

Sistema de calidad del aire en minas subterráneas y túneles

Erickson Cândido Lopes Silvestre

erickson@minas.ismm.edu.cu

Universidad de Moa

Resumen: Se valoraron los rangos de oxígeno, los contaminantes y los parámetros climáticos en el interior de las minas o túneles. Se estudiaron las variables que determinan la calidad del aire en las construcciones subterráneas con la finalidad de satisfacer las necesidades de aire. Se propone un indicador cuantitativo y cualitativo de la calidad del aire para minas subterráneas y túneles.

Palabras clave: ventilación minera; gases contaminantes; condiciones térmicas subterráneas.

Tutorado por el Dr. C. Roberto Lincoln Watson Quesada y la M. Sc. Mirian Rodríguez Bárcenas.

Recibido: 17 noviembre 2021/ Aceptado: 3 febrero 2022

Air quality system in underground mines and tunnels

Abstract: The ranges of oxygen, pollutants and climatic parameters inside the mines or tunnels were assessed. The variables that determine the air quality in underground constructions were studied in order to satisfy the air needs. A quantitative and qualitative indicator of air quality for underground mines and tunnels is proposed.

Keywords: mining ventilation; polluting gases; underground thermal conditions.

Introducción

Las excavaciones subterráneas poseen una atmosfera propia, un entorno bastante hostil debido que el aire que por ellas circula sufre cambios en su composición. Es fundamental mantener los niveles de temperatura, humedad y velocidad del aire en el lugar de trabajo para que los empleados no sufran daños a la salud por la exposición a temperaturas extremas, humedad o frío.

Son conocidas, estudiadas y perfeccionadas las normas sanitarias establecidas por la Organización Internacional del Trabajo y los ministerios de energía y minas de los países establecen sus estándares para garantizar la salud y seguridad de los trabajadores de la minería subterránea y la construcción de túneles. Sin embargo, no existe una normativa que contemple y evalúe de forma integral la calidad del aire en estas obras en construcción y explotación.

Es ante esta problemática y como medida de mitigación que se estudian las variables que determinan la calidad del aire en las minas subterráneas y en los túneles con la finalidad de satisfacer las necesidades de aire en estos espacios. Este trabajo propone elaborar un indicador de la calidad del aire en las minas subterránea y túneles.

La ventilación de una mina es la distribución de aire en un sistema de ventilación de minas a la asignación de caudales de aire en cantidad y calidad al interior de los diversos sectores de la mina, demandantes de recurso de manera tal de lograr medioambientales subterráneos aptos para el normal desempeño de los trabajadores y una óptima operación de las instalaciones y equipos (Cáceres, 2019).

Los objetivos principales de la ventilación en la minería subterránea son los siguientes:

- Proveer el oxígeno suficiente para la respiración óptima de las personas.
- Suministrar el volumen de aire para los equipos diésel e instalaciones subterráneas, para perpetuar la vida útil de ambas herramientas.
- Evitar la formación de mezclas explosivas.
- Diluir y extraer los gases tóxicos y polvo en suspensión que puedan generar riesgo a la salud de los trabajadores.
- Reducir la temperatura en el interior de la mina, ya que este rasgo, resulta ser un potencial peligro para el personal y para el funcionamiento de los equipos (Ibarra & Castro, 2019).

La ventilación minera se puede clasificar en ventilación natural y ventilación mecánica.

La ventilación natural se produce cuando existe una energía natural capaz de crear una corriente de aire, que está influenciada por la gradiente térmica y presión barométrica entre diferentes puntos del circuito de ventilación, lo que genera una diferencia de peso específico entre el aire saliente y entrante. La energía térmica agregada al sistema se transforma a energía de presión, susceptible de producir un flujo de aire (el aire caliente desplaza al aire frío produciendo circulación) (Ibarra & Castro, 2019).

