

# Transporte atmosférico de Hidrocarburos Fósiles

## Caso: Laguna Sontecomapan, Veracruz

Laura G. Calva B.\*, Rocío Torres A.\* y Alfonso V. Botello.\*\*

\*Lab. Ecosistemas Costeros. Depto. Hidrobiología, UAM-I.

\*\*Lab. Contaminación Marina. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

### Introducción

La contaminación atmosférica se refiere a la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes, que perjudiquen o perturben la vida de la flora y la fauna, así como la salud y el bienestar humano; también se refiere a los compuestos que degraden la calidad del aire, agua, suelo, de los bienes particulares o de los recursos de la nación en general.

La contaminación del aire puede producirse por la presencia de uno o más contaminantes, éstos pueden dividirse en dos categorías: gases y partículas. Los gases como el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono, sulfuro de hidrógeno, humos, neblina, compuestos orgánicos volátiles e hidrocarburos, presentan propiedades de difusión y, normalmente son fluidos amorfos que pueden cambiar al estado sólido o líquido por un efecto combinado de aumento de presión y descenso en la temperatura. Las partículas representan cualquier materia dispersa, sólida o líquida, en la cual los agregados individuales son más grandes que las moléculas simples (alrededor de  $0.0002 \mu\text{m}$  de diámetro) pero más pequeños de  $500 \mu\text{m}$ . La materia particulada con un tamaño menor o igual a  $10 \mu\text{m}$  tiene un interés particular, ya que puede producir efectos sobre la salud humana. Además, las partículas pueden permanecer en la atmósfera desde unos pocos minutos hasta varios meses; las partículas más grandes sedimentan más rápidamente que las pequeñas (Canter, 1999).

Los contaminantes atmosféricos pueden ser dispersados en forma de gases, sólidos y/o vapores y permanecer sin ser transformados o bien, ser alterados químicamente por diversos mecanismos atmosféricos mientras están en el aire (Bravo y Torres, 1996).

Los contaminantes atmosféricos provienen de un gran número y variedad de fuentes antropogénicas que emiten sustancias hacia la atmósfera. Los productos manufacturados son vaporizados, mientras que la materia particulada y polvo son liberados desde las construcciones, minas e industrias; tam-

bién son contaminantes atmosféricos los gases y vapores que son formados a temperaturas altas durante la quema de combustibles fósiles, del mineral fundido y de la manufactura de cemento.

Los combustibles fósiles están formados básicamente por hidrocarburos, algunos además se encuentran enriquecidos con metales potencialmente tóxicos (por ejemplo: Hg, Se, As, Cd, Zn), por elementos radiactivos y compuestos orgánicos; dichos combustibles son el origen de una gran parte de las sustancias antropogénicas presentes en la atmósfera ya que son liberados a la misma durante la ignición, representando la masa más grande de materia prima sujeta a los procesos de combustión a temperaturas altas (ABI, 1981).

El presente trabajo describe la presencia de los hidrocarburos en la atmósfera y como su transporte a través de ésta puede influir en que sean llevados lejos de su fuente de origen hasta los sistemas acuáticos. En particular, se trata el caso de la laguna de Sontecomapan localizada en el Golfo de México, en el Estado de Veracruz.

### Hidrocarburos del petróleo

Los hidrocarburos del petróleo forman parte esencial de la industria petroquímica por ser materia prima, producto y, en muchos casos, subproducto de ésta. La presencia de la mayoría de estos compuestos en el ambiente atmosférico se debe a que son altamente volátiles, por lo que en todas las operaciones involucradas con la industria del petróleo: extracción, bombeo, refinación, transformación, distribución y utilización, existe una emisión potencial de ellos, ya sea como materia prima, como combustible o como componente de algún químico en particular.

### Composición química.

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos que sólo contienen hidrógeno y carbono. En relación a su estructura química pueden dividirse en dos clases: los alcanos (n-normal, ramificado y cíclico) y

los aromáticos: nafteno, mono-, di-, y poli, como por ejemplo los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Connel y Miller, 1984). Las principales fuentes de contaminación por hidrocarburos fósiles tienen origen biogénico, antropogénico y por escurrimientos naturales.

En lo que se refiere a los n-alcanos o hidrocarburos alifáticos (HA), éstos son cadenas lineales de átomos de carbono, cuya solubilidad disminuye y el punto de ebullición se incrementa conforme aumentan los átomos de carbono; los compuestos de un átomo de carbono (metano) hasta diez ( $C_{10}$ -decano) son muy volátiles, por lo que se evaporan fácilmente, del  $C_{11}$  en adelante son líquidos y aceites ligeros, cuya insolubilidad y densidad van aumentando (ceras y parafinas) hasta cadenas de más de 60 átomos de carbono (asfaltenos). Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) están formados de hidrógeno y carbono dispuestos en forma de dos o más anillos bencénicos fusionados con grupos sustituidos, posiblemente unidos a uno o más anillos (Morrison y Boyd, 1990).

Los HAP individuales difieren substancialmente en sus propiedades físicas y químicas, sobre todo, los HAP de peso molecular bajo son más volátiles, solubles en agua y son menos lipofílicos que los de pesos moleculares mayores. Estas propiedades fisicoquímicas determinan en gran medida el comportamiento ambiental de tales compuestos e indican que la transferencia y el reciclamiento de los HAP de bajo peso molecular será más rápido que el de los miembros del otro grupo (Wild y Jones, 1995). Al respecto, Jones *et al.*, (1992) mencionan que los compuestos más volátiles de menor peso molecular predominan entre los HAP atmosféricos de origen pirólítico, existiendo principalmente en fase de vapor.

Los HAP están clasificados entre los 65 contaminantes tóxicos prioritarios en los Estados Unidos de América por la EPA (Agencia de Protección Ambiental). Existen 16 HAP, de los cuales a 8 se les clasifica como posibles carcinogénicos, por ejemplo, el *benzo(a)pireno* y el *dibenzo(a,h)antraceno*, se han asociado a cánceres humanos (Fortner y Sick, 1985; Boffetta *et al.*, 1997; Arcaro *et al.*, 1999). Para la protección de la salud humana, la concentración ideal de los HAP en el ambiente debe ser cero, ya que se tiene una posibilidad de 1 a 100,000 de desarrollar cáncer con una concentración de 0.028 ppb (partes por billón U.S.A., es decir, billón = mil millones) de HAP. Por su parte, Allen *et al.*, (1999) incluyen al *criseno* y *benzo(a)antraceno* como carcinogénicos en animales.

