gulf of Aqaba. *Mar. Poll. Bull.*, 26(2): 85-90.

AL-SAAD, H.T. 1987. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in surficial sediments from Shatt Al-Arab River and the North-west region of the Arabian Gulf. *Mar. Poll. Bull.*, 18(5): 248-251.

ALVAREZ, R.U. 1983. Distribución de metales pesados en sedimentos del Río Blanco, Veracruz. Tesis de Maestría. UACPyP-CCH. Maestría en Ciencias del Mar. UNAM. México. 68p.

ANDERLINI, V.C., MUHAMMAD, O.S., ZARBA, M.A., FOWLER, S.W., y P. MIRAMAND. 1982. Trace metals in marine sediments of Kuwait. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 28: 75-80.

ANTOINE, J. 1972. Structure of the Gulf of Mexico. In: *Contribution on the Geological and Geophysical Oceanography of the Gulf of Mexico*. Rezak & Henry (Eds.). Houston, Texas. 3: 1- 34.

BADILLO, G.E.J. 1986. Evaluación preliminar de la contaminación por metales pesados en el río Blanco, Veracruz. Tesis Profesional. ENEP-Iztacala, UNAM. México. 64p.

BAKER, K.L., y P.T. HARRIS. 1991. Copper, lead, and zinc distribution in the sediments of the Fly River Delta and Torres Strait. *Mar. Poll. Bull.*, 22(12): 614-618.

BESSONOV, N., GONZALEZ, O., y A. ELIZAROV. 1971. Resultados de las investigaciones cubano-soviéticas en el Banco de Campeche. Departamento de Hidroquímica de C.I.P., Cuba. 317-323.

BOEHM, P.D., y J.W. FARRINGTON. 1984. *Environ. Sci. Technol.*, 18: 840-845.

BORNEFF, J., y H. KUNTE. 1967. Carcinogenic substances in water and soil. Part XIX: The effect of sewage purification on polycyclic aromatic hydrocarbons. *Arch. Hyg. (Berlin)* 151: 202-210.

BOTELLO, A.V. 1983. Variación estacional de compuestos organoclorados, desechos industriales y coliformes en los sistemas lagunares del estado de Tabasco. Informe Técnico. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

BOTELLO, A.V., y S.F. VILLANUEVA. 1988. La contaminación y procesos geoquímicos en la Laguna de Términos, Campeche, México. *En: Ecología y Conservación del Delta de los ríos Usumacinta y Grijalva.* (Memorias). INIREB. Div. Reg. Tabasco. 720p.

BOTELLO, A.V., GONZALEZ, C., y G. DIAZ. 1991. Pollution by petroleum hydrocarbons in sediments from continental shelf of Tabasco state, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 47: 565-571.

BOTELLO, A.V., PONCE-VELEZ, G., TOLEDO, A., DIAZ-GONZALEZ, G., y S. VILLANUEVA. 1992. Ecología, recursos costeros y contaminación en el Golfo de México. *Ciencia y Desarrollo, XVII(102)*: 28-48.

BOTELLO, A.V., DIAZ, G.G., VILLANUEVA, F.S., y S.L. SALAZAR. 1993. Presence PAH's in coastal environments of the south-east Gulf of Mexico, Mexico. Supplement to vol. 3 of The J. Polycyclic Aromatic Compounds. pp. 397-404. *In: Polycyclic*

Aromatic Compounds, Synthesis, Properties, Analytical Measurements, Occurrence and Biological Effects. Proceedings of the 13th International Symposium on Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. Garrigues, P. y M. Lamote (Eds.). Gordon & Breach Sciences Publishers. Bordeaux, France. 1264p.

BOTELLO, A.V. 1994. Estudio geoquímico y diagnóstico ambiental de las lagunas de los alrededores de la central nucleoelectrica Laguna Verde, Veracruz. Convenio ICMYL-CFE, México. Informe Técnico Final.

BOUMA, H.A. 1972. Distribution of sediments and sedimentary structures in the Gulf of Mexico. *In: Contribution on the Geological and Geophysical Oceanography of the Gulf of Mexico.* Rezak & Henry (Eds.). Houston, Texas. 3: 35-65.

BOWER, P.M., SIMPSON, H.J., WILLIAMS, S.C., y Y.H. LI. 1978. Heavy metals in the sediments of Foundry Cove, Cold Spring, New York. *Environ. Sci. Technol.*, 12: 683-687.

