IMPACTO ECOLÓGICO DE LA INDUSTRIA PETROLERA EN LA SONDA DE CAMPECHE, MÉXICO, TRAS TRES DÉCADAS DE ACTIVIDAD: UNA REVISIÓN

J. ÁNGEL GARCÍA-CUÉLLAR, FRANCISCO ARREGUÍN-SÁNCHEZ, SERGIO HERNÁNDEZ VÁZQUEZ y DANIEL B. LLUCH-COTA

Con el advenimiento del auge en la explotación del petróleo, la empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX) se convirtió en la principal industria de México. A partir de 1974, con el descubrimiento del pozo Chac y de varios campos petroleros gigantes y super-gigantes (Santiago y Baro, 1992), la principal zona productora de petróleo y gas en México se ubicó en la parte sur del Golfo de México, donde se han desarrollado las actividades de perforación y producción en la denominada zona marina de Campeche, que en la actualidad genera el 82% de la producción total nacional de crudo (IMP, 2001b; PEMEX, 2003).

La Sonda de Campeche es un área de alta biodiversidad y al mismo tiempo una región de intensa expansión industrial costera que incluye puertos industriales y pesqueros, explotación petrolera e industria pesquera (Yáñez-Arancibia y Sánchez Gil, 1986). Se han reportado más de 320 especies de peces (Yáñez-Arancibia *et al*,. 1988, citado por Flores-Hernández *et al*., 1997) y sobre esta alta diversidad inciden dos grandes tipos de explotación: la flota camaronera de arrastre, cuya captura en el año 2001 alcanzó 4075ton, y una flota artesanal o ribereña que opera sobre la plataforma continental y cuyas capturas para el mismo periodo fueron cercanas a 42000ton, comprendiendo principalmente recursos de escama y moluscos (CONAPESCA, 2002).

La intensa actividad que desarrolla PEMEX implica la posibilidad de impactos de contaminación por petróleo y sus derivados en el medio ambiente marino, asociados a los procesos de exploración, producción en altamar, transporte marítimo y submarino, operaciones de embarque y almacenamiento, accidentes en operaciones como rupturas de los oleoductos submarinos, accidentes de buques-tanque, derrames y explosiones de plataformas.

Aunado a lo anterior hay otras fuentes de hidrocarburos de petróleo e hidrocarburos aromáticos policíclicos que inciden en el área a partir de descargas industriales y municipales que alcanzan el área por vía de escurrimientos de ríos y descargas costeras, producción biológica *in situ*, deposiciones atmosféricas, emanaciones crónicas y discretas ("chapopoteras", como se denominan en México) provenientes de afloramientos naturales marinos (González-Macías, 1997; PEMEX, 2002a) y la intensa actividad de botes pesqueros y comerciales (Botello *et al.*, 1996; PEMEX, 2002a). De ahí que todas las fuentes conocidas y estimadas de aportaciones de petróleo en el mar (Farrington, 1985; Clark, 1997; Kennish, 1997) ocurren y potencialmente contribuyen a la carga de hidrocarburos en la parte SO del Golfo de México.

Son grandes los beneficios económicos y sociales que se han obtenido para México por parte la industria petrolera, pero la intensa actividad desarrollada durante casi tres décadas ha expuesto a la Sonda de Campeche a factores estresantes que podrían implicar impactos

PALABRAS CLAVE/ Ambiente / Impacto Ambiental / Impacto Ecosistemas / Industria Petrolera / Petróleo / Sonda Campeche/

Recibido: 10/12/2003. Modificado: 04/05/2004. Aceptado: 13/05/2004.

J. Angel García-Cuéllar. **Biólogo, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco (UAM-X), México. Maestro en Ciencias en Manejo de Recursos Marinos, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional (CICIMAR-IPN), México. Estudiante de Doctorado, Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste (CIBNOR), México. Dirección: Calle Miraflores y Comondú No.210. Col. Bellavista. C.P. 23050, La Paz, Baja California Sur, México. e-mail: gcuellar@cibnor.mx**

Francisco Arreguín-Sánchez. **Biólogo, Instituto Politécnico Nacional (IPN), México. Maestro en Ciencias en Biología Marina y Doctor en Ciencias Marinas, CINVESTAV Mérida - IPN, México. Director e investigador, CICIMAR - IPN. e-mail: farregui@ipn.mx**

Sergio Hernández-Vázquez. **Biólogo, IPN, México. Maestro en Ciencias Pesqueras, CICIMAR-IPN. Doctor en Ecología Marina, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), México. Investigador, CIBNOR. e-mail: shernan@cibnor.mx**

Daniel B. Lluch-Cota. **Biólogo, IPN, México. Maestro en Ciencias Marinas, CICIMAR-IPN, México. Doctor en Ciencias, CIBNOR, México. Investigador, CIBNOR. e-mail: dblluch@cibnor.mx**

en el ecosistema de esta región. Los estudios realizados dentro de la zona SO del Golfo de México en el lapso de operaciones de esta industria han sido discontinuos en el tiempo y el espacio, careciéndose de información consistente y previa al inicio de sus operaciones y de controles adecuados en el seguimiento de las actividades petroleras y el impacto en el ambiente y sus componentes bióticos. Ello contrasta con la experiencia tenida en el NO del Golfo de México (Hernández-Arana, 2003), donde existe un programa permanente que ha monitoreado las actividades de la industria petrolera de los EEUU y que data de varios años atrás, a través de *The Gulf of México Offshore Operations Monitoring Experiment* (GOOMEX), así como de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

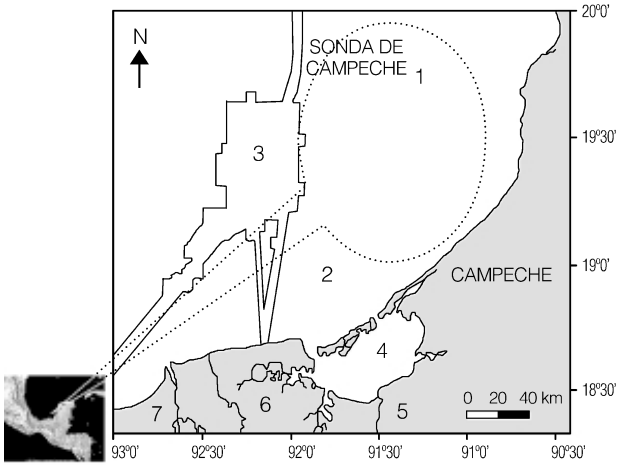

Figura 1. Área de estudio en la Sonda de Campeche, México. 1: Banco de Campeche (plataforma carbonatada), 2: Bahía de Campeche (plataforma terrígena), 3: Área a evitar y de plataformas marinas, 4: Laguna de Términos, 5: Río Palizada, 6: Ríos San Pedro y San Pablo, 7: Ríos Grijalva y Usumacinta. Modificado de: Hernández-Arana (2003)

De los trabajos realizados en la parte SO del Golfo de México tendientes a describir tales impactos destacan los relativos a la meiofauna y macroinfauna bentónica (De Jesús-Navarrete, 1989; Ortiz, 1990; Gold-Bouchot y Fiers, 1991; Herrera, 1992; Sánchez, 1995; Hernández-Arana, 2003), los referentes a comunidades bentónicas ubicadas en afloramientos naturales y su relación con la presencia crónica de hidrocarburos (González-Macías, 1997), los de presencia y concentración de hidrocarburos en sedimentos e impactos en grupos de organismos (Soto *et al.*, 1982; Botello, 1987; González, 1990; González *et al.*, 1992; De Jesús-Navarrete, 1993; PEMEX, 1993; Vázquez-Botello *et al.*, 1993; Gold-Bouchot *et al.*, 1999) y los relativos a bacterias hidrocarbonoclásticas (Lizárraga-Partida *et. al.*, 1982, 1991; Lizárraga-Partida, 1996).

