

Composición de hidrocarburos alifáticos en sedimentos de la laguna Sontecomapan, Ver., México

Composition of aliphatic hydrocarbons in sediments from Sontecomapan lagoon, Ver., Mexico

Laura Georgina Calva B.¹

Alfonso V. Botello²

Guadalupe Ponce Vélez²

¹ Laboratorio de Ecosistemas Costeros. Depto. Hidrobiología. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. México D.F. c.p. 09340. e-mail: cblg@xanum.uam.mx

² Laboratorio de Contaminación Marina. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México. D.F. c.p. 04510. e-mail: alfonsov@mar.icmyl.unam.mx; ponce@icmyl.unam.mx

Calva B. L. G., A. V. Botello y G. Ponce Vélez. 2005. Composición de hidrocarburos alifáticos en sedimentos de la laguna Sontecomapan, Ver., México. *Hidrobiológica* 15 (1): 97-108.

RESUMEN

En este estudio se determinaron las concentraciones de 15 hidrocarburos saturados (HS), tanto en sedimentos superficiales como en núcleos sedimentarios en la Laguna Sontecomapan, Veracruz, los cuales fueron analizados por cromatografía de gases de alta resolución con detector de ionización de flama (CG-DIF). Las concentraciones de HS totales en sedimentos superficiales estuvieron en un intervalo de 0.21 a 12.75 $\mu\text{g g}^{-1}$ y en los núcleos fue de 1.33 hasta 32.01 $\mu\text{g g}^{-1}$; en casi todas las muestras predominaron las cadenas de carbonos pares. En los sedimentos superficiales destacaron los n-alcenos C_{20} , C_{23} , C_{22} , C_{18} y C_{21} , mientras que en los núcleos las mayores concentraciones fueron de C_{30} , C_{32} , C_{21} , C_{28} , C_{20} , C_{25} , C_{23} ; básicamente con una preponderancia de cadenas de carbonos pares, lo que demuestra un origen de los hidrocarburos saturados tanto biológico como antropogénico, lo cual difiere con otros estudios llevados a cabo en lagunas del Golfo de México, en las que exclusivamente se reporta la presencia de hidrocarburos biogénicos.

Palabras clave: Contaminación, hidrocarburos fósiles, hidrocarburos saturados, sedimentos, Sontecomapan, Veracruz.

ABSTRACT

In this study the concentrations of 15 saturated hydrocarbons (SH) were determined, both from surface sediments and sediment core samples in Sontecomapan Lagoon, Veracruz, which were analyzed by gas chromatography using capillary columns and flame ionization detection (GC-FID). Total concentrations of SH in surface sediments were in an interval of 0.21 to 12.75 $\mu\text{g g}^{-1}$ and in cores of 1.33 to 32.01 $\mu\text{g g}^{-1}$; even carbon chains predominant in almost all samples. In surface sediments outstand the n-alkanes C_{20} , C_{23} , C_{22} , C_{18} and C_{21} , whereas the higher concentrations in the cores were for C_{30} , C_{32} , C_{21} , C_{28} , C_{20} , C_{25} , C_{23} ; basically with a preponderance of even carbons, which demonstrates biogenic origin and anthropogenic for SH, this differs with other studies carried out in lagoons of the Gulf of Mexico, in which is exclusively reported the presence of biogenic hydrocarbons

Key words: Pollution, fossil hydrocarbons, saturated hydrocarbons, sediments, Sontecomapan, Veracruz.

INTRODUCCIÓN

La Laguna Sontecomapan se localiza en el Golfo de México, es un ecosistema de manglar altamente productivo que ha sido afectado durante las tres últimas décadas por una tala inmoderada, principalmente para propósitos de agricultura, entre las que destaca la industria tabacalera de la región; actualmente, la selva de los Tuxtlas cuenta con tan sólo un 24% de su cobertura original total. A los manglares y humedales de la Laguna Sontecomapan se les incluyó como Parte de la Reserva de la Biósfera de los Tuxtlas con el número 1342 en la lista RAMSAR, desde febrero del año 2004. La pesca en dicho sistema es una actividad económica importante, así como la ganadería, la agricultura y el turismo (RAMSAR, 2004).

Los n-alcenos y sus índices han sido utilizados en estudios de contaminación de hidrocarburos fósiles, para distinguir entre aportes biogénicos y petrogénicos (Pelletier *et al.* 1991). Las cadenas de carbono impar tienden a prevalecer en los materiales biológicos, en tanto que en los petrogénicos hay una preferencia por los carbonos pares (Snedaker *et al.* 1995).

Los organismos marinos pueden sintetizar un número limitado de hidrocarburos con cadenas de carbono desde el C₁₅ al C₂₁. Por ejemplo, las plantas terrestres y algunas marinas como el Sargassum sp., producen del C₂₁ al C₃₃, en pastos marinos sobresalen del C₂₇ al C₃₃ que están asociados con cubiertas lipídicas. Dichos hidrocarburos son los prevalentes en la mayoría de sedimentos de zonas costeras no contaminadas (UNEP, 1992).

La fuente industrial de los alcanos es el petróleo, junto con el gas natural que lo acompaña. Una segunda fuente potencial de alcanos la compone el otro combustible fósil, el carbón. Los principales productos del petróleo refinado son transportados y son sujetos de introducción al ambiente marino y estuarino. Estos incluyen la gasolina, el queroseno, combustibles para aviones, aceites combustibles, aceites lubricantes, diesel, ceras y asfaltos (Connel y Miller, 1984).

En general, son escasos los trabajos en estuarios sobre n-alcenos en sedimentos (Sharma *et al.* 2000; Bouloubassi *et al.* 2001) y en México destacan los reportados por Botello y Mandelli (1978); Botello *et al.* (1991); López *et al.* (1999) y Armenta y Elizalde (2003). A la fecha, el presente estudio es el único que se ha realizado en el sistema de Sontecomapan sobre hidrocarburos saturados.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar y evaluar las concentraciones y distribución de hidrocarburos alifáticos en sedimentos superficiales y en núcleos, así como el contenido de carbono orgánico en los sedimentos, con el propósito de establecer el origen de dichos compuestos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio. La Laguna Sontecomapan se localiza en el Sur del Estado de Veracruz en el Golfo de México, entre los paralelos 18°30' -18°34' N y los meridianos 94°54' - 95°02' W, tiene un área de 8.9 Km² y es una importante población pesquera. Se conecta con el mar por medio de un canal de 137 m de ancho y es de tipo mixohalino.

