

# IA y nuevas tecnologías aplicadas a la seguridad minera

## Jorge M. Molina

Docente asociado de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Ph.D en ordenamiento territorial.

## Luis F. Vallejo

Candidato a magíster en Ingeniería Química del University College London.

## Sebastián López

Magíster en Ingeniería Química College London. Docente ocasional de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

## Andrés F. Ortiz

Magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

## David A. Soto

Magíster en Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

## José Torero

Jefe del Departamento de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática del University College London. Ph.D en Ingeniería Mecánica.

## Alejandro Molina

Ph.D en Ingeniería Química y de Combustibles. Profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín / Miembro Correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

## Resumen

La industria minera genera una gran cantidad de datos que se encuentran en forma digital. Un ejemplo son las concentraciones de gases de los detectores personales. Frecuentemente, estos datos tienen un uso muy limitado y, en la mayoría de los casos, se descartan. Industrias como la de transporte, manufactura, agricultura y medicina han comenzado a usar todos estos datos a través de nuevas tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA). En este artículo se ilustra cómo los datos de los detectores de gases personales podrían ser usados mediante un algoritmo de inteligencia artificial, específicamente, una red neuronal artificial para alertar sobre una explosión de metano. El ejercicio toma como ejemplo la explosión de metano y polvo de

carbón que tuvo lugar en Tópaga en 2021. Luego de demostrar —mediante herramientas de modelamiento físico— la poca ventilación y la posible estratificación de metano en la mina, se genera una base de datos que alimenta la red neuronal artificial, la cual logra alertar sobre una inminente explosión en un 971,9 ‰<sup>1</sup> de las ocasiones.

## Introducción

En Colombia, la producción de carbón fue de 50,6 millones de toneladas en 2020 (National Mining Agency, 2022). El 8 % correspondió a minas subterráneas. Por su parte, de las 1235 emergencias en minas colombianas presentadas entre el 2005 y el 2018, 956 (un 93 %) ocurrieron en minas de carbón (Gheorghe et al., 2022) y el 87 % de las fatalidades asociadas se registraron en la minería subterránea (Gheorghe et al., 2022; Jaramillo-Urrego, 2019).

Frente al panorama de la siniestralidad minera, en los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías para la

prevención de incidentes en minas de carbón (Dong et al., 2023; Ji & Shi, 2023; Sekhar & Shah, 2021; Yang et al., 2023). Algunos ejemplos son la inteligencia artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y los macrodatos (Meng & Li, 2022). Estas tecnologías se vienen usando en la prevención de explosiones de gas (Demirkan et al., 2022), detección de incendios en minas (Barros-Daza et al., 2022; Sun et al., 2022), explosiones de polvo de carbón (Khan et al., 2022) o en la predicción de deslizamientos de tierra en minas de carbón (Zhang et al., 2023). Un elemento importante de estas nuevas tecnologías son las Herramientas de Modelado Físico (HMF).

En este artículo se analiza una explosión de metano y polvo de carbón ocurrida en el municipio de Tópaga, Boyacá, que dejó 12 víctimas fatales. Sus autores fueron parte de la investigación de este incidente del cual se recolectó documentación extensa que incluye mediciones de gases (antes y después de la explosión), análisis *post mortem* de

