

Juan Herrera Herbert

Importancia de la ventilación en espacios subterráneos

Curso de “Tecnologías y Desarrollos Avanzados en Ventilación de Espacios Subterráneos”

Madrid - 2025



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior
de Ingenieros de Minas y Energía

www.minasyenergia.upm.es



Importancia de la ventilación en espacios subterráneos

Autor: Juan Herrera Herbert (juan.herrera@upm.es).

ADVERTENCIA

El presente documento ha sido preparado con una finalidad exclusivamente divulgativa y docente. Las referencias a productos, marcas, fabricantes y estándares que pueden aparecer en el texto, se enmarcan en esa finalidad y no tienen ningún propósito comercial.

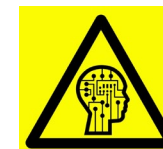
Todas las ideas que aquí se desarrollan tienen un carácter general y formativo y el ámbito de utilización se circunscribe exclusivamente a la formación de los estudiantes de la UPM. La respuesta ante un caso particular requerirá siempre de un análisis específico para poder dictaminar la idoneidad de la solución y los riesgos afrontados en cada caso, además de las incidencias en los costes de explotación. Consulte siempre a su ingeniería, consultor, distribuidor y fabricante de confianza en cada caso.



Nota:

Uso responsable de herramientas IA.

Recurso docente desarrollado con fuentes documentales del Mining Technology Innovative Lab y el apoyo de diversas herramientas de IA en el ámbito del Proyecto de Innovación Educativa "*Fortalecimiento del Conocimiento y Uso Ético de la Inteligencia Artificial en el Entorno Universitario*" y financiación del Proyecto de Investigación *I2MINTECH Project*.



Universidad Politécnica de Madrid
Departamento de Ingeniería Geológica y Minera
Laboratorio de Tecnologías Mineras

Calle Rios Rosas 21
28003 Madrid (España)



Este documento ha sido formateado para su visualización y uso en dispositivos electrónicos y permitir ahorrar en el consumo de papel y tóner.
Antes de imprimirlo, piense si es necesario hacerlo.

Alcance y objetivos

- Esta presentación aborda los fundamentos de la ventilación subterránea, la calidad del aire en estos espacios y la importancia de garantizar una atmósfera segura. También se exploran los desafíos asociados con la degradación del aire, los objetivos estratégicos de la ventilación y los avances tecnológicos recientes en el campo.
- Objetivos:
 - Comprender la importancia de la ventilación en espacios subterráneos y sus implicaciones en la seguridad y salud.
 - Identificar las características de una atmósfera respirable y los factores que afectan su calidad.
 - Analizar las causas y efectos de la degradación del aire en espacios confinados.
 - Definir los conceptos clave relacionados con la ventilación subterránea.
 - Explorar los objetivos estratégicos de la ventilación en distintos entornos.
 - Conocer los avances tecnológicos y mejores prácticas en ventilación subterránea.

Características de una atmósfera respirable

Una atmósfera respirable para los humanos debe tener:

■ Presencia de gases respirables:

- Oxígeno alrededor del 21% en la atmósfera, con un requisito mínimo del 15% para la supervivencia, mientras que niveles por encima del 35% pueden volverse tóxicos.
- Nitrógeno, que constituye la mayor parte de las atmósferas respirables (78% en la atmósfera terrestre), aunque no participa en la respiración, sino que actúa como gas de relleno moderando los niveles de oxígeno y previniendo fluctuaciones de presión dañinas.

- ## ■ Presión moderada
- dentro de un rango adecuado para la fisiología del organismo. Para los humanos, esto está entre 0.5 y 1.5 veces la presión atmosférica terrestre (1 atm). Presiones más bajas pueden llevar a la hipoxia (privación de oxígeno), mientras que presiones más altas pueden causar enfermedad de descompresión (la enfermedad de los buzos).

- ## ■ Ausencia de gases tóxicos o dañinos
- como CO, SO₂ o NO_x.

