

## **SIMULACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SO<sub>2</sub> EMITIDO POR FUENTES FIJAS MAYORES DURANTE 2003 EN EL NOROESTE DE CHIAPAS Y CENTRO DE TABASCO, MÉXICO**

Arturo VALDÉS-MANZANILLA<sup>1</sup>, Germán FERNÁNDEZ-GARCÍA<sup>2</sup>, Sergio RAMOS-HERRERA<sup>1</sup>,  
Raúl G. BAUTISTA-MARGULIS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> División Académica de Ciencias Biológicas, UJAT, carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5, Villahermosa, Tabasco 86100. Correo electrónico: avmanzanilla@hotmail.com

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Guadalajara Campus Tabasco, Villahermosa, Tabasco

*(Recibido agosto 2007, aceptado febrero 2008)*

Palabras clave: calidad del aire, bióxido de azufre, emisiones, modelos

### **RESUMEN**

El modelo de dispersión CALPUFF fue usado para simular la distribución espacial de la concentración de SO<sub>2</sub> emitido por los complejos procesadores de gas de Petróleos Mexicanos (PEMEX) en Cactus, en el noroeste de Chiapas, Nuevo PEMEX y Ciudad PEMEX, en el centro de Tabasco, durante 2003. Se encontró que la zona con mayor concentración de SO<sub>2</sub> está localizada al suroeste de las instalaciones de la empresa petrolera. La zona, donde la norma de la Organización Mundial de la Salud para el SO<sub>2</sub> es sobrepasada (20 µg/m<sup>3</sup>), incluye la ciudad de Reforma, Chiapas y Ciudad PEMEX, Tabasco.

Key words: air quality, sulfur dioxide, emissions, models

### **ABSTRACT**

The CALPUFF dispersion model was used to simulate the spatial distribution of the SO<sub>2</sub> emitted by Petróleos Mexicanos' (PEMEX) gas-processing complexes in Cactus, NW Chiapas, Nuevo PEMEX and Ciudad PEMEX, in central Tabasco, during 2003. It was found that the zone with the highest concentrations of SO<sub>2</sub> is located SW from the PEMEX facilities. The zone, where the World Health Organization's norm for SO<sub>2</sub> is surpassed (20 µg/m<sup>3</sup>), includes the city of Reforma, Chiapas and Ciudad PEMEX, Tabasco.

### **INTRODUCCIÓN**

Uno de los reclamos más frecuentes de la población en la zona petrolera del noroeste de Chiapas y centro de Tabasco ha sido la contaminación del aire causada por las instalaciones de Petróleos Mexicanos (PEMEX) en la región. Esto se refleja en corrosión

de materiales metálicos como alambre de púas y láminas de zinc y en enfermedades de los habitantes de las poblaciones vecinas a las instalaciones. Se piensa que uno de los principales responsables es el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), ya que al transformarse en ácido sulfúrico acelera la corrosión metálica, aparte de causar infecciones respiratorias y debilitamiento

de las defensas pulmonares (Wark y Warner 1992). Sin embargo, se han hecho pocas investigaciones en torno a la distribución espacial de la concentración de los contaminantes en la región.

Un primer paso sería la determinación de la cantidad de emisiones que hay en un cierto lugar, o inventario de emisiones, realizado por Mendoza (2002) en el área petrolera de Samaria-Iride, en el centro de Tabasco. Encontró que en esa zona se producen 1,523 toneladas de SO<sub>2</sub> anuales, repartidas en nueve instalaciones estudiadas.

Por otro lado, Villaseñor *et al.* (2003) realizaron un inventario de emisiones y simulación del transporte y dispersión de SO<sub>2</sub> emitido por las instalaciones petroleras ubicadas en la Sonda de Campeche y zona costera de Tabasco usando el modelo de dispersión CALPUFF (Scire *et al.* 2000) con datos meteorológicos de un experimento realizado durante cuatro días en febrero de 1999. Al comparar las concentraciones de SO<sub>2</sub> simuladas con las observadas en el puerto de Dos Bocas, Tabasco, encontraron que el modelo subestimaba las concentraciones de SO<sub>2</sub>, lo que atribuyeron a que no se tomaron en cuenta las emisiones de los complejos procesadores de gas que tiene PEMEX en la región.

