



Ingeniería  
Servicios  
Capacitación

## SISTEMAS DE VENTILACIÓN DE TÚNELES

Mg. Ing. Raúl Cisternas Yáñez  
Consultor Principal - VDM LTDA.  
CHILE

Ing. Denise Szántó Monsalve  
Ingeniero de Proyecto - VDM LTDA.  
CHILE

<b>1. OBJETIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>2. GENERALIDADES .....</b>	<b>3</b>
<b>3. DESARROLLO .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1 SISTEMA DE VENTILACIÓN NO MECÁNICA .....</b>	<b>4</b>
OPCIÓN 1: SISTEMA DE VENTILACIÓN NATURAL .....	4
<b>3.2 SISTEMAS DE VENTILACIÓN MECÁNICA .....</b>	<b>6</b>
OPCIÓN 2: SISTEMA DE VENTILACIÓN LONGITUDINAL CON USO DE JET FANS .....	6
OPCIÓN 3: SISTEMA DE VENTILACIÓN TRANSVERSAL .....	8
OPCIÓN 4: SISTEMA DE VENTILACIÓN SEMI-TRANSVERSAL .....	10
OPCIÓN 5: SISTEMA DE VENTILACIÓN TRANSVERSAL CON DUCTOS LONGITUDINALES DE INYECCIÓN & EXTRACCIÓN .....	11
OPCIÓN 6: SISTEMA DE VENTILACIÓN SEMI-TRANSVERSAL CON DUCTO LONGITUDINAL DE INYECCIÓN .....	14
OPCIÓN 7: SISTEMA DE VENTILACIÓN LONGITUDINAL CON USO DE VENTILADOR EXTRACTOR .....	15
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>19</b>

## 1. OBJETIVO

El presente Documento tiene por objetivo presentar diversas OPCIONES, existentes, a la fecha de Sistemas de Ventilación Operación de Túneles, en general.

## 2. GENERALIDADES

- Dentro de la presentación, se aborda la Ventilación de Túneles, en general, mediante aplicación de la solución tecnológica denominada VENTILACIÓN POR DILUCIÓN, la cual consiste en la dilución de concentraciones de contaminantes (principalmente gases y polvo), existentes al interior de Túneles, por medio del aire fresco transportado desde superficie (según diversas opciones), al interior de éstos.
- En presente exposición, NO se considera la incorporación de sistema de aire acondicionado (HVAC), dentro de la ventilación de Túneles, como tampoco se considera la presurización, filtración y calefacción del aire fresco de inyección a Túneles.
- Para el caso particular de la industria minera dentro de la República de Chile, los Túneles a ventilar -Fase de Operación- son labores minero-subterráneas y, por lo tanto, en lo que respecta a *Seguridad y Salud Ocupacional*, éstos deberán ser diseñados y operados de acuerdo a lo estipulado por la legislación chilena vigente [D.S. N°132/72: Reglamento de Seguridad Minera, del Ministerio de Minería y, D.S. N° 594: Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo, del Ministerio de Salud].
- En la presentación, se incorporó el uso de la Presión de Ventilación Natural (Pvn) como un medio **NO MECÁNICO** de ventilación de Túneles, en general.
- Dado la escasa información y referencias particulares de Sistemas de Ventilación Operación de Túneles en nuestro país (CHILE), se revisó -en literatura especializada- experiencia foránea (principalmente U.S.A. y EUROPA) respecto a dichos sistemas de ventilación.

### 3. DESARROLLO

Se expone, a continuación, la descripción de c/u de 7 (siete) OPCIONES de Sistemas de Ventilación Operación de Túneles, ampliamente conocidas, a nivel global ; se expone, además, las VENTAJAS y DESVENTAJAS de c/u de ellas.

#### 3.1 SISTEMA DE VENTILACIÓN NO MECÁNICA

##### OPCIÓN 1: SISTEMA DE VENTILACIÓN NATURAL

###### DESCRIPCIÓN:

- Un sistema de ventilación natural (no mecánico), es aquel sistema que tiene por principio el uso de la Presión de Ventilación Natural ( $P_{vn}$ ), para efectos de generar movimiento y renovación de aire al interior de espacios subterráneos. La  $P_{vn}$  está definida como aquella presión generada -de manera natural- por la existencia de diferenciales de presión y temperatura entre ambos extremos de aberturas subterráneas conectadas con superficie (minas, cavernas, túneles, otros).