La ventilación mecánica es ocasionada por la presión que ejerce un ventilador sobre una masa de aire que envía o succiona aire y el cual es accionado por un motor eléctrico que le permite una constante presión sobre el aire que transporta y en una cantidad fija. Requiere energía eléctrica, que puede ser producida a base del petróleo o de hidroeléctricas y en esto que la ventilación minera sea más cara o más económica respectivamente por tonelada de mineral extraído (Zitron, 2019).

El caudal de aire es la cantidad de aire que ingresa a la mina y que sirve para ventilar labores, cuya condición debe ser que el aire fluya de un modo constante y sin interrupciones, el movimiento de aire se produce cuando existe una alteración de equilibrio: diferencia de presiones entre la entrada y salida de un ducto, por causas naturales (gradiente térmica) o inducida por medios mecánicos (Ramírez, 2005).

La cantidad de aire necesario siempre dependerá de diversos factores:

- Número de personas
- Cantidad de equipos diésel que ingresan en la mina
- Consumo de explosivos
- Profundidad

Requerimiento de acuerdo al número de personas

Cuando las minas se encuentren hasta 1500 m.s.n.m del mar la cantidad mínima de aire necesaria por hombre será de 3 m³/min, en otras altitudes las cantidades de aire será de acuerdo con la siguiente escala:

- De 1500 a 3000 m aumentará en 40%, igual a 4m³/min.
- De 3000 a 4000 m aumentará en 70%, igual a 5m³/min.
- Sobre los 4000 m aumentará en 100%, igual a 6m³/min

$$Q_1 = q * n$$

Q₁: Cantidad de aire necesario para el personal (m³/min)

Q: Cantidad de aire mínimo por persona (m³/min)

n: Número de personas presente en la mina por guardia (se debe utilizar el turno con mayor número de trabajadores).

Requerimiento de acuerdo al uso de equipo diésel

En caso de emplearse equipo diésel, la cantidad de aire no será menor de 3 m cúbicos por minuto por cada HP que desarrollen los equipos, en ningún caso la velocidad del aire será menor de 20 metros por minuto, ni superior a 250 m/min en las labores de explotación, incluido el desarrollo, preparación y en todo lugar donde exista trabajo personal.

$$Q_2 = K * N_{\text{EPP}}$$

Q₂: Cantidad de aire para el uso de equipos diésel (m³/min)

K: 3,0 (m³/min) cantidad de aire necesario por cada HP

N: Número de HP de los equipos que trabajan en la mina

Requerimiento de acuerdo al uso de explosivo

$$Q_3 = V * n * A$$

Q₃: Cantidad de aire para diluir contaminantes por explosivo

V: Velocidad de aire 20 m/min (Dinamita), 25 m/min (ANFO)

n: Número de niveles de la mina en trabajo

A: Área promedio de la sección de las labores, niveles en trabajo (m²)

Requerimiento para mantener óptimas condiciones ambientales

$$Q_4 = V. n. A$$

Q₄ = Cantidad de aire para mantener condiciones ambientales ideales.

Cálculo de cantidad total del aire

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

Sistemas de ventilación auxiliar

La ventilación auxiliar corresponde a diferentes sistemas que de forma artificial hacen ingreso de aire limpio, o extraen el aire viciado. Estos sistemas están compuestos por equipos ventiladores, tapados, mangas, generadores y uniones dependiendo de las condiciones físicas de la mina (Ibarra & Castro, 2019).

Existen dos sistemas principales de ventilación auxiliar: Aspirante e impelente. La combinación de estos dos métodos básicos da lugar a la formación de sistema mixto.

La ventilación impelente es un sistema de ventilación, el aire se proporciona mediante mangas, tuberías hasta cierta distancia del frente de trabajo. El aire contaminado que se llega a mezclar con este aire puro, sale por la misma labor. La mayor efectividad en la dilución de los gases tóxicos queda determinada por la distancia L , que está comprendida entre el extremo de la tubería /manga y el frente de trabajo, la que no debe ser muy grande para que tenga las características de turbulencia del chorro libre (Cáceres, 2019).

En la ventilación aspirante el aire fresco ingresa al frente por la galería y atraviesa toda su sección hasta llegar al frente de avance, mezclándose así con los distintos contaminantes que puedan existir. Un ventilador acoplado a la tubería hace que el aire del frente sea extraído y expulsado por su otro extremo al exterior.