Valdés *et al.* (2004) analizaron la distribución espacial y estacional de la concentración de SO<sub>2</sub> en la parte norte de Chiapas y centro de Tabasco usando datos observados de la red de estaciones de monitoreo de contaminantes del Sistema Automático de Monitoreo Atmosférico de la Región Sur (SAMARS) de PEMEX-Exploración y Producción. Encontraron que hay un máximo de la concentración de SO<sub>2</sub> en el área de Reforma, Chiapas, durante todas las estaciones del año, lo que atribuyeron a la cercanía de los Complejos Procesadores de Gas de Cactus y Nuevo PEMEX.

Ruiz (2004) describe el programa de disminución de emisiones de SO<sub>2</sub> en el periodo de 1999-2002 por medio de la instalación de plantas recuperadoras de azufre en los complejos procesadores de gas de PEMEX-Gas y Petroquímica Básica. Por medio de este programa, sólo se emiten 12 kg de SO<sub>2</sub> por las 1513 toneladas/día de azufre procesado en el Complejo Procesador de Gas de Cactus, Chiapas, 23 kg de SO<sub>2</sub> por las 800 toneladas/día de azufre procesado en el complejo Procesador de Gas de Nuevo PEMEX, Tabasco y 23 kg de SO<sub>2</sub> por las 816 toneladas/día de azufre procesado en el Complejo Procesador de Gas de Ciudad PEMEX, Tabasco. Estos valores hacen a estas instalaciones las fuentes fijas más grandes en la emisión de SO<sub>2</sub> en la región.

Priego (2004) estudió los suelos y la vegetación alrededor de las instalaciones petroleras en el norte

de Chiapas y centro de Tabasco y encontró que la vegetación más perturbada y los suelos más ácidos se encontraban alrededor de los complejos de Cactus y Nuevo PEMEX.

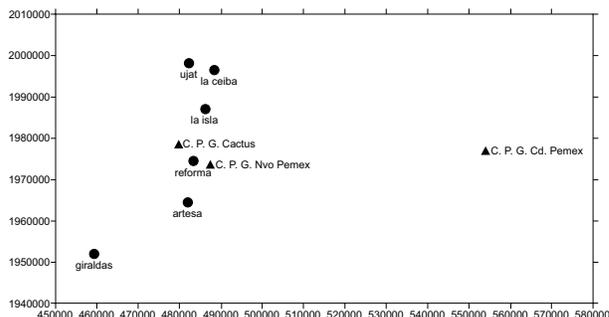
Herrera (2006), al estudiar la base de datos de concentraciones observadas de la red SAMARS, encontró una tendencia negativa, entre los años 2001 a 2004, en las concentraciones de SO<sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Reforma, Chiapas.

El objetivo de este trabajo es determinar la distribución espacial de SO<sub>2</sub> emitido por los complejos procesadores de gas de PEMEX en el noroeste de Chiapas y centro de Tabasco, usando un modelo de dispersión atmosférica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó el modelo de dispersión CALPUFF (Scire *et al.* 2000), recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), para estimar la distribución espacial de SO<sub>2</sub> en el noroeste de Chiapas y centro de Tabasco. El modelo se usó en la forma recomendada por la EPA (reguladora), sin considerar depositación seca y húmeda o reacciones químicas. Para caracterizar el flujo atmosférico regional se usaron datos de estaciones meteorológicas representativas de una zona plana y relativamente homogénea, como es la planicie tabasqueña.

El área de estudio fue de 140 km en la dirección oeste-este y 70 km en la dirección norte-sur, con el vértice sureste en las coordenadas UTM 430,000 m este y 1,940,000 m norte, lo que abarcó un área de la planicie tabasqueña relativamente alejada de la costa del Golfo de México (25 km), en el noroeste de Chiapas y el centro de Tabasco. En la **figura 1** se muestra el área de estudio. La malla del modelo fue



**Fig. 1.** Localización de las estaciones de monitoreo de la red SAMARS de Pemex-Exploración y Producción y de los Complejos Procesadores de Gas de PEMEX

de 71 x 36 nodos, siendo el tamaño de malla de 2.0 km. El periodo de estudio fue de un año, del 1 de enero al 31 de diciembre de 2003.