- ## ■ Rango estable de temperatura
- que permita al organismo funcionar correctamente. Para los humanos, este rango generalmente está entre 0°C y 40°C. Las temperaturas extremas pueden causar golpes de calor, hipotermia y otros problemas de salud.

COMPOSICION DEL AIRE SECO		
GAS	% (volumen)	% (peso)
Nitrógeno - N ₂	78,09	75,53
Oxígeno - O ₂	20,95	23,14
Anh. Carbóno - CO ₂	0,03	0,046
Argón y otros	0,93	1,284

- En un espacio confinado, como un compartimento o un espacio subterráneo, la calidad del aire puede degradarse debido a:
 - La acumulación de gases de diversas fuentes,
 - La falta de ventilación y
 - La presencia de contaminantes químicos.
- Esto puede conducir a problemas de salud y seguridad si no se gestionan adecuadamente.
- Entre los problemas más comunes se incluyen:
 - La disminución de oxígeno y el aumento de dióxido de carbono,
 - La acumulación de gases tóxicos como monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno,
 - La exposición a contaminantes químicos, y
 - El crecimiento de moho y bacterias de afección respiratoria debido al aumento de la humedad.
 - Incremento de la temperatura
 - Polvo en suspensión



Para mitigar estos riesgos, se necesitan medidas de control de la calidad del aire, una ventilación adecuada y protocolos de seguridad.

Definiciones

La ventilación es la herramienta más versátil de control y mantenimiento de la atmósfera del interior de la mina.

- La ventilación **es la aplicación de los principios de la mecánica de fluidos al flujo de aire en excavaciones subterráneas.**
- La ventilación **es la gestión de la atmósfera de mina, manteniéndola en un rango de parámetros adecuados.**
- La ventilación **es uno de los factores más importantes en la seguridad del personal porque reduce o elimina los riesgos de catástrofes y accidentes bajo tierra, al tiempo que mejora sustancialmente el rendimiento de las operaciones.**

La ventilación es el proceso de hacer pasar un flujo de aire en cantidad suficiente para crear y mantener unas condiciones que permitan:

- Asegurar una **atmósfera** agradable (en lo posible), **limpia y sin gases, con una composición, temperatura, y un grado de humedad (entre otros), adecuadas para desarrollar una labor con seguridad**, en todos los lugares en actividad de la mina, preservando la salud de los trabajadores y permitiendo la obtención de altos rendimientos.
- **Asegurar el** contenido mínimo necesario de **oxígeno** para la respiración en cualquier parte de la mina en la que deba entrar personal.
- Asegurar la **dilución de los gases tóxicos, asfixiantes y/o explosivos**, producidos durante las operaciones o desprendidos en el interior de la mina, a niveles por debajo de los valores límites seguros, establecidos en las normativas de aplicación, y su inmediata extracción al exterior.
- Asegurar la **dilución y extracción del polvo generado**.
- Asegurar **adecuadas condiciones de temperatura y humedad** (climatización) a medida que aumenta la profundidad de la explotación, ya que la temperatura aumenta por el gradiente geotérmico y por las emisiones de calor de maquinaria y equipos en operación.
- **Asegurar altos niveles de seguridad y capacidades de actuación** frente a emergencias o situaciones anómalas.
- **Aunar el conseguir un coste mínimo y una máxima eficiencia y seguridad en el sistema.**

Ventilación de mina

- Los sistemas de ventilación:
 - Garantizan la **gestión de la atmósfera de mina, manteniéndola en un rango de parámetros adecuados.**
 - Resultan de la aplicación de los principios de la mecánica de fluidos al flujo de aire en excavaciones subterráneas.
 - Son una herramienta muy versátil.
 - Garantizan poder mantener adecuados niveles de seguridad para la explotación en conjunto y el personal.
 - Permiten afrontar situaciones de emergencia con suficientes garantías para el personal y la seguridad de bienes.
- Tiene una importante
 - **Dimensión técnica, por la complejidad que pueden alcanzar.**
 - **Dimensión económica, por su enorme influencia en los costes de inversión y operativos de la mina.**
 - **Dimensión ambiental, por su incidencia directa en la salud del personal.**
- **Invertir en sistemas de ventilación adecuados no es solo una medida de seguridad, sino también una inversión estratégica que contribuye al éxito y la sostenibilidad general de la mina.**

“Una mina que no tiene un buen diseño del sistema de ventilación, es inviable”.