El presente trabajo tiene como objetivo conjuntar la información relacionada al tema y presentar una revisión de las actividades de la industria petrolera costa afuera y el ecosistema marino de la Sonda de Campeche, considerando las diversas actividades, instalaciones de riesgo y fuentes de impacto que inciden con diversos tipos de contaminantes emitidos y que podrían implicar impactos al ecosistema como medio receptor y en función de los grupos biológicos asociados.

Área de Estudio

La Sonda de Campeche se localiza en la parte sur del Golfo de México, entre dos provincias geológico-sedimentarias (Antoine y Gilmore, 1970): al oeste la provincia "Bahía de Campeche" con sedimentos de tipo terrígeno-clástico proveniente del sistema fluvial (limo-arcillosa); y al este la provincia denominada "Banco de Campeche", caracterizada por sedimentos calcáreos provenientes de la plataforma carbonatada de Yucatán, que se extiende en un área de aproximadamente 90000km^2 desde los 200m de profundidad hasta la línea de playa. La zona de interés se ubica entre los 19º00' y 20º15'N y los 91º00' y 92º30'W (Figura 1).

Sus características de mayor importancia ecológica son la circulación litoral, el intercambio de aguas oceánicas y costeras, la descarga fluvial, y la transición de materiales terrígenos y de sedimentos calcáreos (Sánchez-Gil *et al.*, 1981; Yáñez-Arancibia y Sánchez-Gil, 1983). Estas características condicionan un sistema sedimentario y comunidades biológicas dominadas por organismos detritívoros, lo cual es importante cuando se busca establecer los problemas asociados a las actividades petroleras y se pretende medir los cambios en el tiempo y espacio y los límites máximos para la absorción de los impactos (González-Macías, 1997).

El clima dominante es Amw, caliente subhúmedo con lluvia en verano, temperatura media anual alrededor de 26°C y la precipitación promedio oscila entre 1100 y 2000mm (García, 1973). Los patrones de circulación se establecen con base a una rama de la Corriente de Lazo, la cual forma un giro ciclónico dentro de la Sonda de Campeche (Capurro, 1972). Las corrientes, a una distancia no mayor de 180km mar adentro, están influenciadas por los vientos dominantes: en verano (octubre a febrero) se dirigen al Noroeste y en invierno cambian hacia el Este (marzo-abril hasta agosto). Este cambio se ve influenciado por el flujo de agua proveniente de la Corriente de Lazo, que al mezclarse con el giro ciclónico lo desvía hacia el Este (Monreal-Gómez y Salas de León, 1990; Martínez-López y Pares-Sierra, 1998), si bien persiste todo el año a través de la parte norte de la región carbonatada. En la parte sur de la plataforma las interacciones frontales ocurren entre las descargas de los ríos y el agua oceánica (Czitrom *et al.*, 1986; Carranza-Edwards *et al.*, 1993).

La Sonda de Campeche, en un área de 8000km^2, cuenta con el 90% de las instalaciones para la extracción y el procesamiento del petróleo crudo y gas natural que hay en las costas del Suroeste del Golfo de México: un total de 200 instalaciones para diferentes propósitos y que incluyen, dentro de nueve campos petroleros principales, 185 plataformas de producción (IMP, 2001a; PEMEX, 2003).

La Industria Petrolera en la Sonda de Campeche

PEMEX ha dividido operativamente esta zona en dos regiones, la Región Marina Noreste (RMNE) y la Región Marina Suroeste (RMSO). En ambas regiones (Figura 2) se realiza la exploración de nuevos yacimientos y producción de aceite y gas de campos petroleros localizados en la plataforma continental y talud del Golfo de México, así como el transporte y comercialización de estos hidrocarburos a los centros de venta (IMP, 2001a).

La infraestructura requerida para el manejo de crudo y gas está integrada por complejos de plataformas (Cantarell, Ek-Balam y Ku-Maloob-Zaap en RMNE, y Abkatún y Pol-Chuc en RMSO), con 1508km lineales de ductos marinos a través de los cuales la RMNE distribuye los productos obtenidos hacia un terminal marino monoboya costa afuera ubicada en Cayo de Arcas, donde se realiza la carga de petróleo crudo hacia sus destinos de exportación. En este terminal opera un promedio anual de 500 buques

tanques, cuyos tiempos de residencia oscilan entre 12 a 60h. Otro elemento a considerar son las zonas restringidas, en un radio de 500m en la zona de influencia de las plataformas petroleras, establecidas con la finalidad de evitar riesgos por y para las actividades pesqueras, y que abarcan en conjunto 1250km^2 (PEMEX, 1999; IMP, 2000; IMP, 2001a).

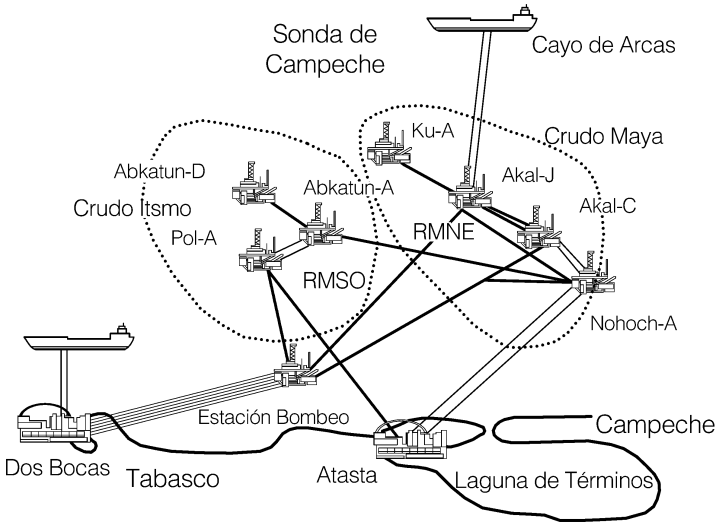

Figura 2. Esquema de las instalaciones costa afuera: complejos de plataformas, oleoductos y monoboyas para la carga de buques tanque. Las líneas claras indican oleoductos, las gruesas gasoductos. Fuente: PEMEX, 2002a

Producción de Petróleo y Gas Natural

En esta región, en el lapso de 1990 a 2002, la producción de petróleo crudo creció 30%, pasando de 1793,7 a 2604Mbd. Por su parte, la producción de gas natural creció 3% en el mismo periodo, de 1117,6 a 1451,8MMpcd (PEMEX, 2001; PEMEX, 2003). De la producción total del año 2002, la RMNE produjo 2152Mbd y 831,2MMpcd, y la RMSO produjo 452 Mbd y 620,6MMpcd (PEMEX, 2003).

