



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y NEGOCIOS  
INGENIERÍA EN MINAS

PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL GRADO DE INGENIERO EN MINAS

**Análisis Técnico Económico  
comparativo para la construcción  
del Túnel de Agua negra, entre  
Sistema de Perforación y  
Tronadura tradicional v/s Mediante  
Tunelera**

FERNANDO ISAÍAS MUÑOZ MILLAPÁN

PROFESOR GUÍA  
ALEJANDRO RAMÍREZ GONZÁLEZ

JULIO 2017  
CONCEPCIÓN

# ÍNDICE

## Contenido

ÍNDICE .....	1
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
CAPÍTULO I	
RESUMEN .....	5
ABSTRACT.....	6
INTRODUCCIÓN .....	7
CAPÍTULO II	
TÚNELES EN LA HISTORIA .....	8
ANTECEDENTES.....	9
METODOLOGÍA.....	12
ANTECEDENTES HISTÓRICOS .....	15
MARCO TEÓRICO.....	17
ACTUALES TÚNELES OPERATIVOS EN CHILE .....	24
CLASIFICACIÓN DE TÚNELES SEGÚN UBICACIÓN .....	29

### CAPÍTULO III

MÉTODOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA TRADICIONAL.....	34
MÉTODO DE PERFORACIÓN MEDIANTE TUNELEADORA.....	42
TIPOS DE TUNELEADORAS.....	43
CARACTERÍSTICAS DEL FUTURO TÚNEL .....	47
LABORATORIO SUBTERRANEO .....	49
INGENIERÍA DEL TUNEL.....	54
EL IMPACTO ECONÓMICO DEL PROYECTO.....	55
CORREDOR BIOCEÁNICO.....	56
COMERCIO EXTERIOR.....	60

### CAPÍTULO IV

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO.....	66
COSTOS MEDIANTE TBM.....	73
COSTOS MEDIANTE P&T.....	85
COSTOS MÉTODO COMBINADO.....	89
BIBLIOGRAFÍA.....	98
LINKOGRAFÍA.....	101

## DEDICATORIA

... Quiero dedicar este, mi proyecto de titulación, en primer lugar a DIOS padre, por brindarme el amor, la salud y la vida que he necesitado durante mi existencia, por darme a nacer en una hermosa familia, con unos padres maravillosos que desde muy pequeño me inculcaron los valores que he necesitado para afrontar esta vida y sus porvenires.

A mi Padre terrenal, a quién le prometí en su lecho de muerte que sería un gran profesional, a mi Madre bella, que desde mi gestación a dejado por mi su vida entera, a mi tía madrina, por apoyar desde mi nacimiento la difícil labor de educar e inculcarme a ser un hombre autovalente para mi vida y de bien para la sociedad; a mi tía Tato, por hacerme ver en cada conversación que mantuvimos durante mi proceso de formación profesional, que debía perseverar para alcanzar aquella lucecita, que se encontraba en la cima de la escalera, que cada ramo que cursaba, que cada problema que superaba era un peldaño más que recorría para alcanzar mi meta. A mis tíos, tías, hermanos, hermanas, primos y sobrinos en general, ya que cada uno aportó con su granito de arena en el momento más necesitado.

Y por último deseo dedicar este también a mi compañera de vida, quién me dio los empujoncitos más certeros para concluir esta, mi última etapa de formación profesional, ya presentando en el siguiente libro, mi proyecto de titulación para optar al grado de mi profesión soñada, Ingeniero en Minas...

## AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a todos quienes me apoyaron en este corto pero a la vez duro proyecto en el que me embarque hace ya cinco años, que estuvo marcado como en la vida diaria, con altos y bajos, pero fue en esos bajos donde estuvieron presentes esas palabras de alientos, esas frases motivacionales que me recordaban por qué inicié este camino, y el por qué debía perseverar para cumplir mi meta.

... Muchos quizás dijeron que no lo lograría, pero los que realmente me conocían, confiaban plenamente en mis capacidades, que aunque peco siempre de distraído e inquieto, fui bendecido con una gran inteligencia, que en este caso, la ocupé para el proceso de mi formación profesional.

Mil gracias a todos quienes estuvieron ahí, en las buenas y en las malas, en los días secos y en los mojados, porque mi tiempo con ustedes no fue perdido, no fue en vano, ya que sea buena o sea mala, me guardo la experiencia ganada, lo que debo repetir a futuro y lo que nunca debo volver a realizar. Mi tiempo con ustedes fue invertido, conocí lindas personas y así también me aleje de muchas otras, todo pasa por algo, pero ¡el que quiere siempre puede!.

Y aquí estoy, pudiendo, lográndolo, cumpliendo mi meta... Enormes Gracias a mi Madre, por cada oración elevada, por cada palabra de aliento entregada, a mi familia entera, por la constante motivación a continuar, a mi grupo de compañeros, por el mutuo apoyo y complicidad que siempre nos entregamos, a el cuerpo de docentes mineros, que siempre nos hizo sentir como en casa, a mi compañera de vida, quién lucho conmigo hasta el final de esta etapa, hasta la última noche en vela, escribiendo esta, mi memoria. Gracias a mi Padre, que cuando mi perseverancia descendía, miraba al cielo y recargaba, esa promesa inolvidable, de cuidar a mamá, de pasar a ser el hombre de la casa, de ser un gran profesional.

Muchas veces decaí, muchos errores cometí, pero siempre opte por perseverar, porque sí, simplemente porque quería, porque lo podía lograr..

Gracias enormes a todos ustedes, hoy ya puedo contarles, ¡ MISIÓN CUMPLIDA !.

## CAPÍTULO I

### **RESUMEN**

En el siguiente proyecto podrán informarse de manera clara sobre el estudio técnico – económico para la creación del nuevo túnel “AGUA NEGRA” mediante sistema tradicional o con una TBM (Tunnel Boring Machine). Además indica la recomendación de aplicación resultante de este estudio y sus correspondientes fundamentos.