BROOKS, J.M., KENNICUTT, M.C., WADE, T.L., HART, A.D., DENOUX, G.J., y T.J. McDONALD. 1990. Hydrocarbon distribution around a shallow water multiwell platform. *Environ. Sci. Technol.*, 24(7): 1079-1085.

BRUNNEMANN, K.D., y D. HOFFMANN. 1976. Analysis of polynuclear aromatic hydrocarbons in the respiratory environment. pp. 283- 296. *In: Carcinogenesis A comprehensive survey. Vol. 1. Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. Chemistry, Metabolism, and Carcinogenesis.* R. Freudenthal y P.W. Jones (eds.). New York. Raven Press.

BUSCAIL, R., y F. GADEL, 1991. Transfer and biogeochemistry of organic matter at sediment-water interface on the northwestern mediterranean margin. *In: Diversity of*

Environmental Biogeochemistry. Developments in Geochemistry 6. Berthelin, J. (Ed.). Elsevier. Amsterdam, Holland.

CAMPOS, C.J. 1981. Contribución a la sedimentología y morfología de la plataforma continental frente a las costas de Campeche, México. Primera parte. Dirección General de Oceanografía. Secretaría de Marina. *Inv. Ocean. G-81-01 y 02*: 11-41.

CAMPOS, C.J. 1986. Características sedimentológicas y microfaunísticas de la Plataforma y Talud Continental entre Veracruz, Ver. y Frontera, Tab. *Invest. Ocean. Dir. Gral. Ocean. Naval, III(2)*: 63-114.

CARICCHIA, M.A., CHIAVARINI, S., CREMISINI, C., MARTINI, F., y R. MORABITO. 1993. PAHs, PCBs, and DDE in the Northern Adriatic Sea. *Mar. Poll. Bull.*, 26(10): 581-583.

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

CARRANZA-EDWARDS, A., GUTIERREZ, E.M., y T.R. RODRIGUEZ. 1975. Unidades morfotectónicas continentales de las costas mexicanas. *An. Cent. Cienc. del Mar y Limnol., UNAM*, 2(1): 81-88.

CARRANZA-EDWARDS, A., y J.E. AGUAYO-CAMARGO. 1992. Sedimentología Marina. *Carta de Geología Marina (esc. 1:12,000,000) del Atlas Nacional del Instituto de Geografía, Vol. II, Naturaleza*.

CARRANZA-EDWARDS, A., ROSALES-HOZ, L., y A. MONREAL-GOMEZ. 1993. Suspended sediments in the southeastern Gulf of Mexico. *Mar. Geol.*, 112: 257-269.

CAVALIERI, E.L., ROGAN, E.G., MURRAY, W.J., y N.V.S. RAMAKRISHNA. 1993. Mechanistic aspects of Benzo(a)pyrene metabolism. Supplement to vol. 3 of The J. Polycyclic Aromatic Compounds. pp. 397-404. In: *Polycyclic Aromatic Compounds, Synthesis, Properties, Analytical Measurements, Occurrence and Biological Effects*. Proceedings of the 13th International Symposium on Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. Garrigues, P. y M. Lamote (Eds.). Gordon & Breach Sciences Publishers. Bordeaux, France. 1264p.

CELIS, L., BOTELLO, A.V., MENDELEWICZ, M., y G. DIAZ. 1987. Actividades del proyecto CARIPOL en las zonas costeras de México: I. Hidrocarburos disueltos. *Carib. J. Sci.*, 23(1): 11- 18.

CHESTER, R. 1990. *Marine Geochemistry*. Unwyn Hyman, London. 735p.

COMMINS, B.T. 1969. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons during pyrolysis and combustion of hydrocarbons. *Atmos. Environ.*, 3: 565-572.

CONTRERAS, F. 1988. *Las Lagunas Costeras Mexicanas*. Centro de Ecodesarrollo, Secretaría de Pesca. México. 263p.

CORTES-VAZQUEZ, J.M., BOTELLO, A.V., y S. VILLANUEVA. 1987. Actividades del proyecto CARIPOL en las zonas costeras de México: II. Breas y Alquitrans en Playa. *Carib. J. Sci.*, 23(1): 19-28.

