

## Predicción y Análisis de la Contribución de PM<sub>10</sub> desde Pilas de Carbón en una Mina a Cielo Abierto

Heli A. Arregoces<sup>(1,2)</sup>, Roberto E. Rojano<sup>(1,2)</sup>, Luis C. Ângulo<sup>(1,2)</sup> y Gloria M. Restrepo<sup>(2)</sup>

(1) Grupo de Investigación GISA, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira, Km 5 Vía a Maicao, Riohacha-Colombia. (e-mail: rrojano@uniguajira.edu.co)

(2) Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia UdeA, Calle 70 No. 52-21, Medellín-Colombia.

Recibido Dic. 28, 2015; Aceptado Mar. 2, 2016; Versión final Mar. 7, 2016, Publicado Ago. 2016

---

### Resumen

Se determinaron las contribuciones de PM<sub>10</sub> en el medio ambiente en una zona industrial minera en el norte de Colombia por actividades implicadas en el almacenamiento de 3.2 Mton carbón. Se utilizó como principal herramienta el software CALPUFF para determinar el aporte de PM<sub>10</sub> durante 10 días de modelado durante un mes. Se midieron las concentraciones ambientales de PM<sub>10</sub> en 5 receptores. Aunque las mayores emisiones se producen en horas diurnas, caracterizada por altos valores en la velocidad del viento y mayor insolación, la mayor receptividad de PM<sub>10</sub> en las estaciones de mediciones se produce en horas nocturnas por la disminución de la altura de mezcla. Los resultados de la modelación muestran que las actividades implicadas en el almacenamiento de carbón pueden aportar un 14.5% de las concentraciones ambientales diarias en receptores ubicados a 16.2 km viento abajo de la fuente.

*Palabras clave:* CALPUFF; receptores ambientales; PM<sub>10</sub>; pilas de carbón; mina a cielo abierto

## Prediction and Analysis of the Contribution of PM<sub>10</sub> from Coal Piles in an Open Pit Mining

### Abstract

The contributions of PM<sub>10</sub> to the environment were determined in a mining industrial zone in northern Colombia for activities involved in storing 3.2 Mton of coal. As the main modeling tool the software CALPUFF was used to determine the contribution of PM<sub>10</sub> for 10 days modeling during a month period. Ambient concentrations of PM<sub>10</sub> in five receivers were measured. Although higher emissions occur during daytime, characterized by high values of wind speed and higher solar radiation, the greater receptivity of PM<sub>10</sub> measurements stations occurred during night hours due to the decreasing the mixing height. The modeling results show that the activities involved in carbon storage can provide 14.5% of daily ambient concentrations at receptors located 16.2 km downwind from the source.

*Keywords:* CALPUFF; environmental receptors; PM<sub>10</sub>; coal piles; open pit mining

## INTRODUCCIÓN

Durante el año 2014 la mina de carbón el Cerrejón en el Departamento de La Guajira, al norte de Colombia, obtuvo una producción aproximada de 34,2 Mton/año de carbón, convirtiéndose en una de las regiones más grandes del mundo de explotación minera a cielo abierto. La magnitud de la extracción, almacenaje y transporte es directamente proporcional al nivel de contaminante particulado presente en su zona de influencia. Los valores medidos de material particulado cercanos a minas a cielo abierto varían de una mina a otra, pero presentan rangos de concentraciones altos a distancias cercanas de las operaciones de extracción de carbón (Chakraborty et al., 2002; Aneja y Morgan, 2012). Este problema se agudiza cuando cerca de las operaciones de extracción hay pequeñas comunidades que habitan y realizan sus labores diarias en esos lugares. Caso que se presenta en la Mina el Cerrejón, donde de las 13 estaciones que conforman su Red de Calidad de Aire, 8 estaciones están ubicadas en comunidades que no han sido reubicadas. Estas comunidades constantemente se quejan de la presencia de material particulado de color negro en sus techos y vasijas de almacenamiento de agua. Este Material que puede ser partículas de carbón que por acción del viento puede ser aerotransportada desde las pilas de almacenaje.

Las áreas de almacenamientos de carbón constituyen extensas zonas que permiten el acopio de grandes volúmenes del material en minas a cielo abierto. Su versatilidad radica en que permite obtener reservas y disponibilidad de carbón para cuando se presenten inconvenientes que pudieran afectar las producciones normales de exportaciones. La recurrencias a estas formas de almacenamiento en zonas industriales lleva inherente la generación de partículas que puede convertirse en problema de tipo ambiental (Torano et al., 2007) en casos más graves han sido asociados con excesos en la morbilidad y mortalidad en problemas como la disminución de la función pulmonar, dificultad respiratoria e hipoxemia, cambios adversos en la función autonómica cardíaca (Mardones et al., 2015; Dostal et al., 2013; Muránszky et al., 2011; Pope y Dockery, 2006).