En este estudio, de la fauna de macromoluscos se identificaron bancos de ostión de *Crassostrea rhizophorae*, *C. virginica* (especies comestibles) y del mejillón *Brachidontes exustus* (no comestible). En cuanto a su ictiofauna, Kobelkowsky (1991) señala que en el Estado de Veracruz, la Laguna Sontecomapan, es una de las que cuenta con un número considerable de especies exclusivas y con el mayor número de especies dulceacuícolas y es un sitio muy importante para la migración de aves.

La madera tiene una gran demanda tanto para construcciones ligeras como para carbón y la industria tabacalera de la región de Los Tuxtlas ha talado grandes extensiones de mangle rojo en la Laguna Sontecomapan, lo que ha originado que el tamaño de la población local de esta especie se encuentre muy reducido (Angeles, 1997). Dicha explotación, generalmente utilizaba hasta 1999 la madera de mangle para el secado de la hoja de tabaco, lo que le daba un olor particular a éste, además, regularmente se realiza la quema de pastizales aledaños a la laguna. Por lo que el manglar está siendo desplazado por áreas para cultivo, ganadería (potreros) y palmares, sobre todo en la zona oeste donde el manglar ya no existe o es muy escaso (Carmona, comunicación personal). Galvan *et al.* (1999) reportaron que el crecimiento de las áreas denudadas tiene una velocidad de 4.05 ha/año, mientras que el manglar tiene una velocidad de 2.25 ha/año.

Colecta de Muestras. Este estudio incluyó dos períodos de muestreo para los sedimentos superficiales (marzo de 1991 y 1992) y una colecta de núcleos sedimentarios (agosto 1992). Las estaciones de muestreo (Fig. 1), se eligieron utilizando fotografías aéreas, las desembocaduras de ríos y/o arroyos, así como en una estación cercana a la boca con influencia marina entre las que se encuentran: Estación 4 -Canal de El Real, E5 -Influencia del Río La Palma, E6 -Influencia del Río El Sábalo y la E8 -Influencia del arroyo De Basura.

En lo referente a la ubicación de los núcleos, el "A" se estableció aledaño a Punta La Esperanza (área central del sistema) y el "B" al Noroeste del Canal del Real (de influencia marina). En el "A", al estrato más profundo se le asignó el número 7 (31-35 cm) y al superficial el 1 (0-5 cm) en tanto que en el "B" el número 1 también fue para la parte superficial (de 0-5 cm) y el estrato 6 (profundo) fue de 26-30 cm respectivamente.

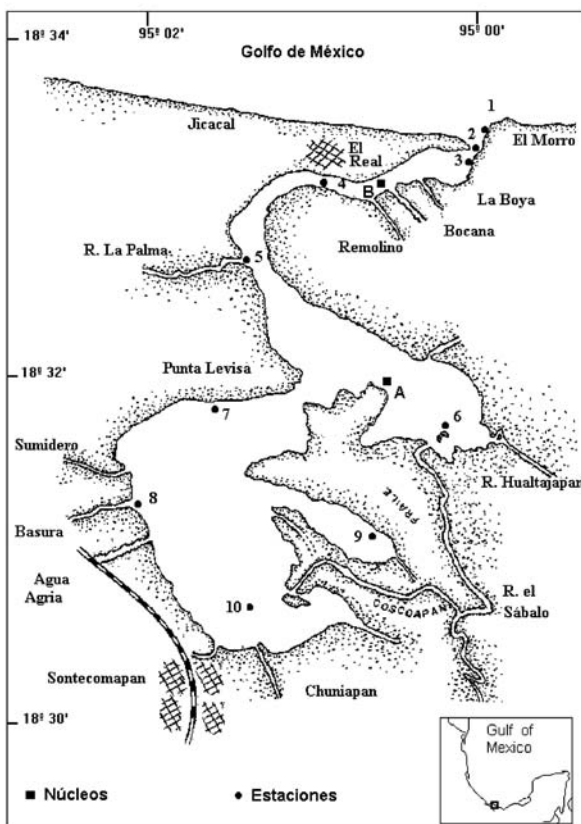


Fig 1. Estaciones de muestreo en la Laguna Sontecomapan, Ver.

Los sedimentos superficiales se recolectaron con una draga van Veen (6L), las muestras se congelaron en frascos de vidrio previamente lavados y enjuagados con acetona bidestilada y se secaron en horno a 200°C por 18 hr, posteriormente se enjuagaron con hexano grado cromatográfico. La colecta del sedimento de los núcleos se hizo manualmente y cada uno consistió de un tubo de PVC de 50 cm de largo por 5 cm de diámetro, tapados en ambos extremos con un tapón de goma.

Análisis de Muestras. En el laboratorio, los sedimentos superficiales se descongelaron y secaron durante 48 hr a 45°C y se tamizaron en una malla de 0.25 mm.

Se tomaron placas de rayos "X" a cada uno de los núcleos para verificar el grado de compactación de los mismos y se procedió a separar cada una de las secciones (de 5 cm cada una) con un "cortador en redondo" y se colocó el sedimento en frascos de vidrio y de igual forma, las muestras se descongelaron y secaron durante 48 hr a 45°C y se tamizaron en una malla de 0.25 mm.

El procedimiento analítico para la extracción y purificación de los hidrocarburos fósiles se llevó a cabo de acuerdo al CARIPOL/IOCARIBE/UNESCO (Caribbean Pollution Programme. Intergovernmental Oceanographic Commission for Caribbean of UNESCO, 1986) y a la UNEP (United Nations

Environment Programme, 1992). Cada grupo de muestras (5) se acompañó por un blanco y dos adiciones patrón (fenantreno 200 µL y C₁₈) que se añadieron antes de la extracción. Se pesó una submuestra de 10 g (peso seco) de sedimento y se realizó la extracción con cloruro de metileno: hexano (50:50 v/v) y KOH en Soxhlet durante 6 horas.

