

Juan Herrera Herbert

# Ventilación natural en espacios subterráneos.

## Conceptos fundamentales y aplicaciones

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](http://www.minasyenergia.upm.es)





# Ventilación natural en espacios subterráneos. Conceptos fundamentales y aplicaciones

**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.



Foto de portada: <https://www.solerpalau.com/>

Identificador DC: <https://oa.upm.es/88234/>

Identificador OAI: [oai:oa.upm.es:88234](https://oai.upm.es/88234)

Copyright © 2025. Todos los derechos reservados

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

Calle Ríos 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 y analiza los conceptos, principios, y aplicaciones de la ventilación natural en espacios subterráneos, con un enfoque en su implementación en minas y túneles. Se discuten tanto los fundamentos teóricos como las consideraciones prácticas para su diseño y operación, con énfasis en su viabilidad técnica en minería profunda.

Los objetivos incluyen:

- **Explicar** los principios físicos y fundamentos de la ventilación natural en minería y túneles.
- **Comprender** la fuerza aeromotriz natural y su influencia en el flujo de aire.
- **Describir** el cálculo de la fuerza aeromotriz natural y la curva característica de la ventilación.
- **Presentar** métodos de cálculo, análisis y diseño para evaluar la implementación efectiva de sistemas de ventilación natural.
- **Analizar** las ventajas, limitaciones y aplicaciones en diferentes entornos subterráneos.
- **Evaluar** la importancia de la ventilación natural en la seguridad y eficiencia operativa.
- **Proporcionar** recomendaciones prácticas para su implementación.
- **Detallar** estrategias de diseño óptimo para entradas y salidas de aire.
- **Explorar** metodologías de optimización y cálculo para mejorar el rendimiento del sistema.
- **Capacitar** en el diseño y optimización de sistemas de ventilación natural en minería.
- **Fomentar** la evaluación crítica de su viabilidad en proyectos específicos.
- **Ofrecer** recomendaciones prácticas basadas en estudios y experiencias reales..

# Introducción a la ventilación natural

## ■ Definición:

La ventilación natural se produce cuando existe una **energía natural** capaz de generar una corriente de aire sin necesidad de ventiladores. Este flujo de aire se produce por el **gradiente térmico** y la diferencia de presión entre distintos puntos del circuito de ventilación.

## ■ Mecanismo de funcionamiento:

- Para que haya un flujo de aire en la mina, es necesario que exista una fuente de energía que ponga el aire en movimiento.
- La **energía térmica** es la principal responsable de este fenómeno, al calentar el aire en ciertas zonas y provocar su ascenso, desplazando el aire frío hacia las áreas de menor temperatura.
- Es un proceso análogo al **"tiro" de una chimenea**, donde el aire caliente menos denso asciende y desplaza al aire frío, creando una circulación constante.
- El aire ingresa por la bocamina de entrada, recorre la totalidad del circuito de ventilación y sale por la bocamina de salida, impulsado por la diferencia de densidad entre las masas de aire.

## ■ Factores que influyen en la ventilación natural:

1. **Diferencia de temperatura** entre el aire de la mina y el exterior.
2. **Diferencia de presión** entre los puntos de entrada y salida.
3. **Humedad y composición del aire**, que afectan su densidad.
4. **Gradiente térmica** en el subsuelo debido al calor de las rocas.
5. **Condiciones climáticas externas**, que pueden modificar el flujo del aire.

## ■ Limitaciones de la ventilación natural:

- Es un fenómeno **inestable y fluctuante**, afectado por la estación del año, el ciclo día-noche y las condiciones climáticas.
- No debe utilizarse como único método de ventilación en faenas subterráneas modernas, ya que su fiabilidad es limitada.
- Su efectividad depende de la **dimensión y configuración del circuito de ventilación**, siendo más viable en túneles de corta longitud.