Estas emisiones fugitivas pueden afectar significativamente la calidad del aire y debido a su naturaleza es difícil su cuantificación. Su tasa de emisión está influenciada por varios factores como características de los vientos, formas de las pilas, presencias de elementos no erosionables, topografía de la zona y perturbaciones en la superficie (Mueller et al., 2015a; Song et al., 2014; Cong et al., 2012; Xuan et al., 1994). El componente antrópico dominante en las emisiones de partículas en una Área de pilas de almacenamiento normalmente consta de cargadores, operaciones con tractores y el tráfico de camiones alrededor de las pilas de almacenamiento. La EPA (1995) sugiere factores de emisión que relacionan el material emitido con la actividad generadora para calcular las contribuciones a las atmosfera. Por otro lado, existen otros componentes de tipo natural que afectan las emisiones fugitivas en pilas de almacenamiento de carbón como es el viento, combustiones y turbulencias generadas en la superficie del material (Mueller et al., 2015a). Diversas técnicas han utilizado métodos empíricos o modelos matemáticos para estimar las emisiones de material particulado (Mueller et al., 2015a; Mueller et al., 2015b; Cong et al., 2012; Laurent et al., 2009); Los resultados de estas investigaciones, están enfocadas a las emisiones de las fuentes descartando sus efectos en las concentraciones ambientales o receptores de la zona.

El objetivo general de esta investigación es determinar la contribución de PM<sub>10</sub> a las concentraciones ambientales de la atmosfera por las actividades inherentes en el almacenamiento de carbón en una zona industrial minera ubicada en el norte de Colombia, aplicando un modelo en estado no estacionario, Calpuff, para cuantificar la variabilidad en receptores ambientales debido a las emisiones por factores antrópicos y naturales. El Calpuff es un modelo gaussiano, no estacionario, que contiene módulos para complejos efectos del terreno, el transporte sobre el agua, los efectos de interacción costeras, la construcción de caída de flujo, eliminación húmeda y seca. (Scire et al., 2000). El modelo tiene la capacidad para tratar variables en el tiempo y espacio en fuentes de áreas y volúmenes, y la idoneidad para los dominios de modelado de decenas de metros a cientos de kilómetros de una fuente proporcionado resultados confiables por procesos atmosféricos inherentes que pueden afectar las emisiones, transporte y dispersión de contaminantes (USEPA, 2008). Los resultados obtenidos en muchas investigaciones muestran que el control operacional enmarcado dentro de la gestión ambiental en zonas de almacenamiento puede afectar significativamente las concentraciones de contaminantes en áreas distantes. Estas contribuciones a las concentraciones ambientales pueden ser determinadas debido a que sus emisiones se tratan como fuentes fugitivas y a la versatilidad del modelo para estimar campos de vientos debido a las condiciones del terreno (Nosek et al., 2013; Rodríguez et al., 2014).

## METODOLOGÍA

El dominio de modelación abarca una rejilla de 55 km x 45 km con resolución de celdas de 0.25<sup>2</sup> km y 10 niveles de alturas verticales (20, 50, 80, 100, 500, 1000, 1500, 2000, 3000 y 5000 m) que contempla toda la zona de influencia del proyecto minero (Figura 1)

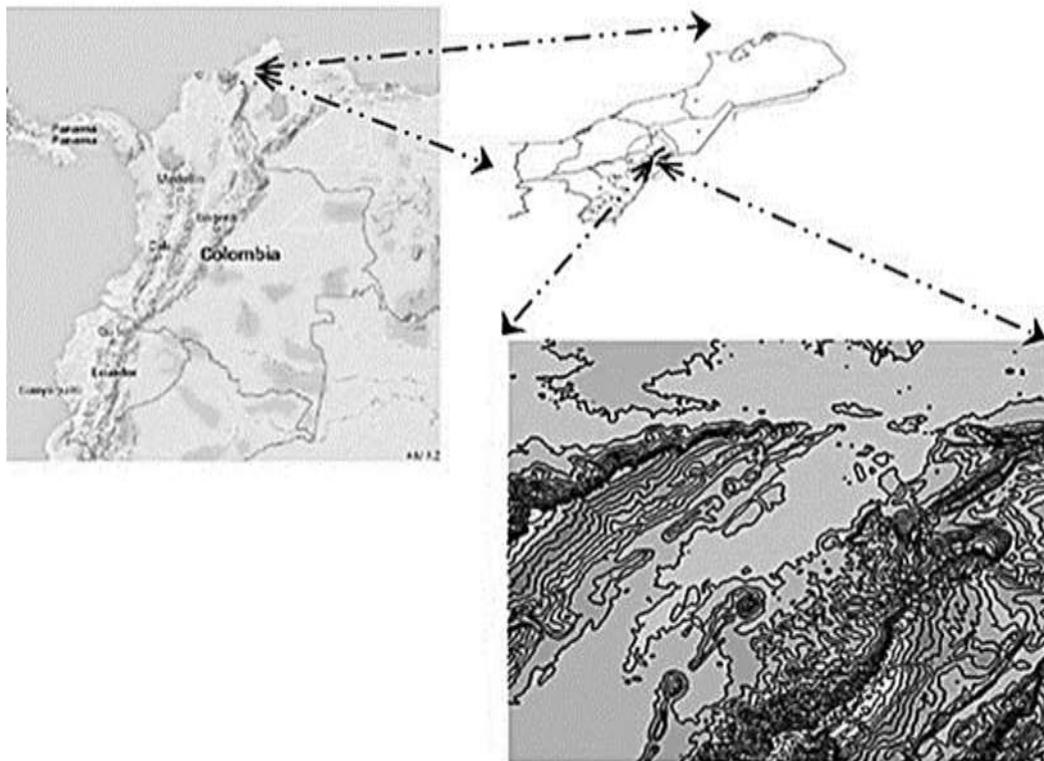


Fig. 1. Dominio del Modelado

Los patios de almacenamiento de carbón tienen capacidad de hasta 3.2 Mton en 18 zonas para ubicación de pilas para diferentes calidades. Se identificaron 11 pilas en los patios principales y 2 pilas auxiliares en la zona sur y 1 en la zona norte del proyecto. Para determinar las emisiones fugitivas naturales sujeta a la perturbación del viento se calculó la velocidad de fricción en la superficie de las pilas y el potencial de erosión con datos meteorológicos horarios.