## Comportamiento en la atmósfera.

### 1. Emisión.

Como se ha mencionado, los hidrocarburos de bajo peso molecular son los que con mayor facilidad se volatilizan y se constituyen en contaminantes del aire. Las principales emisiones se deben a la evaporación de gasolinas en los automóviles y vehículos de motor que utilizan dicho combustible, los procesos de refinación, distribución y venta de este producto. Le siguen en importancia los procesos industriales en los que intervienen hidrocarburos y solventes y la pirólisis de combustibles fósiles.

Específicamente, los HAP se forman principalmente por combustión incompleta y pirólisis de materia orgánica. Dichos procesos incluyen la quema de combustibles fósiles, calor residencial y generación de poder, la incineración de desechos municipales sólidos y algunos procesos industriales específicos, tales como la fundición de metales y el craqueo catalítico (fraccionamiento) del petróleo (Bjørseth, 1983). Por lo tanto, estos HAP no siempre son de utilidad industrial, sino que son el producto indeseable de algunos procesos de manufactura. Meharg *et al.*, (1998) por su parte, indican que los incendios que involucran químicos orgánicos producen HAP, por lo que también éstos se originan de la combustión incompleta de una amplia variedad de plásticos, incluyendo el polipropileno.

### 2. Transporte.

Los HAP son identificados por la EPA como "materia orgánica policíclica" o POM, cuyo mecanismo de formación aún no se conoce con certeza. Esta POM no está en forma de gases a temperatura ambiente, sin embargo, su presencia se debe a que está asociada o depositada con el hollín o material carbonáceo que resulta de la combustión incompleta a temperatura alta.

El transporte de los HAP en la atmósfera depende de la dirección y fuerza de los vientos predominantes en una zona determinada. Los HAP durante el transporte atmosférico, desde las fuentes de emisión hasta llegar a los receptáculos, se encuentran asociados a los aerosoles o están presentes en forma gaseosa, dependiendo de sus propiedades como la presión de vapor, el tipo y cantidad de partículas en el aire y de la temperatura del mismo (Bidleman *et al.*, 1990). De la misma manera, estos compuestos orgánicos llegan a las cuencas hidrológicas a través de la deposición húmeda y seca. En el proceso, húmedo se presenta una deposición breve en episodios, en combinación con la precipitación; mientras que la segunda es más dinámica durante el clima seco (Mackay *et al.*, 1986.)

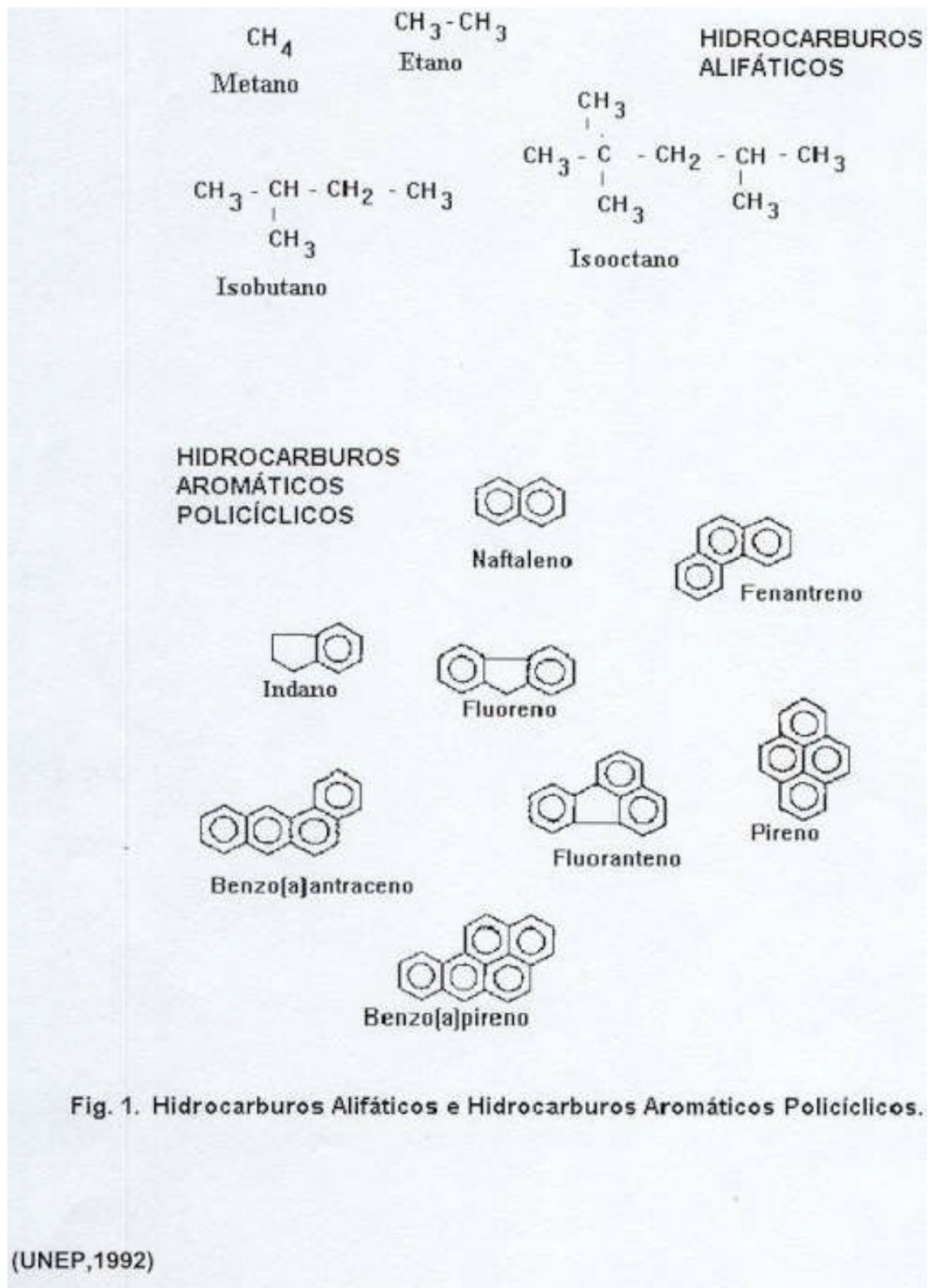


Figura 1. Hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos policíclicos.