Posteriormente se extrajo la fase orgánica en embudos de separación con hexano y lo obtenido se concentró en un rotoevaporador hasta obtener 2 mL del extracto. En seguida, se procedió a la separación de las fases alifática y aromática mediante cromatografía de adsorción en una columna de 25 cm de longitud y 2.5 cm de diámetro interno empacada con alúmina desactivada con agua tridestilada al 5%; la fracción de alifáticos (F1) se eluyó con 20 mL de hexano. Para la obtención de aromáticos (F2) las eluciones se hicieron con 20 mL de hexano:cloruro de metileno (7:3 v/v) y 20 mL de cloruro de metileno. Cada una de dichas fracciones se rotoevaporó hasta 2 mL, se pasaron a viales y se llevaron a sequedad bajo una suave corriente de N₂ ultrapuro. Los compuestos se analizaron por cromatografía de gases de alta resolución con columna capilar y detector de ionización de flama (CG-DIF).

La cuantificación de ambas fracciones se llevó a cabo en un cromatógrafo de gases (Hewlett Packard modelo 5890) equipado con columna capilar de sílice fundida de 30 m x 0.25 mm D.I. x 0.25 µm de grosor de capa de fenil metil silicona 5% con detector de ionización de flama (programa de temperatura 40-300°C a 6 °C min⁻¹). El nitrógeno se usó como gas acarreador (flujo 1 mLmin⁻¹). Para los hidrocarburos saturados, se empleó una mezcla de estándares de Chemical Service, U.S.A., con una concentración 100 µmL⁻¹ (19 compuestos). El límite de detección para los compuestos individuales fue de 0.01 µgg⁻¹ y se evaluó el material de referencia IAEA-408 para cuantificar el porcentaje de recuperación de los analitos que fue del 99% para todos los alifáticos determinados. La precisión y exactitud del método empleado está acreditado con un ejercicio de intercalibración con la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA-140) para Hidrocarburos del Petróleo.

La determinación de carbono orgánico se realizó con base en el método de Gaudette *et al.* (1974).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La laguna Sontecomapan durante este estudio presentó una salinidad promedio general de 9.27 ups. El área central tenía una salinidad promedio de 8.22 ups, la zona norte 16.95 ups mientras que en la zona sur fue de 4.23 ups, lo que evidencia la importancia de los aportes fluviales. La temperatura del agua (27.1°C), está relacionada estrechamente con la temperatura ambiente (26.9 C), debido a lo somero del sistema. La

profundidad promedio fue de 1.67 m con una transparencia del agua de 0.70 m y un pH promedio de 7.5

Los hidrocarburos alifáticos en sedimentos superficiales mostraron que en marzo (1991 y 1992), el intervalo de concentraciones de HS totales fue de 0.21 a 12.75 $\mu\text{g g}^{-1}$ y en los núcleos de agosto (1992), éstas fluctuaron desde 1.33 hasta 31.99 $\mu\text{g g}^{-1}$, además de sobresalir las cadenas de carbonos pares.

Las concentraciones de n-alcenos totales, en orden jerárquico para marzo de 1991 fueron: C_{20} (4.20 $\mu\text{g g}^{-1}$) > C_{22} (1.73) > C_{21} (1.37) > C_{24} y C_{32} (0.81) > C_{18} (0.66).

Y las concentraciones para marzo de 1992: C_{20} (8.02 $\mu\text{g g}^{-1}$) > C_{23} (7.34) > C_{18} (2.39) > C_{22} (2.31) > C_{28} (1.08) > C_{21} (1.26) (Tabla 1),

Mientras que los principales alcanos para el núcleo "A" (agosto, 1992) en orden decreciente fueron: C_{30} (24.59 $\mu\text{g g}^{-1}$) > C_{32} (13.10) > C_{21} (5.99) > C_{28} (2.68) > C_{20} (2.47) > C_{24} (1.93) y en el núcleo "B" la secuencia fue la siguiente: C_{21} (12.31 $\mu\text{g g}^{-1}$) > C_{25} (2.93) > C_{20} (1.77) > C_{23} (1.74) > C_{28} (1.29) > C_{30} (0.93) (Tabla 2).

En el núcleo "A" destacó la presencia de cadenas de carbonos pares y en núcleo "B" hubo una preferencia por las cadenas de carbonos impares.

Los hidrocarburos biogénicos de origen reciente muestran un alto dominio de n-alcenos de cadenas de carbono impar. Algunas excepciones posibles se registran en el intervalo de C_{22} a C_{30} cuando concentraciones bajas de alcanos de cadenas de carbonos pares pueden ser formados por bacterias (UNEP, 1992).

El índice de preferencia del carbono (CPI), es la proporción de las longitudes de las cadenas de carbonos impares y pares (UNEP, 1992), en particular para este estudio, el CPI se basó en la fórmula propuesta por Nevenzel (1989):

$$\text{CPI}_{x-y} = \frac{\sum \% \text{HC}_{\text{impares}}}{\sum \% \text{HC}_{\text{pares}}} \cdot \frac{D}{N}$$

donde D = número de homólogos pares entre la cadena de longitud x e y, y N = número de homólogos impares en este intervalo.

La importancia de evaluar el CPI en sedimentos recientes radica en conocer de manera indirecta y general, el tipo de aporte de hidrocarburos que se acumula en los sedimentos. De esta forma, valores de CPI mayores a la unidad (donde predominen claramente los n-alcenos de cadenas de carbono impar sobre los pares) se atribuyen a un aporte importante de materiales alóctonos (plantas vasculares y desechos de éstas; ceras cuticulares de plantas terrestres) (Bouloubassi *et al.* 2001).

Tabla 1. Concentraciones totales de hidrocarburos alifáticos ($\mu\text{g g}^{-1}$, peso seco) en sedimentos superficiales de Laguna Sontecomapan, Ver.

n-Alcanos	Marzo-1991	Marzo-1992
C_{12}	<0.01	0.05
C_{13}	<0.01	0.02
C_{16}	<0.01	0.22
C_{17}	<0.01	0.09
C_{18}	0.66	2.39
C_{20}	4.2	8.02
C_{21}	1.37	1.26
C_{22}	1.73	2.31
C_{23}	0.25	7.34
C_{24}	0.81	0.84
C_{25}	0.56	0.53
C_{28}	0.42	1.08
C_{30}	0.43	0.64
C_{32}	0.81	<0.01
\sum n-Alcanos	11.24	24.79

Límite de detección: <0.01 $\mu\text{g g}^{-1}$

Tabla 2. Concentraciones totales de hidrocarburos alifáticos (μgg^{-1} , peso seco) en núcleos de sedimentos de Laguna Sontecomapan, Ver.

