

APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE GAUSS A LA DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA DEL DIÓXIDO DE AZUFRE

Eduardo Taipe H., Juan Arroyo C.

Departamento de Físicoquímica, Facultad de Química e Ingeniería Química,
UNMSM, Av. Venezuela s/n, Ciudad Universitaria, Lima - Perú.

Resumen: El modelo de dispersión gaussiano PTC se aplica para simular la dispersión atmosférica del SO₂, producida por una chimenea de 20 m de altura y 0.7 m de diámetro en la Central Térmica Tintaya (Cusco), que expulsa continuamente al medio ambiente 261 461 mg SO₂ /s a 17,2 m/s. El modelo evalúa la distancia de máxima concentración a nivel del suelo a 750 m de la fuente y la concentración promedio en el lugar de 3,06 mg SO₂ /m³.

Palabras Clave: Modelo gaussiano, fuente puntual, dispersión atmosférica.

Abstract: The PTC Gaussian dispersion model, was designed to simulate the atmospheric dispersion of SO₂, produced a chimney 20 m height and 0,7 m diameter in Thermal Center Tintaya (Cusco), which expels continually to the environment 261 461 mg SO₂/s at 17,2 m/s. The model evaluate the location at ground level the maximum concentration at 750 m from the source and the average concentration in the location of 3,06 µg SO₂ /m³.

Key words: Gaussian model, point source, atmospheric dispersion.

I. INTRODUCCIÓN

La atmósfera exhibe variaciones significantes en sus magnitudes físicas y químicas, el cambio en la concentración de una sustancia se deben a procesos de reacción química y difusión.

La composición química de la atmósfera es dependiente del tiempo y de las coordenadas espaciales, así como de las fuentes y sumideros de las sustancias contaminantes.

Un modelo matemático de difusión corresponde a un esquema analítico capaz de calcular o predecir niveles puntuales de inmisión, teniendo como datos de entrada valores medidos o estimados de emisión del mismo contaminante a través de fuentes emisoras conocidas y ubicadas geográficamente, así como de los parámetros meteorológicos que intervienen en la difusión o estancamiento de los contaminantes, y de los factores de la

micro geografía propios de la zona donde se aplicará el modelo.

Los modelos de difusión y de tiempo corto son usados para calcular concentraciones de contaminantes sobre pocos minutos, horas o días y pueden ser empleados para predecir episodios de alta contaminación. Los modelos de tiempo largo son diseñados para predecir concentraciones promedio estacionales o anuales, los cuales son muy usados en estudios de efectos sobre la salud e impactos en la vegetación, materiales y estructuras[1].

En el presente trabajo usamos el modelo de Gauss para simular la dispersión atmosférica del dióxido de azufre producido en una chimenea de la central térmica de Tintaya, Cusco. Los resultados obtenidos se confrontan con los obtenidos por el método de químico analítico de West-Gaeke[10].

II FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uno de los modelos más usados en dispersión atmosférica es el modelo de pluma gaussiano, que emplea las propiedades estadísticas de la turbulencia, aceptando la hipótesis de operar con fuentes puntuales (chimeneas) cuyas plumas presentan en su sección distante transversal una distribución gaussiana en sus dos ejes ortogonales Y-Z[2].

La figura 1 representa la emisión hipotética de una chimenea y su pluma "gaussiana", produciendo la inmisión en el área según la dirección predominante del viento.

