

**Juan Herrera Herbert**

# **Estudio, medida y trabajos de caracterización de la ventilación in situ.**

**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)





# Estudio, medida y trabajos de caracterización de la ventilación in situ. 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://subroca.es/>

Identificador DC: <https://oa.upm.es/88127/>

Identificador OAI: [oai:oa.upm.es:88127](https://oai.upm.es/88127)

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

- **La caracterización de las condiciones reales en el emplazamiento de la ventilación subterránea en operación es un aspecto esencial para garantizar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad en operaciones mineras e industriales, al permitir detectar las necesidades de actuación en cada momento.**
- Este análisis cubre:
  - Estudio de las condiciones existentes de ventilación en las minas.
  - Medición de caudales, temperatura y humedad para determinar el peso específico del aire.
  - Análisis de las resistencias de la red de ventilación y adaptación a la evolución de la mina.
  - Medición de presión en ventiladores y determinación de caudales.
- Objetivos del trabajo de caracterización
  - Medición y análisis de presión, caudal, temperatura y composición del aire.
  - Identificación y cuantificación de gases nocivos (CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, etc.).
  - Evaluación de la efectividad de sistemas de ventilación y propuesta de mejoras.
  - Cumplimiento de normativas de seguridad y optimización de condiciones de trabajo.
  - Prevención de riesgos: Mitigación de gases tóxicos y deficiencia de oxígeno.
  - Diseño y optimización de sistemas de ventilación para mejorar la eficiencia operativa.

# Introducción a la caracterización de la ventilación subterránea

- **Objetivos del Estudio de Ventilación Subterránea:**
  - Medir y analizar presión, caudal, temperatura y composición del aire.
  - Identificar y cuantificar gases nocivos (CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>).
  - Evaluar la efectividad de los sistemas de ventilación y proponer mejoras.
  - Cumplir con las normativas de seguridad y optimizar las condiciones laborales.
  - Identificar fuentes de contaminación y riesgos asociados.
- **Factores que Afectan la Ventilación Subterránea:**
  - Geometría de las galerías: secciones irregulares y obstrucciones.
  - Fuentes de calor: equipos mecánicos, procesos de voladura y temperatura del entorno.
  - Tipo de explotación: métodos de extracción y número de frentes de trabajo.
  - Condiciones ambientales externas: temperatura, humedad y presión atmosférica.
  - Sistemas de ventilación: diseño, caudal, potencia y eficiencia de los ventiladores.
- **Procedimientos de Medición y Control**
  - Medición de caudales, temperatura y humedad para conocer el peso específico del aire.
  - Estudio de resistencias de la red para prever ventilación adecuada en el futuro.
  - Medición de presión total, estática y dinámica en ventiladores principales y secundarios.
  - Análisis de gases: monitoreo de gases explosivos y de baja concentración de oxígeno.

**La caracterización detallada de la ventilación subterránea es esencial para garantizar la seguridad, la eficiencia operativa y el cumplimiento de normativas. Mediante mediciones precisas y un análisis de los sistemas de ventilación, se asegura un ambiente de trabajo seguro y productivo.**

# Diseño metodológico para el estudio de la ventilación

## 1. Definición y planificación del estudio

- Determinar el tipo de estudio requerido.
- Analizar el sistema de ventilación existente.
- Verificar técnicas de medición aplicables.
- Calcular los caudales de ventilación necesarios.
- Planificar el levantamiento de datos in situ.

## 2. Campaña de medición

- Definir objetivos específicos:
  - Seguridad: condiciones atmosféricas seguras.
  - Cumplimiento normativo: ITC 04.8.01, OSHA, ISO.
  - Optimización: eficiencia del sistema de ventilación.
- Selección de métodos de medición:
  - Caudal: tubos de Pitot, anemómetros, gas trazador.
  - Presión: manómetros absolutos y diferenciales.
  - Temperatura y humedad: sensores termo-higrométricos.
  - Gases: detectores portátiles, monitoreo continuo.
  - Trazado de aire: humo o trazadores gaseosos.