La ventaja de la ventilación aspirante es que los gases y el polvo retornan por la tubería evitando que los inhale el personal. Además, tras el disparo de las voladuras, los gases y humos se eliminan rápidamente.

La ventilación aspirante necesita un elevado volumen de aire, lo que conduce a la instalación de ventiladores de gran caudal, además que la distancia entre el frente de trabajo y el extremo de la tubería son en función del tiempo de ventilación.

Si la tubería de extracción se coloca distante al frente de trabajo una gran proporción de aire puro de la galería será absorbido sin llegar al frente de trabajo, dejando sin remover los gases y el polvo, en instalaciones para este tipo de ventilación debe usarse tubería de acero, ya que los de lona se chupan, a menos que estas se refuercen, considerando no recomendables (Vilca, 2016).

En la ventilación mixta se combinan los dos anteriores (aspirante e impelente), empleando dos tendidos de ductos, uno para extraer aire y el segundo para impulsar aire limpio al frente de avance. Este sistema reúne las ventajas de los dos tipos básicos, en cuanto a mantener la galería y la frente en desarrollo con una renovación constante de aire limpio y en la velocidad de la extracción de los gases de disparos, con la desventaja de su mayor costo de instalación y manutención.

El funcionamiento de los ventiladores se basa en la entrega de energía mecánica al aire a través de un rotor que gira a alta velocidad y que incrementa la energía cinética del fluido, que luego se transforma parcialmente en presión estática. Se dividen en dos grandes grupos: los ventiladores axiales y los ventiladores centrífugos (Pocoví, 2016),

En los ventiladores axiales, el flujo a través del rotor, con álabes o palas de distintas formas, se realiza conservando la dirección del eje de éste.

En los ventiladores centrífugos el aire ingresa en dirección paralela al eje del rotor, por la boca de aspiración, y la descarga se realiza tangencialmente al rotor, es decir que el aire cambia de dirección noventa grados (90°).

El aire atmosférico es una mezcla de gases, vapores y finas partículas de variada solidez, todos en proporciones cambiantes, cada uno de los cuales tiene propiedades físicas y químicas propias (Tabla 1).

El aire atmosférico tiene una composición gaseosa variable. Las concentraciones de cada uno de sus componentes oscilan entre valores relativamente cercanos entre sí, en las zonas del planeta alejadas de los focos perturbadores naturales de la misma (por ejemplo los volcanes) o de los creados por el hombre.

Tabla 1. Composición del aire atmosférico (Novitzky 1962)

Gases componentes	Análisis cuantitativo	
	Volumen (%)	Peso (%)
Nitrógeno	78,09	75,53
Oxígeno	20,95	23,14
Anhídrido carbónico	0,03	0,05
Argón y otros gases	0,93	1,28
Total	100	100

El aire de mina es una mezcla de gases, vapores y partículas de variada solidez, todos en proporciones cambiantes, que se va obteniendo como resultado de la interacción

del aire atmosférico normal con el medio minero por donde se desplaza. Si las alteraciones son tan pequeñas que el aire puede ser considerado como atmosférico, se denomina aire fresco o de ingreso, mientras que el aire contaminado será descrito como aire viciado o de retorno. Durante el invierno, cuando el aire en el exterior de la mina es relativamente seco, absorbe además la humedad de la atmósfera de la mina. Durante el verano el proceso se invierte.

Calidad del aire en las minas

Durante la realización de sus actividades, las empresas mineras, cuentan con estándares ambientales que deben cumplir para garantizar una adecuada protección del ambiente y la salud de las personas. Estos estándares ambientales son los límites máximos permisibles (LMP) (Tabla 2).

Los LMP de agentes químicos aseguran que las emisiones gaseosas que emitan las empresas no excedan ciertos niveles de concentración que se consideran dañinos a la salud, al bienestar humano y al ambiente.

