

DISPERSION Y DEPOSICION DE MATERIAL PARTICULADO EN ZONAS DE EXPLOTACION MINERA A CIELO ABIERTO USANDO CFD

José I. Huertas*, Eloy Vilchis

Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz. Tecnológico de Monterrey. Eduardo Monroy
Cardenas No. 2000. Código Postal 50110. Toluca. México.

*Tel (722) 2799990 ext 2113, jhuertas@itesm.mx

Resumen

Debido a su sencillez y a la falta de una mejor alternativa, los modelos gaussianos han sido la herramienta estándar para evaluar el impacto ambiental de fuentes de material particulado para propósitos regulatorios. Estos modelos son de estado estable, tipo heurístico que involucran un alto grado de incertidumbre, especialmente cuando los receptores son ubicados cerca a las fuentes, o las fuentes están localizadas en un terreno complejo. La tecnología computacional CFD (computational fluid dynamics) se ha convertido en una herramienta cada vez más utilizada. En contraste con los modelos gaussianos, CFD desarrolla numéricamente la física de las ecuaciones que gobiernan el flujo de un fluido. El propósito de este trabajo es usar CFD para simular la dispersión y deposición de partículas. Se realizó un trabajo experimental y computacional para validar esta alternativa. Un túnel de viento fue usado para estudiar la dispersión y deposición de partículas desde una única fuente de emisión bajo condiciones de estado estable. La misma situación fue simulada usando el software CFD. Los resultados muestran una buena correlación. Como una aplicación, el software CFD fue usado para simular la dispersión y deposición desde un pit de minería cielo abierto. Diversas alternativas de geometría de la mina fueron evaluadas para identificar una de ellas que maximizara la deposición del material particulado dentro del área de la mina bajo diferentes condiciones de viento. Esta configuración minimiza el impacto de la operación de la mina en la calidad del aire de las zonas cercanas a la misma.

Palabras claves: CFD, deposición de material particulado, dispersión de material particulado, minería cielo abierto.

1. Introducción

Actualmente existe el interés de cuantificar la cantidad de material particulado que es emitido a la atmósfera cuando el viento incide sobre superficies con material particulado suelto y determinar el impacto ambiental que genera dichas emisiones. La extracción y el procesamiento del carbón, produce y emite una cantidad considerable de material particulado, la cual podría causar tanto daños ambientales como a la salud humana. La complejidad en la topografía típica de las regiones de explotación minera a cielo abierto dificulta a los modelos Gaussianos convencionales obtener resultados precisos.

Recientemente, los modelos numéricos CFD han sido empleados en problemas que involucran el transporte y deposición de material particulado. La referencia(1) reporta el uso de esta herramienta para modelar la dispersión de material particulado en una mina de explotación minera a cielo abierto. Sin embargo no se han encontrado trabajos que modelen la deposición de material particulado como función de su tamaño de partícula.

El presente trabajo busca extender el uso de los modelos numéricos CFD para modelar la dispersión y deposición de PM_{10} en una mina de explotación de carbón a cielo abierto. Adicionalmente se busca utilizar el modelo implementado para identificar el impacto de la geometría de la mina sobre las emisiones de material particulado como una función de la dirección del viento.

2. Metodología unificada para la modelación en CDF

La metodología para llevar a cabo una modelación de la calidad del aire, y en especial usando CFD, se muestra en la figura 1. El procedimiento se divide en 3 etapas:

- Datos de entrada: geografía, meteorología y emisiones
- Corrida del modelo
- Post-procesamiento.

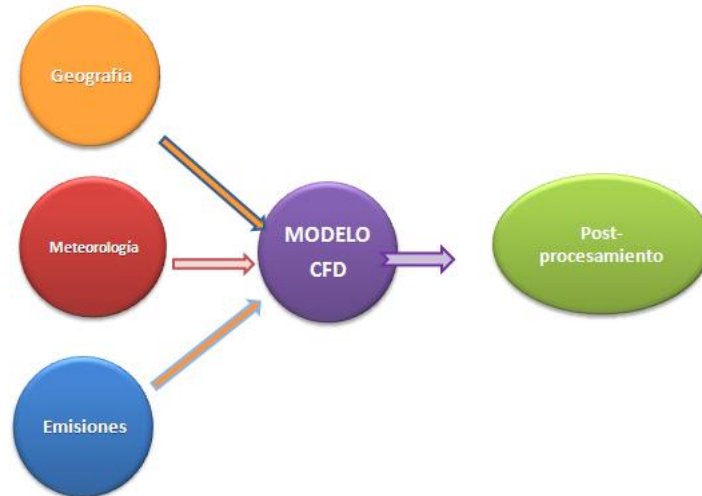


Figura 1. Metodología para llevar a cabo una modelación de la calidad del aire, y en especial usando CFD

