



Boletín de Ciencias de la Tierra

ISSN: 0120-3630

Universidad Nacional de Colombia

Bustamante-Rúa, Moisés Oswaldo; Daza-Aragón, Alan José; Bustamante-Baena, Pablo  
Simulación en el software VENTSIM™ de la influencia de la implementación de  
sellamientos en labores abandonadas en la ventilación de una mina subterránea de carbón  
Boletín de Ciencias de la Tierra, núm. 43, 2018, Enero-Junio, pp. 5-13  
Universidad Nacional de Colombia

DOI: <https://doi.org/10.15446/rbct.n43.56128>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169555640001>

- [Cómo citar el artículo](#)
- [Número completo](#)
- [Más información del artículo](#)
- [Página de la revista en redalyc.org](#)

UNAM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc  
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso  
abierto

# Simulation software VENTSIM™ the influence of implementation of work abandoned sealings ventilation of an underground coal mine

Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa, Alan José Daza-Aragón & Pablo Bustamante-Baena

*Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. mobustam@unal.edu.co, ajdazaa@unal.edu.co, pabustamanteba@unal.edu.co*

Received: March 09<sup>th</sup>, 2016. Received in revised form: July 11<sup>th</sup>, 2017. Accepted: August 25<sup>th</sup>, 2017.

## Abstract

It is common to find that in some mines in the coalfield of Sinifaná not exercise proper control over sealings and therefore the air can make tours of areas that do not require to be ventilated at the mine. This has a major negative impact, since often the air does not reach to operating fronts of the adequately form and makes it impossible for people can have appropriate working conditions; on the other hand it generated highly relevant economic losses related to the air injection to abandoned works. With the present study is pretend to assess how is the influence of the sealings in the behavior of the mine, in the equivalent resistance and the flows to the work fronts, this in order to establish in the case of the mine selected, which sealings can be implemented and thus optimize ventilation in the mine.

**Keywords:** Sealings; coal; mine ventilation; underground mine; VENTSIM™.

# Simulación en el software VENTSIM™ de la influencia de la implementación de sellamientos en labores abandonadas en la ventilación de una mina subterránea de carbón

## Resumen

Es común encontrar que en algunas unidades mineras de la cuenca carbonífera de Sinifaná, no ejercen el debido control sobre lo sellamientos y, por tanto, permiten que el aire realice recorridos por zonas que no requieren ser ventiladas en la mina. Esto tiene un gran impacto negativo, ya que muchas veces el aire no llega de forma adecuada a los frentes de explotación e imposibilita que las personas tengan condiciones idóneas de trabajo. Por otro lado, se generan pérdidas económicas de gran relevancia, relacionadas con la inyección de aire a labores abandonadas. Con el presente estudio, se pretende evaluar cómo influyen los sellamientos en el comportamiento de la mina, tanto en la resistencia equivalente como en los caudales que llegan a los frentes de trabajo, esto con el fin de establecer en el caso particular de la unidad minera seleccionada, que sellamientos pueden ser implementados y de esta forma optimizar la ventilación en la mina. En este caso se encontró que, utilizando pared de lona y puerta agujereada, el caudal llega a 0,2 m<sup>3</sup>/seg a los frentes de trabajo, y cuando se utiliza buen sello, buena puerta y sello pobre, el caudal que llega a los frentes es 0,3 m<sup>3</sup>/seg.

**Palabras clave:** Sellamientos; carbón; ventilación de minas; minas subterráneas; VENTSIM™.

## 1. Introducción

La ventilación en minería subterránea es un tema de gran importancia a la hora de garantizar la seguridad y excelentes condiciones en los sitios de trabajo [1]. Por tal razón, el Estado Colombiano en los últimos años ha realizado campañas con el fin de mejorar esta condición. Asimismo, la Gobernación de

Antioquia ha impulsado múltiples proyectos en pro de generar condiciones idóneas de trabajo, dentro de las cuales ha acobijado minas que hacen parte de la cuenca de Sinifaná, ubicadas en el suroeste antioqueño. El principal objetivo de este tipo de proyectos es buscar el mayor acercamiento de las unidades mineras al cumplimiento de las normas debidamente establecidas. La Gobernación de Antioquia y la Universidad

**How to cite:** Bustamante-Rúa, M.O., Daza-Aragón, A.J. and Bustamante-Baena, P., Simulación en el software VENTSIM™ de la influencia de la implementación de sellamientos en labores abandonadas en la ventilación de una mina subterránea de carbón. Boletín de Ciencias de la Tierra, 43, pp. 5-13, Enero, 2018.

Nacional de Colombia desde el año 2013 a través del proyecto “Mejoramiento de la seguridad minera en 5 minas de carbón de la cuenca de Sinifaná” han trabajado en conjunto en busca de lograr este objetivo. Actualmente, el decreto 1886 de 2015 [2] es el reglamento de seguridad que se tiene como punto de referencia para labores mineras subterráneas. Este expresa de forma detallada cada uno de los aspectos que se deben cumplir a cabalidad para desarrollar este tipo de actividades. En este sentido, la ventilación de minas es indispensable, ya que se encarga de llevar el aire suficiente a los trabajadores que se encuentran desarrollando labores subterráneas[3], la dilución de gases y la regulación de la temperatura[4]. Es primordial que toda mina cuente con un circuito de ventilación definido, puesto que de esta manera se asegura la demanda de aire requerida en zonas donde sea necesario[5]. Cuando se abandonan labores de preparación, desarrollo y explotación, la normatividad exige la implementación de sellamientos (*puertas de ventilación: estructura de madera, plástico, caucho, metal o cualquier otro material para frenar o regular el paso de aire a través de una labor minera subterránea*)[2]. Con esto se evita que existan pérdidas de presión y que el aire se dirija a lugares de la mina que no requieren ser ventilados [6].

