

ANÁLISIS Y VERIFICACIÓN DEL MODELO GAUSSIANO DE DISPERSIÓN: MÉTODOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

ANALYSIS AND VERIFICATION OF THE GAUSSIAN MODEL OF DISPERSION: THEORETICAL AND EXPERIMENTAL METHODS

Laura Gineth Molano Guzmán*
Cristián Julián Díaz Álvarez**

Recibido: 1 de enero de 2019

Aceptado: 11 de abril de 2019

DOI: <https://doi.org/10.29097/2011-639X.210>

Resumen

Es necesario comprender la dispersión de contaminantes para dimensionar y pronosticar la concentración y mezcla de gases generados por fuentes móviles y fijas en la atmósfera baja. Sin embargo, esta movilización de sustancias químicas en el aire por acción de gradientes de presión, temperatura y concentración no es completamente predecible ni reproducible en laboratorio, razón por la que los modelos de dispersión de contaminantes y los bancos de prueba se han convertido en una alternativa recurrente en los estudios ambientales. Este estudio confrontó la modelación teórica con la experimental haciendo uso de una cámara de simulación desarrollada en la Universidad Central: Cámara de Interacción y Simulación de Contaminantes Atmosféricos, con el objeto de identificar correlaciones con el modelo gaussiano y su aplicabilidad para estudios de calidad del aire. Para el análisis se realizaron múltiples marchas con dióxido de carbono en la cámara de interacción y simulaciones en el software Screen View; igualmente, en hoja de cálculo de Excel se desarrolló la matemática del modelo gaussiano. Se evidenció que la campana gaussiana es representativa para dispersión a cota máxima de 1.5 km de altura, que en la mayoría de los casos equivale a la altura de mezcla. En conclusión, fue posible verificar que el banco de pruebas es muy útil para representar dispersión tridimensional en condiciones controladas y que la realidad de la dispersión sí es acorde a la tendencia gaussiana.

Palabras clave.: cámara, gaussiano, dispersión, modelación.

Abstract

The dispersion of pollutants is a phenomenon of necessary understanding to size and forecast the concentration and mixture of gases generated by mobile and fixed sources in the lower atmosphere; However, this mobilization of chemical substances in the air by the action of gradients of pressure, temperature and concentration is not completely predictable or reproducible in the laboratory, which is why contaminant dispersion models and test benches have become a recurrent alternative in environmental studies. For this reason, it is necessary to confront the theoretical and experimental modeling using the Chamber of Interaction and Simulation of Atmospheric Pollutants -CISCA UC- in order to identify correlations and their applicability for certain studies. In order to carry out this

* Ingeniera ambiental. Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Central, Bogotá D. C., Colombia. ORCID: 0000-0002-0506-6805. lmolanog2@ucecentral.edu.co

** Doctor en Pensamiento Complejo. Grupo de investigación en Innovación en Ingeniería Civil, UMMR, Edgar Morín, Ciudad de México, México. ORCID: 0000-0002-4212-4947. investigacion@proyectoaxioma.org

comparison, multiple tests with carbon dioxide were made in the chamber, simulations in the Screen View software and in the Excel spreadsheet, developing the mathematics of the Gaussian model. It was evidenced that the Gaussian bell is representative for dispersion at a maximum height of 1.5 km, which in most cases equals the mixing height. In conclusion, it was possible to verify that the test bench is very useful to represent three-dimensional dispersion under controlled conditions and that the reality of the dispersion is in accordance with the Gaussian tendency.

Keywords: chamber, gaussian, dispersion, modeling.

INTRODUCCIÓN

La dispersión de los contaminantes es una condición dinámica de estado fundamental, que establece la forma como se mezclan los gases emitidos por fuentes móviles o fijas con los gases que se encuentran en la atmósfera; igualmente, de acuerdo con los cambios meteorológicos, define si se desplazan en la dirección del viento o se concentran alrededor de la fuente (González, 2015). El comportamiento de la concentración puede ser representado matemáticamente mediante modelos; gráficamente, con la rosa de vientos, y experimentalmente, con el uso de bancos de pruebas. En cuanto a la representación matemática de este fenómeno, el modelo más usado es el gaussiano, principalmente por su simplicidad de cálculo y facilidad de adquisición de datos de entrada. Por esta razón, ha sido empleado en la mayoría de sistemas de gestión y vigilancia de la calidad del aire en centros urbanos y zonas industriales, para, por ejemplo, establecer los límites de concentración de contaminantes que pueden ser emitidos por distintas fuentes de naturaleza antrópica y definir la localización de futuras fuentes de emisión (Hernández et ál., 2015).

En el caso colombiano, los modelos de dispersión y el desarrollo de bancos de pruebas para analizar fenómenos atmosféricos han sido temas de investigación poco estudiados. Sin embargo, se destacan algunos trabajos académicos, como el de Buitrago (2003), quien aplicó el modelo gaussiano y analizó la dispersión de CO₂ en la ciudad de Manizales, o el de Vergara y García (2013), quienes determinaron la dispersión del material particulado suspendido (PST) y de la fracción respirable (PM10) en Santa Marta. En mérito de lo anterior, el propósito de esta investigación es comprender y caracterizar la dinámica del proceso de dispersión que se presenta en la Cámara de Interacción y Simulación de Contaminantes Atmosféricos¹ (CISCA), del departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad Central, para verificar si existe correlación entre esta, el modelo gaussiano y el software Screen View. Estos análisis emplearon CO₂ como gas de muestra. El desarrollo de pruebas en condiciones controladas a escala banco resulta relevante para verificar su aplicabilidad y capacidad de validar el modelo gaussiano de dispersión sobre fuentes fijas puntuales a escala y sobre especies químicas de interés ambiental, como el dióxido de carbono. Se consideró que el análisis de CO₂ es pertinente porque corresponde al 60% de GEI (gas efecto de invernadero) producido por el hombre, es la especie química que más se emite en el mundo (Environmental Protection Agency, 2017) y, en el caso específico de Bogotá, su emisión anual asciende a 6240 kt CO₂ (Díaz, 2013).

