

# Caracterización geoquímica del medio ambiente en un yacimiento petrolífero cubano. Parte 1: Aire

Miguel Díaz\*, Juan A. Colás y Verlayn Paumier

Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), Washington # 169 Esq. Churruca, Cerro, CP 12000, Ciudad de la Habana, Cuba.

Recibido 6 Abril 2006, revisado 4 Junio 2006, aceptado 5 Junio 2006

---

*Geochemical Characterization of the Environment in a Cuban oil field. Part 1: Air*

## Abstract

A study on the environmental geochemistry in the Pina oil field was developed, including the characterization of air, water, and soil matrix, by applying the integral study concept, from the emission source up to the technological solution, with the view to guarantee the ecosystem protection.

The environmental impact of the emission source, located in the collector center of the oil field (flare), is established by the application of the theoretical principles of the diffusion and transport of the atmospheric pollutant from the experimental results. It gives more validity to the obtained pollution forecast and contributes to respond some tasks to perfect the population setting. Technological solutions are given with a view to reduce the environmental impact of the oil activity in the zone.

*Keywords:* environmental impact, air pollution, flare

---

## Introducción

La protección del medio ambiente constituye una alta prioridad en las actividades operacionales para la industria petrolera (UNEP, 1996) y ha adquirido una connotación mundial creciente como resultado de una mayor conciencia pública.

El primer paso en cualquier análisis de la calidad del aire es definir las emisiones de contaminantes desde una fuente o instalación productiva para completar un inventario exacto de las emisiones. Un inventario apropiado determinará las regulaciones y niveles de control de la contaminación que deben aplicarse (Kumar et al., 2004).

La correcta evaluación del medio ambiente atmosférico para conocer los niveles de

contaminantes durante la explotación de un yacimiento petrolífero es una de las exigencias fundamentales para la toma de medidas que garanticen mantener los niveles adecuados con relación a la calidad del entorno (Slater, 1996).

Uno de los problemas asociados a la actividad de exploración - producción de petróleo es la contaminación originada por la combustión de gas natural que contiene sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) en flares de poca altura, produciendo emisiones de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>).

Los óxidos de azufre originan efectos directos e indirectos sobre la salud humana, las plantas, el clima y los materiales, por su concentración en la atmósfera y por su deposición seca y/o húmeda. El dióxido de azufre es sumamente soluble en agua y reacciona para formar ácido sulfúrico (un 30 % del

---

\* Autor para correspondencia  
E-mail: michael@ceinpet.cupet.cu; Fax: +537 6426021

SO<sub>2</sub> en la atmósfera se convierte a aerosol ácido), siendo muy probable que cuando se inhala se absorba en los conductos húmedos del sistema respiratorio superior, la nariz y las vías respiratorias superiores, donde puede dañar el tejido pulmonar. El aerosol de ácido sulfúrico en concentraciones elevadas se asocia con el asma bronquial y con índices de mortalidad mayores de lo esperado.

Las fuentes principales de emisiones a la atmósfera en la actividad de exploración - producción de petróleo la constituyen además los equipos de combustión, venteos y las emisiones fugitivas. Estas pueden contener compuestos orgánicos volátiles, óxidos de azufre, sulfuro de hidrógeno y óxidos de nitrógeno (World Bank, 1998). En el yacimiento de Pina, de la Unidad de Perforación y extracción de Petróleo (UPEP) Majagua, existe un flare de 10 m de altura, localizado cerca del centro colector, cuyas emisiones influyen sobre zonas aledañas.

El objetivo fundamental de este estudio ha sido la caracterización geoquímica del medio ambiente en el yacimiento petrolífero de Pina, con el objetivo específico de determinar los niveles de contaminantes atmosféricos en puntos habitados en la localización del yacimiento y definir la influencia de la quema de gas natural sobre la ocurrencia de enfermedades respiratorias en la zona.

### Material y métodos

En el año 2000 se realizó una campaña intensiva de monitoreo en el yacimiento, en la que se seleccionaron tres puntos de muestreo en el área de estudio, en los cuales se tomaron muestras puntuales (20 minutos) en distintos horarios (1 AM, 4 AM, 7 AM, 10 AM, 1 PM, 4 PM, 7 PM, 10 PM) durante 24 horas (ARPEL, 1997), con vistas a determinar la variación diurna de contaminantes.