n-Alcanos	Núcleo "A"	Núcleo "B"
C ₉	0.12	<0.01
C ₁₀	0.02	<0.01
C ₁₂	0.03	0.18
C ₁₅	<0.01	0.07
C ₁₆	<0.01	0.16
C ₁₇	0.10	0.31
C ₁₈	0.05	0.38
C ₂₀	2.47	1.77
C ₂₁	5.99	12.31
C ₂₂	0.65	0.49
C ₂₃	1.06	1.74
C ₂₄	1.93	0.80
C ₂₅	1.40	2.93
C ₂₈	2.68	1.29
C ₃₀	24.59	0.93
C ₃₂	13.10	0.61
Σ n-Alcanos	54.19	23.97

Límite de detección: $<0.01 \mu\text{gg}^{-1}$

La presencia en la Laguna Sontecomapan de los carbonos pares (C₁₆, C₁₈, C₂₀, C₂₄, C₂₆, C₂₈ y C₃₀) con un CPI menor a 1 indican que hay contaminación por petróleo (Snedaker *et al.* 1995), así como el haber detectado C₁₃, C₁₆, C₂₈, C₉ y C₂₅ confirman que hay emisiones de gasolina, diesel y/o lubricantes (Salazar *et al.* 1991). Además, el C₁₆ es un n-alcano típico de los petróleos crudos y raramente se encuentra en los biolípidos (Thompson & Eglinton, 1978).

Echaniz (1988) registró en sedimentos marinos un CPI promedio de 0.91 para Isla Sacrificios, 0.99 en Isla Verde y 0.81 en la Isla de Enmedio en el Puerto de Veracruz; con una proporción similar de n-alcanos pares e impares, por lo que sugiere aporte natural así como de petróleo crudo dado que detectó la presencia relevante de cadenas de carbonos pares (C₁₆, C₁₈ y C₂₀) característicos de éste último y detectados en Sontecomapan.

Una proporción mayor de n-alcanos de cadena larga ($>C_{23}$) con CPI altos han sido reportados para sedimentos cercanos a las playas y recientes del Atlántico Este, el Golfo de México y Atlántico Oeste, el Mar Muerto, el Mar Noruego, El Mar Negro, alrededor del área del Reino Unido y el Mar Báltico.

La distribución espacial de n-alcanos en el sistema de Sontecomapan, mostró que las estaciones de colecta con las con-

centraciones más altas de HS totales durante marzo de 1991 fueron la 6 ($5.78 \mu\text{gg}^{-1}$; CPI=0.17), siguiéndole la estación 4 ($2.96 \mu\text{gg}^{-1}$; CPI=0.26) y finalmente la estación 8 ($2.5 \mu\text{gg}^{-1}$; CPI=0.4). Para marzo de 1992 la estación 4 fue la que presentó los mayores valores de n-alcanos totales ($12.75 \mu\text{gg}^{-1}$; CPI=0.13), a continuación la estación 5 ($11.83 \mu\text{gg}^{-1}$; CPI=1.87) y en la 8 se determinó exclusivamente la presencia del C₂₈ con $0.21 \mu\text{gg}^{-1}$ y un CPI=0.

En el área cercana a la boca de la laguna (estaciones 4 y 5) por el tipo de HS detectados se presume la presencia de hidrocarburos originados del transporte de petróleo en el Golfo de México así como hidrocarburos biogénicos independientemente de que el sedimento es arenoso.

En la desembocadura de los arroyos De Basura, Del Sumidero y Agua Agria (estación 8) se presentaron los menores niveles de n-alcanos pese a estar conformada por sedimentos arcillosos-limosos, en esta zona hay lirio acuático *Eichornia crassipes* y tule *Typha domingensis*, los cuales indican la descarga de aguas residuales o cuerpos de agua eutróficos con altos contenidos de nitrógeno y fósforo (Heard & Winter-ton, 2000).

En la laguna Sontecomapan, el C₂₇ y C₂₉ no se detectaron en sedimentos superficiales ni en los núcleos, solamente C₂₅, los

que proviene del detritus de plantas terrestres (Al-Saad & Al-Timari, 1993; Nishigima *et al.* 2001; Bouloubassi *et al.* 2001) pese a que en este sistema se presenta la hidrófita sumergida *Ruppia maritima* y en los alrededores existe *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* y *Avicennia germinans*.

En el Pacífico, en la Isla de Guadalupe, Bernard *et al.* (1996) citan que los n-alcános dominantes fueron el C₂₉ o el C₃₁, evidenciando la gran incorporación de detritus de manglar hacia los sedimentos superficiales.

Particularmente en el núcleo "B" estrato 4, el CPI fue de 0.9, manifestando que existe un ligero dominio de cadenas de carbono impares sobre los pares, entre el intervalo del C₁₄ al C₂₂. Estas características indican que el aporte de hidrocarburos al sedimento se deriva principalmente del petróleo (UNEP, 1992) y en algunos casos de determinados organismos marinos.

Exclusivamente en el B4 se detectó la presencia del C₁₅ (0.07 µg g⁻¹), este alcano prevalece en algas caféas; el C₁₅ ó C₁₇ en el fitoplancton y en algas rojas domina el C₁₇, con un máximo secundario en un intervalo de C₂₀ a C₃₀ (Duursma y Dawson, 1981).

Cuando sobresalen los n-alcános de cadenas de carbonos pares puede interpretarse como una consecuencia de la actividad microbiana en el área. Las poblaciones de diatomeas contienen un intervalo de n-alcános desde el C₁₅ al C₃₁ con dominio de cadenas de carbonos impares (Salot, 1981).

El predominio de cadenas de carbonos impares en el núcleo "B" (tanto en el estrato superior-1 como en el inferior-6), da un indicio de que estas n-parafinas provienen de varias fuentes, por ejemplo, las ceras de plantas terrestres que contienen alcános impares de la región C₂₃ a C₃₃ (Guthrie *et al.* 1996); las plantas de niveles de organización menor producen cantidades altas de homólogos menores (n-C₁₅ al n-C₂₃), con un número igual de cadenas de carbonos pares e impares y el fitoplancton sintetiza n-C₁₅, C₁₇, C₁₉ frecuentemente una serie de compuestos alrededor del C₂₁.

Entre las herramientas analíticas para evaluar la presencia de hidrocarburos del petróleo se sugieren las siguientes: el índice de dominio de cadenas de carbonos impares (CPI), las relaciones Pristano/Fitano, n-C₁₇/n-C₁₈, n-C₁₇/Pristano, n-C₁₈/Fitano y n-C₁₇/n-C₁₈. Estas relaciones entre los isoprenoides Pristano/Fitano y los n-alcános C₁₇/C₁₈ se establecieron para comparar la proporción existente entre compuestos comunes en el medio marino y los que no lo son (Echaniz, 1988).