CRUZ-ABREGO, F.M., FLORES-ANDOLAIS, F., y V. SOLIS-WEISS. 1991. Distribución de moluscos y caracterización ambiental en zonas de descarga de aguas continentales del Golfo de México. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México*, 18(2): 247-259.

CURTIS, C.D. 1966. The incorporation of soluble organic matter into sediments and its effect on trace element assemblages. *In: Advances in Organic Geochemistry*. Hobson, G.D., y M.C. Louis (Eds.). Pergamon, Press. Oxford. 1-13.

DE LEON Y PEÑA, N.O. 1987. Evaluación de metales pesados en sedimentos recientes de dos sistemas costeros del Caribe Mexicano. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 68p.

DENANT, V., y A. SALIOT. 1991. Biogeochemistry of organic matter at the freshwater/seawater interface in the Rhone delta, Mediterranean Sea, France. *In: Diversity of Environmental Biogeochemistry. Developments in Geochemistry 6*. Berthelin, J. (Ed.). Elsevier. Amsterdam, Holland.

DEURER, R., FÖRSTNER, U., y G. SCHMOLL. 1978. Selective chemical extraction of carbonate-associated trace metals in recent lacustrine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42: 425-427.

DUJMOV, J., y P. SUCEVIC. 1990. Application of synchronous fluorescence spectroscopy for characterization of the aromatic hydrocarbons in sediments of the middle Adriatic. *Chem. Ecol.*, 4(4): 189-195.

DUNN, B.P., y H.F. STICH. 1976. Monitoring procedures for chemical carcinogens in coastal waters. *J. Fish. Res. Bd. Canada* 33: 2040-2046.

ECHANIZ, H.V. 1988. Determinación de los niveles de hidrocarburos en agua, sedimentos recientes y hojas de pasto marino *Thalassia testudinum* (Konong, 1805) en tres islas arrecifales del puerto de Veracruz, Ver. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 81p.

ELDER, J.F., y P.V. DRESLER. 1988. *Environ. Pollution*, 49: 117- 132.

ESTEVEZ, J.L., y M.G. COMMENDATORE. 1993. Total aromatic hydrocarbons in water and sediment in a coastal zone of Patagonia, Argentina. *Mar. Poll. Bull.*, 26(6): 341-342.

EVANS, K.M., GILL, P.A., y P.W.J. ROBOTHAM. 1990. The source, composition and flux of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the River Derwent, Derbyshire, U.K. *Water Air Soil Poll.*, 51(1-2): 1-12.

FERGUSON, E.J. 1990. *The heavy elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects*. Pergamon Press, U.K. 614p.

FÖRSTNER, U., y G.T.W. WITTMAN. 1981. *Metal pollution in the aquatic environment*. 2a. Ed. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 486 p.

GAUDETTE, H.E., FLIGHT, W.R., TONER, L., y FOLGER. 1974. An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *J. Sediment. Petrol.*, 44(1): 249- 253.

GEYER, A.R., y Ch. P. GIAMMONA. 1980. Naturally occurring hydrocarbons in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. In: *Marine Environmental Pollution, 1. Hydrocarbons*. Geyer, A.R. (Ed.). Elsevier Scientific Publishing Company. New York.

GOLDBERG, E.D. 1976. *The Health of the Oceans*. Paris: UNESCO, Press.

GOMEZ-BELINCHON, J.I., LLOP, R., GRIMALT, J.O., y J. ALBAIGES. 1988. The decoupling of hydrocarbons and fatty acids in the dissolved and particulate water phases of a deltaic environment. *Mar. Chem.*, 25: 325-348.

GONZALEZ, E.C. 1990. Determinación de los niveles de hidrocarburos alifáticos y aromáticos en sedimentos recientes de la plataforma continental de los estados de Tabasco y Campeche, México. Tesis Profesional. ENEP-Zaragoza, UNAM. 108p.

GONZALEZ, C., BOTELLO, A.V., y G. DIAZ. 1992. Presence of aliphatic hydrocarbons in sediments and organisms from Campeche Bank, Mexico. *Mar. Poll. Bull.*, 24(5): 267-270.