**El diseño metodológico debe abordar de manera integral todos los aspectos del sistema de ventilación de la mina, desde el análisis de su funcionamiento actual hasta la simulación de futuros escenarios, con el fin de garantizar la seguridad y eficiencia operativa.**

### 3. Selección de puntos de medición

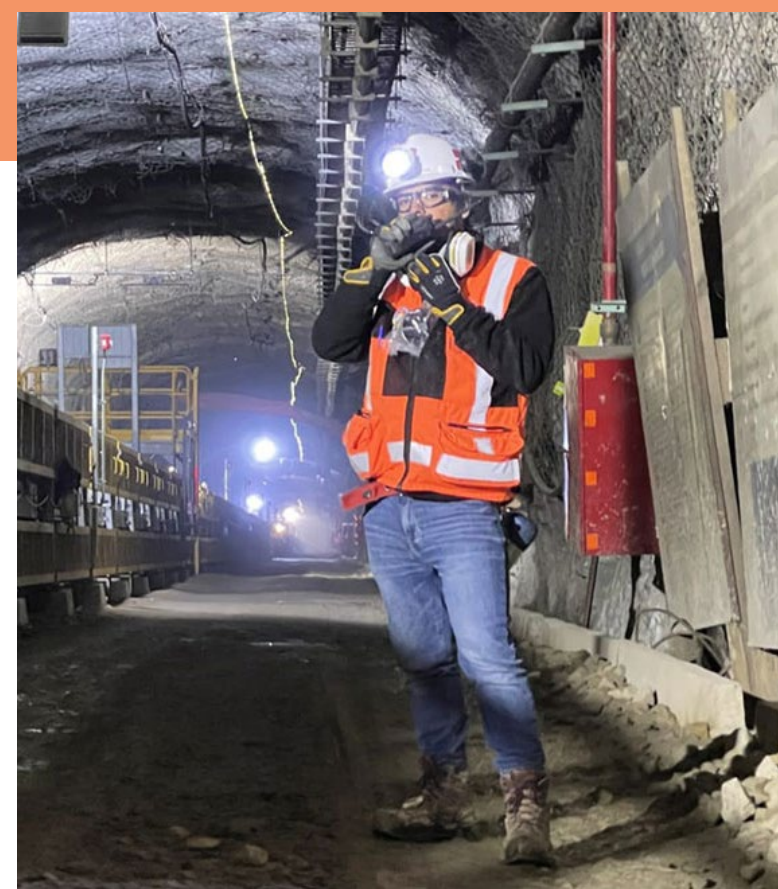
- Ubicación estratégica en galerías principales, secundarias y ventiladores.
- Identificación de zonas críticas:
  - Áreas con acumulación de gases (metano, CO<sub>2</sub>).
  - Zonas con alta resistencia aerodinámica.
  - Lugares con alta exposición a contaminantes (diésel, explosivos).

### 4. Procesamiento de datos

- Implementar y calibrar un modelo de simulación del circuito de ventilación (VentSim™ o similar).
- Evaluar la respuesta del sistema ante cambios en la mina.

### 5. Procedimientos de seguridad

- EPIs de protección frente a problemas de ventilación.
- Emergencias:
  - Protocolos de evacuación por presencia de gases peligrosos.
  - Comunicación en tiempo real con el centro de control.
- Coordinación con personal:
  - Identificación de rutas seguras.
  - Monitoreo en tiempo real de la atmósfera.



**Un diseño metodológico sólido permite optimizar la ventilación en minas subterráneas, garantizando seguridad, eficiencia y cumplimiento normativo.**

# Medición de la presión y pérdidas de carga en ventilación subterránea

## Conceptos y Medición de Presión en Ventilación Subterránea

- **Presión Absoluta vs. Presión Manométrica**
  - **Presión Absoluta ( $P_a$ ):** medida con respecto al vacío absoluto.
  - **Presión Manométrica ( $P_m$ ):** diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica ( $P_a - P_{a,tm}$ ).
  - **Presión Diferencial ( $\Delta P$ ):** diferencia de presión entre dos puntos en un sistema.
- **Instrumentos para Medir Presión**
  - **Presión Absoluta:**
    - **Barómetros:** miden la presión atmosférica y se utilizan como referencia en sistemas cerrados.
    - **Manómetros electrónicos:** sensores de alta precisión para presiones absolutas en minería.
  - **Presión Manométrica:**
    - **Manómetros de tubo en U:** determinan la diferencia de presión en sistemas de ventilación.
    - **Sensores de presión digital:** ofrecen mediciones precisas en tiempo real.
  - **Presión Diferencial:**
    - **Manómetros diferenciales:** comparan presiones en distintos puntos del sistema.
- **Importancia de la medición de presión en minería**
  - Permite evaluar la eficiencia del sistema de ventilación.
  - Detecta posibles obstrucciones o pérdidas de carga excesivas.
  - Contribuye al diseño y optimización del flujo de aire.