Los puntos seleccionados fueron georeferenciados con equipo GPS. Las muestras fueron tomadas a una altura de 1.5 m sobre el nivel del suelo y analizadas según métodos normalizados para la determinación de estos contaminantes en el aire. Los contaminantes seleccionados para la evaluación, de acuerdo a la Regulación Ambiental 09/99 (CUPET, 1999), fueron SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, hidrocarburos (HC) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Los contaminantes SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S se determinaron por métodos espectrofotométricos normalizados NC 93-02-216 (CEN, 1988) y NC 93-02-205 (CEN, 1987), respectivamente.

Las determinaciones de HC y CO<sub>2</sub> se realizaron por cromatografía gaseosa en equipo Pye Unicam 104 con detector de conductividad térmica empleando columnas de relleno de tri-etilenglicol-di-butirato y sílice gel, acorde con las normas ISO 6974 (1995) e ISO 6975 (1995).

Teniendo en cuenta la influencia de las variables meteorológicas, y el comportamiento de las mismas según la época del año, de acuerdo a experiencias propias (Díaz et al., 2005) (Colás, Díaz et al., 2005) (Díaz et al., 2002) y de otros autores (Tsapakis & Stephanou, 2005), se realizaron monitoreos adicionales en la zona de estudio en épocas de lluvia (septiembre/2005) y seca (marzo/2006). Se determinaron los siguientes parámetros indicadores de contaminación atmosférica: H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC y BTX. Las muestras fueron tomadas y analizadas con equipo Multiwarn II de la firma alemana Draeger para la determinación de estos contaminantes en el aire, que utiliza 3 sensores electroquímicos (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S), un sensor IR (HC) y un sensor Cat Ex (BTX).

Para conocer el impacto del flare sobre los puntos seleccionados se aplicó un modelo de dispersión de contaminantes en la atmósfera para emisiones calientes. Los datos del flare para los cálculos de dispersión fueron suministrados por la empresa y se relacionan a continuación:

Altura	Flujo	Diámetro	H <sub>2</sub> S
10 m	25 000 m <sup>3</sup> /d	0.10 m	0.011 %

El cálculo de dispersión de contaminantes emitidos por el flare se realizó según el modelo de Berliand que ha sido establecido como metodología de cálculo en la norma cubana NC 39 (1999). El valor de la constante de estratificación térmica atmosférica A que define las condiciones naturales de difusión más adversas se tomó igual a 200, según lo propuesto para nuestro país para zonas llanas o con topografía de poca complejidad y altura, el cual ha sido aceptado en la norma cubana de referencia. Los datos meteorológicos fueron

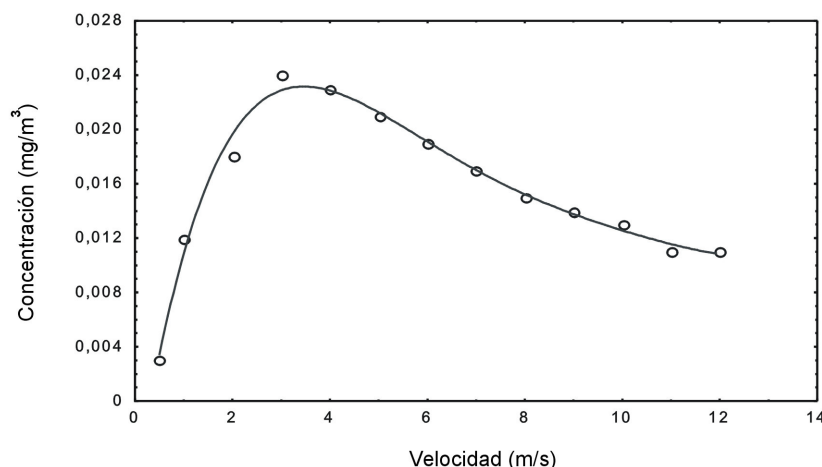


Figura 1. Concentraciones esperadas para velocidades de viento diferentes a la peligrosa.