En la Figura 3 se muestra la evolución de la producción de crudo y gas natural para ambas regiones marinas en el periodo señalado. Puede observarse que el crecimiento ha sido sostenido para la RMNE en ambos rubros, producción de crudo y gas, mientras que en la RMSO el ritmo de producción ha ido decreciendo. En consecuencia, puede suponerse que la mayor presión hacia el entorno marino y sus componentes estaría dado, principalmente, por las actividades desarrolladas en la RMNE.

Caracterización de los crudos producidos en la Sonda de Campeche

En la RMNE se produce principalmente crudo pesado ("Maya") y en la RMSO únicamente crudo ligero ("Itsmo"). Esta diferencia es importante, ya que los componentes de cada tipo de petróleo poseen características específicas que influyen en la predicción del comportamiento del petróleo (procesos de intemperismo), el riesgo e impacto que estos poseen hacia los recursos naturales (toxicidad y potencial de bioacumulación) y la velocidad de recuperación de los hábitats dañados y grupos de especies asociados (NOAA, 1992b; NOAA, 1993; Dicks, 1999; IMP, 2000). Las diferencias más significativas entre ambos tipos de petróleo se presentan en la Tabla I.

Cuando se presenta la eventualidad de un derrame, el tipo de petróleo y su comportamiento da pauta para su clasificación (NOAA, 1992b). Por ejemplo, el tipo "2" (crudos ligeros) incide en la "petrolización" de recursos intermareales con contaminación de corto plazo, lo que puede implicar impactos submareales. Para atender este tipo de derrames no es necesaria la dispersión del petróleo y su limpieza puede ser muy efectiva. En cambio, el tipo "4" (crudos pesados) implicará una fuerte contaminación probable de áreas intermareales y posiblemente contaminación de largo plazo. En estos casos la dispersión química rara vez es efectiva, y la limpieza de las líneas de costa es dificultosa bajo todas las condiciones.

En el área de interés, las altas temperaturas de esta zona tropical favorecen el fenómeno de evaporación del petróleo y su ulterior fotooxidación, lo que puede llegar a remover más de la mitad del petróleo en caso de derrame accidental. Otras particularidades son menos ventajosas, como la existencia de un régimen pluvial que puede ocasionar un acarreo de petróleo de los campos terrestres hacia los ríos, lagunas y la zona costera. Por su parte, los vientos locales pueden acelerar la dispersión, emulsificación y biodegradación del petróleo, y provocar una resuspensión de sedimentos observable hasta por 50m en la columna de agua (Lizárraga, 1996).

Relación entre Producción Petrolera y Emisión de Contaminantes

Como parte del proceso de producción del crudo, en ambas regiones de la Sonda de Campeche se incorporan al ambiente marino vía atmosférica gases y partículas, se derraman (y/o fugan) hidrocarburos, y se emiten a la atmósfera gases de efecto invernadero (CO_2). En la Tabla II se presenta una comparación de las emisiones durante 2001 y 2002. Puede apreciarse una disminución en las emisiones de algunos contaminantes, pero incrementos (de 60% en la RMSO) en otras emisiones como las de compuestos orgánicos volátiles (COV) y de partículas en ambas regiones, principalmente en la RMNE, donde se duplica su emisión. Es de destacar que el número de derrames de hidrocarburos y la cantidad derramada han disminuido considerablemente.

Al respecto, desde 1999 PEMEX inició la certificación

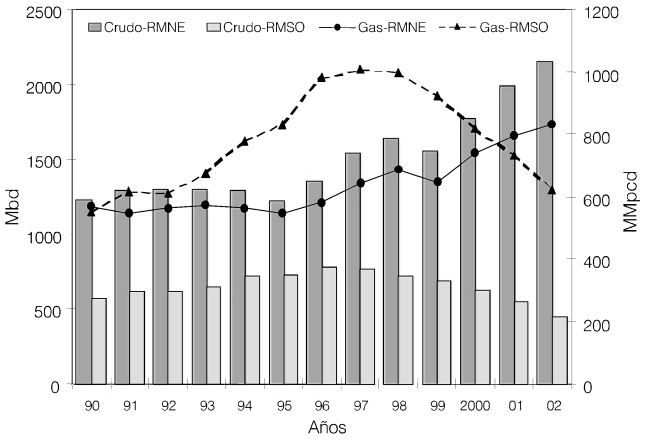

Figura 3. Producción de petróleo crudo y gas natural en las (1990-2002) regiones marinas de la Sonda de Campeche, México (1990-2002). Mbd: miles de barriles diarios, MMpcd: millones de pies cúbicos diarios, RMNE: Región Marina Noreste, RMSE: Región Marina Sureste. Fuente: PEMEX (2003).

de sus instalaciones de acuerdo con la norma ISO 14001 de Sistemas de Gestión Ambiental, contando ya para el año 2001 con 154 certificados de industria limpia en el área de exploración y producción (PEMEX, 2000; 2002b). Las auditorias y las evaluaciones ambientales a que es sometida la operación de la industria petrolera parecen haber ayudado a garantizar que los sistemas de gestión que sustentan el logro de estos objetivos estén funcionando correctamente, y por tanto a evitar en lo posible accidentes en la operación (Guédez-Mozur *et al*., 2003).

Caracterización del Impacto por Petróleo en la Sonda de Campeche

El estudio de las relaciones entre actividad industrial, fuentes de contaminación, contaminantes e impactos se realizó de acuerdo con los siguientes criterios: tipo de actividad industrial específica; zona de riesgo, instalación de impacto identificada y operación causante del impacto, operación específica de la instalación contaminante, contaminantes vertidos, medio receptor dentro del ecosistema, grupo biológico impactado, efectos del contaminante e intensidad de impacto sobre el grupo biológico.

A partir de la información obtenida se construyeron tablas informativas de impacto para cada actividad (perforación, explotación y producción y transporte) de la industria, las que fueron adecuadas a las necesidades del presente análisis (Tablas III a VI).

Dentro de las actividades desarrolladas por la industria, ciertos impactos son generados durante la operación normal de algunas instalaciones (estaciones de rebombeo, quemadores, tráfico marino, estaciones de embarque, buques tanque), y otros impactos obedecen a accidentes de diversa magnitud (perforación, pozos, ductos). Destaca entre los últimos el accidente del pozo IXTOC-I, ocurrido en 1979, y que durante nueve meses derramó cerca de 560 millones de litros de petróleo (3522400bb de 159l), siendo considerado el mayor accidente petrolero costa afuera de la Sonda de Campeche (NOAA, 1992a). Otros derrames de consideración ocurridos en la zona son los de los campos de Abkatun en 1986 (no se determinó la magnitud del derrame) YUM II/Zapoteca en 1987 (58640bb; NOAA, 1992a; PEMEX, 1993), y Och en 1988 (5307bb; PEMEX, 1993).