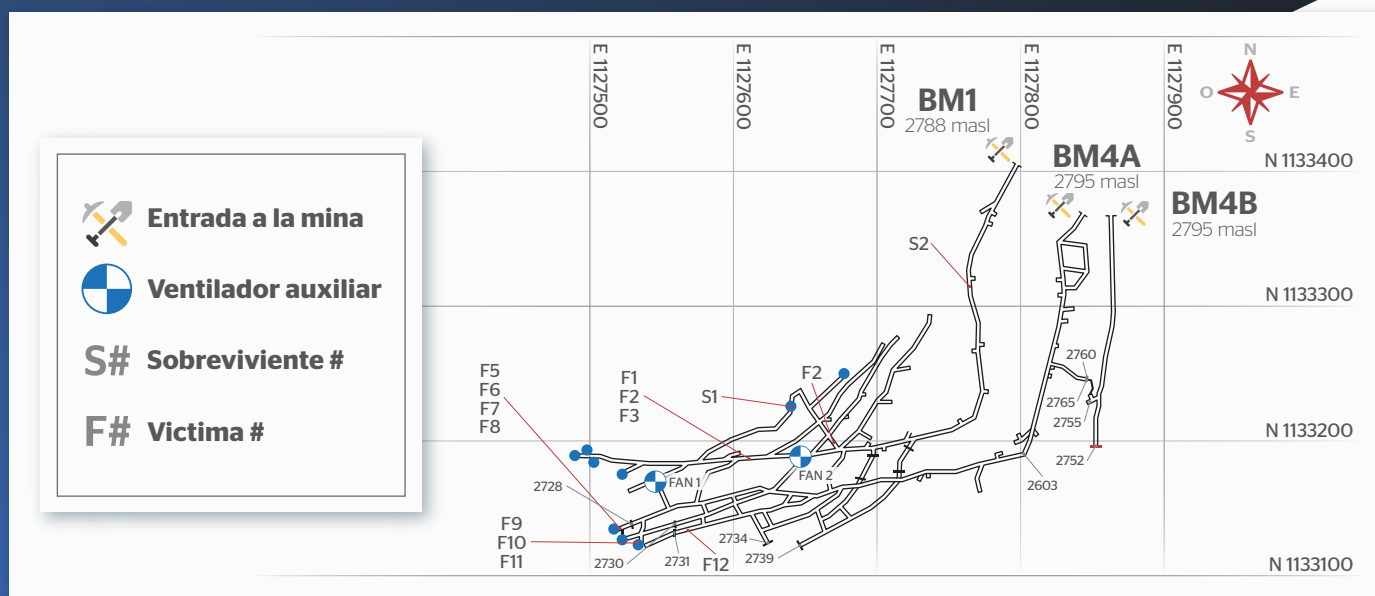
diferentes muestras textiles, metálicas y plásticas y estudios geológicos del entorno. La experiencia obtenida durante la investigación de la explosión permite ilustrar cómo nuevas tecnologías como las HMF y la IA se pueden aplicar en la seguridad minera.

## Herramientas de modelamiento físico

La HMF VENTSIM<sup>2</sup> 5.4. (The Howden Group, 2023) permitió representar el sistema de ventilación de la mina antes de la explosión. La figura 1 presenta el plano de la mina.

Durante la investigación de la explosión se encontró que muy cerca de una víctima mortal (F12 en la figura 1) se hallaba un martillo eléctrico perforador sin protección para explosiones, el cual se consideró como la más posible causa de ignición. La simulación en VENTSIM consideró los dos ventiladores, el circuito de ventilación natural y ductos desde los ventiladores hasta los frentes de trabajo.

**Figura 1.** Plano de la mina en el momento de la explosión



Fuente: elaboración propia

<sup>1</sup> Valor porcentual por mil (‰). Expresión usada para indicar la décima parte de un porcentaje.

<sup>2</sup> VENTSIM es un software comercial que se usa para realizar el diseño de ventilación en ambientes subterráneos.