Entre las emisiones contempladas en el modelo están las actividades antrópicas directas de cargue y descargue de carbón, tráfico de camiones alrededor de las pilas de almacenamiento y operaciones de remanejo con bulldozer. Las emisiones de PM<sub>10</sub> fueron calculadas con los factores sugeridos por la EPA (1995) y escenarios de actividades estándares para alcanzar el suministro diario de exportación. El factor de emisión para las emisiones de partículas generadas por el viento sujeta a perturbación fue determinado por la siguiente expresión:

$$\text{Factor Emision} = k \sum_{i=1}^N P_i \tag{1}$$

Donde  $k$  depende del diámetro aerodinámico de las partículas,  $N$  número de perturbaciones en el tiempo y  $P_i$  potencial de erosión. La función  $P_i$  en seco está determinada por:

$$P_i = 58(u^* - u_i^*)^2 + 25(u^* - u_i^*) \tag{2}$$

Donde  $u^*$  es la velocidad de fricción en la pila de almacenamiento y  $u_i^*$  es el umbral de la velocidad de fricción ( $P_i = 0$  si  $u^* \leq u_i^*$ ). Debido a la relación no lineal de la función cada evento de erosión debe ser tratado por separado. Las emisiones de PM<sub>10</sub> generados por cada evento es calculado como el producto del multiplicador  $k$  (PM<sub>10</sub> = 0.5), el potencial de erosión ( $P_i$ ) expresado en g/m<sup>2</sup>, y el área afectada de la pila (EPA, 1995).

El valor de  $u_i^*$  depende de las características y conglomerado del carbón que conforman las pilas y la velocidad de fricción es igual a  $u_i^* = 0.1u_s^+$ ; la variación temporal de la velocidad del viento que fluye por la

superficie de la pila  $u^+_s$  es determinada por la velocidad máxima del viento en el ambiente medida a un corto intervalo de tiempo, siendo el valor  $u^+_s$ :

$$u^+_s = \frac{u_s}{u_r} u_z \left[ \frac{\ln(10/0.005)}{\ln(z/0.005)} \right] \quad (3)$$

Donde  $u_z$  es la velocidad del viento a una altura  $z$ ,  $u_s/u_r$  es la relación entre las velocidades de superficie-referencia y 0.005 es la altura de la rugosidad en la superficie de las pilas en metros. Al considerar la velocidad umbral de fricción en el modelado sugiere la posibilidad de emisión de PM<sub>10</sub> por procesos natural asociado con la acción de los flujos turbulentos que ocurren durante los periodos de vientos relativamente ligeros (Mueller et al., 2015a; Torano et al., 2007).

El campo de viento tridimensional para Calpuff se construyó a partir de datos de observaciones en superficie y en altitud utilizando el programa de preprocesador meteorológica Calmet. Los parámetros del modelo meteorológico BIAS, RMAX1, RMAX2, TERRAD, R1 y R2 se determinaron a través de las recomendaciones dada por la EPA-Federal-Land-Management (Fox, 2009) y TRC Environmental Corporation (2011) para la optimización en la aplicación del modelo. El parámetro BIAS asigna un peso a los datos entre las observaciones en superficie y radiosondeos para cada capa vertical. Los parámetros RMAX1 y RMAX2 define el máximo radio de influencia de los datos de las estaciones que registran variables meteorológicas. El parámetro TERRAD define el radio de influencia de las características del terreno. Por otro lado, los parámetros R1 y R2 son la distancia de una observación, donde la observación y el campo de estimación inicial del modelo tienen el mismo valor para la superficie y las capas de aire, respectivamente.

Los datos meteorológicos en superficie fueron obtenidos de las estaciones La CDA y Casitas. La primera estación ubicada a 2.5 km de los patios principal de almacenamientos de carbón en las coordenadas 11° 8'15.43"N y 72°36'57.49"O. Por otro lado, la estación Casita se encuentra ubicada en coordenadas 10°57'2.10"N y 72°44'28.38"O en áreas denominadas como zona Sur a más de 20 km de la zona de almacenamiento principal. El modelo meteorológico fue calibrado con datos de dirección y velocidad de los vientos registrados en la estación La Mina perteneciente al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). El factor de corrección de sesgo en la calibración del modelo meteorológico entre los valores simulados para una celda  $ij$  y los valores observados se obtuvo a través de la aplicación de los métodos estadísticos BIAS y el error cuadrático medio (RMSE):

$$BIAS = \sum_{t=1}^N \frac{(\phi t - \phi t_{obs})}{N} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{t=1}^N \frac{(\phi t - \phi t_{obs})^2}{N}} \quad (5)$$