Los datos meteorológicos de superficie usados para correr el modelo fueron datos horarios del 1 de enero al 31 de diciembre de 2003, procedentes tanto del observatorio meteorológico de la Comisión Nacional del Agua (CNA), en la colonia Gaviotas de la ciudad de Villahermosa, como del Aeropuerto Internacional Carlos Rovirosa de Villahermosa. Ambas son estaciones representativas de la zona de estudio, ya que se encuentran en su parte central y cuentan con datos de nubosidad necesarios para correr el modelo. Los datos meteorológicos obtenidos fueron temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, cobertura y altura nubosas.

Los datos meteorológicos de altura usados para correr el modelo fueron sondeos simulados del modelo meteorológico ETA, debido a la falta de una estación de radiosondeo cercana a la región de estudio en esa fecha. Este modelo se corre con una malla de 80 km y abarca toda la región. Estos sondeos se obtuvieron, vía Internet ([www.arl.noaa.gov/ready/arnet.html](http://www.arl.noaa.gov/ready/arnet/arnet.html)) y del Air Resources Laboratory de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), en forma de termodiagramas. A partir de ellos se calculó, en forma gráfica, la altura de la capa de mezcla que se usó en el modelo. Los valores de la altura de la capa de mezcla fueron valores diarios durante el periodo estudiado.

Los datos meteorológicos fueron capturados en formatos digitales especiales y posteriormente procesados por el programa PCRAMMET, de la EPA, del cual se obtuvo un archivo con el formato necesario para su inclusión como datos de entrada al modelo de dispersión CALPUFF.

Para analizar las condiciones meteorológicas durante 2003 en la región se utilizaron datos de reanálisis del modelo global espectral AMIP (Kanamitsu 1991), obtenidos del Climatic Diagnostic Center de la NOAA, vía Internet ([www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/DataMenus.pl?dataset=NCEP](http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/DataMenus.pl?dataset=NCEP)).

Los datos de emisión (flujo másico) de las fuentes fijas mayores –los complejos procesadores de gas de PEMEX– fueron obtenidos de una conferencia impartida por el Ing. José Manuel Ruiz Pons en el tercer congreso nacional de tecnología ambiental (Ruiz 2004). Para los demás datos de emisión se supusieron los siguientes valores: la altura de la chimenea de 40 m, el diámetro de la chimenea de 2 m, la temperatura de salida del gas de 330 °K y la velocidad de salida de los gases de 9 m/s. El **cuadro I** muestra los valores de flujo másico para cada una de las fuentes fijas usadas en la simulación.

**CUADRO I.** COORDENADAS Y FLUJO MÁSIICO DE LOS COMPLEJOS PROCESADORES DE GAS DE PEMEX

Fuente fija	Coordenadas UTM este (m)	Coordenadas UTM norte (m)	Flujo másico (g/s)
Complejo Cactus	480000	1979000	210.0
Complejo Nuevo PEMEX	487000	1974000	213.0
Complejo Ciudad PEMEX	554000	1977000	217.0

Se usaron los datos de la red de estaciones de monitoreo de SAMARS del año 2003 para calcular la concentración observada en la región. Esta red está compuesta por seis estaciones repartidas alrededor del área cercana a la ciudad de Reforma, Chiapas (**Cuadro II** y **Fig. 1**).

**CUADRO II.** COORDENADAS Y PROMEDIO ANUAL DE SO<sub>2</sub> DE LAS ESTACIONES DE LA RED SAMARS DE PEMEX–EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN

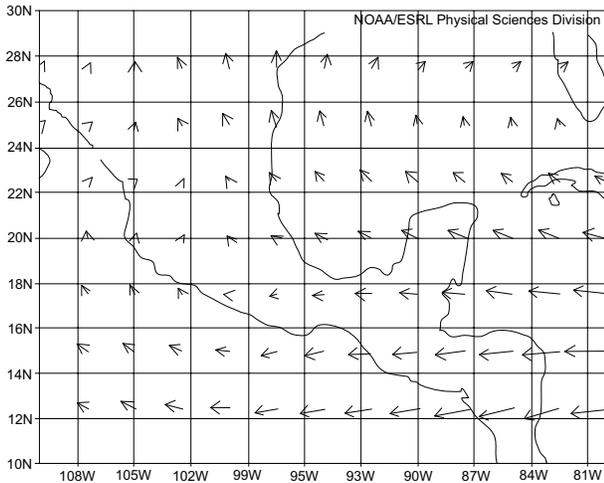
Estación	este-oeste (UTM)	norte-sur (UTM)	promedio anual de SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Reforma	483397	1974552	27.72330777
Artesa	481950	1964600	4.515378487
Giraldas	459219	1952109	8.70705092
La Isla	486200	1987150	6.213572552
UJAT-Cunduacán	482200	1998250	7.493316973
La Ceiba	488300	1996500	6.767565644

Las gráficas de distribución espacial de contaminantes fueron realizadas usando el paquete geoes-tadístico comercial SURFER versión 8.0 (Golden Software 2002). La rosa de vientos se realizó usando el software WRPLOT View (Lakes Environmental Software 2006).