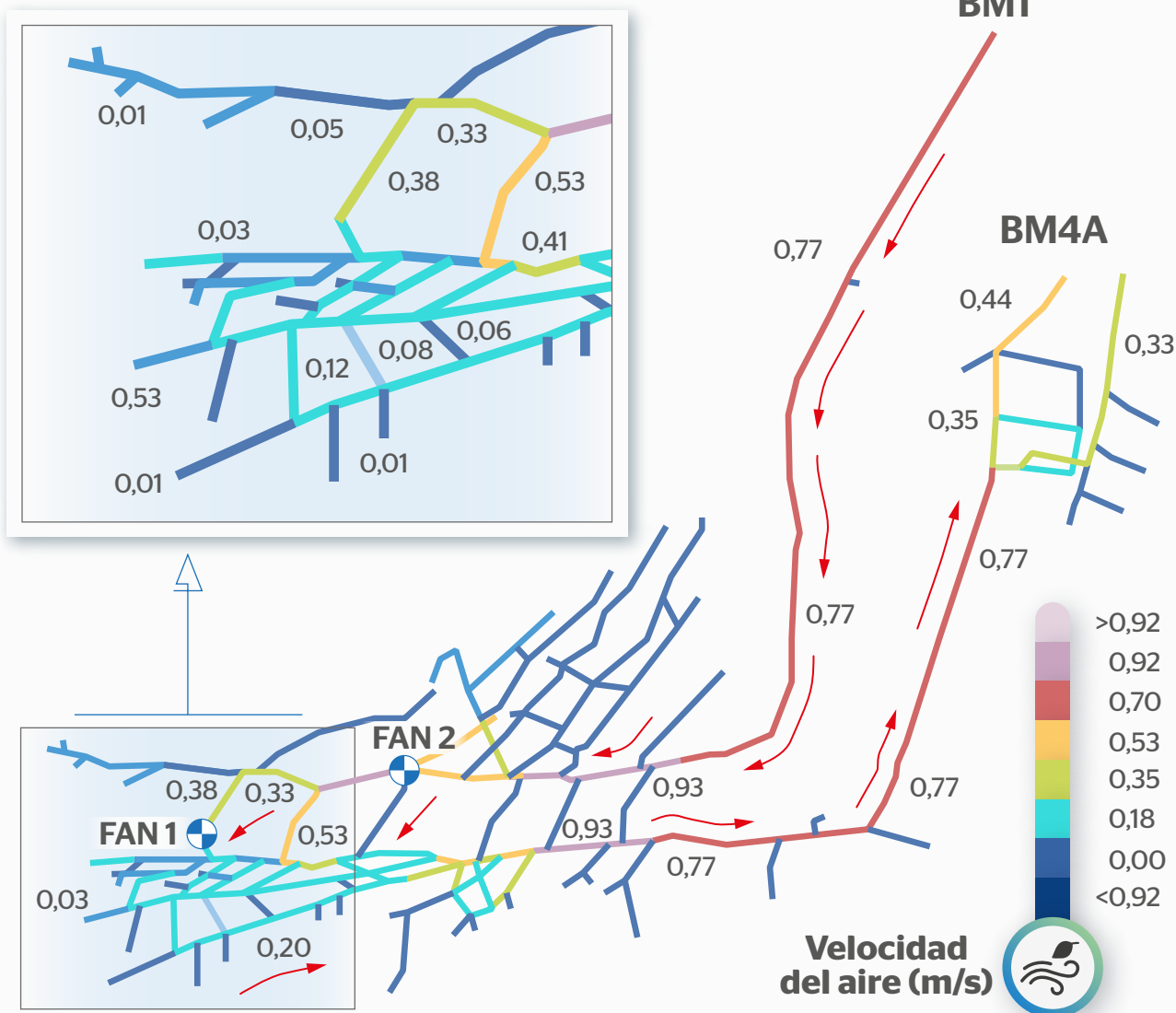
Las HMF como VENTSIM 5.4. (The Howden Group, 2023) resuelven ecuaciones que representan el flujo de aire en la mina y, luego de definir la geometría y de incluir condiciones de frontera como temperatura, presión y velocidad de aire a la entrada, así como parámetros de diseño como el factor de fricción, permiten predecir el campo de velocidad dentro de la mina, como se muestra en la figura 2.

La simulación indica que por el circuito de ventilación primaria que fluye por la galería principal desde BM1, en la parte central superior de la figura 1, las velocidades del aire están en el rango entre 0,70 m/s y 0,93 m/s. El aire viciado regresa por la pendiente principal de la galería que conduce a BM4A (un poco hacia la derecha de BM1 en la figura 1). Si bien

la mina contaba con un circuito de ventilación secundario con dos ventiladores, la figura 2 evidencia que alrededor del 45 % de la mina y del 85 % de los frentes de trabajo presentaban una velocidad de aire inferior a 0,5 m/s, valor definido por la legislación colombiana como el mínimo requerido para evitar la estratificación del gas metano.