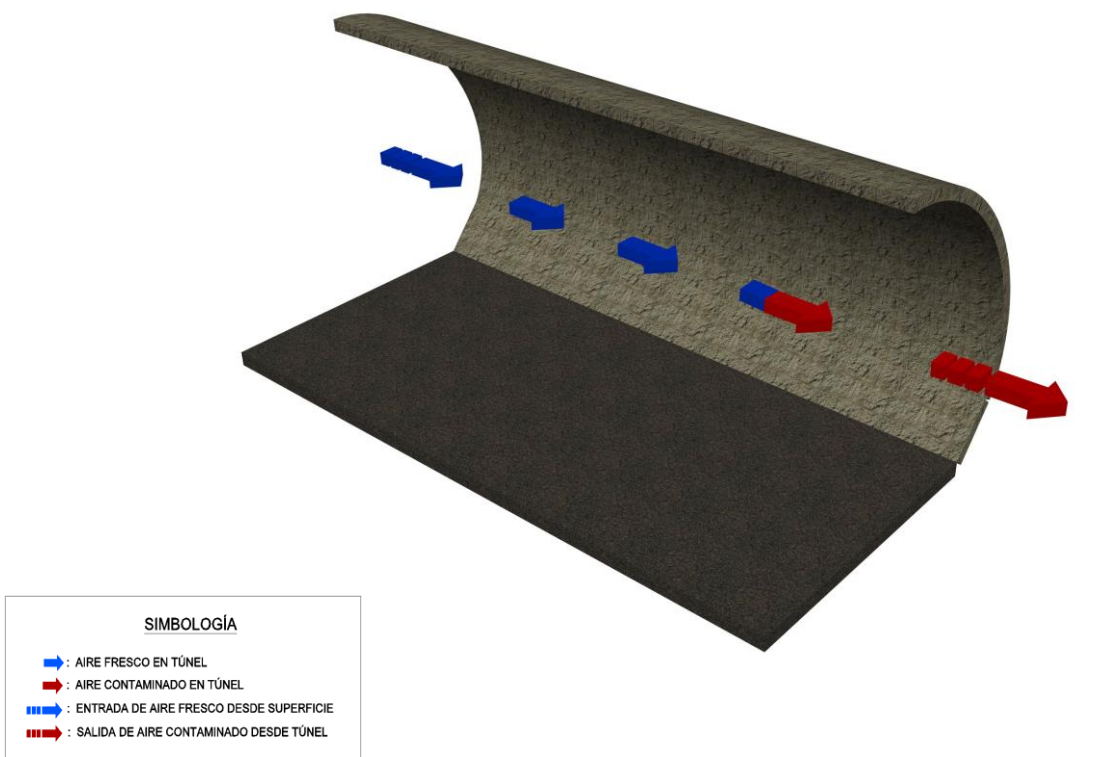


Figura N°1: Sistema de Ventilación Natural

### VENTAJAS:

- NO se requiere la instalación de equipo mecánico alguno para la generación de flujo de aire al interior de una cavidad subterránea, lo cual conlleva a un requerimiento mínimo de inversión por implementación de un Sistema de Ventilación Natural.
- NO se requiere la instalación de ductos (metálicos, concreto, otros); sólo se requiere la instalación de dispositivos de control de flujos de aire, en interior de Túnel y Minas a ventilar, tales como puertas de ventilación (direccionadoras de flujos de aire), reguladores, tapados, otros.

### DESVENTAJAS:

- La presión de ventilación natural es un fenómeno de naturaleza inestable y fluctuante, en términos de sentido de flujo entre diferentes períodos de tiempo [diarios (día; noche) y anuales (Invierno; Verano)]. Es altamente dependiente de las condiciones atmosféricas; por lo tanto, para la ventilación de las operaciones minero-subterráneas -incluido Túneles- NO debe ser utilizado este medio (ventilación natural), como un medio único y exclusivo de ventilación, sobre todo, si al interior de las instalaciones a ventilar, operará equipos diesel.

### 3.2 SISTEMAS DE VENTILACIÓN MECÁNICA

#### OPCIÓN 2: SISTEMA DE VENTILACIÓN LONGITUDINAL CON USO DE JET FANS

##### DESCRIPCIÓN:

- Un sistema de ventilación longitudinal con operación de equipos Jet Fans (aceleradores de chorro), está compuesto -centralmente- por dichos equipos, instalados dentro del Túnel a ventilar (generalmente, dentro de toda la extensión longitudinal del Túnel). El principio de operación está basado en la entrega -vía un conjunto de equipos Jet Fans, dispuestos en serie al interior del Túnel- de alta presión dinámica a una fracción del aire contenido al interior del Túnel, el cual circula a alta velocidad por el interior de c/u equipo, generando con ello un flujo longitudinal -y, en un sólo sentido- del 100% del caudal de aire contenido dentro de toda la sección transversal del Túnel.