Mención especial merecen los efectos del Ixtoc-I debido a la magnitud del derrame y a su potencial de generación de impactos persistentes vía la incorporación de hidrocarburos a los sedimentos. No obstante, las concentraciones halladas en este compartimiento (100ppm) no se reflejaron en las concentraciones de hidrocarburos totales de diversos organismos dermesales y bentónicos, ni en su mortalidad. En cambio, sus efectos se reflejaron primordialmente en la alteración de los estuarios y lagunas costeras, más vulnerables a la contaminación, influyendo importantemente en áreas de reproducción y crecimiento de

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL IMPACTO DE LOS TIPOS DE PETRÓLEO PRODUCIDOS EN LA SONDA DE CAMPECHE, MÉXICO

Comportamiento y Riesgo	Crudo Tipo Itsmo (Ligero)	Crudo Tipo Maya (Pesado)
Evaporación	Rápida y completa (24h)	Casi no hay pérdida
Solubilidad	Alta	Muy baja
Toxicidad	Alta y aguda (corto plazo)	Potencial y crónica (largo plazo)
Potencial de bioacumulación	Sin potencial	Con potencial (vía absorción en sedimento)
Persistencia en sedimento	Ninguna	Largo Plazo
Tasa de Degradación	Rápida	Lenta
Tipo de derrame* (cuando se presenta)	2	4

***** Caracterización basada sobre propiedades y comportamiento en el medio (NOAA, 1992b).

TABLA II
EMISIÓN DE CONTAMINANTES VERTIDOS EN LAS REGIONES MARINAS DE LA SONDA DE CAMPECHE, MÉXICO, A PARTIR DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO (2001 Y 2002)

		Emisiones a la atmósfera (ton)				Derrames de Hidrocarburos		
		SO_x	NO_x	COV	Partículas	Nº total	Total derramado (ton)	Emisiones de CO_2 (ton x 10^6)
2001	RMNE	104,901	11,747	42	212	28	69	6,09
	RMSO	20,711	5,405	125	88	1	369	1,57
2002	RMNE	75,799	10,252	41	554	25	8	4,74
	RMSO	7,481	5,274	201	100	2	261	1,46

Fuente: PEMEX, 2003; PEMEX, 2002b.

TABLA III
IMPACTO DE LA INDUSTRIA PETROLERA POR LA ACTIVIDAD DE PERFORACIÓN EN LA SONDA DE CAMPECHE

Instalación/operación causante	Acción contaminante	Contaminantes emitidos*
Pozos de perforación	Derrames de lodo y recortes de perforación	Metales pesados (Ba, y niveles bajos de Cr, Fe, Ca, V, Ni y Zn), HAPs, COVs, HTP

Impacto			
Medio receptor	Grupos biológicos afectados	Efecto sobre los grupos biológicos	Intensidad impacto
Sedimento	Meiobentos	Mortalidad	Baja a media
	Epifauna	Bioacumulación	Bajo riesgo potencial
Medio marino	Camarón	Bioacumulación	Bajo riesgo potencial
	Lenguado	Reproducción	Baja

* En negritas los contaminantes que se consideran de riesgo potencial (PEMEX, 2002a).

Abreviaturas de contaminantes	
HAP	hidrocarburos aromáticos policíclicos
SOx	óxidos de azufre
COV	compuestos orgánicos volátiles
CO_2	dióxido de carbono
HTP	hidrocarburos totales del petróleo
HC	hidrocarburos
NOx	óxidos de nitrógeno
H_2S	ácido sulfúrico

TABLA IV
IMPACTO DE LA INDUSTRIA PETROLERA POR LA ACTIVIDAD DE EXPLOTACIÓN Y PRODUCCIÓN EN LA REGIÓN MARINA NOROESTE DE LA SONDA DE CAMPECHE

Instalación/operación causante	Acción contaminante	Contaminantes emitidos*
Pozos petroleros	Derrames de crudo y agua de producción	**HAP**, COV, **HTP** y salinidad
Estaciones de rebombeo	Escape de diesel y gas	SOx, NOx, CO, VOC, H_2S, CO_2, HC y partículas
Quemadores	Quema de gas	H_2S, CO_2, HC y partículas
Tráfico marino	Combustión interna	HC, SOx, Nox, CO_2
Ductos	Derrame de petróleo crudo	**HAP**, **COV**, **HTP** y salinidad

Impacto

Medio receptor	Grupos biológicos afectados	Efecto sobre los grupos biológicos	Intensidad impacto
Sedimento	Meiobentos	Mortalidad	Baja a media
	Bentos	y bioacumulación	Bajo riesgo potencial
Medio marino	Camarón	Bioacumulación	Baja
	Fitoplancton	Tasa fotosíntesis	Toxicidad baja, largo plazo
	Zooplancton	Reproducción, reducción biomasa	Reducción 4 órdenes magnitud
	Ictioplancton	Mortalidad	Baja
Atmósfera	n.e.	n.e.	n.e.

n.e.: no evaluada
* En negritas los contaminantes que se consideran de riesgo potencial (PEMEX, 2002a).

TABLA V
IMPACTO DE LA INDUSTRIA PETROLERA POR LA ACTIVIDAD DE EXPLOTACIÓN Y PRODUCCIÓN EN LA REGIÓN MARINA SUROESTE DE LA SONDA DE CAMPECHE

Instalación/operación causante	Acción contaminante	Contaminantes emitidos*
Pozos petroleros	Derrames de crudo y agua de producción	**HAP**, COV, **HTP** y salinidad
Quemadores	Quema de gas	H_2S, CO_2, HC y partículas
Tráfico marino	Combustión interna	HC, SOx, Nox, CO_2
Ductos	Derrame de petróleo crudo	**HAP**, **COV**, **HTP** y salinidad

Impacto

Medio receptor	Grupos biológicos afectados	Efecto sobre los grupos biológicos	Intensidad impacto
Sedimento	Meiobentos	Mortalidad	Baja a media
	Bentos	y bioacumulación	Mínimo
Medio marino	Fitoplancton	Tasa fotosíntesis	Toxicidad baja, corto plazo
	Zooplancton	Disminución biomasa	Reducción 4 órdenes magnitud
	Ictioplancton	Mortalidad	Baja
Atmósfera	n.e.	n.e.	n.e.

n.e.: no evaluada
* En negritas los contaminantes que se consideran de riesgo potencial (PEMEX, 2002a).

diversas especies de importancia pesquera (Soto *et al*., 1982; Botello, 1987; Botello *et al*., 1996.

El accidente del IXTOC-I produjo conciencia del riesgo potencial de las actividades de la industria petrolera costa afuera sobre el medio ambiente marino, del papel predominante de las corrientes oceánicas sobre el comportamiento de dispersión de la pluma, y del proceso de adsorción al material planctónico como un mecanismo de sedimentación del petróleo hacia el compartimiento bentónico (Boehm y Fiest, 1982). De hecho, es a partir de este suceso que la NOAA desarrolló e implementó su primer programa de contingencia contra accidentes petroleros costa afuera (NOAA, 1992b).