Todo esto se desarrolla con el único fin de ver el método más conveniente, en cuanto a tiempos (H.H) y costos (USD), para así lograr elegir la opción más rentable.



## **ABSTRACT**

In the following project you will be able to inform yourself clearly about the technical and economic study for the creation of the new "AGUA NEGRA" tunnel by traditional system or with a TBM (Tunnel Boring Machine). It also indicates the application recommendation resulting from this study and its related grounds.

All this is developed with the sole purpose of seeing the most convenient method, in terms of times (H.H) and costs (USD), in order to achieve the most profitable option.



## INTRODUCCIÓN

El **Túnel de Agua Negra**, es un futuro proyecto vial, que constará en la construcción de dos túneles, en el paso fronterizo de Agua Negra en la cordillera de los andes, en la provincia argentina de San Juan y la chilena Región de Coquimbo. La obra será el componente principal del corredor bioceánico, que conectará el centro de Argentina, con el puerto del Océano Pacífico de la ciudad de Coquimbo y el puerto de la ciudad de Porto Alegre en el Océano Atlántico.

En la siguiente investigación y proyecto de título se realiza un estudio técnico-económico para definir el método más rentable al momento de construir el nuevo proyecto denominado “Agua Negra”, el cual incluirá dos nuevos túneles de 13,9 km de longitud y 12 metros de diámetro cada uno, este estudio comparará el uso del método tradicional con el de una TBM (Tunnel Boring Machine) para determinar cuál es el más rentable o si es necesario combinarlos.

Hoy en día, la construcción de nuevos y modernos túneles, se ha vuelto sumamente necesaria en nuestro mundo actual, ya sea para conectar localidades de manera más directa y con esto reducir tiempos de viaje, conectar vías de comercios directas, como también para modernizar aquellos túneles ya construidos y con esto respaldar medidas de seguridad y estándares exigidos en la actualidad, para nuevos y más rápidos sistemas de transporte que hoy en día existen.

Esta nueva obra tendrá por nombre túnel “Agua Negra”, actualmente no existe ningún viaducto en esa localidad y según estudios realizados por el MOP, se debe construir en un plazo no mayor a 10 años. Esta mega obra será lo más viable tanto técnica como económicamente en comparación con el proyecto de trazar carretera de subida y bajada por la superficie del cerro según un estudio anteriormente realizada por el Ministerio de Obras Públicas.

## CAPÍTULO II

### **Túneles en la historia**

El túnel arranca de la necesidad de superar un obstáculo natural, generalmente un macizo montañoso. Pero además de la montaña existen otras barreras que se pueden salvar mediante túneles como los cursos de agua, fluviales o marinos, y las zonas urbanas densamente edificadas en las que a menudo se incorporan túneles.

Entre los usos más frecuentes pueden enumerarse los túneles para vehículos, para redes de ferrocarril urbano o Metros, para uso peatonal, para abastecimiento de agua, saneamiento, galerías de servicio y para almacenamiento de residuos (A.G.P.).

Si bien el túnel en sentido estricto se caracteriza por su marcado carácter lineal, también se considera, por extensión, el término túnel en un sentido amplio, no solo como obra lineal sino como espacio subterráneo que incluye desde la caverna, la cueva natural hasta amplios recintos subterráneos transitables dentro de lo que podría englobarse como urbanismo y espacio subterráneo; en suma, el túnel como obra de tránsito y también como hábitat.



## ANTECEDENTES

### 1. Título del proyecto:

PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL “AGUA NEGRA”, ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO.

### 2. Identificación del alumno

Nombre: FERNANDO ISAÍAS MUÑOZ MILLAPÁN

R.U.T: 18.719.356-7

Fono: (+56) 9 443 78 609

Carrera: Ingeniería en Minas

Régimen: Diurno

Semestre: PRIMER SEMESTRE DE 2017

Fecha de nacimiento: 09/11/1994

Correo electrónico: arriendosvillarrica@gmail.com

Domicilio: Los Tamarugos 1985, Villarrica

### 2.- Definición del “Problema”:

El problema radica en determinar que método de perforación es TÉCNICO-ECONÓMICAMENTE más conveniente para la creación del nuevo proyecto “Agua Negra”, el cual encarga la construcción de dos nuevos túneles de 13,9 km de longitud y 12 m de diámetro cada uno, que tengan una vida útil de a lo menos 40 años, con fortificación apta para la calidad de la roca a tratar y que se encuentre la obra terminada en máximo 10 años desde la fecha de inicio.

### 3.- Objetivos.

#### General:

Desarrollar un estudio técnico - económico para determinar el método de perforación más eficiente para realizar el proyecto "Aguas Negras".

#### Específico:

- Analizar en terreno la calidad de la roca.
- Caracterizar el macizo rocoso por donde pasará el túnel.
- Realizar estudios a la permeabilidad de suelo de la zona a trabajar y densidad de agua promedio precipitada en la zona.
- Determinar tipo de fortificación a utilizar y costo de esta. (Dovelas)
- Determinar totalidad de equipos que se utilizarán por cada método.
- Determinar si están disponibles tuneleadoras para la fecha que se requieren y por el periodo en que se utilizarán según los estudios técnicos.
- Solicitar los permisos de construcción correspondientes, guiándose por la normativa legal vigente.
- Analizar específicamente los costos y tiempo de operación mediante método tradicional de perforación y tronadura.
- Analizar a menoscabo los costos y tiempos de operación en la creación del túnel, mediante una TBM (Tunnel Boring Machine).
- Determinar cantidad de personal necesario para la obra en cada método.

- Determinar costos totales de operación respectivos para cada método.
  
- Realizar un análisis técnico-económico del proyecto, estudiando las ventajas y desventajas que influyen en este y como resultado, se logre determinar el método más eficiente a utilizar, ya sea entre sistema tradicional o tuneleradoras.

#### 4.- Delimitaciones y Limitaciones.

Construir la nueva obra llamada “Aguas Negras” en la región de Coquimbo, por el lado fronterizo de Chile, y en la provincia de San Juan por la parte fronteriza de Argentina, trabajando in situ con parámetros de esas áreas en específico, y concluir lo antes posible este estudio técnico-económico que nos permita optar por el método de perforación más conveniente para comenzar la obra lo antes posible.