Tabla 1. Variación diaria de contaminantes en puntos evaluados (año 2000), expresadas en mg/m<sup>3</sup>. HC y CO<sub>2</sub> expresados en % vol.

Hora	Campamento				Centro Colector				Poblado de Pina			
	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	HC	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	HC	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	HC	CO <sub>2</sub>
1 : 00 PM	nsa	nsa	nsa	0.13	nsa	nsa	nsa	0.12	nsa	nsa	nsa	0.21
4 : 00 PM	nsa	nsa	nsa	0.11	nsa	nsa	trazas	0.14	nsa	nsa	nsa	0.42
7 : 00 PM	nsa	nsa	nsa	nsa	nsa	nsa	nsa	0.11	nsa	nsa	nsa	0.17
10 : 00 PM	nsa	nsa	nsa	nsa	nsa	nsa	nsa	0.08	nsa	nsa	nsa	0.19
1 : 00 AM	nsa	nsa	nsa	0.10	nsa	nsa	nsa	0.13	nsa	nsa	nsa	0.12
4 : 00 AM	nsa	nsa	nsa	nsa	nsa	nsa	nsa	0.20	nsa	nsa	nsa	nsa
7 : 00 AM	nsa	nsa	nsa	0.11	nsa	nsa	nsa	0.14	nsa	nsa	trazas	0.15
10 : 00 AM	nsa	nsa	nsa	0.32	nsa	nsa	nsa	0.23	nsa	nsa	nsa	0.11

nsa – no se aprecia (límite de detección: 0.001 mg/m<sup>3</sup> para H<sub>2</sub>S y SO<sub>2</sub>, 0.0001 % vol para HC, 0.01 % vol para CO<sub>2</sub>).

suministrados por el Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET).

Se realizó un análisis estadístico, con el empleo del programa STATISTICA, para determinar correlaciones de interés entre la ocurrencia de enfermedades respiratorias del municipio Ciro Redondo (Pina) y la quema de gas natural en el flare de poca altura del yacimiento. Para el estudio se procesaron todos los datos existentes del período de Enero/95 – Diciembre/05 relacionados con esta problemática.

## Resultados y discusión

Con relación al flare ubicado en la zona del centro colector del yacimiento Pina se tiene, mediante la aplicación del modelo de dispersión, que la concentración máxima instantánea de SO<sub>2</sub>, que origina al nivel del suelo, es de 0.024 mg/m<sup>3</sup> (la norma cubana de calidad de aire ambiente para puntos habitados establece 0.5 mg/m<sup>3</sup> para este contaminante) y ocurre a 126 m de la fuente de

emisión, resultando la velocidad de viento peligrosa de 3.27 m/s.

En la Figura 1 vemos las concentraciones esperadas para velocidades de viento diferentes a la peligrosa, siguiendo una distribución gaussiana con máximo cercano a 3 m/s.

Se puede observar también, en la Figura 2, que las mayores concentraciones esperadas resultan inferiores al valor permisible para aire ambiente y aparecen a una distancia entre 125 – 150 m de la localización del flare, siguiendo un comportamiento de acuerdo a la ecuación dada de un polinomio de orden 5.

Para velocidad de viento peligrosa se tiene que la concentración máxima (aparece expresada en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la Figura 3) disminuye siguiendo un comportamiento logarítmico respecto a la distancia de la fuente, aunque los niveles esperados resultan despreciables con relación a la norma para este contaminante (NC 39: 1999).

En la Tabla 1 se reflejan los resultados obtenidos en el año 2000 en mediciones de contaminantes en muestras de aire y se tiene que los contaminantes  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$  e hidrocarburos no se detectaron en estos tres puntos a ninguna hora (excepto trazas en el punto 2 a las 4 PM y en el 3 a las 7 AM), lo que valida los resultados obtenidos

para el flare de acuerdo al modelo de dispersión.

Los niveles de  $\text{CO}_2$  (% volumen) encontrados están dados por los equipos de combustión (incluyendo transportes, cocinas, etc.) y no se consideran significativos dada su magnitud, aunque este contaminante no aparece regulado en la norma de calidad de aire referida.