Tabla 2. Límites máximos permisibles (Schwegler, 2006)

Agente químico	LMP
Polvo Inhalable	10 mg/ m ³ (1)
Polvo Respirable	3 mg/ m ³ (1)
Oxígeno (O ₂)	Mínimo 19,5 %
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Máx 9000 mg/m ³ o 5000 ppm
Monóxido de Carbono (CO)	Máx 29 mg/m ³ o 25 ppm
Metano (Nh ₄)	5000 ppm
Hidrogeno Sulfurado (H ₂ S)	Máx 14 g/m ³ o 10 ppm
Gases nitrosos (NO _x)	Máx 7mg/m ³ o 5 ppm
Anhídrido Sulfuroso (SO ₂)	Máx 5 ppm

Variables e indicadores de la calidad del aire

La calidad del aire en las minas y túneles está determinada por variables de calidad que permiten establecer criterios sobre las condiciones de la mina: composición del aire; condiciones climáticas y contaminantes (Tabla 3).

Cada indicador mencionado tiene sus variables para así determinar y evaluar las condiciones de calidad del aire en el interior de las minas o túneles.

Tabla 3. Variables e indicadores de la calidad del aire en las minas subterráneas y túneles

Variable	Indicador
Composición del aire	Oxígeno
Climático	Temperatura
	Humedad
	Presión
	Velocidad del aire
Contaminantes	Gaseosos
	Polvo
	Líquido
	Vapores

La razón primordial para proveer aire limpio y con adecuado contenido de oxígeno, es la sustentación de la vida humana.

El oxígeno es un gas que no tiene olor, color, ni sabor. Su peso específico es de 1,11 kg/m³ con respecto al aire. Cuando el contenido de oxígeno baja hasta 16 % muchas personas presentan dificultades para respirar. Cuando el contenido de oxígeno baja hasta 10 % puede presentarse la pérdida del conocimiento (Tabla 4).

Tabla 4. Efectos de la deficiencia de oxígeno (Castro, Delgado & Cáceres, 2014)

Contenido de O ₂	Efecto
23,5 %	Nivel máximo de seguridad
21 %	Oxígeno en el aire
19,5%	Nivel inferior
17 %	Respiración rápida y profunda
15 %	Vértigo, vahído, zumbido en oídos, aceleración de latidos
13 %	Pérdida de conocimiento en exposición prolongada
9 %	Desmayos, inconsciencia
7 %	Peligro de muerte, (equivale. A 8 800 m.s.n.m.)
6 %	Movimientos convulsivos, muerte.

La causa más grave de deficiencia de oxígeno es la dilución, que ocurre cuando un gas ajeno se introduce en la atmosfera de la mina, reduciendo así el por ciento del oxígeno en el aire. Estos gases provienen de los estratos del depósito o de las formaciones adyacentes.

Indicador climático de la mina

Las condiciones climáticas de la mina son establecidas fundamentalmente por las variables: temperatura, humedad, presión y la velocidad del aire en su interior.

En las minas subterráneas, a medida que aumenta su profundidad, la temperatura del bulbo seco aumenta aproximadamente 1°C por cada 100 m. La temperatura del bulbo

húmedo es más difícil de estimar, debido a las variaciones de humedad en la roca. Se considera su incremento 0,45 °C por cada 100 m de profundidad.

La exposición prolongada a condiciones térmicas desfavorables conduce al aumento de la temperatura del organismo humano y como consecuencia produce efectos fisiológicos que reducen el rendimiento (Tabla 5).

Tabla 5. Incremento de la temperatura corporal por aumento de la temperatura húmeda del aire (Castro, Delgado, & Cáceres 2014)

Temperatura húmeda del aire °C	Incremento de la temperatura del cuerpo °C
< 29	0,11-0,66
29,5-31,7	0,33-0,77
32,2-34,5	0,66-1,75
> 34,5	1,44-1,90

Actualmente se utilizan índices para la evaluación de las condiciones térmicas a las que se encuentra expuesto el cuerpo humano, los parámetros de dichos índices incluyen medidas de temperatura del bulbo seco, del bulbo húmedo y la temperatura efectiva.