El nuevo túnel se debe terminar en un máximo de 9 años desde la fecha de inicio del proyecto, debido a ocupar un año entero en la continuidad de pavimentar los túneles, deben tener una fortificación apta para cumplir con una vida útil mínima de 40 años y cumplir con la normativa legal vigente.

En delimitaciones se informa que las características de la máquina TBM esta seleccionada exclusivamente para los parámetros de este túnel. Se informa que no existen limitaciones en terreno ya que existe acceso pleno y total a la obra.

#### 5.- Metodología.

La Metodología a utilizar será de carácter Deductivo – Inductivo y explicativo. El presente estudio se caracteriza por tratarse de una trabajo práctico-teórico apoyado en la recopilación de información teórica vía web, cotizaciones y visitas de terreno, recopilando información específica a necesitarse para llevar a cabo el desarrollo del proyecto.

**El método a utilizar para la realización de este proyecto será:**

1. Recopilación de datos: Se comenzará reuniendo información sobre ubicación y condiciones a soportar diariamente, estándares a cumplir, plazos de entrega, y vida útil del nuevo túnel “Agua Negra”, entre muchos otros más.

2. Clasificación y descripción: A través de la recopilación bibliográfica e información entregada por el mandante podremos categorizar el terreno a tratar, el tiempo disponible para ejecutar la obra y el tiempo límite para finalizarla, también así los recursos que se cuentan en el presupuesto de la inversión.

3. Descripción del proceso: En esta etapa se describirá los aspectos sociales, culturales, ambientales, de relaciones bilaterales, aspectos técnicos-económicos del proceso operativo, los beneficios y las contradicciones de cada método, y particularmente, cual de estos será más conveniente tanto en costos como en tiempo de obra.

4. Presentación: Descripción total de la mega obra que se desarrollará para fortalecer la unión entre ambos países, con altos estándares, a nivel nacional e internacional y guiándose siempre por la normativa legal vigente de cada país.

5. Beneficios: El siguiente estudio nos entregará la información total sobre este mega proyecto y como resultado la opción más conveniente para elegir, considerando como factores principales los costos y tiempo de operación para llevar a cabo el nuevo proyecto de túneles “Agua Negra” en la región de Coquimbo.

## Estado del Arte

El túnel arranca de la necesidad de superar un obstáculo natural, generalmente un macizo montañoso. Pero además de la montaña existen otras barreras que se pueden salvar mediante túneles como los cursos de agua, fluviales o marinos, y las zonas urbanas densamente edificadas en las que a menudo se incorporan túneles.

Entre los usos más frecuentes pueden enumerarse los túneles para vehículos, para redes de ferrocarril urbano o Metros, para uso peatonal, para abastecimiento de agua, saneamiento, galerías de servicio y para almacenamiento de residuos.

Si bien el túnel en sentido estricto se caracteriza por su marcado carácter lineal, aquí se considerará, por extensión, el término túnel en un sentido amplio, no solo como obra lineal sino como espacio subterráneo que incluye desde la caverna, la cueva natural hasta amplios recintos subterráneos transitables dentro de lo que podría englobarse como urbanismo y espacio subterráneo; en suma, el túnel como obra de tránsito y también como hábitat.

Gran parte del territorio chileno se desarrolla entre dos cordilleras, la primera de ellas la cordillera de Los Andes, columna vertebral de América Latina y la segunda, la Cordillera de La Costa, cubierto aproximadamente en un 70% por montañas, cerros y lomajes, lo que sumado a su actividad minera, ha exigido una cantidad considerable de socavones y túneles.<sup>[1]</sup>

El espíritu innato del excavador está muy dentro de la mentalidad nacional, kilómetros y kilómetros de túnel se han labrado en la explotación de yacimientos, incluso bajo el océano, como es el caso del carbón. Igualmente ocurre en las obras de regadío, en las líneas ferroviarias y rutas viales, en las centrales hidroeléctricas y en muchas otras faenas de progreso. Desde la fundación del Ministerio de Obras Públicas, todos los túneles de los

ferrocarriles, de las obras hidráulicas y de los caminos, estuvieron a su cargo. En la red ferroviaria norte, tramo La Calera - Cabildo, se abrió el túnel Palos Quemados, con 1050 m. de longitud. En la zona de Cabildo se construyeron cuatro túneles, que suman 2.180 m. de los cuales La Grupa y Las Palmas son utilizados por Vialidad desde que dejó de correr el ferrocarril. De Los Vilos al Choapa se construyó el de Cavilolen, de poco más de 1.600 m. de longitud y de Illapel a San Marcos, el de Espino, con cerca de 1.500 m. de longitud. En la zona central se construyó el túnel Caracoles, del Ferrocarril Transandino, inaugurado en 1910, con una extensión de 3.143 m. (con 1.460 m. en el lado chileno). Próximo a Lonquimay se terminó el túnel Las Raíces en 1939, con una longitud que alcanzó a los 4.528 m. y que también está a cargo de la Dirección de Vialidad en la actualidad.

En Santiago, el túnel de Matucana fue finalizado en 1943 con 2.300 m. de longitud, para comunicar bajo tierra las estaciones ferroviarias Central y Mapocho. Entre las obras ejecutadas en los últimos 20 años se cita la construcción del túnel Cristo Redentor en 1980 ubicado en la Ruta Internacional 60 CH en la V región con una extensión de 3.080 m. (con 1.564 m. en el lado chileno), posteriormente en el año 1984 la construcción del túnel El Farellón en Coyhaique, XI región, con 240 m. de longitud y en el norte de Chile, Antofagasta, se efectuó en 1994 la construcción del túnel Pedro Galleguillos de 793 m. de longitud. La construcción del túnel El Melón (1995) construido mediante el sistema de concesión, se encuentra ubicado en la Ruta 5, V región, con una longitud de 2.500 m. y permite evitar la cuesta del mismo nombre. Finalmente el reciente inaugurado túnel La Calavera en la misma ruta. En la Ruta 68, por la vía de las Concesiones se construyeron dos túneles adicionales, uno en Lo Prado y otro en Zapata, a fin de garantizar un mejor nivel de servicio, disminución de los tiempos de viaje y disminución de congestión vehicular en época estival. Toda esta actividad tunelera creciente en nuestro país, hace que la ingeniería chilena esté particularmente interesada en esta materia, aplicando nuevas técnicas de proyecto y de construcción para las obras viales. <sup>[2]</sup>

Nota.-

[1] Historia de los túneles y su evolución histórica E.T.S.E.C.C.P.B. - U.P.C.

