

Comparative evaluation of SO₂ in less favorable wind direction from a thermal power plant

Cezar García, Analí Machado, Neyma García, Carmen Cárdenas, William González, Jaime Martínez y Suher Yabroudi

Escuela de Ingeniería Química, División de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela. E-mail: garcía@falcon.ing.luz.ve

Abstract

There is a thermal power plant located at Maracaibo State of Zulia, Venezuela. This plant represents an important source of sulphur dioxide emissions in the zone because of combustion of fuel oil. The SO₂ emissions from the chimneys are dispersed into atmosphere, generating high levels of SO₂ in the areas near to the plant that surpassed the limits for air quality. This work analyzes the distribution of SO₂ concentration toward the northern zone of the plant and in the less favorable wind direction. For the experiment, samples were collected by absorption through the RAC 5 system (model all weather shelter). For computational purposes the atmospheric dispersion models presented by Briggs and Pasquill-Gifford were applied. To apply the model hourly values of meteorological conditions were recorded at Maracaibo such as: wind speed, wind direction, cloudiness, insolation and temperature during December 2000 and January 2001. The results indicated that the Briggs model for urban dispersion fit quite well experimental values from the sampling zone, which takes into account local meteorological conditions and data from the pollution source.

Key words: SO₂ dispersion, air pollution, dispersion model, atmospheric stability.

Evaluación comparativa de la concentración de SO₂ vientos arriba de una planta termoeléctrica

Resumen

En la zona urbana de la ciudad de Maracaibo existe una planta termoeléctrica, la cual es una fuente de contaminación atmosférica, produce entre otros poluentes, Dióxido de Azufre (SO₂) formado de la combustión de los componentes fósiles utilizados. Estas emisiones se dispersan en la atmósfera, encontrándose concentraciones en diferentes puntos que inclusive pueden sobrepasar estándares legales de calidad de aire. En este trabajo de investigación se analiza la distribución de las concentraciones del SO₂, hacia la zona norte de la planta termoeléctrica y en la dirección menos preferencial de los vientos. A nivel experimental las muestras fueron recolectadas por absorción a través del sistema RAC 5 modelo all weather shelter, mientras a nivel computacional se aplicaron los modelos de dispersión atmosféricos de Briggs y Pasquill-Gifford. Para la aplicación de los modelos se determinaron datos horarios de las condiciones meteorológicas de la ciudad de Maracaibo tales como: velocidad del viento, dirección del viento, nubosidad, insolución y temperatura de los días de muestreo del mes de Diciembre de 2000 y Enero de 2001, al igual que los datos de la planta termoeléctrica tales como: tasa de emisión, altura física de la chimenea, diámetro de la chimenea, y temperatura de salida de los gases. El modelo de Briggs par la dispersión urbana ofreció la mejor aproximación con los valores experimentales medidos en la zona de muestreo teniendo en cuenta condiciones meteorológicas locales y datos de la fuente puntual.

Palabras clave: Dispersión de SO₂, polución del aire, modelo de dispersión, estabilidad atmosférica.

I. Introducción

El diagnóstico de la calidad del aire por sí solo representa un aspecto fundamental en el proceso de definición, legislación, control y evaluación de la contaminación atmosférica en las diversas regiones. Los factores que participan en la problemática de la contaminación de las atmósferas urbanas son múltiples, entre otros características físico-químicas del efluente gaseoso, configuración de la fuente, condiciones meteorológicas del área, y perfil topográfico del área [1].

La calidad del aire de la atmósfera de la ciudad de Maracaibo está directamente influenciada por la climatología de la cuenca del lago de Maracaibo, la cual comprende una extensa superficie de agua, rodeada en su mayor parte por cordilleras, con un solo lado abierto hacia el norte; esta topografía particular hace que en la cuenca ocurran fenómenos locales cuya intensidad depende en gran medida de los vientos reinantes sobre el Caribe y Venezuela [2].

La existencia de una planta termoeléctrica en la ciudad de Maracaibo constituye una importante fuente emisora de dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), y cenizas en forma de partículas suspendidas, que afectan adversamente la calidad del aire de zonas cercanas a ella. La planta termoeléctrica está ubicada a 10°36'15" de latitud norte y 71°36'50" de longitud oeste en el municipio Maracaibo; la capacidad instalada de producción es de 804 Mw., el combustible de uso frecuentemente es el fuel oil residual que contiene alrededor de 3% de azufre, 450ppm de vanadio, 0.1% de cenizas y un poder calorífico de 18055 BTU/lbm [3].

Araujo y otros [4] realizaron en 1987 un muestreo de SO₂ en áreas alrededor de la planta termoeléctrica con los siguientes valores extremos encontrados en las diferentes estaciones: en la dirección preferencial de los vientos, A (sur, 650 m de la planta) con 3.70- 22.9µg/m³, B (sur, 1200 m de la planta) con 41.60 - 117.6 µg/m³; vientos arriba de la planta, E (norte, a 3700 m), con 7.8 - 23.4µg/m³; hacia el oeste de la planta, C (oeste a 500 m) con 39.8 - 53.8µg/m³, D (oeste a 800 m) con 29.4 - 247.4µg/m³. Las concentraciones de SO₂ resultaron por encima del standard de calidad del aire y en relación directa con la continua emisión de SO₂ desde la planta termoeléctrica.