Es importante resaltar que existe ventilación natural y ventilación mecanizada, en la cual se hace necesario el uso de ventiladores. La ventilación natural es muy cambiante, puesto que depende de la época del año, e incluso en algunos casos, de la noche y el día[1]. Para que esta funcione debe existir una diferencia de alturas entre la bocamina y el bocaviento, pero más importante aún, es el intercambio termodinámico que se produce entre la superficie y el interior[7]. La energía térmica agregada al sistema se transforma a energía de presión, susceptible de producir un flujo de aire (*el aire caliente desplaza al aire frío produciendo circulación*)[8,9].

La ventilación principal es la ventilación que recorre toda la mina, mientras que la ventilación secundaria a la cual se le denomina también ventilación auxiliar, es aquella que se realiza en áreas restringidas o labores en desarrollo de una mina subterránea. Esta va dirigida a los frentes ciegos que no pueden ser incorporados de forma directa a la red de ventilación principal de la mina [10,11].

El software VENTSIM™ a nivel mundial, es una herramienta útil para simulación de contaminantes, funciones financieras que sirven para analizar el costo de ventilación y la simulación termodinámica de calor y la humedad en las minas subterráneas, cuantificando y visualizando variables como dirección, cantidad, densidad, flujo másico y velocidad [10].

## 2. Materiales y método

### 2.1. Materiales

#### 2.1.1. Mina objeto de estudio

Se estudió una mina de carbón perteneciente a la cuenca carbonífera del Sinifaná. La unidad minera cuenta con la infraestructura necesaria para adelantar la extracción de 2000

ton/mes carbón; dentro de sus instalaciones cuenta con oficinas de administración, vestier, baños, almacén, tolvas de almacenamiento de mineral, zona de cargue, tanques de sedimentación, cuarto de compresor, subestación de energía, sistema de conminación, transporte y clasificación. Se accede a los diferentes trabajos mineros por medio de la bocamina que se encuentra a una altura de 1526 msnm. Esta ha formado parte de los proyectos: “Mejoramiento de las condiciones de productividad en las explotaciones mineras ubicadas en la cuenca del Sinifaná en los municipios de Amagá, Angelópolis, Fredonia, Titiribí y Venecia”, que se ejecutó a partir de septiembre de 2013 hasta el mes de marzo de 2015 por la Gobernación de Antioquia – Secretaria de Minas y la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente la mina forma parte del proyecto que tiene por objeto: “Aunar esfuerzos para el desarrollo y socialización de planes de mejoramiento demostrativos en explotaciones carboníferas de la Cuenca del Sinifaná” que se viene ejecutando a la fecha por las dos entidades que se mencionaron anteriormente.

De acuerdo a los compromisos de confidencialidad del proyecto, se reserva el nombre de la mina a la que se le aplicó el estudio.

#### 2.1.2. Software Ventsim™

Ventsim™ es un software para sistemas de ventilación de minas subterráneas diseñado para modelar y simular la ventilación, flujos de aire, presión, calor, gases, finanzas, fuego y muchos otros tipos de datos de ventilación desde un modelo de túneles y pozos [5,12].

Las características principales de Ventsim™ Visual, incluyen: Modelamiento 3D completo con rotación suave, zoom y paneo; animación en tiempo real de los conductos de ventilación y ventiladores; simulación de conductos de ventilación y ventiladores; propagación básica de contaminantes básicos, suministros y simulaciones de emergencia; importación de las líneas centrales y sólidos de paquetes CAD (DFX) para construcción rápida de redes Ventsim™ [5,12].

## 2.2. Método

Para evaluar el efecto de la pérdida de presión, caudal y cambios de temperatura en la mina, se utilizó el software Ventsim™, el cual tiene fundamentos de termodinámica y mecánica de fluidos aplicados a la ventilación de minas. De esta manera, se busca a partir de diferentes simulaciones determinar cómo es el comportamiento de la mina y bajo qué condiciones se aprovecha mejor la ventilación, evitando pérdidas de aire, las cuales se ven reflejadas a su vez en pérdidas económicas [5,12,13].

En este estudio se tomará una de las cinco unidades mineras que hacen parte del proyecto Sinifaná, con el fin de analizar como es el comportamiento de la ventilación de acuerdo a ciertas condiciones específicas que presente la mina, como lo son la implementación y la calidad de los sellamientos.

Inicialmente, se realiza la recolección de datos en la mina para su debida caracterización. Estos datos son:

- Medición de área y perímetro del túnel: ubicado el punto de aforo se procede con el flexómetro a medir el área transversal y el perímetro, teniendo claro la forma del área (rectangular, cuadrada, trapezoidal, etc.).
- Medición de los gases: para la medición de los gases se utiliza el multidetector marca Crowcon; con este equipo se hace un barrido de abajo hacia arriba y de derecha a izquierda del aforo visualizando el display o pantalla que este tiene, de esta manera se puede medir los gases ( $O_2$  % Vol., CO PPM,  $CH_4$  % LEL, entre otros) presentes en este punto.
- Medición de la velocidad del aire: el termohigroanemómetro se compone de dos partes: una es el display donde se observa la lectura en tiempo real y la otra parte son unos álabes las cuales son giradas a medida que el aire pasa a través de ellas; para medir la velocidad del aire los alabes son colocados perpendicularmente al flujo del aire, en donde se hace un barrido lento en zigzag de abajo hacia arriba, y de esta manera se puede obtener la velocidad del aire en el punto de aforo.
- Medición de la temperatura efectiva y porcentaje de humedad: con el equipo antes mencionado (termohigroanemómetro) y visualizando el display, se pueden tomar los datos que este arroja como las medidas de temperatura y porcentaje de humedad en ese punto de aforo, cabe señalar que las unidades de la temperatura efectiva son  $^{\circ}C$ .
- Tratamiento de datos: Con los datos medidos en campo se procede a determinar los diferentes caudales de aire en cada uno de los puntos de aforo, para lo cual se requiere el cálculo del área de cada una de las secciones de aforo que de acuerdo con la forma del túnel se asimilan a un trapecio o también a un rectángulo [14].