2.1 Geografía

La figura 2 muestra la simplificación de la geometría de la mina implementada. Se mantuvo la escala 1:1 de la topografía de la mina. El volumen de estudio consiste en una caja de 3 Km de largo por 2 Km ancho y 1.5 km de altura, tal como se presenta en la figura 3. Se usó elementos tipo tetraedros para discretizar dicho volumen por medio de GAMBIT.

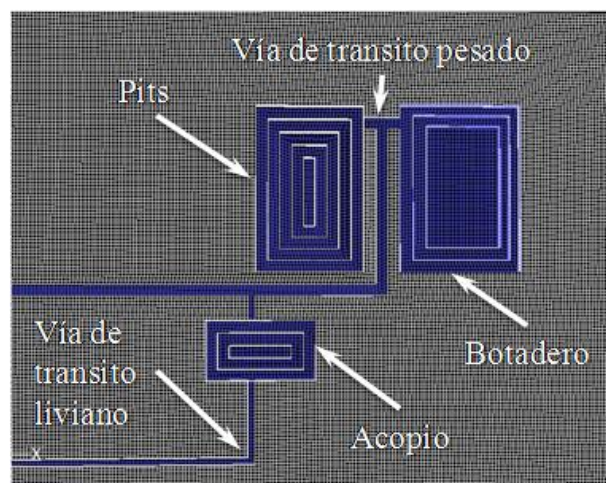


Figura 2. Simplificación de la topografía de una mina de explotación de carbón a cielo abierto ubicada al norte de Colombia

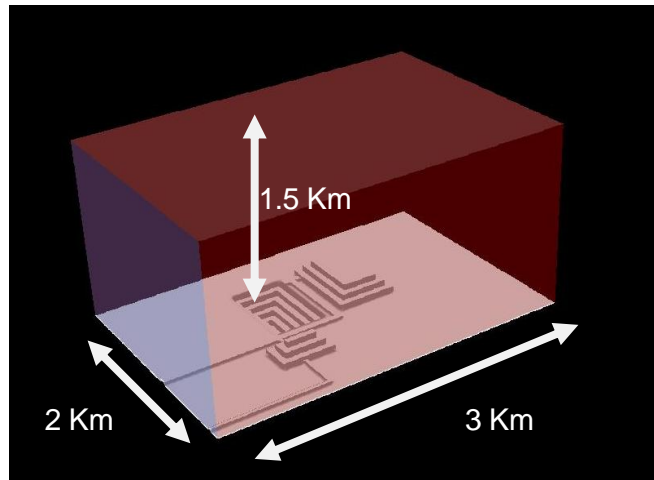


Figura 3. Volumen de control usado para modelar la dispersión y deposición de material particulado en una mina de explotación de carbón a cielo abierto

2.2 Meteorología

Para los paquetes de CFD no es necesario especificar las condiciones meteorológicas sobre la región de modelación. Internamente el modelo las determina. Sin embargo requiere las condiciones meteorológicas en las paredes del volumen de control. Estas condiciones meteorológicas están representadas por la temperatura, presión y dirección del viento. Se consideraron condiciones de estado estable. La tabla 1 muestra los parámetros de entrada para la presente aplicación.

Tabla 1. Condición de frontera en la entrada

<i>Parámetro</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>	<i>Presión manométrica (KPa)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>
Entrada	2	0	27

2.3 Emisiones

Se determinó el material particulado que se emite en cada una de las fuentes de emisión: pit, botadero, acopio, y carreteras. Para alimentar los parámetros como flujo másico y velocidad de salida, se utilizaron los datos obtenidos del trabajo titulado “*Metodología unificada de inventarios de emisiones para áreas de explotación minera a cielo abierto*”(2). A continuación, se presentan los datos utilizados. El material y la densidad de las partículas también se muestran a continuación.