La ecuación general, para calcular la concentración del contaminante en un punto x,y,z (coordenada espacial) [3] es:

$$c = \frac{DQ}{2\pi\sigma_y\sigma_z\mu} e^{-\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left[e^{-\left(\frac{z-h_e}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-\left(\frac{z+h_e}{\sigma_z}\right)^2} \right] \quad (1)$$

La ecuación modificada para concentraciones a nivel del suelo, debajo de la línea central de la pluma, y=0, z=0[4]:

$$c = \frac{DQ}{\pi\sigma_y\sigma_z\mu} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{h_e}{\sigma_z}\right)^2} \quad (2)$$

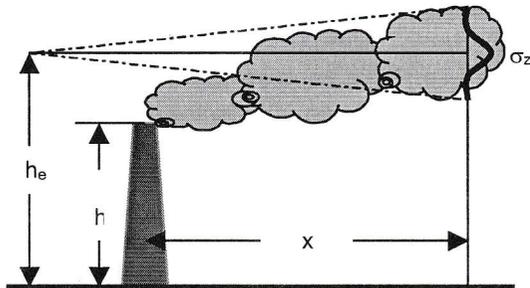


Figura N.º 1: Modelo de Pluma Variable. Donde x es la distancia de máxima concentración del contaminante a nivel del suelo[5].

Para calcular la máxima concentración a nivel del suelo:

$$C_{\max} = \frac{2DQ}{\pi e \mu h_e^2} \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y} \right) \quad (3)$$

Para calcular la locación de máxima concentración a nivel del suelo:

$$\sigma_z = h_e / \sqrt{2} \quad (4)$$

La ecuación para calcular la altura efectiva de la pluma[6] he es:

$$He = h' + 21,425 (Fb^{3/4} / \mu) \quad (5)$$

$$F_b = g \mu_e \phi^2 \left(\frac{\Delta T}{4T_e} \right) \quad (6)$$

Las ecuaciones para calcular las desviaciones transversal y vertical de la pluma σ_y, σ_z [7, 8, 9] son:

$$\sigma_y = 465,11628 (x) \tan [0,017453293 (c - d \ln x)] \quad (7)$$

$$\sigma_z = ax^b \quad (8)$$

Donde:

$$a = 32,093; \quad b = 0,81066$$

$$c = 8,333; \quad d = 0,72382$$

Para la aplicación de las ecuaciones requerimos información específica del punto de emisión. Esta información incluye la ubicación geográfica de la chimenea, la cantidad y flujo de los contaminantes emitidos, condiciones del gas de la chimenea, altura de la chimenea y factores meteorológicos tales como velocidad y dirección de viento, perfil de la temperatura ambiental, nubosidad, radiación solar y presión atmosférica.

III. PARTE EXPERIMENTAL

a) Determinación de SO₂

La determinación de SO₂ se realiza con el método colorimétrico de West-Gaeke [10]. Este método está diseñado para que sirva como método de campo tanto como de laboratorio, es selectivo y muy sensible para SO₂. Su aplicación precisa el paso de aire ambiente por una disolución de tetracloromercurato sódico 0,1 M. El SO₂ se absorbe por este reactivo para formar un complejo de diclorosulfitomercurato (II) (HgCl₂SO₃)⁻² que es estable y no es volátil, que actúa eficazmente como SO₃⁻² "fijado" en disolución. Después este ion sulfito reacciona con formaldehído y pararosanilina en disolución ácida decolorada para dar el ácido pararosanilina sulfónico que tiene color púrpura. La intensidad del color de este ácido a 548 nm y PH 1,6 + 0,1 es proporcional a la concentración del SO₂ absorbido para concentraciones entre 0,002 ppm y 5 ppm.

b) Determinación fisicoquímica

En este estudio de campo, se tomaron cinco muestras diarias por receptor (calidad de aire) y en la chimenea (emisión) cada hora, entre las 18:00 y 23:00 h durante siete días consecutivos. Los dos receptores de calidad de aire fueron ubicados a 750 m de la chimenea (sotavento) y, distanciados entre sí 20 m.

Los equipos que se utilizaron para las mediciones de inmisión y emisión son los que se indican en las tabla 1 y 2.