Luego de realizar la correcta caracterización de la mina, se procede a llevar esta información al software Ventsim™ para ejecutar las debidas simulaciones. En este caso, se busca conocer la influencia de poner o no sellamientos en la unidad minera, al igual que la calidad de estos, ya que así se logra determinar el impacto que se tiene en la mina en cuanto a las pérdidas de aire y las recirculaciones. También es necesario evaluar la eficiencia de los sellamientos, puesto que de acuerdo a su calidad pueden impedir en mayor o menor medida las filtraciones, y se tiene un mejor control del direccionamiento del aire [15].

Básicamente, se analizarán dos escenarios con las diferentes simulaciones: El primero tiene que ver con la distribución de aire en la mina sin sellamientos [13], y en el segundo se analiza como es el comportamiento de la ventilación con la implementación de tapones de alta y baja calidad. Esto teniendo como base algunas hipótesis que se plantearon para la realización del estudio.

### 2.2.1. Hipótesis

- Una mina sin sellamiento hace que el aire recorra lugares que no necesitan ser ventilados y por tanto hace más

difícil que este pueda llegar a los frentes de trabajos donde se encuentra la mayor parte del personal, lo cual se debe a las caídas de presión que se desarrollan por los largos recorridos. Esto incide en pérdidas económicas de gran relevancia para la unidad minera, debido a que se puede incurrir en gastos energéticos excesivos en búsqueda de lograr caudales de aire adecuados en los frentes de trabajo según el decreto 1886 de 2015. En la mayoría de los casos, el aire no alcanza a llegar a estas zonas de forma suficiente, lo que impide el cumplimiento del decreto que exige en el título II capítulo 1 artículo 54 (Excavaciones minerales hasta mil quinientos metros (1500) sobre el nivel del mar: tres metros cúbicos por minuto ( $3 \text{ m}^3/\text{min}$ ) por cada trabajador, mientras que en excavaciones minerales superiores a esta altura: seis metros cúbicos por minuto ( $6 \text{ m}^3/\text{min}$ ) por cada trabajador).

- Una mina sin sellamientos, no podría tener un circuito de ventilación definido, debido a que el aire no tendría un camino específico para seguir y por tanto, puede ir a zonas donde no se requiere, facilitando a su vez la recirculación de aire viciado [15]. Esta es una condición de alta peligrosidad para el personal de trabajo de la mina, lo cuales podrían contaminarse por la presencia de gases nocivos.
- Al presentar la unidad minera los debidos sellamientos en los trabajos abandonados, se podría definir el circuito de ventilación para llevar el aire a los frentes de trabajo, y luego direccionarlo al bocaviento, de tal manera que no se mezcle con el aire limpio en su recorrido. Además, se alcanzarían los caudales necesarios para el correcto desenvolvimiento de los trabajadores según lo contemplado en el decreto 1886 de 2015, evitándose las pérdidas de aire y por ende las pérdidas económicas.
- Con buenos sellamientos no se desarrollan pérdidas de aire, mientras que con sellamientos de baja calidad se logran pérdidas mínimas, por lo que se reduce de manera significativa el paso de aire. Se asume que el software Ventsim™ a través de las diferentes simulaciones es capaz de visualizar la condición anteriormente mencionada [5]. Por lo que se pretende evaluar la veracidad de esta hipótesis.

## 3. Resultados y discusión

Se tiene que el caudal que ingresa a la mina desde la bocamina es de  $0,5 \text{ m}^3/\text{seg}$ ; y el caudal óptimo que debería llegar al frente de trabajo considerando mínimas pérdidas es de  $0,3 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Esto teniendo en cuenta exclusivamente la ventilación natural, ya que se pretende analizar como es el comportamiento de la mina con la implementación de sellamientos y sin el uso de ventilación mecanizada.

El circuito que se busca establecer en la mina es que el aire ingrese desde la bocamina, y se dirija directamente al nivel 6 y llegue hasta el último tambor, luego que pase al nivel 5 y haga el recorrido completo por este nivel hasta llegar a la clavada principal por donde sube el aire hasta superficie, saliendo por el bocaviento (ver Figs,1, 2 y 3).