**Figura 2.** Distribución de velocidades (m/s) en la mina calculada mediante VENTSIM

\* El inserto resalta el área donde se sospecharon emisiones de metano



Fuente: elaboración propia

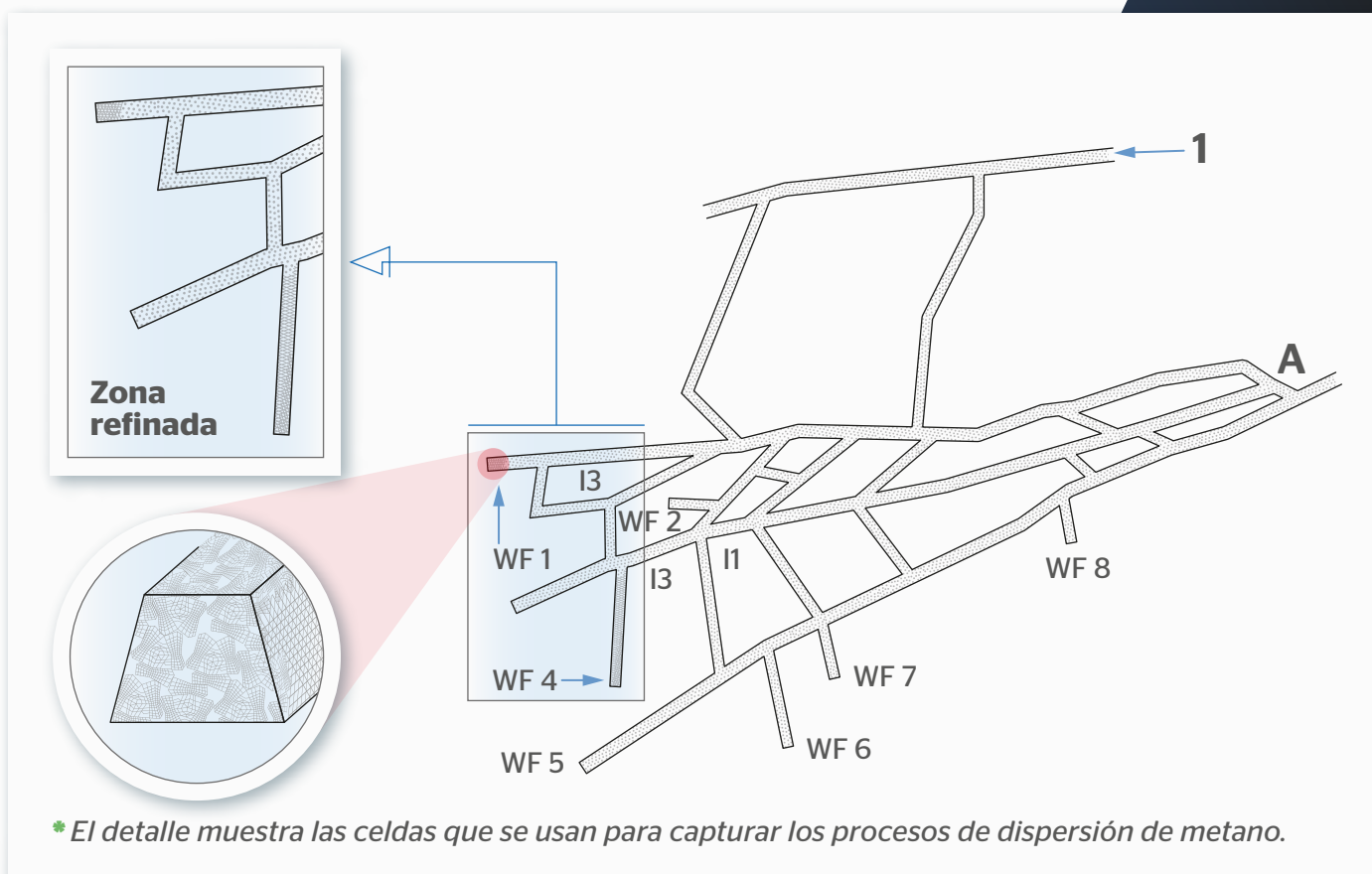
Para evaluar la existencia de dispersión de metano en la mina se hace necesario usar tecnologías HMF que permitan representar el flujo de aire en tres dimensiones. La dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics- CFD) resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes sobre los balances de masa y cantidad de movimiento para predecir cómo varía la concentra-

ción de metano desde un posible frente de emisión y a lo largo y alto de la mina.

En el estudio de la explosión se utilizó Ansys Fluent R2020 [34] (un software comercial de CFD) para representar el flujo de aire y la variación en la concentración de metano. El dominio de simulación se limitó al área donde se encontró el martillo evidenciando más fallas geológicas como se muestra en la figura 3. Al igual que con VENTSIM, Ansys

Fluent requiere de una representación geométrica del interior de la mina y, adicionalmente, la generación de una malla que divida el dominio en múltiples celdas. En la figura 3, por ejemplo, se usan cerca de un millón de celdas las cuales se refinaron en las regiones donde la concentración de metano se encontró superior al 0,5 %.