Rossell y otros [5] efectuaron en 1989 un monitoreo de SO₂ y partículas suspendidas totales (PST) en áreas aledañas a la planta termoeléctrica y reportaron los siguientes valores extremos en las diferentes estaciones, en la dirección preferencial de los vientos, A (sur a 1200 m) con SO₂ 17.1 - 189.9µg/m³ y PST 53.9 - 192.1µg/m³, B (sur a 1800 m) con 5.7 - 72.8µg/m³ y PST 46.3 - 76.2 µg/m³, vientos arriba de la planta, E (norte, a 3000 m) con SO₂ 17.3 - 23.3µg/m³, y PST 22.5 - 79.7 µg/m³; hacia el oeste de la planta, C (oeste a 800 m) con SO₂ 11.4 - 30.2µg/m³, y PST 43.4 - 101.2µg/m³; D (oeste, a 1800 m) con SO₂ 5.6 - 66.5µg/m³, y PST 40.9 - 66.0µg/m³. De todos los sitios de muestreo la estación A resultó la más influenciada por la planta termoeléctrica con los niveles de SO₂ y PST por encima del estándar anual de calidad del aire.

García y otros [6] acoplaron el modelo de dispersión Gaussiana desarrollado por Turner [7] a las condiciones operacionales de la planta termoeléctrica estudiada y a las estabildades atmosféricas de la ciudad de Maracaibo en la predicción de las concentraciones de SO₂ y su comparación con los valores experimentales encontrados en los alrededores de la planta termoeléctrica. Los resultados indican que para la clase de estabilidad C que predomina en la atmósfera de la ciudad de Maracaibo y con los coeficientes de dispersión dados por Pasquill-Gifford se obtiene una alta correlación entre las concentraciones estimadas por el modelo y las medidas de SO₂ en el área.

El objetivo de la presente investigación es hacer un estudio sobre los niveles de SO₂ en el entorno de la planta termoeléctrica, hacia el norte de la planta, en la dirección menos preferencial de los vientos y la comparación con el modelo de Turner a través de las predicciones de los coeficientes de dispersión según Pasquill-Gifford, Briggs (dispersión rural) y Briggs (dispersión urbana).

II. Fundamentos Teóricos

Para predecir las concentraciones de SO₂ en cualquier posición (X, Y, Z) tomando como origen de las coordenadas cartesianas la planta termoeléctrica Ramón Laguna, siendo X el eje trazado por la dirección preferencial de los vientos, Y el eje perpendicular al X sobre el nivel del suelo, Z el eje Normal al eje X hacia arriba del suelo, se utili-

za la ecuación Gaussiana de dispersión desarrollada por Turner [7]:

$$C_{(x,y,z,H_e)} = \frac{Q}{2 * \pi * \mu * \sigma_y * \sigma_z} \exp\left[\frac{-y^2}{2 * \sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[\frac{-(Z - H_e)^2}{2 * \sigma_z^2}\right] \exp\left[\frac{-(Z + H_e)^2}{2 * \sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

donde la altura efectiva involucra la altura física mas la elevación por los efectos combinados de temperaturas y momento, $H_e = H + \Delta H$, el programa de computación a partir de los datos operacionales de descarga de las emisiones calcula con las ecuaciones de Briggs[8] la altura adicional ΔH ,

$$\Delta H = 160 \frac{F^{1/2} \lambda^{1/2}}{\mu} \quad (2)$$

donde el parámetro λ depende de la clase de estabilidad atmosférica, si es neutral o inestable.

$$\lambda = 49F^{1/2} \text{ si } F < 55 \quad (3)$$

$$\lambda = 119F^{1/2} \text{ si } F \geq 55 \quad (4)$$

Mientras que para la clase de estabilidad atmosférica estable:

$$\lambda = 207 \frac{\mu}{S^{1/2}} \quad (5)$$

donde el parámetro flotante F esta definido en función de las condiciones de descarga desde el tope de la chimenea, así:

$$F = g \frac{T_s - T_a}{T_a} V_s \left(\frac{D}{2}\right) \quad (6)$$

Y el parámetro de estabilidad S definido a parte del gradiente vertical de temperatura, de esta manera:

$$S = \frac{g}{T_a} \left[\frac{dT}{dz} + \left(\frac{dT}{dz}\right)_{adiabatica} \right] \quad (7)$$

S= 0, atmósfera adiabática o estabilidad neutra; S>0 atmósfera estable; S<0 atmósfera inestable.

El modelo Gaussiano de dispersión esta orientado por los coeficientes de dispersión σ_y, σ_x como función de la dirección preferencial de los vientos (x) y según la estabilidad atmosférica de Pasquill [9] mostrada en la Tabla 1. En este trabajo de investigación se utilizan tres aproximaciones para los coeficientes de dispersión:

- Ecuaciones de Briggs [10], para dispersión urbana, Tabla 2.
- Ecuaciones de Briggs [10], para dispersión rural, Tabla 2.
- Ecuaciones de Pasquill-Gifford [11], Tablas 3 y 4.

Las siguientes ecuaciones (8 y 9) son utilizadas para estimar los parámetros de dispersión vertical y horizontal de Pasquill-Gifford:

$$\sigma_y = \frac{\left[1000 * X * \tan\left(\frac{T}{57.29569}\right) \right]}{215} \quad (8)$$

donde:

- σ_y : es el parámetro de dispersión horizontal
 X: es la distancia a favor del viento en Km.
 T: es determinada para cada estabilidad como función de X, Tabla 3

Tabla 1
Clave para la clase de estabilidad Pasquill

Velocidad del viento a 10m, m/s	Insolación			Condiciones nocturnas*	
	Fuerte	Moderada	Ligera	>4/8 de Nubosidad**	<3/8 de Nubosidad**
<2	A	A-B	B
2 a 3	A-B	B	C	E	F
3 a 5	B	B-C	C	D	E
5 a 6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	C	D