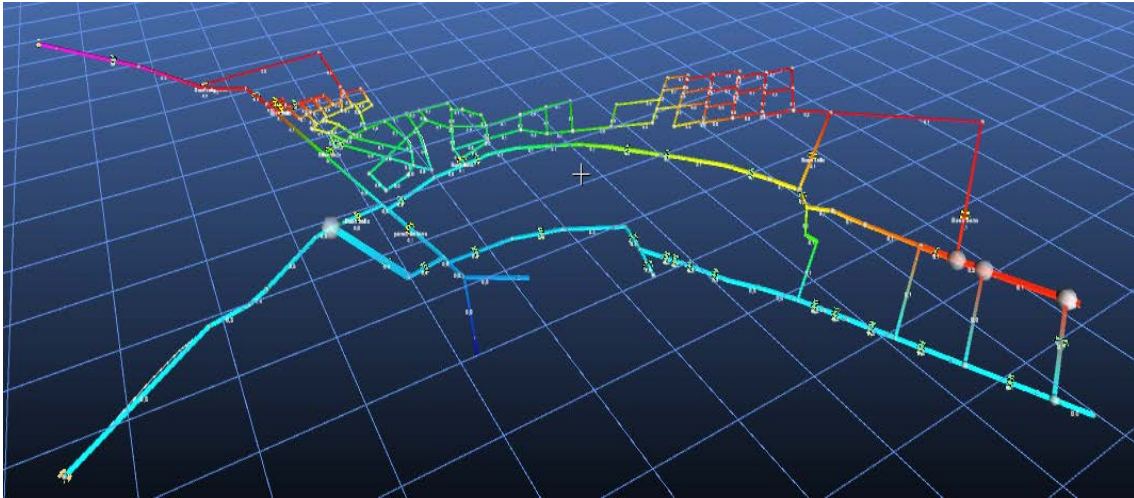


Figura 1. Mina objeto de estudio en el software Ventsim™  
Fuente: Los autores

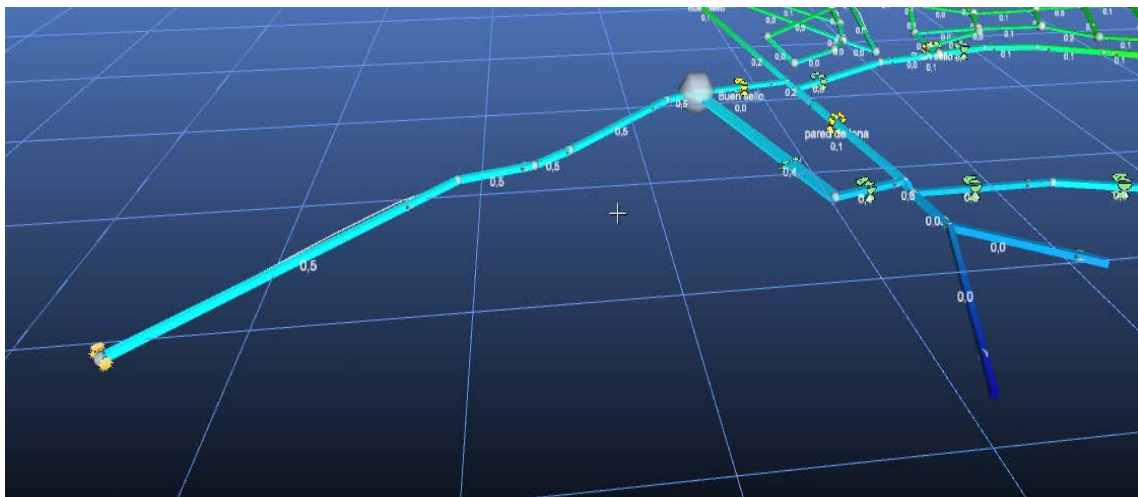


Figura 2. Bocamina de la mina objeto de estudio en el software Ventsim™  
Fuente: Los autores

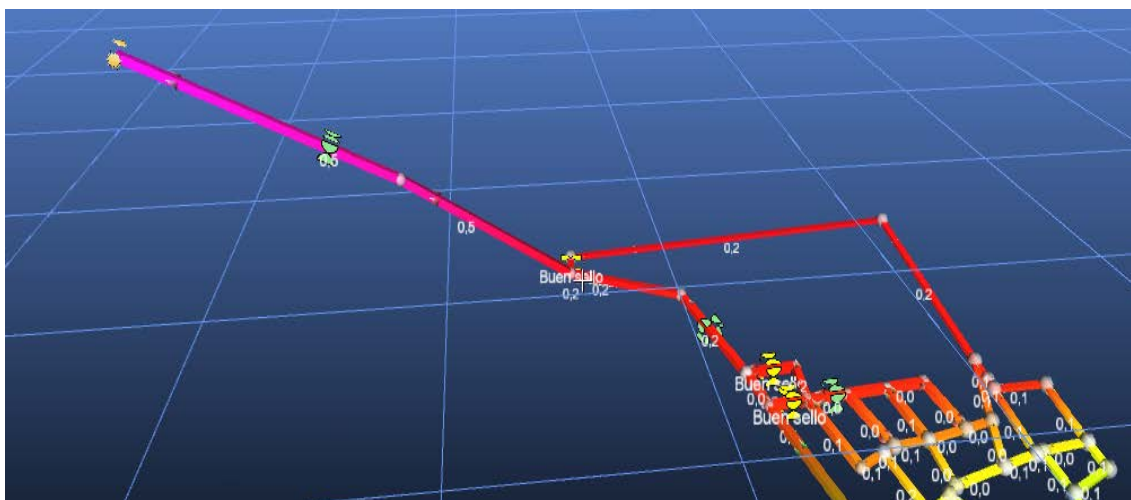


Figura 3. Bocaviento de la mina objeto de estudio en el software Ventsim™  
Fuente: Los autores

También con la implementación de diferentes sellamientos se puede analizar su influencia con la curva característica de la mina, ya que esta se relaciona directamente con la resistencia equivalente, y cada sellamiento de acuerdo a su calidad aporta a esta resistencia. Los sellamientos considerados en el estudio con la resistencia que aportan cada uno, se presentan a continuación (ver Tabla 1).

Tabla 1.  
Tipos de sellamientos.

Tipo de sellamiento	Resistencia ( $\text{Ns}^2/\text{m}^8$ )
Buen sello	250
Pared de lona	2,5
Buena puerta	20
Puerta agujereada	5
Sello pobre	50

Fuente: Los autores

Tabla 2.

Caudal en los frentes sin sellamientos.

	Caudal sellamiento ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )	sin	Caudal Buen Sello ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )	Caudal pared de lona ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )	Caudal buena puerta ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )	Puerta agujereada ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )	Sello pobre ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )
Frente-1	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
Frentes-2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
Resistencia de la mina ( $\text{Ns}^2/\text{m}^8$ )	63,4	62,42	63,41	64,42	63,41	63,42	63,42