# Principios físicos de la ventilación natural

- **Fundamentos que explican el movimiento del aire en sistemas subterráneos:**
  - **Convección Natural:**
    - Se genera por diferencias de temperatura entre el aire dentro de la mina/túnel y el exterior.
    - El aire caliente, menos denso, asciende, mientras que el aire frío desciende, generando una circulación espontánea.
    - Este fenómeno es responsable del tiro natural en minas y túneles.
  - **Diferencia de Presión Barométrica:**
    - La presión atmosférica varía con la altitud y las condiciones climáticas, influyendo en el flujo de aire.
    - Este efecto se hace más notorio en minas ubicadas en regiones de gran variabilidad de presión.
    - Se puede estimar utilizando la **ecuación de Bernoulli** o modelos empíricos basados en gradientes de presión.

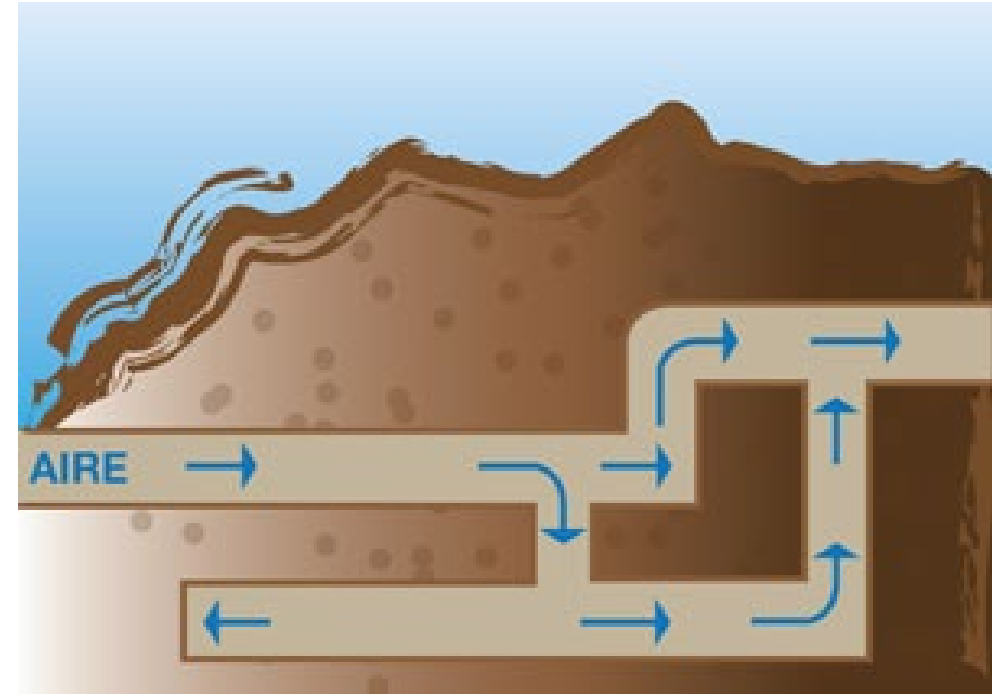


Ilustración esquemática que muestra:

- Entrada de aire frío por la bocamina.
- Recorrido del aire dentro de la mina.
- Salida del aire caliente por la bocamina de retorno.
- Diferencia de temperaturas y densidades que generan el flujo de aire.

# Factores que afectan la ventilación natural

- **Elementos que influyen en la eficacia y estabilidad del flujo de aire en minas y túneles:**
  - **Gradiente térmico:** Diferencia de temperatura entre el interior y el exterior que impulsa la circulación del aire.
  - **Longitud y pendiente de los túneles:** Afectan la resistencia y dirección del flujo de aire.
  - **Ubicación de entradas y salidas de aire:** Diseñar puntos estratégicos para optimizar la eficiencia de la ventilación.
  - **Obstáculos y resistencias en el sistema:** Factores como derrumbes, estrechamientos o equipos en el túnel pueden reducir el flujo natural de aire.
- **Factores clave adicionales:**
  - **Temperatura del aire** en la mina y en el exterior.
  - **Diferencia de altura** entre las bocas de entrada y salida.
  - **Resistencia aerodinámica** causada por la rugosidad y geometría del túnel.
- **Elementos a considerar:**
  - Factores existentes en la mina y su impacto en el flujo de aire.
  - Puntos críticos (bocaminas, gradiente térmico, zonas de mayor resistencia).