GRIMMER, G., HEINRICH, U., JACOB, J., DETTBARN, G., y K.W. NAUJACK. 1993. Differences in the phenanthrene metabolism of tumor-free and tumor-bearing rats. Supplement to vol. 3 of The J. Polycyclic Aromatic Compounds. pp. 397-404. In: *Polycyclic Aromatic Compounds, Synthesis, Properties, Analytical Measurements, Occurrence and Biological Effects*. Proceedings of the 13th International Symposium on Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. Garrigues, P. y M. Lamote (Eds.). Gordon & Breach Sciences Publishers. Bordeaux, France. 1264p.

GROTH, P. 1971. Untersuchungen über einige Spurenelemente in Seen. *Arch. Hydrobiol.*, 68: 305-375.

HANGEBRAUCK, R.P., VONLEHMEN, D.J., y J.E. MECKER. 1964. Emissions of polynuclear hydrocarbons and other pollutants from heat generation and incineration processes. *J. Air Pollut. Contr. Assn.*, 14: 267-278.

HARRISON, R.M., PERRY, R., y R.A. WELLING. 1975. Polynuclear aromatic hydrocarbons in raw, potable and waste waters. *Water Res.*, 9: 331-346.

HASE, A., y R.A. HITES. 1977. On the origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments: biosynthesis by anaerobic bacteria. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40: 1141-1143.

HEIT, M. 1985. The relationship of a coal-fired power plant to the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the sediment of Cayuga Lake. *Energy Rev.*, 12(3): 69.

HERMANN, R., y W. THOMAS. 1984. *Fresenius Z. Anal. Chem.*, 319: 152-159.

HERMIN, M.N., y S. CASTANIER. 1991. Evolution of organic matter diagenesis at water-sediment interface off-shore from the Mahakam delta, Indonesia. In: *Diversity of Environmental Biogeochemistry. Developments in Geochemistry 6*. Berthelin, J. (Ed.). Elsevier. Amsterdam, Holland.

HINGA, K.R., PILSON, M.E.Q., y G. ALMQUIST. 1986. The degradation of 7,12-dimethylbenz(a)anthracene in an enclosed marine ecosystem. *Mar. Environ. Res.*, 18: 79.

HITES, R.A., LAFLAMME, R.E., y J.G. WINDSOR, Jr. 1980. Polycyclic aromatic hydrocarbons in marine/aquatic sediments. In: *Petroleum in Marine Environment. Advances in Chemistry. Series No. 185*. Petrakis, L., y F.T., Wiess (Eds.). American Chemical Society, Washington, D.C., U.S.A.

IARC. 1983. *IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. Vol. 32: Polynuclear aromatic compounds: Part 1. Chemical, environmental and experimental data*. Lyons, France: World Health Organization, International Agency for Research on Cancer, 155-161, 225-237.

INEGI. 1992. *XIII Censo Industrial. Resultados definitivos, Censos Económicos 1989*. Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Campeche. Secretaría de Programación y Presupuesto. México.

JAFFE, R. 1991. Fate of hydrophobic organic pollutants in the aquatic environment: A review. *Environ. Poll.*, 69: 237-257.

JENNE, E.A. 1976. Trace element sorption by sediments and soils - sites and processes. In: *Symposium on Molybdenum*. Chappell, W., y K. Petersen (Eds.), Vol. 2. New York: Marcel Dekker. 425-553.

JOHNSON, A.C., LARSEN, P.F., GADBOIS, D.F., y A.W. HUMASON. 1985. The distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surficial sediments of Penobscot Bay (Maine, USA) in relation to possible sources and to other sites worldwide. *Mar. Environ. Res.*, 15(1): 1-16.

JONASSON, I.R. 1977. Geochemistry of sediment/water interactions of metals, including observations on availability. In: *The Fluvial Transport of Sediment-Associated Nutrients and Contaminants*. DC/PLUARG. Shear, H., y A.E.P. Watson (Eds.). Windsor/Ont. 255-271.

KABATA-PENDIAS, A., y H. PENDIAS. 1992. *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, Boca Raton, Fl. 3-288.

KARICKHOFF, S.W., BROWN, D.S., y T.A. SCOTT, 1979. Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments. *Water Res.*, 13: 241-248.

KENNISH, J.M. 1992. *Ecology of Estuaries: Anthropogenic Effects*. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida. 133-181.

KLEIN, L.A., LANG, M., NASH, N., y S.L. KIRSCHNER. 1974. Sources of metals in New York City waste-water. *J.W.P.C.F.*, 46: 2653- 2662.