Fuente: Los autores

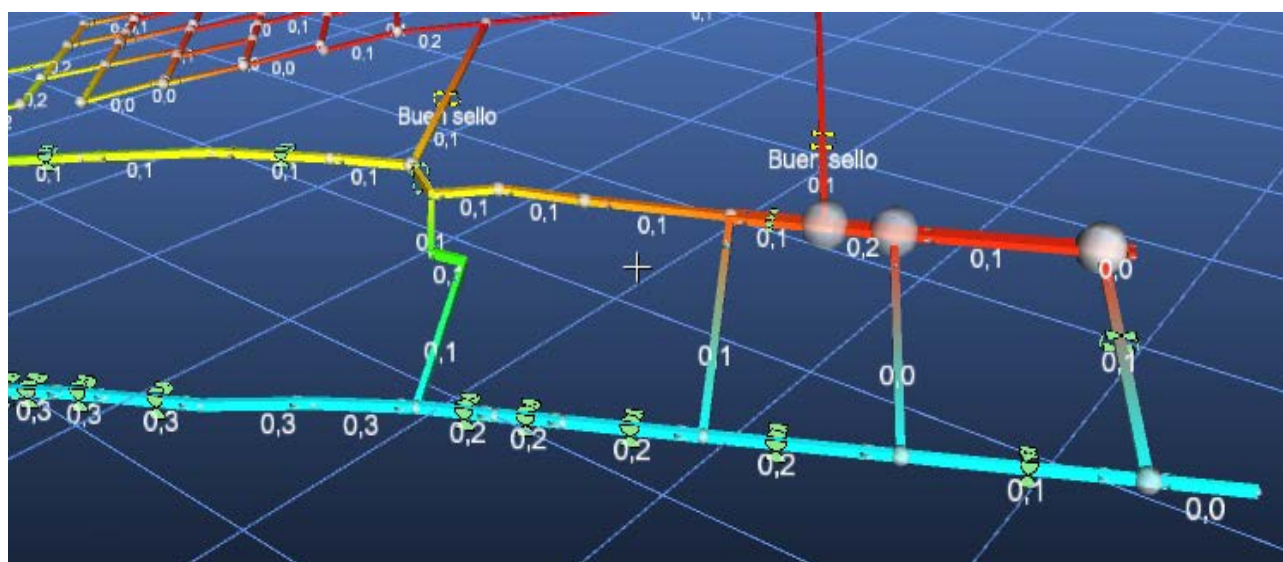


Figura 4. Caudal en los frentes, cuando no hay sellamientos en los tambores del nivel 6.

Fuente: Los autores

Los resultados que se obtuvieron en la mina a partir de la evaluación de los diferentes sellamientos y su comportamiento sin estos, se presentan en la Tabla 2.

A continuación, se ilustrarán los caudales de la mina en los frentes con su respectiva curva característica considerando las condiciones sin sellamiento, buen sello, pared de lona, buena puerta, puerta agujereada y sello pobre (ver Figs. 4 a 9).

De lo anterior, se puede evidenciar que en 4 escenarios se obtiene el caudal óptimo en los frentes de trabajo, y esto se logra con la implementación de buen sello, buena puerta, puerta agujereada y sello pobre. Esto quiere decir que independientemente del sello que se seleccione de los anteriormente mencionados, se va a garantizar el mismo

caudal en los frentes de explotación. Adicionalmente, se puede observar que en los diferentes escenarios, ya sea que la mina se encuentre sin sellamientos o presente cualquiera de los anteriores, esta no sufre un aumento representativo de la resistencia equivalente. Por lo cual, se obtiene que con la implementación de los sellamientos, el aire puede seguir circulando en el interior de la mina y se logra una mejor distribución del mismo, direccionándolo a las zonas que deben ser ventiladas. En este caso, con la implementación de buenos sellos en los tambores que ya han sido explotados del nivel 6, el aire logra pasar en su totalidad hasta el último tambor de este nivel, donde se conecta al nivel 5, ventilando también este frente.

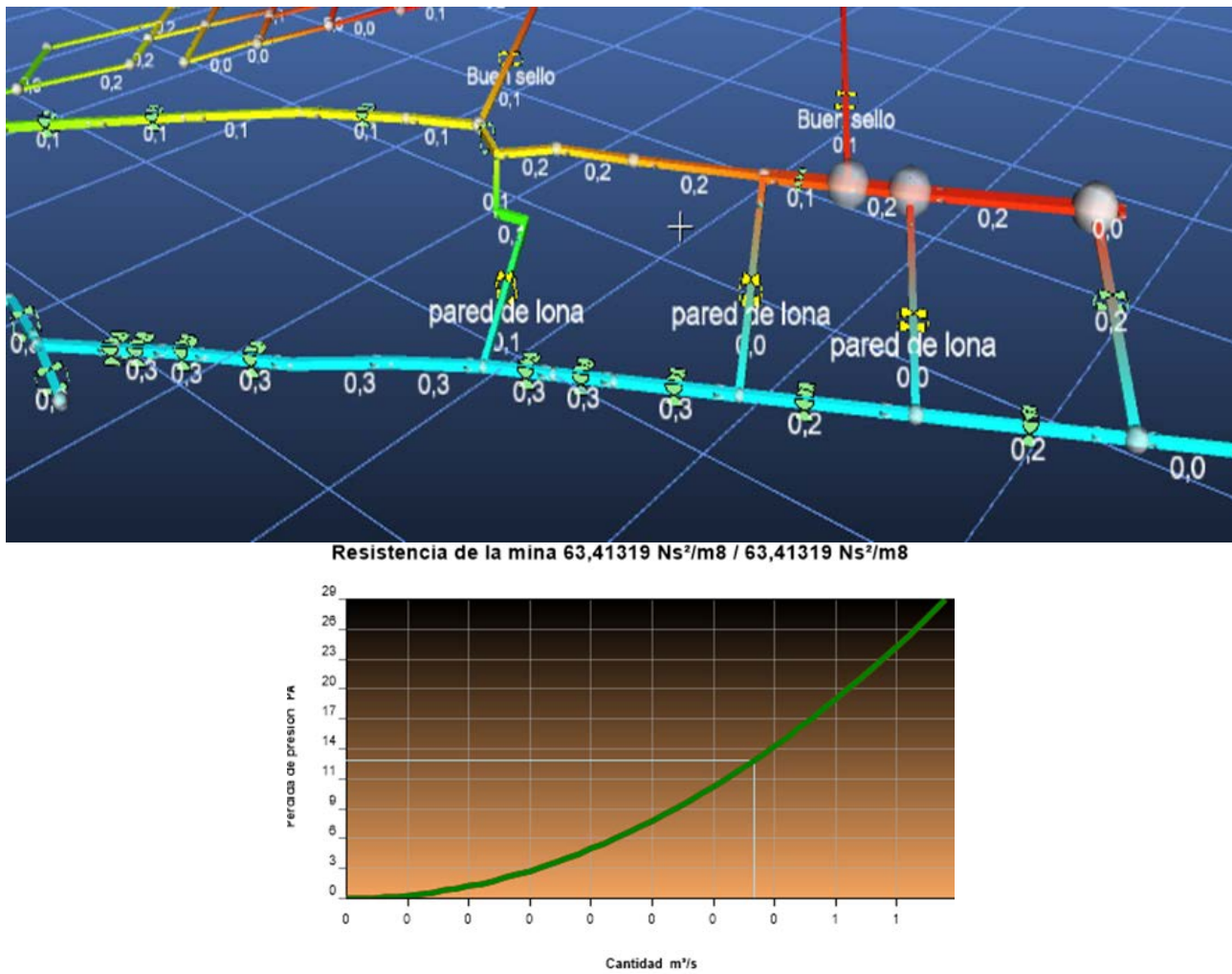


Figura 5. Caudal en los frentes cuando se tiene pared de lona en los tambores del nivel 6 y resistencia equivalente de la mina con la implementación del sellamiento.  
Fuente: Los autores