Para comparar las concentraciones simuladas del modelo con las observadas por la red de monitoreo SAMARS, se realizó un análisis estadístico usando la metodología de Wilmott (1981).

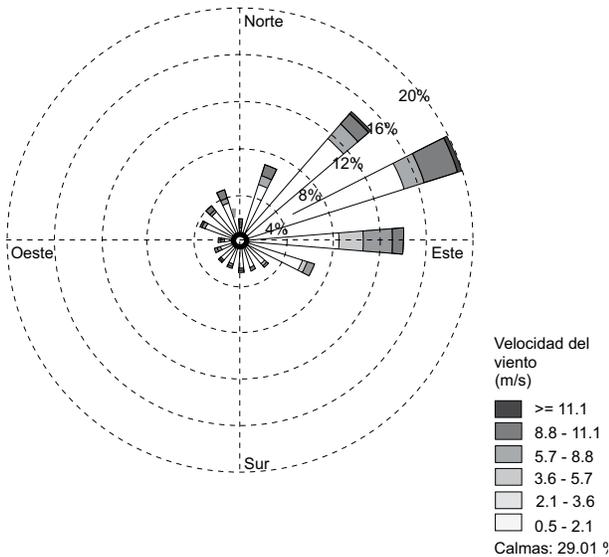
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según los datos de reanálisis del modelo global, a lo largo del año los vientos provinieron en su mayoría



**Fig. 2.** Vientos a 850 hpa durante 2003 según los datos de re-análisis del modelo global espectral AMIP

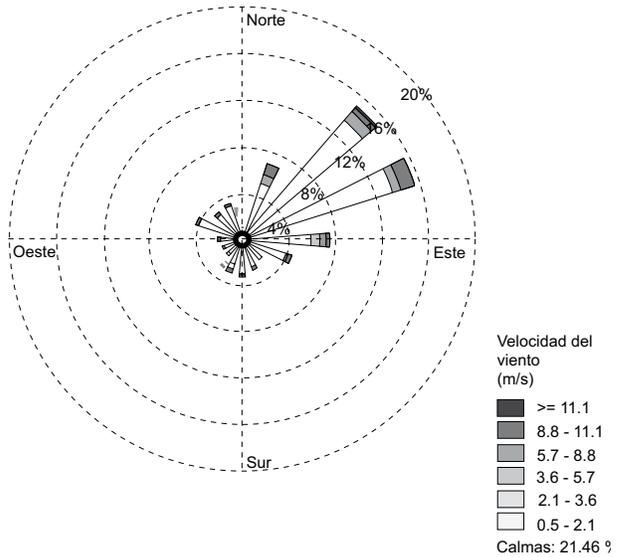
del este en la región de estudio durante 2003 (**Fig. 2**). Esto se aprecia mejor al observar la rosa de vientos de las mediciones combinadas del observatorio de la CNA en Villahermosa y del Aeropuerto (**Fig. 3**): la mayor parte del tiempo los vientos provienen del este-noreste, lo que sugiere que el transporte y dispersión



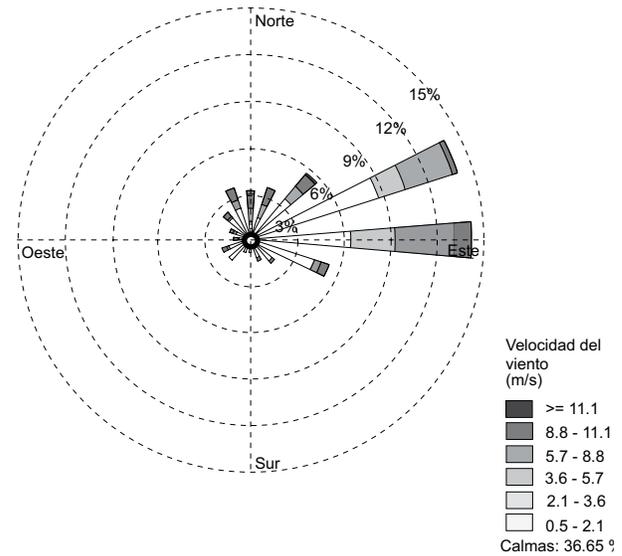
**Fig. 3.** Rosa de vientos de los datos combinados del observatorio meteorológico de la CNA y el aeropuerto de Villahermosa, Tabasco durante 2003

del  $SO_2$  va a ser hacia el suroeste.