Temperatura de bulbo seco (T_{bs}): Es la verdadera temperatura del aire húmedo y con frecuencia solo se le denomina temperatura del aire.

Temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}): Es la temperatura que da un termómetro con el bulbo envuelto en algodón húmedo bajo una corriente de aire. La corriente de aire se produce mediante un pequeño ventilador o poniendo el termómetro en un molinete y haciéndolo girar. Al evaporarse el agua, absorbe calor, rebajando la temperatura, efecto que reflejará el termómetro. Cuanto menor sea la humedad relativa del ambiente, más rápidamente se evapora el agua que empapa el paño. Se utiliza para calcular la humedad relativa, esto se hace usando una carta psicométrica.

Temperatura efectiva (T_e): Se define como temperatura efectiva (T_e) en un frente de trabajo, el valor obtenido al aplicar la fórmula:

$$T_e = 0,3T_s + 0,7T_h - V \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Donde:

T_h : Temperatura húmeda

T_s : Temperatura seca

La temperatura en las minas se puede determinar con el empleo de los siguientes aparatos:

- Termómetros ordinarios (psicrómetro, termohigroanemómetro)
- Pares termoeléctricos
- Medidores de resistencia variable. Con coeficientes de temperatura positiva o negativa.

Humedad

La humedad es la cantidad de vapor de agua contenida en un metro cúbico de aire expresada en porcentaje. Esta cantidad de vapor que es absorbido por el aire es directamente proporcional a la temperatura debido a que la temperatura alta permite que el aire admita más vapor. Cuando el aire contiene el máximo vapor de agua para cualquier temperatura se considera aire saturado (Carrascal & Manzur, 2014).

La humedad relativa del aire se define como la relación entre el peso de vapor de agua en la mezcla y la presión de saturación del vapor de agua a la misma temperatura. Se puede calcular por la ecuación:

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{sh}} * 100$$

Donde:

φ : humedad relativa o grado higrométrico, %.

p_v : peso de vapor de agua en la mezcla, mmHg

P_{sh} : presión de saturación del vapor de agua a la misma temperatura, mmHg

Calculando el peso de vapor de agua en la mezcla por la fórmula de Sprung (1961):

$$P_v = P_{sh} - 0.5(t_s - t_h) * \frac{P_b}{755}$$

Donde:

P_b : Presión barométrica

Presión

La velocidad promedio se utiliza para el cálculo de los caudales. Esta se mide usando un anemómetro digital o de paletas, dependiendo de la sensibilidad del equipo. En una

galería se deben ubicar los puntos de medición de una manera uniforme; con el fin de abarcar toda la longitud de dicha galería e identificar zonas en donde existan fugas y cambios de sección, muy comunes en la explotación.

Contaminantes

En las minas se pueden identificar partículas sólidas, líquidas y gaseosas que contaminan y degradan la composición del aire minero.

Monóxido de carbono: Es uno de los gases más peligrosos que existen y es la causa del 90 % de los accidentes fatales en minas por intoxicación de gases. Es un gas venenoso, incoloro, inodoro e insípido, ligeramente más liviano que el aire con un peso específico de $0,97 \text{ kg/m}^3$. Poco soluble al agua, tóxico, combustible y con gran capacidad de dispersión. El peligro de monóxido de carbono para la salud se debe a que la hemoglobina de la sangre se combina con el gas con mucha más facilidad que con el oxígeno, lo cual limita la capacidad de absorción de oxígeno. Esto hace que una concentración volumétrica de 500 ppm de CO en el aire pueda producir la muerte al bloquea la absorción de oxígeno al 50 % de la hemoglobina contenida en la sangre.

Óxidos de nitrógeno: Se trata de gases más pesados que el aire, incoloros cuando la concentración es baja y pardos rojizos cuando la concentración es alta. Se detecta con relativa facilidad por su olor característico después de una voladura con explosivos. Son gases tóxicos e irritantes formados por efecto del empleo de explosivos, de equipos de combustión interna y durante las soldaduras al arco y con gas.