[2] Historia de túneles en Chile, Dirección de Vialidad.



## Antecedentes históricos

Chile y la provincia de San Juan en Argentina han mantenido relaciones sociales políticas y comerciales por más de tres siglos a pesar del macizo cordillerano. La primera fundación de la ciudad de San Juan la realiza Juan Jufre de Loayza y Montesse por orden de Francisco de Villagra capitán general de Chile. En la época colonial San Juan era parte del corregimiento de Cuyo con cabecera en la ciudad de Mendoza integrando la Capitanía general de Chile dependiente del virreinato del Perú. Con la formación del Virreinato del Río de la Plata en 1777 el Corregimiento de Cuyo fue separado del Virreinato del Perú.

Las fuerzas vivas de los dos países colocan en la agenda de las conversaciones presidenciales el Paso Aguas Negras en 1935, una fecha temprana. Figura en dicho documento en el “Protocolo Adicional al Tratado de Límites de (1881)” refrendado por los cancilleres en julio de ese año. En 1943, se da un nuevo paso, se firman los acuerdos: “Convenio sobre tráfico y Tránsito”, “Acuerdo que establece el procedimiento para concertar la unión aduanera entre ambos países” y “acta relativa al mejoramiento y desarrollo de las Vías trasandinas”. (Frente Paso Agua Negra; 2009)

La necesidad de construir caminos que comunicarán comunidades cordilleranas y transportar carga a ciudades de mayor connotación económica en los dos países, incentiva la construcción de caminos, que generan una vía que se acerca a la frontera. El acta suscrita en Mendoza en 1949 establece que por el lado Argentino que comunica San Juan con las Flores, y que entre este último punto y la frontera se encuentra en construcción un camino al que faltan sólo 38 kilómetros para alcanzar el

límite. Por el lado chileno sólo falta construir el tramo faltante entre la Laguna y el Paso Agua Negra, para comunicar La Serena y Coquimbo con la frontera. Con esta información la Comisión Mixta acuerda incorporar el camino San Juan A Coquimbo a la lista de caminos internacionales a construir (Iribarren; 2012)

Pasarían casi dos décadas para que se inaugure el camino el 1 marzo de 1965. El acuerdo definitivo se gesta casi un año antes en marzo de 1964. En nota 40 del gobierno Argentino que dice, “Por instrucciones de mi gobierno propongo (...) construcción de un camino“ que una las ciudades de San Juan y de Coquimbo, por paso de Agua Negra. El gobierno de Chile acepta la construcción y la modalidad propuesta por Argentina (Iribarren; 2012).

Esta vía de comunicación dá paso a un incipiente intercambio comercial y turístico. Durante algunos años se exportó ganado argentino por el puerto de Coquimbo. La ruta se mantuvo abierta hasta 1977, año en que fue bloqueada por el litigio diplomático-militar que mantenían las dos naciones.

El Paso Agua Negra se reabrió en 1991, desde ese momento se ha observado un ascenso permanente en el tráfico, que se ha visto vigorizado los últimos años por la bonanza económica de la que gozan ambos países.

Desde los noventa se venía hablando en Chile y Argentina de la necesidad de construir un túnel en el paso aguas Negras, que hiciera más expedita la conexión entre San Juan y Coquimbo. La iniciativa se entrampaba en los gobiernos, que si bien, miraban con buenos ojos el proyecto no lo colocaban en primera prioridad de la agenda.

El 2008 un grupo de empresarios chilenos da un paso decisivo y crean el “Frente Paso Agua Negra” con la finalidad de dar una respuesta al escaso avance que ha tenido la realización del estudio del túnel internacional, proyecto que podría hacer operativa la comunicación vial con Argentina durante todo el año. La iniciativa y las acciones emprendidas por la sociedad civil influyen en las autoridades regionales y tanto el Gobernador de la provincia de San Juan, como los sucesivos Intendentes de la Región de Coquimbo se movilizan en pro de concretar el proyecto.

La firma por parte de los Presidentes de Chile y Argentina del Tratado de Maipú (2009) da un impulso definitivo al proyecto Túnel de Agua Negra. En el Protocolo Complementario se acuerda la Constitución de una Entidad Binacional (Diario El Día; 2012) para el proyecto Túnel Internacional Paso Agua Negra, lo más relevante, se da un plazo de treinta días para su constitución. Esta Entidad será la encargada de revisar los estudios técnicos y de factibilidad. Una vez realizado lo anterior, si las partes deciden realizar la obra la Entidad Binacional será la encargada de: a) reunir los antecedentes necesarios a fin de elaborar los pliegos de licitación para la concreción del proyecto; b) realizar el llamado a licitación y adjudicar el Proyecto; c) controlar el proyecto. (Min Rel Ext;2009)

Por fin, llegó el día, y el 16 de marzo del 2012, los Presidentes de Chile y Argentina firman el “Protocolo de Cooperación y Licitación de túnel Agua Negra”. Documento que sella la factibilidad del túnel Agua Negra y abre el paso a una rápida licitación. José Luis Gioja, gobernador de la provincia de San Juan, celebró que en 2012 se empiece con el proceso de licitación y declaró “El Atlántico a nosotros nos queda a 1.200 kilómetros; el Pacífico, a 380. La soja que sale del centro de Argentina llega en 15 días al puerto de Rosario, en el Atlántico. Con este proyecto, llegaría al puerto chileno de Coquimbo en un día y medio”. (Rosario; 2011)

## **MARCO TEÓRICO**

El túnel en la historia de los pueblos:

El arte de los túneles se funde en sus orígenes con el arte de la minería. La mina más antigua que se conoce en el mundo se localiza en el cerro de Bomvu, en Swazilandia, y data del año 40.000 a.C.; en ella el hombre de Neandertal minaba hematites, piedra de sangre, muy apreciada para ritos mortuorios; las herramientas no eran otras que piedras afiladas y sus manos desnudas.