Tabla 2. Emisiones de PM_{10} en cada una de las áreas de emisión

Fuente	PM_{10}	
	kg/s	m/s
Pit	2.14E-03	1.12E-12
Acopio	1.22E-04	3.85E-12
Botadero	2.22E-01	9.08E-11
Vía pit - botadero	1.15E-03	1.09E-11
Vía pit - patio	2.33E-04	1.88E-12
Vía perimetral	3.10E-04	1.82E-12

Tabla 3. Densidad y tipo de partícula

<i>Material</i>	<i>Densidad</i> [Kg/m ³]
Carbón	1300
Quarzo	1730

Se usó la distribución **Rosin-rammler** para caracterizar los tamaños de las partículas, los cuales fueron medidos experimentalmente. La función de la distribución Rosin-Rammler está basada en la relación exponencial que existe entre el diámetro (d) y la fracción másica con el diámetro más grande que d (Y_d).

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad (5)$$

Donde:

\bar{d} Diámetro promedio

n Parámetro de esparcimiento.

Se realiza una distribución acumulada de los tamaños, con el objetivo de ajustar y obtener los parámetros de la ecuación 5.

Tabla 4. Fracción másica de acuerdo al diámetro de la partícula

Rango de diámetro (μm)	Fracción másica
1 - 5	0.9692
5 - 10	0.0154
10 - 20	0.0154

Tabla 5. Fracción másica de acuerdo al diámetro de la partícula

Diámetro (μm)	Fracción másica con un diámetro mas grande que d, Y_d
1	1
5	0.0308
10	0.0154
20	0

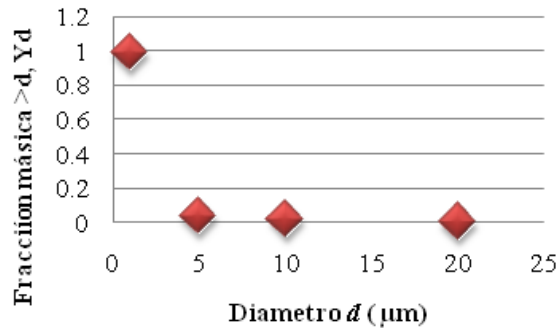


Figura 4. Diámetro de la partícula vs fracción másica con un diámetro más grande que d .

Igualando $\frac{d}{\bar{d}} = 1$ y reemplazando $n = 1$, $Y_d = e^{-1}$ de la figura 4 se obtiene $\bar{d} = 2.5 \mu\text{m}$. Para obtener n , se promedian todos los valores de los diámetros de la siguiente ecuación 6 y de esta manera se obtiene $n = 2.6$

$$n = \frac{\ln(-\ln(Y_d))}{\ln \frac{d}{\bar{d}}} \quad (6)$$

2.4 El modelo

El método numérico CFD se basa principalmente en la resolución de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno del flujo de fluidos: continuidad (1) y el momento (2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

Donde:

ρ	Densidad del fluido
\vec{v}	Velocidad del fluido
S_m	Masa adherida a la fase continúa.
p	Presión estática
$\bar{\tau}$	Tensor de esfuerzos
$\rho \vec{g}$	Fuerza de gravedad del cuerpo
\vec{F}	Fuerza externa.

Para predecir las trayectorias del material particulado, el software integra el balance de fuerzas en la partícula.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (u - u_p) + \frac{g_x (\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_d \text{Re}}{24} \quad (4)$$

Donde:

u_p	Velocidad de la partícula
u	Velocidad del fluido

$F_D(u - u_p)$	Fuerza de arrastre por unidad de masa en la partícula.
μ	Viscosidad molecular del fluido
Re	Número de Reynolds
C_d	Coefficiente de arrastre
Sufijo p	Representación de la partícula

3. Resultados

Se simuló la dispersión de material particulado en las 4 direcciones de viento mostradas en la figura 5. La figura 6 presenta los resultados obtenidos cuando la velocidad del viento incide en la dirección x. Se muestra los perfiles de velocidad en un plano alineado con la dirección del viento que atraviesa el pit y el botadero por medio de vectores de velocidad. Se observa que la presencia del botadero alineado con la zona de pits genera una turbulencia vientos abajo y al interior de los pits. El mismo fenómeno se observa en la zona de acopio. Adicionalmente, se muestra que esta configuración favorece la deposición de material particulado dentro de la zona de pits pero desfavorece el proceso de sedimentación debajo de la zona de botadero. Esto significa que el impacto generado por las áreas descubiertas en la zona de botadero tiene un mayor impacto en términos de emisión neta de material particulado que la que tiene la zona de pits. Por otro lado, la figura 5 muestra que el aire bordea la zona de botadero dejando un rastro de material sedimentado.