Tabla 1: Equipos para monitoreo de inmisión

Parámetro	Equipo	Rango de Medición
Velocidad de viento	Anemómetro	0,1 – 44,8 m/s
Dirección de viento	Anemómetro	0° - 360°
Temperatura	Termómetro	30 – 50 °C
Humedad	Psicrómetro	0,0 – 100,0 %
Dióxido de azufre	Tren de muestreo espectrofotómetro	0 – 1 300 µg/m ³

Tabla N.º 2: Equipos para monitoreo de emisión

Parámetro	Equipo	Rango de Medición
Flujo de gas	Tren de muestreo	1,0 – 20 m/s
Temperatura de emisión	Analizador de gas de combustión	0 – 1 093 °C
Dióxido de azufre	Analizador de gas de combustión	0 – 3700000 µg/m ³

Primeramente, se han evaluado dos de los factores de dispersión atmosférica la velocidad y dirección de viento predominante a 10 m de altura sobre el nivel del suelo, los cuales controlan el desplazamiento vertical y lateral del contaminante a partir de una fuente puntual.

Como factores concomitantes, se han evaluado la temperatura ambiental, la humedad relativa, la presión atmosférica y la nubosidad, los que influyen sobre los primeros factores citados[11].

Para la medición de los parámetros de emisión, ha sido necesario elegir un lugar conveniente y accesible sobre la chimenea para efectuar la perforación por donde se introducirá la probeta de extracción de muestra, que se inserta próxima al centro del conducto, donde se han obtenido los valores máximos del gas efluente: velocidad, temperatura e intensidad del contaminante.

c) Cálculos computacionales

Los datos del aire ambiental y de emisiones de la fuente serán usados para diagnosticar las concentraciones del SO₂ en el área, empleándose para tal efecto un modelo matemático gaussiano para fuentes puntuales continuas de tiempo corto PTC [12]. Este modelo se programó en Visual Basic 6.0, con referencia al modelo ISC (Industrial Source Complex).

Para el caso específico de evaluación del SO₂ en la C.T. Tintaya, primeramente se calcula la altura efectiva de la pluma empleando las ecuaciones 5 y 6.

Con la altura efectiva determinada, el modelo calculará el coeficiente de dispersión vertical, la distancia de máxima concentración a nivel del suelo y el coeficiente de dispersión transversal, empleando las ecuaciones 4,7 y 8.

Finalmente, se calcula la concentración del contaminante, empleando la ecuación 3.

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el período nocturno de monitoreo, las capas de aire cercanas a la superficie terrestre tienden a enfriarse gradualmente con el transcurso de las horas; en consecuencia, la temperatura ambiental desciende con el enfriamiento del aire superficial, desde 12 °C a las 19:00 h hasta 9 °C a las 23:00 h en promedio.