En general los efectos de corto plazo de los derrames de petróleo sobre las especies y comunidades marinas son bien conocidos y predecibles. Por ejemplo, investigaciones extensivas y detalladas de estudios post derrame han mostrado que varios componentes del medio marino son altamente resilentes a cambios adversos en el corto plazo en el medio en el cual viven y que, como consecuencia, un derrame mayor raramente causará efectos permanentes (Dicks, 1999). Menos conocidos son los posibles efectos de largo plazo (sub-letal) sobre las poblaciones, así como los efectos variables debidos a las particularidades de los ambientes impactados. Para la zona de estudio, además, los impactos varían entre regiones con relación al tipo de crudo derramado. En la RMNE (crudo pesado) los efectos reportados en general son de baja toxicidad y de largo plazo, ya que la mayoría de sus componentes son ceras, asfaltenos y compuestos polares; éstos no tienen gran significación en términos de bioaprovechamiento o toxicidad, pero su persistencia en sedimentos es de largo plazo debido a sus lentas tasas de degradación (casi no hay pérdida por evaporación y casi no contiene fracción soluble en agua). En contraste, en la RMSO (crudo ligero) los efectos esperables son de alta toxicidad en el corto plazo, debido a que contienen hidrocarburos monoaromáticos (benceno, tolueno, xileno) los cuales son tóxicos y poseen significativa solubilidad en agua que incrementa su potencial de bioacumularse rápidamente y en concentraciones mayores, a la vez que se retienen por periodos más largos en los tejidos animales (NOAA, 1992b; Botello *et al*., 1996, NAS, 2003).

En ambos casos, el efecto variará según el grupo biológico y el nivel de integración considerado. Las respuestas pueden, por ejemplo, manifestarse al nivel bioquímico y celular, así como a nivel de organismo, que incluiría la integración de respuestas fisiológicas, bioquímicas y conductuales; a nivel poblacional, incluyendo alteración en la dinámica poblacional y a nivel de comunidad, resultando en alteraciones en la estructura y dinámica del ecosistema (Kennish, 1997; NAS, 2003).

Los trabajos publicados sobre concentración de hidrocarburos en la parte suroeste del Golfo datan desde 1978. Los resultados inicialmente obtenidos mostraron predominancia del número de carbonos impares de n-alcanos, lo cual sugirió que los hidrocarburos eran de origen biogénico (plantas terrestres y organismos marinos), concentraciones totales de hidrocarburos menores a 70ppm, características de áreas costeras marinas impolutas (Hedges y Parker, 1976; Botello *et al*., 1982). Mediciones posteriores

han mostrado que estas concentraciones se han ido incrementando conforme lo han hecho las actividades de producción del petróleo.

Entre los contaminantes con mayor potencial de impacto están los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), los compuestos orgánicos volátiles (COV), y los hidrocarburos totales del petróleo (HTP). Los primeros tienen alto potencial carcinogénico, mutagénico y teratogénico en organismos acuáticos (Espina y Vanegas, 1996; Stout *et al*., 1998); los segundos contribuyen al efecto invernadero y están involucrados en la formación directa de ozono sobre el nivel del suelo e indirectamente de la lluvia ácida, además de que algunos compuestos individuales son tóxicos, carcinogénicos, mutagénicos o bioacumulativos (Espina y Vanegas, 1996; Environment Canada, 2003); y los últimos presentan diversos efectos sobre flora y fauna (NOAA, 1992b; IPIECA, 1997).

Con relación al fitoplancton, los derrames de petróleo pueden afectar temporalmente la tasa fotosintética y como consecuencia la productividad primaria. En altas concentraciones, los hidrocarburos son tóxicos para casi todo el fitoplancton y pueden causar su muerte mientras que, paradójicamente, las bajas concentraciones pueden incrementar la producción primaria (Kennish, 1997). De los estudios realizados en la zona no ha concluido si las diferencias florísticas registradas durante los periodos de derrames petroleros se debieron a los hidrocarburos (Soto *et al.*, 1982), al cambio en densidad del zooplancton, o a eutroficación de otro tipo, ya que el fitoplancton presenta una alta variabilidad espaciotemporal natural en sus poblaciones, así como una correlación con los pulsos de descargas ribereñas.

El zooplancton marino es quizá el grupo que menos atención ha recibido en los estudios efectuados en la Sonda de Campeche, si bien se sabe que, en general, los hidrocarburos afectan adversamente la fertilización, el desarrollo embrionario y la alimentación. Al igual que en el caso del fitoplancton, los efectos *in situ* son difíciles de evaluar por las fluctuaciones naturales del zooplancton, así como por los posibles efectos indirectos de los hidrocarburos derivados de la disminución de los productores primarios durante un derrame y la consecuente alteración de la cadena trófica de organismos herbívoros (NOAA, 1992b; Botello *et al*., 1996; PEMEX, 2002a).

El ictioplancton es un grupo particularmente sensible a los derrames de hidrocarburos. El contacto de la superficie de huevos y larvas con el petróleo puede ser letal, e incluso en dosis subletales comúnmente se producen daños que repercuten en un desarrollo anormal, en reducción en el crecimiento, eclosión prematura o tardía y en anormalidades celulares (Kennish, 1997). No obstante, no existe evidencia definitiva que el petróleo induzca mortalidad de peces que pudieran resultar en efectos significativos al nivel poblacional. Al respecto, cabe recordar que las mortalidades de huevos o estadios jóvenes de vida, previos a las etapas críticas para el reclutamiento, son con frecuencia de poca significación, comparadas con las variaciones poblacionales debidas a otros factores como la depredación y la variabilidad ambiental (Houde *et al*., 1979; Clark, 1997; Dicks, 1999). Así, pese a diversos estudios que han documentado la presencia de larvas de recursos pesqueros importantes en áreas de explotación petrolera, la información generada no ha permitido hacer inferencias sobre el grado de perturbación de dichas poblaciones ícticas derivado de esta industria (PEMEX, 2002a).

El necton marino, debido a su movilidad, suele ser capaz de evitar el contacto con el petróleo durante los derrames. En caso contrario los efectos pueden ser letales, al afectar las branquias y provocar muerte por asfixia. Los efectos subletales se manifiestan por cambios en el corazón, hiperplasia de las branquias, hipertrofia del hígado, reducción del crecimiento, erosión de las espinas, daño en el sistema endocrino y modificación del comportamiento en aspectos como la alimentación, migración, reproducción, natación y hábitos crípticos (NOAA, 1992a; Kennish, 1997; NAS, 2003). Al igual que en otros grupos analizados, la información disponible no

TABLA VI
IMPACTO DE LA INDUSTRIA PETROLERA POR LA ACTIVIDAD DE TRANSPORTE EN CAYO DE ARCAS, SONDA DE CAMPECHE

Instalación/operación causante	Acción contaminante	Contaminantes emitidos*
Estaciones de embarque	Derrames de crudo	**HAP**, COV, **HTP** y salinidad
Buques tanque	Quema de gas	CO_2, H_2S, SO_X, NO_X y COV

Impacto			
Medio receptor	Grupos biológicos afectados	Efecto sobre los grupos biológicos	Intensidad impacto
Medio marino	Fitoplancton	Tasa fotosíntesis	Toxicidad alta a corto plazo
	Zooplancton	Disminución biomasa	Baja
Atmósfera	n.e.	n.e.	n.e.

n.e.: no evaluada
* En negritas los contaminantes que se consideran de riesgo potencial (PEMEX, 2002a).