Donde,  $\phi t$  es el valor pronosticado en la celda de la grilla del dominio,  $\phi t_{obs}$  es el valor observado y  $N$  es el número de mediciones correspondientes en el análisis. La Figura 2 muestra la correlación entre las variables ambientales simuladas por el Calmet (velocidad y dirección de vientos, temperatura) y las registrada en la estación La Mina, proporcionado una confiabilidad bastante alta para la utilización del modelo meteorológico en la dispersión y transporte de contaminantes. Se estudiaron las concentraciones de PM<sub>10</sub> de 5 receptores: Casitas, Patilla, Provincial, Vivienda, y Hatonuevo para determinar el aporte de PM<sub>10</sub> por pilas de carbón debido a las concentraciones simuladas por Calpuff y los valores registrados en los monitores. Se utilizó datos de la estación Sol-Sombra como concentración de fondo regional. La Tabla 1 muestra las coordenadas y altitudes de las estaciones.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las contribuciones diarias de PM<sub>10</sub> a las concentraciones ambientales en actividades de almacenamiento de carbón fueron significativas y variables para cada una de las estaciones (Figura 3). La modelación mostro que el 14.50% de la concentración ambiental registradas en Provincial está directamente influenciada por las actividades relacionadas con el almacenamiento del carbón. Mientas que, en otras zonas estudiadas la influencia fue menor (Casitas: 4.04%, Patilla: 4.68% y Hatonuevo: 3.96%). La estación Vivienda no recibió ningún aporte por las actividades de almacenamiento en pilas de carbón. El factor dirección del viento, fue determinante para las contribución en receptores, su frecuencia durante del tiempo de modelado fue NEE.

Tabla 1. Coordenadas y altitud de Receptores.

Estaciones	Latitud	Longitud	msnm	Distancia a zonas central de almacenamiento (km)
Casitas (CAS)	10.950582°	-72.741216°	162	22.19
Provincial (PRO)	11.022399°	-72.741886°	156	16.20
Patilla (PAT)	11.050459°	-72.671383°	115.1	8.80
Hatonuevo (HAT)	11.070833°	-72.757778°	198	14.72
Vivienda (VIV)	11.152041°	-72.605677°	96.4	4.57
Sol (SOL)	11.142642°	-72.514431	117.6	13.08

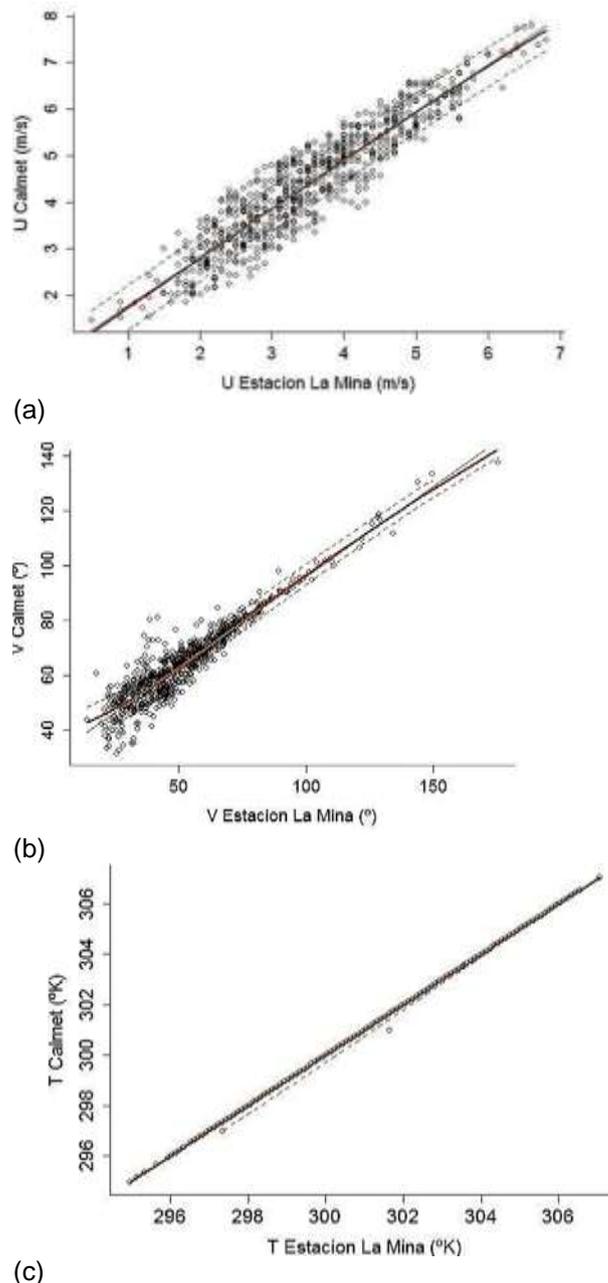


Fig. 2. Modelos de regresión de variables meteorológicas para la calibración del modelo Calmet: (a) Velocidad del Viento ( $y=1.03x +0.76$ ,  $R^2=0.93$ ); (b) Dirección del Viento ( $y=0.66x +30.19$ ,  $R^2=0.95$ ); (c) Temperatura Ambiente ( $y=1.00x -0.04$ ,  $R^2=0.99$ )

Los resultados de las simulaciones son consistentes en estudios realizados previamente en la zona. Huertas et al. (2012) encontró que el promedio de contribución de emisiones de PM<sub>10</sub> debido al área de almacenamiento de carbón en 7 minas a cielo abierto en el Norte de Colombia está representado en un 11% de las emisiones totales para una producción anual de 33 Mton. Sus estudios revelaron que los

botaderos y los pits son las principales áreas fuentes de emisiones de PM<sub>10</sub> con un contribución de 60% y 16%, respectivamente, debido a las actividades de transporte y descargas de material que se realizan ellas. La Tabla 2, muestra aportes promedios diarios a las concentraciones ambientales cercanos a 6.01 µg/m<sup>3</sup> para Provincial, estación viento abajo, con variabilidad de datos de 53.49%. La Figura 4 muestra las concentraciones ambientales registradas durante 10 días en receptores y las contribuciones debido a las actividades y almacenamiento de Carbón producto de la modelación.