En la Figura 4 se muestra la variación diurna de la concentración y se observan los máximos a las 10 AM en el campamento y el centro colector, y a las 4 PM en la comunidad de Pina. Como se aprecia, los niveles de concentración de este contaminante en los tres puntos evaluados no guardan relación entre sí para una misma hora del día, lo que denota que las fuentes emisoras en cada caso particular son diferentes.

Dada la influencia de las variables meteorológicas y su peso sobre los resultados obtenidos, se realizaron nuevas campañas de monitoreo en estos puntos en épocas de lluvia (2005) y seca (2006), cuyos resultados aparecen en las Tablas 2 y 3, respectivamente.

Como se aprecia en la Tabla 2, las concentraciones obtenidas de BTX en el centro colector y el campamento, en época de lluvia, resultan superiores a los niveles establecidos para estos contaminantes, según norma de referencia. Si

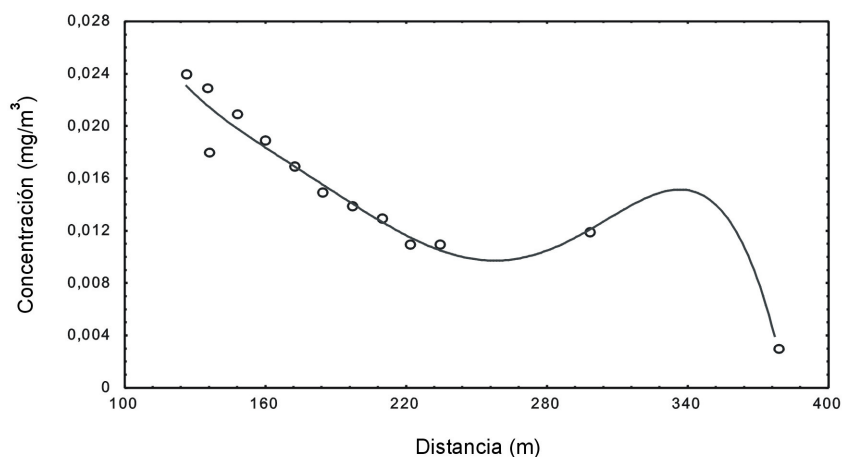


Figura 2. Concentraciones esperadas a diferentes distancias de la fuente de emisión.

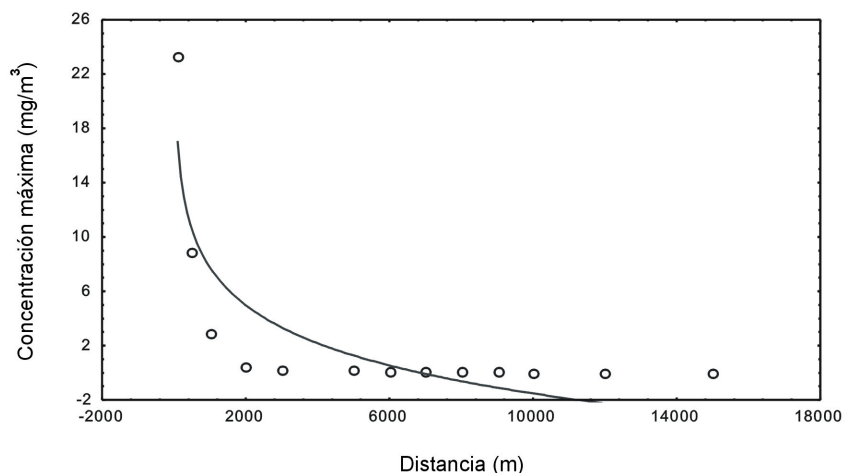


Figura 3. Concentraciones máximas para velocidades de viento peligrosas.

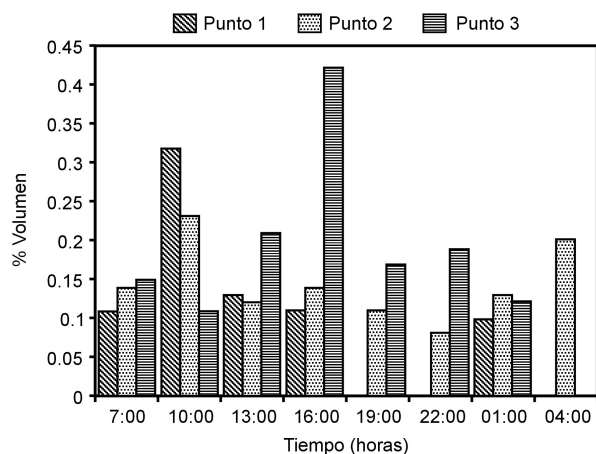


Figura 4. Variación diaria de la concentración de CO<sub>2</sub>.