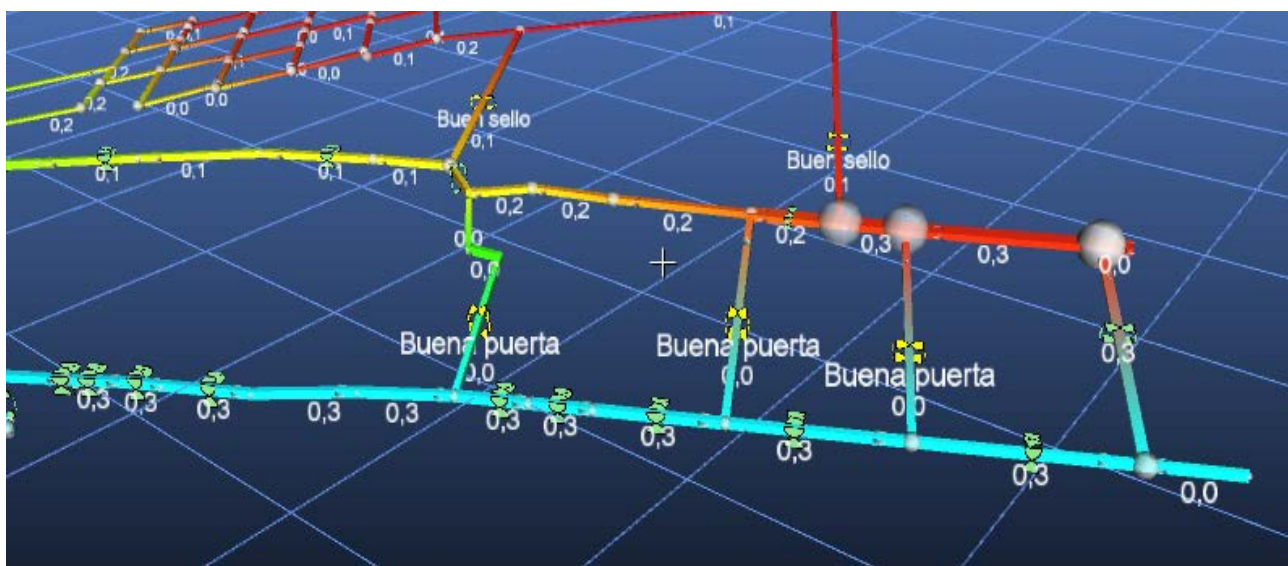


Figura 6. Caudal en los frentes cuando se tiene buena puerta en los tambores del nivel 6.  
Fuente: Los autores

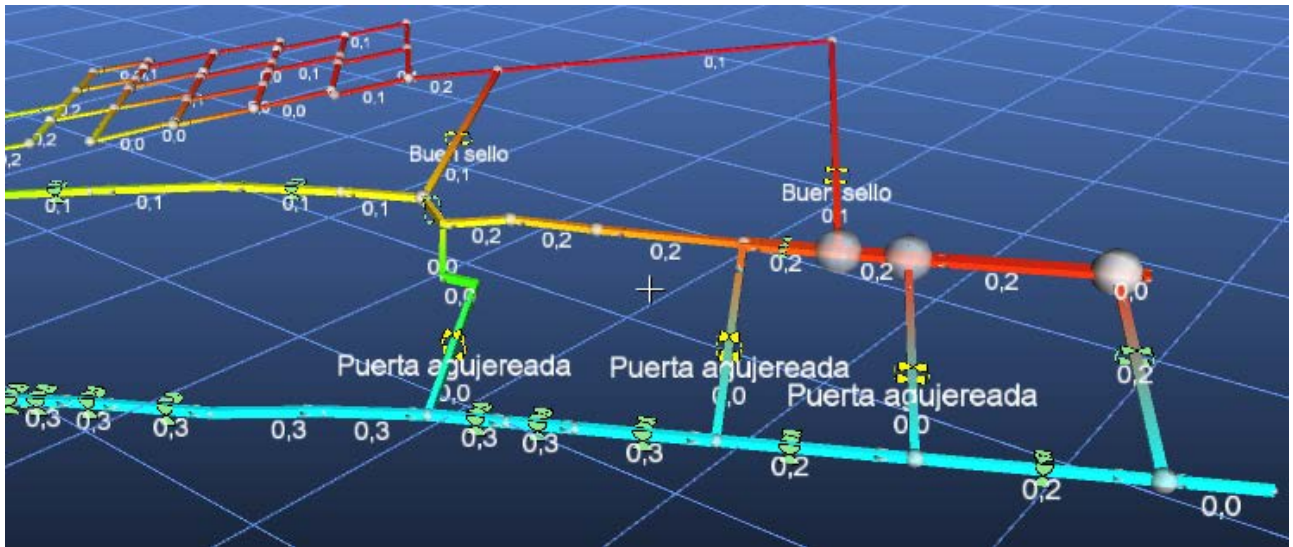


Figura 7. Resistencia equivalente de la mina con puerta agujereada.  
Fuente: Los autores