TABLA VII
CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO DE LAS EMANACIONES NATURALES DE CRUDO ("CHAPOPOTERAS") EN LA SONDA DE CAMPECHE

Potencial de emanación	Alto (A)*	Medio (B)*	Bajo (C)*	Medio receptor	Grupo biológico impactado**	Intensidad y efecto del impacto**
Profundidad en sedimento (m)	5	6-100	101-400	Sedimento	Meiobentos	Crónico. Reducción de Diversidad y Biomasa. Baja Mortalidad. Sucesión de Comunidades.
Área (km^2)	183,41	1581,6	14668			
Factor de Emanación ($m^3/10^3km^2$)	30	15	2,2			
Volumen de Emanación (m^3/día)	5,5	23,72	32,27			
Volumen regional				61m^3/día 22443m^3/año		

Fuentes: *PEMEX (2002a).**Gold y Fiers (1991), González-Macías (1997), PEMEX (2002a), Hernández-Arana (2003).

hace posible el establecer la relación causa-efecto entre las actividades de la industria petrolera y la afectación del grupo de interés (PEMEX, 2002a). Por ejemplo, existen evidencias de que en la zona de exclusión (donde se ubican las plataformas) es mayor la diversidad y la biomasa que zonas de pesca aledañas, lo que puede atribuirse tanto al efecto de arrecife artificial (Soto *et al*., 1982; Gerardo Gold-Bouchot, comunicación personal) que brindan las estructuras físicas de las plataformas petroleras, como a la ausencia de actividades pesqueras (Houde, 1979; PEMEX, 2002a). Por otra parte, no existen evidencias de que cualquier derrame haya matado suficientes peces para afectar la población adulta, pero sí se ven afectadas las oportunidades de pesca para las pesquerías comerciales en la zona de impacto (NOAA, 1992a). Algunas especies de peces, que habitan en las cercanías de las plataformas petroleras, pueden acumular en sus tejidos pequeñas cantidades de compuestos derivados del petróleo que no les afectan a ellos, pero sí al consumo humano (Houde *et al*., 1979), con efectos teratogénicos, mutagénicos y carcinogénicos que van desde irritación de la piel hasta cáncer (tumores hematológicos como anemia y leucemia, de esófago y de recto) y defectos congénitos (Kennish, 1997).

Diversos resultados indican que las comunidades bentónicas han sufrido cambios en cuanto a disminución de biomasa, diversidad y cambio en la composición de especies, presentándose casos de sucesión por especies oportunistas (De Jesús-Navarrete, 1989; Ortiz, 1990; Gold-Bouchot y Fiers, 1991; Herrera, 1992; Sánchez, 1995; Hernández-Arana, 2003). Si bien este proceso ha sido reconocido como indicador de perturbaciones ecológicas asociadas a la industria petrolera (p.e. González-Macías, 1997), la investigación ecológica en el sureste del Golfo de México ha enfatizado que las tormentas de invierno y escorrentías de ríos son los procesos físicos más importantes que influyen en la estructura de la comunidad bentónica, su función e interacciones a lo largo y ancho de las plataformas carbonatada y terrígena (Yáñez-Arancibia, 1983; Hernández-Arana, 2003). Dado que estos procesos también han experimentado cambios de largo plazo, sus efectos ecológicos en cuanto a la estructura y función de las comunidades bentónicas no son fácilmente discernibles de los impactos potenciales derivados de la industria petrolera.

Los estudios sobre las poblaciones de camarones peneidos en la zona de interés han indicado que los hidrocarburos provenientes del petróleo no producen efectos detectables que se puedan adjudicar a las actividades petroleras; las concentraciones registradas en tejidos de *Farfantepenaeus aztecus*, *F. duorarum* y *Litopenaeus setiferus* no se consideraron críticas, aunque de haber bioacumulación, ésta podría afectar a los que depredan sobre estos organismos (Soto *et al*., 1982; Botello *et al*., 1992).

Finalmente, en estudios efectuados en el campo se ha encontrado cierta correlación entre el nivel de concentración de petróleos en el medio ambiente y la distribución de la biomasa y de la productividad de los ecosistemas (Espina y Vanegas, 1996). No obstante, establecer una relación causa-efecto es difícil, entre otras razones porque muchas especies, principalmente peces, muestran marcadas variaciones estacionales tanto en abundancia como en sensibilidad a una cierta presión ecológica natural. Otro aspecto que hace difícil la evaluación de los daños producidos por un derrame es que sólo en contadas ocasiones se cuenta con la información previa de las especies que habitan áreas que fueron afectadas por la presencia de los hidrocarburos. Hasta ahora, los estudios indican que los efectos adversos más graves se manifiestan en las comunidades bénticas, mientras que los peces y las aves son los menos afectados (Botello *et al*., 1996).

Afloramientos Naturales de Crudo

Otra fuente de hidrocarburos dentro de la Sonda de Campeche son los afloramientos naturales de crudo ("chapopoteras"), que se delimitan en una superficie de 16434km^2 y que se ubican en su mayor parte en la RMNE (PEMEX, 2002a). En la Tabla VII se presenta la caracterización de las áreas potenciales de impacto, considerándose a éstas como fuentes puntuales. Existen dos aspectos a considerar sobre los posibles efectos en el ecosistema béntico. Por una parte el petróleo, una fuente de energía altamente reducida, es rápidamente oxidado por microbios, los que a su vez pueden servir como fuente suplementaria de alimento para las cadenas alimenticias bénticas. Por la otra, en concentraciones suficientemente altas los compuestos aromáticos son tóxicos para los organismos marinos (NAS, 2003). En los estudios realizados en la Sonda de Campeche se ha observado que hay cambios en la presencia de especies, especialmente en la comunidad de poliquetos, así como en la diversidad de estas comunidades (González-Macías, 1997). No obstante, debe considerarse que estas fuentes naturales han incidido en su entorno durante miles de años, por lo que las comunidades bentónicas asentadas en esa área pueden tener adaptaciones únicas a este ambiente en particular (NAS, 2003). Además, las emanaciones naturales son muy variables en cuanto a los sitios puntuales en donde ocurren y en términos de los volúmenes derramados. En general, puede suponerse que solo una fracción relativamente menor de las comunidades biológicas estará expuesta al petróleo "fresco" en un momento dado, lo que complica el estudio de los efectos sobre la abundancia de los organismos o la riqueza de especies de la comunidad (Dunaway, 2004; NAS, 2003).

Conclusiones

- Una circunstancia especial de las actividades de exploración y producción está en el hecho de que su localización y relación con los ambientes naturales, frágiles o no, está predeterminada por el yacimiento y la geología del sitio, lo que impide en gran medida tomar decisiones sobre su ubicación o la utilización de otros sistemas naturales.