La rosa de vientos del observatorio de la CNA (**Fig. 4**) es muy similar a la del aeropuerto (**Fig. 5**), lo que justifica la combinación de los datos de las dos



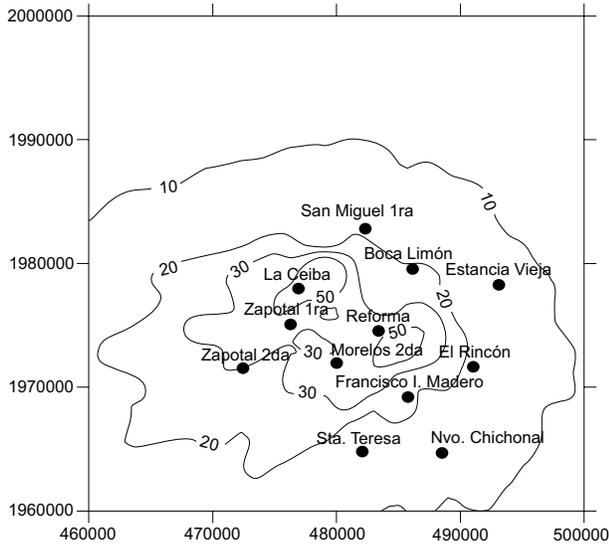
**Fig. 4.** Rosa de vientos del observatorio meteorológico de la CNA de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, en la colonia Gaviotas, del primer semestre de 2003 (enero-junio)



**Fig. 5.** Rosa de vientos del aeropuerto internacional de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, del segundo semestre del 2003 (julio-diciembre)

estaciones meteorológicas en una sola para subsanar la falta de información en algunos periodos del día; también, que haya una representativa de la circulación de los vientos en la planicie tabasqueña y por lo tanto del flujo de vientos en el área de estudio.

Las simulaciones del modelo para todo el periodo de estudio muestran que los máximos de concentración de  $SO_2$  se encuentran al suroeste de los complejos procesadores de gas, en consonancia con

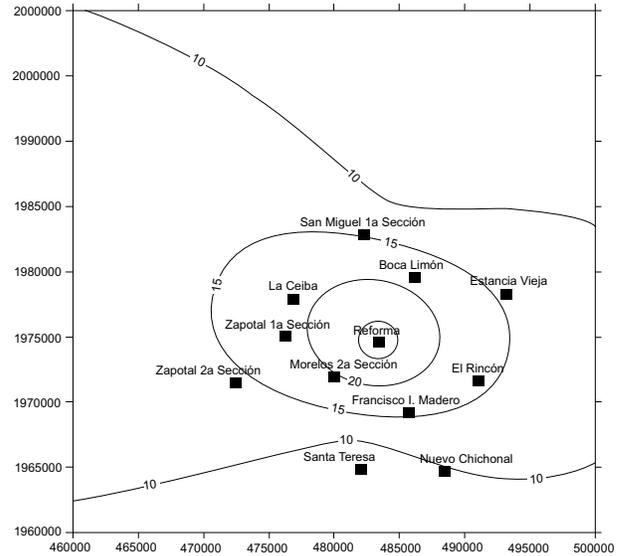


**Fig. 6.** Mapa de concentración promedio anual de SO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) estimada por el modelo durante 2003 en el área de Reforma, Chiapas. Las coordenadas geográficas son UTM. Las isótopos son de concentración de SO<sub>2</sub> de 10, 20, 30 y 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