Las concentraciones promedio en particular del C₁₈ en sedimentos superficiales para 1991 fueron de 0.33 µg g⁻¹ y 1.2 µg g⁻¹ para 1992, mientras que en los núcleos los valores fueron menores: núcleo "A" (0.1 µg g⁻¹) y "B" (0.13 µg g⁻¹). La proporción n-C₁₇/n-C₁₈ obtenida en algunas de las muestras analizadas en el

sistema de Sontecomapan, exclusivamente para la estación 4 (marzo, 1992), con un valor de 0.04 indica el dominio del C₁₈, el cual se relaciona con una contribución reciente de hidrocarburos antropogénicos y que refleja la influencia limitada de la degradación microbiana.

En éstos, la tasa n-C₁₇/n-C₁₈ varió de 0.91 (B4) a 2.0 (A4), pero con preferencia por el C₁₇. Esto último indica la entrada de hidrocarburos biogénicos debido a que el cociente generalmente es mayor en muestras biogénicas que en petróleo.

En el núcleo "A", el segundo estrato (6-10 cm de profundidad) mostró las mayores concentraciones de n-alcános (31.99 µg g⁻¹) coincidiendo con el mayor porcentaje de carbono orgánico (5.81%), en seguida el estrato uno (20.8 µg g⁻¹) y 5.68% de carbono orgánico. En el núcleo "B", estrato 1 (0-5 cm de profundidad), estuvieron los niveles más altos (12.9 µg g⁻¹ CPI=7.6). En los estratos 4 y 6 las concentraciones de HS totales fueron similares con 6.08 µg g⁻¹ y 4.86 µg g⁻¹ y CPI de 0.9 y 1.73 respectivamente (Tabla 3).

Asímismo, las mayores concentraciones totales de n-alcános se detectaron en el área central de la laguna (núcleo "A" con 54.19 µg g⁻¹), cuyo porcentaje promedio de carbono orgánico fue también alto (5.11%) y que está conformado por sedimentos limosos-arcillosos mientras que en la parte sur (núcleo "B" con 23.97 µg g⁻¹) el promedio de C.O. fue de 2.13 y el sedimento arenoso. La correlación entre n-alcános y la salinidad, temperatura del agua, profundidad del sedimento y la tasa de sedimentación estadísticamente resultaron negativas. Lo anterior coincide con la información sobre la variabilidad en la tasa de sedimentación para cada zona de la laguna, ya que en el sur y centro de la misma es mayor, por ejemplo, en época de lluvias es de hasta 8 cmaño⁻¹ y de aproximadamente 2 cmaño⁻¹ en época de secas, lo que da un promedio general de 4 cmaño⁻¹ (Comunicación Personal Pérez-Rojas y Márquez). Galvan *et al.* (1999) consideraron que en el sistema hay un azolvamiento potencial ya que desde el inicio de la agricultura, la producción de sedimentos fue mayor a la producción de agua, condición que indica que la cuenca no tuvo programación en cuanto a la apertura de tierras.

Por otra parte, González *et al.* (1994) en la laguna Sontecomapan detectaron metales pesados y las mayores concentraciones correspondieron al níquel, cromo, zinc y cobre y los autores los asocian a las diversas actividades humanas y/o a los aportes de los desechos de combustibles utilizados por motores de combustión interna. En el sistema hay un tráfico constante de lanchas con fines pesqueros y en algunas temporadas del año con propósitos turísticos.

Por el tipo de cadenas de carbono par presentes en los sedimentos superficiales, así como de los núcleos "A" y "B" (Tabla

Tabla 3. Niveles de hidrocarburos fósiles en sedimentos ($\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco) en Laguna Sontecomapan, Ver

Sedimentos Superficiales.				
Estación (Area)	Alifáticos ($\mu\text{g g}^{-1}$)	CPI	Carbono Orgánico (%)	Predominio Carbonos
Mzo. 1991				
4 (Norte)	2.96	0.26	0.64	Pares
6 (Sureste)	5.78	0.17	2.62	Pares
8 (Suroeste)	2.50	0.40	0.88	Pares
Suma n-Alcanos	11.24			
Mzo. 1992				
4 (Norte)	12.75	0.13	1.12	Pares
5 (Noroeste)	11.83	1.87	2.87	Impares
8 (Suroeste)	0.21	0	2.70	Pares
Suma	24.79			
Sedimentos de Núcleo.				
Núcleo "A"	Alifáticos ($\mu\text{g g}^{-1}$)	CPI	Carbono Orgánico (%)	Predominio Carbonos
Estrato				
A7 (0-5 cm)	20.87	0.31	5.68	Pares
A4 (16-20 cm)	31.99	0.12	5.81	Pares
A1 (31-35 cm)	1.33	0.48	3.83	Pares
Suma n-Alcanos	54.19			
Núcleo "B"				
Estrato				
B6 (0-5 cm)	12.90	7.60	2.64	Impares
B3 (11-15 cm)	6.08	0.90	0.78	Pares
B1 (26-30)	4.99	1.73	0.78	Impares
Suma n-Alcanos	23.97			

CPI: índice de preferencia del carbono; Límite de detección hidrocarburos: $<0.01 \mu\text{g g}^{-1}$

3), se considera que uno de los orígenes de estos hidrocarburos saturados es por agentes petrogénicos, porque los petróleos crudos y productos del petróleo, son mezclas de amplio intervalo que contienen moléculas de tamaños diferentes en la distribución par (Botello y Mandelli, 1978). De igual forma Snedaker *et al.* (1995) mencionan que en el material biológico sobresalen las cadenas de carbonos impares, mientras que en los materiales petrogénicos destacan las cadenas de carbonos pares. Asimismo, el petróleo puede contener C18, el cual no es biogénico (Morris *et al.* 1976).

En cuanto al contenido de carbono orgánico en sedimentos superficiales, los promedios fueron similares para ambas colectas (1.36 y 1.47%) y para el núcleo "A" (2.13%), no obstante, en los sedimentos del núcleo "B" los valores fueron mayores (5.11%) y se obtuvo una correlación positiva entre HS y el porcentaje de carbono orgánico ($r=0.75$, $p=0.08$) (Tabla 4).