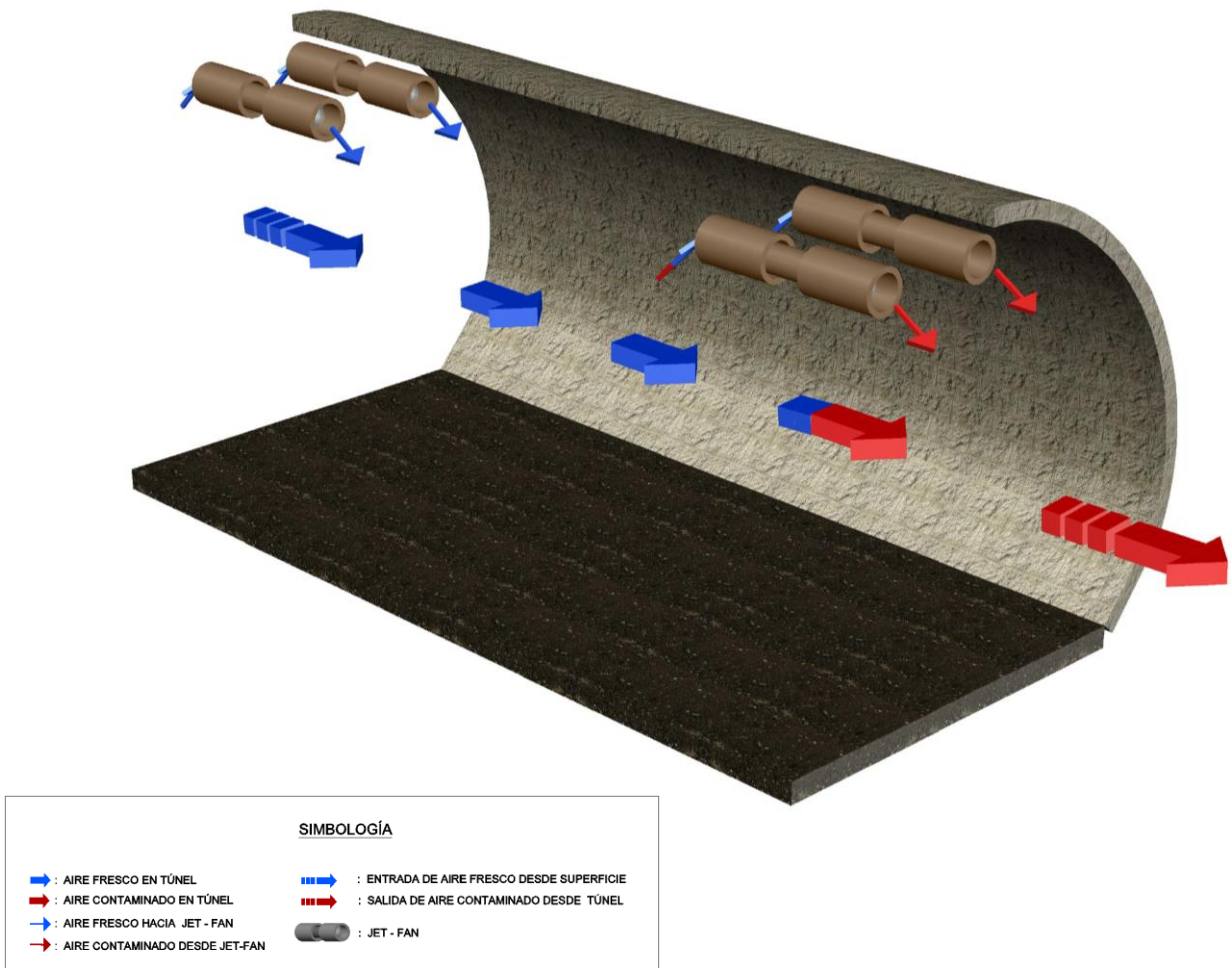


Figura N°2: Sistema de Ventilación Longitudinal con uso de Jet Fans

### VENTAJAS:

- Equipos Jet Fans, son altamente efectivos para operar -según disposición en serie, instalados preferentemente en las cercanías de ambos portales- en Túneles carreteros y ferroviarios de tipo unidireccional (en dónde el efecto pistón generado por los vehículos en su movimiento unidireccional, se suma a la presión dinámica generada por los equipos Jet Fans), de mediana longitud, en dónde se requiere mover un alto caudal de aire pro dilución de altos niveles de contaminación ambiental al interior de Túneles (gases tóxicos, humos y calor, emitidos por un alto número de vehículos livianos y pesados).
- NO se requiere la instalación de ductos; complementario a los equipos Jet Fans, sólo se requiere la instalación de dispositivos de control de flujos de aire, en interior de Túnel a ventilar, tales como puertas de ventilación (direccionadoras de flujos de aire), reguladores, tapados, otros.
- El costo unitario de Inversión (adquisición) de dicho equipos Jet Fans, en presente OPCIÓN, es bajo, si se compara con altos costos de inversión (adquisición) de ventiladores -de tipo axial ó centrífugo- de alta capacidad, para otras OPCIONES de ventilación de túneles (Ver OPCIONES 4 y 5). Por otro lado, el costo global de Inversión (adquisición) + Operación de equipos Jet Fans, es alto si se compara con el costo global (Inversión + Operación) de la OPCIÓN 7 (Sistema de Ventilación Longitudinal con Ventilador Extractor).

### DESVENTAJAS:

- Ventiladores Jet Fans NO son efectivos para generar movimientos de aire en Túneles de gran extensión longitudinal (dado que sólo generan presión dinámica, pero NO generan presión estática), en términos de caudal y sentidos ciertos de flujo de aire.

### OPCIÓN 3: SISTEMA DE VENTILACIÓN TRANSVERSAL

#### DESCRIPCIÓN:

- Un sistema de ventilación transversal está constituido por un conducto de inyección de aire fresco, construido lateralmente en toda la extensión longitudinal del Túnel, el cual abastece a un conjunto de rejillas de inyección de aire fresco conectadas al Túnel. Además, dicho sistema y, para efectos de extracción de aire contaminado desde el interior del Túnel, cuenta con un cielo falso -con celosías de extracción- dispuesto en zona superior y a lo largo de toda la extensión longitudinal del Túnel; por sobre el cielo falso, el aire es evacuado hasta uno de los extremos del Túnel y, desde allí, hasta superficie. Tanto los circuitos de inyección de aire fresco, como los circuitos de extracción de aire contaminado, requieren de su correspondiente ventilador inyector y extractor, respectivamente.