## Determinación de Pérdidas de Carga y Resistencia Aerodinámica

### – Concepto de pérdidas de carga y resistencia aerodinámica

- **Pérdida de carga:** Reducción de presión en un sistema debido a fricción y turbulencias.
- **Resistencia aerodinámica:** Oposición del aire al flujo en conductos y galerías.
- Factores que influyen: rugosidad de las paredes, velocidad del aire y geometría de las galerías.

### – Métodos para determinar pérdidas de carga

- **Levantamientos depresiométricos:** Miden la caída de presión en distintas secciones del sistema.
- **Cálculo de pérdidas de carga:**
  - Aplicación de ecuaciones de flujo en túneles y ductos (Darcy-Weisbach, Hazen-Williams).
  - Uso de coeficientes de fricción y rugosidad.
- **Métodos experimentales con sensores de presión:**
  - Instalación de sensores en galerías para monitoreo

en tiempo real.

- Análisis de variaciones de presión con cambios en el caudal.

### – Determinación de resistencia normal y específica

- **Resistencia normal (R):** relación entre pérdida de carga y flujo volumétrico de aire.
- **Resistencia específica (r):** resistencia por unidad de longitud en función de la sección y rugosidad del conducto.
- **Medición en campo:**
  - Evaluación de caídas de presión en distintos tramos.
  - Comparación con valores teóricos para validar el modelo de ventilación.

### – Aplicaciones prácticas en ventilación minera

- Optimización de la potencia de los ventiladores.
- Reducción del consumo energético en la ventilación.
- Detección de anomalías en el flujo de aire.

# Medición del caudal de aire

- La medición precisa del caudal de aire es esencial para garantizar los objetivos de seguridad, eficiencia y sostenibilidad de la ventilación en minería subterránea.
  
- **Métodos de medición de caudal en ventilación subterránea**
  - **Técnica del gas trazador**
    - Uso de gases inertes ( $N_2$ ,  $SF_6$  o  $CO_2$ ) para medir el caudal a partir del tiempo de tránsito.
    - Aplicación en secciones complejas o con velocidades de aire bajas.
    - Ideal para detectar fugas y evaluar la eficiencia del circuito de ventilación.
  
  - **Anemómetros de hélice**
    - Utilizados en galerías de gran sección con flujo estable.
    - Herramienta portátil y de fácil uso, ideal para mediciones periódicas.
    - Sensibles a turbulencias y variaciones en la dirección del flujo.
  
  - **Tubos de Pitot**
    - Miden el caudal a partir de la diferencia entre presión estática y dinámica.
    - Alta precisión en conductos con flujo laminar.
    - Utilizados en combinación con sensores de presión diferencial.

- **Velocímetros ultrasónicos**
  - Uso de ondas ultrasónicas para determinar la velocidad del aire.
  - Funcionamiento preciso en secciones irregulares y condiciones turbulentas.
  - Permiten monitoreo continuo en tiempo real.
  
- **Metodologías de medición en diferentes áreas de la mina**
  - **Medición en galerías principales y secundarias**
    - Uso de anemómetros de hélice o tubos de Pitot en secciones amplias.
    - Mediciones en múltiples puntos para determinar el caudal promedio.
    - Corrección de valores considerando la estratificación del flujo de aire.
  
  - **Medición en conducciones de ventilación secundaria**
    - Uso de tubos de Pitot o velocímetros ultrasónicos en ductos de ventilación.
    - Realización de mediciones en varios puntos debido a la alta variabilidad del flujo.
    - Evaluación de la eficiencia del sistema de distribución de aire.
  
  - **Medición en ventiladores principales de extracción e impulsión**
    - Determinación del caudal con técnica del gas trazador o anemómetros de alta precisión.
    - Comparación del caudal real con las especificaciones técnicas del ventilador.
    - Evaluación del rendimiento energético y detección de pérdidas en la red de ventilación.