Tabla 2
Coeficiente de dispersión rurales y urbanos de Briggs

Clase de estabilidad Pasquill	σ_y (m)	σ_z
	Condiciones Rurales	Condiciones Rurales
A	$0,22 \cdot X \cdot (1+0,0001 \cdot X)$	$0,20 \cdot X$
B	$0,16 \cdot X \cdot (1+0,0001 \cdot X)$	$0,12 \cdot X$
C	$0,11 \cdot X \cdot (1+0,0001 \cdot X)$	$0,08 \cdot X \cdot (1+0,0002 \cdot X)$
D	$0,08 \cdot X \cdot (1+0,0001 \cdot X)$	$0,06 \cdot X \cdot (1+0,0015 \cdot X)$
E	$0,06 \cdot X \cdot (1+0,0001 \cdot X)$	$0,03 \cdot X \cdot (1+0,0003 \cdot X)$
F	$0,04 \cdot X$	$0,016 \cdot X \cdot (1+0,0003 \cdot X)$
	Condiciones Urbanas	Condiciones Urbanas
A-B	$0,34 \cdot X \cdot (1+0,0004 \cdot X)$	$0,24 \cdot X \cdot (1+0,001 \cdot X)$
C	$0,22 \cdot X \cdot (1+0,0004 \cdot X)$	$0,20 \cdot X$
D	$0,16 \cdot X \cdot (1+0,0004 \cdot X)$	$0,14 \cdot X \cdot (1+0,0003 \cdot X)$
E-F	$0,11 \cdot X \cdot (1+0,0004 \cdot X)$	$0,08 \cdot X \cdot (1+0,0015 \cdot X)$

$$\sigma_z = a \cdot X^b$$

(9)

donde:

 σ_z : es el parámetro de dispersión vertical.

X: es la distancia a favor del viento en Km.

a y b: es determinado para cada estabilidad como función de X, Tabla 4.

III. Metodología y Análisis de Variable

Se seleccionaron tres estaciones de muestreo localizadas hacia la zona norte de la planta termoeléctrica, en la dirección menos preferencial de los vientos, denominadas de la siguiente manera: Estación N° 1 ubicada a una distancia de 3000 m, Estación N° 2 a 2400 m y Estación N° 3 a 700 m, tal cual se muestra en la Figura 1. La recolección de las muestras de aire se realizó con un absorbedor tipo RAC 5 modelo All Weather Shelter, utilizando solución de peróxido de hidrógeno al 0.6% y posterior medición por cromatografía iónica. Las condiciones de operación del RAC 5 se calibraron para un caudal de 1.80 ft³/min., 29 pulgadas de Hg. de vacío y una temperatura de 32.2°C; mientras que para el cromatógrafo iónico se emplearon columnas Dionex Ion Pac-AS4A y como eluyente la mezcla de Na₂CO₃ 1.8 nM - NaHCO₃ 1.7nM, los resultados del moni-

Tabla 3
Parámetros de Pasquill Gifford

Estabilidad	Ecuación para T
A	$T=24,167-2,5334 \cdot \ln(X)$
B	$T=18,333-1,8096 \cdot \ln(X)$
C	$T=12,5-1,0857 \cdot \ln(X)$
D	$T=8,3333-0,72382 \cdot \ln(X)$
E	$T=6,2500-0,54287 \cdot \ln(X)$
F	$T=4,1667-0,36191 \cdot \ln(X)$

toreo del SO₂ para las estaciones 1-3 se presentan en las Tablas 5 y 6 respectivamente.

Las variables meteorológicas correspondientes al periodo de muestreo fueron reportadas por la estación meteorológica, la Cañada de la Fuerza Aérea de Venezuela. En la Figura 2 se presenta la variación de la velocidad de los vientos en la atmósfera de la ciudad de Maracaibo como promedio horario para los meses de Diciembre y Enero, con valores entre 2 y 5 m/s la velocidad de los vientos va disminuyendo como avanza la mañana entre 1:00 am y 12:00 am, luego del medio día, la velocidad empieza a aumentar hasta alcanzar los valores máximos durante la noche entre 8:00 pm y 10:00 pm. En la Figura 3 se presenta la variación de la temperatura del aire atmosférico como promedio horario para los meses de diciembre y enero

Tabla 4
Parámetros a y b de Pasquill Gifford

Estabilidad	Distancia (Km.)	a	b	σ_z
A	> 3,11	5000 m
	0,50 a 3,11	453,85	2,1166	...
	0,40 a 0,50	346,75	1,7283	...
	0,30 a 0,40	258,89	1,4094	...
	0,25 a 0,30	217,41	1,2644	...
	0,20 a 0,25	179,52	1,1262	...
	0,15 a 0,25	170,22	1,0932	...
	0,10 a 0,15	158,08	1,0542	...
	< 0,1	122,8	0,9447	...
B	> 35
	0,40 a 35	109,3	1,0971	...
	0,20 a 0,40	98,483	0,98332	...
	< 0,20	90,673	0,93198	...
C	todo X	61,141	0,91485	...
D	> 30	44,053	0,51179	...
	10 a 30	36,053	0,56589	...
	3 a 10	33,504	0,60486	...
	1 a 3	32,093	0,64403	...
	0,3 a 1	32,093	0,81066	...
	< 0,3	34,459	0,86974	...
E	> 40	47,618	0,29592	...
	20 a 40	35,42	0,37615	...
	10 a 20	26,97	0,48713	...
	4 a 10	24,703	0,50527	...
	2 a 4	22,534	0,57154	...
	1 a 2	21,628	0,63077	...
	0,3 a 1	21,628	0,7566	...
	0,1 a 0,3	23,331	0,84985	...
	< 0,1	24,26	0,8366	...

con los valores máximos entre 35°C y 36°C hacia el mediodía y transcurso de la tarde entre 12:00m y 4:00 pm; mientras los mínimos entre 23°C y 25°C ocurren entre 4:00 am y 8:00 am.

