

**Juan Herrera Herbert**

# **Atmósfera y clima 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](http://www.minasyenergia.upm.es)



## Atmósfera y clima 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.

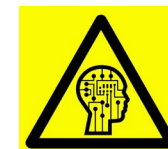
Todas las ideas que aquí se desarrollan tienen un carácter general y formativo y el ámbito de utilización se circunscribe exclusivamente a la formación de los estudiantes de la UPM. La respuesta ante un caso particular requerirá siempre de un análisis específico para poder dictaminar la idoneidad de 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 la calidad del aire en espacios subterráneos, los factores que influyen en la atmósfera minera y las estrategias para medir, controlar y mitigar riesgos asociados con la presencia de gases, humedad, temperatura y polvo en minas subterráneas.
  
- Objetivos:
  - Comprender la composición y características del aire en minería subterránea.
  - Identificar los principales gases presentes en la atmósfera de la mina y sus riesgos.
  - Conocer las fuentes de emisión de gases y las concentraciones límites establecidas.
  - Analizar los métodos de detección de gases, incluyendo la pervivencia de la lámpara de gasolina.
  - Explicar el clima de la mina y su impacto en la operación y en la seguridad.
  - Evaluar los efectos de la humedad y temperatura sobre los trabajadores y la infraestructura.
  - Comprender el impacto del polvo en la salud y seguridad de los trabajadores y los métodos de medición y control.
  - Presentar estrategias de control y prevención de riesgos atmosféricos en minería subterránea.
  - Proporcionar recomendaciones para mejorar la calidad del aire en espacios subterráneos.

# **Características de la calidad del aire y su composición en espacios subterráneos**

## Objetivos específicos

- Permitir un análisis de la composición de la atmósfera en minas, con énfasis en la clasificación de los gases presentes, sus efectos fisiológicos y los métodos de detección y medición utilizados en entornos mineros.
- Entender los límites permisibles de exposición, las fuentes de aparición de gases y el uso de dispositivos de medición para garantizar la seguridad en el ambiente subterráneo.
- Comprender la composición de la atmósfera en minas y su importancia en la seguridad minera.
- Identificar los diferentes gases presentes en las minas, incluyendo oxígeno (O<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), entre otros.
- Analizar los efectos fisiológicos de los gases sobre los trabajadores y los límites permisibles de exposición.
- Explicar las fuentes de aparición de los gases en las minas y los factores que influyen en su concentración.
- Describir los dispositivos y métodos utilizados para la detección y medición de gases en entornos mineros.

# 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, SO<sub>2</sub> o NO<sub>x</sub>.

## ■ 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.

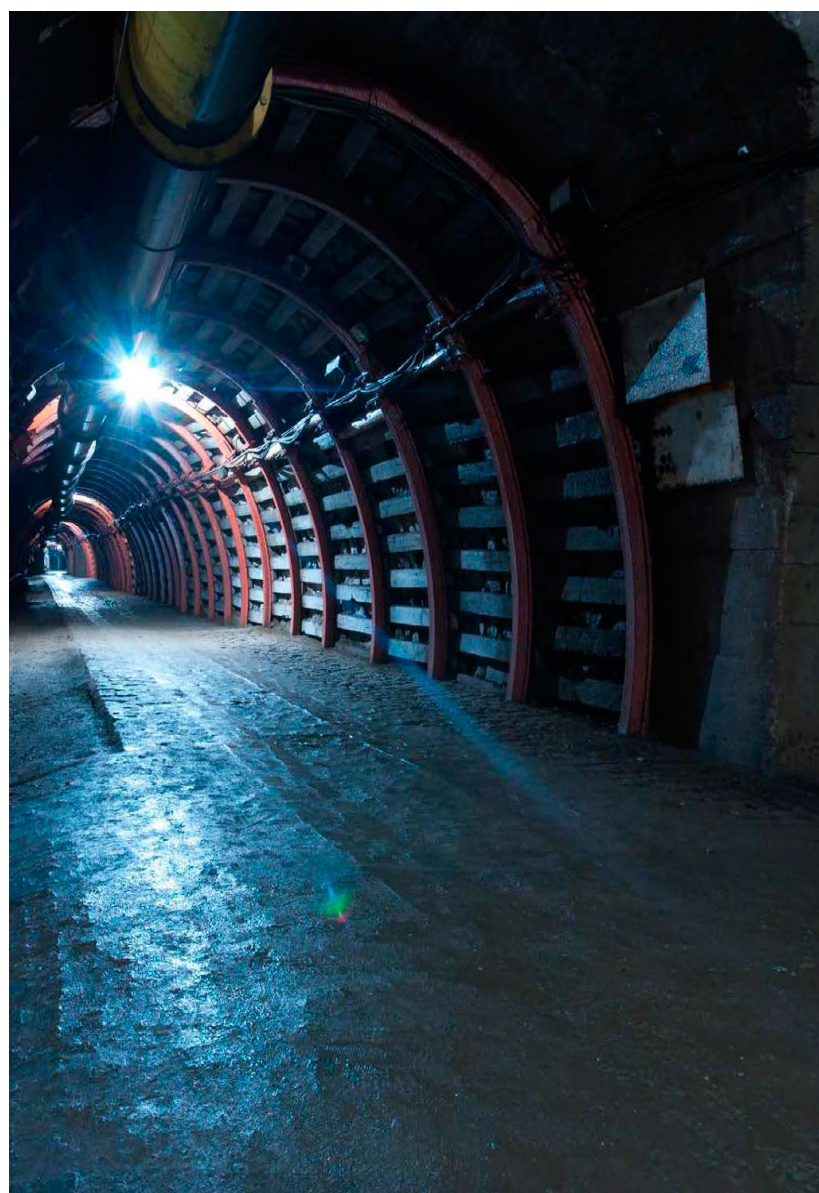
COMPOSICION DEL AIRE SECO

GAS	% (volumen)	% (peso)
Nitrógeno - N <sub>2</sub>	78,09	75,53
Oxígeno - O <sub>2</sub>	20,95	23,14
Anh. Carbóno - CO <sub>2</sub>	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.**



## La atmósfera de mina

- Es el aire que existe en el interior de una mina.
- Este aire se contamina con:
  - Polvo procedente de las labores,
  - Gases originados por la maquinaria y los procesos,
  - Gases emitidos desde los macizos rocosos: CO, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, entre otros
  - Fuerte incremento de su humedad: es variable según la temperatura, la ventilación y la interacción con formaciones geológicas.
  - Incremento de su temperatura.
- Factores que afectan en la atmósfera de mina:
  - Temperatura (profundidad, calor corporal, maquinaria, oxidaciones, etc.).
  - Humedad.
  - Grado de contaminación.
- ITC 04.7.05: T máx eq. = 33°C

- La atmósfera minera tiene una composición variable y depende de la geología, la actividad minera y la ventilación.
  - La falta de renovación del aire propicia la acumulación de gases tóxicos e inertes.
  - La recirculación de aire puede concentrar contaminantes en ciertos sectores.
  
- La presencia de gases de origen natural ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , Rn) y antropogénico ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ) supone efectos sobre la seguridad.
  - Los gases pesados como  $\text{CO}_2$  y Rn tienden a acumularse en galerías bajas o zonas estancadas.
  
- La temperatura, humedad y presión influyen en la distribución y acumulación de estos gases.
  - Un incremento de la temperatura ( $\sim 2.5\text{-}3^\circ\text{C}$  cada 100 m de profundidad) influye en la expansión de gases y en la capacidad de los trabajadores para disipar calor.
  - Un incremento de la presión puede afectar la disolución y liberación de ciertos gases atrapados en los poros de la roca.
  - La variabilidad en la humedad y temperatura afectan a la dispersión de gases y polvo.
  - La humedad elevada puede facilitar la condensación de contaminantes en equipos y estructuras.
  - En minas con alta humedad, los  $\text{NO}_x$  pueden dar lugar a la formación de ácido nítrico, corroyendo equipos.
  
- La vigilancia continua y el monitoreo de calidad del aire son esenciales para evitar riesgos en minería subterránea.
  - El  $\text{CH}_4$  y el  $\text{CO}$  pueden acumularse en techos y galerías mal ventiladas, aumentando riesgos de explosión e intoxicación.
  
- Diferencias con la atmósfera superficial:
  - Menor contenido de oxígeno en zonas con mala ventilación o presencia de gases inertes.
  - Mayor concentración de  $\text{CO}_2$  y gases contaminantes debido a procesos mineros y actividad biológica subterránea.

# Gases en la atmósfera de una mina

Gases en la atmósfera de una mina				
Gas	Densidad relativa (Aire = 1)	Efecto	Origen	Concentr. Adm. (Max)
CO	0,97	Tóxico (Explosivo)	Oxidación del carbón Combustión incompleta Voladuras	50 ppm (100)
CO <sub>2</sub>	1,53	Asfixiante	Formación mineral Combustión Voladura	5000 ppm (12500)
NO + NO <sub>2</sub>	1,69	Tóxico	Motores termicos Voladura	10 ppm (25)
SH <sub>2</sub>	1,19	Tóxico (Explosivo)	Acción del agua sobre piritas o yesos.	10 ppm (50)
SO <sub>2</sub>	2,26	Tóxico	Combustión de piritas Motores termicos Voladura en piritas	5 ppm (10)
H <sub>2</sub>	0,07	Explosivo	Formación mineral Gasificación del carbón Recarga de baterías	1000 ppm (10000)
CH <sub>4</sub>	0,55	Explosivo Asfixiante	Formación mineral	8000 ppm (15000)
Aldehídos (C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub> O)	1,17	Tóxico	Motores termicos	(2 ppm)
Radón	7,66	Radioactivo	Formación mineral	130000 Mev

- Cuando el aire entra en la mina, se deteriora, con una disminución del oxígeno y un aumento de la presencia de otros gases.
- La composición del aire de la mina puede experimentar variaciones significativas según la zona y la circulación del aire.
- **Al analizar el aire de la mina y sus gases, es importante especificar sus densidades y concentraciones para comprender:**
  - **El riesgo para la fuerza laboral expuesta,**
  - **Los posibles efectos combinados, y**
  - **Las medidas preventivas a implementar.**

# Gases presentes

Gases presentes en minería subterránea	
Gases inertes y sofocantes (desplazamiento de oxígeno)	Nitrógeno ( $N_2$ ) Dióxido de carbono ( $CO_2$ ) Acetileno (HC) Metano ( $CH_4$ )
Gases tóxicos	Monóxido de carbono (CO) Dióxido de azufre ( $SO_2$ ) Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) Sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ )
Gases inflamables y explosivos	Metano ( $CH_4$ ) Hidrógeno ( $H_2$ ) Monóxido de carbono (CO) Acetileno (HC) Sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ )
Gases radiactivos	Radón (Rn) y otros gases radiactivos

- Para cada uno de estos gases, se requiere entender:
  - Efectos fisiológicos
  - Límites permisibles en su concentración y reglamentación
  - Causas de su aumento/reducción durante los trabajos
  - Causas de aparición en las labores subterráneas en el caso de los peligrosos
  - Aparatos de detección y medida



# Oxígeno

- Incoloro, inodoro, insípido, no tóxico, fundamental para la vida.
- 19% concentración mínima en condiciones ambientales normales.
  - Norma en edificios: = 0,56 m<sup>3</sup>/min/hombre (10-30 cfm/hombre)
  - Norma minera: 3 m<sup>3</sup>/min por hombre
  - En concentraciones por debajo del 16% empieza a crear problemas respiratorios
- Es consumido en la respiración, oxidación del carbón, putrefacción de la madera, etc.
- Se mide por medio de medidores automáticos y tubos colorimétricos



## Efectos de la deficiencia de oxígeno.

Contenido de Oxígeno	Efectos
17 %	Respiración rápida y profunda. Equivale a 2.500 m.s.n.m.
15 %	Vértigo, vahídos, zumbido en oídos, aceleración latidos.
13 %	Pérdida de conocimiento en exposición prolongada.
9 %	Desmayo e inconsciencia.
7 %	Peligro de muerte. Equivale a 8.800 m.s.n.m.
6 %	Movimientos convulsivos, muerte.

- Entre las causas de reducción del contenido en oxígeno en una atmósfera de mina, se encuentran:
  - Absorción por el propio mineral (oxidación de pirita, carbón, etc.).
  - Respiración: según el trabajo realizado, una persona consume de 0,25 a 2,5 litros/min de  $O_2$ , inhalando de 7 a 60 litros/min de aire y exhalando de 0,2 a 2,4 litros/min de  $CO_2$ .
  - Mezcla de aire con diversos productos gaseosos preexistentes.
  - Emisiones continuas, desgasificación instantánea, explosiones de metano o polvo de carbón e incendios.
  - Extensión de los frentes de trabajo y velocidad del aire: la concentración disminuye más en las zonas donde el aire está en calma o se mueve lentamente. Cuando la velocidad es baja, por ejemplo, en obras abandonadas o de recuperación, no es infrecuente una disminución del 1 % en el  $O_2$ .



<https://www.trainanddevelop.ca/>

- Esquema de las causas de reducción del oxígeno en una atmósfera subterránea
  - Desplazamiento por gases inertes:
    - Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): Se acumula en zonas bajas y desplaza el oxígeno.
    - Nitrógeno ( $\text{N}_2$ ): Puede proceder de formaciones geológicas profundas.
    - Metano ( $\text{CH}_4$ ): Presente en minas de carbón y puede desplazar el  $\text{O}_2$  sin ser tóxico.
  - Consumo de oxígeno por procesos químicos y biológicos:
    - Oxidación de minerales (ej. pirita, que reacciona con el  $\text{O}_2$  formando ácido sulfúrico).
    - Combustión de motores diésel y explosivos en minería.
    - Actividad microbiana en ciertas condiciones de humedad y temperatura.
  - Acumulación en Espacios Confinados:
    - Cámaras cerradas, túneles sin ventilación o áreas con circulación restringida pueden desarrollar zonas de aire pobre en oxígeno.
    - En explotaciones profundas, el calor geotérmico y la alta humedad pueden alterar la distribución del  $\text{O}_2$ .



## Aporte de O<sub>2</sub> para la respiración

- Teóricamente, el ser humano, cuando realiza un trabajo físico, necesita aproximadamente 10 l/seg de aire para respirar.
- La normativa española establece un caudal mínimo de 40 l/seg y persona.
- Un aspecto importante a considerar es el contenido en oxígeno mínimo que debe tener el aire, que se fija en un 19 %, frente al 21 % que tiene normalmente.



### Inhalación de oxígeno y aire en la respiración humana

	Inhalado	Exhalado
Oxígeno	21 %	15 %
Nitrógeno	78 %	74 %
Dióxido de carbono	0,04 %	4 %
Vapor de agua	0,75 %	6,20 %

## Respiración humana

### INHALACION DE OXIGENO Y AIRE EN LA RESPIRACION HUMANA

ACTIVIDAD	REPOSO	MODERADA	MUY VIGOROSA
Ritmo respiratorio por minuto,	1 - 12	30	40
Aire inhalado por respiración m <sup>3</sup> /seg. x 10 <sup>3</sup> ,	5 - 13	46 - 59	98
Oxígeno consumido en m <sup>3</sup> /seg. x 10 <sup>-6</sup> ,	4,70	33,04	47,20
Cociente respiratorio "CR",	0,75	0,90	1,00

$$CR = \frac{CO_2^{exhalado}}{O_2^{consumido}}$$

# Uniforme Minero PARA MINA SUBTERRÁNEA

El uniforme de un minero de mina subterránea se destaca por su casco con lámpara. Su uniforme y equipo de seguridad personal lo mantiene seguro ante algún incidente y le permite hacer su trabajo de manera eficiente.

Aquí te presentamos todo lo que deben llevar los mineros antes de adentrarse a las entrañas de la Tierra.

## Equipo de seguridad PESO APROX: 4 A 6 KGS

### Lámpara de Led o Con batería:

Para iluminar hacia donde se mire o se camine en la oscuridad sin tener que usar tus manos.

### "Key Out"

Es un sistema de localización personalizado que permite saber en que parte de la mina se ubica un minero.

### Cinturón

Permite portar el autorrescatador, o herramientas adicionales.

### Overol con reflejantes

Viste al minero para protegerlo de cualquier salpicadura. Tiene reflejantes para que puedan ser visibles en la oscuridad.

### Lentes de seguridad

Protege a los ojos de sólidos, líquidos y polvo.

### Respirador

Evita la absorción de polvos o gases.

### Guantes de protección

Protegen las manos de cortaduras o raspones, además de aislar corriente eléctrica.

### Casco con cinta reflejante

Protege la cabeza de cualquier caída de objetos que pudieran causar un accidente a los mineros.

### Orejas

Evita daños en la audición.

### Autorrescatador

Dispositivo de un solo uso, para propósitos de escape solamente, proporciona protección respiratoria contra monóxido de carbono en ambientes o áreas contaminadas por gases.

### Botas impermeables

Poseen suela antiderrapante para evitar caídas, frente de metal para proteger el pie de la caída de objetos y tiene suela aislante.

- Métodos de monitorización y control de los niveles de oxígeno:
  - Monitoreo en tiempo real: Uso de sensores de oxígeno en equipos personales y estaciones fijas.
    - Permiten controlar los flujos del sistema de ventilación según se requiera.
    - Tienen gran capacidad de comunicación, ayudando a controlar la distancia desde un sistema SCADA la presencia de gases y su concentración.
    - Emite alertas visuales y sonoras cuando los límites de los gases, según las normas, son sobrepasados o si existe muy bajo nivel de oxígeno.
    - Permite tomar medidas inmediatas de acuerdo a los riesgos presentes.
    - Permite que cualquier persona pueda visualizar los parámetros actuales gracias a la pantalla que posee.
  - Ventilación adecuada: Renovación del aire para mantener niveles seguros de O<sub>2</sub>.
  - Detección temprana de gases desplazantes: Control de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y otros gases inertes.
  - Protocolos de seguridad en espacios confinados: Uso de equipos de respiración autónoma si los niveles de O<sub>2</sub> son bajos.



Sistema de monitoreo de gases  
Fuente: <https://hcamineria.cl/>

# Nitrógeno

- Es un gas incoloro, inodoro e insípido.
- No sufre ninguna acción química durante la respiración.
- Inerte y altamente resistente a la combinación.
- Su peligro radica en que un aumento de su presencia en el aire reduce el O<sub>2</sub> por desplazamiento hasta niveles peligrosos para la vida humana al generar riesgo de asfixia.
- Causa la muerte por sofocamiento cuando el porcentaje de nitrógeno pasa de 88%.
- No se acumula en áreas bajas como el CO<sub>2</sub>, pero puede concentrarse en zonas con mala ventilación.
- Poco soluble en agua, lo que evita su eliminación por condensación o filtración en las rocas.
- Desempeña un papel importante en la estabilidad de la atmósfera minera y en la prevención de explosiones de metano en minas de carbón. En minería de carbón, el nitrógeno **se usa para inertizar atmósferas y prevenir explosiones.**



## Fuentes de enriquecimiento de nitrógeno en el aire de la mina. Puede ocurrir debido a:

- Origen natural:
  - Gasificación en estado puro o asociado con otros gases de la tierra (minería de potasa).
  - Liberación desde formaciones geológicas profundas con bolsas de gas atrapado como resultado de desprendimientos de rocas y "golpes de carbón".
  - Oxidación de sulfuros en minerales, que consume oxígeno y deja un ambiente enriquecido en  $N_2$ .
- Origen antropogénico:
  - Uso de explosivos como ANFO (nitrato de amonio-fuel oil), que libera óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y puede dejar residuos de  $N_2$ .
  - Humos de voladuras con explosivos enriquecidos con nitroglicerina.
  - Inyección artificial de nitrógeno para prevenir explosiones en minas de carbón.
  - Procesos de combustión de motores diésel y otras reacciones químicas.



## Efectos del nitrógeno en la seguridad minera

- Riesgo de asfixia (hipoxia):
  - El nitrógeno desplaza el oxígeno sin generar síntomas de advertencia, lo que puede provocar pérdida de consciencia y muerte en minutos.
  - Áreas con menos del 19.5% de oxígeno se consideran peligrosas para la respiración humana.
- Interferencia en procesos de detección de gases:
  - En presencia de gases como metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el nitrógeno puede alterar las mediciones de la atmósfera.
- Uso controlado para seguridad minera:
  - En minas de carbón, se inyecta nitrógeno para desplazar el oxígeno y prevenir explosiones de metano.
  - Se utiliza en algunos procesos de inertización de galerías abandonadas.