**Figura 3.** Malla utilizada en la simulación CFD



Fuente: elaboración propia

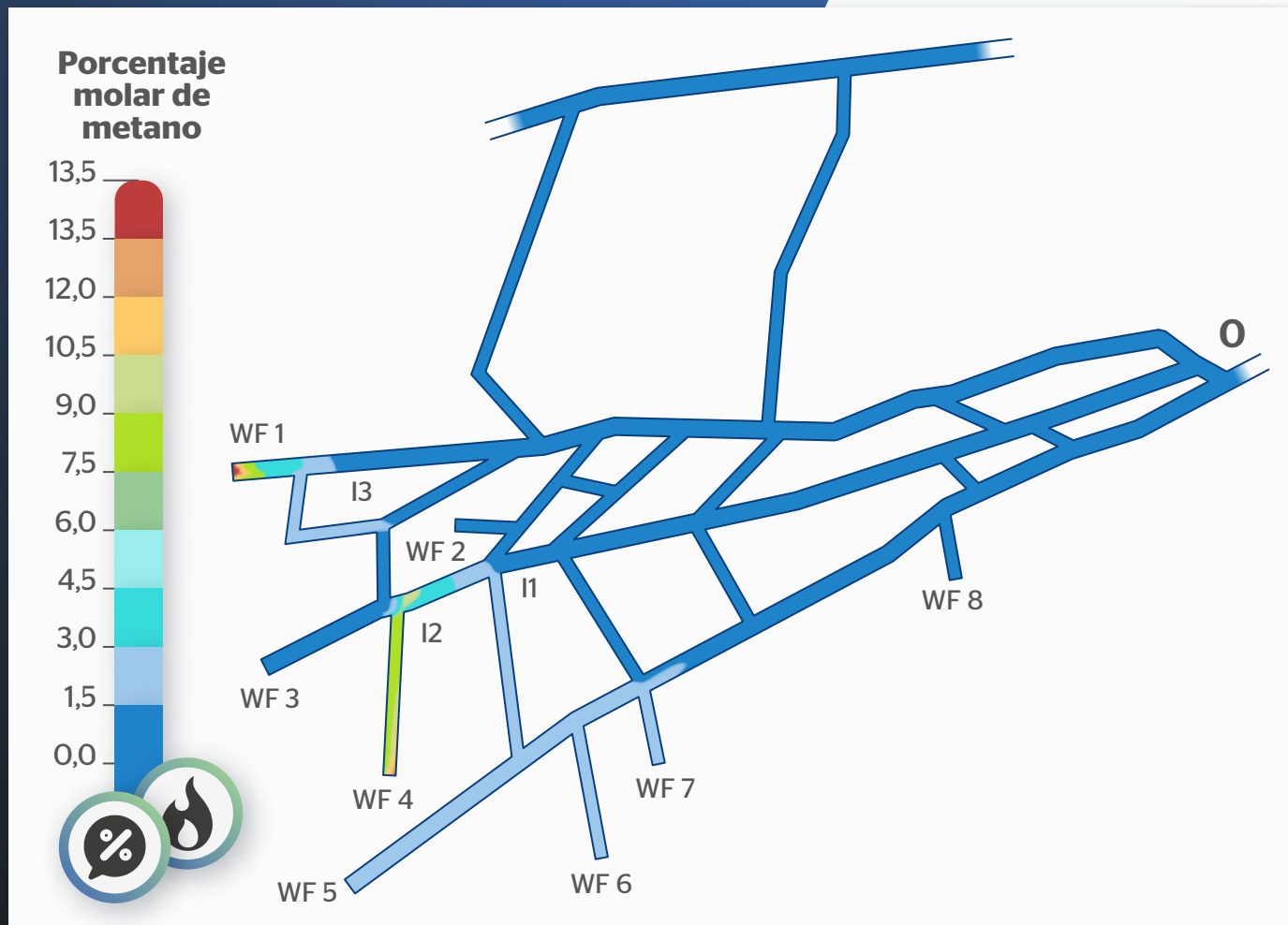
La figura 4, por su parte, muestra las predicciones de concentración de metano en la mina cuando se asume una emisión en los frentes WF1 y WF4. La concentración de metano llega al 15 %, incluso, con la ventilación secundaria encendida, cerca de WF1 y WF4. La concentración de metano disminuye rápidamente al mezclarse con el aire alcanzando valores dentro de los límites de inflamabilidad en

las salidas de las galerías que conducen a los frentes 1 y 4.

Los resultados de la simulación CFD son consistentes con la hipótesis planteada en la investigación del accidente que sugiere que, si se emite metano desde las fallas geológicas identificadas en los frentes de trabajo 1 y 4, junto con la baja velocidad de ventilación del aire

en esa región, se generarían capas de metano en la mina. Una fuente de ignición, como la encontrada en la investigación del accidente en la galería que conduce al frente de trabajo 4, podría desencadenar una explosión de metano que habría involucrado, al menos, las galerías cercanas y, posteriormente, extenderse a una explosión de polvo de carbón.