## ■ Tabla de factores que afectan la ventilación natural

Factor	Descripción
Diferencia de temperatura	Afecta la densidad del aire y su movimiento.
Diferencia de presión	Puede incrementar o reducir el flujo de aire.
Humedad y composición del aire	Influyen en la densidad y en la capacidad del aire para moverse.
Gradiente térmico en la mina	Genera la energía de presión necesaria para mover el aire.
Condiciones climáticas externas	Pueden alterar la dirección y velocidad del flujo de aire.

# Cálculo de la Fuerza Aeromotriz Natural (FAN)

- La fuerza aeromotriz natural (FAN):
  - **Se define como la presión diferencial o energía generada por diferencias de temperatura y presión entre dos puntos en una mina subterránea o túnel que impulsa el flujo de aire en ella.**
  - Es un componente clave en el diseño de sistemas de ventilación natural.
- Ecuación básica:  $FAN = \Delta P = g \cdot \Delta h \cdot (\rho_1 - \rho_2)$ 

Donde:

  - $g$  = aceleración gravitacional (9.81 m/s<sup>2</sup>).
  - $\Delta h$  = diferencia de elevación entre entrada y salida (m).
  - $\rho_1, \rho_2$  = densidades del aire en entrada y salida (kg/m<sup>3</sup>).
- El caudal volumétrico ( $Q$ ) se obtiene mediante:  $Q = \sqrt{\frac{2 \cdot FAN}{\varepsilon \cdot \rho}} \cdot A$ 

Donde  $\varepsilon$  es el coeficiente de resistencia y  $A$  el área de la sección transversal.
- **La fuerza aeromotriz depende de la geometría del circuito de ventilación y de la resistencia aerodinámica del sistema.**

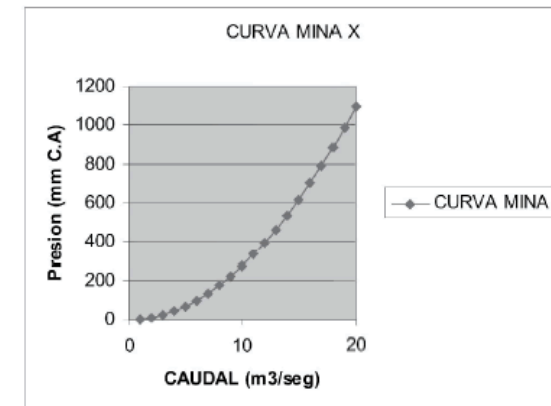


- Factores que afectan la fuerza aeromotriz:
  - Diferencia de altura (desnivel) entre puntos de entrada y salida de aire.
  - Diferencia de densidad del aire debido a variaciones de temperatura.
  - Aceleración de la gravedad ( $g$ ).
  - Variaciones estacionales y diarias de la temperatura.
  - Influencia de la velocidad y dirección del viento.
  - Efecto de la estratificación térmica en espacios profundos.
- Aplicación práctica:
  - La FAN se utiliza para evaluar la capacidad de ventilación natural en minas.
  - Permite optimizar el diseño de sistemas de ventilación forzada cuando la FAN no es suficiente.



# Curva característica de la ventilación natural

- Definición:
  - Representa la relación entre el caudal de aire  $Q$  y la pérdida de presión  $\Delta P$  (pérdidas de carga) en un sistema sin ventiladores.
  - Influencia de la geometría del sistema: la forma, tamaño y rugosidad de las galerías afectan la curva.
- Representación gráfica:
  - Es una gráfica que representa la presión diferencial (Eje y:  $\Delta P$ ) y el flujo de aire (Eje X:  $Q$ ).
  - Curva de FAN: Línea ascendente que representa la fuerza aeromotriz.
  - Curva de pérdidas de carga: Parábola que representa la resistencia del sistema.
  - Punto de operación: Intersección de ambas curvas.
- Desarrollo de la curva característica:
  - Relación entre caudal y fuerza aeromotriz: La Fuerza Aeromotriz Natural (FAN) genera el flujo de aire.
  - El caudal depende de la FAN y las pérdidas de carga del sistema.
- Pérdidas de carga:
  - Se calculan considerando la resistencia al flujo en galerías y túneles.
  - Dependen de la longitud, sección y rugosidad de las galerías.