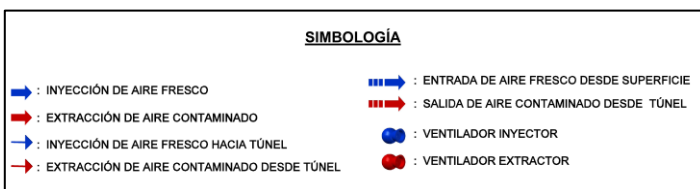
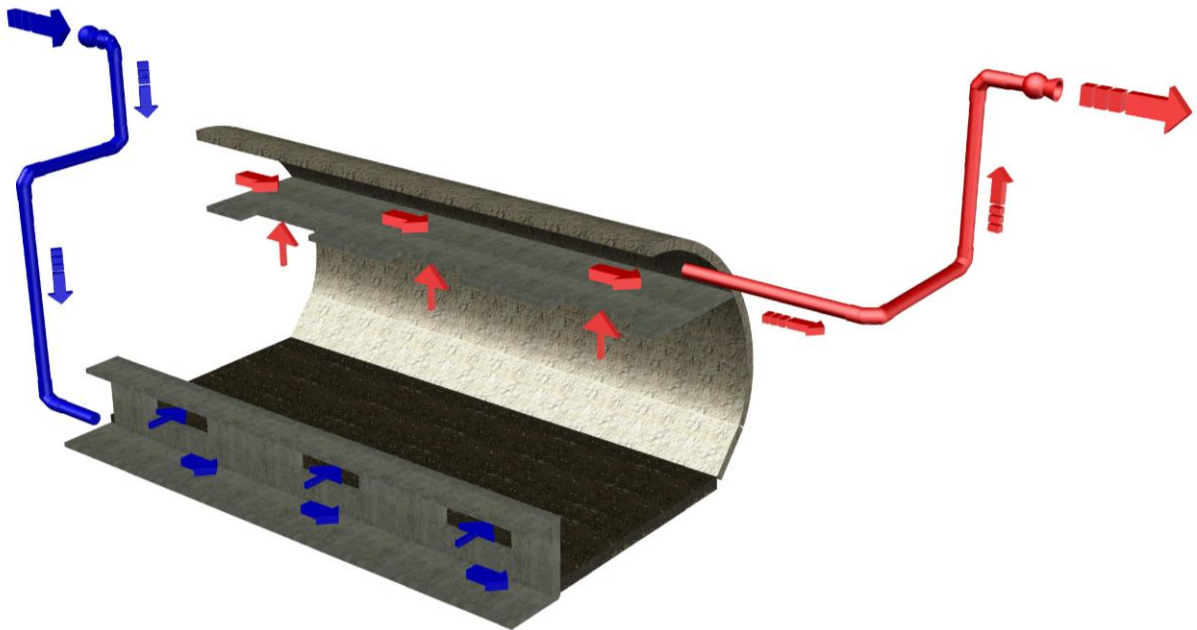


Figura N°3: Sistema de Ventilación Transversal



### VENTAJAS:

- Se constituye como la OPCIÓN más efectiva, en términos de control medio ambiental de operación de Túneles, en general, a lo largo de toda la extensión longitudinal de éstos, no importando la operación específica de los Túneles a ventilar (carretero, ferroviario, Metro, de transporte de mineral, otro).
- De alta efectividad en la ventilación de Túneles carreteros, bidireccionales, de gran longitud y alta intensidad de tráfico (asociado a alta opacidad, altas concentraciones de gases tóxicos y calor).

### DESVENTAJAS:

- OPCIÓN de ALTO COSTO. Es la OPCIÓN que requiere el mayor desembolso económico con respecto a todas las demás OPCIONES de sistemas de ventilación de Túneles, en general, tanto en la inversión en infraestructura y equipamiento [conducto lateral de inyección de aire fresco + cielo falso + ventiladores], como en los costos de operación [ventiladores inyectores & extractores (axiales ó centrífugos), de alta potencia], sobre todo para Túneles de gran longitud.

## OPCIÓN 4: SISTEMA DE VENTILACIÓN SEMI-TRANSVERSAL

### DESCRIPCIÓN:

- Un sistema de ventilación semi-transversal está constituido por un conducto de inyección de aire fresco, construido lateralmente en toda la extensión longitudinal del Túnel, el cual abastece a un conjunto de rejillas de inyección de aire fresco conectadas al Túnel. La extracción de aire contaminado, desde el interior del Túnel, se realiza longitudinalmente por el Túnel hasta uno de los extremos de éste y, desde allí hasta superficie. Para efectos de inyección de aire fresco al Túnel, se requiere la instalación de ventilador inyector (de tipo axial ó centrífugo).