KRAUSKOPF, K.B. 1956. Factors controlling the concentration of thirteen rare metals in sea-water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 9: 1-32.

KRISHNAJA, P.A., REGE, M.S., y A.G. JOSHI. 1987. Toxic effects of certain heavy metals (Hg, Cd, Pb, As and Se) on the intertidal Crab *Scylla serrata*. *Mar. Environ. Res.*, 21: 109-119.

KOONS, C.B., y P.H. MONAGHAN. 1976. Input of hydrocarbons from seeps and recent biogenic sources. pp. 84-107. In: *Sources, Effects and Sinks of Hydrocarbons in the Aquatic Environment*. Washington, D.C.: American Institute of Biological Science.

LAFLAMME, R.E., y R.A. HITES. 1978. The global distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42: 289.

LAMPARCZYK, H., OCHOCKA, R.J., GRYZBOWSKI, J., HALKIEWICZ, J., y A. RADECKI. 1988. Parameters related to pollution by n-Alkanes and PAH in Baltic Water and Sediments. *Mar. Poll. Bull.*, 19(5): 222-226.

LANDRUM, F.P., y J.A. ROBBINS. 1990. Bioavailability of sediment - associated contaminants to benthic invertebrates. In: *Sediments: Chemistry and Toxicity of In-Place Pollutants*. Baudo, R., Giesy, J., y H. Muntau (Eds.). Lewis Publishers, Inc. Boston, U.S.A. 405p.

LAWS, A.E. 1993. *Aquatic Pollution: An Introductory Text*. 2nd. ed. Wiley & Sons, Inc. U.S.A. 611p.

LECUANDA, R., y F. RAMOS. 1985. Distribución de sedimentos en la parte sur del Golfo de México. Informe Técnico No. 2. Lab. de Sedimentología. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM. 1-23.

LORING, D.H., y R.T. RANTALA. 1977. Geochemical analysis of marine sediments and suspended particulate matter. Fisheries and Marine Service. Technical Report No. 700. Canada. 58p.

MACKAY, D., YING, S.W., y K.CH. MA. 1992. *Illustrated handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals*. Vol. II. Lewis Publishers. Michigan, U.S.A. 1-233.

MALLET, L., HEROS, M., y J. BRISOU. 1972. Biosynthesis and bioregression of carcinogenic polybenzene hydrocarbons of the benzo-3,4-pyrene type, taken as controls at the expense of lipids. pp. 177-180. *In: Pollution des Mieux vitaux par les Hydrocarbures Polybenzeniques du Type Benzo- 3,4-pyrene*. L. Mallet (ed.) Paris: Libraire Maloine.

MONREAL, G.M.A. 1984. Modelisation du mode barotrope du premier mode barocline dans le Golfe du Mexique. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Université de Liege.

MOYANO, M., MORESCO, H., BLANCO, J., ROSADILLA, M., y A. CABALLERO. 1993. Baseline studies of coastal pollution by heavy metals, oil and PAH's in Montevideo. *Mar. Poll. Bull.*, 26(8): 461-464.

NEFF, M.J. 1979. *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Aquatic Environment. Sources, Fates and Biological Effects*. Applied Science Publishers LTD. London. 262p.

NRC. 1985. *Oil in the Sea. Inputs, Fates, and Effects*. National Academy Press. Washington, D.C., U.S.A. 601p.

OECD. 1975. *Cadmium and the Environment: Toxicity, Economy, Control*. Organization for Economic Co-operation and Development. Paris. 88p.

PADILLA, A.R., ALATORRE, M.A., RUIZ, F., y S.P.R. CZITROM. 1986. Observaciones recientes de la estructura termohalina en el sur del Golfo de México. Memoria de la Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, A.C. Morelia, Michoacán. 434-440.

PAEZ-OSUNA, F., VALDEZ-LOZANO, D., ALEXANDER, M.H., y H. FERNANDEZ-PEREZ. 1987. Trace metals in the fluvial system of Términos Lagoon, México. *Mar. Poll. Bull.*, 18(6): 294-297.

PAEZ-OSUNA, F., y J.I. OSUNA-LOPEZ. 1990. Heavy metals distribution in the geochemical fractions of surface sediments from lower Gulf of California. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol., Univ. Nal. Auton. México*. 17(2): 287-298.