- Se carece de información previa al inicio de las actividades de la industria petrolera sobre las condiciones generales del ecosistema y sus componentes, así como de controles apropiados de esta información y de la generada subsecuentemente y en forma parcial.

- Con la información obtenida, no es posible concluir la magnitud del efecto de la industria petrolera en el ecosistema de la Sonda de Campeche.

- En relación a las pesquerías, y en el mismo sentido del punto anterior, tampoco se concluye que el descenso en las capturas pueda ser atribuido al impacto de esta industria.

- Los efectos de los derrames petroleros en los componentes del ecosistema se consideran puntuales, pero no se ha establecido la magnitud de los efectos a largo plazo.

- Es difícil distinguir el impacto ambiental atribuible a la industria petrolera en la región de aquellos causados por factores naturales (cambios climáticos, hidrográficos, aflojamientos naturales de petróleo) e impactos antropogénicos (pesca comercial, contaminaciones industriales).

- Debe tomarse en cuenta el papel de la oceanografía física y su papel en el transporte y distribución de la carga de contaminantes, tanto provenientes del continente como los presentes en el medio marino.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado como parte de un Proyecto Institucional del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR, México) y el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), denominado "Investigación sobre el efecto en el recurso pesquero de la explotación y producción de petróleo en sistemas marinos". Los autores agradecen al IMP la información proporcionada para la elaboración del presente estudio. J. Angel García-Cuéllar recibe una beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (Nº 137947), así como del IMP (Proyecto FIES-01-02-VI) en la realización de sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

Antoine JW, Gilmore JC (1970) Geology of the Gulf of México. *Ocean Industry 5*: 34-38.

Boehm PD, Fiest DL (1982) Subsurface distributions of petroleum from an offshore well blowout. The Ixtoc-I blowout, Bay of Campeche. *Environ. Sci. Technol. 16*: 67-74.

Botello AV (1987) Vigilancia de los hidrocarburos fósiles en sistemas costeros del Golfo de México y áreas adyacentes. I. Sonda de Campeche. *An. Inst. Cienc. Mar Limnol.* (UNAM) *14:* 45-52.

Botello AV, Castro SA, Guerrero R (1982) Baseline studies for hydrocarbons and organic carbon isotope ratios of recent sediments in the Bank of Campeche before the Ixtoc-I oil spill. En Keith LH (Ed.) *Energy and Environmental Chemistry*. Ann Arbor Science. EEUU. pp. 119-128.

Botello AV, Vélez GP, Toledo A, Díaz-González G, Villanueva S (1992) Ecología, recursos costeros y contaminación en el Golfo de México. *Ciencia y Desarrollo 17*: 28-48.

Botello AV, Díaz G, Villanueva SF, Salazar S (1993) Presence of PAH´s in coastal environments of the southeast Gulf of Mexico. *Polycyc. Arom. Comp.* (Suppl. 3): 397-404.

Botello AV, Ponce Vélez G, Toledo A, Díaz-González G, Villanueva S (1996) Ecología, recursos costeros y contaminación en el Golfo de México. En Botello AV, Rojas-Galaviz JL, Benítez JA, Zárate Lomelí D (Eds.) *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*. EPOMEX. Serie Científica Nº5. Universidad Autónoma de Campeche. México. pp. 25-44.

Capurro AL (1972) La Circulación Oceánica en el Golfo de México. *Memorias IV Congreso Nacional Oceanografía*. México. pp. 3-11.

Carranza-Edwards A, Rosales-Hoz L, Monreal-Gómez A (1993) Suspended sediments in the southeastern Gulf of Mexico. *Mar. Geol. 112*: 257-269.

Czitrom SP, Ruiz RF, Alatarre MA, Padilla AR (1986) Preliminary study of a front in the Campeche Bay, Mexico. En Nihoul JCJ, (Ed.) *Marine Interfaces Ecohydrodynamics*. Elsevier. Amsterdam. Holanda. pp. 301-311.

Clark RB (1997) *Marine Pollution*. 4th ed.. Clarendon Press. Oxford, RU. 215 pp.

CONAPESCA (2002) Anuario Estadístico de la Pesca 2001. SAGARPA. México.

De Jesús-Navarrete A (1989) *Evaluación de los niveles de hidrocarburos totales en los sedimentos de la Sonda de Campeche, México, y su posible efecto sobre la comunidad de nematodos bénticos*. Tesis. CINVESTAV-IPN. Mérida, México. 144 pp.

De Jesús-Navarrete A (1993) Concentración de hidrocarburos totales en los sedimentos de la Sonda de Campeche, México. *Car. J. Sci. 29*: 99-105.

Dicks B (1999) The Environmental Impact of Marine Oil Spills. Effects, Recovery and Compensation. *International Seminar on Tanker Safety, Pollution Prevention, Spill Response and Compensation*. Rio de Janeiro, Brazil. pp. 1-8.

Dunaway ME (2004) *Biological communities near natural oil and gas seeps*. Mineral Management Service. Pacific OCS Region. www.mms.gov/omn/pacific/enviro/seeps2.htm

Environment Canada (2003) An alternate approach to VOC speciation reporting. www.ec.gc.ca/pdb

Espina S, Vanegas C (1996) Ecofisiología y contaminación. En Botello AV, Rojas-Galaviz JL, Benítez JA, Zárate Lomelí D (Eds.) *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*. EPOMEX. Serie Científica Nº5. Universidad Autónoma de Campeche. México. pp. 45-68.

Farrington JW (1985) Oil pollution: a decade of research and monitoring. *Oceanus 28*: 3-22.

Flores-Hernández D, Sánchez-Gil P, Seijo JC, Arreguín-Sánchez F, Eds (1977) *Análisis y Diagnóstico de los Recursos Pesqueros Críticos del Golfo de México*. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Serie Científica, 7. 496 pp.

García E (1973) *Modificaciones al sistema de Clasificación Climática de Köpen*. Instituto de Geografía. UNAM. México. 264 pp.

Gold-Bouchot G, Fiers F (1991) El impacto de la actividad petrolera sobre la meiofauna de la Sonda de Campeche. *JAINA 2*: 7.

Gold-Bouchot G, Zapata-Pérez O, Noreña-Barroso E, Herrera-Rodríguez M, Ceja-Moreno V, Zavala-Coral M (1999) Oil Pollution in the Southern Gulf of México. En Kumpf H, Steidinger K, Sherman K (Eds.) *The Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem. Assessment, Sustainability, and Management*. Blackwell. Masachussets, EEUU. pp. 372-382.

González C, Botello AV, Diaz G (1992) Presence of aliphatic hydrocarbons in sediments and organisms from Campeche Bank, Mexico. *Mar. Pollut. Bull. 24*: 267-270.

González CE (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. ENEP-Zaragoza. UNAM. México. 108 pp.

González-Macías MC (1997) Análisis de la comunidad bentónica en una chapopotera del Golfo de México y sus relaciones con la presencia crónica de hidrocarburos del petróleo. Tesis. UNAM. México. 114 pp.

Guédez-Mozur C, De Armas D, Reyes R, Galván L (2003) Los Sistemas de Gestión Ambiental en la Industria Petrolera Internacional. *Interciencia 28*: 528-533.