¹ La cámara CISCA se deriva del proyecto “Diseño y construcción de una cámara de simulación de dispersión para contaminantes atmosféricos,” desarrollado en el programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Central, en el que se dejó una base fundamental para la elaboración de este montaje. CISCA emula la capa límite de mezcla de la ciudad de Bogotá y realiza los primeros básicos para un entorno capitalino a escala de 1:10003.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los modelos matemáticos de dispersión en fuentes fijas

Estos modelos consisten en un sistema de ecuaciones y supuestos –algunas veces desarrollados como interfaces computacionales– que permiten predecir e interpretar la concentración de contaminantes, en función de la dispersión de la columna de humo emitida por una fuente fija (pluma) y a partir de las características de la fuente, las condiciones meteorológicas (velocidad del viento, estabilidad atmosférica) y la topografía de la zona. Estas variables de estimación son válidas principalmente a una altura de 1 km sobre la superficie (capa límite) (Buitrago, 2003; Spellman, 2009).

Entre los modelos más usados se encuentran: a) el euleriano, que tiene la cualidad de resolver numéricamente la ecuación de difusión atmosférica y es usado frecuentemente para simular el transporte de especies inertes en el aire y para el pronóstico meteorológico (López, 2009); b) el langrangiano, que se fundamenta en la definición de sistemas de referencia móviles asociados a cada cantidad de contaminante y su distribución dentro de este sistema, sin incluir la reactividad de las especies químicas, ni las fuentes de emisión tipo área o puntuales (Sanín, 2002), y c) el gaussiano, el cual supone que la pluma emitida sigue una distribución gaussiana en la dirección predominante del viento; este modelo se usa comúnmente en problemas de dispersión de gases de baja reactividad o no reactivos, como el CO₂, y material particulado de menos de 20 µm de diámetro procedente de fuentes puntuales, como chimeneas industriales o ductos. En términos generales, estos modelos matemáticos suponen que la turbulencia y el mezclado son uniformes en el área que se va a modelar y que no existe sedimentación de los contaminantes (Hernández et ál., 2015; Boubel, Fox, Turner y Stern, 1973). Asimismo, exigen una corrección de la altura de emisión en correlación a la altura de la chimenea y la elevación de la pluma (Galván, 2012).

La pluma gaussiana se desplaza en el plano horizontal (x), acorde a la dirección predominante del viento, y se dispersa perpendicularmente a su desplazamiento, debido a la turbulencia de la atmosfera (Galván, 2012) (ver figura 1). La formulación matemática del modelo se obtiene a partir de la ecuación de difusión, según la forma propuesta por Ulriksen (2015). Ubicando el origen de las coordenadas en la base de la chimenea, el penacho gaussiano se fundamenta matemáticamente con la expresión 1:

$$C = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} \right\} \quad (SEQ "equation" \setminus n \setminus * MERGEFORMAT 1)$$

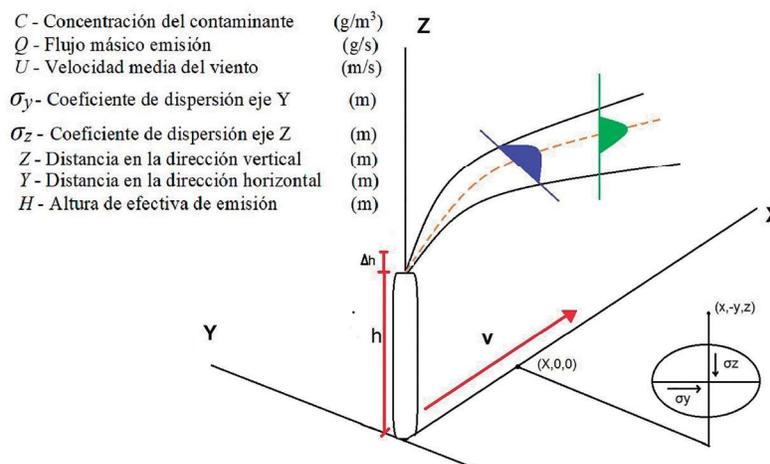


Figura. 1. Distribución de la pluma gaussiana de una fuente fija.

Considerando que la información de flujo másico y velocidad del viento son datos de entrada del modelo, el esfuerzo matemático del modelo se concentra en determinar los coeficientes de dispersión (ver figura 1) y la altura de elevación de la pluma, variando las distancias en los ejes vertical (Y) y horizontal (Z) para determinar la concentración de contaminantes en un punto e instante dado, según la capacidad de dispersión de la atmósfera, que es una función de la turbulencia atmosférica (Puigserver y Carrascal, 2008).