- **Puntos de operación y estabilidad:**
  - Intersección entre la curva de FAN y la curva de pérdidas de carga.
  - Determina el caudal y la presión de operación del sistema.
- **Factores que influyen en la curva:**
  - Densidad y temperatura del aire: afectan la FAN y las pérdidas de carga.
  - Diferencia de altura entre entrada y salida: mayor altura incrementa la FAN.
  - Resistencia de galerías y túneles: longitud, sección y rugosidad determinan las pérdidas de carga.
- **Influencia de la geometría del espacio subterráneo:**
  - Efecto de longitud, sección y rugosidad: galerías más largas o estrechas aumentan las pérdidas de carga. La rugosidad incrementa la resistencia al flujo.
  - Presencia de obstáculos y singularidades: curvas, bifurcaciones y obstáculos aumentan las pérdidas de carga.
  - Optimización de la geometría: diseño de galerías con secciones uniformes y mínimos obstáculos, y maximización del caudal de aire y reducción de pérdidas de carga.



# Diseño de entradas y salidas de aire

- **El objetivo de su diseño es maximizar el flujo natural de aire optimizando la entrada y salida de aire para mejorar la eficiencia de la ventilación natural y aprovechar la Fuerza Aeromotriz Natural (FAN) utilizando diferencias de altura, temperatura y presión para generar flujos de aire eficientes.**
  
- Consideraciones de Diseño:
  - Diferencias de altura: ubicar entradas en zonas bajas y salidas en puntos elevados para aprovechar el efecto chimenea.
  - Evitar obstrucciones: minimizar curvas, bifurcaciones y obstáculos que generen pérdidas de carga.
  - Disposición en zonas con menor resistencia: ubicar aberturas en áreas con menor resistencia al flujo de aire.
  
- Diseño de entradas y salidas de aire:
  - Ubicación:
    - Entradas: En zonas con acceso a aire fresco y limpio (ej.: laderas de colinas).
    - Salidas: En puntos elevados para facilitar la expulsión del aire caliente y contaminado.
  - Dimensiones:
    - Aberturas suficientemente grandes para permitir un flujo adecuado sin pérdidas de presión excesivas.
    - Cálculo de la sección transversal en función del caudal requerido.
  - Protección: Instalar rejillas o filtros para evitar la entrada de agua, escombros y fauna.

- **Parámetros de diseño:**
  - Ubicación de las bocas de mina o túnel: maximizar la diferencia de altura entre entradas y salidas para aumentar la FAN.
  - Tamaño y geometría de las aperturas: diseñar aperturas con formas aerodinámicas para reducir turbulencias y pérdidas de carga.
  - Minimización de restricciones al flujo: evitar estrangulamientos y cambios bruscos de dirección.
  
- **Ubicación y dimensionamiento de aberturas:**
  - Principios de diseño: aprovechar el efecto chimenea y la diferencia de presión natural.
  - Consideración de la topografía y vientos predominantes: ubicar entradas en dirección al viento predominante para maximizar el flujo.
  - Cálculo de la sección necesaria: usar fórmulas de dinámica de fluidos para determinar el tamaño óptimo de las aberturas.
  
- **Tipos de Aberturas y su Eficiencia:**
  - Chimeneas y pozos: eficaces para expulsar aire caliente debido al efecto chimenea.
  - Bocaminas y túneles: requieren diseño aerodinámico para minimizar pérdidas de carga.
  - Sistemas de regulación y control: uso de compuertas o ventilas para ajustar el flujo de aire según necesidades.
  
- **Recomendaciones Adicionales:**
  - Simulación computacional: usar software de dinámica de fluidos (CFD) para modelizar el flujo de aire y optimizar el diseño.
  - Mantenimiento periódico: limpieza y revisión de aberturas para evitar obstrucciones y garantizar su eficiencia.
  - Integración con ventilación forzada: combinar ventilación natural y mecánica en sistemas complejos para maximizar la eficiencia.