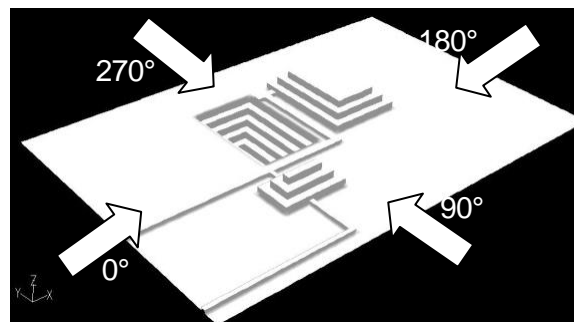


Figura 5. Direcciones del viento simuladas

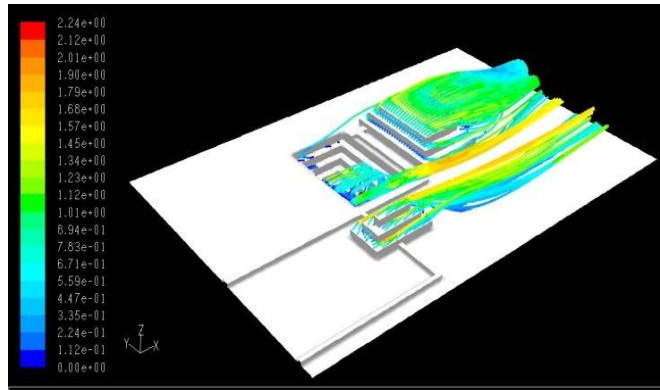


Figura 6. Patrón de flujo de las partículas cuando el botadero tiene la configuración inicial y el viento sopla en la dirección x .

3.1 Evaluación del efecto de la geometría de la zona de botadero sobre las emisiones

Con el fin de explorar el efecto de cambiar la geometría de la zona de botadero para favorecer la retención de material particulado se probaron dos alternativas. Alargar la zona de botaderos de tal forma que el pit quede centrado y bordear los pits con una zona de botadero en forma de L manteniendo el mismo volumen del botadero. La figura 8 muestra los resultados obtenidos para las mismas condiciones del caso anterior reconfigurando el botadero para que asuma la forma de L.

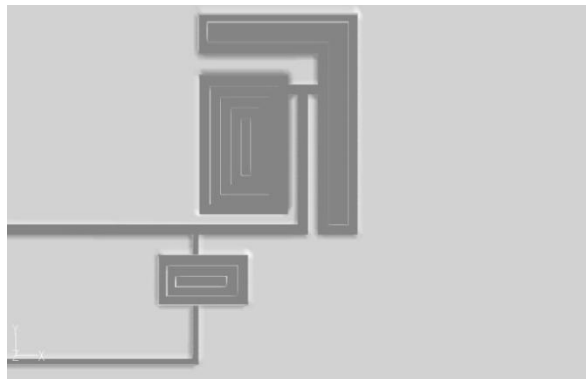


Figura 7. Reconfiguración de la geometría de la mina. Botadero en forma de L

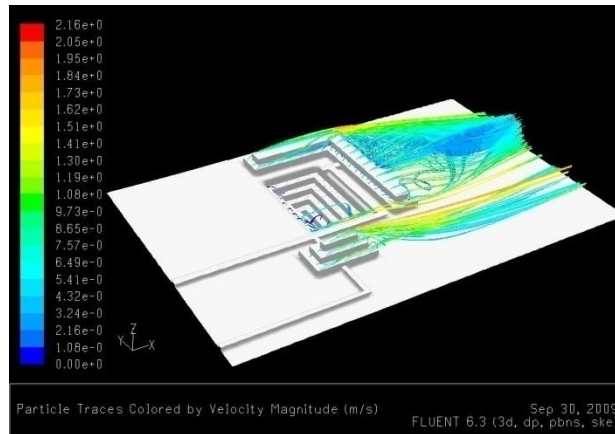


Figura 8. Patrón de flujo de las partículas cuando el botadero tiene forma de L.