Anhídrido sulfuroso: El anhídrido sulfuroso es un gas incoloro, sofocante, inflamable, más pesado que el aire y con fuerte olor a azufre, se disuelve fácilmente en el agua y tiene un peso específico de $2,26 \text{ kg/m}^3$. Se forma por la combustión de minerales con alto contenido de azufre en incendios subterráneos y por las voladuras en minas que contienen sulfuros.

Metano: El metano es un gas incoloro, inodoro, insípido y más liviano que el aire, se concentra en las partes altas de las labores mineras de atmosfera tranquila, tiene un peso específico de $0,554 \text{ kg/m}^3$. Se genera por desprendimiento a través de las fisuras en los mantos de carbón, por la descomposición de la madera bajo agua y por la descomposición de materias orgánicas. El metano es una de las impurezas más

peligrosas de la atmosfera de las minas, por su propiedad de formar mezclas explosivas con el aire.

Polvo: Sobresalen por su importancia, los granos y gránulos de polvo de algunos minerales. Cuando las dimensiones de estos se hallan entre 10-5 y 10-7 m, forman con el aire soluciones sólido-gas denominadas aerosoles. El polvo que llega a considerarse como nocivo, está formado por partículas inferiores a 5 micrones (5 μ) particularmente entre 1 y 2 micrones. Las minas requieren la consolidación de la gestión de la calidad del aire en un plan único e integrado de gestión de la calidad del aire que aborde todas las fuentes, los impactos relativos, las medidas de reducción, los procedimientos, las responsabilidades y los métodos de seguimiento y evaluación del rendimiento. Esto debe garantizar que bajo cualquier conjunto de condiciones y en cualquier etapa del ciclo de vida de la mina, la calidad del aire se gestione dentro de niveles aceptables.

Vapor: Los vapores presentes en las minas son los vapores de arsénico, de mercurio y de ácido cianhídrico producidos durante los trabajos con explosivos. Pero su formación es rara, por eso no se desarrollarán.

Propuesta de un sistema de calidad

Para el sistema de calidad se analizaron parámetros como la composición del aire (Tabla 6), temperatura (Tabla 7), humedad (Tabla 8), velocidad del aire (Tabla 9), contaminantes gaseosos (Tabla 10, 11, 12, 13) y concentración de polvo (Tabla 14).

Tabla 6. Valores de oxígeno de acuerdo al volumen que ocupa

Oxígeno (% vol)	Calidad del aire	Valoración
21-19,5	Óptimo	10
19,5-17,5	Bueno	8
17,5-16,5	Malo	4
\leq 16,5	Muy malo	0

Tabla 7. Valoración para la temperatura

T (°C)	Condición	Valoración
22-24	Óptimo	0
25-27	Bueno	1
28-31	Malo	2
\geq 31	Muy malo	3

En las partes de la mina donde la temperatura sea superior a 31 °C, solamente podrán entrar cuadrillas de salvamento de la mina o de la Estación de Seguridad y Salvamento Minero y de Punto de Apoyo de Seguridad y Salvamento Minero.

Tabla 8. Valoración para los cambios de la humedad

Φ (%)	Condición	Valoración
20-39	Óptimo	0
40-60	Bueno	1
61-80	Malo	2
100	Muy malo	3

Tabla 9. Valoración para los cambios de la velocidad del aire

v (m/s)	Condición	Valoración
0,5-1	Óptimo	0
1-5	Bueno	1
5-15	Malo	2
≥ 15	Muy malo	3

Contaminantes gaseosos

Tabla 10. Valoración Para la concentración de monóxido de carbono

Concentración de monóxido de carbono (Ppm)	Valoración
25	0
400	4
1600	6
6400	8
12800	1

Tabla 11. Valoración para la concentración de dióxido de nitrógeno

Concentración de dióxido de nitrógeno (Ppm)	Valoración
2,4	0
60	4
100	7
150	9
200-700	10

Tabla 12. Valoración para la concentración de anhídrido sulfuroso

Concentración de anhídrido sulfuroso	Valoración
1,6	0
20	5
150	6
400-500	8
1000	10

Tabla 13. Valoración para la concentración de metano

Concentración de metano (Ppm)	Valoración
≤5	0
5-10	0,5
11-19	6
20-25	8
> 25	10

Tabla 14. Valoración para la concentración de polvo

Concentración de polvo	Valoración
2	0
5	0,5
10	6
20	8
50	10

Sistema de calidad del aire

Considerando las valoraciones hechas en las variables se propone la determinación de la calidad del aire cualitativamente y cuantitativamente.