Hedges JI, Parker PL (1976) Land-derived organic matter in surface sediments from the Gulf of Mexico. *Geochim. Cosmochim. Acta 40*: 1019-1029.

Hernández-Arana H (2003) *Influence of natural and anthropogenic disturbance on the soft bottom macrobenthic community of the Campeche Bank, Mexico*. Thesis. University of Plymouth. Plymouth, RU. 211 pp.

Herrera RM (1992) *Evaluación de los efectos de los hidrocarburos sobre la comunidad de nematodos bentónicos de vida libre de la plataforma continental de la Península de Yucatán*. Tesis. CINVESTAV-IPN. Mérida, México. 161 pp.

Houde ED, Leak JC, Dowd CE, Berkeley SA, Richards WJ (1979) *Ichthyoplankton Abundance and Diversity in the Eastern Gulf of Mexico*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management Gulf of Mexico OCS Office. New Orleans, LA, EEUU. 546 pp.

IMP (2000) *Anuario Estadístico 2000*. PEP RMNE. Instituto Mexicano del Petróleo. Cd. del Carmen, México. 65 pp.

IMP (2001a) *E-1 Identificación de las actividades no petroleras y los niveles de contaminación asociados que han tenido impacto sobre el medio ambiente*. Instituto Mexicano del Petróleo. México. 104 pp.

IMP (2001b) *E-7 Identificación y análisis de los aspectos socioeconómicos que han sufrido cambios con relación al establecimiento y desarrollo de las actividades petroleras en la región*. Instituto Mexicano del Petróleo. México. 83 pp.

IPIECA (1997) *Biological impacts of oil pollution: fisheries*. Report Series, Vol. 8. International Petroleum Industry Environmental Conservation Association. 28 pp.

Kennish MJ (1997) *Practical Handbook of Estuarine and Marine Pollution*. CRC. Nueva York, EEUU. 315 pp.

Lizarraga-Partida ML (1996) Microbiología del petróleo en el sur del Golfo de México. En Botello AV, Rojas-Galaviz JL, Benítez JA, Zárate Lomelí D (Eds.) *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*. EPOMEX. Serie Científica Nº5. Universidad Autónoma de Campeche. México. pp. 265-277.

Lizarraga-Partida ML, Rodríguez Santiago H, Romero Jarero JM (1982) Effects of the Ixtoc-I blowout on heterotrophic bacteria. *Mar. Pollut. Bull. 13*: 67-70.

Lizarraga-Partida ML, Izquierdo-Vicuña FB, Wong Chang I (1991) Marine Bacteria on the Campeche Bank oil field. *Mar. Pollut. Bull. 22*: 401-405.

Martínez-López B, Pares-Sierra A (1998) Circulation in the Gulf of Mexico Induced by Tides, Wind and the Yucatan Current. *Ciencias Marinas 24*: 65-93.

Monreal-Gómez MA, Salas de León DA (1990) Simulación de la circulación en la Bahía de Campeche. *Geofísica Internacional 29*: 101-111.

NAS (2003) *Oil in the sea III. Inputs, fates and effects*. National Academy of Sciences. The National Academies Press. Washington, DC, EEUU. 265 pp.

NOAA (1992a) *Oil spills, case histories 1967-1991. Summaries of Significant US and International Spills*. Hazardous Material Response and Assessment Division. National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, DC, EEUU. 224 pp.

NOAA (1992b) *An Introduction to Coastal Habitats and Biological Resources for Oil Spill*

Response. Hazardous Material Response and Assessment Division. National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, DC, EEUU. 401 pp.

NOAA (1993) *Shoreline countermeasures manual. Tropical Coastal Environments*. Hazardous Material Response and Assessment Division. National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, DC, EEUU. 101 pp.

Ortiz HM (1990) Los poliquetos de la Sonda de Campeche y canal de Yucatán, su relación con los hidrocarburos. Tesis. CINVESTAV-IPN. Mérida, México. 99 pp.

PEMEX (1993) *Evaluación de la calidad del agua, sedimentos y algunos aspectos biológicos en el litoral del Golfo de México*. Gerencia de Protección Ambiental. PEMEX. México. 139 pp.

PEMEX (1999) *Las Reservas de Hidrocarburos de México, Volumen I. Evaluación al 1 de enero de 1999*. Exploración y Producción. PEMEX. México. 199 pp.

PEMEX (2000) *Seguridad Salud y Medio Ambiente. Informe 2000*. Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental. PEMEX. México. 47 pp.

PEMEX (2001) *Anuario Estadístico 2001*. Exploración y Producción. PEMEX. México. 51 pp.

PEMEX (2002a) *Evaluación de Riesgo Ecológico e Impacto de las Operaciones Industriales (Análisis General)*. Exploración y Producción. PEMEX. México. 257 pp. www.pemex.org.mx

PEMEX (2002b) *Informe Anual de Seguridad, Salud y Medio Ambiente*. Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental. PEMEX. México. 55 pp.

PEMEX (2003) *Anuario Estadístico 2003*. Exploración y Producción. PEMEX. México. 64 pp.

Sánchez GL (1995) *Evaluación del efecto de los hidrocarburos de petróleo sobre la taxocenosis bentónica dominante del Banco de Campeche, México*. Tesis. CINVESTAV-IPN. Mérida, México. 136 pp.

Sánchez-Gil P, Yáñez-Arancibia A, Amescua Linares F (1981) Diversidad, distribución y abundancia de las especies y poblaciones demersales de la Sonda de Campeche (Verano, 1978). *An. Inst. Cienc. Mar Limnol*. (UNAM) *8*: 209-240.

Santiago J, Baro A (1992) Mexico's giant fields, 1978-1988 decade. *Am. Assoc. Petr. Geol. 54*: 73-99.

Soto LA, García A, Botello AV (1982) Study of the penaeid shrimp population in relation to petroleum hydrocarbons in Campeche Bank. *Proc.* 33rd *Ann. Meet. Car. Fish. Inst*. pp. 81-100.

Stout SA, Uhler AD, McCarthy KJ (1998) PAH can provide a unique forensic ´fingerprint´ for hydrocarbons products. *Soil Groundwater Cleanup*. 4 pp.

Vázquez-Botello A, Ponce-Vélez G, Díaz-González G (1993) Hidrocarburos aromático policíclicos (PAH's) en áreas costeras del Golfo de México. *Hidrobiológica 3*: 1-15.

Yáñez-Arancibia A, Sánchez-Gil P (1983) Environmental behavior of Campeche Sound ecological system, off Términos Lagoon, México: Preliminary results. *An. Inst. Cienc. Mar Limnol*. (UNAM) *10*: 117-136.

Yáñez-Arancibia A, Sánchez-Gil P (1986) *Los peces dermesales de la plataforma continental del sur del Golfo de México 1. Caracterización ambiental, ecología y evaluación de las especies, poblaciones y comunidades*. Publicación Especial Nº 9. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. México. 230 pp.

Yáñez-Arancibia A, Sánchez-Gil P (1988) *Ecología de los Recursos Demersales Marinos. Fundamentos en Costas Tropicales*. AGT. México. 228 pp.