**Figura 4.** Concentración de metano según la simulación CFD en la región cercana a las fallas geológicas



Fuente: elaboración propia

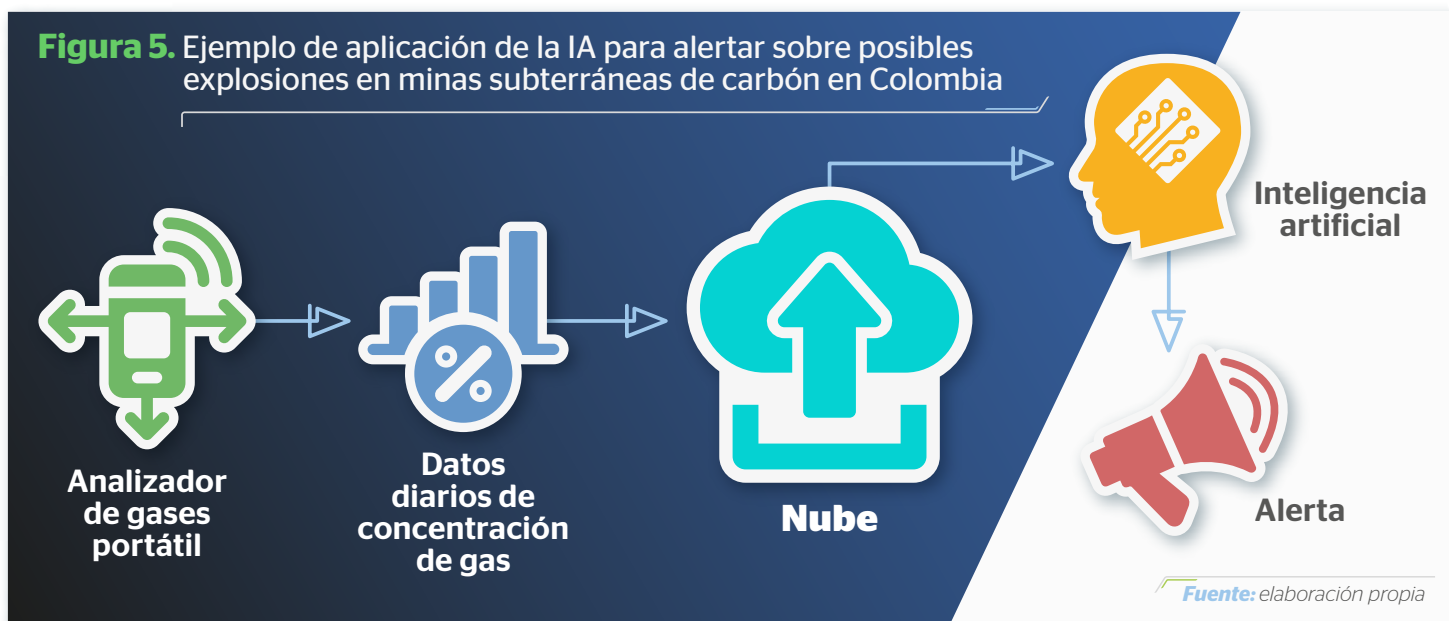
## Inteligencia artificial y nuevas tecnologías

En la seguridad de minas se están aplicando nuevas y diversas tecnologías como la IA y el internet de las cosas. Azhari et al. (2023) recientemente revisaron la aplicación más avanzada de la inteligencia artificial en la minería conocida como “*deep learning*” (aprendizaje profundo). Para estos autores la forma como avanza la IA en este sector es más lenta que la que se observa en otras industrias como la de transporte, manufactura, medicina y agricultura. En estos campos la IA ha tomado ventaja de la digitalización de los procesos que generan

bases de datos de enormes tamaños sobre las cuales no se toma acción. Es allí donde esta tecnología puede contribuir a tomar mejores decisiones con base en la amplia información disponible al reconocer patrones que, normalmente, pasarían desapercibidos por el ser humano.

La IA se ha usado en minería (Azhari et al., 2023) en la exploración asociada a aspectos como el análisis del mineral y de información geológica; en la extracción, la programación y el mantenimiento de la maquinaria; y en el análisis de contaminación y deslizamientos asociados con la explotación minera.