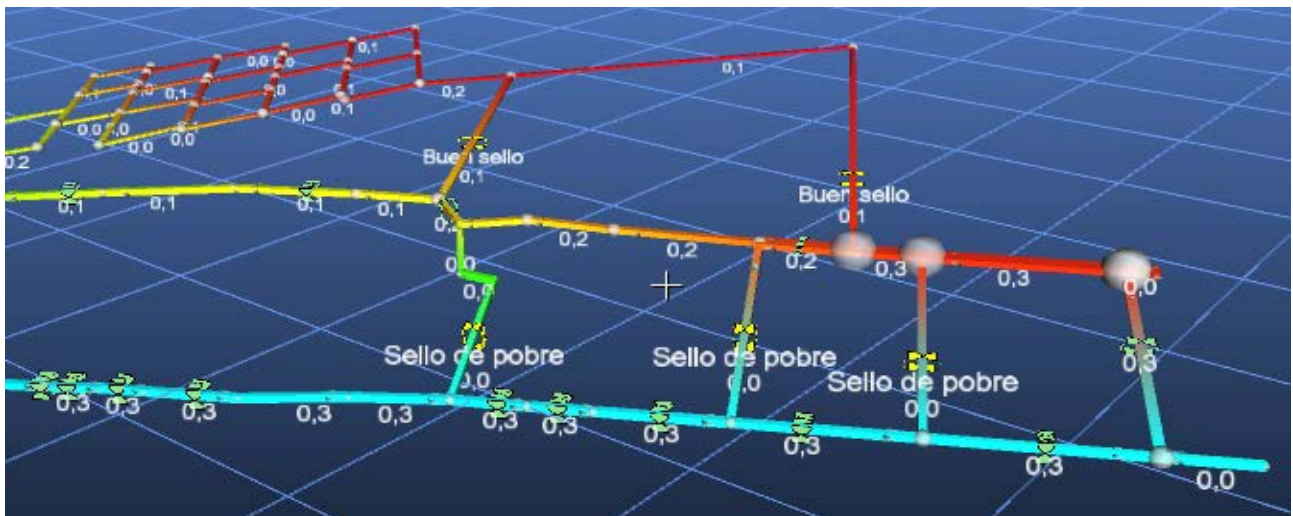


Figura 8. Caudal en los frentes cuando se tiene sello pobre en los tambores del nivel 6.  
Fuente: Los autores

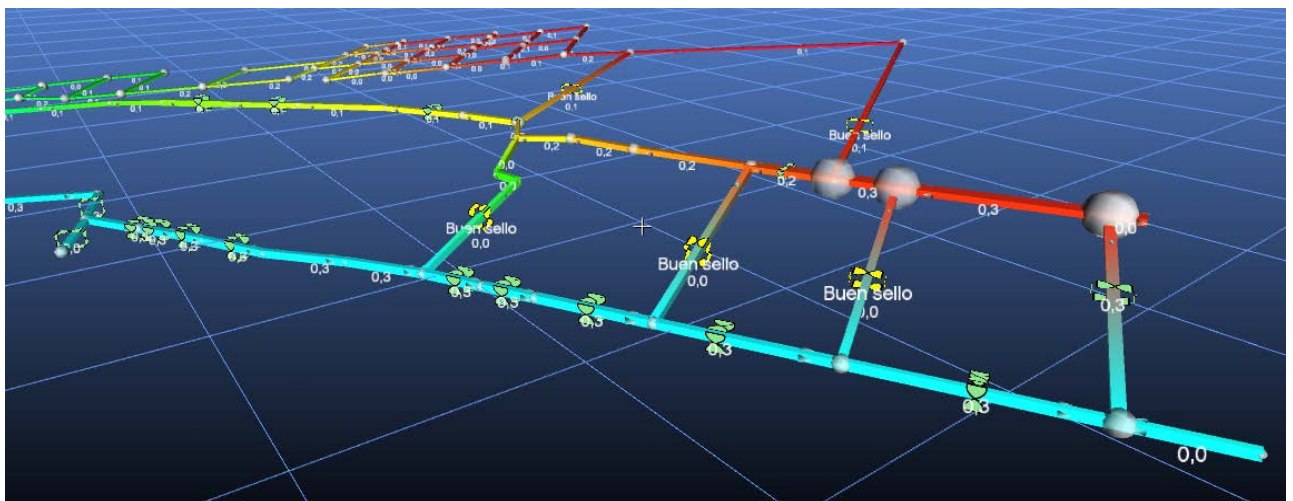


Figura 9. Caudal de aire que llega a los frentes de trabajo nivel 5 y 6.  
Fuente: Los autores

### 3. Conclusiones

A partir de las simulaciones realizadas, se encontró que los caudales que llegan a los frentes de trabajo cuando no se utilizan sellamientos en los tambores del nivel 6 son de 0,1 m<sup>3</sup>/seg, mientras que al utilizar sellamientos se mejora esta condición. En el caso, en el cual se utiliza la pared de lona y la puerta agujereada, el caudal llega a 0,2 m<sup>3</sup>/seg, y cuando se utiliza el buen sello, la buena puerta y el sello pobre, el caudal que llega a los frentes es de 0,3 m<sup>3</sup>/seg. Por otro lado, se debe resaltar que la mina no sufre un aumento significativo en la resistencia equivalente, ya que esta se encuentra en el orden de 63,4 Ns<sup>2</sup>/m<sup>8</sup>. En este sentido, empieza a jugar un papel muy importante la eficiencia y el costo en la selección de los sellamientos para su implementación.

En esta unidad minera, no sería conveniente ubicar buenas puertas en los tambores del nivel 6, ya que estas tienen un alto costo y normalmente no son utilizadas en estos lugares, sino que se implementan en sitios que no pueden ser aislados completamente, pero es de vital importancia sellarlos para definir circuitos de ventilación. En este caso, la mejor opción que se debería utilizar son los buenos sellos, los cuales se construyen con mampostería y evitan las permanentes filtraciones de aire, que suelen ocurrir con sellamientos de menor calidad.

Con la ventilación natural, el aire que ingresa a la mina es 0,5 m<sup>3</sup>/seg, el cual a partir de buenos sellamientos en el nivel 6, se logra que llegue a los frentes 0,3 m<sup>3</sup>/seg, lo que equivale a 30 m<sup>3</sup>/min y permitiría trabajar a 5 personas en cada frente. Esto teniendo en cuenta el decreto 1886 de 2015, que exige 6 m<sup>3</sup>/min por persona y además considerando que en la mina no utilizan explosivos y no tienen maquinaria diésel en su interior. Esta mina a su vez se caracteriza según los registros que se tienen de metano, por ser no grisutosa.