Un sistema de ventilación subdimensionado o mal implementado,

- No será capaz de entregar los caudales de aire fresco requeridos por la legislación vigente.
- Puede exponer a los mineros a altos niveles de gases peligrosos, partículas de polvo y calor excesivo.
- Probablemente impactará de forma negativa la productividad del trabajador en el frente, reduciéndose la eficiencia y la calidad del trabajo.

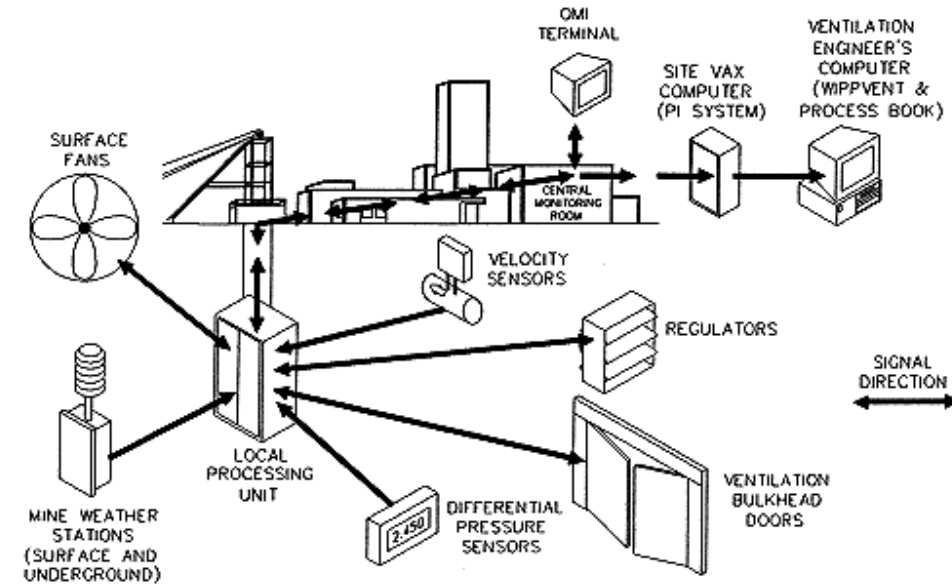


La ventilación requiere de un **sistema eficiente y fiable**, que responda de forma adecuada a las necesidades de la mina a la vez sea **suficientemente moderado en sus costes**.