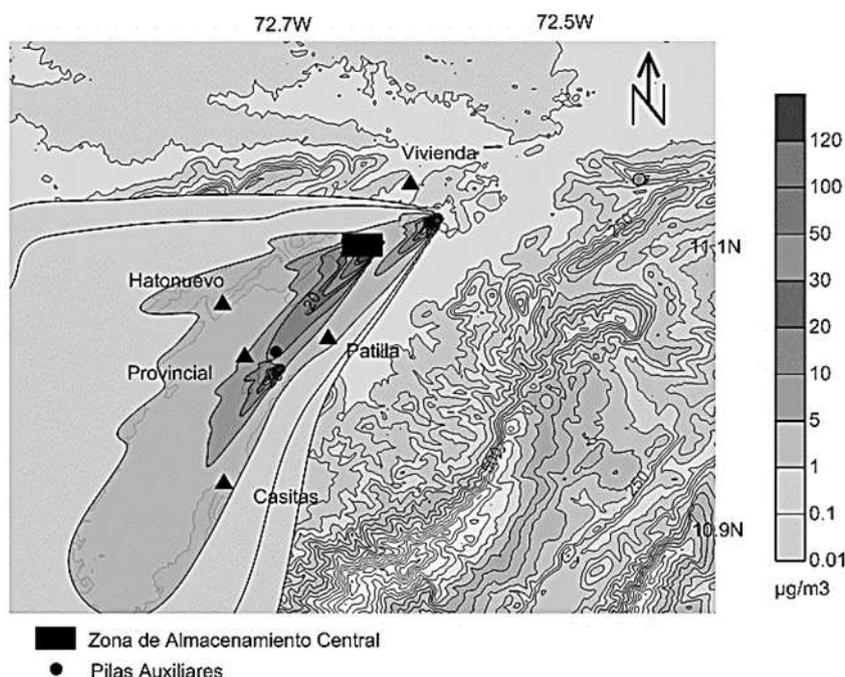


Fig. 3. Contribuciones Promedio diarias PM<sub>10</sub> para cada receptor

Tabla 2. Aportes PM<sub>10</sub> en Receptores

	Aportes (ug/m3)	Min. (ug/m3)	Max. (ug/m3)	Desv. (ug/m3)	CV %	Aportes %
Casitas	1.52	0.17	5.16	1.45	95.03	4.04
Provincial	6.01	2.31	11.70	3.21	53.49	14.50
Patilla	1.52	0.19	4.34	1.52	99.55	4.68
Hatonuevo	1.93	0.93	4.03	1.00	51.76	3.96
Vivienda	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

La variabilidad en el aporte recibido en la estación Provincial esta influencia en gran medida por su cercanía a las 2 pilas auxiliares en la zona sur ubicadas aproximadamente 4.58 km que abarca un área de 0.14 km<sup>2</sup>. Las condiciones meteorológicas tienen un efecto directo en el aporte de PM<sub>10</sub> sobre este receptor. El 39.9% de la frecuencia total de la dirección del viento fue 53 grados con velocidad entre 3.6 - 5.7 m/s que generan condiciones de receptividad en zonas cercanas a las pilas auxiliares. Por otra parte, La estación Hatonuevo registro vientos variables con máximos alcanzados de 7.58 m/s lo que permitió la dispersión de las partículas en el área.

Las contribuciones de PM<sub>10</sub> a la concentraciones ambiental son normalmente más bajo después de 0700 LST. Los mayores aportes se registran durante 1800 -0600 LST debido a la compleja interacción de la meteorología subyacente. No todas las horas experimentaron erosión eólica. Las mayores emisiones eólicas se presentaron durante el día cuando la velocidad del viento registrada a una altura de 10 metros sobre el suelo era superior a 6.0 m/s. Los mayores valores de velocidad del viento y de energía solar se alcanzarán aproximadamente durante el mediodía hora local proporcionando valores superiores al umbral de fricción en la superficie de la pila de carbón y aunque se emite más por las perturbaciones, la dispersión es bastante significativa. Las actividades de remanejo, cargue y acarreo realizadas en horas nocturnas, asociadas a valores de vientos inferiores a 2.38 m/s, aportan significativamente a los receptores debido a la acumulación de contaminantes y probabilidades de poca dispersión.