COEFICIENTES

Indican la amplitud de la dispersión la masa inicial en los ejes Y y Z en función de la distancia en el eje X. Su determinación se logra a través de nomogramas, correlaciones de McMullen y ecuaciones de Delance O. Martin. Considerando que en la práctica los nomogramas son un método caduco y que las correlaciones tienden a sobreestimar el valor de los coeficientes, se desarrollaron las ecuaciones de Delance O. Martin (ecuaciones 2 y 3). Este método considera que σ_y y σ_z son dependientes de la distancia (eje X) desde la fuente y de la estabilidad atmosférica (Galván, 2012; Martin, 1976).

$$\sigma_y = a x^b \tag{2}$$

$$\sigma_z = c x^d + f \tag{3}$$

Dónde $b = 0.894$, independiente de X. X es la distancia a la cual se determina la desviación en km; pero una vez determinada se reporta en m (Buitrago, 2003).

Por su parte, las variables a, c, d y f se obtienen a partir de la tabla de categorías de estabilidad atmosférica de Pasquill y la distancia de la fuente con la tabla de constantes para el cálculo de los coeficientes de dispersión.

ELEVACIÓN DE LA PLUMA

Para el cálculo de la elevación la pluma es importante resaltar que la pluma se eleva a una altura adicional a la cota de chimenea (Δh) y que una vez llega a esta altura se desplaza en el plano horizontal, conforme a la dirección predominante y la velocidad del viento (Galván, 2012).

Para calcular esta elevación se empleó la ecuación de Holland. Esta formulación matemática (ecuación 4) supone que la variación del viento en los tres ejes es despreciable y que la fuente se ubica en $X = 0$ (Arzate, 2015).

$$\Delta h = \frac{vD}{U} \left(k_1 + k_2 PD \frac{(T_c - T_a)}{T_a} \right) \tag{4}$$

Donde,

V	Velocidad de salida del gas (m/s)	Tc	Temperatura de la chimenea (k)
D	Diámetro de la chimenea (m)	Ta	Temperatura de la atmosfera (k)
U	Velocidad del viento (m/s)	K1	1.5
P	Presión (mBares)	K2	2.69 x 10-3

ALTURA EFECTIVA DE EMISIÓN

Por último se estima este factor, que no es más que la altura real en la que la pluma inicia su trayectoria horizontal (ecuación 5).

$$H = h + \Delta h \tag{5}$$

Donde Δh es altura de elevación de la pluma (m) y h es altura de la chimenea (m).

Figura 2. Cuadro explicativo de los coeficientes de dispersión, estabilidad de Pasquill y altura efectiva de emisión.

Después de comprender el desarrollo matemático de todos los parámetros del modelo gaussiano, se conforma una propuesta metodológica de cuatro etapas, involucrando un banco de pruebas y un software modelador (ver figura 2).

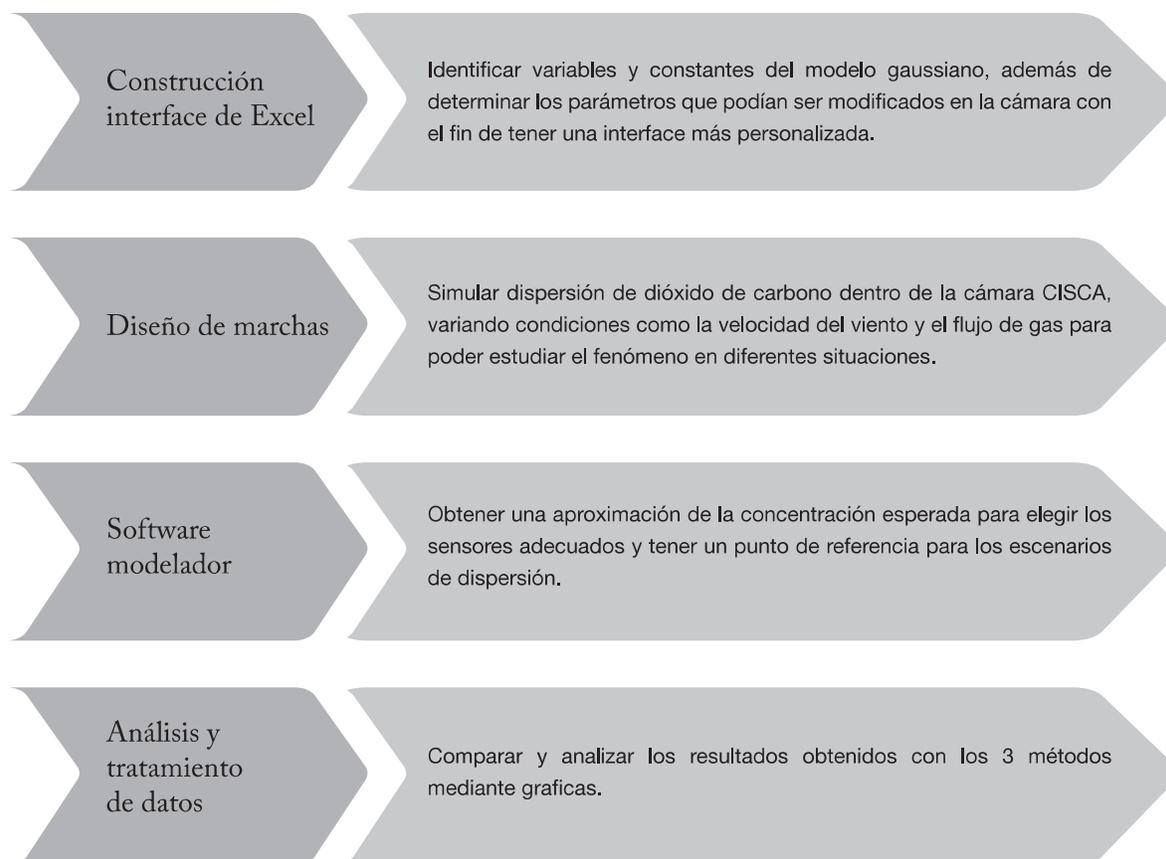
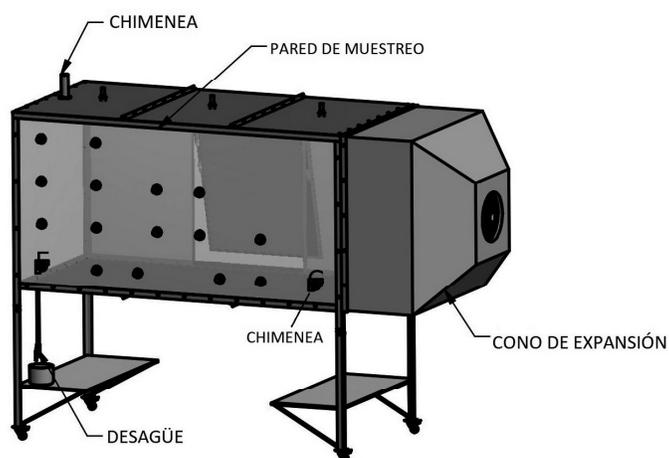