- **Importancia y aplicaciones de la medición del caudal de aire**
  - **Beneficios de la medición precisa del caudal**
    - Garantiza condiciones seguras para los trabajadores.
    - Permite el ajuste óptimo del sistema de ventilación.
    - Reduce costos energéticos mediante la optimización del flujo de aire.
    - Facilita el cumplimiento de normativas de seguridad y salud ocupacional.
  
  - **Aplicaciones en minería subterránea**
    - Evaluación del desempeño de los sistemas de ventilación.
    - Identificación de áreas con deficiencia de ventilación.
    - Diagnóstico de fallas y detección de fugas en circuitos de ventilación.
  
  - **Tecnologías emergentes para la medición del caudal**
    - Integración de sensores IoT para monitoreo en tiempo real.
    - Uso de drones para medición de caudal en zonas de difícil acceso.
    - Aplicación de inteligencia artificial para análisis predictivo de la ventilación.

# Medición de secciones de galerías y conductos

## Métodos convencionales de medición

### ■ Cálculo del área mediante perfil geométrico

- Determinación de la sección transversal considerando la forma de la galería:
  - Rectangular:  $\text{Área} = \text{ancho} \times \text{alto}$ .
  - Trapezoidal:  $\text{Área} = \frac{1}{2} \times (\text{base mayor} + \text{base menor}) \times \text{altura}$ .
  - Elíptica/Circular:  $\text{Área} = \pi \times (\text{radio mayor} \times \text{radio menor})$ .
  - Irregular: Aproximación mediante subdivisión en figuras simples.
- Aplicación de fórmulas geométricas basadas en dimensiones medidas in situ.

### ■ Herramientas tradicionales para la medición

- Flexómetros y cintas métricas:
  - Método manual simple y accesible.
  - Adecuado para secciones pequeñas y regulares.
- Distanciómetros láser:
  - Medición rápida y precisa de distancias y alturas.
  - Útil en galerías con formas simples y de fácil acceso.
- Planimetría y perfiles a escala para documentación y análisis comparativo.



**La elección del método de medición depende de la precisión requerida, la accesibilidad de la galería y los recursos disponibles. Los métodos convencionales son económicos y accesibles, pero los especializados ofrecen una mayor exactitud y digitalización del entorno subterráneo.**

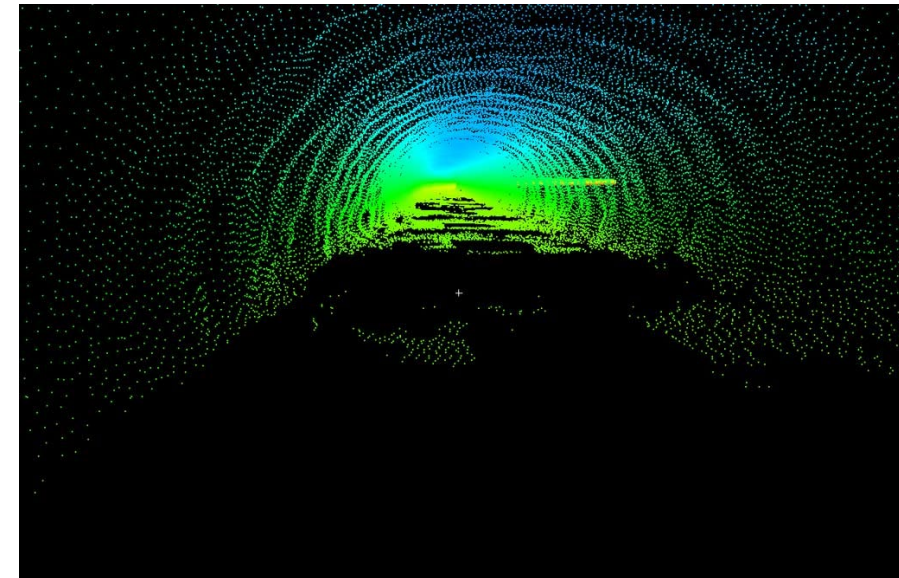
## ■ Ventajas y limitaciones de los métodos convencionales

- Ventajas:
  - Bajo costo y fácil acceso.
  - No requiere equipos avanzados.
- Limitaciones:
  - Mayor susceptibilidad a errores humanos.
  - Menor precisión en galerías con geometría irregular.