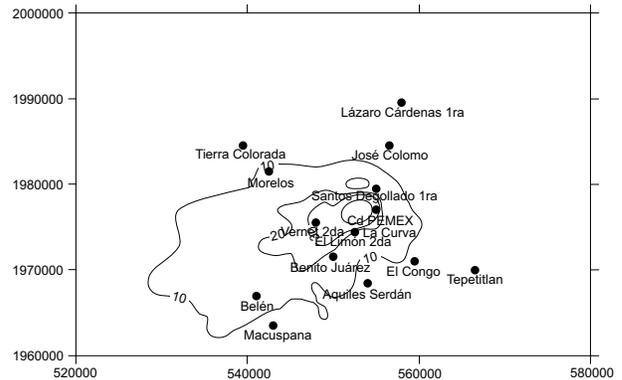
la dirección del viento, que es predominantemente del este-noreste (**Fig. 3**). En el caso de los complejos procesadores de gas de Cactus y Nuevo PEMEX, se aprecia que la zona que abarca la ciudad de Reforma, Chiapas, y algunas pequeñas comunidades de sus alrededores, la concentración de SO<sub>2</sub> sobrepasa la norma oficial de la Organización Mundial de la Salud (OMS 2006), de 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio en un año (**Fig. 6**). Si se compara la distribución espacial de SO<sub>2</sub> estimada por el modelo con la medida por la red de estaciones de monitoreo de la SAMARS (**Fig. 7**), se puede ver la gran similitud entre las dos distribuciones, coincidiendo ambas en el máximo cerca de Reforma; sin embargo, en la distribución medida de SO<sub>2</sub> no se aprecia el otro máximo cerca del complejo procesador de gas de Cactus, al noroeste de la ciudad arriba mencionada.

En el caso del complejo procesador de Ciudad PEMEX, Tabasco, la zona de mayor concentración de SO<sub>2</sub> se encuentra al oeste-suroeste del complejo (**Fig. 8**), en consonancia con la dirección del viento dominante. Por otro lado, la zona donde la concentración de SO<sub>2</sub> sobrepasa la norma oficial de la Organización Mundial de Salud (OMS 2006) abarca Ciudad PEMEX, la rancharía Vernet segunda sección y el pueblo de La Curva.

En cuanto a la bondad del modelo para reproducir las observaciones, se puede ver en el **cuadro III** y en la **figura 9**, al comparar la media de las observaciones ( $\bar{O}$ ) con la media de las predicciones



**Fig. 7.** Mapa de concentración promedio anual de SO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) medida en la red SAMARS de PEMEX-Exploración y Producción durante 2003. Las coordenadas geográficas son UTM. Las isótopos son de 10, 15, 20 y 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



**Fig. 8.** Mapa de concentración promedio anual ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de SO<sub>2</sub> estimada por el modelo durante 2003 en el área de Ciudad PEMEX, Tabasco. Las coordenadas geográficas son UTM. Las isótopos son de 10, 20, 30 y 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

o estimaciones del modelo ( $\bar{E}$ ), que éste sobrestima las concentraciones de SO<sub>2</sub> aproximadamente en 52 %; esto puede ser debido a que los valores de emisión de las chimeneas necesitan ser más exactos. Por otro lado, el valor del error cuadrático medio no sistemático ( $\text{MSE}_{\text{NS}}$ ) es sólo 25 % del error cuadrático medio total ( $\text{MSE}$ ), lo que indica una buena exactitud del modelo, y que se corrobora por el valor de  $R^2$  de 0.89.

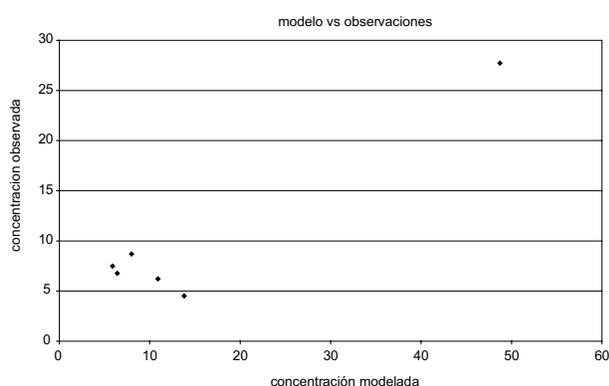
## CONCLUSIONES

Se encontraron concentraciones altas de SO<sub>2</sub> al

**CUADRO III.** PARÁMETROS ESTADÍSTICOS PARA EVALUAR LA BONDAD DEL MODELO SEGÚN WILMOTT(1981)

Parámetro estadístico	$S_o$	$S_e$	MAE	MSE	$MSE_S$	$MSE_{NS}$	$R^2$	$\bar{E}$	$\bar{O}$
Valor	8.7	16.5	6.3	91.8	69.0	22.8	0.89	16.5	10.2

Donde  $S_o$  es desviación estándar de las observaciones,  $S_e$  es desviación estándar de las estimaciones del modelo, MAE es el error absoluto medio, MSE es el error cuadrático medio,  $MSE_S$  es el error cuadrático medio sistemático total,  $MSE_{NS}$  es el error cuadrático medio no sistemático,  $R^2$  es el cuadrado del coeficiente de correlación,  $\bar{E}$  es la media de las estimaciones del modelo,  $\bar{O}$  es la media de las observaciones.