Valoración cuantitativa

Para la determinación cuantitativa de la calidad del aire se propone la expresión:

$$SI = CA - (Cont + P)$$

Donde:

CA: Composición del aire-valoración del oxígeno

Cont: Contaminantes

P: Parámetros climáticos

$$Cont = G + Po$$

$$G = Mc + On + Me + As$$

$$P = T + v + H$$

Donde:

G: Contaminantes gaseosos

Po: Polvo

Mc: Monóxido de carbono

Dn: Dióxido de nitrógeno

Me: Metano

As: Anhídrido sulfuroso

T: Temperatura

V: Velocidad del aire

H: Humedad

Valoración cualitativa del indicador de calidad

La valoración cualitativa se expresa en función de los resultados cuantitativos obtenidos a partir de las posibles situaciones que se puedan presentar en las minas y túneles tomando como máximo el valor del componente principal necesario para el desarrollo de cualquier trabajo en estas obras: el oxígeno. Los restantes componentes del aire se toman como valores que afectan la calidad del aire o que son inertes cuando sus valores cumplen con las normas sanitarias estandarizadas (Tabla 15).

Tabla 15. Valoraciones para el I_{cal} .

Condición	I_{cal} .
Óptimo	10
Bueno	5-9
Medio	4
Malo	1-3
Muy malo	≤ 0

Conclusiones

Se seleccionaron las variables e indicadores de la calidad de aire más notorias para las minas subterráneas y túneles.

Se propuso un indicador cuantitativo y cualitativo de la calidad del aire para minas subterráneas y túneles.

Referencias bibliográficas

CÁCERES, P. Q. 2019. *Ventilación de Minas Subterráneas Natural y Mecánica*. Trabajo de diploma Puno, Universidad Minera San Andrés-Marsa, Perú.

CARRASCAL, A. A. & MANZUR, C. A. 2014. *Evaluación y propuesta del mejoramiento de la ventilación para la mina "El Maracaibo" municipio de Samacá*. Trabajo de diploma. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

CASTRO, Y.; DELGADO, J. & CÁCERES, J. 2014. Análisis del índice de impacto térmico generado en un ambiente subterráneo. *Respuestas* 19(2): 32-40.

- IBARRA, C. N. & CASTRO, C. P. 2019. *Propuesta de Ventilación para Minera Blanco III, comuna de Los Vilos*. Santa María, Los Vilos. Trabajo de diploma. Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar. Chile
- NOVITZKY, A. 1962. *Ventilación de Minas: ventiladores para minas, acondicionamiento del aire, incendios subterráneos y salvamento*. Tall. Graf. Yunque, Buenos Aires.
- POCOVÍ, R. E. 2016. *Ventilación industrial. Descripción y diseño de los sistemas de ventilación industrial*. Magna Publicaciones, Argentina.
- RAMÍREZ, H. 2005. *Módulo de Capacitación Técnico Ambiental*. Chaparra, Perú.
- SCHWEGLER, F. 2006. Air quality management: a mining perspective. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 86: 205-212.
- SPRUNG, DWL. 1961. Fórmula relativista para el coeficiente de correlación de Spín C KP. *Revisión Física* 121(3): 925.
- VILCA, J. A. 2016. *Influencia de la ventilación mecánica en el diseño del sistema de ventilación del nivel 4955 Mina Urano Sac-Puno*. Trabajo de diploma. Universidad Nacional del Altiplano, Perú.
- ZITRON. 2019. *Sistema de ventilación para la mina*. Disponible en <http://zitron.com-minería>.