En ambientes cercanos a una fuente de combustión, prevalece la depositación seca (sobre la depositación húmeda) para los compuestos que se presentan en grandes extensiones en asociación con partículas, en tanto que la depositación seca y húmeda son aproximadamente de igual magnitud en ambientes alejados (McVeety y Hites, 1988).

En un estudio efectuado en el Mar Mediterráneo Benlahcen *et al.*, (1997) concluyeron que los HAP fueron introducidos al ambiente marino a partir de partículas atmosféricas, principalmente en el caso de los compuestos aromáticos de bajo peso molecular, siendo menor para los HAP de alto peso molecular. Al respecto, Meharg *et al.*, (1998), por su parte mencionan que los HAP son depositados a través de las partículas y que preferentemente ésta se produce para los compuestos más hidrofóbicos.

### 3. Degradación.

Los HAP son susceptibles de degradación en la atmósfera y sus tiempos de residencia en ella pueden estar restringidos a unos pocos días, también, los HAP más ligeros son susceptibles de degradación tanto abiótica como biótica. Generalmente, los HAP conformados por más de 4 anillos bencénicos son más resistentes a la degradación (Wild y Jones, 1995).

### Antecedentes

Los diferentes tipos de emisores de hidrocarburos fósiles que se han descrito anteriormente, se localizan en mayor o menor escala en el Golfo de México. De hecho, en el Estado de Veracruz, específicamente a menos de 100 km de distancia de la laguna de Sontecomapan, se ubican dos de los complejos petroquímicos más importantes en Latinoamérica: Minatitlán y Cosoleacaque.

**Área industrial-urbana de Minatitlán:** se localiza al margen del río Coatzacoalcos y ocupa una superficie estimada en 1400 Has. Minatitlán está a menos de 20 km de la ciudad de Coatzacoalcos, la cual es el asentamiento humano más importante de la región; ambas ciudades conforman la conurbación Coatzacoalcos-Minatitlán, como resultado de la actividad urbano-industrial que en conjunto desarrollan (Torres, 1989).

Minatitlán se ubica río arriba a 20 km de la desembocadura del Coatzacoalcos. Coatzacoalcos se sitúa a la orilla del estuario del Coatzacoalcos y el área costera. Ambas zonas tienen un área aproximada de 77 000 km<sup>2</sup> y se hallan en una planicie. El clima es cálido, con poca variación en la temperatura anual y con lluvias la mayor parte del año; septiembre y octubre registran la mayor precipitación pluvial, por ser la época de “nortes” (Báez, 1986).

Las ciudades de Minatitlán y Coatzacoalcos, se encuentran bajo la influencia de las emisiones de diversos contaminantes (óxidos de nitrógeno, azufre, entre otros) de las industrias situadas en áreas circunvecinas como Jaltipan, Nanchital, Allende, Cosoleacaque, Pajaritos y Cangrejera. Dentro y en los límites de la Cd. de Minatitlán se ubican varias plantas industriales y petroquímicas, las más importantes por volumen de producción son: la refinería “Lázaro Cárdenas”; el complejo petroquímico de Cosoleacaque; la Unidad Minatitlán de Fertilizantes y las plantas de Albamex, Celanese Mexicana y Fenocúmia.

En particular, las instalaciones de la refinería “Lázaro Cárdenas” se localizan en el margen del río Coatzacoalcos y al sur del área urbana de Minatitlán en una zona aproximada de 3 Km<sup>2</sup>. La refinería original data de 1908, sin embargo, las primeras instalaciones han sido desmanteladas (PEMEX, 1971). Desde 1955 a la fecha se han sucedido ampliaciones y modernizaciones. Para 1985 la capacidad de ésta llegaba a 200,000 B/D (barriles por día) de crudo. Dicha actividad industrial ha ocasionado que se considere a Minatitlán como “zona de atención prioritaria por contaminación atmosférica” y como un problema ambiental nacional dada la cantidad y variedad de contaminantes emitidos por la actividad industrial (SEDUE, 1986).

**Complejo petroquímico “Cosoleacaque”:** éste ocupa una superficie de 78 Has y se encuentra localizado en el Km 39 de la carretera costera del Golfo a una altitud de 30 m. s.n.m., dentro del Municipio de Cosoleacaque, Ver., pero enclavado en el perímetro de la Cd. de Minatitlán.

La refinería es la principal fuente de emisión de hidrocarburos alifáticos y alicíclicos (46 ton/día). Los hidrocarburos alifáticos y alicíclicos llegan a niveles atmosféricos de hasta 100 ppm de hidrocarburos como equivalentes a metano. De acuerdo al Banco Mundial (1978), 500 ppm de hidrocarburos son peligrosos a la salud en un ambiente laboral.

Del total de toneladas liberadas, más del 35% son generadas por la operación de las plantas de destilación primaria y secundaria, incluyéndose dispersiones de equipo menor como bombas, compresores, bridas y conexiones, además de otras fugas, venteos y derrames. Un porcentaje similar es emitido en los sistemas de colección y separación de grasas y aceites del tratamiento primario de aguas residuales, como consecuencia de que estos sistemas no están cubiertos, permitiendo una fácil evaporación de los hidrocarburos de presión de vapor baja. El almacenamiento de productos intermedios y combustibles,

así como su manipulación es otro factor importante de diseminación. Las operaciones de craqueo catalítico generan una gran cantidad de hidrocarburos que no alcanzan a ser recuperados, por la propia naturaleza del proceso. Las otras industrias de la zona presentan emisiones mínimas de hidrocarburos, principalmente por combustión.

De acuerdo a Torres (1989), los procesos de combustión en la refinería de Minatitlán no representan un porcentaje de consideración de emisiones de hidrocarburos, ya que el principal combustible consumido es gas natural o de refinería. Sin embargo, dicho autor hace hincapié en que existe la posibilidad de que la cuantificación de los hidrocarburos emitidos por la operación de los quemadores de campo esté subestimada. Lo anterior se basa en el hecho de que es posible apreciar en las instalaciones de la refinería, plumas de humo negro emergiendo de varios quemadores de campo, siendo éste un índice de que la combustión que ahí se realiza es incompleta, generándose emisiones de gases como hidrocarburos (HC) y compuestos orgánicos volátiles (COV), además de partículas tipo POM. El balance total de emisiones señala que, como hidrocarburos totales [(HT) = (HC+COV)] se envían a la atmósfera de la microregión de Minatitlán aproximadamente 68 ton/día, de las cuales 72% son hidrocarburos y el resto COV.