Los cromatogramas muestran una mezcla compleja no resuelta (UCM, de acuerdo a sus siglas en inglés), característica que representa compuestos no resueltos por la columna cromatográfica empleada, tales como isoalcanos, naftenoa-

Tabla 4. Algunos índices empleados para n-Alcanos en Laguna Sontecomapan.

Sedimentos Superficiales		
	Marzo, 1991	Marzo, 1992
Plancton ($\mu\text{g/g}$)	<0.01	0.09
Plantas terrestres ($\mu\text{g/g}$)	0.56	0.53
Indicadores de petróleo (1) ($\mu\text{g/g}$)	4.86	10.63
Indicadores de petróleo (2) ($\mu\text{g/g}$)	1.66	2.56
Principales n-alcanos	$C_{20}, C_{22}, C_{21}, C_{24}, C_{32}, C_{18}$	$C_{20}, C_{23}, C_{18}, C_{22}, C_{21}, C_{28}$
n-Alcanos ($\mu\text{g/g}$)	4.2; 1.73; 1.37; 0.81; 0.81; 0.56	8.02; 7.34; 2.39; 2.31; 1.26; 1.08
Principales alcanos (%)	37, 15, 12, 7, 7, 6	32, 30, 10, 9, 5, 4
C17 (%)	0	0.36
C18 (%)	6	10
CPI	0.24	0.59
Carbono orgánico (%)	1.36	1.47
Núcleos de Sedimento		
	Núcleo "A"	Núcleo "B"
Plancton ($\mu\text{g/g}$)	0.1	0.38
Plantas terrestres ($\mu\text{g/g}$)	1.4	2.93
Indicadores de petróleo (1) ($\mu\text{g/g}$)	2.52	1.77
Indicadores de petróleo (2) ($\mu\text{g/g}$)	29.22	3.63
Principales n-alcanos	$C_{30}, C_{32}, C_{21}, C_{28}, C_{20}, C_{24}$	$21, C_{25}, C_{20}, C_{23}, C_{28}, C_{30}$
n-Alcanos ($\mu\text{g/g}$)	24.59; 13.1; 5.99; 2.68; 2.47; 1.93	12.31; 2.93; 1.77; 1.74; 1.29; 0.93
Principales alcanos (%)	45%, 24%, 11%, 5%, 5%, 4%	51%, 12%, 7%, 7%, 5%, 4%
C17 (%)	0.19	1.3
C18 (%)	0.09	1.6
CPI	0.19	0.49
	5.11	2.13

*Plancton: $C_{15}+C_{17}+C_{19}$; Plantas terrestres: $C_{25}+C_{27}+C_{29}$; Indicadores de petróleo (1): $C_{16}+C_{18}+C_{20}$; Indicadores de petróleo (2): $C_{24}+C_{26}+C_{28}+C_{30}$; CPI=índice de preferencia del carbono.

romáticos y aromáticos de origen fósil. La UCM es considerada como un buen indicador de posibles aportes de hidrocarburos derivados de las actividades del hombre hacia el sistema marino, al igual que la aparición del C_{18} y el C_{20} (Bottello *et al.* 1991) y que Readman *et al.* (1986) sugieren que se asocia con residuos de petróleo intemperizado. Además, Atlas *et al.* (1981) cita que una UCM que origina una curva cuya área se incrementa con el grado de intemperismo se relaciona con la actividad bacteriana.

Este tipo de cromatogramas se obtuvo en la estación 4 (marzo, 1991) y en los núcleos: A4, B6, B3 y se observa ligeramente en el B1. Todo lo anterior, confirmando la presencia de petróleo en el área de estudio, aunado a ello, a lo largo de la barra arenosa

de la laguna hay breas y alquitranes sobre las arenas y siguiendo por la costa hacia el noreste hasta Punta El Lagarto se aprecian incluso en las rocas grandes manchas del hidrocarburo, al parecer ésto es ocasionado por el constante tráfico de embarcaciones en esta zona del Golfo de México.

En cuanto a la caracterización de los hidrocarburos alifáticos en los sedimentos superficiales (marzo-1991), los carbonos dominantes fueron pares ($C_{22}, C_{21}, C_{32}, C_{18}, C_{24}, C_{30}$ y C_{24}) y para marzo de 1992 se obtuvo un patrón similar ($C_{20}, C_{23}, C_{18}, C_{22}, C_{24}, C_{21}, C_{28}$).

Concerniente al dominio de cadenas de carbonos de los HS promedio en los núcleos de manera general, en el núcleo "A"

destacó la presencia de cadenas de carbonos pares y en núcleo "B" hubo una preferencia por las impares $C_{21} > C_{25} > C_{29} > C_{33} > C_{37}$ (Tabla 4) lo que confirmó la presencia tanto de aportes biogénicos como antropogénicos en el sistema. El origen del petróleo fue demostrado por la presencia de la UCM y por un CPI bajo (Tarek *et al.* 1995).

Actualmente se conoce que las concentraciones de hidrocarburos biogénicos son más pequeñas con relación a concentraciones de muestras contaminadas y a modo de comparación, los niveles promedio de hidrocarburos biogénicos en sedimentos costeros tienen aproximadamente de 5 a 10 μgg^{-1} (UNEP, 1992; Volkman *et al.* 1992), en sitios de derrames de petróleo los niveles de hidrocarburos del petróleo exceden las 3000 μgg^{-1} , y por último, en los sedimentos de puertos urbanos-industriales las concentraciones de hidrocarburos del petróleo fluctúan de 10 hasta 1000 μgg^{-1} en peso seco (UNEP, 1992); sin embargo, Volkman *et al.* (1992) restringen a 500 μgg^{-1} en peso seco de hidrocarburos para establecer sedimentos con contaminación significativa.

Se concluyó que el origen de los hidrocarburos alifáticos detectados en la laguna Sontecomapan es biológico, derivado del petróleo y pirolítico, ésto por los diferentes productores primarios presentes en el sistema, la quema de mangle y del constante tráfico de lanchas que emplean gasolina, aceites y lubricantes e inclusive de los combustibles que se transportan en las lanchas para su uso en vehículos terrestres; de igual forma, a través de las descargas de los ríos y los provenientes de la costa por el constante transporte de petróleo

en el área, poniendo de manifiesto la importancia de efectuar monitoreos ambientales en áreas no industriales.