PENDOLEY, K. 1992. Hydrocarbons in Rowley Shelf (Western Australia) oysters and sediments. *Mar. Poll. Bull.*, 24(4): 210-215.

PEREZ-HERNANDEZ, M.A. 1994. Ictiofauna, hidrología, productividad y algunos parámetros de la contaminación en la Laguna de Tampamachoco, Veracruz. Informe final de Proyecto de Investigación Interdepartamental. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. México.

PEREZ-RAMOS, S.G. 1988. Estudio de sedimentos de la plataforma continental del Golfo de México desde Tuxpan, Veracruz hasta Ciudad del Carmen, Campeche. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería, UNAM. México. 49p.

PHILLIPS, R.CH., PAYNE, R.J., LAMBACH, L.J., FARMER, H.G., y R.R. SIMS, Jr. 1987. Georges Bank monitoring program: Hydrocarbons in bottom sediments and hydrocarbons and trace metals in tissues. *Mar. Environ. Res.*, 22: 33-74.

PHILLIPS, D.H., CARMICHAEL, P.L., PFAU, W., HUGHES, N.C., NI SHE, M., GRIMMER, G., y J. JACOB. 1993. DNA binding characteristics of complex mixtures of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Supplement to vol. 3 of The J. Polycyclic Aromatic Compounds. pp. 397-404. In: *Polycyclic Aromatic Compounds, Synthesis, Properties, Analytical Measurements, Occurrence and Biological Effects*. Proceedings of the 13th International Symposium on Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. Garrigues, P. y M. Lamote (Eds.). Gordon & Breach Sciences Publishers. Bordeaux, France. 1264p.

PICA-GRANADOS, Y., PONCE-VELEZ, G., y M.E. BARRON-ECHAURY. 1991. Golfo de México y Mar Caribe Mexicano. Oceanografía Geológica. En: *Oceanografía de Mares Mexicanos*. De La Lanza, E.G. (comp.). AGT. Editores. México. 3-29.

PICA-GRANADOS, Y., y PINEDA-LOPEZ, R. 1991. Golfo de México y Mar Caribe Mexicano. Oceanografía Física. En: *Oceanografía de Mares Mexicanos*. De La Lanza, E.G. (comp.). AGT. Editores. México. 31-74.

PONCE, V.G. 1988. Evaluación de metales pesados en sedimentos recientes y tejidos del ostión *Crassostrea virginica* (Gmelin, 1791) de la Laguna de Términos, Campeche, México. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 70p.

PONCE-VELEZ, G., y BOTELLO, A.V. 1991. Aspectos geoquímicos y de contaminación por metales pesados en la Laguna de Términos, Campeche. *Hidrobiológica*, 1(2): 1-10.

PRAHL, F.G., y R. CARPENTER. 1983. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)-phase associations in Washington coastal sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: 1013-1023.

PRAHL, F.G., CRECELIUS, E., y R. CARPENTER. 1984. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Washington coastal sediments: an evaluation of atmospheric and riverine routes of introduction. *Environ. Sci. Technol.*, 18: 687.

PULICH, M.W. 1980. Heavy metals accumulation by selected *Halodule wrightii* ASH populations in the Corpus Christi Bay Areas. *Mar. Sci.*, 23: 89-100.

RADDING, S.B., MILL, T., GOULD, C.W., LIU, D.H., JOHNSON, H.L., BOMBERGER, D.C., y C.V. FOJO. 1976. The environmental fate of selected polynuclear aromatic hydrocarbons. EPA560/5-75-009. US Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 122pp.

RAO, P.S.C., LEE, L.S., y R. PINAL. 1990. *Environ. Sci. Technol.*, 24: 647-654.

RAOUX, C.Y. 1991. Modélisation du mécanisme de contamination par les HAP des sédiments marins cotiers de Méditerranée: conséquences sur la biodisponibilité des HAP dans le milieu marin. Ph.D. dissertation. Université Bordeaux I, no. 565. 1- 136.

RAOUX, C.Y., y P. GARRIGUES. 1991. Mechanism model of polycyclic aromatic hydrocarbons contamination of marine coastal sediments from the Mediterranean Sea. Supplement to vol. 3 of The J. Polycyclic Aromatic Compounds. pp. 443-450. *In: Polycyclic Aromatic Compounds, Synthesis, Properties, Analytical Measurements, Occurrence and Biological Effects*. Proceedings of the 13th International Symposium on Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. Garrigues, P. y M. Lamote (Eds.). Gordon & Breach Sciences Publishers. Bordeaux, France. 1264p.