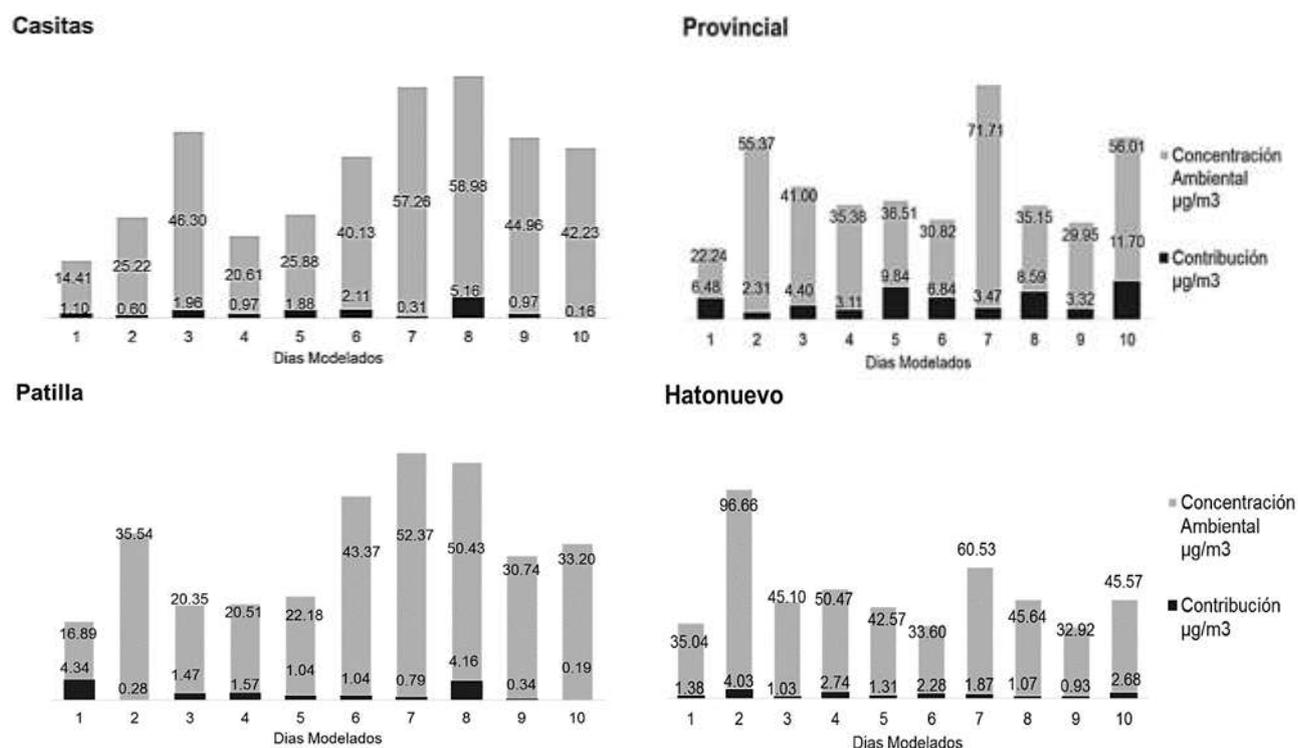


Fig.4. Contribución por actividades y almacenamiento en pilas de Carbón (µg/m<sup>3</sup>)

La actividad realizada en las pilas de almacenamiento influye directamente en las emisiones y por lo tanto en las contribuciones en los receptores. Se alcanzaron los mayores valores de deposiciones secas en cercanía al almacenamiento central de las pilas de carbón de aproximadamente 0.31 µg/m<sup>2</sup>/s. Se estima que para las operaciones de manejo de carbón para periodos promedio de 24 horas las actividades de acarreo sobre la superficie de las pilas, descargue y las operaciones con bulldozer aumentarían significativamente las concentraciones ambientales de PM<sub>10</sub> en un radio de 350 metros hasta un 300% (CDM, 2014). Por otra parte, el receptor que presentó mayor deposición de PM<sub>10</sub> por efecto de la gravedad fue provincial con una media de 1.49 × 10<sup>-3</sup> µg/m<sup>2</sup>/s (Tabla 3, Figura 5). Las mayores concentraciones ambientales se registraron en la estación Provincial, es de esperar que la altas probabilidades de deposición a nivel del suelo por difusión Browniano sea mayor debido a interceptaciones entre partículas en el ambiente, fuerza de inercia ejercida y la sedimentación generando adhesiones entre partículas (Zufall et al., 1998).