## Métodos de medida directa con equipos especializados

### ■ Escáneres láser 3D para digitalización de secciones

- Uso de tecnología LiDAR para capturar la geometría de la galería con alta precisión.
- Generación de nubes de puntos y modelos 3D detallados.
- Permite evaluar cambios estructurales a lo largo del tiempo.
- Aplicación ideal en galerías con geometría irregular o difícil acceso.

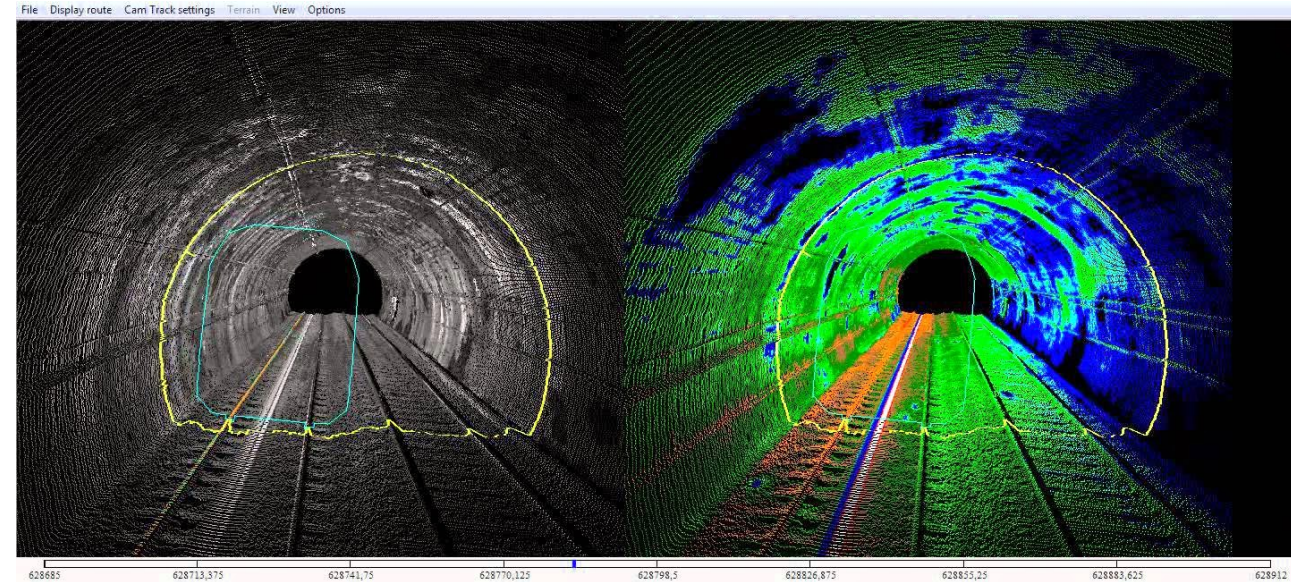


## ■ Fotogrametría para reconstrucción de perfiles

- Uso de cámaras de alta resolución para capturar imágenes detalladas de la sección.
- Reconstrucción tridimensional de perfiles mediante software especializado.
- Permite comparación con planos previos para detectar deformaciones y cambios estructurales.
- Útil en túneles de difícil acceso donde los métodos manuales son inviables.

## ■ Ventajas y limitaciones de los métodos especializados

- Ventajas:
  - Alta precisión y digitalización detallada de datos.
  - Permite análisis comparativo a lo largo del tiempo.
  - Reduce el riesgo de errores humanos.
- Limitaciones:
  - Mayor coste de los equipos y software requerido.
  - Requiere personal capacitado para operar los dispositivos y analizar los datos.



# Desarrollo de la campaña de mediciones

## Equipos y metodología aplicada en campo

### ■ Equipos y herramientas de trabajo

- Para una caracterización precisa de la ventilación subterránea se emplean diversos instrumentos:
  - Sensores de presión: miden presiones absolutas y diferenciales en diferentes puntos del circuito de ventilación.
  - Anemómetros (hélice, ultrasónicos, térmicos): evalúan la velocidad del aire en galerías y conductos.
  - Manómetros: determinan la presión estática y dinámica en la red de ventilación.
  - Detectores de gases ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $NO_x$ ,  $H_2S$ , etc.): analizan la calidad del aire y niveles de contaminantes.
  - Termohigrómetros: registran la temperatura y humedad relativa en el ambiente subterráneo.