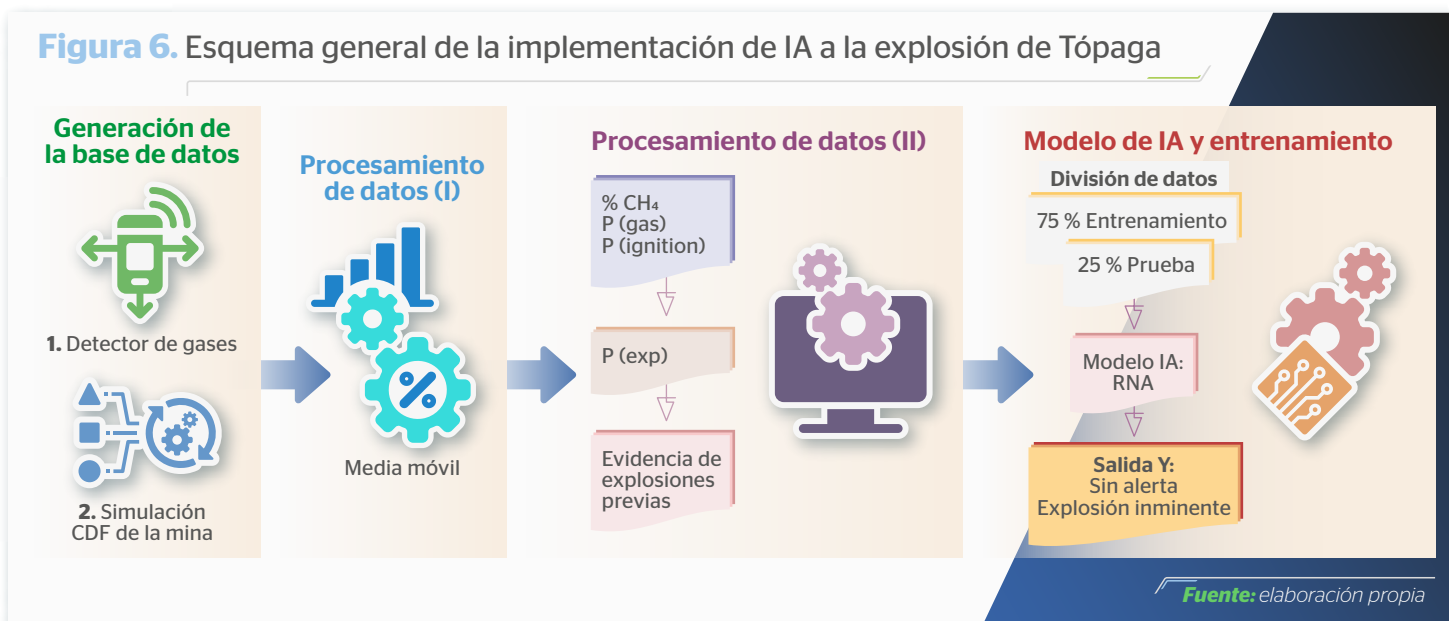
Con el fin de ilustrar un ejemplo tangible del uso de la IA en la seguridad en minería, la figura 5 demuestra cómo se podría aplicar para prevenir explosiones como la que sucedió en Tópaga en 2021. La figura reconoce la existencia de una gran cantidad de información que se genera en los detectores de gases portátiles de uso frecuente en la industria minera. Esta información actualmente se usa de forma limitada por parte de quien porta el detector. Sin embargo, estos datos se pueden subir diariamente a la nube y, mediante algoritmos de IA que permitan encontrar patrones, alertar sobre una posible explosión.



La figura 6 presenta el detalle de cómo se podría desarrollar el algoritmo de IA ilustrado en la figura 5. La base de datos, proveniente de mediciones fre-

cuentas de múltiples detectores de gases o de simulaciones de CFD como la de la figura 4, se depura para entrenar una red neuronal artificial (RNA) que uti-

liza funciones como la probabilidad de presencia de gas metano y de ignición para generar una probabilidad de explosión y así, una alerta.



Una aplicación tal como la que se describe en la figura 6 se desarrolló recientemente utilizando como base de datos 199 posibles trayectorias de mineros dentro de la simulación CFD de la figura 4. Si bien la base de datos fue bastante limitada y no se realizó ningún intento para optimizar los hiperparámetros de la red neuronal artificial, la imple-

mentación de IA demostró que en el 971,9 % de los casos el algoritmo funciona correctamente ya que presenta una alerta positiva de explosión en un 4,1 % de los casos y no presenta alerta en 967,8 %. Un desarrollo más exhaustivo de la base de datos y una optimización del algoritmo de red neuronal artificial aumentaría la probabilidad de

alertar a los operadores mineros y a las autoridades reguladoras colombianas sobre una posible explosión.

### Conclusiones


La gran cantidad de datos que actualmente se encuentran de forma digital en todas las industrias, pero, particularmente en la minería, abre la posibilidad



de utilizar nuevas tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA) para mejorar la seguridad. Las herramientas de modelamiento físico permiten entender los fenómenos que pudieron haber llevado a una explosión, como se ilustró con el caso de la explosión de metano y polvo de carbón que tuvo lugar en Tópaga, Boyacá, en 2021. La IA se está usando en minería en campos como la exploración, la extracción y la reclamación. En el caso de la seguridad minera se considera posible que un algoritmo a partir de esta tecnología, específicamente, una red neuronal artificial pueda alertar sobre una posible explosión utilizando la gran cantidad de datos que se generan mediante los de-

teores personales de gas que se utilizan en las minas subterráneas de Colombia.