En relación a la dirección de los vientos, el análisis del promedio horario indica que en general durante las primeras horas del día entre 1:00

am y 9:00 am y las ultimas horas de la tarde y noche entre 6:00 pm y 12:00 pm la dirección predominante de los vientos es nor-este; lo anterior implica que las emisiones de SO₂ por parte de la fuente generadora de energía eléctrica estarían siendo distribuidas hacia lo que se conoce como vientos abajo durante un periodo de tiempo de 14



Figura 1. Mapa donde se ubican las estaciones seleccionadas.

horas. Por el contrario durante el horario cercano al medio día y primeras horas de la tarde, la dirección sur-este es la prevaleciente; similarmente, ello significa que las emisiones de SO₂ de la fuente bajo estudio, estarían dispersándose en la dirección catalogada como vientos arriba por un periodo de tiempo de 6 horas. En la Tabla 7 se presenta los valores diarios predominantes de la dirección de los vientos y de la estabilidad atmosférica según el criterio de Pasquill (9) y los valores promedios diarios de la velocidad de los vientos y la temperatura atmosférica.

IV. Discusión de Resultados

Del análisis de los resultados del Estación N° 1, los valores de SO₂ se ubican entre 66.20µg/m³, y 85.20µg/m³, con 76.07µg/m³ como concentración promedio para el periodo de

muestreo del 07 al 13 de Diciembre de 2000 con velocidades de vientos entre 2.08 m/s y 3.82 m/s y temperaturas entre 27°C y 29°C. En principio las concentraciones de SO₂ registradas en la Estación N° 1 fluctúan en un rango considerado moderado por la uniformidad de las condiciones meteorológicas predominante para el periodo de muestreo y señala al mismo tiempo la posibilidad de la existencia de una línea base de SO₂ en las adyacencias de la planta termoeléctrica.

En la Estación N° 2, las concentraciones de SO₂ resultaron entre 58.90µg/m³ y 75.52µg/m³ con un valor promedio de 66.26µg/m³ para el periodo de muestreo correspondiente del 14 al 20 de Diciembre de 2000, con variaciones meteorológicas de velocidad del viento entre 2.82 m/s y 4.59 m/s y temperaturas entre 27°C y 28°C. Del análisis comparativo de las Tablas 5 y 7 (meteorología del lapso) se observa la tendencia hacia la

Tabla 5
Concentraciones de SO₂ en las Estaciones N° 1 y 2

Concentraciones en SO ₂ (µg/m ³) en la Estación N° 1			Concentraciones en SO ₂ (µg/m ³) en la Estación N° 2		
Muestras	Días	Concentración SO ₂	Muestras	Días	Concentración SO ₂
1	07/12/2000	85,17	1	14/12/2000	69,11
2	08/12/2000	81,28	2	15/12/2000	72,52
3	09/12/2000	81,28	3	16/12/2000	70,57
4	10/12/2000	73,98	4	17/12/2000	58,89
5	11/12/2000	72,52	5	18/12/2000	63,75
6	12/12/2000	66,19	6	19/12/2000	64,24
7	13/12/2000	72,03	7	20/12/2000	64,73

disminución de la concentración de SO₂ con la disminución de la velocidad de los vientos; 72.52µg/m³, 70.57µg/m³, 64.73µg/m³, mientras la velocidad de los vientos varia así 3.74m/s, 3.13m/s y 2.84m/s, esto se corresponde con las premisas del modelo Gaussiano de dispersión, donde la concentración es inversamente proporcional a la velocidad del viento.

En la Estación N° 3, los valores extremos de la concentración de SO₂ se ubicaron entre 58.89µg/m³ y 65.71 µg/m³ con un valor promedio de 63.97 µg/m³ para el periodo de muestreo del 12 al 18 de Enero de 2001, bajo las velocidades del viento entre 3.09 m/s y 4.79 m/s, y temperaturas entre 27.49°C y 36.01°C.

Del análisis global del muestreo experimental de SO₂ en las Estaciones 1-3, se destaca las siguientes observaciones:

- i. Las concentraciones de SO₂ aumentan con el incremento de la posición horizontal (trazada en el eje preferencial de los vientos), esto es los valores de la Estación N° 1 (3000 m) resultaron mayores que los de la Estación N° 2 (2400 m) y estos mayores que los de la Estación N° 3 (700 m).
- ii. Los valores promedios de SO₂ en función de la posición horizontal así: 76.07µg/m³ a 3000 m, 66.26µg/m³ a 2400 m, 63.97µg/m³ a 700 m desde la base de la Planta termoeléctrica. Esta distribución de concentración de SO₂ con la distancia X se

Tabla 6
Concentraciones de SO₂ (µg/m³)
en la Estación N° 3

Muestras	Días	Concentración SO ₂
1	12/01/2001	64,564
2	13/01/2001	62,269
3	14/01/2001	61,464
4	15/01/2001	61,282
5	16/01/2001	45,416
6	17/01/2001	55,173
7	18/01/2001	56,54

corresponde con lo predicho en el modelo Gaussiano de dispersión.

- iii. El rango de variación de la concentración de SO₂ en la medida que se aleja de la Planta termoeléctrica tiende a una mayor abertura entre los niveles máximos y mínimos, así $\Delta C = 19.00\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 3000 m, $\Delta C = 13.62\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 2400 m, $\Delta C = 6.82\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 700 m.
- iv. La existencia de un rango de variación moderada entre los niveles de SO₂ aconseja sobre la presencia de una línea base de SO₂ en la adyacencia de la Planta Termoeléctrica como consecuencia de la emisión continua de SO₂ por más de 50 años.