# Aplicaciones y limitaciones de la ventilación natural en espacios subterráneos

## Aplicaciones:

- Minas de pequeña escala y túneles cortos:
  - Ideal para minas con bajo volumen de producción y túneles de corta longitud.
  - Eficaz en túneles de bajo tráfico y galerías de exploración o desarrollo.
- Espacios con gradientes térmicos adecuados:
  - Aprovecha diferencias naturales de temperatura para generar flujos de aire.
  - Eficiente en minas con gradientes térmicos marcados (ej.: minas poco profundas).
- Ventilación inicial en etapas de exploración o desarrollo:
  - Reduce costes en fases iniciales donde la ventilación mecánica no es viable.
- Sistemas híbridos para reducir consumo energético:
  - Combina ventilación natural y mecánica para optimizar costos y eficiencia.
- Control de polvo y gases en túneles poco profundos:
  - Diluye contaminantes en espacios con baja producción de gases o polvo.
- Minas metálicas y no metálicas:
  - Aplicable en etapas iniciales y operaciones de bajo impacto.
  - Limitada en minas profundas y de alta producción.
- Minas de carbón:
  - Riesgos por acumulación de metano y polvo de carbón.
  - Requiere sistemas híbridos o mecánicos para garantizar seguridad.
- Túneles de gran longitud:
  - Limitada eficacia; requiere ventilación mecánica complementaria.

## Limitaciones:

- Dependencia de factores climáticos:
  - La efectividad varía con cambios en temperatura y presión atmosférica.
  - Fluctuaciones estacionales afectan la estabilidad del flujo de aire.
- Bajo control sobre caudales y dirección del flujo: difícil ajustar el flujo ante cambios en la producción de gases o calor.
- Ineficiencia en minas profundas:
  - La FAN disminuye con la profundidad debido a la homogeneización térmica.
  - En minas >500 m, la ventilación natural suele ser insuficiente como sistema primario.
- Resistencia en redes complejas de galerías: aumento de pérdidas de carga en sistemas con múltiples bifurcaciones y obstáculos.
- Limitaciones en minas de carbón: incapacidad para diluir gases inflamables (ej.: Metano) de manera eficiente.
- Dependencia climática: condiciones externas (viento, temperatura) pueden reducir su eficacia.

## Recomendaciones para optimizar su uso:

- Análisis previo del sistema: evaluar gradientes térmicos, topografía y resistencia de galerías.
- Uso de sistemas híbridos: combinar ventilación natural con ventiladores auxiliares para aumentar eficiencia.
- Monitoreo continuo: implementar sensores de flujo y calidad del aire para ajustar el sistema.
- Diseño eficiente de aberturas: maximizar diferencias de altura y minimizar obstrucciones.

# Conclusión y recomendaciones

## ■ Conclusiones

- La ventilación natural es una opción viable en ciertos escenarios, pero presenta limitaciones importantes.
- Su eficiencia depende de la configuración de las entradas y salidas de aire, así como de las condiciones ambientales.
- En sistemas más complejos, es necesario combinarla con ventilación forzada.
- Es una estrategia eficiente en minas y túneles con diferencias de altura y gradientes térmicos favorables.
- Su aplicación está limitada por condiciones ambientales y resistencia aerodinámica del sistema.
- Es crucial realizar simulaciones y cálculos detallados para verificar su viabilidad antes de implementarla.
- En escenarios de ventilación insuficiente, debe complementarse con sistemas mecánicos auxiliares.
- Es una solución eficiente y económica para la renovación de aire en espacios subterráneos.
- Su implementación requiere un diseño cuidadoso para maximizar su efectividad y minimizar sus limitaciones.

## ■ Recomendaciones

- Evaluar con estudios detallados las condiciones específicas del entorno antes de implementar ventilación natural.
- Diseñar estratégicamente las entradas y salidas de aire.
- Considerar monitoreo y control para evaluar la eficiencia y necesidad de ventilación adicional.
- Evaluación inicial: realizar un estudio detallado de las condiciones ambientales y estructurales antes de diseñar el sistema de ventilación.
- Monitoreo continuo: implementar sistemas de monitoreo para asegurar que la ventilación sea adecuada en todo momento.
- Combinación con sistemas mecánicos: en casos donde la ventilación natural no sea suficiente, considerar la combinación con ventilación mecánica.
- Usar como sistema auxiliar en túneles cortos o etapas iniciales.
- Integrar sensores para monitorear calidad del aire y ajustar diseños.
- Priorizar ventilación mecánica en minas profundas o con alta producción de gases.
- Realizar simulaciones CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) para optimizar diseños.

# 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