Como se puede evidenciar, según los resultados arrojados por el software Ventsim<sup>TM</sup>, el aire que aporta el tiro natural es muy pequeño, y por tanto no es suficiente de acuerdo a los requerimientos que tiene la mina por su personal de trabajo, en el cual laboran alrededor de 50 personas por turno. Por esta razón, se hace necesaria la implementación de ventilación mecanizada, la cual posibilite suplir estas necesidades. Además, según lo estipulado en la normatividad, toda mina debe contar con ventilación mecanizada para mayor seguridad, puesto que la ventilación por tiro natural es muy cambiante y depende de las condiciones climáticas que se tengan en el momento.

La simulación idealiza un proceso que está pasando en la realidad, por tal motivo para que los valores obtenidos en términos de pérdida sean mínimos y semejantes se hace necesario que los sellamientos se mantengan en las mejores condiciones posibles.

Finalmente, cabe resaltar que con el desarrollo de las simulaciones se validaron las diferentes hipótesis planteadas en el artículo.

### Agradecimientos

Se agradece al grupo de trabajo del Instituto de minerales CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia, a la

Gobernación de Antioquía y a las unidades mineras del proyecto, por su ayuda, comprensión en este proceso.

### Referencias

- [1] Johnson, B.R. and Ramani, R.V., Mine Ventilation Design. SME Min. Eng. Handb. 2<sup>nd</sup> Ed. Vo, 1992, pp. 1093-1121.
- [2] Ministerio de Minas y Energía. DECRETO 1335 DE 1987: Reglamento de Seguridad en las Labores Subterráneas de Colombia 1987.
- [3] Carruthers, J., Australasian coal mining practice. Ventilation, Victoria: Australasian Inst. Mining and Metallurgy; 1993, pp. 461-503.
- [4] Ren, W., Shi, J., Guo, Q., Zhao, Q. and Bai, L., The influence of dust particles on the stability of foam used as dust control in underground coal mines. Process Saf Environ Prot., 111, pp. 740-746, 2017. DOI: 10.1016/j.psep.2017.08.043.
- [5] Wallace, K., Prosser, B. and Stinnette, J.D., The practice of mine ventilation engineering. Int J Min Sci Technol 25(2), pp. 165-169, 2015. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.001.
- [6] Su, S., Chen, H., Teakle, P. and Xue, S., Characteristics of coal mine ventilation air flows. J Environ Manage, 86(1), pp. 44-62, 2007. DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.11.025.
- [7] Gobierno de Chile. Ventilación de Minas 2015:36.
- [8] Singh, R.V.K., Spontaneous heating and fire in coal mines. Procedia Eng., 62, pp. 78-90, 2013. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.046.
- [9] Díaz, E., Fernández, J., Ordóñez, S., Canto, N. and González, A., Carbon and ecological footprints as tools for evaluating the environmental impact of coal mine ventilation air. Ecol. Indic., 18(1), pp. 126-130, 2012. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.11.009.
- [10] Yanes, E.G., Ventilación de Minas: Capítulo I. Form. Expert. en Prevención Riesgos la Minería Extr., 2015, 36, P.
- [11] Singh, H. and Mallick, J., Utilization of ventilation air methane in Indian coal mines: Prospects and Challenges. Procedia Earth Planet Sci., 11, pp. 56-62, 2015. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.06.008.
- [12] Feng, W., Zhu, F. and Lv, H., The use of 3D simulation system in mine ventilation management. Procedia Eng., 26, pp. 1370-1379, 2011. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2313.
- [13] Castro, R., Ventilación de minas: Flujo de aire a través de galerías y ductos. 2007, 34 P.
- [14] Montgomery, J.M., Theory and practice of mine ventilation. 1936, 34 P.
- [15] De Souza, E., Application of ventilation management programs for improved mine safety. Int. J. Min. Sci. Technol., 27(4), pp. 647-650, 2017. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.018.

**M.O. Bustamante-Rúa**, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, MSc en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Metalurgia Extractiva - Mención – Mineralurgia de la Universidad de Concepción –Chile, DSc. en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Metalurgia Extractiva – Minería de la Universidad de Concepción – Chile. Profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Director e Investigador del Instituto de Minerales CIMEX – Facultad de Minas, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín ha dirigido e integrado proyectos de investigación en las áreas de concentración y beneficio de minerales, modelación y optimización matemática de procesos y operaciones mineras, reología de suspensiones y pastas, ha publicado artículos en revistas científicas y participado como expositor en congresos y simposios nacionales e internacionales. Además ha sido director de diversas tesis de maestría y doctorado.  
ORCID: 0000-0002-1692-991X

**A.J. Daza-Aragón**, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, finalizó sus estudios en 2015. Candidato a MSc Recursos Minerales de la Universidad Nacional de Colombia. Fue estudiante auxiliar del Instituto de Minerales CIMEX, donde participó en

dos semilleros en asociación con el Programa Nacional de Semilleros de Investigación, Creación e Innovación de la Universidad Nacional de Colombia 2013-2015: Recuperación de oro ultrafino y modelación de plantas minero-metalúrgicas a través del software MODSIM. Sus intereses actualmente se centran en minería y procesamiento de minerales.  
ORCID: 0000-0001-7596-9666

**P. Bustamante-Baena**, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, candidato a MSc Recursos Minerales de la Universidad Nacional de Colombia y joven investigador de Colciencias. Ganador del concurso mejores trabajos de grado del Año 2015 y concurso nacional Otto de Greiff, fue estudiante auxiliar del Instituto de Minerales CIMEX. Sus intereses actualmente se centran en procesamiento de minerales.  
ORCID: 0000-0002-8409-5531



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales  
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de  
Materiales

Mayor información:

E-mail: [acgeomin\\_med@unal.edu.co](mailto:acgeomin_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 53 68