Para la predicción de la concentración de SO₂ en las referidas estaciones se utilizó la si-

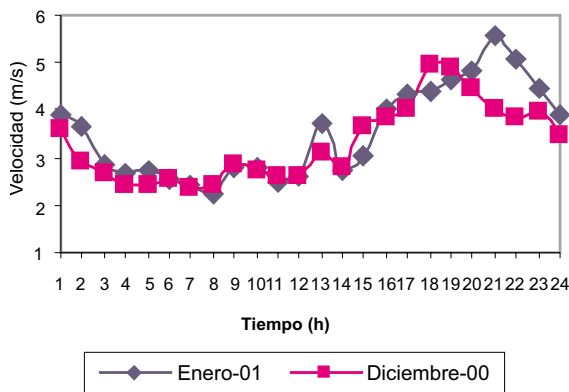


Figura 2. Variación horaria promedio de la velocidad del viento en la ciudad de Maracaibo.

guiente información para las corridas de los modelos computacionales:

1. La tasa de emisión de 535.09 g/s correspondiente a la generación mínima de energía eléctrica en la planta.
2. Los coeficientes variables de dispersión en las direcciones, Y, Z, esto es, los parámetros σ_y y σ_z hasta encontrar el orden de Magnitud apreciable entre las concentraciones experimentales y calculadas.

Los resultados de esta tercera aproximación se presentan en los Tablas 8, 9 y 10, para el Modelo de Briggs de dispersión urbana; en las Tablas 11, 12 y 13 para el Modelo de Briggs de dispersión rural; y en las Tablas 14, 15 y 16 para el Modelo de Pasquill-Gifford; del análisis global de los anteriores resultados se desprende las siguientes anotaciones:

- i. Indudablemente que la distribución Gaussiana o distribución normal de la concentración varía con los parámetros de dispersión σ_y y σ_z que según Pasquill la relación binaria (σ_y y σ_z) conjuntamente con la dirección preferencial de los vientos define igualmente la Estabilidad Atmosférica. De tal modo que al variar la relación binaria (σ_y y σ_z) se estarán analizando las estabildades A, B, C, D, E, y F, en la determinación de las concentraciones.
- ii. El Modelo de Briggs de dispersión urbana ofrece la mejor aproximación para la primera estación para la relación binaria $\sigma_y = 373.99$ metros y $\sigma_z = 354.99$ metros

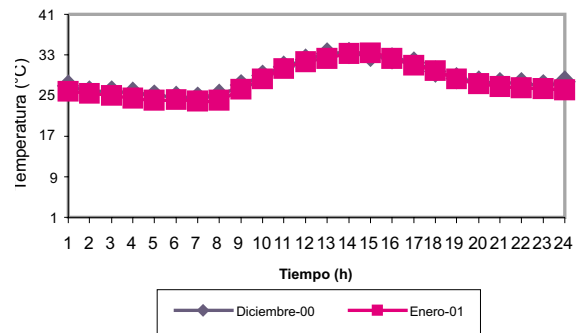


Figura 3. Variación horaria promedio de la temperatura en la ciudad de Maracaibo.

equivalente a una estabilidad atmosférica D, con rango de concentración entre $51.84\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $62.36\mu\text{g}/\text{m}^3$ referido al rango experimental entre $85.18\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $66.19\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para la segunda estación de muestreo, el mejor ajuste corresponde al par de valores $\sigma_y = 335.64$ metros y $\sigma_z = 316.59$ metros equivalente a una estabilidad atmosférica D, con un rango de concentración entre $38.16\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $51.48\mu\text{g}/\text{m}^3$ comparados con el rango experimental entre $58.89\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $72.52\mu\text{g}/\text{m}^3$. Y para la tercera estación el mejor ajuste se logra para la relación binaria $\sigma_y = 216.68$ metros y $\sigma_z = 247.81$ metros correspondiente a una estabilidad atmosférica A o B con el rango de concentración entre $54.36\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $67.68\mu\text{g}/\text{m}^3$ en comparación con el rango experimental entre $58.89\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $66.68\mu\text{g}/\text{m}^3$.

- iii. Del análisis anterior se reafirma que para la estación mas cercana a la Planta Termoelectrica, Estación N° 3 los valores de concentración de SO₂ pueden expresarse por la distribución Gaussiana para el Modelo de Briggs de dispersión urbana con los coeficientes binarios σ_y y σ_z (216.68 m; 247.81 m) para la estabilidad atmosférica B en el periodo de muestreo del presente estudio, y para la tasa mínima de emisión.
- iv. Para las Estaciones más lejanas de la Planta Termoelectrica, Estación N° 2 y N° 3, las predicciones del modelo de Briggs de Dispersión Urbana resultaron ligeramente menores a las concentraciones experimentales

Tabla 7
Parámetros meteorológicos registrados los días de muestreo

Día	Temp Prom	Vel Prom a 10 m	Vel a 100 m	Dirección	Estabilidad
07/12/2000	301,77	2,8	3,95	NNE	A
08/12/2000	301,61	3,41	4,82	NNE	B
09/12/2000	302,08	3,04	4,22	ENE	B
10/12/2000	302,29	3,1	4,38	NNE	B
11/12/2000	302,24	3,42	4,83	ENE	B
12/12/2000	302,06	3,82	5,34	NNE	B
13/12/2000	300,95	3,62	5,11	NNE	E
14/12/2000	301,47	4,59	6,48	NE	B
15/12/2000	300,78	3,74	6,65	NNE	D
16/12/2000	300,66	3,13	4,42	NNE	B
17/12/2000	301,31	3,45	4,87	NNE	B
18/12/2000	301,32	3,27	4,61	NNE	B
19/12/2000	300,67	2,82	3,98	NNW	A
20/12/2000	301,22	2,84	4,01	NNE	B
11/01/2001	303,01	4,79	9,55	NNE	E
12/01/2001	300,49	3,41	6,8	NNE	E
13/01/2001	300,6	3,09	4,36	NE	B
14/01/2001	300,84	3,17	4,47	NE	B
15/01/2001	300,74	3,34	5,93	NNE	D
16/01/2001	301,17	3,75	7,48	NE	E
17/01/2001	301,36	4,13	5,83	ENE	B
18/01/2001	301,25	3,63	5,12	ENE	B