Comparando los resultados obtenidos en este trabajo, en la tabla 5 se aprecia que las concentraciones de HS en la laguna Sontecomapan son similares a las determinadas en el estuario Changjiang y al Mar Amarillo, ambos en China. Con respecto a otros estudios en lagunas mexicanas, las lagunas que han presentado mayores niveles fueron: Mecoacán, Tab. y Términos, Camp., de ahí el que también se concluya que la laguna Sontecomapan tiene una contaminación por n-alcános moderada.

Finalmente, con lo expuesto anteriormente así como de forma especulativa, las concentraciones de hidrocarburos fósiles en la zona de estudio actualmente pueden ser iguales o mayores de cuando se realizó este estudio, (pese a que se ha detenido la quema del manglar por la industria tabacalera), debido al aumento demográfico, al incremento del tráfico de lanchas y a que la tala de manglar no se ha detenido, lo que conlleva el aumento del acarreo de sedimento a este sistema acuático, azolvándose sobre todo en la porción sur, así también, la presencia de un muelle cercano a Monte Pío puede estar favoreciendo la entrada de estos compuestos a la laguna.

REFERENCIAS

- AL-SAAD, H. & A. AL-TIMARI. 1993. Seasonal Variations of Dissolved Normal Alkanes in the Water Marshes of Iraq. *Marine Pollution Bulletin* 26(4):207-212.

Tabla 5. Promedio de n-alcános (μgg^{-1} peso seco) en sedimentos de algunos sistemas acuáticos

Sistema	μgg^{-1} peso seco	Referencias
Laguna Mecoacán, Tab., México	0.1 - 67	Armenta y Elizalde, 2003.
Laguna de Términos, Camp., México	12 - 56	Botello y Mandeli, 1978
Estuario Changjiang, China	2.20 - 11.82	Bouloubassi <i>et al.</i> 2001
Estuario Gironde, Francia	0.62 - 4.89	Budzinski <i>et al.</i> 1997
Sur del Mar Caspio	0.5 - 17	Tolosa <i>et al.</i> 2004
Mar Amarillo, China	0.7 - 15.8	Wu <i>et al.</i> 2001
Mar Báltico, Rusia	1 - 326	Nemirovskaya y Zaretskas, 2001
Bahía Elefsis, Grecia	85.7 - 1062	Sklivagou <i>et al.</i> 2001
Santos, Brasil	1.05 - 4.29	Nishigima <i>et al.</i> 2001
Cananea, Brasil	4.37 - 157.9	Nishigima <i>et al.</i> 2001
Zona Costera de la Patagonia, Argentina	*N.D. - 1304	Commendatore <i>et al.</i> 2000
Isla Guadalupe en el Caribe Zona Marina	29.4	Bernard <i>et al.</i> 1996
Isla Guadalupe en el Caribe Zona Portuaria	1000	Bernard <i>et al.</i> 1996
Este estudio	0.21 - 12.75	

N.D.= No Detectado

- ANGELES, G. 1997. *Rhizophora mangle* (mangle rojo). In: González, S.E., R. Dirzo & R.C. Vogt. (Eds.). 1997. *Historia Natural de Los Tuxtlas*. Inst. Biol. (UNAM); Inst. de Ecología (UNAM) y CONABIO. México, pp. 148-150.
- ARMENTA, A. G. & M.G. ELIZALDE. 2003. Contamination by PAHs, PCBs, PCPs and Heavy Metals in the Mecoacan Lake Estuarine Water and Sediments after Oil Spilling. *Journal of Soils and Sediments* 3(1):35-40.
- ATLAS, R.M., P.D. BOHEM & J.A. CALDER. 1981. Chemical and biological weathering of oil from the Amoco Cadiz oil spillage within the littoral zone. *Estuarine Coastal Marine Science* 12:589-608.
- BERNARD, D., H. PASCALINE & J.J. JEREMIE. 1996. Distribution and Origin of Hydrocarbons in Sediments from Lagoons with Fringing Mangrove Communities. *Marine Pollution Bulletin* 32(10):734-739.
- BOTELLO, A. V., C. GONZÁLEZ & G. DÍAZ. 1991. Pollution by Petroleum Hydrocarbons in Sediments from Continental Shelf of Tabasco State, Mexico. *Bulletin Environmental Contamination & Toxicology* 47:565-571.
- BOTELLO, A.V. & E. MANDELLI. 1978. Distribution of n-parafins in Seagrasses, Benthic Algae, Oysters and Recent Sediments from Terminos Lagoon, Campeche, México. *Bulletin Environmental Contamination & Toxicology* 19(3):162-168.
- BOULOUBASSI, I., J. FILLAUX & A. SALIOT. 2001. Hydrocarbons in Surface Sediments from Changjiang (Yangtze River) Estuary, East China Sea. *Marine Pollution Bulletin* 42(12):1335-1346.
- BUDZINSKI, H., I. JONES, J. BELLOCO, C. PIÉRARD & P. GARRIGUES. 1997. Evaluation of Sediment Contamination by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Gironde Estuary. *Marine Chemistry* 58:85-97.
- CARIPOL/IOCARIBE/UNESCO. 1986. Manual CARIPOL para el Análisis de Hidrocarburos del Petróleo en Sedimentos y Organismos Marinos. Programa CARIPOL II. Puerto Morelos, Q. Roo., México, 25 p.
- COMMENDATORE, M.G., J.L. ESTEVES & J.C. COLOMBO. 2000. Hydrocarbons in Coastal Sediments of Patagonia, Argentina : Levels and Probable Sources. *Marine Pollution Bulletin* 40(11):989-998.
- CONNEL, D.W. & G.J. MILLER. 1984. *Chemistry and Ecotoxicology of Pollution*. John Wiley & Sons. U.S.A., pp. 228-249.
- DUURSMA, E.K. & R. DAWSON. 1981. *Marine Organic Chemistry*. Evolution, Composition, Interactions and Chemistry of Organic Matter in Seawater. Elsevier Oceanography Series, New York, U.S.A., 521 p.
- ECHANIZ, V.H. 1988. Determinación de los Niveles de Hidrocarburos en Agua, Sedimentos Recientes y Hojas del Pasto Marino *Thalassia testudinum* (König, 1805) en Tres Islas Arrecifales del Puerto de Veracruz, Ver. Tesis Prof. Fac. Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 1-58.
- GALVAN, F. M., H.M. ARIAS, J.M. CÁVEZ & F.G. ZAVALA. 1999. Influencia del transporte fluvial de sedimentos sobre la evolución de una laguna costera. *Hidrobiológica* 9(2):145-158.
- GAUDETTE, H., W. FLIGH, L. TONER, & D. FOLGER. 1974. An Inexpensive Tritation Method for the Determination of Organic Carbon in Recent Sediments. *Journal Sedimentology & Petrology* 44(1):249-253.
- GONZÁLEZ, F.A., A.V. BOTELLO, S.F. VILLANUEVA & G.V. PONCE. 1994. Presencia de Metales y Oligoelementos en Sedimentos Recientes y Organismos de la Laguna de Sontecomapan, Veracruz, México. *Hidrobiológica* 4(1-2):35-43.
- GUTHRIE, J.M., E.S. DA FROTA, M.A. DA SILVA & C.B. ECKARDT. 1996. Memorias del V Congreso de Latinoamericano de Geoquímica Orgánica. Resúmenes en Extenso. Cancún, México. 6-10 octubre, 1996. pp. 168-170.
- HEARD, T.A. & S.L. WINTERTON. 2000. Interactions Between Nutrient Status and Weevil Herbivory in the Biological Control of Water Hyacinth. *Journal of Applied Ecology* 37(1):117-127.
- KOBELKOWSKY, A. 1991. Ictiofauna de las Lagunas Costeras del Estado de Veracruz. In: Figueroa, A.T., M.G. Alvarez, A.H. Esquivel y M.E. Ponce. (Eds.). *Fisicoquímica y Biología de las Lagunas Costeras Mexicanas*. UAMI. pp. 74-93.
- LÓPEZ V.D., G. E. DE LA LANZA & A.V. BOTELLO. 1999. Hydrocarbons in Surface Shelf Sediments of the Mexican Tropical Pacific Ocean. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 15(2):85-93.
- MORRIS, B.F., J. CADWALLADER, J. GEISELMAN & J.N. BUTLER. 1976. Transfer of Petroleum and Biogenic Hydrocarbons in the Sargassum Community. Reprinted from H.L. Windom & R.A. Duce. Eds. *Marine Pollutant Transfer*. Chap. 11:235-259
- NEMIROVSKAYA, I.A. & S.A. ZARETSKAS. 2001. Composition of the Aliphatic Hydrocarbons in the Bottom Sediments of the Baltic Sea. *Okeanologiya* 41(1):53-60.
- NEVENZEL, J.C. 1989. Biogenic Hydrocarbons of Marine Organisms. In: Ackman, G.R. (Ed.). *Marine Biogenic Lipids, Fats, and Oils*. CRC Press. Florida, U.S.A. Vol. I pp. 3-73.
- NISHIGIMA, F.N., R.R. WEBER & M.C. BICEGO. 2001. Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in Sediments of Santos and Cananeia, S.P. Brazil. *Marine Pollution Bulletin* 42(11):1064-1072.
- PELLETIER, E., S. OUELLET & M. PAQUET. 1991. Long-term Chemical and Cytological Assessment of Oil Contamination in Estuarine Intertidal Sediments. *Marine Pollution Bulletin* 22:273-281.
- RAMSAR, 2004. ON WORLD WETLANDS DAY 2004, Mexico. 6th Workshop on Management and Conservation of Wetlands in Mexico. Universidad de Guadalajara, Zapopan, Jalisco.
- READMAN, J.W., R.F. MANTOURA, C.A. LLEQUELLYN, M.R. PRESTON & REEVES, A.D. 1986. The Use of Pollutant and Biogenic Markers as Sour-