Respecto a la dispersión de COV (aromáticos, fenoles, alcoholes, aldehídos y otros), se encontró que la operación de procesos petroquímicos en las diversas plantas localizadas en Minatitlán, son la principal fuente de estos compuestos. El conjunto de plantas del Complejo de Cosoleacaque, Albamex, Fenocimia y Celanese, contribuyen con el 78% del total de emisiones de COV (15 ton/día). Las plantas petroquímicas de la refinería de Minatitlán aportan el 22% restante (4.23 ton/día). Las emisiones de COV son generadas en los procesos en lo que la materia prima y sus productos están conformados por estos compuestos. Los derrames y fugas de bombas, compresoras y conexiones diversas, así como venteos en las principales fuentes individuales emisoras son reconocidas como "emisiones fugitivas". La planta industrial de Fertimex no es considerada emisora de COV a una escala considerable.

Las partículas tipo POM alcanzan niveles pronosticados de hasta  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como benzo(a)pireno. Los niveles reportados en la literatura señalan que en ambientes urbanos, las concentraciones de estos compuestos presentan una media de  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los benzopirenos provienen de las operaciones de craqueo catalítico de la refinería de Minatitlán con poco más de 6 kg/día (99.95% del total). Por combustión se generan cantidades mínimas y también co-

mo consecuencia del uso de gas natural o de refinería. Sin embargo, existe la posibilidad de una subestimación de las emisiones de los quemadores de campo en la misma.

En la región de Minatitlán y Cosoleacaque, la dirección predominante de los vientos es hacia el norte durante el día y hacia el sur durante la noche, con una gran variabilidad de intensidades, que van desde calmas en la madrugada, hasta vientos de más de 4 m/seg por la tarde. En invierno influye la presencia del sistema semipermanente de alta presión en el Golfo de México y en verano, la presencia de tormentas tropicales y de huracanes influyen sensiblemente en los patrones regionales de viento en la región (Barradas *et al.*, 1982).

### Contaminantes atmosféricos asociados a los hidrocarburos Fósiles en el Golfo de México

A partir de las instalaciones petroleras se producen, además de los hidrocarburos, otros contaminantes como  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y diversos compuestos orgánicos, formaldehído entre ellos, y es común, que el conjunto de dichas emisiones inicien la formación de ozono en el sector sureste del Golfo de México en forma continua y estable. Se han efectuado estudios sobre la presencia de tales compuestos en la atmósfera y el análisis de los resultados demostró que los niveles de estos contaminantes son mayores cerca de las ciudades costeras que en alta mar, lo cual refleja la influencia de las emisiones urbano-industriales. De igual forma, durante el crucero de investigación oceanográfica UNAM-SM/NOAA durante 1986, se determinaron las concentraciones en masa de muestras de partículas en el Golfo de México, las cuales fueron más altas en el Puerto de Veracruz ( $90.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), de Coatzacoalcos a Progreso ( $14.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en el Puerto de Coatzacoalcos ( $54.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y de Tampico a Veracruz ( $58.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mientras que los niveles de hidrocarburos también fueron mayores en el Puerto de Veracruz con 0.89 ppm, Tampico-Veracruz con 0.72 ppm y posteriormente Coatzacoalcos-Progreso con 0.32 ppm (Bravo *et al.*, 1996).

En lo que se refiere a los sulfatos, Báez (1986) reportó que los valores altos de sulfatos en Coatzacoalcos y en Minatitlán, indican que las fuentes de dispersión de estos iones, y de su precursor  $\text{SO}_2$ , se originan en los procesos de combustión de compuestos que contienen azufre y durante los procesos de refinación del petróleo; de hecho esta situación es común en las grandes zonas industriales de México, debido al alto contenido de azufre que tiene el combustible y otros derivados del petróleo. La contaminación atmosférica antropogénica, especialmente de las ciudades costeras y de la actividad de la industria del petróleo, son la mayor fuente de aerosoles de sulfato a través de la conversión gas-a-partícula.

En Minatitlán los iones sulfatos tuvieron un promedio de 16.75 ppm y en Coatzacoalcos el promedio fue de 9.66 ppm.

El formaldehído puede ser originado por emisiones directas a la atmósfera o por reacciones fotoquímicas entre hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y otros productos. Se han cuantificado los niveles de formaldehído ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) tanto en las ciudades de Minatitlán como de Coatzacoalcos, así como las presentes en la precipitación pluvial; obteniéndose 12.7 ppb y 5.6 ppb en el aire en Minatitlán y Coatzacoalcos, respectivamente; mientras que en el análisis de la precipitación pluvial los niveles fueron en promedio de 0.06 ppm para Minatitlán, y 0.061 ppm para Coatzacoalcos. Lo anterior indica que dicho compuesto una vez liberado no es incorporado dentro de las nubes en el momento de su formación debido a que éstas se desarrollan lejos de las fuentes de diseminación.

La emisión de hidrocarburos y  $\text{NO}_x$  determinan la formación de ozono, por lo cual las zonas con actividad petrolera como la cuenca del Golfo de México que abarca las costas de Tamaulipas, sur de Veracruz, y Tabasco, así como la Sonda de Campeche son las fuentes principales de este gas en la región.

La presencia de los niveles relativamente altos de ozono frente a la costa sur de Veracruz indica la influencia de las emisiones de precursores de ozono en la zona Minatitlán-Coatzacoalcos. Es posible que, como consecuencia de efectos meteorológicos locales de la Cuenca del Río Coatzacoalcos, se esté realizando una acumulación de precursores en la zona cercana al volcán de San Martín, Tuxtla en la parte costera central del Estado de Veracruz durante el período diurno. Al presentarse el efecto de brisa de tierra, la masa de aire relativamente rica en niveles oxidantes como el ozono, formados durante el transcurso del día, puede ser transportado hacia el mar (Bravo *et al.*, 1996).

En lo que se refiere al ozono, las concentraciones promedio mayores se registraron de Veracruz a Coatzacoalcos con 8.58 ppb, en seguida el Puerto de Coatzacoalcos (6.77 ppb) y el Puerto de Veracruz (4.32 ppb). En general, la calidad del aire en la cuenca atmosférica del Golfo de México respecto al ozono es buena, prácticamente dentro de los niveles de concentración de fondo de  $\text{O}_3$ . Los valores típicos en ambientes urbanos se encuentran entre 50 y 400 ppb (Bravo y Torres, 1996).