Tabla 8
Ajuste de las concentraciones calculadas para el modelo Briggs urbano en la Estación N° 1

Estabilidad	SIGMA Y(m)	SIGMA Z(m)	07-Dic	08-Dic	09-Dic	10-Dic	11-Dic	12-Dic	13-Dic
A	747,98	1905,59	15,91	13,04	14,62	14,33	13,00	11,74	12,28
B	747,98	1905,59	15,91	13,04	14,62	14,33	13,00	11,74	12,28
C	514,24	734,60	32,96	27,25	30,60	30,06	27,50	25,06	26,10
D	373,99	354,69	62,36	55,68	59,40	59,04	55,44	51,84	53,28
E	257,12	115,17	21,23	21,44	21,38	21,46	21,49	21,42	21,35
F	257,12	115,17	21,23	21,44	21,38	21,46	21,49	21,42	21,35

para la tasa mínima de emisión de SO₂. Si el valor real de descarga de SO₂ desde las chimeneas coincidiera con la tasa mínima de emisión, entonces habría que considerar otras fuentes emisoras de SO₂ que contri-

buyan a mantener los niveles registrados en las Estaciones N° 2 y N° 3. En otras palabras, la Planta Termoeléctrica aporta la concentración de 62.36µg/m³ mientras el diferencial ΔC = 22.82µg/m³ tendrá que ser

Tabla 9

Ajuste de las concentraciones calculadas para el modelo Briggs urbano en la Estación N° 2

Estabilidad	SIGMA Y(m)	SIGMA Z(m)	14-Dic	15-Dic	16-Dic	17-Dic	18-Dic	19-Dic	20-Dic
A	671,28	1543,46	10,08	9,83	14,80	13,43	14,18	16,42	16,31
B	671,28	1543,46	10,08	9,83	14,80	13,43	14,18	16,42	16,31
C	461,50	631,00	22,61	22,07	31,90	29,30	30,74	34,88	34,67
D	335,64	316,59	39,24	38,16	49,36	46,80	48,24	51,48	51,48
E	230,75	105,45	8,71	8,68	8,24	8,46	8,35	7,99	8,06
F	230,75	155,42	8,71	8,68	8,24	8,46	8,35	7,99	8,06

Tabla 10

Ajuste de las concentraciones calculadas para el modelo de Briggs urbano en la Estación N° 3

Estabilidad	SIGMA Y(m)	SIGMA Z(m)	12-Ene	13-Ene	14-Ene	15-Ene	16-Ene	17-Ene	18-Ene
A	216,68	247,81	57,24	67,68	67,32	61,56	54,36	62,28	65,52
B	216,68	247,81	57,24	67,68	67,32	61,56	54,36	62,28	65,52
C	148,97	155,00	34,02	25,81	26,68	32,98	34,27	32,87	30,49
D	108,34	97,73	4,46	1,14	1,29	3,37	5,26	3,26	2,22
E	74,48	42,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	74,48	42,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 11

Ajuste de las concentraciones calculadas para el modelo de Briggs rural en la Estación N° 1

Estabilidad	SIGMA Y(m)	SIGMA Z(m)	07-Dic	08-Dic	09-Dic	10-Dic	11-Dic	12-Dic	13-Dic
A	691,05	734,60	26,03	21,74	24,19	23,72	21,71	19,82	20,59
B	502,58	440,66	47,52	41,04	45,02	44,28	41,04	38,16	39,24
C	345,53	223,11	57,60	58,68	58,68	59,04	59,04	57,96	58,32
D	251,29	86,38	0,75	2,58	1,35	1,54	2,66	3,374	53,28
E	188,47	52,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	125,65	27,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 12

Ajuste de las concentraciones calculadas para el modelo de Briggs rural en la Estación N° 2

Estabilidad	SIGMA Y(m)	SIGMA Z(m)	14-Dic	15-Dic	16-Dic	17-Dic	18-Dic	19-Dic	20-Dic
A	605,17	631,01	19,51	19,08	27,58	25,31	26,57	26,82	29,95
B	440,12	378,61	34,24	33,48	45,02	42,48	43,92	47,88	48,24
C	302,58	197,63	40,68	40,68	40,68	41,76	41,42	38,52	38,88
D	220,06	79,06	2,51	2,58	0,32	0,64	0,45	0,14	0,15
E	165,05	48,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	110,03	25,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 13

Ajuste de las concentraciones calculadas para el modelo de Briggs rural en la Estación N° 3

Estabilidad	SIGMA Y(m)	SIGMA Z(m)	12-Ene	13-Ene	14-Ene	15-Ene	16-Ene	17-Ene	18-Ene
A	164,25	155,03	39,60	30,13	31,14	33,52	39,96	38,16	35,64
B	119,46	93,02	5,26	1,12	1,28	3,58	6,37	3,66	2,53
C	82,13	57,69	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
D	59,73	31,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E	44,82	18,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	29,86	10,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 14

Ajuste de las concentraciones calculadas para el modelo de Pasquill-Gifford en la Estación N° 1

Estabilidad	SIGMA Y(m)	SIGMA Z(m)	07-Dic	08-Dic	09-Dic	10-Dic	11-Dic	12-Dic	13-Dic
A	651,37	5000,02	17,89	14,65	16,45	16,13	14,62	13,21	13,82
B	489,18	455,52	47,88	41,04	45,02	44,28	41,04	37,83	34,24
C	334,78	200,97	52,23	55,82	54,36	54,72	55,83	56,16	55,86
D	221,62	73,66	0,08	0,48	0,19	0,23	0,49	0,97	0,70
E	165,81	47,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	110,35	29,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 15