## Métodos de monitoreo y control

- Monitoreo continuo: Uso de sensores de  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$  en zonas críticas. El monitoreo de oxígeno y nitrógeno es clave para evitar accidentes en espacios confinados.
- Ventilación adecuada: Para evitar acumulaciones de nitrógeno en áreas confinadas.
- Protocolos de ingreso a espacios confinados: Medición previa de la atmósfera antes de acceder.
- Inertización controlada: Aplicación de nitrógeno en minería de carbón solo bajo estricta supervisión.



## Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

- Incoloro, inodoro y con sabor ligeramente ácido
- Se disuelve bien en agua y es incombustible
- No es tóxico, sino asfixiante. Puede acumularse en operaciones mal ventiladas. En concentraciones de tan solo el 5-6%, causa dolores de cabeza, pérdida de consciencia e incluso la muerte.
- Las medidas de monitoreo y control son esenciales para prevenir la acumulación excesiva de dióxido de carbono.
- A pesar de ser un componente normal del aire (0,03%), el dióxido de carbono se encuentra con frecuencia en áreas abandonadas y mal ventiladas de una mina.
- El valor máximo permisible según la normativa española vigente es del 0,5 por 100.
- Procede de la putrefacción de la madera y de la oxidación del carbón
- En condiciones normales pesa 1,98 kg/m<sup>3</sup> por lo que tiende a irse al suelo de las labores, zonas bajas y espacios confinados.
- Se mide por la lámpara de gasolina (se apaga sin O<sub>2</sub>), detector automático y tubos colorimétricos

### Efectos de altas proporciones de dióxido de carbono en la respiración de las personas.

Proporción de CO <sub>2</sub> en el aire aspirado (% en volumen)	Síntomas
0,3 – 0,5	Dificultad para respirar y dolor de cabeza.
0,5	Aumento del 5% en la ventilación pulmonar.
1	Aumento de la cantidad de aire respirado sin perjudicar la salud. Calor y sudoración, falta de atención, fatiga, ansiedad, falta de energía, debilidad en las piernas.
2 – 4	Más del doble de la cantidad de aire respirable (aumento del 50% en la ventilación pulmonar), lo que provoca fatiga rápida. Dolor de cabeza tras varias horas de exposición.
4 – 8	La respiración se triplica y se vuelve difícil. Fuerte necesidad de respirar y signos de agotamiento. Jadeo intenso, hiperventilación y fatiga hasta el punto de no poder respirar, acompañado de dolor de cabeza intenso. La exposición prolongada a 50.000 ppm (5 %) puede provocar efectos irreversibles.
8 - 10	Pérdida del conocimiento y cese de la respiración, grave riesgo de muerte. Con una probabilidad del 20 al 25%, la muerte puede ocurrir en segundos.

En minería subterránea, su concentración puede aumentar peligrosamente debido a procesos geológicos, actividad minera y ventilación deficiente, generando riesgo de asfixia y afectación al rendimiento fisiológico de los trabajadores.

## Fuentes de $\text{CO}_2$ en minería

- Origen natural:
  - Desprendimiento desde rocas y vetas de carbón en zonas profundas.
  - Actividad volcánica y geotérmica en minas con interacción magmática.
  - Descomposición de materia orgánica atrapada en formaciones geológicas.
- Origen antropogénico:
  - Combustión de motores diésel en maquinaria y generadores.
  - Uso de explosivos, especialmente aquellos basados en nitrato de amonio.
  - Respiración de los trabajadores y actividad biológica en minas con alta humedad.

250 - 450 ppm	Concentración atmosférica típica.
450 - 600 ppm	Concentración aceptable en el interior.
600 - 1.000 ppm	Concentración aceptable en el interior. Pero se puede notar olores
1.000 - 2.500 ppm	Concentración tolerable. Somnolencia
2.500 - 5.000 ppm	Concentración tolerable. Dolor de cabeza, aire estancado, pérdida de concentración, pérdida de atención y somnolencia..
6.000 - 30.000 ppm	Concentración peligrosa, sólo exposiciones breves.
30.000 - 50.000 ppm	Concentración extrema. Intoxicante, aumenta la frecuencia cardíaca y náuseas
>50.000 ppm	Concentración extrema. Pérdida de conocimiento, daño cerebral permanente y muerte.

**El dióxido de carbono es uno de los parámetros básicos de calidad del aire a controlar**

## Efectos del dióxido de carbono en la seguridad minera

### ■ Riesgo de asfixia (hipercapnia):

- **Concentraciones superiores al 3% afectan la salud y pueden ser mortales** sin una ventilación adecuada.
- Aumenta el nivel de CO<sub>2</sub> en la sangre, afectando la función cerebral.
- Puede generar náuseas, confusión y pérdida del conocimiento en minutos.

### ■ Interferencia en la calidad del aire:

- Desplaza el oxígeno en espacios confinados, reduciendo la seguridad de los trabajadores.
- Se acumula en fosos, túneles bajos y áreas mal ventiladas.
- Su acumulación en zonas bajas y túneles mal ventilados lo convierte en un peligro silencioso en minas profundas.

### ■ Utilidad en minería controlada:

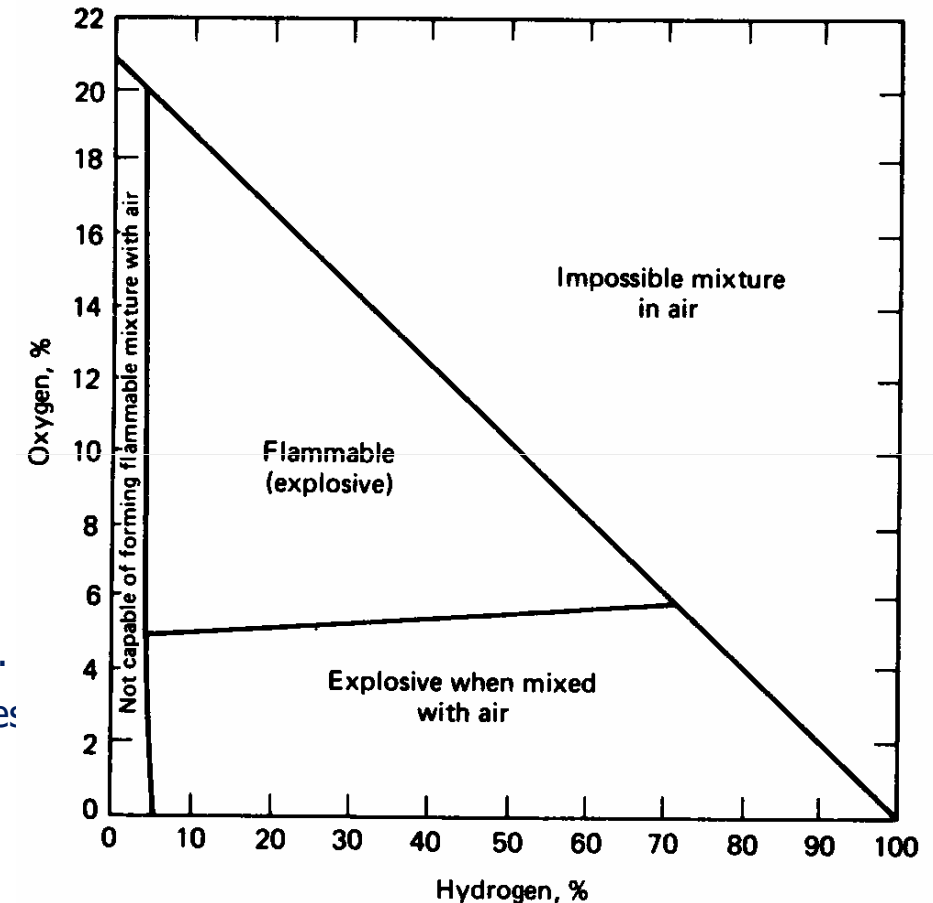
- En algunas minas de carbón, **se usa CO<sub>2</sub> para inertizar galerías y prevenir explosiones de metano.**
- **Puede emplearse en supresión de incendios subterráneos** al reducir la concentración de oxígeno.

### ■ Métodos de monitoreo y control

- ingreso a áreas con CO<sub>2</sub> elevado.
- Monitoreo continuo: Uso de sensores de CO<sub>2</sub> en puntos críticos.
- Ventilación eficiente: Eliminación de CO<sub>2</sub> acumulado mediante circulación forzada de aire.
- Inspección de acumulaciones en zonas bajas: Identificación de áreas propensas a concentraciones peligrosas.
- Uso de equipos de respiración autónoma (ERA): En caso de

## Hidrogeno (H<sub>2</sub>)

- Es un gas ligero, inflamable y explosivo que puede encontrarse en la atmósfera de una mina subterránea debido a reacciones químicas y procesos industriales.
- Es incoloro, inodoro, insípido y más ligero que el aire. **Su detección es difícil sin sensores específicos**
- Es **extremadamente ligero**, por lo que tiende a acumularse en las partes superiores de galerías y túneles.
- El hidrógeno es un gas de **alta peligrosidad** en minería debido a su extrema inflamabilidad y facilidad de ignición.
  - Su presencia en concentraciones elevadas representa un riesgo de incendio y explosión, especialmente en minas de carbón y aquellas con acumulaciones de gases combustibles.
  - Puede formar mezclas explosivas con el aire en concentraciones entre 4% y 75%..
  - Cualquier fuente de ignición en un entorno de este tipo puede provocar explosiones potencialmente catastróficas, poniendo en peligro la vida de los mineros y causando graves daños a la infraestructura minera.
- También es un gas **asfixiante** debido al desplazamiento del oxígeno
- El hidrógeno se presenta en estado libre en las minas de sal, así como en cualquier operación en las salas de baterías durante la carga si el electrolito es SO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>.
- Por lo tanto, es esencial implementar medidas estrictas de monitoreo y control para mitigar el riesgo asociado con la presencia de hidrógeno en el aire de la mina.



Explosividad del Hidrógeno

- Su combinación con oxígeno puede generar explosiones violentas con mínima energía de ignición.
- En minas con riesgo de metano, la presencia de  $H_2$  aumenta la posibilidad de explosiones mixtas ( $CH_4 + H_2$ ).
  - Las fuentes de ignición deben controlarse estrictamente en minas con riesgo de acumulación de  $H_2$ .
  - Es clave implementar un monitoreo continuo y mantener una ventilación eficiente para prevenir explosiones.
- **Métodos de monitoreo y control**
  - Se detecta por medidores de hidrógeno de visor digital
  - Monitoreo continuo: instalación de detectores de  $H_2$  en zonas de riesgo.
  - Ventilación eficiente: prevención de acumulaciones en partes altas de túneles.
  - Control de fuentes de ignición: minimización de chispas y llamas en zonas con riesgo de acumulación de  $H_2$
  - Inspección de baterías y equipos eléctricos: control del uso y almacenamiento seguro de tecnologías basadas en hidrógeno.



## ■ Fuentes de hidrógeno en en una atmósfera minera

- Origen natural:
  - Liberación de  $H_2$  por procesos de reducción en rocas profundas.
  - Interacción del agua con minerales metálicos (ej. reacción de hierro con agua en ambientes anóxicos).
- Origen antropogénico:
  - Uso de baterías en equipos eléctricos subterráneos (celdas de plomo-ácido y de hidrógeno).
  - Reacciones químicas en la oxidación de sulfuros metálicos.
  - Electrólisis y procesos industriales cercanos a las minas.
  - Detonaciones de explosivos, en especial aquellos que generan gases calientes.



bnamericas.com

# Monóxido de carbono (CO)

Es un gas:

- Incoloro e inodoro: no puede ser detectado sin instrumentos específicos.
- Altamente tóxico por inhalación, incluso en bajas concentraciones:
  - Se une a la hemoglobina en la sangre, con una avidéz 300 veces mayor que la del O<sub>2</sub> impidiendo el transporte de oxígeno y causando intoxicación severa e incluso la muerte.
  - Si se inhala monóxido de carbono, incluso en cantidades moderadas o durante un corto periodo, puede causar daños irreversibles en muy pocos minutos. En concentraciones peligrosas pueden causar pérdida de consciencia y muerte en pocos minutos.
- Ligeramente menos denso que el aire (Pesa 1,25 kg/m<sup>3</sup>): Se dispersa en la atmósfera minera, pero puede acumularse en áreas confinadas.
- Inflamable en concentraciones elevadas: Puede arder en presencia de oxígeno a partir del 12.5% de concentración.
- Explosivo en un amplio rango (12,5-74 % en el aire).
- Siempre aparece en combustiones incompletas, como la fricción, el calentamiento, las explosiones de metano o polvo de carbón, los gases de escape de locomotoras diésel, etc.
- Se forma en entornos subterráneos por incendios y explosiones en minas, explosiones, oxidación a baja temperatura y motores de combustión interna.

Efectos del CO en función de su concentración	
Concentración (ppm)	Efectos
50	Efectos del CO en función de su concentración
200	Posible dolor de cabeza leve en la parte frontal de la cabeza al cabo de 2-3 horas. Fatiga, mareos y náuseas.
400	Cefalea frontal y náuseas en 1-2 horas. Dolor occipital después de 2,5-3,5 horas. Confusión, debilidad y alteraciones en la visión.
800	Dolor de cabeza, mareos y náuseas en 45 minutos. Colapso y posibilidad de muerte en 2 horas.
1.600	Dolor de cabeza, mareos y náuseas en 20 minutos. Colapso y posibilidad de muerte en 1 hora.
1.200	Dolor de cabeza, mareos y náuseas en 20 minutos. Colapso, convulsiones y posibilidad de muerte en 1 hora.
6.400	Dolor de cabeza, mareos y náuseas en 1-2 minutos. Pérdida del conocimiento, convulsiones y muerte en 10-15 minutos.
12.800	Pérdida de conocimiento inmediata. Riesgo de muerte en 1-3 minutos.

**El monóxido de carbono es uno de los gases más peligrosos en minería subterránea debido a su toxicidad y dificultad de detección.**

## ■ Fuentes de monóxido de carbono en una atmósfera minera:

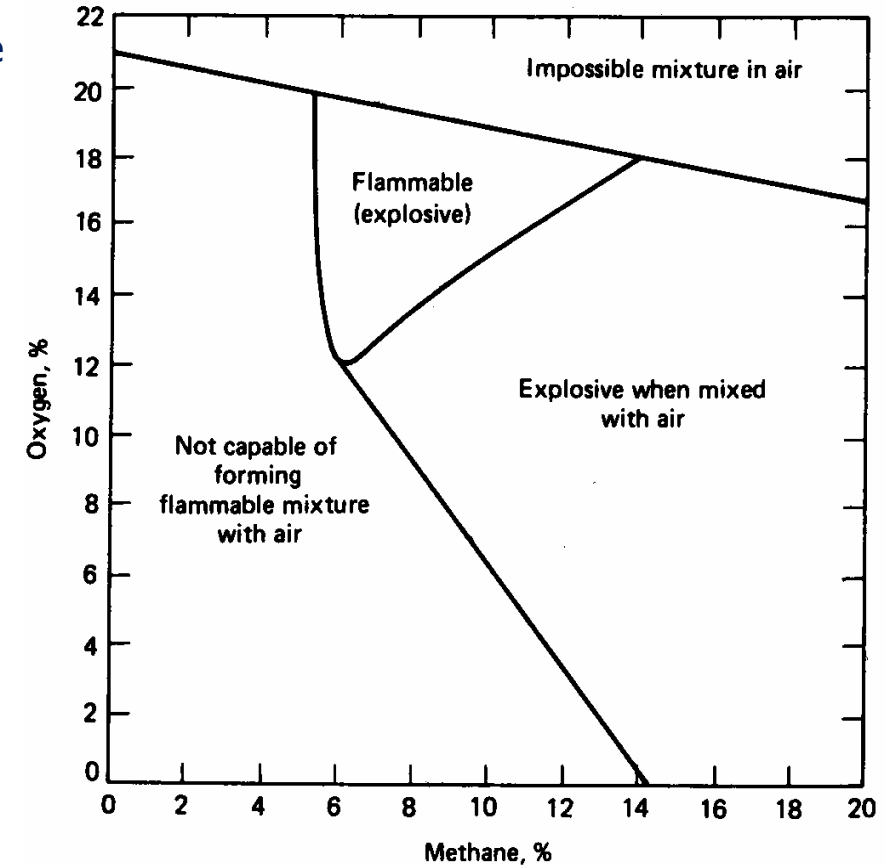
- Origen natural:
  - Incendios subterráneos (como es el caso de incendios en vetas de carbón o acumulaciones de material combustible).
  - Oxidación de materia orgánica en ambientes de alta temperatura.
- Origen antropogénico:
  - Motores diésel y equipos de combustión interna en túneles mal ventilados.
  - Detonación de explosivos con combustión incompleta.
  - Incendios de materiales plásticos, madera o aceites lubricantes en mina.
  - Soldadura y otros procesos de calentamiento con combustibles fósiles.



# Metano (CH<sub>4</sub>) y gas Grisú

El metano:

- Es un gas incoloro, inodoro e insípido en estado puro (aunque en minería suele encontrarse con otros gases).
- Tiene una densidad de 0,7168 kg/m<sup>3</sup>N (es casi el doble de ligero que el aire): Tiende a acumularse en las zonas altas de galerías y túneles.
- Altamente inflamable: puede generar explosiones violentas en mezclas con aire con concentraciones de entre 5% y 15% y entrar en contacto con una chispa o fuente de calor.
- Baja solubilidad en agua: puede liberarse de capas de carbón o formaciones sedimentarias con agua subterránea.
- En altos porcentajes, desplaza el oxígeno a concentraciones insuficientes para respirar, provocando muertes por asfixia en espacios confinados cuando aparece repentinamente.
- No es tóxico ni tiene efectos nocivos específicos para el organismo.
- Sus emisiones en una mina se producen de tres formas distintas:
  - Lentamente, mediante emisión continua y difusa.
  - En forma de chorro o "golpes" audibles sin violencia.
  - Mediante desgasificación instantánea o liberación violenta.
- Tiende a estratificarse en zonas altas de los huecos mineros donde no hay una suficiente turbulencia de la corriente de aire.
- En condiciones normales, es inerte, con un punto de ignición: 650 °C, pero su propiedad más característica es su combustibilidad y su capacidad de formar mezclas explosivas con el aire cuando la concentración está entre el 5-6% y el 14-16%.



**Explosividad del metano**  
(Coward, Jones, 1952)

# Grisú

- Gas presente en yacimientos carboníferos, compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ).
- Puede contener otros gases: etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), helio ( $\text{He}$ ) y argón ( $\text{Ar}$ ).
- Origen y almacenamiento:
  - Se genera durante la carbonificación junto con el carbón.
  - 95% adsorbido en la superficie interna del carbón debido a fuerzas de van der Waals.
  - 5% libre en fisuras y fracturas de la roca.
  - Puede migrar a lo largo de la mina.
- Liberación del grisú en la mina:
  - La excavación genera zonas de relajación que facilitan la salida del gas.
  - Fases de desgasificación:
    - Primero se libera el gas libre de las fisuras.
    - Luego, el gas adsorbido migra lentamente hacia las fisuras y el hueco minero.
  - Factores que afectan la desgasificación:
    - Granulometría del carbón.
    - Temperatura.
    - Composición del grisú.
- Dilución del grisú en la mina: se mezcla con el aire de ventilación, lo que puede generar atmósferas explosivas.
- Presencia en otros yacimientos: también aparece en potasa, yeso y caliza, pero en menor cantidad.