READMAN, J.W., MANTOURA, R.F.C., LLEWELLYN, C.A., PRESTON, M.R., y A.D. REEVES. 1986. *J. Environ. Anal. Chem.*, 27: 29-54.

READMAN, J.W., MANTOURA, R.F.C., y M.M. RHEAD. 1987. A record of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) pollution obtained from accreting sediments of the Tamar Estuary, U.K.: Evidence for non-equilibrium behaviour of PAH. *Sci. Total Environ.*, 66: 73-94.

RIOS-QUIROZ, L. 1993. Evaluación de las concentraciones de metales pesados en sedimentos de la plataforma continental de los estados de Veracruz y Tabasco, México. Tesis Profesional. FES-Zaragoza, UNAM. México. 93p.

ROSALES, H.L., CARRANZA, E.A., y U.R. ALVAREZ. 1986a. Sedimentological and chemical studies in sediments from Alvarado lagoon system, Veracruz, México. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nat. Autón. México*, 13: 19-28.

ROSALES, H.L., CARRANZA, E.A., y U.R. ALVAREZ. 1986b. Sedimentological and chemical studies in sediments from Papaloapan River, México. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nat. Autón. México*, 13: 263-272.

ROSALES-HOZ, L., CARRANZA-EDWARDS, A., ARIAS-REYNADA, S., y S. SANTIAGO-PEREZ. 1992. Distribución de metales en sedimentos recientes del sureste del Golfo de México. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nat. Autón. México*, 19(2): 123-130.

ROSALES-HOZ, L., CARRANZA-EDWARDS, A., SANTIAGO-PEREZ, S., MENDEZ-JAIME, C., y R. DOGER-BADILLO. 1994. Study of anthropogenically induced trace metals on the continental shelf in the southeastern part of the Gulf of Mexico. *Rev. Int. Contam. Ambien.*, 10(1): 9-13.

ROSAS, I., BAEZ, A., y R. BELMONT. 1983. Oyster (*Crassostrea virginica*) as indicator of heavy metal pollution in some lagoons of the Gulf of Mexico. *Water Air and Soil Poll.*, 20: 127-135.

SADIQ, M., y T.H. ZAIDI. 1985. Metal concentrations in the sediments from the Arabian Gulf of Saudi Arabia. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 34: 565-571.

SALOMONS, W., y U. FÖRSTNER. 1984. *Metals in Hydrocycle*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 349p.

SANTIAGO, P.S. 1989. Estudio químico de sedimentos de una porción de la plataforma continental de Baja California Norte, México. Tesis Profesional. Facultad de Química, UNAM. México.

SCAFE, D.W., y G.W. KUNZE. 1971. A clay mineral investigation of six cores from the Gulf of Mexico. *Mar. Geol.*, 10: 69-85.

SCHMELTZ, I., y D. HOFFMANN. 1976. Formation of polynuclear aromatic hydrocarbons from combustion of organic matter. pp. 225-240. In: *Carcinogenesis A comprehensive survey. Vol. 1. Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. Chemistry, Metabolism, and Carcinogenesis*. R. Freudenthal y P.W. Jones (eds.), New York: Raven Press.

SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS (S.R.H.). 1976. *Atlas del Agua de la República Mexicana*.

SHIRASAGO-GERMAN, B. 1991. Hidrografía y análisis frontogenético en el sur de la Bahía de Campeche. Tesis de Maestría en Ciencias del Mar, Oceanografía Física. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. México. 141p.

SICRE, M.A., MARTY, J.C., SALIOT, A., APARICIO, X., GRIMALT, J., y J. ALBAIGES. 1987. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in the Mediterranean aerosols. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, 29: 73-94.

SIMPSON, J.H., y I.D., JAMES. 1986. Coastal and estuarine fronts. *In: Baroclinic processes on continental shelves*. Coastal and Estuarine Sciences 3. American Geophysical Union. 63-93.

SOTO, L., GRACIA, A., y A.V. BOTELLO. 1980. Study of the Penaeid shrimp population in relation to petroleum hydrocarbons in Campeche Bank. Proceedings of the 33th anual Gulf and Caribbean Fisheries Institute, Sn. Jose, Costa Rica. 81-100.