Ajuste de las concentraciones calculadas para el modelo de Pasquill-Gifford en la Estación N° 2

Estabilidad	SIGMA Y(m)	SIGMA Z(m)	14-Dic	15-Dic	16-Dic	17-Dic	18-Dic	19-Dic	20-Dic
A	570,84	5000,02	11,12	10,84	16,31	14,78	15,62	18,11	17,96
B	427,83	385,54	34,09	33,37	45,02	42,12	43,92	4788	47,88
C	291,96	174,88	37,82	37,82	33,77	36,02	3492	30,71	31,10
D	193,24	67,13	0,48	0,54	0,02	0,07	0,04	0,00	0,00
E	144,56	43,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	96,23	27,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 16

Ajuste de las concentraciones calculadas para el modelo de Pasquill-Gifford en la Estación N° 3

Estabilidad	SIGMA Y(m)	SIGMA Z(m)	12-Ene	13-Ene	14-Ene	15-Ene	16-Ene	17-Ene	18-Ene
A	166,66	264,61	46,08	56,52	55,82	50,04	43,56	50,40	53,64
B	122,67	82,64	3,06	0,38	0,45	1,94	3,99	1,84	1,02
C	81,74	48,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D	53,99	26,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E	40,36	17,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	26,84	11,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

- aportado por otras fuentes de emisión (Por ejemplo: El flujo vehicular).
- v. Las concentraciones calculadas por el modelo de Briggs de Dispersión Rural resultan menores a las reportadas por el modelo de Briggs de Dispersión Urbana en referencia a las mediciones experimentales. Sin embargo los valores calculados se aproximan en orden de magnitud a los experimentales para la estabilidad atmosférica C y los coeficientes binarios $\sigma_y = 345.53$ metros y $\sigma_z = 223.11$ metros para la Estación N° 1; para la estabilidad atmosférica B y los coeficientes binarios $\sigma_y = 164.25$ m y $\sigma_z = 155$ metros para la Estación N° 3.
- vi. Las mejores aproximaciones del modelo de Pasquill-Gifford se resumen así: Estabilidad atmosférica C y coeficientes binarios $\sigma_y = 334.78$ metros y $\sigma_z = 200.97$ metros para la estación N° 1, estabilidad atmosférica B y coeficientes binarios $\sigma_y = 427.83$ metros y $\sigma_z = 385.54$ metros para la estación N° 2; y estabilidad A y coeficientes binarios, $\sigma_y = 166.66$ metros y $\sigma_z = 264.61$ metros para la estación N° 3. Los valores de concentración calculados resultaron menores a los valores experimentales y menores a las predicciones del modelo de Briggs de dispersión urbana. En las Tablas 17, 18 y 19, se observan los mejores ajuste de los modelos de Briggs y Pasquill-Gifford para la tasa míni-

Tabla 17
Concentraciones Ajustadas Estación N° 1 (Hielo el Toro)

Día	Concentraciones Ajustadas			
	CONC. EXP.	B.U.	B.R.	P.G.
07-Dic	85,19	62,36	57,30	52,20
08-Dic	81,28	55,68	58,68	55,80
09-Dic	81,28	59,41	58,68	54,36
10-Dic	73,98	59,04	59,04	54,72
11-Dic	72,52	55,44	59,04	55,80
12-Dic	66,19	51,84	57,96	56,16
13-Dic	72,03	53,28	58,32	55,80

Tabla 18
Concentraciones Ajustadas Estación N° 2 (Extintores del Zulia)

Día	Concentraciones Ajustadas			
	CONC. EXP.	B.U.	B.R.	P.G.
14-Dic	69,11	39,29	34,24	34,09
15-Dic	72,52	38,46	33,48	33,37
16-Dic	70,57	49,32	45,01	45,01
17-Dic	58,89	46,80	42,43	42,12
18-Dic	63,76	48,24	43,92	43,92
19-Dic	64,24	51,48	47,88	47,88
20-Dic	64,73	51,48	48,24	47,88

Tabla 19
Concentraciones Ajustadas estación N° 3 (Carrocerías Buena Vista)

Día	Concentración Ajustadas			
	CONC. EXP.	B.U.	B.R.	P.G.
12-Ene	65,22	57,24	39,60	46,08
13-Ene	62,78	67,68	30,13	56,52
14-Ene	64,73	67,32	31,14	55,81
15-Ene	63,76	61,56	38,52	50,04
16-Ene	66,68	54,36	39,96	43,56
17-Ene	58,89	62,28	38,16	50,40
18-Ene	65,71	65,52	35,61	53,64

ma de emisión de SO₂ para las correspondientes estaciones 1, 2 y 3. Tales Tablas son de particular importancia para adecuar la predicción y adecuación del modelo a las mediciones experimentales de SO₂ en las referidas estaciones. Lo anterior se explica con los siguientes ejemplos:

1. Si la tasa de emisión de SO₂ corresponde a la generación mínima de energía eléctrica de 100 Mw., esto es, 535.09g de SO₂ /s la Estación N° 3 es entonces representada por el modelo de Briggs para dispersión urbana.
2. Si la tasa de emisión resulta ser el 36 % mayor a la tasa mínima de emisión, esto es, 730.86 g de SO₂/s, entonces las estaciones N° 1 y N° 2 pueden representarse por el modelo de Briggs de dispersión urbana mientras para la estación N° 3, se excede tal cual se observa en las Tablas 20.
3. Si la tasa de emisión de SO₂ resulta ser el 52 % mayor a la tasa mínima de emisión, esto es, 813.34 g de SO₂/s, entonces las Estaciones N° 1 y N° 2 pueden expresarse por el Modelo de Pasquill-Gifford.