# Gas Grisú

- Manifestaciones de su presencia en el carbón:
  - Gas libre: por almacenamiento bajo presión en los poros o grietas de las capas o rocas de los hastiales
  - Gas combinado: mezclado en la estructura del carbón
  - Gas adsorbido: se concentra en la superficie porosa del carbón
  - Gas absorbido: integrado en la estructura del carbón
- Tipos de desprendimiento o liberación:
  - LENTOS: ordinarios, lentos y continuos a lo largo de los frentes de arranque y de los hastiales. Para su eliminación se utiliza la ventilación normal.
  - EN FORMA DE SURTIDOR O SOPLO: audibles, sin violencia. En grietas, fallas o roturas naturales. Se eliminan cerrando la salida; captándolo con tubería o aumentando la ventilación en ese lugar para diluirla
  - INSTÁNTANEOS: violentos tanto de CH<sub>4</sub> como de CO<sub>2</sub>. Liberan cantidades de gas y carbón pulverizado que no se diluyen con la ventilación.
- Causa de los desprendimientos instantáneos:
  - La causa es la presencia de bolsas de carbón finamente triturado y comprimido por grandes presiones que, al ponerse en contacto con una labor, liberan el gas adsorbido y absorbido por una especie de reacción en cadena

# Gas Grisú

## ■ **Carácter explosivo del Grisú:**

- **Cuando la proporción del metano en el aire oscila entre el 5 % y el 14-15 % es explosivo**, límite inferior de explosividad (LIE) y límite superior (LSE), respectivamente. El porcentaje más peligroso es en torno al 9 – 9,5%, que es la que se corresponde a la mezcla que menor energía necesita para provocar una explosión.
- Por encima del LSE y por debajo del LIE la mezcla no es combustible, por exceso de combustible y de aire, respectivamente. No obstante, las mezclas entre el 4 y 6 % pueden arder en presencia de llama desnuda, apagándose al retirarla. Y aquellas con concentración entre el 14 y el 16 % tienen el mismo comportamiento ante una llama, pero continúan ardiendo después de ser retirada.
- Causas de explosión:
  - Encender una llama
  - Abrir una lámpara de gasolina
  - Voladuras defectuosas de barrenos
  - Fuego de mina
  - Arcos y chispas eléctricas
  - Rozamientos que produzcan aumento de temperatura

# Gas Grisú

- **Clasificación de las minas por presencia de Grisú según ITC 04.1.01 (categoría de una labor subterránea):**
  - **1ª Categoría: sin grisú**  
No habrá indicios en la corriente de salida
  - **2ª Categoría: débilmente grisuosas**  
Cantidades reducidas. Menos del 0,3 % en la corriente de salida
  - **3ª Categoría: fuertemente grisuosas**
    - Se desprenden cantidades abundantes de grisú y gases
    - Si contenido  $> 0,5$  % en el retorno de ventilación general
  - **4ª Categoría: con desprendimientos instantáneos**  
Desprendimientos de forma súbita, masiva y con arrastre



## Contenidos límites de CH<sub>4</sub> en la corriente de aire ITC 05.0.02

LABORES	SIN CONTROL AUTOMÁTICO PERMANENTE DE CH <sub>4</sub>	CON CONTROL AUTOMÁTICO PERMANENTE DE CH <sub>4</sub>
RETORNOS PRINCIPALES	0,80%	1,00%
RETORNOS PARCIALES	1,50%	1,50%
RETORNOS DE TALLERES NO ELECTRIFICADOS	1,50%	1,50%
RETORNOS DE TALLERES ELECTRIFICADOS	1,00%	1,50%

- Si se superan estos límites, se detendrán trabajos
- Si se supera 2,5 % se abandonarán labores

## ■ EMANACIONES DE METANO:

$$E = A \cdot (P/h)^n$$

- E: emisión de CH<sub>4</sub> en m<sup>3</sup>/Tm
- (P/h): producción de carbón horaria (Tm/h)
- n: exponente función de la proximidad de otros focos de emisión y de la permeabilidad del terreno. (n =1 aprox.)
- A: coeficiente variable según la mina.

**E= 1-2 m<sup>3</sup>/Tm MINA POCO GRISUOSA**

**E= 50-100 m<sup>3</sup>/Tm MINA MUY GRISUOSA**

## ■ APARATOS DE MEDIDA Y CONTROL:

- LAMPARA DAVY:
  - Longitud de la llama azulada: >%CH<sub>4</sub>. Sensibilidad 1'25%
  - Se apaga con <16% de O<sub>2</sub>. Detecta deficiencia de O<sub>2</sub>.
- GRISUOMETRO CATALITICO
- GRISUOMETRO DE INTERFERENCIA

## ■ Indice de Leach:

$$I_e = v / [g (\Delta\rho/\rho) (Q_g/a)]^{1/3}$$

- v: velocidad de la corriente de ventilación (m/seg)
  - $Q_g$ : Caudal de gas emitido (m<sup>3</sup>/seg).
  - a: Anchura de la conducción (m)
  - $\Delta\rho/\rho$  : Diferencia relativa de densidad respecto a la del aire
- Para el metano:  $I_e = v / 1'64 (Q_g/a)^{1/3}$
- $I_e > 3$  NO HAY ESTRATIFICACION (conductos inclinados y corriente descendente)
  - $I_e > 5$  NO HAY ESTRATIFICACION (conductos horizontales)
  - $I_e > 8$  NO HAY ESTRATIFICACION (conductos inclinados y corriente ascendente)

- En presencia de **polvo de carbón**, la explosión puede **intensificarse** (explosión de polvo de carbón).
- **El monitoreo continuo y la ventilación eficiente son esenciales** para prevenir acumulaciones peligrosas:
  - **Monitoreo continuo:** Uso de sensores de metano en áreas críticas.
  - **Ventilación adecuada:** Eliminación de acumulaciones de CH<sub>4</sub> en zonas altas.
  - **Drenaje y extracción del gas:** Perforación de pozos de desgasificación en minas de carbón.
  - **Control de fuentes de ignición:** Eliminación de chispas, llamas abiertas y equipos eléctricos sin protección en áreas con CH<sub>4</sub>.
  - **Uso de explosímetros:** Medición frecuente de concentraciones para evitar atmósferas explosivas.

**El monitoreo continuo y la ventilación eficiente son esenciales para prevenir acumulaciones peligrosas.**



# Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

Es un gas:

- Incoloro, con un olor acre - picante (similar al de los fósforos quemados) penetrante y sofocante.
- Se genera en minas con presencia de minerales sulfurados.
- Más denso que el aire (su peso es de 2,26 kg/m<sup>3</sup>), tiende a acumularse en zonas bajas y áreas mal ventiladas.
- Se produce en la combustión de compuestos que contienen azufre.
- Altamente soluble en agua: reacciona con la humedad para formar ácido sulfuroso (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>), que puede ser corrosivo.
- Es altamente tóxico e irritante: afecta ojos, piel y sistema respiratorio, especialmente en exposiciones prolongadas.
- Es incombustible.
- Se libera en muchos procesos de combustión de compuestos sulfurados.
- Se han reportado casos de producción de este gas debido a explosiones en minas de cobre.

Efectos del SO<sub>2</sub> en función de su concentración

Concentración (ppm)	Efectos
0,3 – 1	Detección del gas por su sabor.
2	Límite de exposición permisible (Permissible Exposure Limit PEL) en 8 horas establecido en las tablas de OSHA.
3	Detección por su olor.
6 – 12	Irritación de nariz y garganta. Tos intensa, dolor de cabeza y dificultad respiratoria.
> 10	Riesgo de broncoespasmos y daño pulmonar severo.
20	Irritación de los ojos.
100 ppm	IDLH - Immediately Dangerous to Life or Health, NIOSH - CDC (30 minutos)
400 ppm	Concentración letal mínima en el aire durante una exposición de 1 minuto

## ■ Fuentes de dióxido de azufre en una atmósfera de mina:

- Origen natural:
  - Oxidación de sulfuros metálicos (pirita, calcopirita, esfalerita) en contacto con el oxígeno.
  - Actividad volcánica subterránea en zonas geotérmicas o minas cercanas a sistemas magmáticos.
- Origen antropogénico:
  - Voladuras con explosivos en formaciones ricas en sulfuros.
  - Procesos metalúrgicos cercanos a la mina, como la tostación de minerales sulfurados.
  - Combustión de carbón y otros combustibles con alto contenido de azufre en equipos de minería.

## ■ Riesgos del dióxido de azufre en minas subterráneas

- Irritación severa de las vías respiratorias en concentraciones bajas (causa tos, dificultad para respirar y sensación de ardor en la garganta).
- En exposiciones prolongadas o concentraciones altas, puede generar broncoespasmos y edema pulmonar.
- Corrosión de equipos y estructuras al reaccionar con la humedad, formando ácido sulfuroso y ácido sulfúrico

- Es un indicador de procesos de oxidación ya que puede servir como señal de oxidación de sulfuros en minas, ayudando a prever drenajes ácidos.

## ■ Métodos de monitoreo y control

- Se mide por medio de tubos colorimétricos
- Monitoreo continuo: uso de sensores de  $\text{SO}_2$  en áreas con presencia de sulfuros.
- Ventilación adecuada: eliminación del gas en zonas con riesgo de acumulación.
- Uso de equipos de protección respiratoria (mascarillas con filtros químicos).
- Control de fuentes de generación: minimización de la oxidación de sulfuros y reducción del contenido de azufre en combustibles.
- Neutralización química: pulverización de soluciones alcalinas para reducir la acidez generada por  $\text{SO}_2$ .



# Sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S)

- Tiene un olor característico a huevos podridos que solo es perceptible en bajas concentraciones, ya que en dosis altas paraliza el sentido del olfato, aumentando el riesgo de intoxicación severa e incluso la muerte.
- Más denso que el aire (1,55 kg/m<sup>3</sup>): se acumula en zonas bajas de túneles y espacios confinados.
- Altamente tóxico, incluso más que el CO. Se absorbe rápidamente por los pulmones. Afecta el sistema nervioso y respiratorio, causando pérdida de consciencia y asfixia. La rapidez de los síntomas y la rápida evolución también dependen de la temperatura, la humedad y la circulación del aire.
- Inflamable: puede arder en presencia de oxígeno a partir del 4.3% de concentración en aire.
- Altamente corrosivo: reacciona con la humedad y el oxígeno, formando ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) que daña equipos y estructuras.
- Es poco común en la mayoría de las minas, pero ha causado algunos accidentes graves. Aparece en aquellas con presencia de minerales sulfurados o depósitos de materia orgánica en descomposición. También en minas de sal o carbón.
- Este gas se disuelve fácilmente en agua y puede liberarse en cantidades significativas tras recorrer largas distancias.

Efectos del H<sub>2</sub>S en función de su concentración

Concentración (ppm)	Síntomas
0,13	Olor perceptible.
4,60	Fácil de detectar debido a un olor moderado.
10	Comienzo de irritación ocular. PEL (OSHA, ACGIH).
10- 15	Posible inflamación de la conjuntiva y la córnea con exposición prolongada.
20	Límite de exposición permisible (Permissible Exposure Limit PEL) para concentración máxima durante una jornada laboral de 8 horas.
27	Olor fuerte y desagradable, pero tolerable.
50 - 100	Inflamación leve de la conjuntiva e irritación de las vías respiratorias después de una hora.
100	Tos, irritación ocular, pérdida del sentido del olfato después de 2-5 minutos.
150	Náuseas, dolor de cabeza, fatiga.
200-300	Inflamación severa de la conjuntiva e irritación de las vías respiratorias después de una hora.
500	Nariz que moquea, vómitos, calambres, dificultad para respirar, tos, sensación de presión en la cabeza.
500 – 700	Posible pérdida de consciencia. Edema pulmonar, colapso respiratorio.
600	Muerte después de aproximadamente media hora de exposición.
700-1000	Peligro agudo de envenenamiento, pérdida rápida de conocimiento, parálisis respiratoria y muerte.
1000	Pérdida rápida de conciencia, apnea y muerte en pocos minutos.
1.000 – 1.800	Pérdida del conocimiento, paro respiratorio repentino y muerte en pocos minutos. La muerte sobreviene incluso si la persona afectada se expone al aire limpio.

- **Fuentes de sulfuro de hidrógeno en una atmósfera minera:**
- Origen natural:
  - Oxidación de minerales sulfurados (pirita, galena, esfalerita, calcopirita).
  - Descomposición de materia orgánica en aguas subterráneas estancadas.
  - Liberación desde fallas geológicas y depósitos de gas natural.
- Origen antropogénico:
  - Explosiones en zonas con sulfuros: reacciones químicas que generan  $H_2S$ .
  - Uso de productos químicos en procesos de minería subterránea.
  - Sistemas de drenaje ácido de minas donde los sulfuros reaccionan con el agua.
- **Métodos de monitoreo y control:**
  - Monitoreo continuo: uso de sensores de  $H_2S$  en áreas críticas. **Se puede detectar con tubos colorimétricos**
  - Ventilación eficiente: prevención de acumulaciones en espacios confinados.
  - Uso de equipos de protección respiratoria: máscaras con filtros para  $H_2S$  o equipos de respiración autónoma (ERA) en zonas de riesgo.✓
  - Evacuación inmediata en caso de concentraciones peligrosas.
  - Drenaje adecuado de aguas estancadas para evitar acumulaciones de  $H_2S$  en túneles y galerías.

# Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

- Los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) son un grupo de gases tóxicos formados principalmente por monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), con presencia ocasional de otros compuestos como el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).
- En minería subterránea, estos gases se generan principalmente por
  - Trabajo con explosivos, en particular en detonaciones incompletas de dinamita (deflagración).
  - La combustión de motores diésel y de gasolina, representando un riesgo para la salud y la seguridad de los trabajadores.
- Incoloro e inodoro en su forma de NO, pero el NO<sub>2</sub> tiene un color marrón-rojizo y olor irritante.
- Más pesado que el aire: Se acumula en zonas bajas y espacios mal ventilados.
- Altamente reactivo: Puede formar ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) en contacto con humedad, generando lluvia ácida y corrosión.
- Tóxico: Afecta las vías respiratorias y puede causar inflamación pulmonar.
- En presencia de humedad, generan ácidos nítrico y nitroso, y su inhalación produce corrosión en las vías respiratorias.

Efecto de diferentes concentraciones de dióxido de nitrógeno en las personas	
Concentración de NO <sub>2</sub> en el aire inspirado en ppm.	Síntomas
2,8	Posible variación sanguínea.
3	Irritación severa, riesgo pulmonar.
5	Valor MAC. [MAC = Maximum acceptable concentration in %]
8	En un ensayo permanente con animales, se observó daño pulmonar.
10 – 20	Fenómenos irritativos; pueden disminuir con la habituación. Exposición peligrosa con riesgo de daño pulmonar irreversible.
20	La proporción de hemoglobina en la sangre comienza a aumentar.
30 – 35	Tolerable con lo acostumbrado (para edemas) sin ningún trastorno inusual.
40	Tos irritativa que no se suprime, sensación de ardor en las vías respiratorias, malestar; con exposición prolongada durante varias horas, es posible intoxicación.
55 – 84	Irritación de la nariz y la garganta.
80	Después de 3 a 5 minutos, sensación de opresión en el pecho.
120 – 200	Mortal con exposición durante varias horas.
300	Rápidamente letal.

- Pesan  $1,34 + 1,45 \text{ kg/m}^3$  respectivamente y suelen ir juntos por lo que hay que conocerlos en conjunto.
- Su peligro reside en que los óxidos de nitrógeno pueden disolverse en el agua pulmonar, formando ácidos nitrosos e incluso nítricos, capaces de corroer las mucosas de las vías respiratorias.
- Se debe tener especial cuidado de disolverlos completamente en el flujo de ventilación después de la voladura.
- **Métodos de monitoreo y control**
  - Pueden medirse con tubos colorimétricos
  - Monitoreo continuo: uso de sensores de  $\text{NO}_x$  en zonas con riesgo de acumulación.
  - Ventilación forzada: eliminación de gases después de voladuras y en áreas con motores diésel.
  - Uso de explosivos de baja emisión de  $\text{NO}_x$ .
  - Mantenimiento de motores diésel: regulación de la combustión para reducir emisiones.
  - Equipos de protección personal (PPE): uso de mascarillas con filtros adecuados en áreas contaminadas.

Gas	Límite de exposición (ppm)
$\text{NO}$ (Monóxido de nitrógeno)	25 ppm
$\text{NO}_2$ (Dióxido de nitrógeno)	3 ppm

**Pueden causar irritación severa, inflamación pulmonar e incluso enfermedades respiratorias crónicas.**

- El principal gas radiactivo presente en minas es el radón (Rn-222), un gas noble producto de la desintegración del uranio (U-238) presente en rocas y suelos.
- Su acumulación en espacios confinados puede incrementar el riesgo de cáncer de pulmón en los trabajadores expuestos.
- Características del radón en minas subterráneas
  - Incoloro, inodoro e insípido, lo que dificulta su detección sin instrumentos especializados.
  - Denso y pesado: se acumula en áreas bajas y poco ventiladas.
  - Producto de la desintegración del uranio, presente en rocas graníticas, fosfáticas y en vetas metálicas.
  - Emite radiación alfa: su inhalación expone directamente a los pulmones a partículas alfa.
  - Forma descendientes radiactivos (Po-218, Pb-214, Bi-214) que se depositan en los pulmones.

ISÓTOPO	TIPO DE RADIACIÓN	PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN
<sup>238</sup> Uranio	Alfa	4'49 x 10 <sup>9</sup> años
<sup>234</sup> Torio	Beta	24'1 días
<sup>234</sup> Protactinio	Beta	1'17 min
<sup>234</sup> Uranio	Alfa	2'48x10 <sup>5</sup> años
<sup>230</sup> Torio	Alfa	8x10 <sup>4</sup> años
<sup>226</sup> Radio	Alfa	1622 años
<sup>222</sup> Radon	Alfa	3'825 días
<sup>218</sup> Polonio	Alfa	3'05 min
<sup>214</sup> Plomo	Beta, gamma	26'8 min
<sup>214</sup> Bismuto	Beta, gamma	19'7 min
<sup>214</sup> Polonio	Alfa	2'73x10 <sup>-6</sup> min
<sup>210</sup> Plomo	Beta, gamma	22 años
<sup>210</sup> Bismuto	Beta	5'02 días
<sup>210</sup> Polonio	Alfa	138'3 días
<sup>206</sup> Plomo		estable

## ■ Efectos del radón en la salud

- Riesgo principal: Cáncer de pulmón
  - La radiación alfa daña el ADN de las células pulmonares.
  - El riesgo aumenta con la concentración y el tiempo de exposición.
  - Minerías de uranio presentan mayor incidencia de enfermedades pulmonares.
- Otros efectos:
  - Inflamación y daño pulmonar en exposiciones prolongadas.
  - Incremento del riesgo al combinarse con el humo del tabaco.

## ■ Métodos de detección de radón

- Detectores de trazas nucleares (CR-39): miden la radiación alfa en largos períodos.
- Detectores de carbón activado: absorben radón para análisis posterior.
- Monitores electrónicos en tiempo real: sensores que miden la concentración de radón en el aire.
- Cámaras de ionización: equipos de alta precisión para medición continua.

## ■ Métodos de control y mitigación

- Ventilación eficiente: reducción de acumulaciones en áreas subterráneas. ✓ Sellado de grietas y fracturas en el macizo rocoso.
- Uso de monitoreo continuo en minas con uranio o alta radiactividad.
- Rotación del personal en zonas de mayor concentración de radón.
- Uso de mascarillas de alta eficiencia para reducir la inhalación de partículas radiactivas.