### Caso Laguna Sontecomapan

La Laguna Sontecomapan se encuentra situada entre la cuenca que forma el volcán San Martín Tuxtla y la Sierra de Santa Marta, en el Estado de Veracruz. Tiene una superficie de  $8.9 \text{ Km}^2$ , con un perímetro de 35,600 m (Fig. 2). Dicho sistema tiene una gran influencia fluvial alimentada por arroyos y ríos; los principales ríos son: Coscoapan (que nace en la Sierra de Santa Martha), Hualtajapan, La Palma y El Sábalo. Entre los arroyos, destacan: Los Pollos, Sontecomapan, Del Fraile, De la Boya y el De Basura.

El área de estudio, se eligió con el propósito de definir si era un área prístina (sin contaminación) debido a que es una zona donde no existen complejos petroquímicos o industrias aledañas (Calva, 2000); o, si en su defecto, sí presentaba contaminación por hidrocarburos, ya que estudios recientes indican que los HAP no sólo se detectan en áreas urbanas, sino también en regiones rurales y remotas debido al transporte atmosférico (Valette, 1993).

Como resultado del estudio efectuado, en los sedimentos de la laguna Sontecomapan los niveles promedio de HAP fueron de 7.54 ppm (Calva, 2000), siendo equiparables a los cuantificados en la laguna Tampamachoco, Ver., con 7.65 ppm; este último sistema se encuentra en un área afectada principalmente por descargas de la termoeléctrica de la CFE, a diferencia de Sontecomapan (Botello y Calva, 1998). Los HAP predominantes en sedimentos de la laguna Sontecomapan fueron en orden descendente: criseno > benzo(a)antraceno > benzo(k)fluoranteno > pireno > antraceno, cuyo origen es predominantemente pirolítico (Calva y Botello, 1999).

De acuerdo a los resultados obtenidos por Calva (2000) se plantea que las altas concentraciones de hidrocarburos fósiles antropogénicos (alifáticos y aromáticos policíclicos) determinadas en los diversos componentes analizados en la laguna, tales como agua, sedimentos y organismos (macroalgas, ostiones y mejillones) (Fig. 3), se deben a que en la laguna Sontecomapan ingresan estos compuestos provenientes de diversas fuentes, entre las que destacan el tráfico de lanchas (las cuales utilizan gasolina, diesel y/o lubricantes), a través de las descargas directas de los ríos, por medio de los aportes procedentes de la costa y de la pirólisis de vegetación circundante; no obstante, debido a las concentraciones determinadas y al tipo de hidrocarburos, en este trabajo se concluyó que no se puede descartar el origen de los hidrocarburos fósiles procedentes del transporte atmosférico desde una de las zonas industriales más importantes del país donde se localiza uno de los complejos petroquímicos

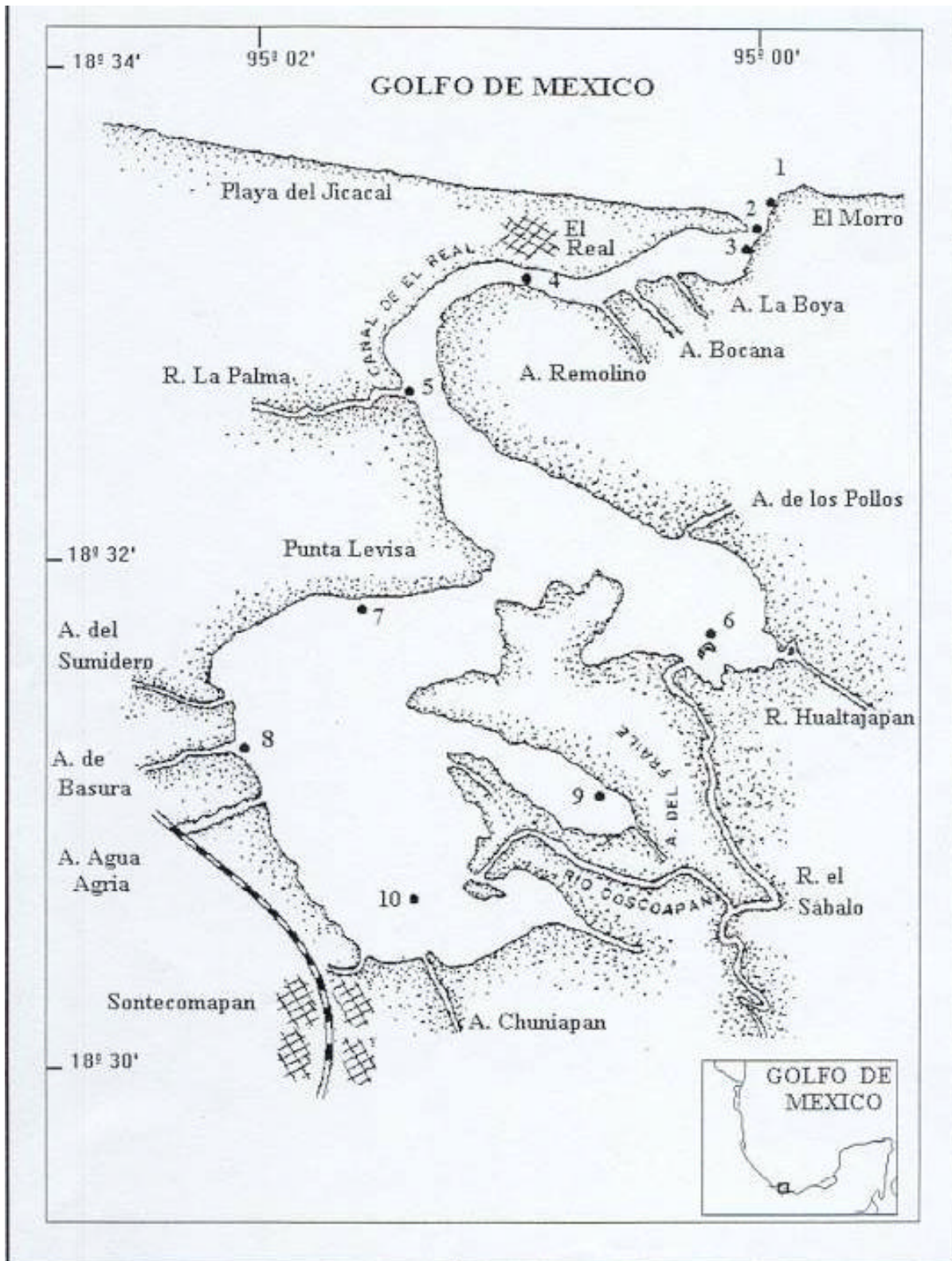


Figura 2. Localización de las estaciones de muestreo en la Laguna Sontecomapan, Ver.

más grandes de Latinoamérica, el de Cosoleacaque-Minatitlán-Coatzacoalcos.