**Fig. 9.** Dispersograma de las concentraciones de  $SO_2$  observadas por la red SAMARS y las simuladas por el modelo CALPUFF

suroeste de los Complejos Procesadores de Gas de Cactus, Nuevo PEMEX y ciudad PEMEX durante 2003. La zona donde las concentraciones de  $SO_2$  sobrepasan la norma de la Organización Mundial de Salud incluye localidades importantes como Reforma, Chiapas, Ciudad Pemex y La Curva en Tabasco. El modelo sobrestima del orden de 52 % las concentraciones de  $SO_2$ .

Se recomienda usar valores más representativos de la emisión de  $SO_2$ , de las características de las chimeneas y estudiar con mayor detalle las concentraciones de fondo para mejorar las estimaciones de concentración de  $SO_2$  en la región.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al personal del área de Seguridad Industrial y Protección Ambiental de PEMEX–Exploración y Producción, las facilidades para realizar este trabajo, en especial el acceso a los datos de inmisiones y emisiones de contaminantes atmosféricos.

### REFERENCIAS

- Golden Software, Inc. (2002). Surfer user's guide, Golden Colorado, EUA.
- Herrera S. (2006). Análisis de contaminantes atmosféricos ( $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $H_2S$  y  $PM_{10}$ ) en la zona norte de Chiapas. Tesis de maestría en Ingeniería y Protección Ambiental. División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.
- Kanamitsu M., Alpert J.C., Campana K.A., Caplan P.M., Deaven D.G., Iredell M., Katz B., Pan H.L., Sela J. y White G.H. (1991). Recent changes implemented into the global forecast system at NMC. *Wea. and Forecasting*, 6, 425-435.
- Lakes Environmental Software Inc. (2006). WRPLOT View version 5.3.0.419 Philip St. Ontario, Canada ([www.weblakes.com/lakewrpl.html](http://www.weblakes.com/lakewrpl.html)) [Consultado 19-sep-06].
- Mendoza V. (2002). Inventario de emisiones atmosféricas por la actividad de las instalaciones petroleras en la zona central del estado de Tabasco. Tesis de maestría en Ingeniería y Protección Ambiental. División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- OMS (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Organización Mundial de la Salud, Ginebra, Suiza.
- Priego G.A. (2004). Diagnóstico ambiental de suelos y vegetación en las zonas norte de Chiapas y centro de Tabasco. Tesis de licenciatura en Ingeniería Ambiental. División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.
- Ruiz J.N. (2004). Disminución de la emisión de  $SO_2$  en PGPB. III Congreso Nacional de Tecnología Ambiental. 1-3 de Junio de 2004, Villahermosa, Tabasco. Memoria electrónica, Universidad Tecnológica de Tabasco, División de Tecnología Ambiental ([www.uttab.edu.mx](http://www.uttab.edu.mx)). [Consultado 19-Sep-2006]
- Scire J.S., Strimaitis D.G. y Yamartino R.J. (2000). User's

- Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5.0), Earth Tech Inc. Concord, MA, EUA.
- Valdés A., Bautista R., Ramos S. y Magaña E. (2004). Distribución espacial y estacional de las inmisiones de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en la zona norte de Chiapas y centro de Tabasco. *Kuxulkab'* 10, 33-36.
- Villaseñor R., Magdaleno M., Quintanar A., Gallardo J.C., López M.T., Jurado R., Miranda A., Aguilar M., Melgarejo L.A., Palmerín E., Vallejo C.J. y Barchet W.R. (2003). An air quality inventory of offshore operations for the exploration and production of petroleum by the Mexican oil industry. *Atmos. Environ.* 37, 3713-3729.
- Wark K. y Warner C.F. (1992). *Contaminación del aire. Origen y control*, LIMUSA, México, 650 pp.
- Willmott C.J. (1981). On the validation of models. *Phys. Geogr.* 2, 184-294.