Organización	Límite de exposición (Bq/m <sup>3</sup> )
OMS	100 Bq/m <sup>3</sup> (recomendado)
OSHA (EE.UU.)	148 Bq/m <sup>3</sup> (4 pCi/L)
EU Directiva 2013/59/Euratom	300 Bq/m <sup>3</sup>

## Fuentes de emisión de gases

- **Gases de Estratos:** se produce por migraciones de gases desde el macizo rocoso debido a la actividad de extracción (**CH<sub>4</sub>**, **dióxido de carbono, nitrógeno, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S**):
  - El metano es el mas “popular” en minería del carbón. Este se moviliza entre los estratos por cambios en la presión existente por la minería. Rango explosivo: 5-15%
  - Los gases de estratos no solo se relacionan a sedimentos, sino también a roca ígnea
- **Gases de Voladura (CO, CO<sub>2</sub>, NO, H<sub>2</sub>S)**
  - Maquinas de combustión interna: pueden emanar hasta 0,28 m<sup>3</sup>/HP de contaminantes
  - Fuegos y explosiones (CO, CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>)
  - Respiración humana (CO<sub>2</sub>) aprox 0,1 cfm/hombre
  - Baterías (genera H)

## Concentraciones límites (ITC 04.7.02)

CONCENTRACIONES LÍMITES DE GASES EN LA ATMÓSFERA DE MINA				
GASES	JORNADA DE 8 HORAS		PERÍODOS CORTOS DE TIEMPO	
	P.P.M.	PORCENTAJE %	P.P.M.	PORCENTAJE %
CO	50	0'005	100	0'01
CO <sub>2</sub>	5.000	0'50	12.500	1'25
NO+NO <sub>2</sub>	10	0'001	25	0'0025
SH <sub>2</sub>	10	0'001	50	0'005
SO <sub>2</sub>	5	0'0005	10	0'001
H <sub>2</sub>	1.000	0'1	10.000	1
OXÍGENO MÍNIMO			TEMPERATURA EQUIVALENTE MÁXIMA	
19%			33°C	

GASES		ORIGEN
Necesarios para la respiración	Oxígeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atmósfera exterior.</li> <li>• Por regeneración del aire de respiración en equipos de autosalvamento.</li> <li>• Por generación en equipos de respiración con botella de O<sub>2</sub> o generación por vía química.</li> </ul>
Anóxicos o Asfixiantes	Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atmósfera exterior.</li> <li>• Aportación del exterior como gas inerte para extinción de fuegos e incendios.</li> </ul>
	Metano	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desprendimiento en la mina.</li> </ul>
	Anhídrido carbónico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desprendimiento de CO<sub>2</sub> en la mina (no se conoce en España).</li> <li>• Oxidación lenta del carbón y la madera.</li> </ul>
Tóxicos químicos	Monóxido de carbono	Fuegos e incendios. Combustión lenta del carbón. Incendios y calentamientos de bandas transportadoras, aceites, cables eléctricos y otras sustancias plásticas.
	Gases nitrosos NO + NO <sub>2</sub>	Voladuras con explosivos. Gases de escape de motores de combustión interna.
Tóxicos químicos	Sulfuro de hidrógeno	Aguas estancadas.
	Bióxido de carbono	Oxidación del monóxido de nitrógeno (NO) producido por explosivos y gases de escape.
Otros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ácido fórmico</li> <li>• Ácido cianhídrico</li> <li>• Dioxina</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mala ventilación en el empleo de espumas.</li> <li>• Combustión de poliuretano.</li> <li>• Emisión de vapores.</li> </ul>



# Consideraciones especiales a las concentraciones de gases

- Cada gas tóxico o explosivo (como el grisú), tiene una concentración máxima admisible en una atmósfera de mina para una exposición de 8 horas.
- En algunas legislaciones, se establecen para los gases unos límites permisibles:
  - Límite Permissible Ponderado (LPP): para exposición típica de jornadas de 8 horas continuadas y 48 horas/semana.
  - Límite Permissible Absoluto (LPA): Límite que no puede excederse en ningún momento. Por ejemplo, si la legislación no lo establece, se puede fijar por ejemplo:  $LPA = 5 \times LPP$

Ejemplo: Límites establecidos por la legislación chilena para minería de interior

GAS	EFEECTO	LPP ppm (mgr / m3)	LPA ppm (mgr / m3)
Monóxido de Carbono (CO)	Veneno Desplaza hemoglobina	40 (46)	458
Anhídrido Carbónico (CO <sub>2</sub> )	Sofocamiento, Aceleración respiratoria	4000 (7.200)	54.000
Anhídrido Sulfuroso (SO <sub>2</sub> )	Ataca (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) mucosas de ojos, nariz y garganta.	1,6 (4)	13
Ácido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	Muy Venenoso Irrita mucosas y ataca el sistema nervioso	20 (25)	21
Óxidos de Nitrógeno (N <sub>x</sub> O <sub>y</sub> ) (NO <sub>2</sub> )	Ataca (HNO <sub>3</sub> ) tejidos pulmonares, puede tener efecto retardado	25	-
Metano (CH <sub>4</sub> )	Sofocante, Explosivo	10.000 (1%)	10.000 (1%)

- Corrección por altitud: a mayor altitud, hay menos oxígeno disponible y por lo tanto se respira con más profundidad. Los valores límite deben ser por tanto corregidos:

$$\text{(Si } H > 1000 \text{ m.s.n.m)} \quad LPP' = LPP \times P(H) \text{ (mm de Hg)} / 760$$

- También deben introducirse correcciones por mayor exposición de los trabajadores a los gases contaminantes:

$$\text{(Si } J_s > 48 \text{ hrs/semana)} \quad LPP'' = LPP \times (48/H_s) \times (168-H_s)/120$$

$H_s = \text{Jornada Hrs} / \text{Semana}$

- Estas correcciones deberán realizarse con los criterios vigentes en la normativa de cada país.

# Métodos de detección de gases

# Fundamentos de los métodos de detección de gases

Los métodos de detección se basan en propiedades físicas y químicas de los gases, permitiendo su identificación en tiempo real o mediante análisis posteriores.

**Selección del método adecuado.** Para elegir el método de detección correcto, se consideran:

- Tipo de gas (tóxico, inflamable, asfixiante):
    - Gases tóxicos: CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>
    - Gases inflamables: CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>
    - Gases asfixiantes: N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>
  - Rango de concentración esperado.
  - Condiciones ambientales (humedad, temperatura, interferencias).
  - Frecuencia de monitoreo (continuo o puntual).
  - Costo y mantenimiento del equipo.
- 
- **DETECTORES OXICATALITICOS:**
    - Gases combustibles (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>).
    - Contienen un filamento catalítico que cambia de temperatura al reaccionar con el gas, generando una señal eléctrica. Miden el calor desprendido o el cambio de resistencia en un puente de Wheatstone, durante el proceso de combustión del gas.
    - .Ventajas: Fiables y de respuesta rápida. Desventajas: Pueden dañarse con contaminantes (como silicona).



## ■ DETECTORES ELECTROQUÍMICOS:

- Basados en una celda electroquímica que genera corriente eléctrica proporcional a la concentración del gas.
- Para  $O_2$ ,  $CO$ ,  $SH_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$
- Miden la corriente generada en un electrolito por la reacción del gas en contacto con un electrodo especial, formado por una membrana especial permeable al gas y no al electrolito.



- Ventajas: Sensibles y selectivos, permiten monitoreo en tiempo real.
- Desventajas: Vida útil limitada de los sensores.



## ■ **DETECTORES OPTICOS:**

- Infrarrojos (NDIR - Non-Dispersive Infrared):
  - Basados en la absorción de radiación infrarroja por ciertos gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ).
  - Detecta  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$
  - Cada gas absorbe la luz en distintas longitudes de onda, experimentando distintos grados de dilatación.
  - Ventajas: Alta precisión y larga vida útil.
  - Desventajas: Costosos y sensibles a la humedad y temperatura.
  
- Interferómetro:
  - $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$
  - La diferencia entre la velocidad de propagación de la luz en el gas en cuestión y en el aire, da lugar a distintas bandas de interferencia.



- **DETECTORES POR CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA:**

- CO, SH<sub>2</sub>
- Cambio en la conductividad de un semiconductor (SnO<sub>2</sub>), en presencia del gas.



- **DETECTORES POR CONDUCTIVIDAD TÉRMICA:**

- Comparan la conductividad térmica del aire con la del gas objetivo.
- Útiles para gases como H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

- **SENSORES ÓPTICOS DE DISPERSIÓN DE LUZ:**

- Utilizados en la detección de partículas y aerosoles, como polvo de mina y humo.



## ■ **TUBOS COLORIMÉTRICOS:**

- Contienen reactivos químicos que al reaccionar con el gas cambian de color, de intensidad o longitud de coloración al contacto con gases específicos.
- Se utilizan con bombas manuales para extraer una muestra de aire.
- Detección de  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SH_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2$
- Ventajas: Simples, portátiles y de bajo coste.
- Desventajas: lectura subjetiva, no permiten monitoreo continuo.





Detector portátil multigas



Detector portátil 5 gases

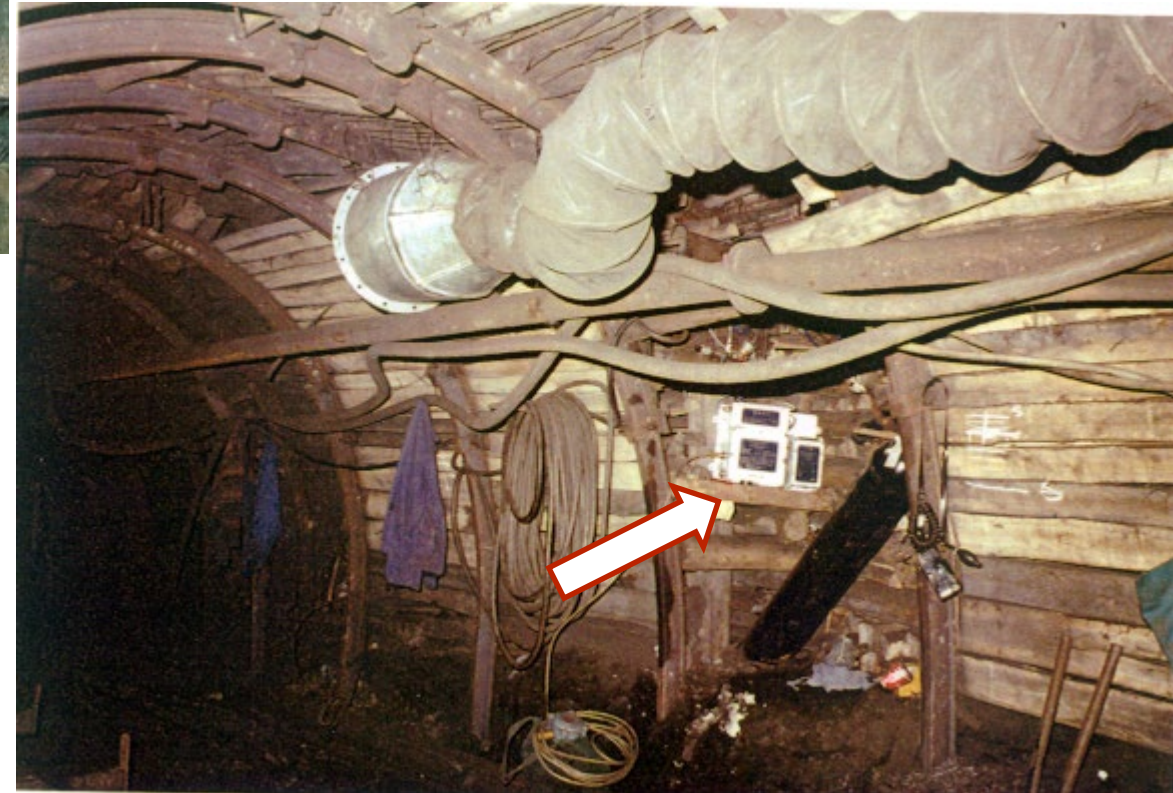


# Detección de Grisú

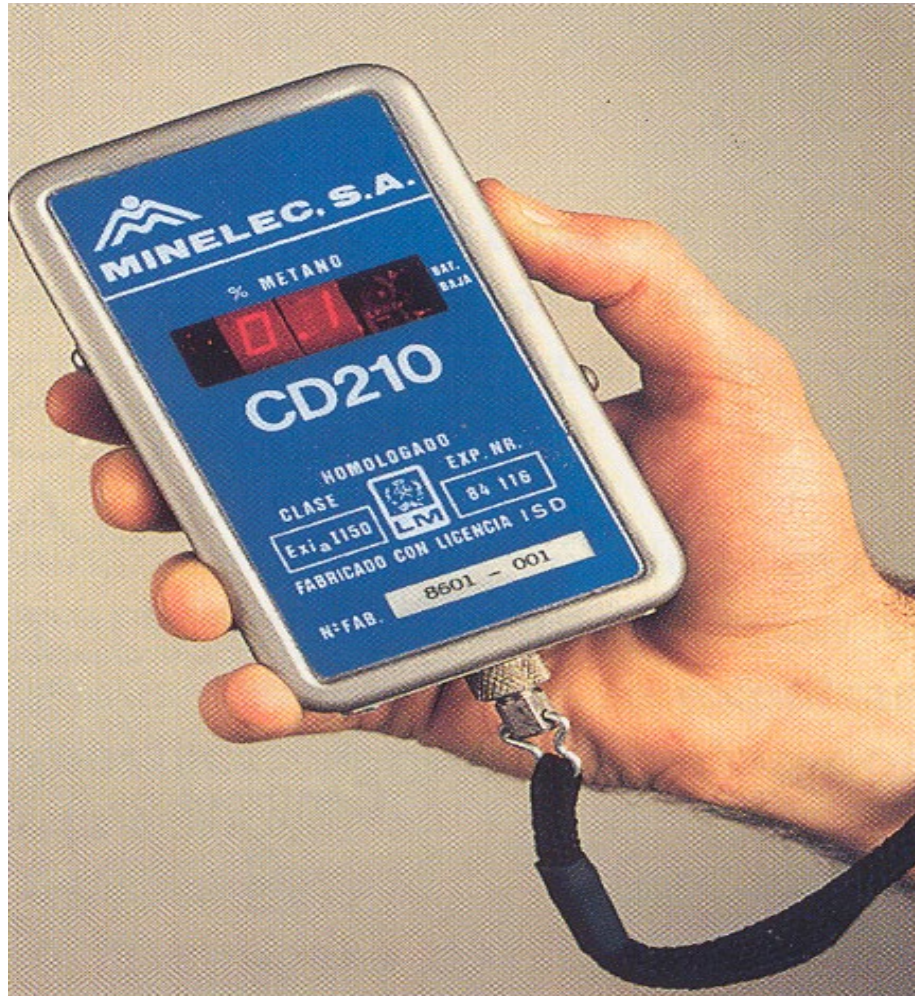
## ■ Detección del Grisú:

- **Lámpara de seguridad de gasolina**
  - Primero con llama normal y después con llama corta
- **Grisuómetros, metanómetros diversos:**
  - Aparatos de lectura directa.
  - El más normal es el grisúmetro óptico.
- **Estación de telecontrol**
  - Permite el control automático por medio de medidas continuas
  - Actúa, en su caso, dando señales de alarma o desconectando la red eléctrica de alimentación

# Metanómetro



# Metanómetro digital

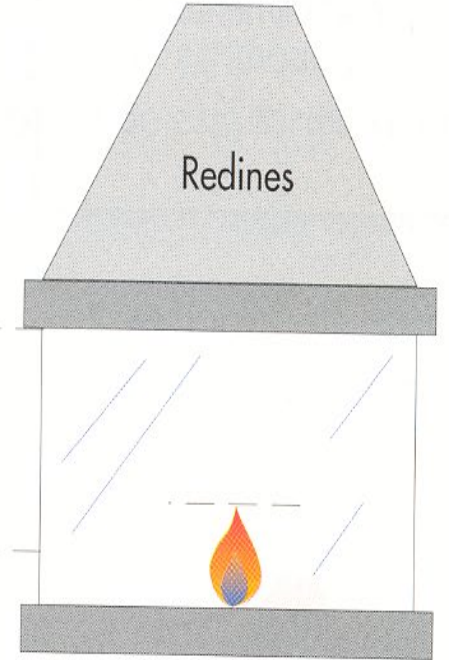
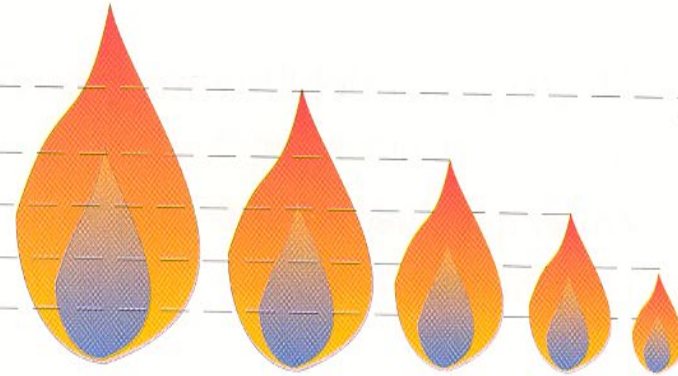


# Lámpara de gasolina



## CONTROL DE GRISÚ CON LLAMA NORMAL

Centímetros
4
3
2
1



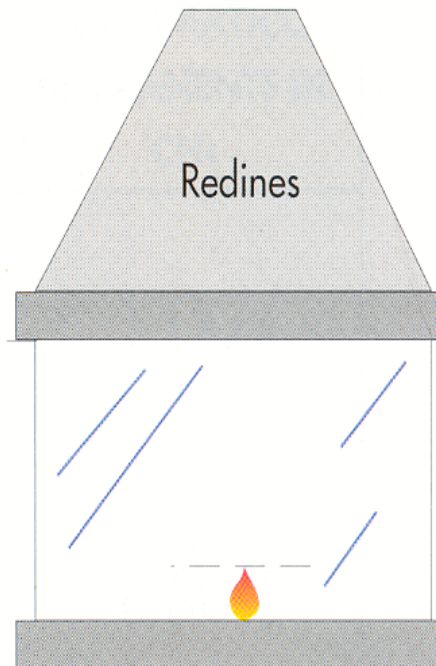
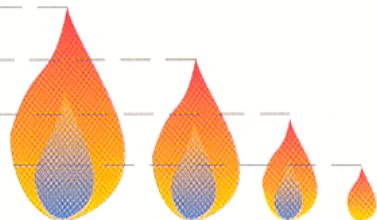
Llama normal  
con 1,5 a 2 cm de altura.

Altura de aureola	Vacila y se apaga	45 mm	40 mm	30 mm	Ligero estiramiento
% de Grisú	6%	4%	3%	2%	1%
Evacuar el tajo, poner una cruz, ventilar y avisar al responsable.				Se puede reconocer con una llama corta.	

# CONTROL DE GRISÚ CON LLAMA CORTA

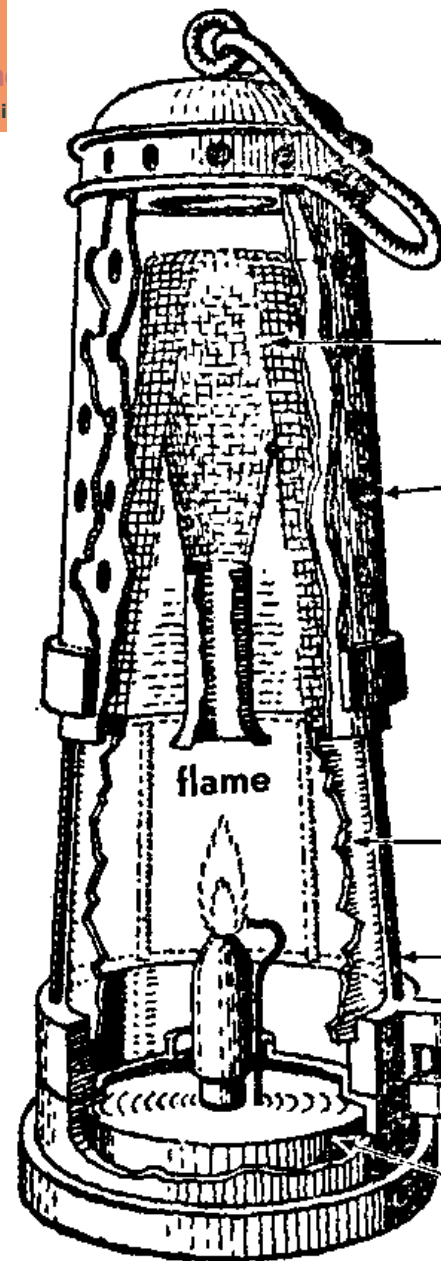
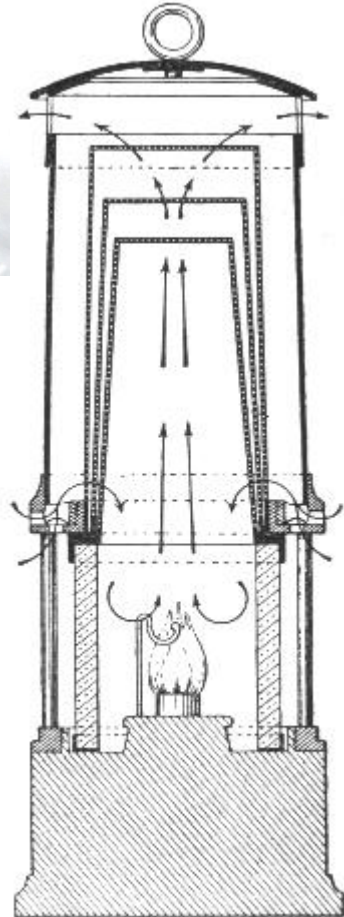
Utilizable sólo cuando se tiene la seguridad de que no existe mezcla de explosivos y después de un reconocimiento previo con llama normal.

Centímetros
4
3
2
1



Altura de aureola	Posibilidad de explosión	30 mm	13 mm	11 mm	9 mm
% de grisú	5%	3%	2%	1,5%	1%
El uso de llama corta está prohibido.		Evacuar tajo, avisar responsable, señalar.		Prohibido disparar. Ventilar.	