### Agradecimientos

Este trabajo se dedica a la memoria de los doce mineros que fallecieron en la explosión de Tópaga el 21 de agosto de 2021. Se reconoce financiación parcial por parte de la Royal Academy of Engineering en el programa 'Transforming Systems through Partnership 20/21 award, referencia TSP2021/100311: Training for the prevention of fires and explosions through the use of data analysis and simulation'. LFVM reconoce la beca de la fundación Juan Pablo Gutiérrez Cáceres. 

## Referencias

- Azhari, F., Sennersten, C. C., Lindley, C. A., & Sellers, E. (2023).** Deep learning implementations in mining applications: a compact critical review. *Artificial Intelligence Review*. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10500-9>
- Barros-Daza, M. J., Luxbacher, K. D., Lattimer, B. Y., & Hodges, J. L. (2022).** Real time mine fire classification to support firefighter decision making. *Fire Technology*, 58(3), 1545-1578.
- Demirkan, D. C., Duzgun, H. S., Juganda, A., Brune, J., & Bogin, G. (2022).** Real-Time Methane Prediction in Underground Longwall Coal Mining Using AI. *Energies*, 15(17), 6486.
- Dong, X., Yang, Z., Guo, L., & Gao, Y. (2023).** Assessment of the Explosion Accident Risk in Non-Coal Mining by Hasse Diagram Technique. *Processes*, 11(2), 582.
- Gheorghe, G. C., Manrique-Hernández, E. F., & Idrovo, A. J. (2022).** Injuries and fatalities in Colombian mining emergencies (2005-2018): a retrospective ecological study. *Revista Brasileira de Medicina Do Trabalho : Publicacao Oficial Da Associacao Nacional de Medicina Do Trabalho-ANAMT*, 20(4), 591-598.
- Jaramillo-Urrego, L. M. (2019).** Safety in small-scale underground coal mining in Colombia University of Leoben. Master's thesis. [https://pure.unileoben.ac.at/portal/en/publications/safety-in-smallscale-underground-coal-mining-in-colombia\(5c55f760-3cce-4105-8079-08a4c12e96b8\).html?customType=theses](https://pure.unileoben.ac.at/portal/en/publications/safety-in-smallscale-underground-coal-mining-in-colombia(5c55f760-3cce-4105-8079-08a4c12e96b8).html?customType=theses)
- Ji, P., & Shi, S. (2023).** Hazard prediction of coal and gas outburst based on the Hamming distance artificial intelligence algorithm (HDAIA). *Journal of Safety Science and Resilience*, 4(2), 151-158.
- Khan, A. U., Salman, S., Muhammad, K., & Habib, M. (2022).** Modelling Coal Dust Explosibility of Khyber Pakhtunkhwa Coal Using Random Forest Algorithm. *Energies*, 15(9), 3169.
- Meng, F., & Li, C. (2022).** Safety warning of coal mining face based on big data association rule mining. *Journal of Computational Methods in Science and Engineering*, 1-18.
- National Mining Agency. (2022).** Coal. Report. <https://mineriaencolombia.anm.gov.co/sites/default/files/2022-02/Fact%20Sheet%20Coal%2001%202022.pdf>
- Sekhar, B. S., & Shah, Y. (2021).** Emerging technologies in Indian mining industry: an exploratory empirical investigation regarding the adoption challenges. *Journal of Science and Technology Policy Management*, 13(2), 358-381.
- Sun, S., Gura, D., & Dong, B. (2022).** Fire safety assessment models based on machine learning methods for the coal industry. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 231, 104693.
- The Howden Group. (2023).** VENTSIM. VENTSIM 3D Mine Ventilation Simulation Software. <https://ventsim.com/es/>
- Yang, S., Lian, H., Xu, B., Thanh, H. V., Chen, W., Yin, H., & Dai, Z. (2023).** Application of robust deep learning models to predict mine water inflow: Implication for groundwater environment management. *The Science of the Total Environment*, 871, 162056.
- Zhang, Y., Zhang, J., & Wang, Q. (2023).** Scene analysis of landslide geoscience and characterization of scene evolution. *Acta Geophysica*, 71(3), 1539-1564.