Tabla 2. Contaminantes en muestras de aire del yacimiento petrolífero de Pina en época de lluvia (septiembre/2005).

Punto de Muestreo	HC (ppm CH <sub>4</sub> )	BTX (ppm C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	H <sub>2</sub> S mg/m <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> mg/m <sup>3</sup>
Centro colector	234	234	1.643	nsa	0.006
Campamento	589	138	1.534	0.002	0.162
Terminal de ómnibus	857	169	nsa	0.057	0.049
CMA <sup>(a)</sup>	600	15.5	3 <sup>(b)</sup>	10	5
CMA <sup>(c)</sup>	-	0.47	0.008	0.50	0.085

<sup>(a)</sup> Concentración máxima admisible de las sustancias nocivas en el aire de la zona de trabajo. (NC 19-01-03).

<sup>(b)</sup> Sulfuro de hidrógeno en mezclas con hidrocarburos (C1 – C5).

<sup>(c)</sup> Concentración máxima admisible de sustancias contaminantes del aire para zonas habitables. (NC 39: 1999).

Tabla 3. Contaminantes en muestras de aire del yacimiento petrolífero de Pina en época de seca (marzo/2006).

Punto de Muestreo	Hora	HC (ppm CH <sub>4</sub> )	BTX (ppm C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	H <sub>2</sub> S mg/m <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> mg/m <sup>3</sup>
Centro colector	11.10 AM	772	145	nsa	0.072	0.058
	4.00 PM	535	221	1.388	0.023	nsa
Campamento	11.30 AM	547	93	1.514	0.067	nsa
	4.20 PM	527	110	0.123	0.016	0.234
Terminal de ómnibus	11.50 AM	600	187	0.170	nsa	0.053
	4.50 PM	514	187	0.992	nsa	0.046
CMA <sup>(a)</sup>	--	600	15.5	3 <sup>(b)</sup>	10	5
CMA <sup>(c)</sup>	--	--	0.47	0.008	0.50	0.085

<sup>(a)</sup> Concentración máxima admisible de las sustancias nocivas en el aire de la zona de trabajo. (NC 19-01-03).

<sup>(b)</sup> Sulfuro de hidrógeno en mezclas con hidrocarburos (C<sub>1</sub> – C<sub>5</sub>).

<sup>(c)</sup> Concentración máxima admisible de sustancias contaminantes del aire para zonas habitables. (NC 39: 1999).

Tabla 4. Resultados obtenidos en el análisis de regresión múltiple.

<i>Ecuaciones de regresión</i>						
Regresión IRA	R	Regresión Asma	R			
IRA = - 0.19 GQ + 740	0.194	Asma = - 0.43 GQ + 128	0.434 c	<i>con intercepción</i>		
IRA = 0.869 GQ	0.869 c	Asma = 0.746 GQ	0.746 c	<i>sin intercepción</i>		
<i>Variables</i>						
	Media	dS	N	Mínimo	Máximo	
IRA	639	203	69	206	1 051	<i>variables dependientes</i>
Asma	83	43	71	4	279	
M m <sup>3</sup> Gas	1 039	429	72	174	2 472	<i>variable independiente</i>

IRA - Infecciones respiratorias agudas

GQ - Gas quemado

comparamos los valores obtenidos de estos contaminantes, con las concentraciones máximas admisibles para zonas habitables, se observa que las concentraciones de BTX en la Terminal de ómnibus (poblado), resultan muy superiores a los niveles permisibles de estos contaminantes para puntos habitados. Los niveles de hidrocarburos resultan elevados, aunque este parámetro no se regula en la norma de referencia.