El primer método de perforación de galerías mineras y, con posterioridad, de túneles es la técnica del fuego, consistente en provocar un incendio en el frente de ataque para luego sofocarlo bruscamente con agua fría produciendo un brusco gradiente térmico que da lugar al resquebrajamiento de la roca; pero esta técnica también provoca, como no es difícil imaginar, una atmósfera viciada, irrespirable, generando gases a menudo venenosos, convirtiendo el trabajo del minero en una trampa mortal a la que sólo unos pocos afortunados sobreviven.

El primer túnel de la historia, allá donde ésta se difumina con el territorio del mito, fue el que la leyenda dice mandara construir Semiramis bajo el Eúfrates para comunicar el Palacio y el Templo de Belos en la Babilonia del 2200 a.C.. A este formidable trabajo se refieren entre otros los historiadores Diodoro de Sicilia, Herodoto y Estrabon. En realidad, se trataba de un falso túnel, por cuanto no se perforó en galería sino mediante zanja a cielo abierto y posteriormente recubierta, para lo cual se desviaron las aguas del Eúfrates aprovechando el período de estiaje.

El siguiente túnel construido bajo el cauce de un río se perforó cuatro mil años después de aquel de Babilonia, obra de los Brunel padre e hijo quienes tras veinte años de lucha denodada y arrojaron lograron dominar las furiosas aguas del río Támesis que se resistía a ver perforado su lecho.

A lo largo de la historia y en el seno de distintas culturas se han proyectado y construido túneles con distintos motivos. Así, tanto en el antiguo Egipto, como en las culturas orientales, el túnel ha tenido un marcado carácter religioso. Mientras que en zonas como las Tierras de Canaan (siglo X a.C.) el propósito no es místico o religioso sino ingenieril, hidráulico. Tenían como fin el abastecimiento a las ciudades y la captación de aguas. ¿Por qué bajo tierra?. Por varios motivos. El más poderoso de

ellos, sin duda, evitar que un bien tan preciado como el agua (muy escaso por aquellas regiones) se evaporara como consecuencia de las altas temperaturas que se alcanzaban. Pero siguiendo con los principales hitos de la historia de los túneles merece especial referencia el de la Isla de Samos, de un kilómetro de longitud y primero del que se tiene noticia del ingeniero que lo construyó, Eupalinos de Megara, hijo de Naustrofo. Esta obra construida hacia el 530 a.C., servía para el abastecimiento de agua a la capital de la isla. Estuvo en funcionamiento durante un milenio y fue considerada como una de las tres maravillas del Mundo Heleno.

También merece especial atención la época del Imperio Romano. Los romanos construyeron túneles con muy diversos propósitos: galerías mineras, túneles para abastecimiento de agua, para alcantarillado, para el drenaje de lagos volcánicos (emisario de Fucino con 5500 m de longitud), en las calzadas romanas (como el túnel de Pausilippo, cerca de Nápoles, con sus 1500 m de longitud), sin olvidar los túneles de propósito militar y las catacumbas.

En la Edad Media, los túneles pierden esa potencia como obras vigorosas de ingeniería civil y derivan en galerías y pasadizos en castillos y fortalezas, obras menores. Durante este período, la minería se robustece y consolida, fundamentalmente en Centroeuropa, surgiendo al filo del Renacimiento la obra maestra de la minería, *De Re Metallica* de Georgius Agrícola publicada en el S. XVI. Dicha obra recoge con minuciosidad en su texto y en sus grabados las prácticas y técnicas mineras, siendo un libro básico de consulta durante los dos siglos siguientes a su publicación.



Fig. 1. Grabado extraído de la obra de *De Re Metallica* del autor alemán Georgius Agrícola Ésta, sirvió de referencia como manual de consulta durante los S. XVI-XVII

El Renacimiento marca el resurgir del hombre así como el de los túneles tras el letargo de la época medieval. Leonardo da Vinci concibe niveles subterráneos en sus proyectos de ciudades y piensa en la posibilidad de perforar túneles allá donde los canales se encuentran con barreras montañosas.

El primer túnel del Renacimiento es la Mina de Daroca en la provincia de Teruel. Cuenta con 600 m de longitud, 6 m de anchura y una altura variable entre los 7 y 8 m. Fue construido entre 1555 y 1570 por Pierres Bedel para reconducir y desviar las aguas torrenciales que venían castigando la villa aragonesa.



Fig. 2. Imágenes de la antigua Mina de Daroca

Pero es en el siglo XVIII cuando surge la Era de los Canales y dentro de ella los túneles comienzan a adquirir peso propio: el túnel de Malpas, cerca de Bezieres en el Canal de Midi para la unión de los dos mares (Atlántico y Mediterráneo), obra portentosa que impulsa Colbert bajo el reinado del Rey Sol (Luis XIV) es el primer túnel para canal. Este túnel, de 155 m de longitud, 6,5 m de altura y 8 de anchura, fue perforado por Pierre-Paul Riquet, empleando la pólvora por primera vez. Así comienza la Era de los túneles para canales: tras él muchos túneles se construirán en las siguientes décadas destacando los túneles ingleses para canal, muchos de ellos obra de ese prodigioso ingeniero que se llamó James Brindley.

La experiencia adquirida con la construcción de túneles para canal resultaría valiosísima en el período siguiente, ya superado en el corazón de Europa el umbral de la Revolución Industrial, la Era de los Ferrocarriles.