Figura. 3. Esquema de metodología.

Bancos de pruebas

Las cámaras de simulación son herramientas para comprender la dinámica, dispersión y reactividad de los contaminantes atmosféricos. El desarrollo de estos montajes se ha realizado principalmente en Europa y Estados Unidos, para el análisis de la reactividad en la atmósfera de contaminantes primarios. Sin embargo, en el escenario latinoamericano solo hay conocimiento de dos bancos de pruebas de este tipo: a) la cámara de la Universidad Nacional de Nordeste en Argentina, que es un túnel de vientos modificado para condiciones de dispersión y b) la CISCA de la Universidad Central en Colombia (ver tabla 2 y figura 3) (Neira y Díaz, 2015). El objetivo de CISCA es brindar herramientas adicionales para la comprensión de los fenómenos asociados a una fuente fija, es decir, busca conocer y representar el comportamiento del contaminante –como gas patrón– a escala dentro de la cámara, verificando su concentración en el espacio con sensores químicos. Además, este montaje puede simular lavado atmosférico mediante generadores de niebla a escala (Díaz, Molano, Neira, Silva y Puentes, 2016).



Dimensiones físicas CISCA		Dimensiones fuente fija	
Alto	2.7 m		Escala
Largo	4.0 m		
Ancho	1.5 m		
Dimensiones volumen de control		Escala Alto Diámetro	1:1000 60 m 3m
Alto	1.5 m		
Largo	3.0m		
Ancho	1.5 m		
Volumen efectivo	6.75 m ³		
Área superficial	4.5 m ²		

Figura 4. Descripción de la cámara CISCA.

Software modelador

El desarrollo computacional de los diferentes modelos de dispersión se traduce en diferentes programas que realizan los cálculos rápidamente y que varían dependiendo de la ecuación base, que puede ser euleriana, langrangiana o gaussiana. Entre ellos se destacan algunos como CALPUFF, AERMOD, SCREEN VIEW y ISCST3, los cuales difieren en su aplicabilidad, pues algunos sirven no solo para modelar dispersión, sino también permiten estudiar reactividad.

La interface SCREEN VIEW usa el modelo de pluma gaussiana, que incorpora factores relacionados a la fuente y condiciones meteorológicas para calcular la concentración de contaminantes de fuentes fijas de emisión continua. SCREEN VIEW asume que el contaminante no experimenta ninguna reacción química y que ningún otro proceso de remoción (como deposición húmeda o seca) actúa sobre la pluma durante su transporte desde la fuente. La interface examina el rango de clases de estabilidad según Pasquill-Gifford y velocidades del viento para identificar el "peor caso" de

condiciones meteorológicas, todo esto mediante un algoritmo de integración numérica para modelar impactos de fuentes de área (EPA, 2000).

Diseño de escenarios y definición de condiciones para las marchas

Concomitante con la operación en la cámara, se formuló el modelo gaussiano en hoja de cálculo de Excel, teniendo en cuenta las ecuaciones 2, 4, 5 y 6. Sobre la hoja de cálculo se corrieron tres escenarios de dispersión: alto, medio y bajo, que fueron definidos a partir del flujo volumétrico de entrada de gas a la cámara (ver tabla 1).

Tabla 1. Valores para los escenarios de simulación

ESCENARIO	Q(CFH)	q (g/s)	V (m/s)	U (m/s)	ΔH (m)
Alto	35	8.73	0.77	3.1	1.138
Medio	25	5.29	0.47	2.7	0.834
Bajo	15	1.34	0.12	2.1	0.277

Nota. q es el volumétrico de CO₂ proveniente de una bala; Q, flujo másico; V, velocidad de salida del gas; U, velocidad del viento, y H, altura efectiva de emisión. Los valores de q, V, U y H están ajustados de acuerdo con la escala de la CISCA (1:1000).