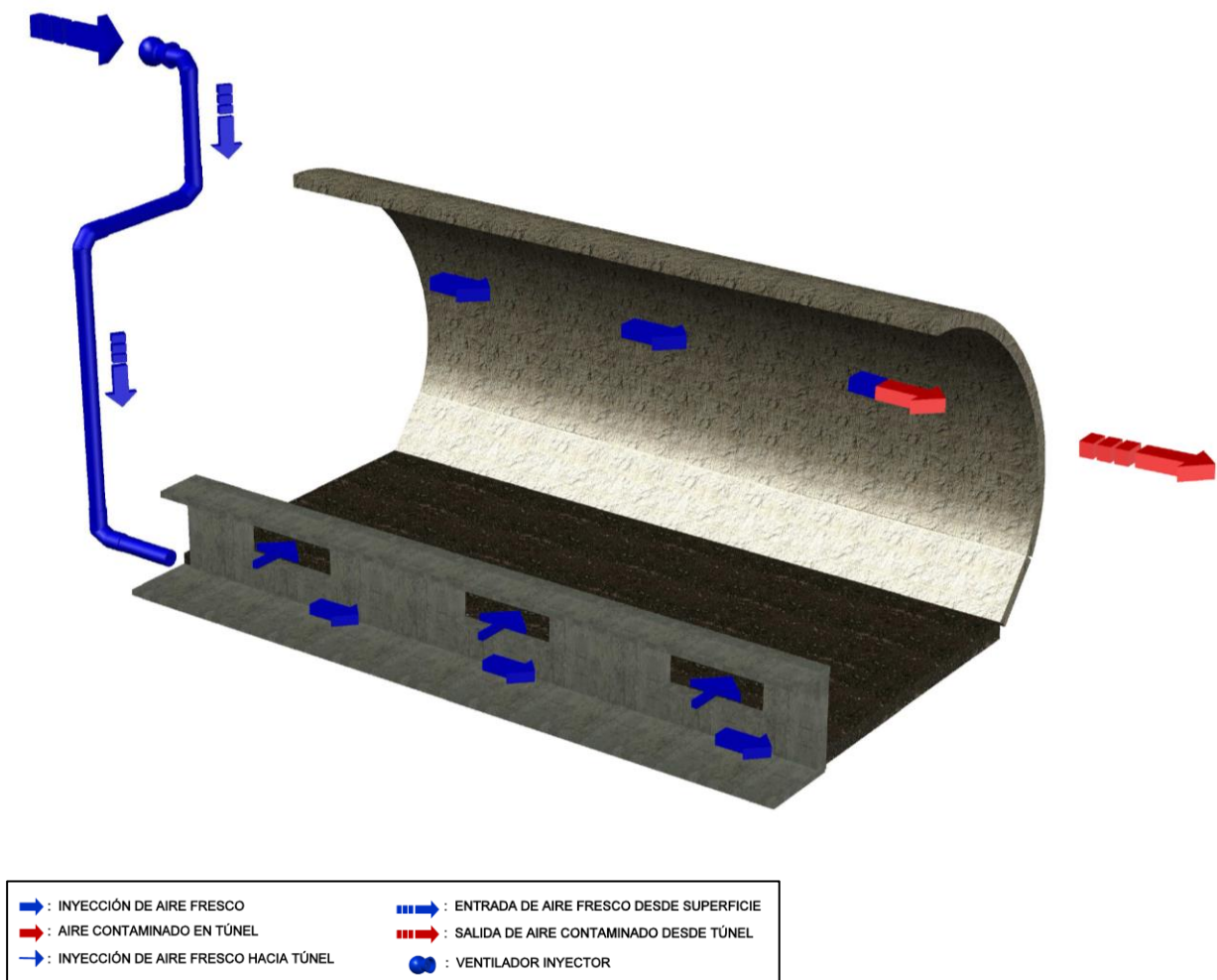


Figura N°4: Sistema de Ventilación Semi-Transversal

### VENTAJAS:

- Se constituye como una de las OPCIONES más efectiva, en términos de control medio ambiental de operación de Túneles, en general, a lo largo de toda la extensión longitudinal de éstos, no importando la operación específica de los Túneles a ventilar (carretero, ferroviario, Metro, de transporte de mineral, otro).
- De mediana, a alta efectividad en la ventilación de Túneles carreteros, bidireccionales, de gran longitud y alta intensidad de tráfico (asociado a alta opacidad, altas concentraciones de gases tóxicos y calor).

### DESVENTAJAS:

- OPCIÓN de ALTO COSTO. Es una de las OPCIONES que requiere mayores desembolsos económicos con respecto a todas las demás OPCIONES de sistemas de ventilación de Túneles, en general, tanto en la inversión en infraestructura y equipamiento [conducto lateral de inyección de aire fresco + ventiladores inyectores], como en los costos de operación [ventiladores inyectores (axiales ó centrífugos), de alta potencia], sobre todo para Túneles de gran longitud.

## OPCIÓN 5: SISTEMA DE VENTILACIÓN TRANSVERSAL CON DUCTOS LONGITUDINALES DE INYECCIÓN & EXTRACCIÓN

### DESCRIPCIÓN:

- Un sistema de ventilación transversal con ductos longitudinales de inyección y extracción, está constituido por un ducto de inyección de aire fresco, dispuesto al interior y a lo largo de toda la extensión longitudinal del Túnel a ventilar; dicho tendido de ducto inyector, contiene un conjunto de rejillas inyectoras por dónde se inyecta el aire fresco hacia el Túnel. Tal sistema, está constituido, además, por un ducto de extracción de aire contaminado, dispuesto al interior y a lo largo de toda la extensión longitudinal del Túnel; dicho tendido de ducto extractor, por dónde se extrae el aire contaminado desde el Túnel, hacia superficie, contiene un conjunto de rejillas extractoras conectadas al Túnel. Tanto los circuitos de inyección de aire fresco, como los circuitos de extracción de aire contaminado, requieren de su correspondiente ventilador inyector y extractor, respectivamente.