### ■ Metodología aplicada en campo. Para garantizar mediciones representativas y comparables, se aplican procedimientos estandarizados:

- Medición de presión: uso de sensores en puntos estratégicos para detectar variaciones de presión.
- Medición de caudal: aplicación de anemómetros y tubos de pitot en distintas secciones del circuito.
- Medición de gases: uso de detectores portátiles y estaciones fijas para muestreo en zonas críticas.
- Medición de temperatura y humedad: uso de termohigrómetros para evaluar confort térmico y condiciones de trabajo.

**Una campaña de medición bien estructurada permite optimizar la ventilación subterránea, mejorar la seguridad y eficiencia energética, y asegurar el cumplimiento normativo.**

## Técnicas de aforo, evaluación de esclusas y registro de datos

### ■ Técnicas de aforo en galerías:

- Determinación de flujos de aire en distintos niveles de la mina o túnel.
- Evaluación de velocidades y direcciones para identificar deficiencias en ventilación.
- Uso de técnica del gas trazador en circuitos complejos para determinar caudales y detectar fugas.

### ■ Medición en esclusas y puertas de ventilación

- Evaluación de pérdidas de carga en sistemas de control de flujo.
- Determinación del grado de hermeticidad y eficiencia en la distribución del aire.
- Uso de manómetros diferenciales para detectar fugas de presión y optimizar el sistema de ventilación.

### ■ Registro de datos y análisis

- Creación de hojas de medición estandarizadas: registro estructurado para análisis posterior.
- Uso de software de modelado y simulación: representación digital del circuito de ventilación (Ej.: VentSim™ y similares).
- Comparación con valores normativos: verificación del cumplimiento de regulaciones como ITC 04.8.01, OSHA e ISO.



# Medición de gases en entornos subterráneos

## Importancia y métodos de medición de gases

- Importancia de la medición de gases: el objetivo principal es identificar concentraciones de gases peligrosos para prevenir accidentes, explosiones y enfermedades ocupacionales.
  - Control de gases tóxicos ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ).
  - Prevención de deficiencia/enriquecimiento de oxígeno ( $\text{O}_2$ ).
  - Detección de gases explosivos e inflamables ( $\text{CH}_4$ , COV).
- **Métodos de lectura directa y análisis in situ.** Permiten mediciones inmediatas en campo sin necesidad de análisis externo.
  - Sensores electroquímicos: detectan  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{NO}_2$  mediante reacciones químicas.
  - Espectrómetros portátiles (infrarrojos y láser): identificación precisa de gases como metano y  $\text{CO}_2$ .
  - Detectores de ionización por fotoionización (PID): detectan compuestos orgánicos volátiles (COV).
    - Ventajas: monitoreo en tiempo real y rápida respuesta ante fugas.
    - Limitaciones: requieren calibración frecuente y mantenimiento.



**El uso de equipos adecuados y estrategias de medición combinadas permite un control efectivo de la atmósfera en minas y túneles, reduciendo riesgos y mejorando la seguridad.**

## Métodos indirectos y procedimientos en mina

- **Métodos indirectos (muestreo y análisis en laboratorio):** Cuando se necesita un análisis detallado y de alta precisión, se utilizan métodos de muestreo:
  - Tubos colorimétricos: método rápido para detectar concentraciones aproximadas de gases.
  - Captura en bolsas o cilindros de gas: permite análisis en laboratorio mediante cromatografía de gases.
  - Absorción en líquidos reactivos: determinación de gases específicos mediante reacciones químicas.
    - Ventajas: alta precisión y detección de trazas de gases.
    - Limitaciones: resultados no inmediatos y necesidad de equipos especializados.
- **Procedimientos de medición de gases en mina**
  - Ubicación estratégica de sensores:
    - Instalación en zonas críticas (acumulación de gases, galerías profundas).
    - Colocación en diferentes niveles (piso, altura media y techo).
    - Uso de detectores personales en trabajadores para monitoreo continuo.
  - Medición en tiempo real vs. muestreo periódico:
    - Monitoreo en tiempo real: uso de sensores fijos y portátiles para alertas inmediatas.
    - Muestreo periódico: evaluación de tendencias a lo largo del tiempo.
    - Recomendación: combinar ambos métodos para mejorar la seguridad y detección temprana de riesgos.