En la historia de los Ferrocarriles, que se desarrolla a partir del siglo XIX, los túneles tuvieron gran auge; en la historia de los túneles de ferrocarril se agolpan grandes hazañas en una denonada lucha del hombre por dominar el arte de perforar la tierra; incorporando progresivamente maquinaria y procedimientos constructivos a partir de los cuales el esfuerzo manual va cediendo en pro de una incipiente mecanización. En el siglo XVI existía ya el transporte por carriles cuya infraestructura estaba construida de madera y se utilizaba para mover por ella vagones en las minas. Los avances técnicos del siglo XIX, que surgen gracias a la Revolución Industrial hacen que aparezcan los ferrocarriles. En 1803 se abrió el primer ferrocarril tirado por caballos del mundo en Surrey, Inglaterra. Así, los raíles de hierro se extendieron al

transporte de mercancías y viajeros. Con las primeras locomotoras de vapor el desarrollo del tren estaba decidido. En 1825 se inauguró el primer tren traccionado por una locomotora de vapor creada por Stephenson.

El primer túnel de ferrocarril fue el de Terre-Noir en Francia, de la línea Roanne-Andrezieux, camino de carriles traccionado por caballos, construido por caballos, construido en 1826, con 1476 m de longitud, 5 m de altura y cerca de 3m de anchura.

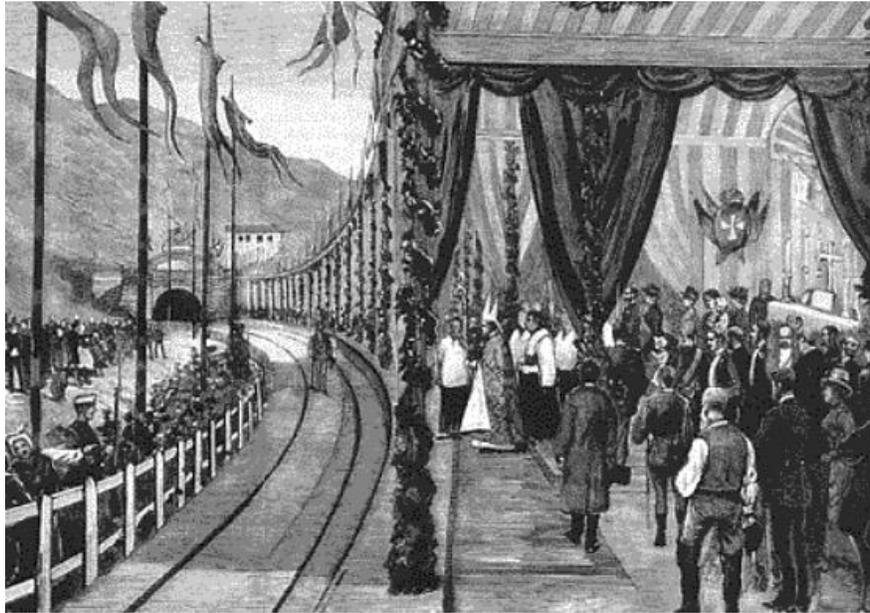


Fig. 3. Imagen correspondiente a la bendición de los raíles de la vía del túnel de Perruca en León (1884)

Los ferrocarriles de vapor, que comenzaron en Gran Bretaña, se multiplicaron de forma importante entre los años 1830 y 1845. El ferrocarril de Liverpool a Manchester, obra de Isambard Kingdom Brunel fue el primero; dicha línea atravesaba la montaña por dos túneles, uno de 4.8 km y otro de 1.6 km.

Durante esta período también tiene lugar la gesta de la perforación del primer túnel bajo el Támesis entre Rotherhithe y Wapping, el primero que se construye en terreno blando y con enorme presencia de agua y en el que por primera vez se aplica la técnica del escudo que patentase Marc Brunel. Cuando la Reina Victoria inaugura el túnel en marzo de 1843 han transcurrido casi veinte años de brutal lucha contra las inundaciones del Támesis (en cinco ocasiones), contra la quiebra financiera, contra ese gran agujero del que casi todos recelaban pero que los Brunel superaron enfrentándose a todas las dificultades con arrojo y valentía sin límites.

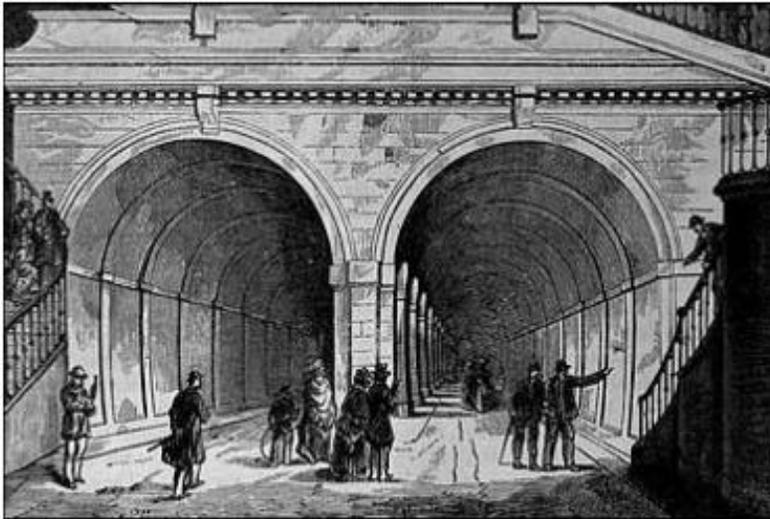


Fig. 4. A la izquierda una imagen de época del túnel construido bajo las aguas del río Támesis y a la derecha otra del escudo utilizado y patentado por Brunel para este mismo proyecto (1843)

En un principio, la construcción de un ferrocarril era considerada como empresa de colosos, pero conforme los progresos se iban consolidando, los ferrocarriles se construían con relativa facilidad y economía, desarrollándose en todo el mundo como un gran modo de transporte terrestre. Ello llevó a una revolución en el transporte en todo el mundo y a un cambio trascendental en el estilo de vida.