- ce Discriminants of Organic Inputs to Estuarine Sediments. *International Journal of Environmental Analyses Chemistry* 27:29-54.
- SALAZAR, S., G.G. DÍAZ & A.V. BOTELLO. 1991. Presence of Aliphatic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Northwestern Mexico City, Mexico. *Bulletin Environmental Contamination & Toxicology* 46(5):690-696.
- SALLOT, A. 1981. Natural hydrocarbons in sea water. In : Duursma, E.K. & R. Dawson. (Eds.) *Marine Organic Chemistry. Evolution, Composition, Interactions and Chemistry of Organic Matter in Seawater*. Elsevier Oceanography Series, New York, U.S.A., 521 p.
- SHARMA, V.K., S.D. HICKS, W. RIVERA & F.G. VÁZQUEZ. 2000. Hydrocarbon Contamination in Sediments of Nueces Bay, Texas. *Bulletin Environmental Contamination & Toxicology* 65:253-260.
- SKLIVAGOU, E., S.P. VARNAVAS & J. HATZIANESTIS. 2001. Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments from Elefsis Bay, Greece (Eastern Mediterranean). *Toxicological and Environmental Chemistry* 79(3-4) :195-210.
- SNEDAKER, S.C., P.W. GLYNN, D.G. RUMBOLD & E.F. CORCORAN. 1995. Distribution of n-Alkanes in Marine Samples from Southeast Florida. *Marine Pollution Bulletin* 30(1):83-89.
- TAREK, A., T. ABOUL-KASSIM & B.R.T. SIMONEIT. 1995. Petroleum Hydrocarbon Fingerprinting and Sediment Transport Assesed by Molecular Biomarker and Multivariate Statistical Analyses in the Eastern Harbour of Alexandria, Egypt. *Marine Pollution Bulletin* 30(1):63-73.
- THOMPSON, S. & G. EGLINGTON, 1978. Composition and Sources of Pollutant Hydrocarbons in the Severn Estuary. *Marine Pollution Bulletin* 9:133-136.
- TOLOSA, I., S. DE MORA, M. R. SHEIKHOLESAMI, J.P. VILLENEUVE, J. BARTOCCI & CH. CATTINI. 2004. Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in Coastal Caspian Sea Sediments. *Marine Pollution Bulletin* 48(1-2):44-60.
- UNEP. (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME).1992. *Determination of petroleum hydrocarbons in sediments*. References Methods for Marine Pollution Studies N° 20, 75 p.
- VOLKMAN, J.K., S.M. BARRET & A.G. DUNSTAN. 1992. Identification of natural, anthropogenic and petroleum hydrocarbons in aquatic sediments. *The Science of Total Environment* 112:203-219.
- WU, Y., J. ZHANG, T.Z. MI. & B. LI. 2001. Occurrence of n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in the core sediments of the Yellow Sea. *Marine Chemistry* 76(1-2):1-15.

Recibido: 4 de septiembre de 2003.

Aceptado: 10 de junio de 2004.