# Medición de humedad y temperatura

## ■ Importancia del control de humedad y temperatura

- Preservación de infraestructura y equipos: evita corrosión y degradación.
- Seguridad y salud del personal: reduce enfermedades respiratorias y estrés térmico.
- Eficiencia y productividad: mejora la concentración y el confort laboral.

## ■ Procedimientos y herramientas para la medición de humedad

- Psicrómetros de bulbo seco y húmedo
  - Comparan la temperatura ambiental y la de evaporación para calcular la humedad relativa.
  - Uso en campo donde no se pueden instalar sensores electrónicos.
- Sensores de humedad relativa
  - Utilizan materiales higroscópicos o tecnologías capacitivas.
  - Aplicación en sistemas de monitoreo ambiental en minas.

## ■ Medición de la temperatura del aire subterráneo

- Termómetros de contacto: miden temperatura en superficies como paredes de pozos y maquinaria.
- Termómetros infrarrojos:
  - Capturan la radiación térmica sin contacto.
  - Útiles para medir temperatura en túneles o maquinaria inaccesible.
- Estimación de temperatura equivalente en minas profundas:
  - Desafío: el calor geotérmico aumenta la temperatura con la profundidad.
  - Solución: uso de sensores combinados y modelos matemáticos para prever condiciones térmicas.

# Determinación del peso específico del aire

## ■ Importancia de la densidad del aire

- Afecta el flujo de aire y las pérdidas de carga en los conductos.
- Influye en la distribución de gases en galerías y túneles.
- Determina la eficiencia de los ventiladores y el dimensionamiento de sistemas de ventilación.
- Permite optimizar el flujo de aire y evaluar riesgos de acumulación de gases peligrosos.

## ■ Factores que afectan la densidad del aire

- Temperatura y humedad relativa
  - Mayor temperatura → Menor densidad (aire más liviano, menor capacidad de arrastre de gases).
  - Mayor humedad → Menor densidad (el vapor de agua desplaza moléculas de aire seco).
- Composición de gases presentes:
  - CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono): Más denso que el aire, se acumula en zonas bajas.
  - CH<sub>4</sub> (Metano): Menos denso que el aire, se concentra en zonas altas.

- Vapor de agua: Reduce la densidad al desplazar moléculas más pesadas.

## ■ Métodos de cálculo y medición

- Cálculo teórico
  - Uso de la ecuación de estado de los gases ideales.
  - Aplicación de tablas empíricas para valores específicos de temperatura y humedad.
- Medición en campo
  - Termohigrómetros: miden temperatura y humedad relativa.
  - Barómetros digitales: determinan la presión atmosférica en mina.
  - Sensores de gases: detectan compuestos que alteran la densidad del aire.
- Recomendación: Corregir valores considerando altitud y presión local en cada mina o túnel para obtener mediciones precisas.

# Evaluación del funcionamiento de los ventiladores

## ■ Medición de la eficiencia de ventiladores principales y secundarios

- Determinación de la curva característica del ventilador
  - Curva de rendimiento: relación entre caudal de aire y presión generada en distintas condiciones.
  - Importancia: permite seleccionar y ajustar los ventiladores para un rendimiento óptimo.
- Relación entre caudal, presión y potencia consumida
  - Caudal: volumen de aire transportado ( $\text{m}^3/\text{s}$  o CFM).
  - Presión: resistencia al paso del aire (Pa o mm H<sub>2</sub>O).
  - Potencia consumida: energía requerida (kW).
  - Eficiencia: se maximiza cuando el ventilador mueve el mayor caudal posible con la menor potencia consumida.

## ■ Parámetros de control operativo y optimización

- Velocidad de rotación y consumo eléctrico
  - Mayor velocidad: más caudal y presión, pero también más consumo eléctrico.
  - Uso de variadores de frecuencia (VFD) para ajustar velocidad y optimizar eficiencia.