Tabla 3. Deposición seca PM<sub>10</sub> en Receptores

	Deposición Seca (ug/m <sup>2</sup> /s)	Min. (ug/m <sup>2</sup> /s)	Max. (ug/m <sup>2</sup> /s)	Desv. (ug/m <sup>2</sup> /s)	CV %
Casitas	3.07 × 10 <sup>-4</sup>	5.98 × 10 <sup>-5</sup>	6.97 × 10 <sup>-4</sup>	1.96 × 10 <sup>-4</sup>	64.02
Provincial	1.49 × 10 <sup>-3</sup>	7.07 × 10 <sup>-4</sup>	2.90 × 10 <sup>-3</sup>	7.71 × 10 <sup>-4</sup>	51.66
Patilla	3.07 × 10 <sup>-4</sup>	7.06 × 10 <sup>-5</sup>	1.69 × 10 <sup>-3</sup>	4.96 × 10 <sup>-4</sup>	161.54
Hatonuevo	5.56 × 10 <sup>-4</sup>	1.00 × 10 <sup>-4</sup>	1.58 × 10 <sup>-3</sup>	5.37 × 10 <sup>-4</sup>	96.56
Vivienda	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Se analizó el plan de estabilidad Pasquill-Gifford-Turner (PGT), se evidencio condiciones inestables de la atmosfera durante el día específicamente en horas de la mañana, su estabilidad está asociada con la calefacción a nivel del suelo, bastante considerable en zona minera, que genera turbulencia térmica dentro de la capa límite y mayor dispersión de las partículas en el ambiente. Durante las horas nocturnas se presentaban fluctuaciones entre condiciones neutras y estables, estas estabildades en horas nocturnas están relacionadas con enfriamiento que resulta en la supresión de los niveles de turbulencia y la inversión de la temperatura a niveles más bajos, favoreciéndose por la presencias de nubes registrado durante la noche Las fuertes estabildades durante la noche y niveles inferiores en la velocidad de viento crean condiciones favorables para la acumulación de contaminantes (Amnuaylojaroen et al., 2012). La Altura de mezcla será mucho más bajo en condiciones estables, es decir, en las noches claras con bajas velocidades de viento y fuertes insolaciones durante el día (Authority V., 2005). En horas nocturnas se presentaron alturas de mezclado estuvieron que promediaron 500 m, mientras que, en horas del día se alcanzaron en promedio 1500 m.

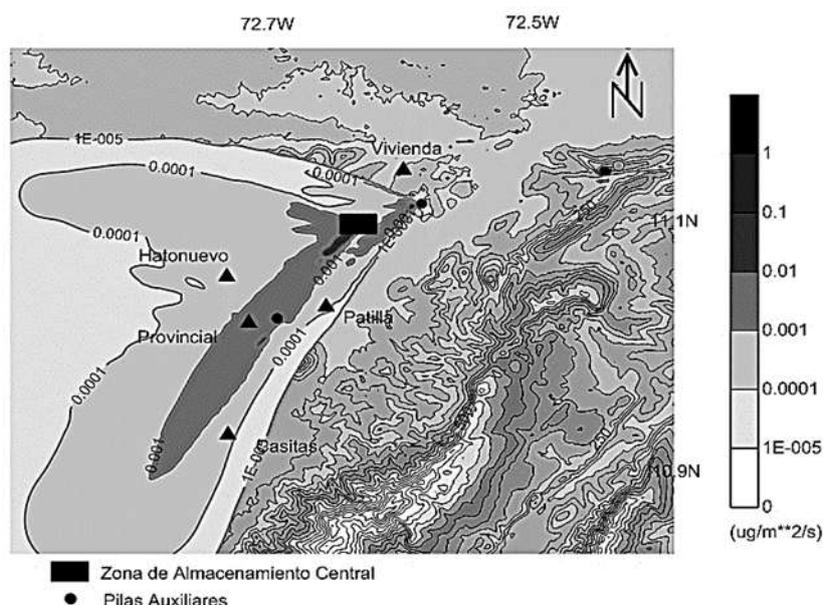


Fig. 5. Deposición seca 24 horas promedios

## CONCLUSIONES

El Calpuff representa una buena herramienta de simulación y estimación de los niveles ambientales por actividades mineras. Se determinó que las contribuciones de PM<sub>10</sub> a las concentraciones ambientales diarias por almacenamiento de carbón industrial son bastante significativas y está relacionadas con las condiciones meteorológicas, formas de las pilas y complejidad del terreno. Aunque las emisiones son menores en horas nocturnas, se encontró que las mayores contribuciones en receptores se presentan en horas de las noches por la disminución de la altura de mezcla, menores velocidades de vientos y estabilidad atmosférica asociadas a la zona. Las emisiones aumentan en gran medida con la variabilidad de la velocidad del viento y turbulencia sensibles a las dimensiones y orientaciones de las pilas de almacenamiento. El aporte significativo en las concentraciones ambientales puede estar representado en un 14.50% de las concentraciones diarias en receptores viento abajo. Simulación confiable permite una mayor gestión en la línea ambiental accediendo a contemplar la posibilidad de cambios e identificación de zonas de almacenamiento y mayor control en las actividades de emisión.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS - CERREJON, proyecto código 1115-524-30465, a la Universidad de Antioquia y a la Universidad de La Guajira por el apoyo para el desarrollo de este trabajo.

## REFERENCIAS

Amnuaylojaroen, T., y J. Kreasuwun, *Investigation of fine and coarse particulate matter from burning areas in Chiang Mai, Thailand using the WRF/CALPUFF*. Chiang Mai J. Sci., 39(2), 311-326 (2012)

Aneja V., A. Isherwood, y P. Morgan, *Characterization of particulate matter (PM<sub>10</sub>) related to surface coal mining operations in Appalachia*. Atmos. Environ, 54, 496-501 (2012)

VPA, Vancouver Port Authority, Environmental Assessment Application for the Deltaport Third Berth Project, Vancouver, BC Canada, (2005)

Chakraborty M.K., M. Ahmad, R.S. Singh, D. Pal, C. Bandopadhyay y S.K. Chaulya. *Determination of the emission rate from various opencast mining operations*. Environmental Modelling & Software: 17 467-480 (2002)

CDM Smith, *City of Chicago Fugitive Dust Study*. CDM Smith Inc., Available online: [http://www.cityofchicago.org/content/dam/city/depts/cdph/environmental\\_health\\_and\\_food/PetCoke\\_Public\\_Comments/102512DustReport031314.pdf](http://www.cityofchicago.org/content/dam/city/depts/cdph/environmental_health_and_food/PetCoke_Public_Comments/102512DustReport031314.pdf). Acceso 27 de febrero (2015)