Tabla N.º 3: Resultados de simulación del SO₂

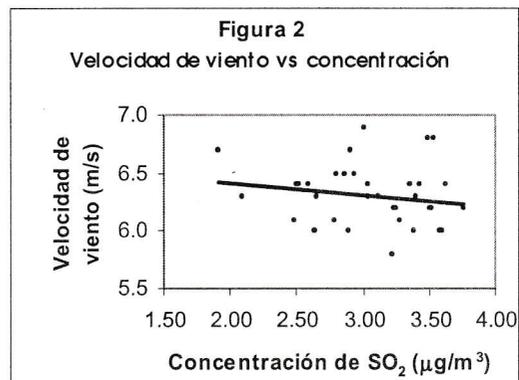
Nº	Veloc. viento m/s	Altura efectiva M	Conc. SO ₂ (P-1) µg/m ³	Conc. SO ₂ (P-2) µg/m ³	Conc. SO ₂ (PTC) µg/m ³
1	6,0	40,7	3,45	3,40	3,39
2	6,4	39,0	3,15	3,21	3,03
3	6,4	39,1	3,50	3,60	3,62
4	6,2	40,7	3,30	3,22	3,24
5	6,1	41,0	3,18	3,19	3,28
6	6,2	40,0	3,45	3,42	3,50
7	6,5	38,5	3,05	3,12	2,85
8	6,7	38,0	2,50	2,72	1,91
9	6,4	38,7	3,40	3,42	3,43
10	6,3	40,3	3,11	3,07	3,03
11	6,0	41,9	3,52	3,57	3,58
12	6,3	41,4	3,52	3,52	3,40
13	6,2	41,5	3,60	3,69	3,76
14	6,5	41,2	3,20	3,25	2,93
15	6,8	40,4	3,19	3,26	3,49
16	6,9	39,7	3,00	2,98	3,00
17	6,8	40,4	3,42	3,47	3,54
18	6,5	42,7	2,98	2,78	2,79
19	6,4	42,2	2,87	2,76	2,58
20	6,1	42,6	2,88	2,69	2,78
21	6,2	43,2	3,32	3,35	3,23
22	6,0	45,0	3,44	3,52	3,60
23	6,0	44,8	3,38	3,30	3,38
24	6,1	42,7	3,00	2,94	2,48
25	5,8	44,2	3,11	3,05	3,21
26	6,0	44,0	3,01	3,01	2,89
27	6,0	44,1	2,72	2,71	2,63
28	6,7	41,5	2,84	2,68	2,90
29	6,3	43,5	2,29	2,32	2,09
30	6,3	43,2	2,50	2,49	2,65
31	6,4	43,7	2,72	2,65	2,49
32	6,2	43,3	3,41	3,39	3,52
33	6,4	43,8	2,98	3,00	2,51
34	6,4	43,2	3,39	3,35	3,35
35	6,3	43,1	3,22	3,19	3,11

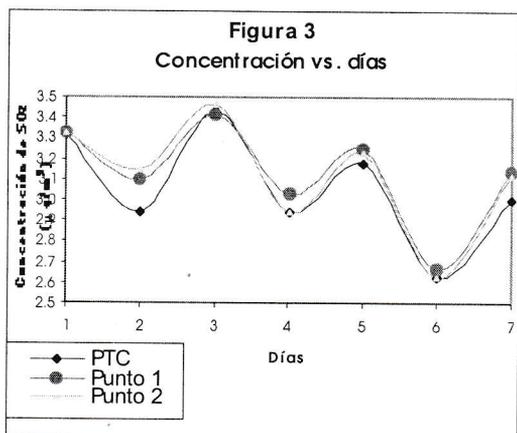
En este período de transición de inversión térmica, la estabilidad atmosférica generalmente es neutra, con tendencia a estabilizarse pasadas las 23.00 h, que es cuando la inversión térmica ha sido completada, inhibiéndose el movimiento vertical de las capas de aire[13].

Como consecuencia de la inversión térmica, el viento se uniformiza en una sola dirección, fluctuando entre 90°-125° SE (sotavento).

La elevada temperatura de emisión del gas comparada con la temperatura ambiental, permitirá que la pluma ascienda verticalmente por su flotabilidad, atravesando las capas de aire frío del ambiente. La pluma alcanzará su máxima altura de ascenso entre 38 y 45 m a 220 m de la fuente; hasta este punto la dispersión de la pluma ha sido afectada por su flotabilidad y la turbulencia atmosférica del ambiente; de ahí en adelante, la pluma es completamente dominada por la turbulencia atmosférica (ver tabla 3)[14]. Las desviaciones transversal y vertical de la pluma a 750 m de la chimenea son equivalentes a $s_y = 52,5$ m y $s_z = 8,1$ m.

De la figura 2, se observa que la concentración del SO₂ disminuye al aumentar la velocidad del viento, por la mayor dispersión del contaminante. La alta dispersión de la nube de puntos es influenciada principalmente por los parámetros de emisión; sin embargo, puede observarse claramente esta relación entre las muestras N° 1 y N° 5, N° 25 y N° 35, en donde se mantiene casi constante la intensidad de emisión y la altura efectiva de pluma.





De la figura 3, se observa que la curva PTC evoluciona en la misma dirección que las otras dos curvas de monitoreo obtenidas por métodos de análisis químico durante los siete días de monitoreo, comprobándose la confiabilidad del modelo PTC.