Ya en la segunda mitad del siglo XIX se produce un avance impresionante con la construcción de los grandes túneles alpinos de ferrocarril. Los nombres de Mont Cenis, San Gotardo y Simplón constituyen la triada en la titánica lucha por perforar los Alpes y que marca el punto de mayor tensión en la historia de los túneles: baste recordar que la longitud respectiva de estas galerías es de 12.6 km, 15.2 km y 19.7 km. Los medios disponibles eran todavía modestos, si bien la incorporación de máquinas taladradoras accionadas por aire comprimido, obra de Sommeiller, marca un salto cualitativo en los rendimientos alcanzados.

En aquellas décadas la temeridad y audacia de los ingenieros no tenía límites y tal vez por ello ninguno de los que emprendieron los tres grandes túneles alpinos de ferrocarril pudieron ver su obra terminada. Probablemente, en ocasiones, también a causa de una ambición desmedida, las condiciones de trabajo resultaban inhumanas, destacando la negra historia de Louis Favre y el túnel de San Gotardo. El compromiso de un plazo de ejecución imposible de cumplir con duras penalizaciones por cada día de retraso condujo a Favre primero a la ruina, luego a la muerte y a sus trabajadores a unas condiciones laborales y sanitarias infernales, estimándose en cerca de doscientos el número de muertos durante las obras; un precio muy elevado.

También en Estados Unidos se van imponiendo los túneles en la segunda parte del siglo XIX. Cabe recordar dos túneles bajo el río de Chicago abiertos en 1869 y 1871, que sirvieron como la única vía de escape para los habitantes de la ciudad durante el

feroz incendio que redujo la ciudad a cenizas en octubre de 1871, sólo cuatro meses después de inaugurarse el túnel de la calle La Salle.

El túnel Hoosac marca también sin duda un hito a nivel de avances tecnológicos, como el de la utilización por primera vez de la nitroglicerina en este tipo de obras, y el túnel de Saint Clair construido a finales del XIX bajo el río que le da nombre entre EE.UU y Canadá mediante un escudo de 6.45 m de diámetro.

Como hemos visto el resurgimiento de los túneles como consecuencia de la Revolución Industrial, la máquina de vapor y los ferrocarriles marcó un hito importante en el diseño y construcción de los mismos. Los siguientes avances fueron debidos a diversas causas. Así, la electricidad y la potencia eléctrica propició la aparición de los ferrocarriles subterráneos, el metro. Por otra parte, las centrales de energía dieron lugar a los túneles para enfriamiento de agua y para conducción de cables. La máquina de combustión interna, no sólo extendió la potencia de la ingeniería sino que dio lugar al motor de explosión, lo que condujo al desarrollo de las carreteras y por tanto a la demanda de un número creciente de túneles para vehículos a motor, no sólo perforados bajo montañas sino también bajo colinas menores o incluso bajo los cauces de los ríos.

Son innumerables los túneles construidos desde entonces hasta la actualidad, así como las mejoras en las técnicas y elementos constructivos que poco a poco han alcanzado un grado de eficacia inimaginable. Debido precisamente a esta evolución vale la pena hacer un alto en el camino y revisar los distintos métodos nacionales de construcción de túneles que fueron surgiendo desde la Era de los Canales y los Ferrocarriles hasta la actualidad y que, aún, hoy día se utilizan en algunos casos concretos en los que el terreno no da otra opción.

Fundamentalmente han de considerarse los sistemas inglés, belga, alemán y austriaco. Con posterioridad se introduciría el Nuevo Método Austriaco, con una inmensa proyección y aplicación de forma diversificada.

A continuación revisaremos de forma esquemática los diversos métodos y que se centran principalmente en las diferentes secuencias de excavación.

**El Método Inglés:** recibe su nombre por haber sido aplicado en túneles a través del tipo de terreno que usualmente se localiza en Inglaterra, como son las arcillas y areniscas. Siguiendo el ejemplo establecido en la construcción del primer túnel bajo el Támesis, su principal característica es proceder el avance de la perforación a sección completa del túnel, en una sola operación.

**El Método Belga:** se basa en los principios que permitieron la construcción, en 1828 del túnel de Charleroi en el Canal que enlaza Bruselas y Charleroi.

**El Método Alemán:** este sistema fue utilizado por primera vez en 1803 para construir el túnel en el Canal de San Quintín, y desarrollado por Wiebeking en 1814, siguiendo

el sistema de núcleo central, también empleado en la construcción de las amplias bóvedas de cerveza de Baviera.

**El Método Alemán Modificado:** se aplica en el caso en que durante la operación de perforación del túnel, a través de un terreno bastante firme, surja la aparición de agua, lo que origina una alteración en el Método Clásico Alemán en cuanto a las etapas sucesivas de ataque del frente.

**El Método Austriaco (NAMT):** los austriacos desarrollaron un plan de trabajo basado en la utilización de puntales de madera formando un sistema de entibación, procedimiento aplicado en las minas de Friburgo y que fue aplicado por primera vez por Meisner en la construcción del túnel de Oberau, en el ferrocarril entre Leipzig y Dresden, en Sajonia en el año 1837. En 1839 Keissler lo empleó en el túnel de Gumpoldskirch, cerca de Viena-Neustadt.