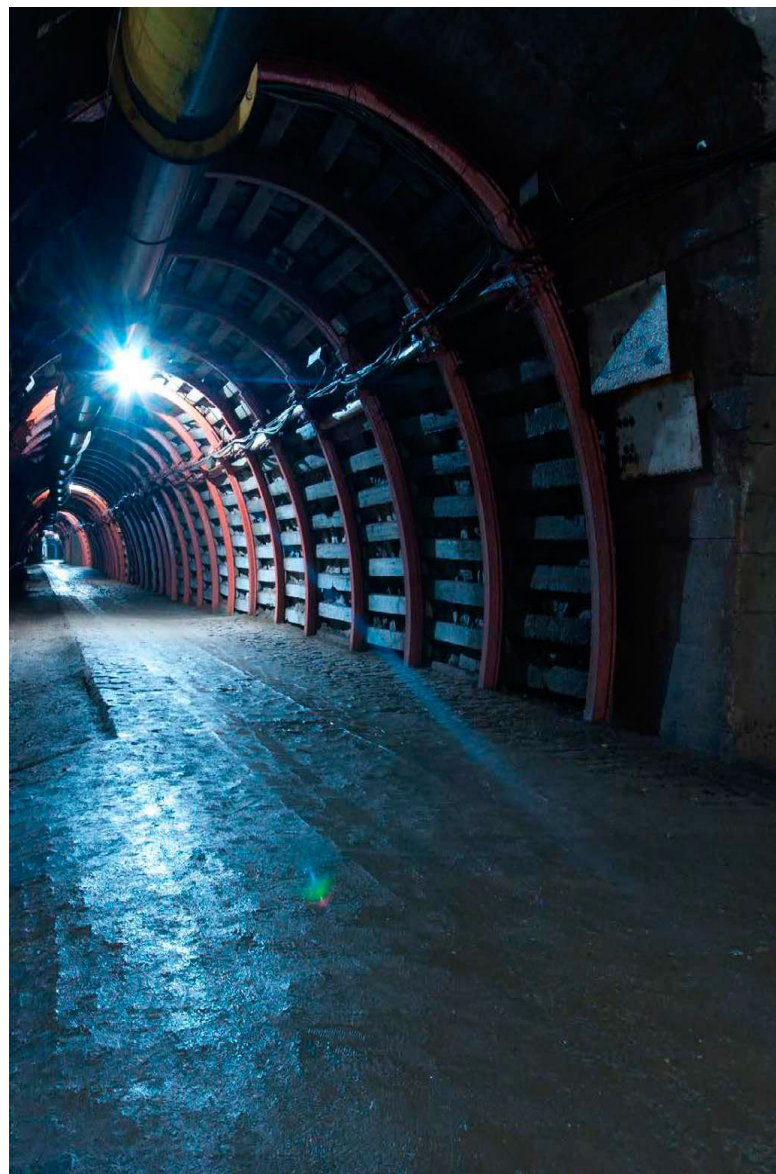
Un sistema de ventilación sobredimensionado:

- Generará costes innecesarios, afectando al conjunto de los costes operativos y de capital del proyecto.
- Provocará un desperdicio energético e ineficiencias en su funcionamiento.
- Supone desafíos de diseño (por su complejidad) y de mantenimiento.
- Supondrá una gestión operativa más compleja.

- La ventilación es un ámbito extremadamente sensible y complejo.
- Abarca diversas disciplinas para:
 - Comprender los factores que afectan la calidad del aire en cada caso y,
 - En consecuencia, determinar la solución para lograr y preservar condiciones seguras bajo tierra.
- Para que la ventilación de la mina cumpla con los estándares regulatorios actuales y los niveles de confort adecuados, se requiere:
 - Un sólido conocimiento de los requisitos legislativos y las mejores prácticas de ingeniería.
 - Un alto conocimiento técnico de todas las disciplinas mineras relacionadas con la ventilación.
 - Un alto nivel tecnológico de todos los equipos y productos necesarios para lograr estos objetivos.



Desde una perspectiva de ingeniería, implica procesos de identificación de cualquier riesgo o peligro e implementación del sistema de ventilación más adecuado para los objetivos.



- El aire de la explotación subterránea se contamina con:
 - Polvo procedente de las labores,
 - Gases originados por la maquinaria y los procesos,
 - Gases emitidos desde los macizos rocosos,
 - Fuerte incremento de su humedad
 - Incremento de su temperatura.

- Por ello, puede suceder que el aire no puede seguir un flujo natural hacia fuera de la mina.

El estudio técnico de la ventilación de la mina debe contemplar, como mínimo, los aspectos que se indican en los apartados siguientes:

- Caracterización de las atmósferas en el emplazamiento
- Definición de situaciones de peligrosidad y riesgos
- Dimensionamiento de necesidades.
 - Medición de caudales requeridos por personal, temperatura, polvo en suspensión, producción minera, consumo de explosivos, equipos diésel, etc.
 - Necesidades de control de temperatura.
 - Necesidades de control y evacuación de gases y aerosoles
 - Medición permanente de gases y condiciones efectivas de ventilación.
 - Determinación de necesidades de actuación en emergencias.
- Cálculo de ventilación de la mina.
- Diseño del circuito de ventilación.
- Cálculo de ventiladores de la mina.
- Dimensionamiento de equipos e infraestructura de ventilación
- Eficiencia y efectividad del sistema.
- Proyecto constructivo
- Definición de estrategias de actuación y creación de procedimientos y protocolos.