Llama corta se reduce a un punto amarillo central de 1 mm.



the metal gauze  
absorbs heat and  
prevents fire reaching  
outside gas

metal gauze

fire-damp enters  
lamp through holes  
and burns

flame

glass enclosing flame

bars protecting glass

safety lock

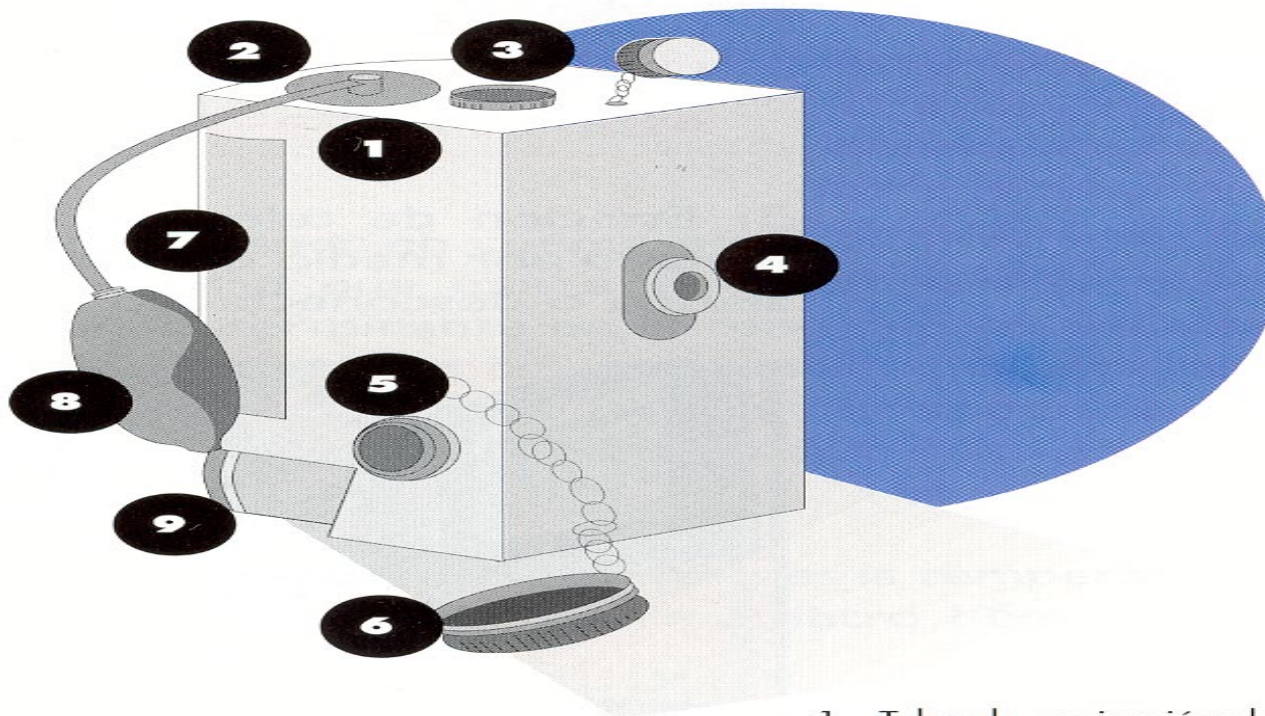
oil container

*Davy safety-lamp.*

## Monitor para lectura directa de oxígeno y metano



# Grisuómetro óptico



- 1.- Tubo de aspiración de gases
- 2.- Gancho para colgar filtro y goma
- 3.- Ocular
- 4.- Interruptor
- 5.- Volante de ajuste a acero
- 6.- Tapa protectora
- 7.- Contenedor de pilas (1,5 voltios)
- 8.- Bomba de goma
- 9.- Corrector de posición de bombilla

## Clima de la mina: humedad y temperatura

## Objetivos específicos

- Abordar el análisis del clima subterráneo en entornos mineros, enfocándose en los factores que influyen en la humedad y la temperatura.
- Explorar los conceptos fundamentales de humedad y sus distintos tipos, así como los métodos de medición utilizados, incluyendo el diagrama psicrométrico.
- Identificar las principales causas del aumento de temperatura en las minas, tales como el clima exterior, la compresión del aire, el calor generado por equipos y explosivos, y la influencia de la roca.
- Definir el concepto de clima subterráneo y su importancia en la minería.
- Analizar los factores que afectan la humedad y la temperatura en espacios subterráneos.
- Examinar los distintos tipos de humedad (absoluta, específica y relativa) y sus métodos de medición.
- Evaluar el impacto de la temperatura y la humedad en la seguridad y salud de los trabajadores.
- Identificar las principales fuentes de incremento de temperatura en minas subterráneas.

# Concepto de clima de mina

- El clima de mina hace referencia a las **condiciones ambientales que prevalecen** en una explotación minera subterránea.
- Es un **factor clave** para la seguridad, confort y productividad de los trabajadores y eficiencia operativa en minería subterránea.
- Estas condiciones incluyen:
  - **Temperatura:**
    - Depende del calor geotérmico, la actividad minera y la ventilación. Mayor profundidad de la mina implica temperaturas más altas por el gradiente geotérmico.
    - Se mide en bulbo seco y bulbo húmedo para evaluar el confort térmico.
    - Elevadas temperaturas pueden provocar estrés térmico y fatiga en los trabajadores.
    - Las fuentes de calor antropogénicas son, entre otras, la maquinaria, las voladuras y la actividad humana elevan la temperatura.
  - **Humedad relativa:**
    - Viene afectada por la ventilación.
  - **Temperatura y humedad:**
    - Influye en la percepción térmica y en la evaporación del sudor.
    - Alta humedad puede reducir la eficiencia de enfriamiento del cuerpo.
  - **Ventilación y circulación del aire:**
    - Regula la renovación del aire y dispersa contaminantes.
    - Afecta la disipación del calor y la concentración de gases nocivos.
    - Gases como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S pueden acumularse en áreas con mala circulación de aire.
    - Se mide en velocidad del aire y renovación de aire por hora.
  - **Presión atmosférica:**
    - Puede influir en la liberación de gases como metano y radón.
    - En minas profundas, puede contribuir a malestar físico en los trabajadores.

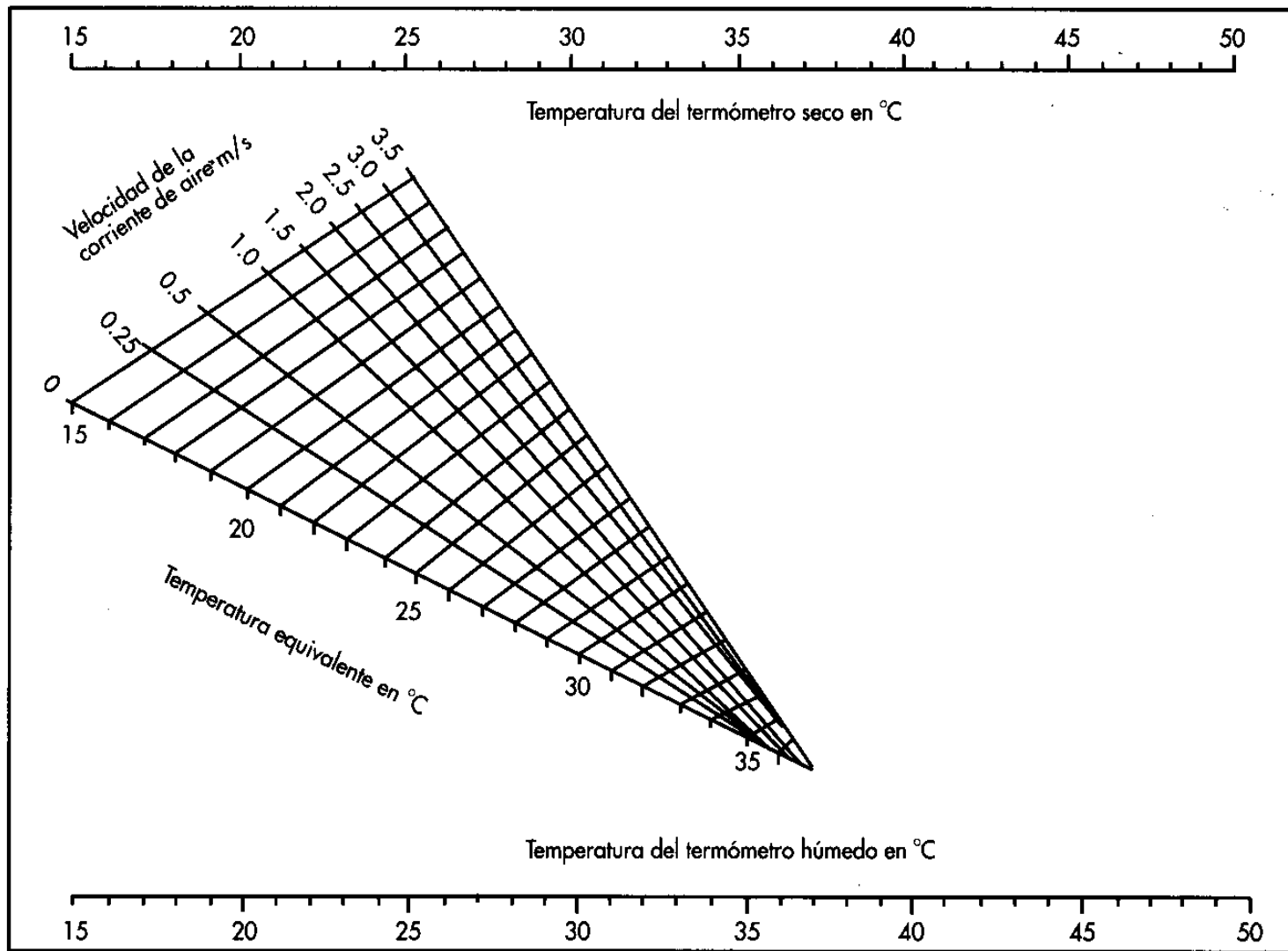
## Temperatura y humedad en la atmósfera minera ITC: 04.7.05

- La temperatura y la humedad influyen de forma determinante en el rendimiento del trabajador.
- La ITC: 04.7.05, define la temperatura equivalente según el gráfico siguiente, teniendo en cuenta la temperatura seca, la temperatura húmeda y la velocidad de la corriente de aire.
- El límite máximo de temperatura equivalente no excederá los 33°C en ningún lugar donde trabaje personal
- En labores donde la temperatura equivalente sea entre 30 y 33°C una DIS regulará las condiciones y forma de trabajo en ese lugar
  
- Normativa española:

$$T_e < 33^{\circ}\text{C}$$

$$T_e = 0.9t_h + 0.1t_s$$

- $T_e$ : Temperatura equivalente ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $t_h$ : Temperatura húmeda ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $t_s$ : Temperatura seca ( $^{\circ}\text{C}$ )



# Temperatura y Humedad

- La temperatura mínima en minas debe ser mayor que 2°C para evitar congelamiento de agua en cañerías o piso de galerías.
- **La temperatura debe ser tal que produzca una sensación térmica confortable, lo cual depende también de la humedad y velocidad del aire o "brisa".**
- Dependiendo de la condición geográfica y/o estacional se puede requerir calentar o enfriar el aire de ventilación.

# Control y regulación del clima de mina

- Se requiere una gestión efectiva de temperatura, humedad, velocidad del aire y presión atmosférica para:
  - Mayor seguridad y reducción de enfermedades ocupacionales.
  - Mejora del confort térmico y productividad de los trabajadores.
  - Reducción del riesgo de acumulación de gases peligrosos.
  - Mayor eficiencia en el consumo energético de ventilación y refrigeración.
- Su regulación implica:
  - **Ventilación adecuada** para control del flujo de aire, regulación térmica, control de humedad y para disipar calor y contaminantes.
    - Ventilación principal y secundaria para la renovación del aire, disipación del calor y reducción de gases nocivos.
    - Aumento del caudal de aire en áreas con temperaturas elevadas o alta humedad.
    - Uso de ventiladores auxiliares para mejorar la distribución del aire en frentes de trabajo y galerías profundas.
  - Control del punto de rocío para evitar condensación excesiva y mejorar el confort térmico.
  - **Monitoreo continuo** de temperatura y humedad.
  - **Uso de equipos de protección personal (PPE)** para minimizar el impacto de condiciones extremas.
  - **Hidratación y pausas para prevenir el estrés térmico.**
  - **Optimización de la maquinaria y procesos** para reducir la generación de calor.
  - **Control de la presión atmosférica:**
    - Diseño adecuado de los circuitos de ventilación para equilibrar presiones y evitar diferencias bruscas.
    - Monitoreo de la presión barométrica para prevenir liberaciones súbitas de metano o radón.
    - Uso de sellos y compuertas para controlar flujos de aire en secciones de alta presión.

# Humedad en mina



## Objetivos específicos

- Comprender los efectos de la humedad sobre la operación minera.
- Analizar los riesgos asociados con una humedad inadecuada.
- Identificar los métodos de medición de la humedad.
- Comprender los efectos de la humedad en la operación minera y su relación con la seguridad y la salud.
- Analizar los riesgos asociados con niveles de humedad elevados o reducidos en el entorno minero.
- Identificar y aplicar los métodos de medición de la humedad, incluyendo el uso del diagrama psicrométrico para evaluar las condiciones del aire.

# Efectos de la humedad sobre la operación minera

- Efectos en la seguridad y salud de los trabajadores
  - Aumento del estrés térmico: la combinación de alta humedad y temperatura dificulta la disipación del calor corporal, incrementando el riesgo de golpe de calor.
  - Problemas respiratorios: exceso de humedad puede favorecer la proliferación de microorganismos en el aire, aumentando el riesgo de enfermedades pulmonares.
  - Disminución del confort laboral: un ambiente húmedo reduce la productividad y aumenta la fatiga.
- Efectos en la maquinaria y equipos
  - Corrosión acelerada: equipos metálicos sufren desgaste prematuro en ambientes con alta humedad.
  - Mal funcionamiento de sistemas eléctricos: la humedad puede generar cortocircuitos y fallos en equipos electrónicos.
  - Reducción de la eficiencia de explosivos: algunos tipos de explosivos pierden efectividad en condiciones de humedad elevada.
- Efectos en la estabilidad geotécnica y producción
  - Debilitamiento de estructuras rocosas: la humedad excesiva favorece la disolución de minerales y la inestabilidad de taludes y galerías.
  - Incremento de riesgos de colapsos y derrumbes: la infiltración de agua puede reducir la resistencia mecánica del macizo rocoso.
  - Impacto en la manipulación de materiales: minerales y escombros pueden aglomerarse, dificultando su transporte y procesamiento.

# Riesgos asociados con una humedad inadecuada

- La humedad en minería subterránea debe mantenerse dentro de rangos adecuados porque tanto la humedad excesiva como la baja humedad pueden generar problemas que afectan la estabilidad de la mina, la salud de los trabajadores y el rendimiento de los equipos.
- **El control de humedad debe ser parte de un sistema integral de gestión minera, combinando ventilación, monitoreo ambiental y estrategias de mitigación.**

## Riesgos por alta humedad:

- Estrés térmico y golpe de calor: la humedad elevada reduce la capacidad del cuerpo para disipar el calor, aumentando el riesgo de deshidratación y fatiga térmica.
- Problemas respiratorios: la humedad favorece la proliferación de hongos y bacterias, incrementando el riesgo de enfermedades pulmonares.
- Corrosión acelerada de equipos: la presencia de humedad excesiva deteriora maquinaria, estructuras metálicas y componentes eléctricos
- Inestabilidad geotécnica: la humedad puede debilitar el macizo rocoso, favoreciendo derrumbes y colapsos en galerías.
- Disminución de la eficiencia de explosivos: algunos tipos de explosivos pierden efectividad al absorber humedad, afectando la fragmentación de la roca.
- Mayor generación de lodo y barro: dificulta el transporte de materiales y el desplazamiento de los trabajadores.

## Riesgos por baja humedad

- Mayor generación de polvo en suspensión: aumenta el riesgo de enfermedades pulmonares como la silicosis y la neumoconiosis.
- Electricidad estática y riesgo de incendios: ambientes secos pueden provocar descargas electrostáticas, generando chispas en presencia de gases inflamables o polvo combustible.
- Deshidratación acelerada de los trabajadores: la evaporación rápida del sudor puede llevar a fatiga y problemas de salud.
- Desgaste prematuro de componentes mecánicos: la falta de humedad en el aire puede generar fricción excesiva en maquinaria y equipos móviles.

# Métodos de control de la humedad en minería

1. Ventilación eficiente: regula los niveles de humedad mediante el control del flujo de aire en el interior de la mina.
2. Drenaje y bombeo de agua subterránea: evita la acumulación de agua en zonas críticas, reduciendo la humedad excesiva.
3. Uso de humidificadores y deshumidificadores industriales: permite mantener niveles óptimos de humedad según las condiciones específicas de cada sector de la mina.
4. Supresión de polvo mediante aspersión de agua: contribuye al control de la humedad al reducir la dispersión de partículas en suspensión.
5. Recubrimientos protectores para equipos eléctricos y metálicos: previene la corrosión y fallos eléctricos causados por ambientes húmedos.
6. Mantenimiento preventivo de equipos: garantiza la operatividad de maquinarias y sistemas eléctricos, minimizando los efectos de la humedad excesiva o sequedad extrema.

# Principales métodos de medición de la humedad

- Existen diferentes métodos para cuantificar la humedad relativa y absoluta en el entorno minero.
- Psicrómetros
  - Principio de funcionamiento: mide la temperatura con dos termómetros, uno seco y otro húmedo. La diferencia de temperatura se usa para calcular la humedad relativa.
  - Tipos:
    - Psicrómetro de aspiración: usa un ventilador para acelerar la evaporación del bulbo húmedo.
    - Psicrómetro de lámina húmeda: más simple, se basa en la evaporación natural del agua.
  - Ventajas: método económico y sin necesidad de calibración frecuente.
  - Desventajas: requiere condiciones específicas para una medición precisa.
- Higrómetros electrónicos
  - Principio de funcionamiento: utilizan sensores capacitivos, resistivos o de punto de rocío para medir la humedad en el aire.
  - Tipos:
    - Higrómetros capacitivos: detectan cambios en la capacitancia de un polímero sensible a la humedad.
    - Higrómetros resistivos: miden la variación de la resistencia eléctrica en un sensor higroscópico.
    - Higrómetros de punto de rocío: detectan la temperatura en la que el aire alcanza la saturación.
  - Ventajas: alta precisión, respuesta rápida y posibilidad de monitoreo continuo.
  - Desventajas: más costosos y requieren mantenimiento periódico.

- **Sensores de humedad en sistemas de ventilación**
  - Principio de funcionamiento: integrados en redes de ventilación, miden la humedad y envían datos en tiempo real.
  - Características:
    - Conectados a sistemas de monitoreo centralizado.
    - Permiten ajustar automáticamente la ventilación para mantener condiciones óptimas.
  - Ventajas: automatización y control continuo en toda la mina.
  - Desventajas: instalación costosa y necesidad de calibraciones frecuentes.
  
- **Medidores gravimétricos de humedad**
  - Principio de funcionamiento: basado en la diferencia de peso de una muestra antes y después del secado en horno.
  - Usos: aplicado en el análisis de contenido de humedad en minerales y materiales de construcción en la mina.
  - Ventajas: método muy preciso para análisis de laboratorio.
  - Desventajas: no es útil para medición en tiempo real.

Método	Precisión	Coste	Aplicación en mina
Psicrómetro	Media	Bajo	Medición puntual manual
Higrómetros electrónicos	Alta	Medio	Monitoreo en tiempo real
Sensores en ventilación	Alta	Alto	Control automático de humedad
Medidores gravimétricos	Muy alta	Medio	Análisis de muestras en laboratorio

- La medición de humedad en minería es clave para la seguridad, ventilación y conservación de equipos.
- Una medición precisa permite prevenir problemas como son el estrés térmico, corrosión de equipos, generación de polvo y alteraciones en la estabilidad del macizo rocoso.
- El uso de sensores electrónicos permite un control continuo y automatizado.
- Psicrómetros y higrómetros electrónicos son los más adecuados para mediciones directas en mina.
- La elección del método más adecuado en cada caso dependerá de la necesidad operativa y el nivel de precisión requerido.

# Impacto de la humedad en la seguridad y salud laboral

## ■ Efectos de una humedad alta

- Estrés térmico y golpe de calor: la alta humedad dificulta la evaporación del sudor, lo que impide la disipación del calor corporal y puede provocar fatiga, deshidratación e insolación.
- Problemas respiratorios: la humedad elevada favorece la proliferación de hongos, bacterias y ácaros, aumentando el riesgo de infecciones respiratorias y alergias.
- Disminución del confort laboral: condiciones de trabajo incómodas que reducen la productividad y generan un mayor desgaste físico.

## ■ Efectos de una humedad baja

- Mayor riesgo de enfermedades pulmonares: la sequedad del aire incrementa la dispersión de partículas de polvo y sílice, favoreciendo enfermedades como la silicosis y neumoconiosis.
- Irritación en piel y mucosas: el aire seco provoca sequedad en la piel, ojos y vías respiratorias, aumentando el riesgo de infecciones.
- Deshidratación acelerada: un ambiente seco intensifica la evaporación del sudor, lo que puede generar fatiga y reducción del rendimiento físico.