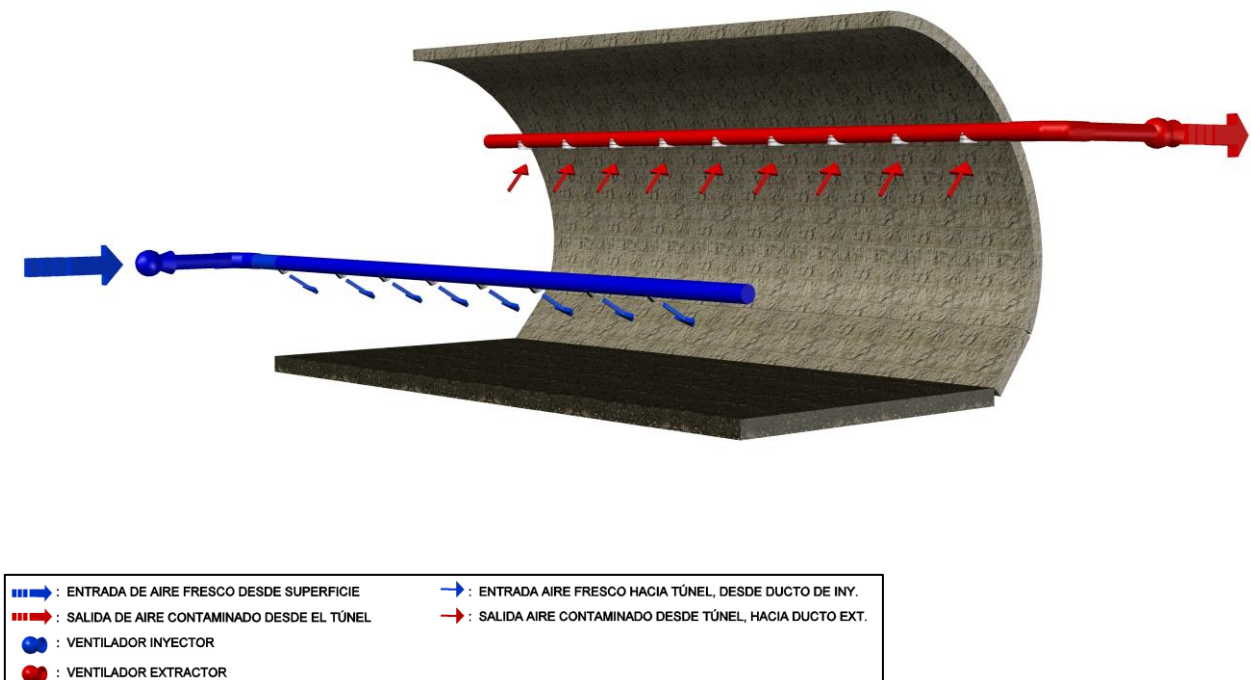


Figura N°5: Sistema de Ventilación Transversal con Ductos Longitudinales de Inyección & Extracción

### VENTAJAS:

- Se constituye como una de las OPCIONES más efectiva, en términos de control medio ambiental de operación de Túneles, en general, a lo largo de toda la extensión longitudinal de éstos, no importando la operación específica de los Túneles a ventilar.
  
- De alta efectividad en la ventilación de Túneles viales, urbanos, bidireccionales, de baja a mediana longitud y alta intensidad de tráfico (asociado a alta opacidad, altas concentraciones de gases tóxicos y calor).

### DESVENTAJAS:

- Es una OPCIÓN de ventilación de Túneles que requiere alto desembolso económico en ductos de ventilación (Inyección & Extracción). No obstante lo anterior, el desembolso económico requerido, es menor que el desembolso requerido para la implementación de la OPCIÓN 3 (sistema de ventilación transversal).

## OPCIÓN 6: SISTEMA DE VENTILACIÓN SEMI-TRANSVERSAL CON DUCTO LONGITUDINAL DE INYECCIÓN

### DESCRIPCIÓN:

- Un sistema de ventilación semi-transversal con ducto longitudinal inyector, está constituido por un ducto de inyección de aire fresco, dispuesto al interior y a lo largo de toda la extensión longitudinal del Túnel a ventilar ; dicho ducto de inyección, contiene un conjunto de rejillas inyectoras por dónde se inyecta el aire fresco hacia el Túnel. La extracción de aire contaminado, desde el interior del Túnel hasta superficie, se realiza longitudinalmente por el Túnel hasta uno de los extremos de éste. Para efectos de inyección de aire fresco al Túnel, se requiere la instalación de ventilador inyector (de tipo axial ó centrífugo), el cual deberá ser conectado al ducto de inyección.

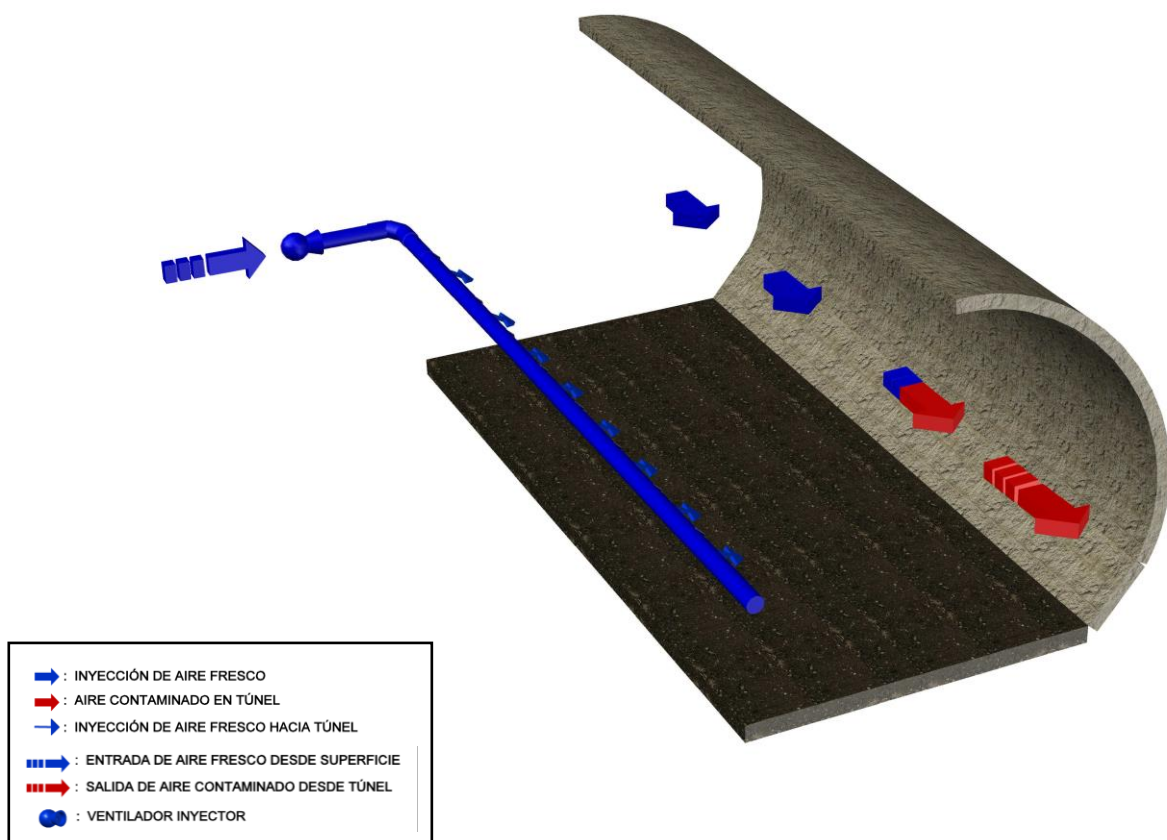


Figura N°6: Sistema de Ventilación Semi-Transversal con Ducto Longitudinal de Inyección

### VENTAJAS:

- Se constituye como una de las OPCIONES más efectiva, en términos de control medio ambiental de operación de Túneles, en general, a lo largo de toda la extensión longitudinal de éstos, no importando la operación específica de los Túneles a ventilar.
  