Antes de la verificación del modelo se definieron coordenadas en el plano (X, Y, Z) para los 19 puntos de muestreo definidos en el modelo original de la CISCA (ver figura 5), con el fin de referenciar en el espacio los resultados de modelación matemática y medición con sensores químicos. En esta distribución los puntos de muestreo 1 a 6 corresponden al nivel del suelo por ser los de menor altura y los puntos 1, 11, 13 y 19 se establecieron para analizar dispersión en función de la altura de la fuente (eje Z).

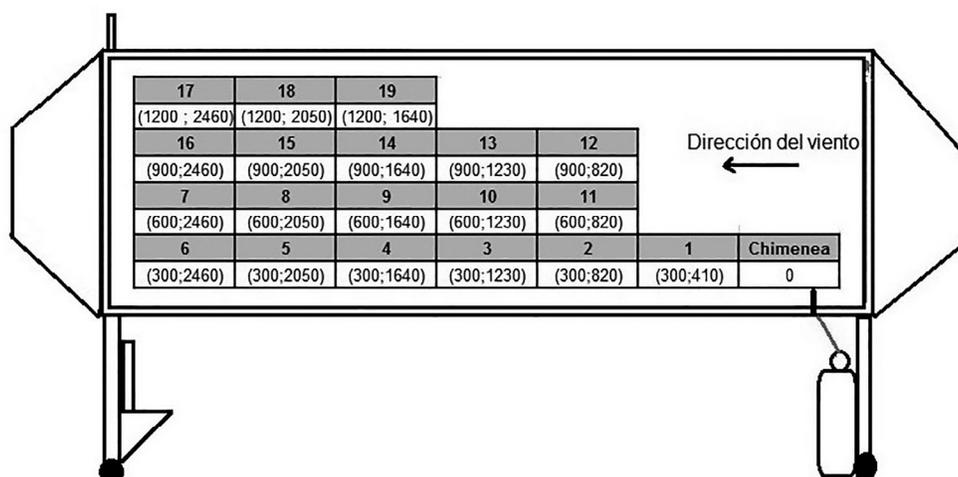


Figura 5. Vista lateral de la CISCA y distribución de coordenadas de los puntos de muestreo. El valor de Y= 0.75 m es constante en todos los cálculos de los puntos de muestreo de las coordenadas Z y X. Por ejemplo, el punto 6 (300; 2460) corresponde a 300 m de altura y 2460 m de distancia de la emisión. Las unidades del sistema de coordenadas están relacionadas con la escala de la cámara (1:1000), es decir, 30 cm de altura de los puntos 1 a 6 en las dimensiones reales de la CISCA corresponden a 3 m.

La tabla 2 presenta un resumen del resultado matemático del modelo en un punto determinado de la cámara. Esta sección de la interface permite calcular la concentración de contaminante para un solo punto a la vez.

Tabla 2. Interface modelo matemático escenario de dispersión alto en el punto 1

	MODELO GAUSSIANO	SIGNIFICADO	VALOR	UNIDADES
ECUACION DE GAUSS	C	Concentración	7.89E-05	g/m ³
	q	Flujo másico	8.73	g/s
	σ_y	Desviación eje Y	46.9	m
	σ_z	Desviación eje Z	27.1	m
	U	Velocidad del viento	3.1	m/s
	Y	Coordenada en Y	0.75	m
FORMULA DE HOLLAND	Z	Coordenada en Z	300	m
	V	Velocidad salida del gas	0.77	m/s
	D	Diámetro de chimenea	3	m
	P	Presión atmosférica	746.605	mBares
	Tc	Temperatura emisión	294.15	K
	Ta	Temperatura ambiente	293.15	K
	h	Altura chimenea	60	m
	Δh	Altura elevación de la pluma	1.133	m
H	Altura efectiva de emisión	61.133	m	

Ocho valores deben ser ingresados por el usuario en la interface de Excel para realizar los diferentes cálculos: Q, U, Y, Z, V, D, Tc y h. Todos los valores pueden ser modificados para emplear este modelo en diferentes condiciones. Los valores de P y Ta están preestablecidos a las condiciones de Bogotá. Las salidas de este modelo son: C, σ_y , σ_z y H

Teniendo en cuenta que los coeficientes de dispersión son variables fundamentales del modelo gaussiano, se calculó la amplitud máxima de la pluma en los ejes Y y Z, con el fin verificar si las dimensiones del volumen de control eran suficientes y adecuadas para que la pluma se dispersara libremente en estos ejes, en referencia a la distancia máxima (a escala) de la fuente (3 km) (ver figura 5).

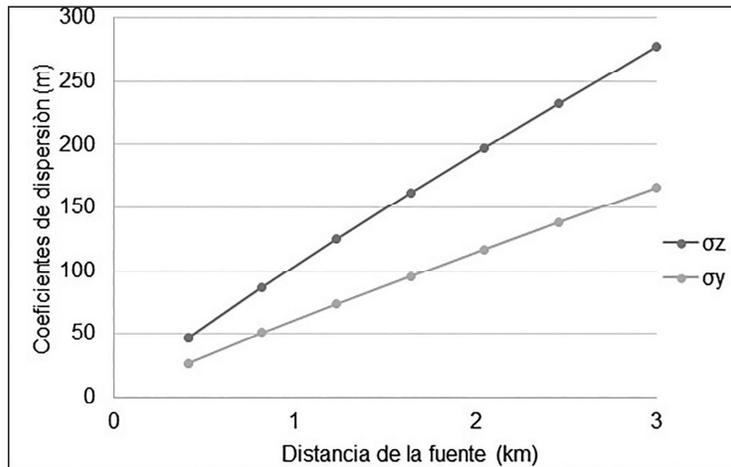


Figura 6. Amplitud de la pluma vs. distancia de la fuente.