Para apoyar el hecho de que en la zona existe un transporte atmosférico de hidrocarburos desde el área de Minatitlán-Coatzacoalcos hasta la Sierra de los Tuxtlas, se utilizó la rosa de los vientos, como se observa en la figura 4, ésta indica que los vientos predominantes presentan una dirección hacia el Noroeste (Báez, 1986; Atlas Nacional Mexicano, 1990a: Parungo y Miller, 1988).

De acuerdo al trabajo presentado por Bravo *et al.*, (1996) la cuenca atmosférica del Golfo de México se caracteriza por dos movimientos meteorológicos: escala sinóptica y mesoescala. La presencia del movimiento escala sinóptica se debe básicamente a que la mayor parte del año actúa sobre el Golfo de México un sistema atmosférico profundo de alta presión, el cual responde a las fluctuaciones climáticas anuales; alternadamente sobre tierra se presentan bajas presiones.

Esta dualidad “baja presión/alta presión” es resultado de un calentamiento diferencial de la superficie de la tierra respecto al agua. El patrón de vientos horizontal a escala sinóptica originada por este sistema es en el sentido de las manecillas del reloj. En general, la dirección de vientos dominantes en la costa del Golfo es del Este en Mérida y Coatzacoalcos, cambiando a vientos del sureste y sur para Veracruz y Tampico respectivamente, para ser del oeste a lo largo de la costa de Texas; este sistema se refuerza con vientos alisios del sur (figura 5). Este proceso determina un gran acarreo de humedad desde la parte central del Golfo y del sur del país. Conforme se va acercando al continente, el efecto de la alta temperatura reinante en tierra provoca movimientos convectivos que generan nubes cumuliformes, las cuales depositan su precipitación con mayor abundancia en el interior del continente, sobre el lado de barlovento de la Sierra Madre Occidental.

A nivel mesoescala, la diferencia de calentamiento entre las superficies de la tierra y del mar ocasiona una circulación vertical de vientos en las costas, efecto conocido como “brisa de mar” y “brisa de tierra”. Durante el día el movimiento de ascenso sobre la tierra da por resultado un flujo horizontal desde el nivel del mar hacia tierra (brisa de mar), mientras que el flujo contrario se presenta durante la noche cuando el Golfo de México es más caliente (brisa de tierra). La formación de nubes tipo *cumulus* por las tardes a lo largo de la costa, es indicativa de la presencia de brisa de mar (Bravo y Torres, 1996).

Por tanto, Baez (1986) indica que el análisis de la rosa de los vientos señala que la dirección de éstos en el Golfo es predominantemente la del Noroeste, con mayor incidencia en verano (47%) (Bravo y Torres, 1985). Los vientos provenientes del sur representan un porcentaje cercano al 15%. Por lo común, la velocidad del viento es leve por las mañanas y aumenta un poco durante las tardes; sin embargo, durante la noche, el viento llega a alcanzar velocidades apreciables.

Con base en la información presentada anteriormente y con los resultados obtenidos por Calva (2000), probablemente los hidrocarburos atmosféricos derivados de las emisiones urbano-industriales del área de Minatitlán, por la dirección de los vientos hacia el noroeste, podrían ser llevados a la región de Sontecomapan, donde dada la gran precipitación existente (precipitación anual mayor a 4 000 mm) (Fig. 6) provoca que los hidrocarburos y otro tipo de partículas estén siendo depositados en la laguna de Sontecomapan (Atlas Nacional Mexicano, 1990b).

Además de que la dirección predominante de los vientos puede ser un factor que influye en la distribución y destino de los hidrocarburos en la laguna, se tiene otro aspecto que favorece tal hipótesis y es el hecho de que la distancia en línea recta desde Minatitlán a Sontecomapan es de aproximadamente 90 km, mientras que con respecto a Coatzacoalcos es de 80 km.

### Comentarios Finales

Queda de manifiesto que en México son escasos los trabajos sobre la concentración de hidrocarburos fósiles presentes en la atmósfera, a pesar de que es uno de los principales países productores y exportadores de petróleo, por lo que se hace necesario llevar a cabo estudios multidisciplinarios para poder determinar con certeza el origen, acumulación y transporte de estos compuestos orgánicos en la atmósfera, así como el destino que están teniendo en los diferentes ecosistemas. Además es importante evaluar la cantidad liberada por año puesto que puede aumentar la probabilidad de que un compuesto se convierta en un contaminante global (Galassi, 1999).

La baja solubilidad en agua de los hidrocarburos fósiles, su gran volatilidad y persistencia en los compartimentos tanto bióticos como abióticos, parecen ser las propiedades que determinan su distribución. Del mismo modo, se deben conocer las rutas de entrada y transporte de los químicos en los sistemas acuáticos a los que llegan y sus niveles de acumulación en las cadenas tróficas.

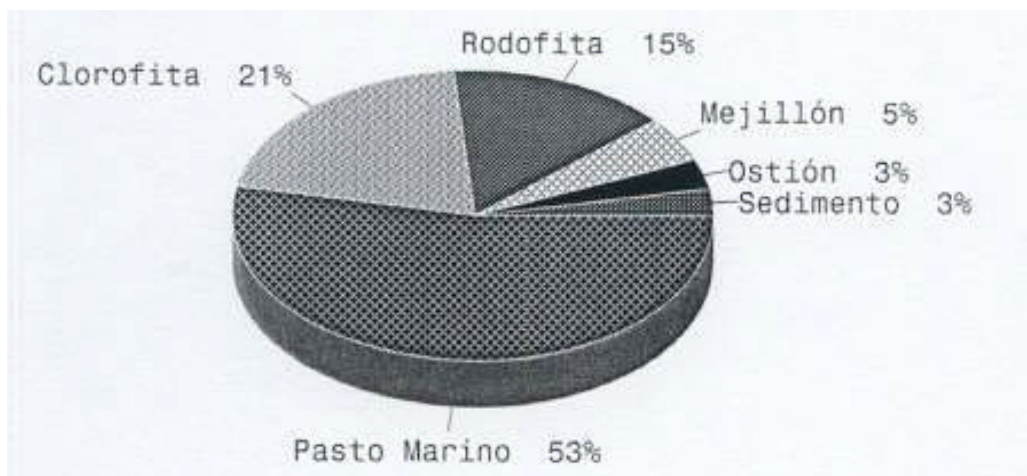


Figura 3. Porcentaje de HAP determinados en sedimentos y organismos de la Laguna Sontecompan, Ver.