IV. CONCLUSIONES

El descenso de la temperatura ambiental durante las mañanas genera inversión térmica, por lo que la central térmica detiene sus operaciones a las 23:00 h, para evitar que los contaminantes queden atrapados en el fondo del valle.

La distancia promedio de máxima concentración a nivel del suelo para el SO₂ es 750 m viento abajo de la chimenea.

El período de decaimiento no se considera para bajas concentraciones de SO₂, $D = 1$.

Finalmente, se concluye que la simulación realizada para el SO₂ utilizando el modelo PTC, en la C.T. Tintaya, bajo condiciones de estabilidad atmosférica neutra, en la dirección predominante del viento y a la distancia de máxima concentración a nivel del suelo, pueden considerarse satisfactorias.

LISTA DE SÍMBOLOS

- c: Concentración del contaminante, $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
 e: Base de logaritmo neperiano, en la ecuación 3

- h_e : Altura efectiva de emisión de la pluma, m
 σ_y, σ_z : Desviación estándar de la concentración de la pluma en la transversal y vertical a una distancia x, respectivamente, m.
 Q: Intensidad de emisión del contaminante, mg/s.
 D: Período de decaimiento
 μ : Velocidad del viento en la dirección de la pluma, m/s.
 x, y, z: Direcciones lateral, transversal y vertical, m.
 h' : Altura de la chimenea, m.
 ϕ : Diámetro de la chimenea, m.
 F_b : Flotabilidad de flujo, m^4/s^3 .
 μ_e : Velocidad de emisión, m/s.
 $\Delta T: T_e - T_a$
 T_e : Temperatura de emisión, K.
 T_a : Temperatura ambiental, K.
 g: Gravedad de la tierra, $9,8 \text{ m/s}^2$
 a, b, c, d: Coeficientes de dispersión.

V. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D.O. Harrop. Air Quality Management System Course, Air Quality Assessment, London (1998).
- [2] J.A. Del Giorgio. Contaminación Atmosférica: Métodos de Medida y Redes de Vigilancia, Alhambra, Madrid, Pág. 145-175 (1977).
- [3] R.M. Harrison. Understanding Our Environment: An Introduction to Environmental Chemistry and Pollution, University of Birmingham, Londres, págs. 222-243 (1992).
- [4] F. Pasquill. Atmospheric Diffusion, Ellis Horwood, Chichester (1974).
- [5] S.S. Butcher y R.J. Charlson. An Introduction to Air Chemistry, Academic Press, Londres (1972).
- [6] G.A. Briggs. Plume Rise USAEC Critical Review Series TID-25075, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, 22161(1969).
- [7] D.B. Turner. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, US Environmental

- Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina (1970).
- [8] F.A. Gifford. A Review. Nucl. Saf., 17, 68-86 (1976).
- [9] J.L. McElroy y F. Pooler. The St Louis Dispersion Study, US Public Health Service, National Air Pollution Control Administration, Report AP- 53 (1968).
- [10] Standard Test Methods for Sulfur Dioxide Content of the Atmosphere (West-Gaeke Method), ASTM, D 2914 (1978).
- [11] J. Valdivia Ponce. Meteorología General, Universidad Mayor de San Marcos, Lima, págs. 17-80 (1979).
- [12] E.H. Taipe Huamán. Simulación de Dispersión Atmosférica del Dióxido de Azufre en la Central Térmica Tintaya. Tesis UNMSM Facultad de Química e Ing. Química, Lima (2003).
- [13] G.E. June, y T. Ryan., Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 84, 4655 (1958).
- [14] H.W. Georgii. J. Geophys. Res., 75, 2365 (1970).

AGRADECIMIENTO

Este trabajo de investigación fue realizado, gracias al apoyo de la Unidad de Postgrado. Asimismo, agradecemos a la C.T. Tintaya, que permitió la toma de datos.