La tabla 6 compara el porcentaje de material particulado que es retenido al interior de la mina por efecto del cambio de geometría de la zona de botadero en comparación con la geometría inicial. Se observa que este porcentaje aumenta en las direcciones 0° y 180° mientras que hay una disminución en las direcciones 90° y 270° . En la figura 9 muestra una comparación cualitativa de la deposición en ambas geometrías.

Tabla 6. Porcentaje de material particulado que es retenido al interior de la mina por cambio en la geometría

<i>Dirección del viento</i>	<i>%</i>
0°	125.2
90°	-66.9
180°	21.5
270°	-54.4

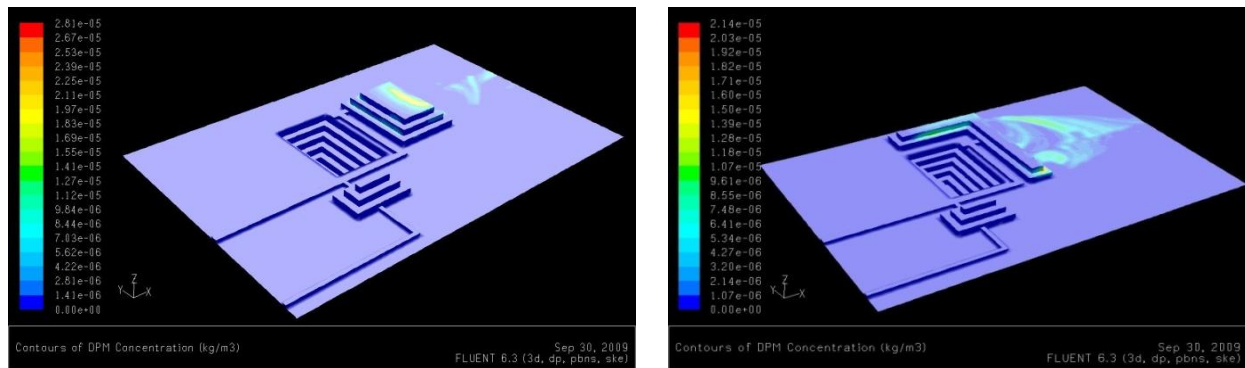


Figura 9. Concentración de material particulado. A la derecha se presentan los resultados con el cambio en la geometría.

4 Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo permite concluir lo siguiente:

- La alternativa de encerrar las fuentes de emisión con elementos naturales para protegerlas de la acción de viento es una buena práctica de control de emisiones. En algunos casos esta alternativa puede ser implementada fácilmente, como por ejemplo en la zona de acopio.
- Aunque no se mostró, los resultados de la simulación indican que mantener las zonas de acopio y botadero lo más bajas posibles reduce la dispersión de material particulado y por tanto su impacto en las poblaciones vecinas.
- Las emisiones que generan el mayor impacto sobre las poblaciones vecinas son las emitidas en la zona de botadero y de acopio por estar a la mayor altura en la mina. Por tanto se recomienda reducir el área expuesta en los botaderos, humectar esta zona y cubrirlas con material vegetal tan pronto como sea posible.

Adicionalmente, se recomienda dar preferencia en el riego a las vías ubicadas fuera de los pits y en especial a las ubicadas a la mayor altura. Finalmente, se recomienda fomentar la reforestación a los costados de las vías ubicadas fuera de los pits.

5. Referencias

1. **Silvester S.A, Lowndes I.S., Hargreaves D.M.** *A computational study of particule emissions from an open pit quarry under neutral atmospheric conditions* . Nottingham UK : Atmospheric Environment, 2009.
2. **Huertas J., Camacho D.** Metodología unificada de inventarios de emisiones para áreas de explotación minera a cielo abierto. 2008.
3. **C. Cowherd, Jr. et al.,.** *Control Of Open Fugitive Dust Sources, EPA-450/3-88-008, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park.* NC September 1988.
4. **ANSYS Inc.** Fluent Software. <http://www.fluent.com/>. 2009.