**Medir la curva característica del ventilador, analizar la relación entre caudal, presión y potencia, y optimizar parámetros como la velocidad y el consumo eléctrico son claves para una ventilación eficaz y eficiente**



- Eficiencia en función de la carga de trabajo
  - Carga variable: la demanda de ventilación fluctúa según la actividad minera.
  - Optimización: ajustar la velocidad del ventilador para minimizar el consumo sin afectar la ventilación.
- Factores que afectan la eficiencia
  - Condiciones ambientales: temperatura y humedad modifican la densidad del aire.
  - Estado del equipo: suciedad o daños en las palas afectan el rendimiento.
  - Mantenimiento regular: inspecciones y limpiezas mejoran la eficiencia operativa.

# Análisis de los resultados

**Un análisis detallado de los resultados permite detectar deficiencias, optimizar el sistema de ventilación y mejorar la seguridad. La combinación de monitoreo en tiempo real y mantenimiento predictivo garantiza un entorno más seguro y eficiente.**

## ■ Interpretación de los datos obtenidos

- Comparación con estándares normativos
  - Evaluación de niveles de ventilación según normativas (ISO 9001, OSHA, NIOSH).
  - Análisis de caudal, presión y temperatura para detectar desviaciones y aplicar correcciones.
- Identificación de áreas con deficiencia de ventilación
  - Localización de zonas críticas con bajo flujo de aire o alta concentración de contaminantes.
  - Detección de problemas en conductos o ventiladores que afectan la distribución del aire.

## ■ Optimización del sistema de ventilación

- Ajuste de ventiladores y compuertas de regulación
  - Modificación de velocidad y caudal de ventiladores según

los resultados obtenidos.

- Uso de compuertas de control para redirigir el flujo de aire y mejorar la eficiencia.
- Estrategias de ventilación natural y mecánica combinada
  - Ventilación natural: Uso de ventilación cruzada y chimeneas solares.
  - Ventilación mecánica combinada: Integración con ventiladores para reducir el consumo energético.

## ■ Mejoras en seguridad y eficiencia

- Monitoreo continuo con sensores IoT
  - Implementación de sensores para medición en tiempo real de flujo de aire, temperatura y contaminantes.
  - Beneficio: detección temprana de fallos para respuestas rápidas.
- Mantenimiento preventivo basado en datos
  - Mantenimiento predictivo con análisis de patrones de desgaste en ventiladores y conductos.
  - Optimización de costes: prevención de fallos críticos, menor tiempo de inactividad.

# Conclusiones y recomendaciones

## ■ Conclusiones

### – **Importancia de la medición ambiental**

- La medición precisa de gases, humedad, temperatura y densidad del aire es fundamental para la seguridad y eficiencia operativa en entornos subterráneos.
- Métodos de monitoreo en tiempo real y muestreo periódico complementan una evaluación integral de la calidad del aire.

### – **Evaluación del funcionamiento de ventiladores**

- El análisis de curvas características, eficiencia energética y variaciones de carga permite optimizar el rendimiento de los ventiladores.
- La implementación de variadores de frecuencia y ajustes estratégicos mejora la distribución del aire y reduce costos operativos.

### – **Optimización del sistema de ventilación**

- La combinación de ventilación natural y mecánica contribuye a la eficiencia energética.
- El uso de monitoreo continuo con sensores IoT mejora la capacidad de respuesta ante cambios en las condiciones del aire subterráneo.

## ■ Recomendaciones

- **Mejorar la seguridad con medición continua**
  - Utilizar sensores avanzados para la detección de gases peligrosos, control de humedad y temperatura.
  - Implementar protocolos de calibración y mantenimiento para garantizar mediciones precisas.
- **Optimizar la eficiencia energética**
  - Regular la velocidad de los ventiladores según la demanda para minimizar el consumo eléctrico.
  - Implementar sistemas de ventilación híbridos (natural y mecánico) para mejorar la circulación del aire.
- **Incorporar tecnología y mantenimiento predictivo**
  - Integrar sensores IoT para monitoreo remoto y alertas tempranas de problemas en la ventilación.
  - Aplicar estrategias de mantenimiento preventivo basadas en datos recopilados para evitar fallos operativos.
- **Cumplimiento normativo y capacitación permanente del personal**
  - Asegurar que los niveles de ventilación cumplan con estándares internacionales (OSHA, NIOSH, ISO 9001).
  - Capacitar al personal en uso de equipos de medición y respuesta ante emergencias.

# 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