Finalmente, cabe señalar que algunos de los HAP determinados en la Laguna de Sontecomapan al ser tóxicos, mutagénicos y/o carcinogénicos podrían poner en peligro la pesquería de peces y moluscos del sistema, afectando de esta forma la economía del núcleo de pescadores.

#### Referencias

- Allen, Ch., D. Boyd, F. Hempehall, M. Larkin & N. Sharma. 1999. Contrasting Effects of a Nonionic Surfactant on the Biotransformation of Polycyclic aromatic Hydrocarbons to cis-Dihydrodiols by Soil Bacteria. *Applied & Environ. Microbiol.* 65(3):1335-1339.
- Arcaro, K.F., P.W. O'Keefe, Yi Yang, W. Clayton & J.F. Gierthy. 1999. Antiestrogenicity of environmental PAHs in human breast cancer cells. *Toxicol.* 133(2-3):115-127.
- Atlas nacional mexicano. 1990a. *Vientos dominantes durante el año*. Instituto de Geografía, UNAM. IV.4.2.
- Atlas nacional mexicano. 1990b. *Precipitación*. Instituto de Geografía, UNAM. IV. 4. 6.
- Baez, A. P. 1986. Medio Ambiente en Coatzacoalcos. *La Calidad del Aire*. Vol. II. Centro de Ecodesarrollo. 84 p.
- Banco mundial. 1978. *Consideraciones Ambientales para el Sector de Desarrollo Industrial*. The World Bank, Washington, D.C.
- Barradas, V. M., H. P. Ortega, B. G. Pala Y E. S. Narvaez. 1982. Aspectos Climáticos y Meteorológicos de la Región. En: *Estudio bioeconómico de la región del delta del Río Coatzacoalcos*. SMA. México.
- Benlahcen, K. T., A. Chaoui, H. Bundzinski, J. Bellocq & PH. Garrigues. 1997. Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Some Mediterranean Coastal Sediments. *Mar. Pollut. Bull.* 34(5): 298-305.
- Bidleman, T. F., A. A. Castelberry, W. T. Foreman, M. T. Zaranski & D. W. Wall. 1990. Petroleum Hydrocarbons in the Surface Water of Two Estuaries in the Southeastern United States. *East. Coast. & Shelf Sci.* 30(1):91-109.
- Bjorseth, A. ed. 1983. *Emission Sources and Recent Progress in Analytical Chemistry*. Marcel Dekker, INC. U.S.A. Vol. 1 pp. 1-521. Bjorseth, A. ed. 1983. Marcel Dekker, Inc. U.S.A. Vol. II pp. 61-110.
- Boffetta, P., N. Jourenkova & P. Gustavsson. 1997. Cancer risk from occupational and environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Cancer Caus. Contr.* 8(3):444-472.
- Botello, A. V. & Calva, L. G. B. 1998. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments From Pueblo Viejo, Tamiahua and Tampamachoco Lagoons in the Southern Gulf of Mexico. *Bull. Environ. Contam. & Toxicol.* 60(1):96-103.
- Bravo, H. A. y R. J. Torres. 1985. Evaluación de la meteorología en la zona Minatitlán-Coatzacoalcos y su importancia sobre la contaminación ambiental. 2º. Seminario sobre la preservación del medio ambiente. Instituto Tecnológico de Minatitlán, Minatitlán, Veracruz.
- Bravo, H. A. y R. J. Torres. 1996. Características Físicoquímicas y Fuentes de Contaminantes Atmosféricos, p. 409-422. In: A. V. Botello, J. L. Rojas-Galaviz, J. A. Benítez, D.