Dimensión estratégica

- Los sistemas de ventilación eficaces y eficientes permiten:
 - Mayor productividad:
 - Menor fatiga y estrés por calor para el personal.
 - Polvo y humo pueden obstruir significativamente la visión, generando ineficiencias y posibles riesgos de seguridad.
 - Reducción de enfermedades respiratorias y otros problemas de salud entre el personal.
 - Menos accidentes:
 - Mejor comunicación y visibilidad al evitarse la acumulación de gases y polvo que puede dificultarlas.
 - Reducción de la acumulación de metano en minas grisuosas, evitando acumulaciones peligrosas y posibles explosiones en la mina.
 - Mejora del estado de alerta y los tiempos de reacción, reduciendo el riesgo de accidentes.
 - Menos enfermedades crónicas:
 - Menor inhalación de polvo, previniendo enfermedades respiratorias crónicas (silicosis y neumoconiosis).
 - Menor exposición a gases nocivos (monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno), mitigando sus efectos nocivos.
 - Reducción de la exposición prolongada a contaminantes que pueden provocar diversos problemas de salud.

- Actualmente las operaciones mineras subterráneas son altamente intensivas en el uso de grandes equipos diesel muy potentes. Por ello:
 - Las técnicas de ventilación han tenido obligatoriamente que **reorientarse estratégicamente al estudio** y control de escenarios mineros subterráneos con **altas concentraciones de gases** (comparativamente muy superiores a las de épocas de menor mecanización de las operaciones mineras).
 - Las **altas concentraciones de gases tóxicos** producidas por la operación de:
 - **Equipos diesel**, cada vez mayores en tamaño y de más potencia
 - **Mayor número de servicios**
 - **Mayor número y diversidad de instalaciones** (trituración, talleres, oficinas, etc.),
implican un fuerte aumento de los caudales de aire de ventilación requeridos para diluir y extraer dichos contaminantes.
 - Por otro lado, los altos caudales involucrados, han llevado al **necesario desarrollo de galerías de grandes secciones y de equipos ventiladores también de grandes dimensiones y potencia eléctrica, lo cual implica el desembolso de fuertes sumas de dinero.**

- A medida que las minas se profundizan, a los desafíos de un incremento de la producción y de la seguridad se unen el consecuente incremento de la temperatura y de las emisiones de gases y aerosoles de la maquinaria y los procesos.
- La ventilación se convierte en una cuestión desafiante, requiriendo un sólido conocimiento de conceptos y prácticas que abarcan aspectos como:
 - El control del polvo,
 - La gestión del estrés térmico,
 - La refrigeración y/o calentamiento del aire,
 - El control de gases en la mina,
 - El control de situaciones anómalas o de emergencia,
 - Los riesgos de gases y polvo explosivos,
 - Los riesgos de incendios en mina,
 - La planificación de escape y rescate,
 - La minimización del ruido,
 - La operación y teoría de los ventiladores,
 - La economía de la ventilación en mina
- La formación específica para ingenieros y profesionales es esencial para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores, así como para diseñar sistemas de ventilación eficientes y efectivos.



- Mejorar el flujo de aire en la mina implica observar, medir y comprender minuciosamente como se producen los flujos y como cambia la calidad del aire, lo que puede conducir a
 - Una fuerza laboral con más garantías de protección y
 - Una mayor eficiencia en la producción.
- Considerar el sistema de ventilación en su totalidad y utilizar modelos informáticos para analizar los cambios son prácticas importantes que pueden minimizar riesgos y mejorar la planificación de emergencias.
- La **creatividad y la innovación** son esenciales para abordar las redes de ventilación y anticipar posibles perturbaciones, lo que puede resultar en una mejor calidad del aire para los mineros y en ahorros de costos para la operación.

Ayer



Hoy



¿Mañana?