SPEERS, G.C., y E.V. WHITEHEAD. 1969. Crude Petroleum. pp. 638- 675. *In: Organic Geochemistry: Methods and Results*. G. Eglinton y M.R.J. Murphy (eds.), Springer-Verlag, Berlin.

STAUFFER, T.B., MACINTYRE, W.G., y D.C. WICKMAN. 1989. *Environ. Toxicol. Chem.*, 8: 845-852.

SUESS, E. 1973. Interaction of organic compounds with calcium carbonate - II. Organo-carbonate association in recent sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37: 2435-2447.

SUESS, M.J. 1976. The environmental load and cycle of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Sci. Total Environ.*, 6: 239-250.

SWANSON, V.E., FRIST, L., RADER, R.F.Jr., y C.Jr., HUFFMAN. 1966. Metal sorption by northwest Florida humate. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 550-C: 174-177.

TARIQ, J., JAFFAR, M., ASHRAF, M., y M. MOAZZAM. 1993. Heavy metal concentrations in fish, shrimp, seaweed, sediment, and water from the Arabian Sea, Pakistan. *Mar. Poll. Bull.*, 26(1): 644-647.

THAYLER, G.W., y USTACH. 1980. *Gulf of Mexico Wetlands: Values, state of knowledge and research needs*. National Marine Fisheries Service, Southeast Fisheries Center, Beaufort Laboratory, Beaufort, North Carolina. 25p.

VALENCIA, J.J.L. 1989. Registro sedimentario de metales pesados en la Laguna de las Ilusiones, Villahermosa, Tabasco. Tesis Profesional. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ciencias Básicas-Biología. Unidad Sierra. 100p.

VAZQUEZ DE LA CERDA, A.M. 1987. Estudio de las corrientes y masas de agua en el Golfo de México en los últimos 50 años. Mem. Simp. Ocean. Sría. de Marina. Dirección General de Oceanografía. México. 22p.

VAZQUEZ, F., SANCHEZ, M., ALEXANDER, H., y D. DELGADO. 1991. Distribution of Ni, V, and petroleum hydrocarbons in recent sediments from the Veracruz coast, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 46: 774-781.

VILLANUEVA, F.S. 1987. Evaluación de metales pesados en los sedimentos y organismos del río Coatzacoalcos y áreas adyacentes, Ver., México. Tesis Profesional. ENEP-Zaragoza, UNAM. México. 82p.

VILLANUEVA, F.S., y A.V. BOTELLO. 1992. Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano: Una revisión. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 8(1): 47-61.

WADE, T.L., ATLAS, E.L., BROOKS, J.M., KENNICUTT, M.C.III, FOX, R.G., SERICANO, J., GARCIA-ROMERO, B., y D. DEFREITAS. 1988. NOAA Gulf of Mexico Status and Trends Program: Trace organic contaminant distribution in sediments and oyster. *Estuaries*, 11(3): 171-179.

WADE, T.L., KENNICUTT, M.C., y J.M. BROOKS. 1989. Gulf of Mexico hydrocarbon seep communities: Part 3. Aromatic hydrocarbon concentrations in organisms, sediments and water. *Mar. Environ. Res.*, 27(1): 19-30.

WILD, S.R., BERROW, M.L., y K.C. JONES. 1991. The persistence of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH's) in sewage sludge amended agricultural soils. *Environ. Poll.*, 72: 141-157.

WISE, S.A., CHESLER, S.N., HILPERT, L.R., MAY, W.E., REBBERT, R.E., VOGT, C.R., NISHIOKA, M.G., AUSTIN, A., y L. LEWTAS. 1985. *Environ. International*, 11: 147-160.

WOO, C.S., DSILVA, A.P., FASSEL, V.A., y G.J. OESTREICH. 1978. Polynuclear aromatic hydrocarbons in coal-identification by their X-ray excited optical luminescence. *Environ. Sci. Technol.*, 12(2): 173-174.

WOOD, J.M. 1974. Biological cycles for toxic elements in the environment. *Science*, 183: 1049-1052.

YOUNGBLOOD, W.W., y M. BLUMER. 1975. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the environmental: Homologous series in soils and recent marine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39: 1303-1314.