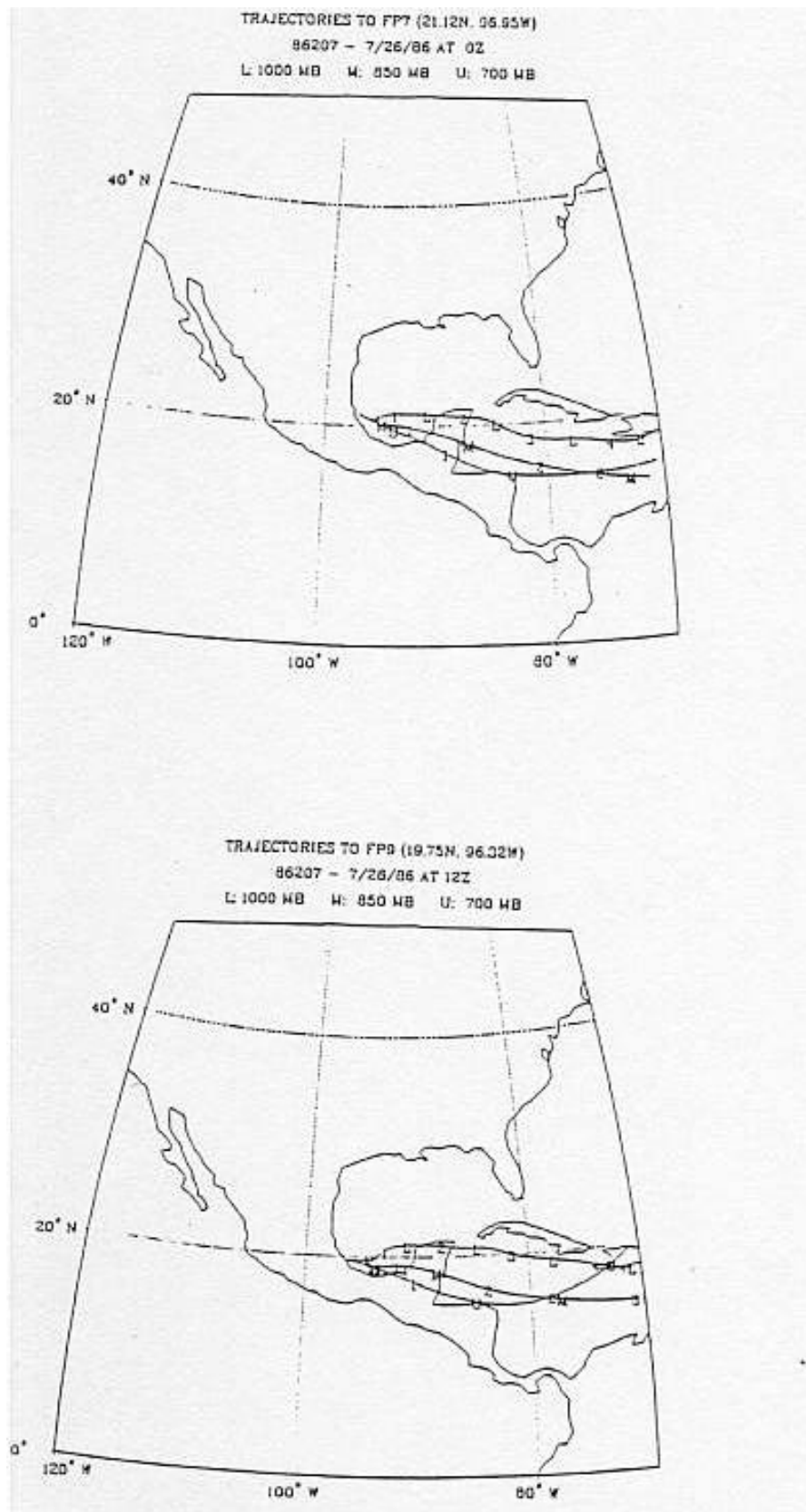


Figura 5. Trayectorias de aire en el Golfo de México.

- Zárate-Lomelí. (Eds). *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Serie Científica, 5. 666 p.
15. Bravo, H. A., E. C. Buendía y R. J. Torres. 1996a. Meteorología de la Contaminación, p. 423-431. In: A. B. Botello, J. L. Rojas-Galaviz, J. A. Benítez, D. Zárate-Lomelí. (Eds). *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Serie Científica, 5. 666 p.
  16. Calva, L. G. B. & A. V. Botello. 1999. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments from Sontecomapan Lagoon, Veracruz, Mexico. *Hidrobiológica* 9(1):45-52.
  17. Calva, L. G. B. 2000. Determinación de los Niveles Actuales de Hidrocarburos Fósiles en la Laguna Sontecomapan, Veracruz, México. Tesis Doctoral. Fac. Ciencias, UNAM. 174 p.
  18. Canter, L. W. 1999. 2ª. ed. *Manual de Evaluación de Impacto Ambiental*. Técnicas para la elaboración de los estudios de impacto. Mc. Graw Hill. Colombia. 841 p.
  19. Connel, D. W. & G. J. Miller. 1984. *Chemistry and Ecotoxicology of Pollution*. John Wiley & Sons. U.S.A. pp. 228-249.
  20. Fortner, A. & L. Sick. 1985. Simultaneous Accumulations of Naphthalene, a PCB Mixture, and Benzo(a)pyrene, by the *Oyster Crassostrea virginica*. *Bull. Environ. Contam. & Toxicol.* 34 (2): 256-264.
  21. Galassi, S. 1999. The Atmospheric Pathways of Persistent Organic Pollutants (POPs) and their Effects on Remote Areas. P.p. 62-67. International School on Environment and Health Summer School for Xenobiotics and Human Health. Siena, Italy. April 6-18, 1999.
  22. Jones, K. C., G. Sanders, Wild, S. R., V. Burnett, A. E. Johnston. 1992. Evidence for a decline of PCBs and PAHs in rural vegetation and air in the UK. *Nature*. 356:137-139.
  23. Mackay, D., S. Paterson & W. H. Schroeder. 1986. Model describing the rates of transfer processes of organic chemicals between atmosphere and water. *Environ. Sci. Technol.* 20:810-816.
  - McVeety, B. D. & R. A. Hites. 1988. Atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons to water surfaces: a mass balance approach. *Atmos. Environ.* 22:511-536.
  24. Meharg, A. A., J. Wright, H. Dyke & D. Osborn. 1998. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) Dispersion and Deposition to Vegetation and Soil Following a Large Scale Chemical Fire. *Environ. Pollut.* 99(1):29-36.
  25. Morrison, R. T. & R. N. Boyd. 1990. *Química Orgánica*. 5ª. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana. U.S.A. 1478 p.
  26. Parungo, F. & J. Miller. 1988. Air Chemistry Studies Over the Gulf of Mexico. A Bilateral Scientific Cooperative Project Between the United States of America and the United States of Mexico. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Technical Memorandum ERL ESG-29.
  27. Petróleos mexicanos. 1971. *El Petróleo*. Publicación de la Dirección General. Biblioteca Central, PEMEX. México, D.F.
  28. SEDUE. 1986. Informe sobre el estado del medio ambiente en México. Subsecretaría de ecología. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, México.
  29. Sitting, M. 1985. *Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens*. 2ª. Ed. Noyes Publications, New Jersey, U.S.A. 950 P.
  30. Torres, R. J. 1989. Contaminación Atmosférica por Hidrocarburos y Compuestos Orgánicos Volátiles en una Zona Industrial Petroquímica, Caso Minatitlán, Veracruz. Tesis Ingeniero Químico. Fac. Química, Universidad Nacional Autónoma de México. 116 p.
  31. U.N.E.P. (United Nations Environment Programme). 1992. Determination of Petroleum Hydrocarbons in Sediments. References Methods for Marine Pollution Studies No. 20, 75 P.
  32. Valette S. N. 1993. The Use of Sediment Cores to Reconstruct Historical Trends in Contamination of Estuarine and Coastal Sediments. *Estuaries*. 16(3B):577-588.
  33. Wild, S. R. & K. C. Jones. 1995. Polynuclear Aromatic Hydrocarbons in the United Kingdom Environment: A Preliminary and Source Inventory and Budget. *Environ. Pollut.* 88(1):91-108.



Figura 6. Precipitación anual en el área de Veracruz.