- Algunos de los avances más recientes en ventilación abordan las tendencias presentadas anteriormente. Entre ellos se incluyen:
 - Ventilación bajo Demanda (VOD)
 - Sistemas de monitorización de la ventilación minera
 - Desarrollos de software para la planificación de la ventilación
 - Software de predicción de impactos y evolución de incendios subterráneos
 - Avances en la tecnología de motores diésel para minimizar las emisiones de material particulado diésel (DPM)
 - Eficiencia energética y ahorro de energía en sistemas de ventilación y refrigeración
 - Monitorización en tiempo real del entorno subterráneo, incluyendo dispositivos para medir el polvo y el material particulado diésel (DPM)

- La ventilación minera va más allá de la seguridad, siendo esencial para la salud y productividad.
 - La inversión en sistemas eficientes no solo cumple con normativas, sino que también contribuye al éxito y sostenibilidad de la mina.
1. **Son una inversión estratégica en salud y productividad**, además de ser crucial para la seguridad
 2. **Enfoque de Ingeniería:** Desde el punto de vista de la ingeniería, la ventilación en espacios subterráneos, especialmente en minas, implica identificar riesgos y aplicar sistemas de ventilación adaptados a los objetivos.
 3. **Requerimientos Actuales:** Los ritmos de explotación minera actual y las grandes dimensiones de las minas exigen requisitos de ventilación más altos, con niveles de confort y seguridad más exigentes según las normativas actuales.
 4. **Accidentalidad y Formación Específica:** La accidentalidad debida a deficiencias en la ventilación obliga a la necesidad de formación específica para ingenieros y profesionales encargados de operaciones subterráneas, garantizando seguridad y eficiencia.
 5. **Importancia Económica y Ambiental:** La construcción y operación de sistemas de ventilación subterránea implica inversiones significativas y costes operativos considerables, representando hasta el 50% del consumo de energía en una mina, con impactos ambientales.
 6. **Es un problema dinámico**

- 7. Evolución Tecnológica:** La ventilación evoluciona con avances tecnológicos en la industria minera, como mejoras en tecnologías de motores diesel, software de modelización de ventilación y capacidades de gestión. Estos avances reevalúan métodos históricos y pueden llevar a modificaciones para mejorar la eficiencia de los sistemas.
- 8. Enfoque Creativo y Flexibilidad:**
- Destaca la importancia de pensar de manera creativa y fuera de lo convencional para mejorar la eficiencia de la ventilación.
 - Se sugieren opciones como la instalación de ventiladores adicionales, recirculación controlada y modificaciones en los ventiladores principales.
 - La flexibilidad en la ventilación, incluyendo principios de Ventilación a Demanda (VOD), es clave para la producción y seguridad.

Resumen de objetivos fundamentales de la ventilación

- La ventilación tiene por objeto mantener una atmósfera en la mina que permita trabajar en condiciones ambientales y de seguridad adecuadas y confortables.
- Las funciones básicas de la ventilación son:
 - Aporte del oxígeno necesario para la respiración (en cantidad y calidad adecuadas).
 - Mantenimiento de una temperatura adecuada.
 - Dilución del polvo.
 - Dilución de gases inflamables o tóxicos.
 - Suministro del aire fresco necesario para atender la operación de diversos equipos e instalaciones (funcionamiento de la maquinaria y sistemas).
- Consecuentemente, la ventilación minera deberá proporcionar a la mina un flujo de aire en cantidad y calidad suficiente para diluir contaminantes a **límites seguros** y en todos los lugares donde el personal esté trabajando.
- Requiere de un sistema **eficiente**, que responda de forma óptima a los requerimientos de la labor minera y, a la vez, sea suficientemente **económico**.

Dudas y preguntas



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGIA
LABORATORIO DE TECNOLOGÍAS MINERAS

TECHNICAL UNIVERSITY OF MADRID
HIGHER TECHNICAL SCHOOL OF MINING AND ENERGY ENGINEERING
MINING TECHNOLOGIES LABORATORY