- Cong, X. C., S. L. Yang, S. Q. Cao, Z. L. Chen, M. X. Dai y S. T. Peng, *Effect of aggregate stockpile configuration and layout on dust emissions in an open yard*. Applied Mathematical Modeling: 36(11), 5482-5491 (2012)
- Dostal, M., A. Pastorkova, S. Rychlik, E. Rychlikova, V. Svecova, E. Schallerova, y R.J. SRAM, *Comparison of child morbidity in regions of Ostrava, Czech Republic, with different degrees of pollution: a retrospective cohort study*. Environmental Health: 12, 2-11, (2013)
- EPA. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors - Volume I: Stationary Point and Area Sources. AP-42 Fifth Edition*, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC. (<http://www.epa.gov/ttn/ chief/ap42>), (1995)
- Fox, T. *Memorandum: Clarification on EPA-FLM Recommended Settings for CALMET*. August, 31, (2009). Acceso 4 de marzo (2015)
- Huertas, J. I., D. A. Camacho, y M. E. Huertas, *Standardized emissions inventory methodology for open-pit mining areas*. Environmental Science and Pollution Research: 19(7), 2784-2794 (2012)
- Laurent, B., B. Marticorena, G. Bergametti, I. Tegen, K. Schepanski, y B. Heinold, *Modelling mineral dust emissions*. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 7(1), 1-10 (2009)
- Mardones, C., Saavedra, A., & Jiménez, J., *Cuantificación económica de los beneficios en salud asociados a la reducción de la contaminación por MP10 en Concepción Metropolitana, Chile*. Revista médica de Chile, 143(4), 475-483 (2015).
- Mueller, S. F., J. W. Mallard, Q. Mao, y S.L. Shaw, *Variability of Natural Dust Erosion from a Coal Pile*. Journal of Applied Meteorology and Climatology: 54(1), 3-14 (2015)
- Mueller, S. F., J. W. Mallard, Q. Mao, y S.L. Shaw, *Emission factors for fugitive dust from bulldozers working on a coal pile*. Journal of the Air & Waste Management Association: 65(1), 27-40 (2015)
- Muránszky, G.; M. Óvári, M.; I. Virág, P. Csiba, R. Dobai, Z. Gyula, *Chemical characterization of PM<sub>10</sub> fractions of urban aerosol*. Microchemical Journal: 98, 1-10 (2011)
- Nosek S. Z., Janour, L. Kukacka, K. Jurcakova, R. Kellnerova y E.Gulikova. *Impact of Open-cut Coal Mine Terrain Complexity on Atmospheric Dispersion*. International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena EnFlo Laboratory, University of Surrey, UK, 16th – 18th September (2013)
- Pope, C.; D. Dockery, *Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect*. Journal of the Air & Waste Management Association: 56, 1368-1380 (2006)
- Rodríguez J.L., L.C. Angulo, G.M. Restrepo, R. Rojano. *Evaluation of the models CALMET and CALPUFF in two sites topographically different in the coal mining zone of department of Cesar, Colombia*, ProScience: 1, 94-99 (2014)
- Scire, J. S., D. G. Strimaitis, y R. J. Yamartino, *A user's guide for the CALPUFF dispersion model*. Earth Tech, Inc, 521, 1-521(2000)
- Song, C. F., L. Peng, J.J. Cao, L. Mu, H.L. Bai, y X.F. Liu, *Numerical Simulation of Airflow Structure and Dust Emissions behind Porous Fences Used to Shelter Open Storage Piles*. Aerosol and Air Quality Research: 14(6), 1584-1592 (2014)
- Tachikawa, T., M. Kaku, A. Iwasaki, D. Gesch, M.Oimoen, Z. Zhang, y C.Carabajal, *ASTER Global Digital Elevation Model Version 2-Summary of Validation Results*. ASTER GDEM Validation Team ([http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary\\_GDEM2\\_validation\\_report\\_final.pdf](http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf)), Acceso 12 de enero (2015)
- Torano, J. A., R. Rodriguez, I. Diego, J.M. Rivas, y A. Pelegry, *Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation*. Applied Mathematical Modelling: 31(11), 2487-2502 (2007)
- TRC, Environmental Corporation (2011), *Generic Guidance and Optimum Model Settings for the CALPUFF Modeling System for Inclusion into the Approved Methods for the Modeling and Assessments of Air Pollutants in NSW, Australia*, <http://www.epa.nsw.gov.au/resources/air/CALPUFFModelGuidance.pdf>, Acceso: 23 marzo (2015)

U.S. EPA, Clarification of regulatory status of CALPUFF for near-field applications. U.S.Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, (2008)

Xuan, J., y A Robins, *The effects of turbulence and complex terrain on dust emissions and depositions from coal stockpiles*. Atmospheric Environment: 28(11), 1951-1960 (1994)

Zufall, M. J., C.I. Davidson, P.F. Caffrey, y J.M. Ondov, *Airborne concentrations and dry deposition fluxes of particulate species to surrogate surfaces deployed in southern Lake Michigan*. Environmental science & technology: 32(11), 1623-1628 (1998)