Adicionalmente, en cuanto a las marchas, se propusieron mediciones de la concentración CO_2 empleando la bomba manual Dräger Accuro y tubos colorimétricos con el menor rango de medición disponible para CO_2 , es decir, 0.1 a 6.0% vol., cuyo principio de reacción química con amina genera cambio de coloración blanca a violeta en los tubos y tiene una escala en su cuerpo para realizar la lectura de concentración en unidades de % vol.

RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos al correr la interface del modelo gaussiano para los tres escenarios de dispersión anteriormente descritos, se construyó una gráfica de las concentraciones a nivel de suelo (puntos 1 al 6) en la CISCA (ver figura 7) con el fin de poder comparar los resultados con Screen View y marchas con sensores. Igualmente, se elaboró una gráfica para verificar el comportamiento de la concentración de CO_2 en función de la altura en el eje Z. Se evidenció correspondencia gráfica con el comportamiento esperado e ideal de la campana gaussiana, es decir, la concentración de contaminante disminuye a mayor distancia (en el eje X) de la fuente (ver figuras 7 y 8).

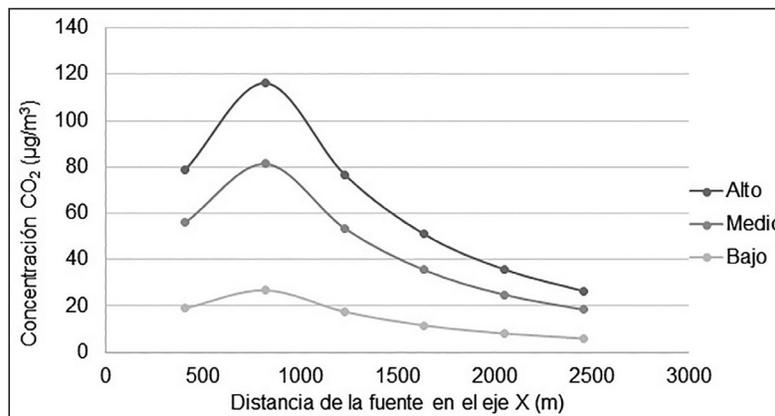


Figura 7. Concentración de gas a nivel del suelo (eje X).

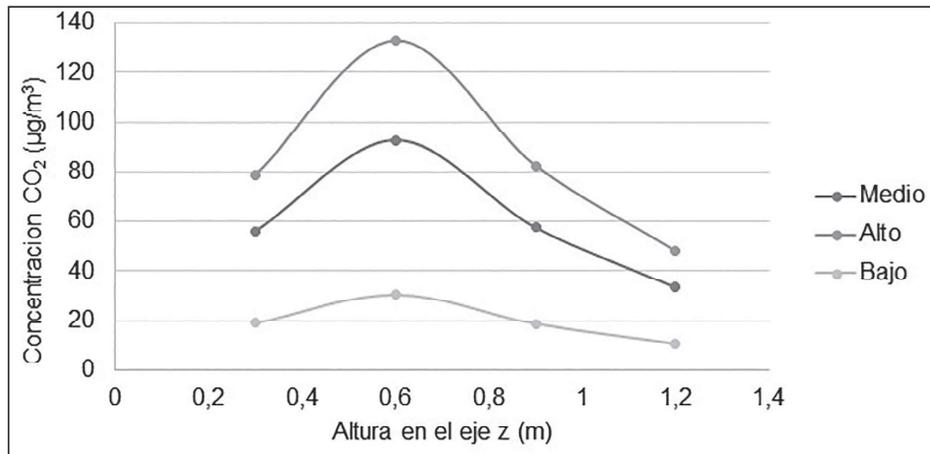


Figura 8. Concentración de gas vs altura (eje z).

Se realizaron las mediciones en un escenario intermedio, es decir, caudal alto y velocidad del viento baja, apartándose de la idealidad de los escenarios de dispersión descritos anteriormente, debido a que el tiempo de saturación de la cámara con velocidad de viento alto (3.1 m/s) es de aproximadamente 6 min 40 s. Luego de más de 10 marchas en la cámara (la cantidad de marchas se determinó por la disponibilidad de tubos de Dräger, ya que son de un solo uso), se ajustó la curva que describe la concentración de gas en el volumen de control (ver figura 9), la cual no refleja la campana gaussiana, pero se mantiene la tendencia de reducción de concentración de CO₂ en función de la distancia del punto de emisión. Lo anterior se debe principalmente dos aspectos: a) la concentración de gas patrón en la CISCA es muy baja y b) la escala de medición de los tubos es muy amplia, por lo que al realizar la lectura no se presentan diferencias sustanciales en la lectura de concentración punto a punto.