V. Conclusiones

Las principales conclusiones de este estudio enfocado en la medición experimental y de la aplicación de tres modelos de dispersión atmosférica, basándose en el principio Gaussiano para estimar las concentraciones de Dióxido de Azufre emitidas por la planta termoeléctrica Ramón Laguna son las siguientes:

Del análisis global del muestreo experimental del SO₂ se destaca:

1. Las concentraciones de SO₂ aumentan con el incremento de la posición horizontal (trazada en el eje preferencial de los vientos), esto es los valores de la estación N° 1 (3000 metros) resultaron mayores que los de la estación N° 2 (2400 metros) y estos mayores que los de la estación N° 3 (700 metros).
2. De la comparación de las concentraciones obtenidas experimentalmente con los valores estipulados por las normas de calidad del aire, se concluye que en la estación N° 1 tan solo un 30% de las muestras superan el límite de 80µg/m³ cumpliendo así con el porcentaje de excedencia permitido; para el caso de las Estaciones N° 2 y N° 3, en la totalidad de los días muestreados los valores obtenidos resultaron inferiores a la norma.

Del análisis global de las concentraciones calculadas del SO₂ se refiere:

3. Similarmente al comportamiento observado para los valores experimentales, las predicciones de los modelos de Briggs (dispersión urbana y dispersión rural) y Pasquill-Gifford describen adecuadamente el orden de magnitud para las diferentes Estaciones de monitoreo sujeto a la tasa de emisión de SO₂ y de la estabilidad atmosférica, sin embargo, el modelo de Briggs de dispersión urbana ofrece la mayor aproximación respecto a los valores experimentales de SO₂.

Tabla 20
Concentraciones Calculadas de SO₂ ajustando flujo masico (m) a 730,86g/s

Estación N° 1 (Hielo el Toro)		Concentraciones Ajustadas		
Días	Con. Exp.	B.U.	B.R.	P.G.
07/12/2000	85,18	85,12	78,62	71,25
08/12/2000	81,28	76,01	80,10	76,17
09/12/2000	81,28	81,08	80,10	74,20
10/12/2000	73,98	80,58	80,59	76,69
11/12/2000	72,52	75,68	80,59	76,17
12/12/2000	66,19	70,76	79,12	76,66
13/12/2000	72,03	72,73	79,61	76,17
Estación N° 2 (Ext. del Zulia)		Concentraciones Ajustadas		
Días	Con. Exp.	B.U.	B.R.	P.G.
14/12/2000	69,11	53,63	46,73	46,54
15/12/2000	72,52	52,09	45,70	45,55
16/12/2000	70,57	67,32	61,43	61,43
17/12/2000	58,89	63,88	57,92	57,49
18/12/2000	63,76	65,85	59,95	59,95
19/12/2000	64,24	70,27	65,36	65,37
20/12/2000	64,73	70,27	65,36	65,36
Estación N° 3 (Carrocerías)		Concentraciones Ajustadas		
Días	Con. Exp.	B.U.	B.R.	P.G.
12/01/2001	65,22	78,01	54,05	62,90
13/01/2001	62,78	92,38	41,13	77,15
14/01/2001	64,73	91,89	42,51	76,17
15/01/2001	63,76	84,02	52,58	68,30
16/01/2001	66,68	74,21	54,55	59,46
17/01/2001	58,89	85,01	52,09	68,80
18/01/2001	65,71	89,43	48,60	73,22

Referencias Bibliográficas

- García C.: "Evaluación cuantitativa de Polución del Aire", edición Septiembre 1987, Facultad de Ingeniería, LUZ, paginas 138-160, Maracaibo.
- Rossell N.: "Diagnostico de la Química Atmosférica y Procesos de Remoción de los Principales Compuestos de Azufre en Maracaibo", Trabajo de Ascenso categoría asoci-
- ado, Facultad de Ingeniería, LUZ, 100 pagina, Octubre 1990.
- González I. y Tremont C. "Efectos Socio-Económicos y Ambientales Ocasionados por el Funcionamiento de Planta Termoeléctrica Ramón Laguna, Sector la Arreaga -Maracaibo", Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela pp 120, 1987.

4. Araujo J., Petit E. y Flores C.: "Determinación Cuantitativa de los Contaminantes Gaseosos Emitidos por la Planta Termoelectrica Ramón Laguna", Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, pp 115, 1987.
5. Rossell N., Velásquez H. y Linares T.: "Niveles Atmosféricos de SO₂, PST y Sulfatos alrededor de una Planta termoeléctrica en Época Seca", Rev. Tec. Univ. Zulia, Vol. 15 N° 2, 79-85, 1992.
6. García C., Rojano R. y Rossell N.: "Efectos de las Variables Operacionales y Meteriologicas en la Dispersión Atmoferica del SO₂". Rev. Tec. Univ. Zulia, Vol. 23, No. 2, 150-160, 2000.
7. Turner B.: "Worbook atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling", Lewis Publishers, CRC Press Inc., London, pp 144, 1994.
8. Briggs G.A.: Some resents analyses of plume rise observations, pp 1029 - 1032 in Proceedings of the second international Clear Air Congress, England H.M. and Berry W.T. Editors, Academic Press, New York.
9. Pasquill F.: The estimations of the dispersion of windborne material, Meteorology Magazine, 90 (1063), 33 - 49, 1961.
10. Briggs G.A.: Discussion on chimney plumes in neutral and stable surrounding, Atmos, Environ. 6, 507 - 510, 1972.
11. Gifford F.A.: Atmospheric dispersion calculations using the generalized Gaussian plume model, Nuclear safety, 2 (2), 56 - 68, 1960.

Recibido el 04 de Julio de 2002
En forma revisada el 14 de Julio 2003