# Impacto de la humedad en la seguridad estructural y operativa de la mina

- Impacto en la estabilidad de la mina
  - Debilitamiento del macizo rocoso: La humedad excesiva puede disolver minerales y reducir la resistencia de las rocas, aumentando el riesgo de colapsos.
  - Derrumbes y desprendimientos: Materiales inestables y acumulación de agua en galerías incrementan los peligros geotécnicos.
  - Corrosión de soportes metálicos: Elementos estructurales como pernos y mallas pueden deteriorarse más rápido en condiciones de alta humedad.
- Impacto en equipos y materiales
  - Fallas en equipos eléctricos y electrónicos: La humedad puede causar cortocircuitos y fallas en sistemas de automatización y comunicación.
  - Desgaste acelerado de maquinaria: La corrosión afecta la vida útil de equipos mineros, generando costos de mantenimiento elevados.
  - Alteración de explosivos y sustancias químicas: Algunos explosivos pierden efectividad o se vuelven inestables con la absorción de humedad.

# Temperatura en espacios subterráneos



- Evaluar los efectos de la temperatura sobre los trabajadores y las condiciones de trabajo.
- Analizar las causas del aumento de temperatura en las minas.
- Estudiar los métodos de medición y control de la temperatura.
- Evaluar los efectos de la temperatura sobre los trabajadores y su impacto en las condiciones de trabajo.
- Analizar las principales causas del aumento de temperatura en las minas y los factores que influyen en su variabilidad.
- Analizar la influencia de la velocidad del aire y su efecto en la temperatura.
- Estudiar los métodos de medición y control de la temperatura, incluyendo su aplicación y eficacia en la gestión térmica del ambiente minero.

# Causas del aumento de temperatura en mina

- La temperatura al interior de una mina subterránea depende de varios factores:
  1. Temperatura del aire exterior
  2. Influencia del gradiente geotérmico y temperatura de la roca
  3. Calentamiento por auto-compresión del aire durante descenso a la mina
  4. Procesos endotérmicos
  5. Procesos exotérmicos
  6. Utilización de maquinaria y en particular, de equipos diésel
  7. Voladuras y usos de explosivos
  8. Presencia, en su caso, de aguas calientes o acuíferos termales
  9. Intensidad de la ventilación
  
- El aumento de la temperatura en las minas puede afectar la salud, la seguridad, la higiene y la productividad de los trabajadores.

## Aumento de temperatura por compresión

- La temperatura de los gases aumenta si aumenta la presión

$$(PV = nRT)$$

- En el caso del aire se tiene que la presión atmosférica es inversamente proporcional a la altura sobre el nivel del mar.
- A medida que profundizamos en una mina la presión atmosférica aumenta, por lo tanto también lo hace la temperatura.
- Por este efecto, la temperatura aumenta a razón de 1°C por cada 100m de profundidad o 10°C cada 1 Km.

$$T = T_0 + \frac{k-1}{kR} H$$

$$k(\text{indice\_adiabatico}) = 1,41$$

$$R(\text{cte\_gases}) = 29,27$$

$$T = T_0 + 0,0098H$$



## Temperatura de la roca

- La temperatura de la roca en la capa superficial (20 a 40 m bajo la superficie) se correlaciona con la temperatura del aire en el exterior.
- Bajo la capa superficial está la zona geotérmica, en que la temperatura de la roca no tiene correlación con la temperatura exterior.
- En la zona geotérmica, la temperatura de las rocas asciende a medida que nos acercamos al centro de la tierra.

# Gradiente Geotérmico

Se define como la diferencia de temperatura por unidad de profundidad (en la zona geotérmica)

- Varía entre 1 y 5 °C por cada 100 m.
  - Menos de 300 m de profundidad: 2°C/100 m
  - Menos de 1000 m de profundidad: 3°C/100 m
  - 1000 a 2500m de profundidad: 4,5°C/100 m

## Influencia de la velocidad del aire

- El rendimiento en la lucha contra la temperatura aumenta con la velocidad del aire ya que el organismo del trabajador puede eliminar mejor el calor hacia el exterior.
- A más de 5 m/s no hay mayor influencia práctica.
- Sensación térmica:

Humedad relativa	Temperatura seca	Velocidad mínima
< 85 %	24 a 30 °C	30 m/min
> 85 %	> 30 °C	120 m/min

- Temperatura máxima:
  - 32° si jornada < 6 hrs
  - 30° si jornada < 8 hrs.
- Velocidad máxima del aire: 150 m/min = 2,5 m/s

# Efectos de la temperatura sobre los trabajadores y las condiciones de trabajo

La temperatura y la humedad relativa se incrementan con la profundidad; estas dos variables inciden en el índice de estrés térmico que experimentan los trabajadores

## ■ Efectos sobre la salud

- Agotamiento por calor, náuseas, mareos
- Deshidratación
- Síncopa por calor
- Golpe de calor, que puede ser mortal
- Insolación
- Trastornos de líquidos y electrolitos
- Enfermedades cardiovasculares, renales, y respiratorias
- Problemas de salud mental

## ■ Efectos sobre la seguridad

- Aumento de los índices de accidentalidad
- Heridas en el lugar de trabajo
- Lesiones
- Incendios

- Corrosión de equipos y materiales
- Reducción de la vida útil de los equipos

## ■ Efectos sobre el rendimiento

- Bajos rendimientos en las labores
- Disminución de la concentración, la habilidad motriz, y el rendimiento físico
- Aumento de la irritabilidad
- Dificultad para prestar atención a los procedimientos de seguridad

# Métodos de medición y control de la temperatura

Para medir la temperatura en mina se utilizan termómetros, termopares, termohigrómetros y otros instrumentos:

## ■ Termómetros

- Termómetros de contacto directo: miden la temperatura en contacto directo con la fuente
  - Termopares: sensores que utilizan la diferencia de temperatura entre dos metales para generar un voltaje proporcional a la temperatura medida.
  - Sensores de termistor: dispositivos semiconductores que cambian su resistencia con la temperatura.
- Termómetros de bulbo húmedo: miden la temperatura del aire y la humedad relativa
- Termómetros sin contacto: miden la temperatura de objetos a distancia sin necesidad de contacto físico:
  - Pirómetros Infrarrojos: miden la radiación térmica emitida por una superficie sin necesidad de contacto directo.

- Cámaras termográficas: permiten obtener imágenes térmicas del entorno para identificar zonas de calor anormal.

- Termómetros de resistencia: son termómetros de contacto que miden la temperatura a partir de la variación de la resistencia eléctrica de un material:
  - Termorresistencias (RTD): utilizan la variación de resistencia eléctrica con la temperatura para obtener mediciones precisas.
- Termómetros de gas: miden la temperatura a partir de la variación de la presión de un gas

## ■ Otros instrumentos

- Termopares: miden la temperatura a través de la conducción de calor
- Termohigrómetros: miden la temperatura y la humedad relativa de un ambiente
- Medidores de resistencia variable: miden la temperatura



- Sensores electrónicos y redes de monitoreo:
  - Sensores inalámbricos IoT: utilizan redes de sensores distribuidos en la mina para enviar datos en tiempo real.
  - Estaciones meteorológicas subterráneas: miden la temperatura, humedad y otros parámetros para evaluar las condiciones ambientales.
  - Sensores de fibra óptica: detectan variaciones de temperatura a lo largo de un cable de fibra óptica, útil en áreas extensas.

# Polvo en espacios subterráneos

## Objetivos específicos

- Identificar los riesgos del polvo en la minería.
- Clasificar los tipos de polvo los diferentes tipos de polvo presentes en entornos mineros, sus efectos en la salud, los valores límite de exposición establecidos por las regulaciones vigentes y los métodos de control para mitigar su impacto.
- Analizar los riesgos asociados al polvo mineral, en particular el polvo de roca, el polvo de carbón y otros polvos inflamables, así como las estrategias para minimizar la exposición de los trabajadores.
- Evaluar métodos de control y medición del polvo.
- Identificar y clasificar los tipos de polvo presentes en actividades mineras, con énfasis en el polvo de roca, polvo de carbón y polvos inflamables.
- Analizar los efectos en la salud derivados de la exposición al polvo mineral, incluyendo las principales enfermedades respiratorias y ocupacionales.
- Examinar los valores límite de exposición establecidos por normativas y regulaciones nacionales e internacionales para la protección de los trabajadores.
- Evaluar y proponer métodos de control para la reducción de emisiones de polvo en entornos mineros, considerando medidas de prevención, mitigación y tecnologías disponibles.

## Polvo de roca

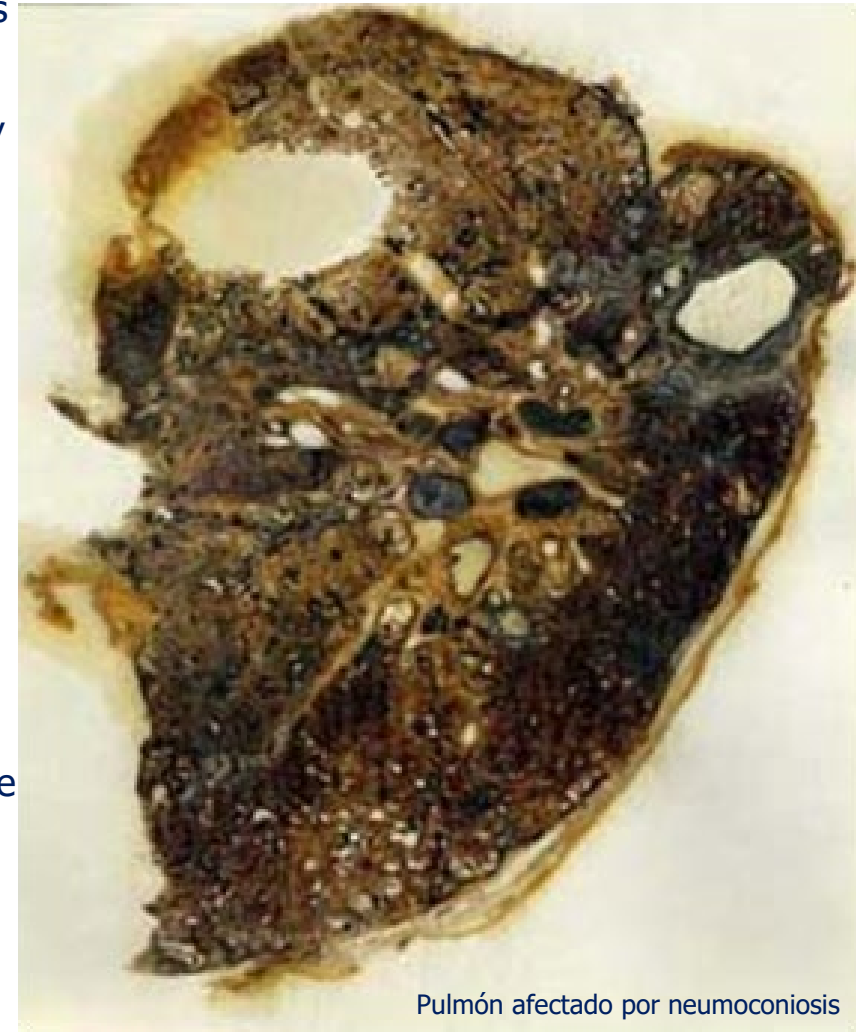
- El polvo es una mezcla de material particulado en suspensión que es omnipresente en el aire respirable de todas las actividades de la industria extractiva:
  - Operaciones de extracción
  - Procesamiento de minerales (trituración, molienda y clasificación )
  - Transporte de materiales (movimiento de camiones y cintas transportadoras, tolvas, coladeros)
  - Condiciones ambientales
- Está constituido por partículas de muy diverso tamaño, lo que influye en su comportamiento y efectos en:
  - Salud ocupacional: puede causar enfermedades respiratorias como silicosis y neumoconiosis.
  - Seguridad laboral: reduce la visibilidad y aumenta el riesgo de accidentes.
  - Impacto ambiental: contaminación del aire, suelo y agua por deposición de partículas.
  - Deterioro de equipos: el polvo acumulado en maquinaria reduce su eficiencia y vida útil.
- Cuando se respira, antes de llegar a los pulmones, pasa por una serie de filtros como son los conductos nasales y los conductos pulmonares.
- Las partículas que evitan el sistema de defensa del aparato respiratorio son las que su granulometría viene definida por la Curva de Johannesburgo (Convenio de Johannesburgo 1979. Directiva 88/642/CEE del año 1988).
- Las partículas más peligrosas del polvo respirable son las que están entre 1 y 10  $\mu\text{m}$ . Las de tamaños menores no se depositan y mayores se capturan en filtros naturales del cuerpo.
- El polvo de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) es el más agresivo.



## Polvo de roca. Lesiones que produce en el sistema respiratorio

Las partículas de polvo de carbón y roca son agentes con alto grado de peligrosidad en sus efectos

- La exposición al polvo de roca en la minería puede provocar diversas enfermedades y lesiones en el sistema respiratorio, dependiendo de la composición del polvo, el tiempo de exposición y la concentración de partículas en el aire.
- Las afecciones provocadas en el sistema respiratorio son
  - Lesiones sobre vías respiratorias superiores:
    - Laringitis y faringitis
    - Tos crónica y dificultad para respirar.
    - Irritación de la mucosa nasal y de la garganta.
  - Alteraciones bronquiales
    - Inflamación de los bronquios y tejidos pulmonares.
  - Enfermedades pulmonares ocupacionales causadas por la inhalación prolongada de partículas minerales. Se clasifica en varios tipos según el tipo de polvo inhalado
    - Silicosis: provocada por la inhalación de polvo de sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Es irreversible y puede llevar a insuficiencia respiratoria grave.
    - Asbestosis: relacionada con la inhalación de fibras de asbesto, causando fibrosis pulmonar.
    - Neumoconiosis, también conocida como "pulmón negro", afecta a trabajadores expuestos al polvo de carbón.



Pulmón afectado por neumoconiosis

- Enfermedades respiratorias crónicas
  - Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC): restricción del flujo de aire en los pulmones, provocando disnea progresiva.
  - Fibrosis pulmonar: formación de tejido cicatricial en los pulmones que reduce la capacidad respiratoria.
- Mayor riesgo de infecciones pulmonares: la exposición prolongada al polvo de roca debilita las defensas del sistema respiratorio, aumentando la susceptibilidad a infecciones como la tuberculosis pulmonar.



# El polvo en la mina

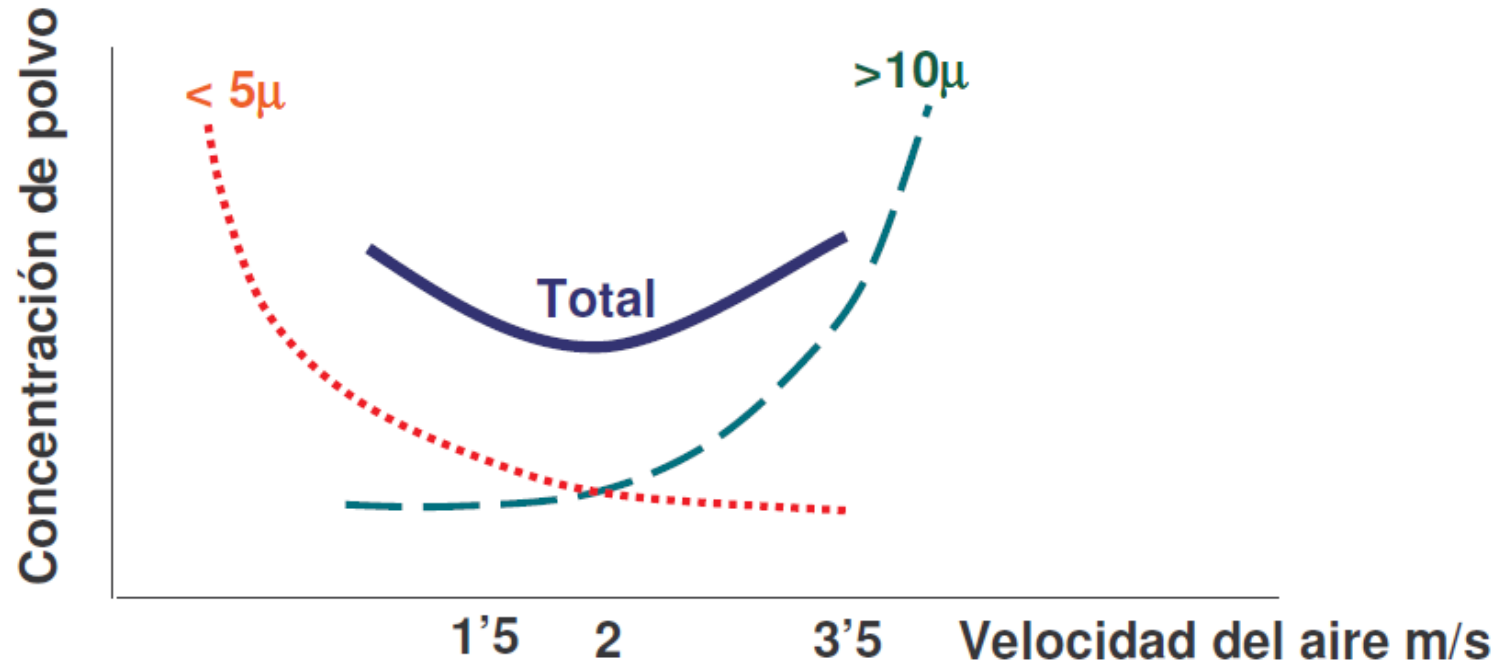
El polvo respirable está compuesto por partículas de tamaño extremadamente pequeño (menores de  $7\ \mu\text{m}$ ) que pueden ser inhaladas profundamente en los pulmones, alcanzando los alvéolos pulmonares sin ser filtradas por las defensas naturales del cuerpo.

- Eliminación del polvo:
  - Polvo respirable:  $< 7\ \mu\text{m}$
  - Clasificación de las labores en tres categorías, según el polvo respirable ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) y el % de  $\text{SiO}_2$ .
  - Prescripción:  $v < 8\ \text{m}/\text{seg}$ .
- La ventilación, como medida para combatir el polvo, puede actuar de dos formas diferentes:
  - Por dilución
  - Por desplazamiento fuera del lugar donde se encuentren los operarios.

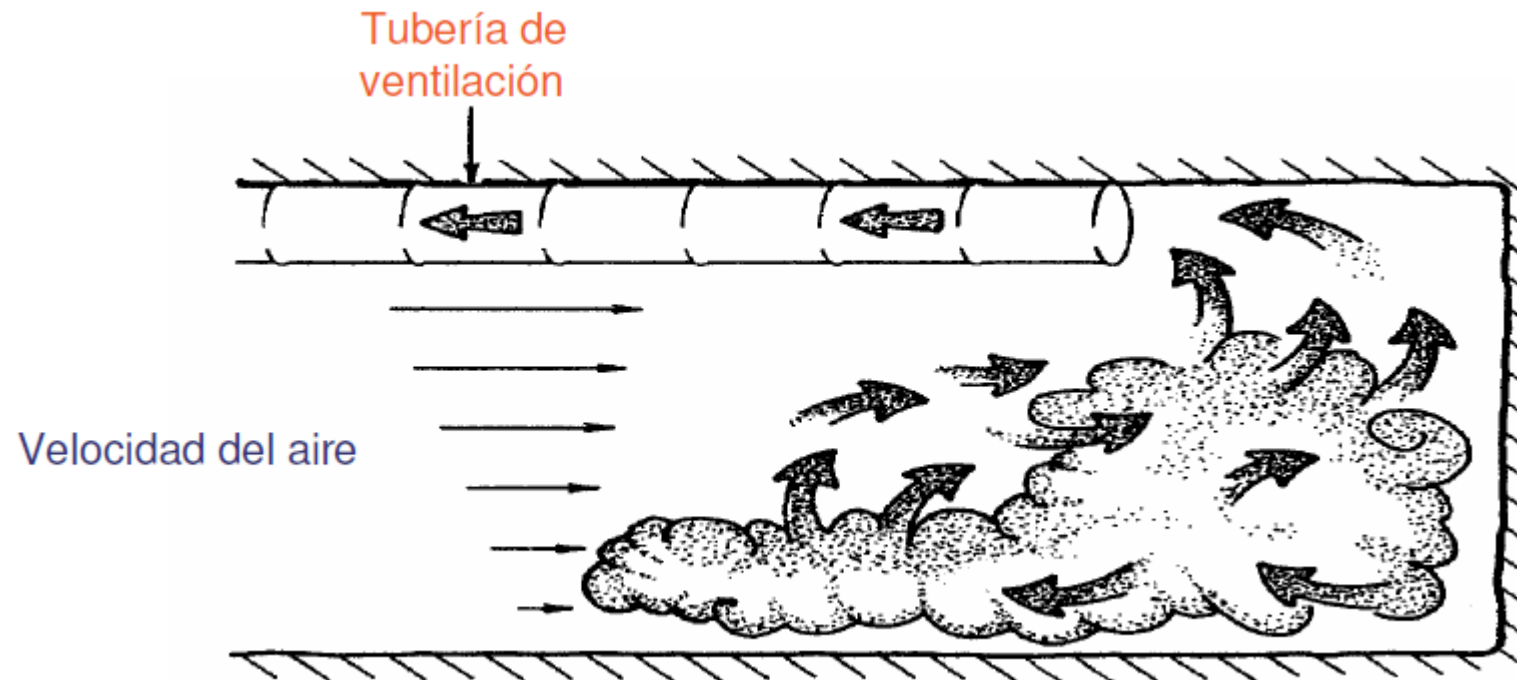


- **Dilución:**

- La concentración de polvo total sería mínima para una velocidad del aire en la labor de aproximadamente 2 m/seg o bien para un rango de velocidades entre 1'5 y 3'5 m/seg.