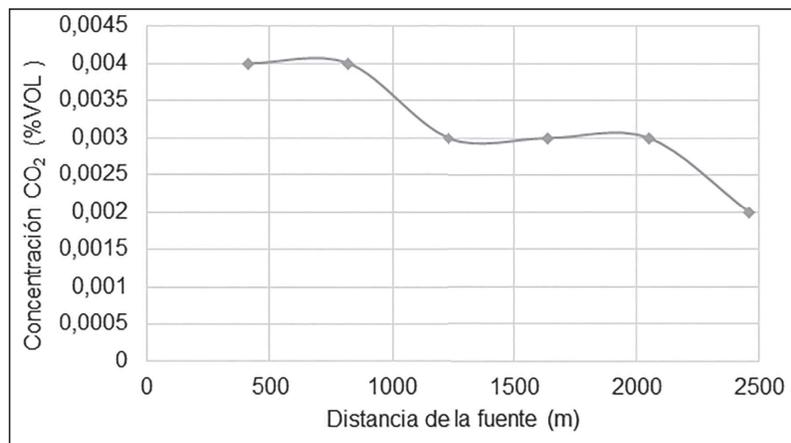


Figura 9. Concentración de gas a nivel del suelo.

La simulación en Screen View se realizó para los tres escenarios de dispersión (definidos en función del flujo del gas), en el que obtuvieron resultados de concentración de CO₂ a nivel de suelo similares a los de la interface de la cámara (ver figura 10).

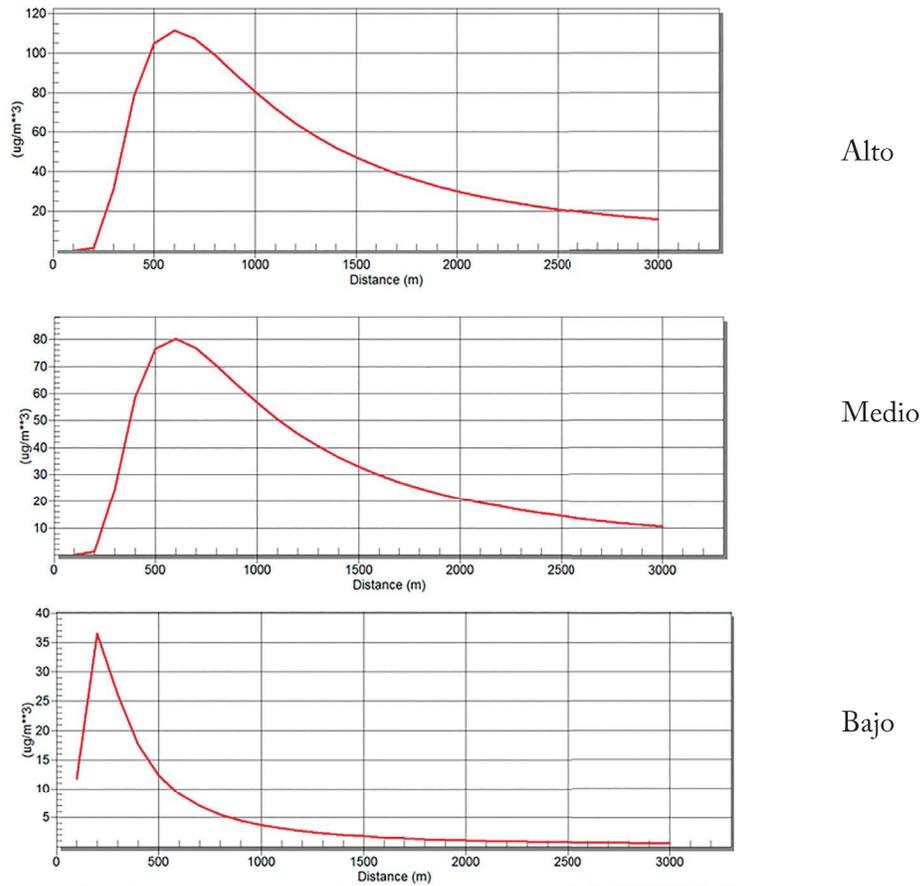


Figura 10. Concentración a nivel del suelo para los escenarios de dispersión. Gráficas elaborados con Screen View.

Como se esperaba, las gráficas obtenidas con Screen View describen una aproximación a curva de la campana de Gauss para todos los escenarios de dispersión. El escenario con la tendencia menos marcada es el bajo, ya que por el reducido flujo de emisión se dispersa mucho más lento y básicamente se pierde la concentración en el volumen de control. Finalmente, la tabla 5 presenta una comparación de los tres métodos de evaluación del modelo Gaussiano bajo diferentes parámetros.

Tabla 3. Cuadro comparativo métodos empleados

PARÁMETROS	MODELO	SENSORES	SCREEN VIEW
Tiempo de cálculo	Corto	Largo	Corto
Representación gráfica	Manualmente	Manualmente.	Automática
Sistemas de coordenadas de la cámara	Es compatible	Es compatible	No se ajusta

Los métodos matemáticos y computacionales presentan ventajas importantes en cuanto a los dos primeros parámetros de comparación. Sin embargo, son completamente ideales; así que el software solo permite obtener la concentración a nivel de suelo, desconociendo el comportamiento tridimensional de la pluma, algo que sí permite la cámara. Adicionalmente, la compatibilidad de la interface de Excel con el sistema de coordenadas le da la ventaja sobre el software. Por otra parte, la mayor ventaja de la cámara para complementar estudios de dispersión es que permite analizar este fenómeno que en la realidad no tiene un comportamiento tan ideal como lo plantea la matemática, teniendo en cuenta que la estabilidad en la atmosfera baja no es una condición estacionaria en la realidad.

Finalmente, aunque en puntos cercanos a la emisión se identifica la máxima concentración, que disminuye a medida que se aleja del punto de medición de la fuente, los métodos empleados se corresponden gráficamente, pero difieren en los órdenes de magnitud de sus resultados numéricos.