- De mediana, a alta efectividad en la ventilación de Túneles viales urbanos, bidireccionales, de baja a mediana longitud y alta intensidad de tráfico (asociado a alta opacidad, altas concentraciones de gases tóxicos y calor).

### DESVENTAJAS:

- Es una de las OPCIONES que requiere mediano desembolso económico en ductos de ventilación (Inyección). No obstante lo anterior, el desembolso económico requerido es menor que aquellos desembolsos requeridos para la implementación de las OPCIONES 3 y 5.

## OPCIÓN 7: SISTEMA DE VENTILACIÓN LONGITUDINAL CON USO DE VENTILADOR EXTRACTOR

### DESCRIPCIÓN:

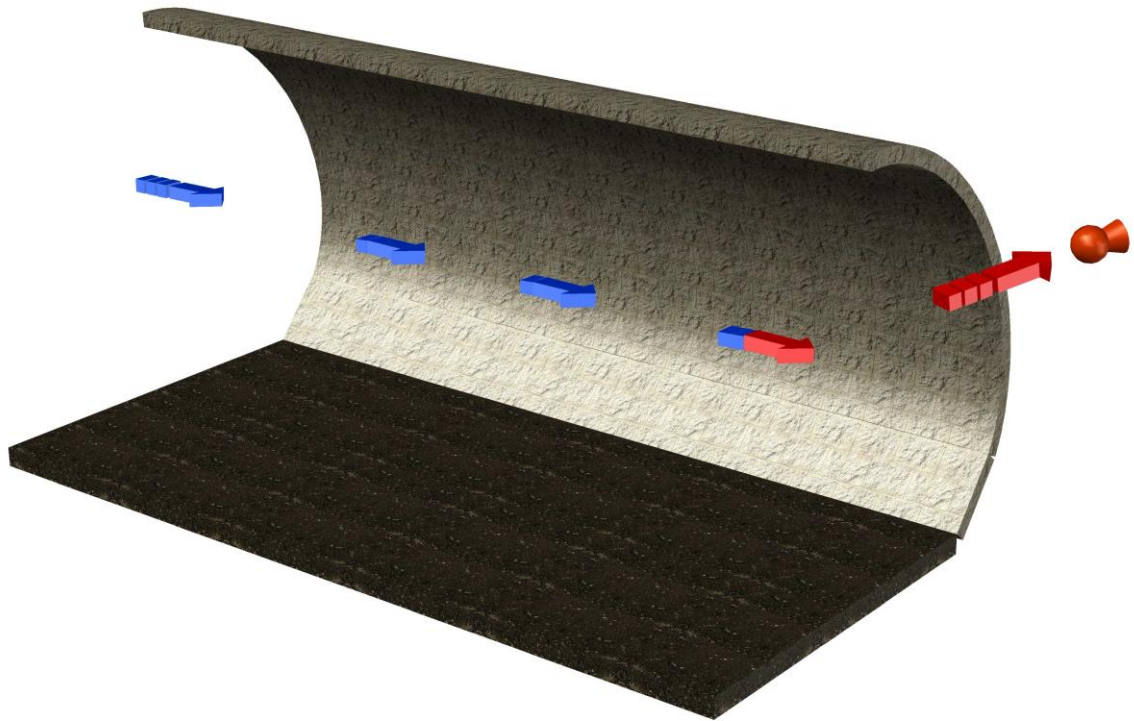
Un sistema de ventilación longitudinal con ventilador extractor, está constituido centralmente por la galería a ventilar, más Ventilador extractor (del tipo axial ó centrífugo), a instalar en uno de los extremos de la galería (Rampa, Túnel u otro), con conexión a superficie.

En diversas faenas mineras de nuestro país (Chile), en dónde los accesos están constituidos por labores minero-subterráneas denominadas Rampas, el control medio ambiental de dichas infraestructuras mineras es realizado mediante la operación de un SISTEMA DE VENTILACIÓN LONGITUDINAL CON VENTILADOR EXTRACTOR:

*Tal sistema, opera de la siguiente manera:*

*El aire fresco entra -desde superficie y, por depresión- a la Rampa, ventila toda la extensión longitudinal de la Rampa, posteriormente, el aire contaminado es evacuado desde extremo final de la Rampa, hasta estocada ó galería extractora, por medio de la operación de ventilador extractor instalado en dicha labor, finalmente, el aire es evacuado, desde galería extractora, hacia chimenea extractora y, por medio de ésta, es extraído hasta superficie.*





**Figura N°7:** Sistema de Ventilación Longitudinal con uso de Ventilador Extractor

VENTAJAS:

- Se constituye como una de las OPCIONES más efectiva de control medio ambiental subterráneo (Minas, Túneles, otros) para aquellos casos de mediana contaminación ambiental (polvo y gases), dado las operaciones particulares al interior de la infraestructura a ventilar.
- Dentro de las OPCIONES de Ventilación Mecánica, la presente OPCIÓN, es la OPCIÓN de MENOR COSTO, tanto en inversión, como en operación. NO se requiere instalación alguna de ductos de ventilación (metálicos, concreto, otros); sólo se requiere la instalación de ventilador extractor, más la instalación de dispositivos de control de flujos de aire, en interior de Túnel a ventilar, tales como puertas de ventilación (direccionadoras de flujos), reguladores, tapados, otros.