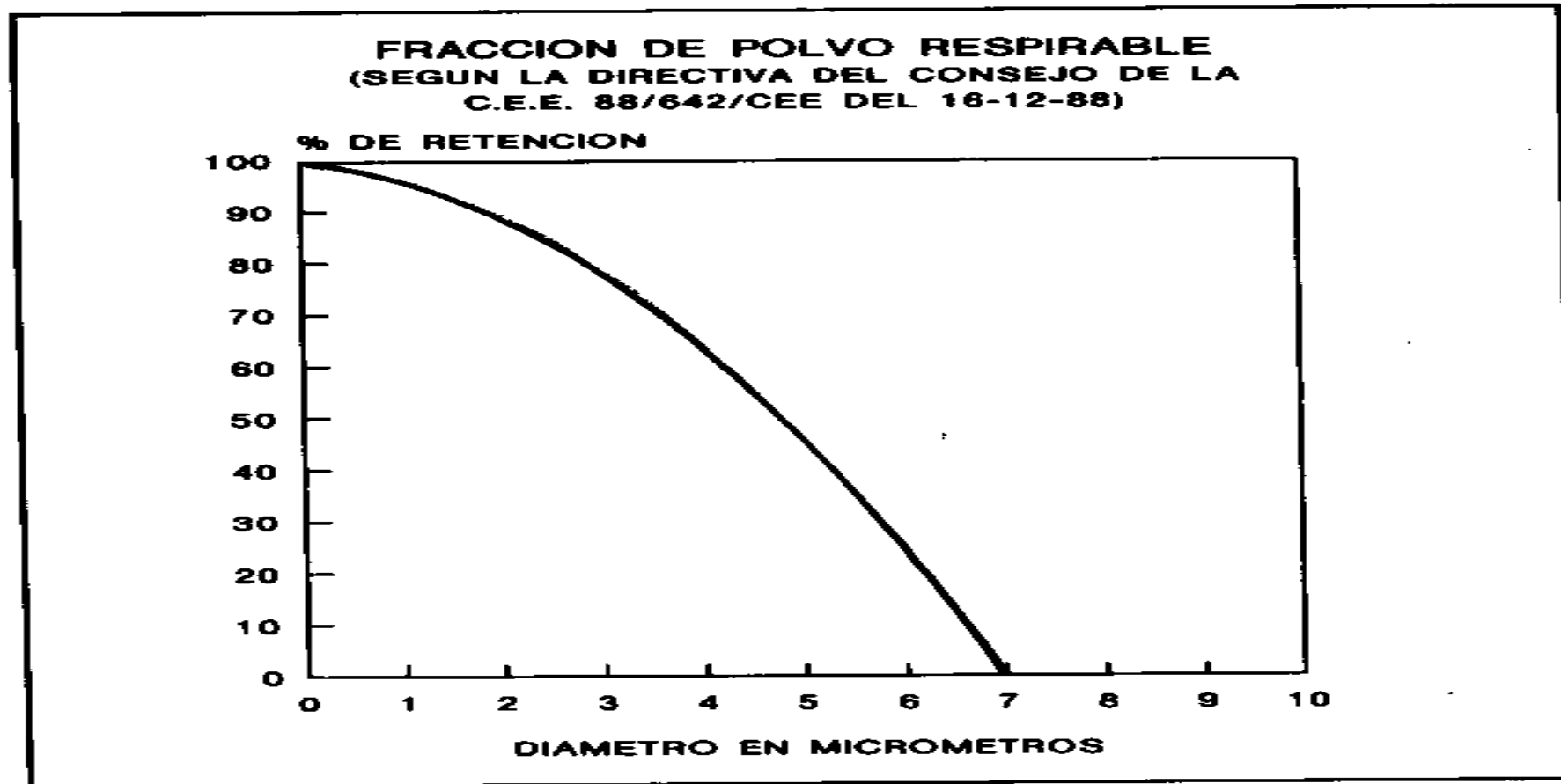
- **Desplazamiento (extracción) fuera del lugar donde se encuentran los operarios:**



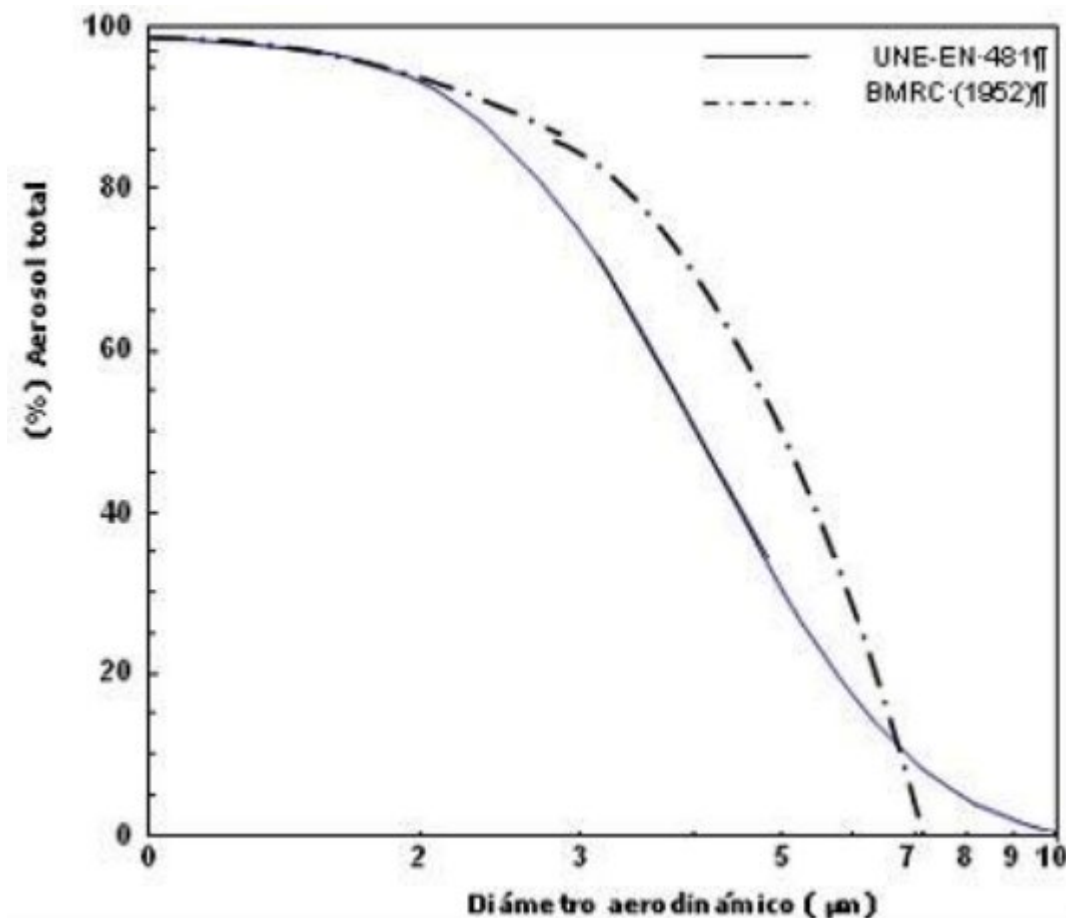
## Convenio de Johannesburgo 1979. Directiva 88/642/CEE del año 1988

- Establece:
  - **Fracción inspirable:** fracción de partículas que se inspira de todo el conjunto de partículas en suspensión presentes en el aire que respira el trabajador
  - **Fracción respirable:** es la parte de fracción inspirable que penetra en los alveolos pulmonares, para su captación se emplea un separador por sedimentación que separe el 50% de las partículas que tengan un diámetro aerodinámico de 5 micras
- **Esta doble definición no es suficiente para la protección de los trabajadores contra polvo.**
- Dos FACTORES para definir la clasificación:
  - PESO DEL POLVO RESPIRABLE en  $\text{mg}/\text{m}^3$
  - PORCENTAJE DE SÍLICE LIBRE ( $\text{SiO}_2$ )
- **Polvo respirable:** incluye el 98 % de las partículas de  $1\mu$  de diámetro, el 75 % de las de  $3,5\mu$ , el 50 % de las de  $5\mu$  y ninguna por encima de  $7\mu$  (Curva de Johannesburgo)

# Curva de Johannesburgo



- La curva BMRC (convenio de Johannesburgo) da valores más altos que el convenio de la norma UNE-EN 481.
- Esto quiere decir que **los equipos acordes con el convenio de Johannesburgo recogen mayor concentración en masa (un 20% mas) que los equipos acordes con el convenio para la fracción respirable descrito en la norma UNE EN 481**



- El Comité Europeo de Normalización CEN publicó en 1993 la norma EN 481
- Según la Norma UNE EN 481 "Atmósferas en puestos de trabajo", se definen las siguientes fracciones:
  - **Fracción inhalable:** fracción másica del aerosol total que se inhala a través de la nariz y la boca
  - **Fracción extratorácica:** fracción másica de partículas inhaladas que no penetran más allá de la laringe
  - **Fracción torácica:** fracción másica de partículas inhaladas que penetran más allá de la laringe
  - **Fracción traqueo-bronquial:** fracción másica de partículas inhaladas que penetran más allá de la laringe, pero no pueden penetrar a las vías respiratorias no ciliadas
  - **Fracción respirable:** fracción másica de partículas inhaladas que penetran en las vías respiratorias no ciliadas

Valores numéricos de los convenios, como porcentajes del convenio para la fracción inhalable y del aerosol total

Diámetro aerodinámico D µm	Como porcentaje del inhalable			Como porcentaje del total			Diámetro aerodinámico D µm
	Convenio inhalable E <sub>I</sub> %	Convenio torácico E <sub>T</sub> %	Convenio respirable E <sub>R</sub> %	Convenio inhalable E <sub>I</sub> %	Convenio torácico E <sub>T</sub> x E <sub>I</sub> %	Convenio respirable E <sub>R</sub> x E <sub>I</sub> %	
0	100	100	100	100	100	100	0
1	100	100	100	97,1	97,1	97,1	1
2	100	100	96,8	94,3	94,3	91,4	2
3	100	100	80,5	91,7	91,7	73,9	3
4	100	99,6	55,9	89,3	89,0	50,0	4
5	100	98,1	34,4	87,0	85,4	30,0	5
6	100	94,9	19,8	84,9	80,5	16,8	6
7	100	89,5	10,9	82,9	74,2	9,0	7
8	100	82,2	5,9	80,9	66,6	4,8	8
9	100	73,7	3,2	79,1	58,3	2,5	9
10	100	64,6	1,7	77,4	50,0	1,3	10
11	100	55,5	0,9	75,8	42,1	0,7	11
12	100	47,0	0,5	74,3	34,9	0,4	12
13	100	39,3	0,3	72,9	28,6	0,2	13
14	100	32,4	0,2	71,6	23,2	0,2	14
15	100	26,6	0,1	70,3	18,7	0,1	15
16	100	21,6	0,1	69,1	15,0	0	16
18	100	14,1	0	67,0	9,5		18
20	100	9,1		65,1	5,9		20
25	100	3,0		61,2	1,8		25
30	100	1,0		58,3	0,6		30
35	100	0,3		56,1	0,2		35
40	100	0,1		54,5	0,1		40
50	100	0		52,5	0		50
60	100			51,4			60
80	100			50,4			80
100	100			50,1			100

# Polvo de roca. Clasificación de labores respecto al polvo respirable (ITC 04.8.01)

GRUPO	PORCENTAJE SiO <sub>2</sub> LIBRE		
	A <10%	B 10 - 30%	C >30%
CLASE	mg/m <sup>3</sup> PESO DEL AIRE RESPIRABLE		
I	<6	<3	<2
II	6 - 10	3 - 6	2 - 3
III	>10	>6	>3

Otras legislaciones que han actualizado sus normativas establecen valores límite más restrictivos.

A modo de ejemplo, la legislación chilena establece:

- LPP (límite permisible ponderado) para la sílice es de 0,08 mg/m<sup>3</sup>
- LPA (límite permisible absoluto) = 0,4 mg/m<sup>3</sup>

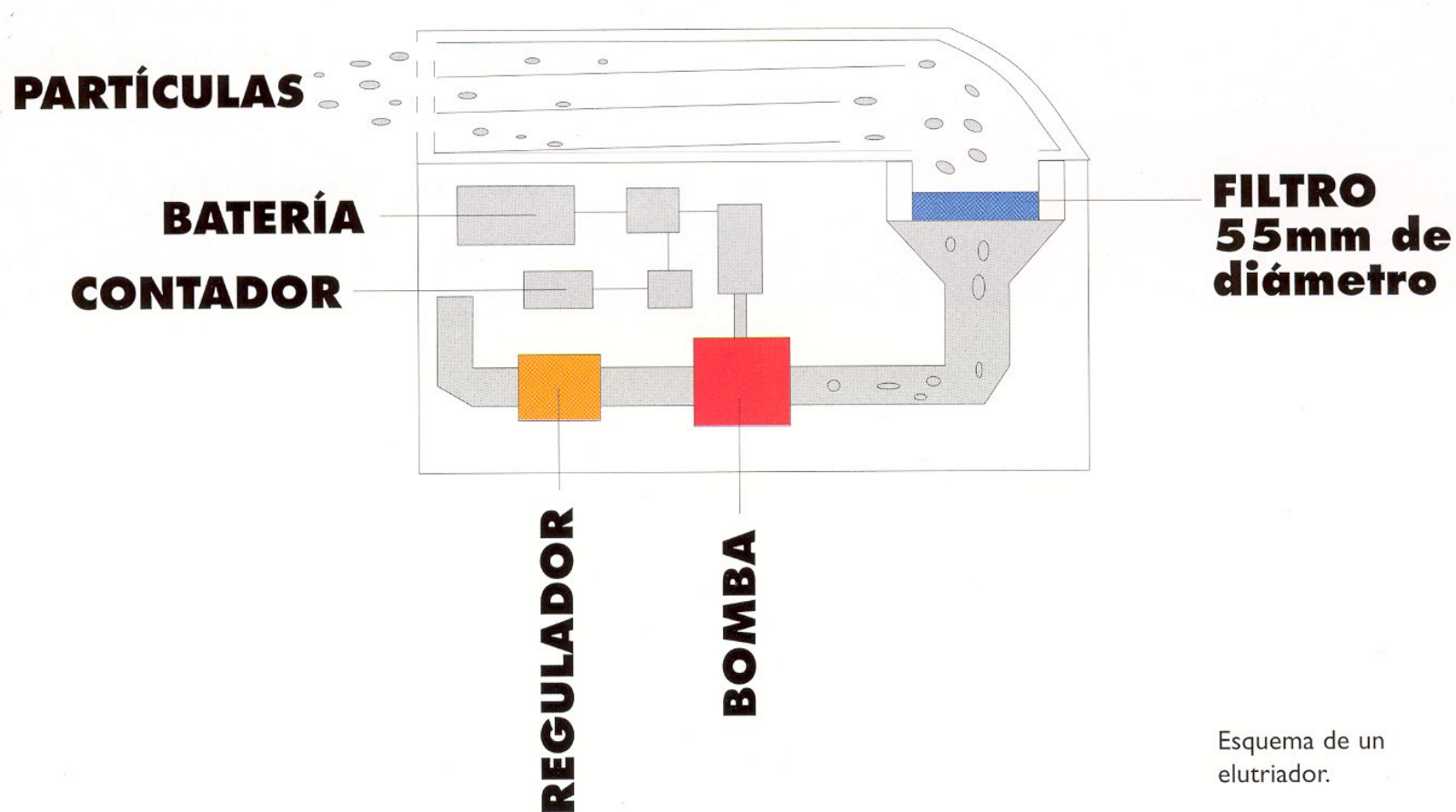
## Clasificación de las labores mineras de interior respecto al polvo de roca

- CLASE I
  - Se considera labor sin riesgo.
  - Se aconseja utilizar medidas de prevención.
- CLASE II
  - Aplicar sistemas de seguridad adecuados para reducir los índices obtenidos.
  - Como máximo 180 jornadas efectivas anuales. Resto en I.
- CLASE III
  - Medidas de prevención inmediatas. Dar cuenta a la autoridad que informará sobre medidas y plazos.
  - No superar las 150 jornadas efectivas anuales. Resto en I.

## Fundamentos de la medición del polvo respirable

- Mediante un aparato aspirador llamado **elutriador**, utilizado para la **separación y clasificación** de partículas en función de su tamaño y densidad mediante una corriente ascendente de aire o líquido.
  - Su principio de funcionamiento se basa en la diferente velocidad de sedimentación de las partículas:
    - Las partículas más livianas o pequeñas son arrastradas por la corriente.
    - Las partículas más pesadas o grandes se sedimentan y son separadas.
  - Separa el polvo respirable ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ) del polvo total presente en el aire.
  - Permite evaluar la eficacia de los sistemas de control de polvo en minas y otras industrias.
- Absorbe 2,5 litros de nube de polvo por minuto a velocidad constante. Pasa a través de placas horizontales donde se sedimentan las partículas gruesas.
- El polvo respirable queda depositado en un filtro que se analiza posteriormente.
  - En talleres no mecanizados se sitúa a menos de 15 m del último trabajador en el sentido de la ventilación.
  - En los mecanizados a menos de 15 m del final del recorrido de la máquina.
  - En fondos de saco a menos de 5 m del puesto.

## Medición del polvo respirable. Esquema de un elutriador



## Otros aparatos de medición de polvo

- **Conjunto ciclónico:**
  - Una bomba de aspiración accionada por pilas deposita las partículas de mayor tamaño en un pequeño ciclón y, las más pequeñas (<5m), en un filtro de PVC.
  - Pesada la muestra, se analiza el contenido de SiO<sub>2</sub> por infrarrojos, colorimetría o difracción de Rayos X.
- **Conímetro:**
  - Las partículas se recogen sobre una superficie adherente (i.e. papel parafinado) al impactar sobre ella a gran velocidad. Luego se hace un conteo al microscopio.
- **Precipitador térmico:**
  - Las partículas se depositan en dos cristales, repelidas por un filamento situado entre ambos y calentado mediante una batería.
- **Precipitador electrostático:**
  - Las partículas se cargan eléctricamente al atravesar un campo eléctrico y posteriormente se depositan sobre unas superficies cargadas con signo contrario.

- **Tindalómetro:**

- El polvo dispersa un rayo de luz o un rayo láser y la variación de intensidad es detectada por una célula fotoeléctrica.

- **Medidor piezoeléctrico:**

- Cambio de frecuencia de resonancia en un cristal piezoeléctrico de cuarzo debido a la acumulación de polvo en él.

- **Medidor de rayos  $\beta$ :**

- Mide la absorción por las partículas de polvo de los rayos  $\beta$  emitidos por el  $C_{14}$  o el  $Sr_{90}$

## Medición del porcentaje de sílice libre ( $\text{SiO}_2$ )

- Es fundamental para evaluar el riesgo de enfermedades respiratorias como la silicosis y garantizar el cumplimiento de normativas de seguridad.
- Se calcula por aparatos que toman muestras de polvo ambiental en:
  1. Talleres de explotación
  2. Labores en fondo de saco
  3. Estaciones de transferencia de cintas, zonas de instalación de cribas, machacadoras y trituradoras, así como en puestos de trabajo aislados
- Métodos de Medición
  - Muestreo de Aire con Filtros:
    - Se recolecta una muestra de aire utilizando bombas de muestreo personales con filtros de membrana de PVC o de celulosa.
    - Estos filtros capturan partículas de polvo respirable, incluyendo la fracción de sílice.
  - Difracción de Rayos X (DRX)
    - Técnica más precisa para determinar la cantidad de sílice cristalina en una muestra.
    - Se analiza el polvo capturado en los filtros mediante difracción de rayos X, identificando la estructura cristalina del  $\text{SiO}_2$ .