CONCLUSIONES

Aunque la pluma puede dispersarse libremente, alcanzando una amplitud máxima de 138.5 m y 232.6 m en los ejes Y y Z, respectivamente, en las condiciones actuales de la cámara solo es posible realizar simulaciones para estabilidad atmosférica C.

Luego de realizar las marchas y las simulaciones matemáticas se determina que, en cuanto a la dispersión se refiere, la interface de Excel es el método teórico más compatible con la cámara, principalmente por su afinidad con el sistema de coordenadas tridimensional de los puntos de muestreo. Al igual que los modelos matemáticos, la cámara se desarrolla sobre una idealidad porque supone que la velocidad del viento, la temperatura y la radiación solar son constantes en el tiempo y el espacio. Sin embargo, estos parámetros pueden ser modificados durante las marchas, algo que es restrictivo en la modelación matemática.

Las mediciones con sensores químicos no tienen el rendimiento esperado debido a que las dimensiones de la chimenea y el volumen de control no son proporcionales, además de la ausencia de un sistema de extracción para evitar la saturación de cámara, lo que está asociado a los tiempos de reacción y el rango de medición de estos.

La cámara CISCA es un montaje con un gran potencial para la gestión de la calidad del aire, no solo en cuanto a dispersión se refiere, sino también para el estudio de reactividad y lavado atmosférico de contaminantes, en la medida en que es un volumen de control con condiciones atmosféricas modificables y un sistema de simulación de precipitación.

La cámara no es tan efectiva para escenarios bajos de dispersión o en los que la velocidad del viento sea muy baja, ya que cuando la dispersión es más lenta se genera concentración y esta no se comporta de manera gaussiana.

No se realizaron marchas para el escenario de dispersión bajo, puesto que los sensores disponibles no tenían reacción por la baja concentración. Se requieren sensores digitales con una mayor escala y sensibilidad.

Para futuras investigaciones se recomienda hacer marchas para verificar reactividad de gases, así como modificaciones en el gas patrón y la fuente de emisión, que permitan que el fenómeno pueda ser visualizado dentro de la CISCA.

REFERENCIAS

Arzate, C. (2015). *Realización de software educativo para simular la dispersión de contaminantes atmosféricos* (tesis de pregrado). Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla, Puebla, México.

- Boubel, R., Fox, D., Turner, B., y Stern, A. (1973). *Fundamentals of air pollution*. Florida, EE. UU.: Academic Press.
- Buitrago, J. (2003). *Aplicación del modelo gaussiano para determinar la calidad del aire de Manizales* (tesis de maestría). Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
- Díaz, C. (2013). Metabolismo energético y calidad del aire en Bogotá D. C.: señal de insostenibilidad. *Épsilon*, 21, 119-144.
- Díaz, C., Molano, L., Neira, D., Silva, J., y Puentes, A. (2016). *Breve descripción de la cámara de interacción y simulación de contaminantes atmosféricos—CISCA. Documento técnico para proceso de patentamiento*. Bogotá D. C.: Universidad Central.
- Environmental Protection Agency. (2000). *Guía del usuario del modelo SCREEN3*. Recuperado de <https://www3.epa.gov/ttn/catc1/dir2/scrn3ds.pdf>
- Environmental Protection Agency. (2017). *Overview of greenhouse gases*. Recuperado de <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- Galván, M. (2012). *Estudio de impacto ambiental debido a las emisiones atmosféricas de la producción de alimentos concentrados para animales en la zona metropolitana de Bucaramanga* (tesis de grado). Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia.
- González, T. (2015). *Determinación de la calidad del aire en la Universidad Libre seccional Bogotá, sede Bosque Popular* (tesis de grado). Universidad Libre de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Hernández, A., Jauregui, U., Souto, J., Casares, J., Saavedra, S., Guzmán, F., y Torres, A. (2015). Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones. *UCE Ciencia. Revista de Postgrado*, 3(2). Recuperado de <http://uceciencia.edu.do/index.php/OJS/article/view/49>
- López, M. (2009). *Aplicación del modelo de dispersión CALPUFF para la estimación de concentraciones del PM_{2.5k}* (tesis de maestría). Ingeniería Ambiental, Posgrado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Martin, D. (1976). Comment on the change of concentration standard deviations with distance. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 26(2), 145-147. doi: 10.1080/00022470.1976.10470238
- Neira, D., y Díaz, C. (2015). *Puesta en marcha de la cámara de interacción y simulación de contaminantes atmosféricos (CISCA)* (trabajo de grado). Ingeniería Ambiental, Universidad Central, Bogotá D.C., Colombia.
- Puigcerver, M., y Carrascal, D. (2008). *Medio atmosférico: meteorología y contaminación*. Barcelona, España: Universitat Barcelona.
- Sanín, N. (2002). *Construcción de un modelo tridimensional para ajuste de campos de viento y dispersión de contaminantes en la atmósfera* (tesis doctoral). Departamento de Matemáticas, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas, Gran Canaria, España.
- Spellman, F. (2009). *The science of air. Concepts and applications*. EE. UU: CRC Press. doi: 10.1201/9781420075335
- Ulriksen, P. (2015). *Apuntes modelos de dispersión* (tesis de grado). Diploma en Contaminación Atmosférica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Escuela de Postgrado, Universidad de Chile, Chile.
- Vergara, E., y García, F. (2013). Simulación de la dispersión del material particulado proveniente de actividades portuarias en Santa Marta. *Épsilon*, 21, 41-55.