## DESVENTAJAS:

- Tal OPCIÓN, no es apropiada para la ventilación de Túneles de gran extensión longitudinal (longitud de Túnel mayor que 5.000 m.) y alto tráfico vehicular, dado la NO renovación de aire circulante al interior del Túnel, lo cual genera un aumento progresivo de las concentraciones ambientales de contaminantes, según aumenta la distancia recorrida por el aire al interior del Túnel.

[Para atender túneles de gran longitud (párrafo anterior), se debe implementar Sistema de Ventilación Longitudinal con Ventiladores Extractores + Piques (ó ventanas) de Ventilación Intermedios, emplazados éstos a cierta distancia -entre ellos- al interior del Túnel, los cuales deberán conectar el Túnel, con superficie, logrando de esta manera crear *Subsistemas de Ventilación Longitudinal con Ventilador Extractor, por Tramos*].

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- A la fecha, existe diversos Sistemas de Ventilación de Túneles, en operación, del tipo híbridos, que fueron diseñados en base a la combinación de 2 (dos) ó más OPCIONES de Sistemas de Ventilación de Túneles, en general, expuestos al interior de presente Documento; es decir, el total de OPCIONES de sistemas de ventilación de Túneles acá expuestos, representa sólo una fracción de una alta cantidad y diversidad de OPCIONES de sistemas de ventilación de Túneles (carreteros, ferroviarios, metro, de transporte de mineral, otros) desarrollados y operados, a nivel global.
- La implementación de c/u de los Sistemas de Ventilación Operación de Túneles acá expuestos, considera sólo la operación normal de Túnel, es decir, NO toma en consideración, la evacuación de humos, gases y calor, en caso de incendio.

Es necesario señalar que, al interior de todo estudio (diseño, cálculo y dimensionamiento) de sistema de ventilación de Túnel, se deberá considerar la eventual ocurrencia de incendio al interior de dicha infraestructura, con el objeto de que dicho sistema -al ser implementado- sea capaz de atender tanto los requerimientos de ventilación durante la operación normal del Túnel (mediano requerimiento de aire), como los requerimientos de ventilación (control de flujos de aire, con alto contenido de humos, gases y calor) durante instancias de incendio subterráneo (alto requerimiento de aire).

Además, todo sistema de ventilación de Túnel a diseñar, para operar durante instancias de incendio subterráneo, deberá cumplir las normas vigentes respecto a tiempos mínimos y temperatura máxima de operación de equipos y dispositivos de control de incendio (ventiladores, motores eléctricos, cables eléctricos, puertas de ventilación, puertas contra incendio, tapados, otros), estipuladas -a la fecha- por diversos países, tales como U.S.A. y Comunidad europea.

- Es de interés consignar que, sea cual sea los valores reales de la Presión de Ventilación Natural (Día-Noche; Invierno-Verano) para un Túnel en particular y, dado que, la Presión de Ventilación Natural es un fenómeno de naturaleza inestable y fluctuante, en términos de sentido de flujo entre diferentes períodos de tiempo [diarios (noche ; día) y anuales (Invierno; Verano)], altamente dependiente de las condiciones atmosféricas, NO ES RECOMENDABLE hacer uso exclusivo de la Ventilación Natural (NO MECÁNICA) para ventilar dicho Túnel. No obstante y de acuerdo a las buenas prácticas, la ventilación natural debe ser analizada e incorporada dentro del diseño, cálculo y dimensionamiento del sistema de ventilación mecánica que sea necesario implementar para atender la operación de Túneles ; es decir, la ventilación natural deberá incluirse como una fuerza aeromotriz de tipo complementaria al sistema de ventilación mecánica a implementar.
- De acuerdo a las OPCIONES de sistemas de ventilación de Túnel antes expuestas, es posible consignar que, las OPCIONES que mejor responden a requerimientos de manejo de aire, tanto en la operación normal de un Túnel, como en instancias de emergencia de incendio al interior de éste -sin importar la longitud del Túnel- son las OPCIONES 3 y 5. En el caso particular de implementación de OPCIÓN 3: Sistema de Ventilación Transversal, el cielo falso, puede ser utilizado tanto para la extracción de aire -por medio de celosías extractoras, desde el Túnel- durante operación normal de éste, como para la extracción de humos durante instancias de incendio en Túnel. Dicho cielo falso, deberá ser construído con materiales de alta resistencia al fuego y, de un espesor mínimo tal que NO colapse frente a altas temperatura generada por la potencia calorífica del incendio.

- Es recomendable abordar -dentro del desarrollo global de estudios de ventilación de Túneles- estudios de *Sistemas de Protección Contra Incendio Subterráneo*, dentro de los cuáles, además de considerar lo estipulado en *Capítulo Octavo: Prevención y Control de Incendio, D.S. N°132/72 (Reglamento de Seguridad Minera, Ministerio de Minería, República de Chile)*, se deberá abordar, como mínimo, las siguientes materias:
  - *Medidas relativas al comportamiento y reacción al fuego,*
  - *Sistemas de detección de incendios,*
  - *Señalización específica de emergencia,*
  - *Sistema de ventilación de emergencia,*
  - *Sistemas de iluminación de emergencia,*
  - *Sistemas de alimentación eléctrica ininterrumpida,*
  - *Vías de evacuación a superficie,*
  - *Salidas de emergencia,*
  - *Refugios contraincendio,*
  - *Otros.*