- Espectrofotometría Infrarroja (FTIR)
  - Método rápido basado en la absorción de luz infrarroja por la sílice en la muestra.
  - Permite estimar la concentración de sílice libre en función de su firma espectral.
- Gravimetría y Análisis Químico
  - Se pesa el polvo recolectado antes y después de la exposición a ácido fluorhídrico (HF), que disuelve la sílice.
  - La diferencia en peso indica la cantidad de sílice presente.
- Límites de Exposición
  - Las regulaciones varían según la normativa del país, pero en general se establecen valores límite de exposición ocupacional (VLE) como:
    - OSHA (EE.UU.): 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de aire (promedio ponderado de 8 horas).
    - NIOSH: 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con un límite recomendado de 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
    - Normativas locales: Deben seguirse los estándares específicos de cada país.

# Estrategias de control del polvo

## ■ ACCIONES POSIBLES:

- Ventilación eficiente: mejora la dispersión y filtración del aire contaminado.
  - (+) Dilución del polvo respirable (<5m)
  - (-) Sustentación de partículas (>10m)
- Supresión de polvo con agua: uso de aspersores para reducir partículas en suspensión.
- Ciclonado / Filtrado
- Encapsulación y barreras físicas: cubiertas y cerramientos para minimizar la dispersión del polvo.
- Uso de equipos de protección personal (epp): máscaras y filtros para reducir la inhalación de partículas.

## ■ RECOMENDACIONES Y PRESCRIPCIONES:

- Conectar directamente al retorno los principales focos de emisión de polvo
- Que el aire circule en la misma dirección que el mineral.
- Velocidad del aire inferior a 8 m/seg. (i.e.  $v=4$  m/seg)

# Medidas preventivas en la lucha contra el polvo

## 1. Técnicas

- Limitar la cantidad de polvo en las entradas de ventilación.
- Ventilación suficiente para reducir las concentraciones de polvo a los límites reglamentarios, cuidando de no provocar la puesta en suspensión del polvo depositado en la galería.
- Barrenados con inyección de agua o aspiración de polvo.
- Retacado de barrenos con materiales exentos de  $\text{SiO}_2$
- En la carga de escombros provenientes de una pega se regará de forma eficaz cuando sea posible.
- En puntos de carga, descarga, trasvase, adopción de medidas tales como absorber el polvo con campanas.
- Consolidación del polvo depositado utilizando sales higroscópicas
- Inyección de agua en el carbón y se humedecerá el relleno
- Utilización de equipos de protección individual (EPIs) específicos para la lucha contra el polvo.

## 2. Médicas

- Examen médico previo a la admisión del trabajador
- Reconocimientos médicos periódicos

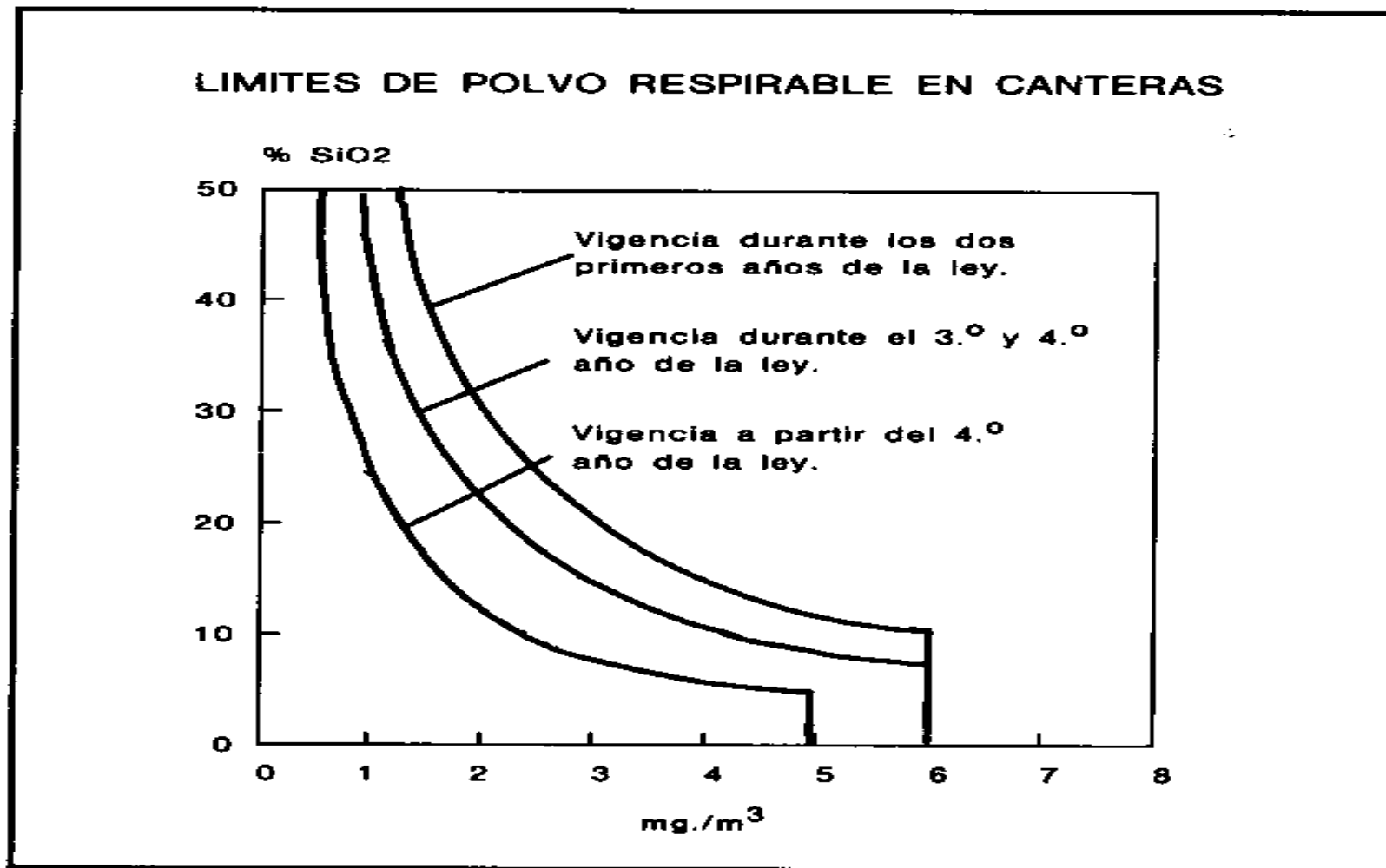
## Límites de polvo respirable en canteras (ITC 07.1.04)

- La duración de la toma de muestras de polvo debe de comprender toda la jornada de trabajo.
- Las concentraciones de la fracción respirable del polvo no podrán sobrepasar el valor límite  $V_L$  medido o calculado para un período de referencia de 8 horas de exposición.
- El valor  $V_L$  se calculará en función del porcentaje (Q) de sílice libre según:

$$V_L = 25/Q$$

y no podrá ser superior a  $5 \text{ mg/m}^3$

# Límites de polvo respirable en canteras

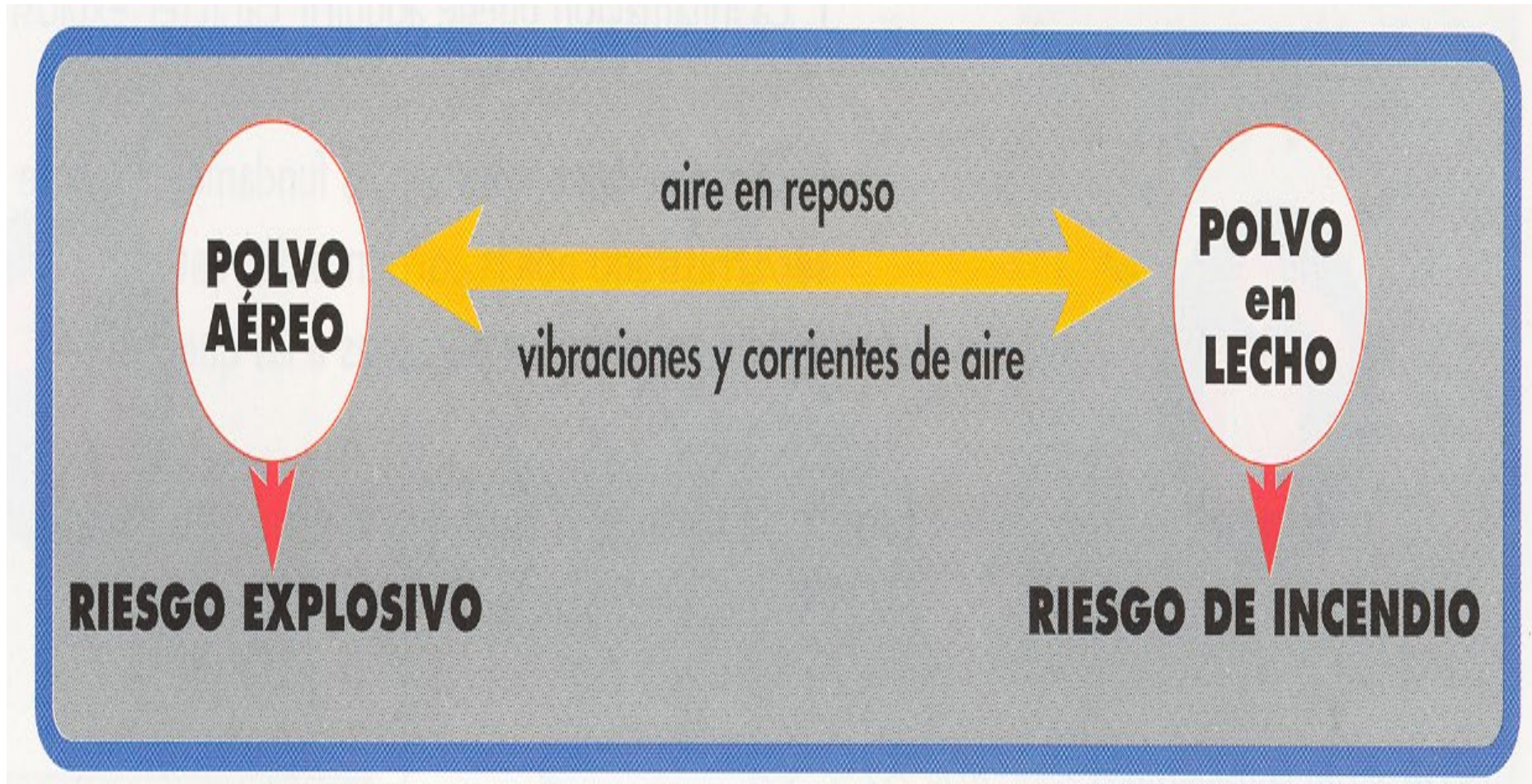


## Polvo de carbón

- Es inflamable y produce un doble efecto:
  - La inflamación puede adquirir carácter explosivo
  - El gas de la combustión es fundamentalmente CO que, al ser arrastrado por la corriente de ventilación, produce intoxicación a todas las personas a las que afecta
- Se presenta en dos formas
  - Polvo en suspensión aérea. Riesgo de explosión
  - Polvo en el lecho. Riesgo de incendio



## Riesgos del polvo de carbón



# Polvo de carbón (ITC 04.1.01). Clasificación de la mina de carbón o cuartel con polvos explosivos

	CONTENIDO EN MATERIAS VOLÁTILES
MINA O ZONA CLASIFICADA COMO GRISUOSA	> 12%
MINA O ZONA CLASIFICADA SIN GRISÚ	> 16%

# Cómo se combaten los riesgos del polvo de carbón

- En actuaciones sobre el polvo combustible.
  - Limitando su existencia (limpiezas periódicas, aspiraciones, etc.).
  - Transformando el polvo en incombustible por vía húmeda (barros).
- Actuaciones sobre la concentración de  $O_2$ , añadiendo un gas inerte como el  $N_2$  o el  $CO_2$ .
- Actuación sobre los focos de ignición.

# Control y prevención de riesgos atmosféricos en espacios subterráneos

# Estrategias de prevención y mejora de la calidad del aire

- Ventilación eficiente
  - Implementación de sistemas de ventilación forzada para garantizar la renovación del aire.
  - Uso de ventiladores principales y auxiliares para dirigir el flujo de aire a zonas críticas.
  - Control de la circulación de aire mediante conductos y compuertas ajustables.
- Control del polvo en el entorno
  - Aspersión de agua en zonas de perforación, voladuras y transporte de material.
  - Uso de supresores de polvo químicos para minimizar la dispersión de partículas.
  - Encapsulación de cintas transportadoras y sistemas de extracción localizada en puntos críticos.
  - Filtración del aire mediante colectores de polvo y precipitadores electrostáticos.
- Monitoreo de gases y calidad del aire
  - Instalación de sensores de gases tóxicos (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) en áreas operativas.
  - Implementación de alarmas automáticas ante la detección de niveles peligrosos.
  - Monitoreo continuo del oxígeno para evitar riesgos de hipoxia.

- Mantenimiento preventivo de equipos
  - Revisión y limpieza periódica de sistemas de ventilación y filtrado.
  - Mantenimiento de motores diésel y sistemas de escape para reducir emisiones contaminantes.
  - Inspección de circuitos eléctricos y equipos de combustión para prevenir acumulación de gases peligrosos.
  
- Uso de Equipos de Protección Individual (EPI)
  - Mascarillas con filtros de alta eficiencia (N95 o P100) para partículas finas.
  - Equipos de respiración autónoma en zonas de alta contaminación o emergencia.
  
- Planificación de operaciones mineras
  - Diseño adecuado de rutas de circulación para evitar acumulación de gases en áreas confinadas.
  - Programación de voladuras en horarios definidos con evacuación temporal de trabajadores.
  - Implementación de protocolos de seguridad para emergencias por contaminación del aire.

# Índices de peligrosidad de gases

- La presencia de gases tóxicos, inflamables o asfixiantes representa un riesgo significativo para la seguridad de los trabajadores.
- Para evaluar su peligrosidad, se emplean diferentes índices y parámetros de medición que permiten determinar su impacto en la salud y el riesgo de explosión.
- Principales Índices de Peligrosidad:
  - Límite de Exposición Permisible (LEP o TLV)
  - Índice de Explosividad o Límites de Inflamabilidad (LEL y UEL)
  - Índice de Deficiencia de Oxígeno (O<sub>2</sub>)
  - Máxima Concentración Admisible (MAC)
  - Threshold Limit Value (TLV) - Valor Límite Umbral
  - Regla de Haber (Dosis = Concentración × Tiempo)
  - Índice de Calidad del Aire (AQI - Air Quality Index)
- MAC y TLV regulan la exposición en el trabajo.
- Regla de Haber permite evaluar el impacto de la exposición acumulada.
- AQI informa sobre la contaminación ambiental general.

**El uso de estos  
índices permite  
tomar medidas de  
control adecuadas**

## Límite de Exposición Permisible (LEP o TLV)

- Indica la máxima concentración de un gas a la que un trabajador puede estar expuesto durante 8 horas diarias sin efectos adversos.
- Se mide en ppm (partes por millón) o mg/m<sup>3</sup>.

Gas	LEP - TLV (ppm)
Monóxido de carbono (CO)	25
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	0,5
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	3
Metano (CH <sub>4</sub> )	1000
Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	10
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	5000

## Índice de Explosividad o Límites de Inflamabilidad (LEL y UEL)

- Límite Inferior de Explosividad (LEL): Concentración mínima de un gas inflamable en el aire que puede arder si hay una fuente de ignición.
- Límite Superior de Explosividad (UEL): Concentración máxima de un gas en el aire en la que aún puede explotar.

Gas	LEL (%)	UEL (%)
Monóxido de carbono (CO)	5,0	15,0
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	4,0	75,0
Metano (CH <sub>4</sub> )	12,5	74,0



## Índice de Deficiencia de Oxígeno (O<sub>2</sub>)

- El aire normal contiene 21% de oxígeno.
- Se considera peligroso cuando baja de 19.5%.
- Menos del 16% de oxígeno puede causar desmayos y menos del 10% puede ser mortal.

# Índices de peligrosidad de gases: MAC, TLV, Haber, AQI

## Máxima Concentración Admisible (MAC)

- Define la máxima concentración de un gas en el aire a la que los trabajadores pueden estar expuestos sin sufrir efectos adversos a corto o largo plazo.
- Se expresa en ppm (partes por millón) o  $\text{mg}/\text{m}^3$ .
- Similar a otros valores de referencia como el TLV.
- Regulado por normativas como OSHA, NIOSH y la Unión Europea.
  
- Ejemplo: Para el monóxido de carbono (CO), la MAC en ambientes laborales es de 25 ppm.

# Efectos combinados de agentes químicos

## Threshold Limit Value (TLV) - Valor Límite Umbral

- Definido por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), los TLV se dividen en:
  - TLV-TWA (Time-Weighted Average): Concentración promedio permitida en un turno de trabajo de 8 horas diarias y 40 horas semanales.
  - TLV-STEL (Short-Term Exposure Limit): Límite de exposición a corto plazo (15 min), sin efectos adversos.
  - TLV-C (Ceiling Limit): Concentración que nunca debe superarse en ningún momento.
  
  - Ejemplo: Para el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>):
    - TLV-TWA: 0.5 ppm
    - TLV-STEL: 1 ppm

## Regla de Haber (Dosis = Concentración × Tiempo)

- La Regla de Haber establece que el efecto tóxico de un gas depende de la relación entre la concentración y el tiempo de exposición.
- Se expresa como:

$$D=C \times t$$

- Donde:
  - D = Dosis total absorbida.
  - C = Concentración del gas en el aire.
  - t = Tiempo de exposición.
- Aplicación: Si una persona está expuesta a 50 ppm de CO por 2 horas, la dosis total será 100 ppm·h. Esta regla es útil para evaluar riesgos a largo plazo y establecer niveles de seguridad.

## Índice de Calidad del Aire (AQI - Air Quality Index)

- Utilizado para medir la calidad del aire en el ambiente y sus efectos en la salud pública.
- Evalúa la concentración de contaminantes como CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, material particulado (PM10 y PM2.5). Se representa en una escala de 0 a 500, donde valores más altos indican mayor contaminación y riesgo para la salud.
- Ejemplo: Si el AQI es 200, la calidad del aire es "no saludable", y se recomienda reducir la exposición.

AQI	Nivel de Calidad del Aire	Impacto en la Salud
0-50	Bueno	Sin riesgo
51-100	Moderado	Riesgo leve para personas sensibles
101-150	No saludable para grupos sensibles	Riesgo para personas con enfermedades respiratorias
151-200	No saludable	Afecta a toda la población
201-300	Extremadamente poco saludable	Mayor riesgo para todos
301-500	Peligroso	Emergencia de salud

# Conclusiones y recomendaciones

## Conclusión y recomendaciones

El clima en una mina subterránea está determinado por factores como la temperatura, humedad, calidad del aire y presencia de contaminantes como polvo y gases tóxicos. Un control eficiente de estos elementos es esencial para garantizar la seguridad y salud del personal, así como la eficiencia operativa en la minería.

- En las minas subterráneas se encuentran gases tóxicos, inflamables y asfixiantes, como monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>) e hidrógeno sulfurado (H<sub>2</sub>S), los cuales pueden generar riesgos de intoxicación, explosión o asfixia.
- Los índices de peligrosidad de gases como MAC, TLV y AQI permiten evaluar el impacto de la exposición y definir límites seguros para los trabajadores.
- La ventilación es la medida más efectiva para reducir la concentración de gases y mantener la calidad del aire en niveles aceptables.
- El polvo generado en las operaciones mineras, especialmente el polvo respirable (<7-10 µm), representa un riesgo grave para la salud de los trabajadores, pudiendo causar enfermedades pulmonares como la silicosis.
- El polvo de sílice (SiO<sub>2</sub>) es el más agresivo y debe ser monitoreado constantemente.
- Los métodos de control del polvo incluyen aspersion de agua, supresores químicos y sistemas de filtración.
- Las condiciones térmicas en una mina subterránea pueden ser extremas, con altas temperaturas y humedad elevada, lo que genera fatiga térmica y problemas de salud.
- La ventilación y drenaje ayudan a regular la temperatura y la humedad, reduciendo los efectos negativos en el personal y en los equipos.
- El uso de deshumidificadores, sistemas de aire acondicionado y barreras térmicas son estrategias para mejorar el confort térmico en la mina.
- Para garantizar condiciones seguras en la mina, se deben monitorear continuamente la temperatura, humedad, concentración de polvo y presencia de gases peligrosos.
- La implementación de sensores, alarmas automáticas y equipos de detección portátil es esencial para prevenir accidentes.

# 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