Se aprecia en la Tabla 3, para la época de seca, que en estos puntos las concentraciones obtenidas de hidrocarburos, en el centro colector, y de BTX (gases y vapores inflamables), en el centro colector y el campamento, resultan superiores a los niveles establecidos para estos contaminantes, según norma de referencia. Si comparamos los valores obtenidos de estos contaminantes con las concentraciones

máximas admisibles para zonas habitables, se observa que las concentraciones de sulfhídrico y de BTX en la Terminal de ómnibus (poblado), resultan muy superiores a los niveles permisibles de estos contaminantes para puntos habitados. Los niveles de hidrocarburos resultan comparables con los regulados para aire de zona de trabajo, aunque este parámetro no se regula en la norma de calidad de aire en puntos habitados.

La Figura 5 ilustra el comportamiento de las infecciones respiratorias agudas (IRA) y el asma en la población del municipio Ciro Redondo de 1995 – 2005 con relación a la cantidad de gas quemado (expresada en Mm<sup>3</sup>) en el flare ubicado en la zona del centro colector del yacimiento Pina. Se puede apreciar cierta relación entre el gas quemado y la cantidad de casos mensuales de estas enfermeda-

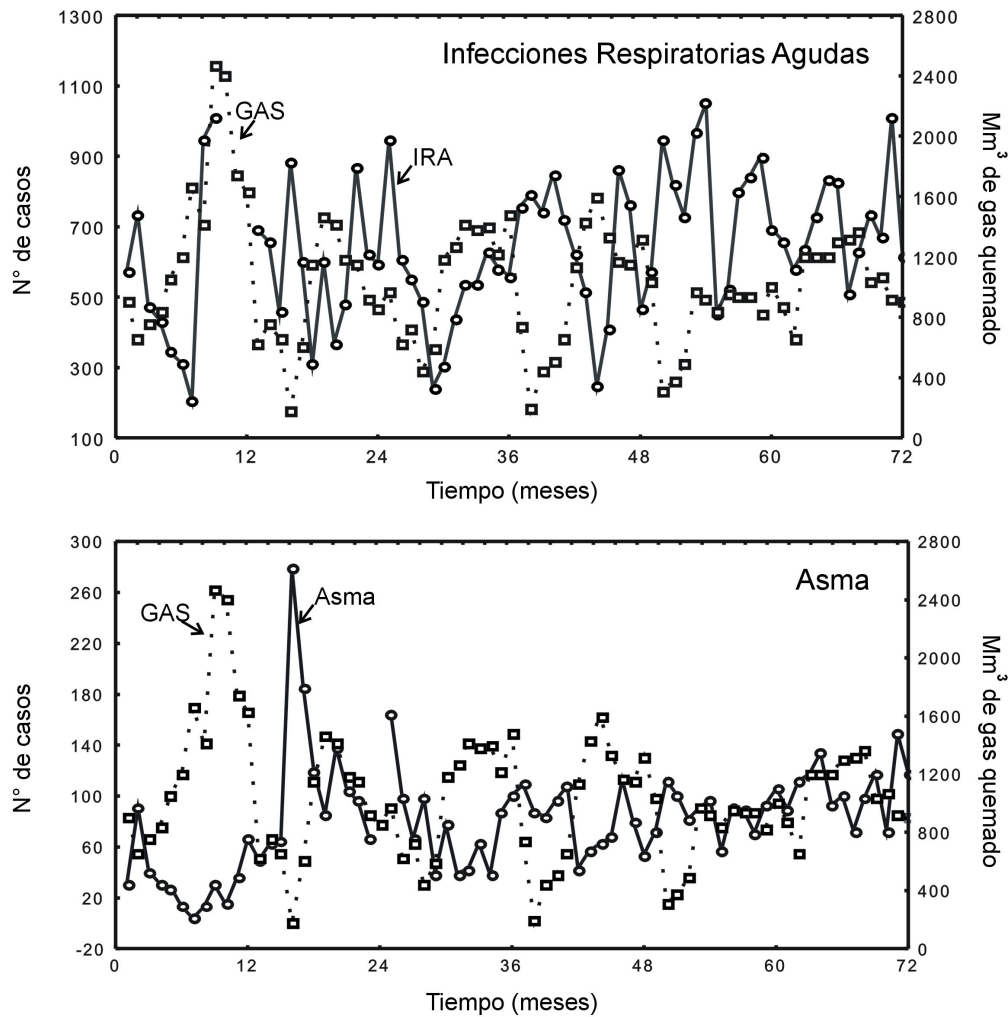


Figura 5. Comportamiento de las infecciones respiratorias agudas (IRA) y del asma en la población.

des; sin embargo, no parecen estar asociadas sólo con la cantidad de gas.

En el análisis de regresión múltiple, cuando se incluyó el intercepto en el modelo (Tabla 4), se obtuvieron las siguientes ecuaciones de interés con coeficiente de correlación significativo para  $\alpha = 0.05$  sólo entre los casos de asma con la cantidad de gas quemado (GQ).

Esto se debe a la influencia de las variables meteorológicas, fundamentalmente la rapidez y dirección de vientos, que determinarán la difusión y

el transporte de contaminantes desde la fuente emisora hacia la población referida y no aparecen contempladas en el análisis.

En el análisis de regresión, cuando no se considera el intercepto en el modelo, se obtuvieron las siguientes ecuaciones de interés con coeficientes de correlación significativos para  $\alpha = 0.05$  entre los casos de IRA y asma con la cantidad de gas quemado, lo cual indica que las emisiones del flare influyen negativamente sobre la ocurrencia de estas enfermedades en la zona.

## Conclusiones

Los niveles de concentración de hidrocarburos en el centro colector y de BTX en el centro colector y el campamento del yacimiento petrolífero de Pina resultan superiores a los máximos permisibles para aire de la zona de trabajo, según norma cubana. Las concentraciones de sulfhídrico y de BTX en el poblado resultan muy superiores a los niveles permisibles de estos contaminantes para puntos habitados.

Las emisiones de SO<sub>x</sub> del flare para velocidad de viento peligrosa alcanzan niveles de concentración máxima no significativos de acuerdo a la norma de calidad de aire ambiente y ocurren cercanos a la fuente emisora.

La ocurrencia de IRA y asma en la zona puede estar dada tanto por las emisiones no controladas de sulfhídrico y de BTX, como con la quema de gas natural en el flare de poca altura del yacimiento y el efecto aditivo de estos contaminantes en la atmósfera.

En este sentido se recomienda elevar la altura del flare con vistas a favorecer la dispersión y el transporte de estos contaminantes fuera de la localización de la zona habitada, como medida a corto plazo, así como crear infraestructura que permita aprovechar el gas en procesos de combustión en áreas cercanas a su localización, incluyendo su suministro a la población.

## Bibliografía

- ARPEL, 1997. Environmental Monitoring Procedures. Komex Int. Ltd., Calgary.
- CUPET, 1999. Regulación Ambiental 09/99. Calidad del aire para los sitios de perforación de pozos petroleros en tierra (onshore). CUPET. La Habana.
- Colás, J.A., Díaz, M., Alvarez, O. y Teuteló, R., 2005. Emission and atmospheric impact of a Cuban refinery. *Thermal Engineering*, 4: 41-45.
- Díaz, M., Paumier, V. y Colás, J.A., 2005. Uso de combustible con elevado contenido de azufre en una CTE y su relación con enfermedades no transmisibles. V Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo. pp. 90-104.
- Díaz, M., Paumier, V., Colás, J.A. y Alvarez, O., 2002. Impacto de emisiones de la actividad petrolífera. Contribución a la educación y la protección ambiental. Vol. 3.
- Kumar, R., Ramaswamy, B. y Kumar, A., 2004. Air Pollution Instrumentation. [www.utoledo.edu](http://www.utoledo.edu).
- NC 39: 1999. Calidad del aire. Requisitos higiénico – sanitarios. La Habana.
- Slater, D., 1996. Meeting the challenges of Integrated Pollution Control. *Industry and Environment*, 19: 19-22.
- Tsapakis, M. & E. G. Stephanou. 2005. Occurrence of gaseous and particulate polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: study of sources and ambient temperature effect on the gas/particle concentration and distribution. *Environmental Pollution*, 133: 147-156.
- UNEP, 1996. Industry compliance for sustained environmental protection. *Industry and Environment*, 19: 3-33.
- World Bank Group. 1998. Pollution Prevention and Abatement Handbook. Annual Meeting Ed.