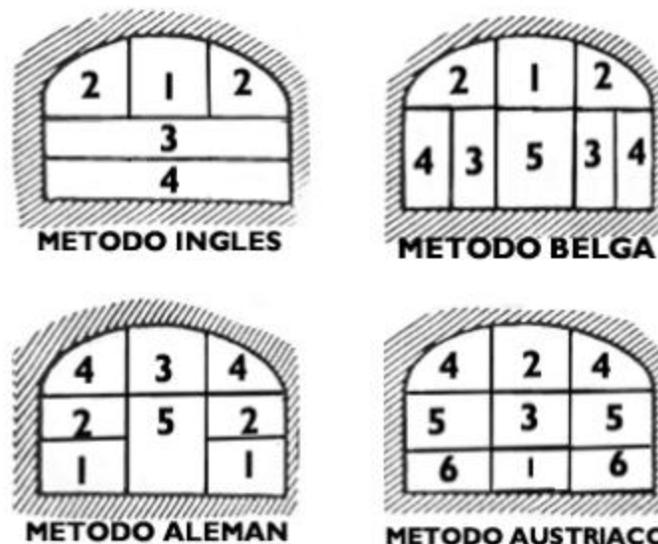


Fig. 5. Esquema de los diferentes métodos constructivos nacionales

Llegados a este punto, consideramos adecuado hacer un pequeño resumen sobre los principales factores que han intervenido en el progreso de la ingeniería de túneles:

La ingeniería de túneles ha progresado de forma muy significativa durante el siglo XX y lo que llevamos de XXI. Entre los principales factores que han contribuido decisivamente a este avance se encuentran los siguientes:

- En relación con la excavación, las mejoras en las técnicas de voladura, tanto en la fase de barrenado como en los tipos de explosivos, el uso cada vez más eficiente de la energía, sea eléctrica o por aire comprimido; así como la introducción de nuevos equipamientos y maquinaria, dependiendo de las características del terreno (tema del que nos ocuparemos más en profundidad

en los siguientes puntos), como son las máquinas tuneladoras (TBM), las rozadoras o tuneladoras de ataque puntual, escudos, etc ha sido determinante.

- En relación con el sostenimiento, los avances en materia de revestimientos, principalmente en hormigón y acero moldeado, en mejora del terreno mediante inyecciones a presión así como el perfeccionamiento de máquinas tuneladoras a sección completa.
- En relación con las características del entorno de trabajo, cabe resaltar las notables mejoras en sistemas de ventilación e iluminación, un control más eficaz del agua subterránea mediante equipos de bombeo o a través de sobrepresión ambiental.
- En relación con los métodos de diseño y construcción de entre los diversos métodos que anteriormente se apuntaron, cabe destacar el Nuevo Método Austriaco de construcción de Túneles (NATM).

## ACTUALES TÚNELES EN OPERACIÓN EN CHILE

El espíritu innato del excavador está muy dentro de la mentalidad nacional, kilómetros y kilómetros de túnel se han labrado en la explotación de yacimientos, incluso bajo el océano, como es el caso del carbón.

NOMBRE TUNEL	RUTA	KM.	REGION PROVINCIA	LONG. M.	AÑO P.S.
ANGOSTURA*	5 S.	56	RM – VI MAIPO-CACHAPOAL	347	1948
CARACOLES	60 CH	207	V LOS ANDES	1.460	1910
CURVO	D - 37 E		IV	212	1910 aprox.
CHACABUCO*	57 CH	59	RM – V CHACABUCO-LOS ANDES	2.045	1972
DEL CRISTO REDENTOR	60 CH	207	V LOS ANDES	1564 S. CH. 1516 S. AR.	1980
EL MELON*	5 N.	130	V PETORCA- QUILLOTA	2.543	1995
EL FARELLON	245	12	XI AYSEN	240	1988
JARDIN BOTANICO O.	60 CH	8	V	245	1996
JARDIN BOTANICO P.	60 CH	8	V	245	1996
LA CALAVERA*	5 N.	90	V SAN FELIPE	298	1950
LA GRUPA	E – 35	32	V PETORCA	1.277	1910

NOMBRE TUNEL	RUTA	KM.	REGION PROVINCIA	LONG. M.	AÑO P.S.
LAS ASTAS	D – 37 E		IV	787	1910 aprox.
LAS PALMAS	E – 37 D	20	IV PETORCA- COQUIMBO	980	1910 aprox.
LAS RAICES	R – 953	95	IX MALLECO	4.528	1939
LO PRADO*	68	24	RM STGO. MELIPILLA	2.800	1970
PEDRO GALLEGUILLOS	1	209	II TOCOPILLA	793	1994
PUCLARO	41 – CH	45	IV	370	1997
RECTO	D – 37 –E		IV	142	1910 aprox.
ZAPATA*	68	56	RM – V MELIPILLA- VALPO.	1.215	1955

**LONGITUD TOTAL 22.091 M.**

## Otros Túneles

Existen diversos tipos de túneles que no son ferroviarios ni carreteros que se han construido y es bueno conocer como los túneles para la conducción de agua que hay hoy en día en Norteamérica que conducen agua desde los grandes lagos, o de los grandes ríos hasta las ciudades: al sur de California se construyó un acueducto de 370 Km. de longitud que conducía el agua del río Colorado a varias ciudades, se excavaron 29 túneles (148 Km.) de los cuales los más largos fueron el de East Coachello (29 Km.) y el de San Jacinto (21 Km.). El túnel que lleva agua a la ciudad de Nueva York desde el Delaware, con 137 Km., es considerado el más largo del mundo.

No podemos olvidar las centrales hidroeléctricas, con sus redes de túneles que conducen el agua, las grandes cavernas donde se instalan las turbinas y los túneles de acceso a las instalaciones. Incluso ya no es necesario construir grandes presas, sino que se construyen centrales subterráneas que se abastecen del agua de lagos de montaña, aguas conducidas por largos túneles, con el consiguiente ahorro de hormigón y de acero, como la de Montpezat (Francia) con más de 20 Km. de galerías subterráneas.

Como sistemas de alcantarillado ya Londres había construido el primer proyecto para una gran ciudad en 1865; hubo que construir numerosos túneles para conseguir transportar el agua sucia al Támesis a casi 20 Km. aguas abajo. Pero las demandas de una población e industria creciente hacen necesario un mejoramiento continuo.

Aunque ya desde la antigüedad se construían aljibes para el almacenamiento de las aguas pluviales, se construyen en la actualidad depósitos subterráneos con una finalidad que es la de recoger las aguas pluviales y residuales que desbordan las redes de alcantarillado y las depuradoras durante las tormentas de cierta intensidad; de esta manera pueden ser tratadas posteriormente, evitándose los vertidos directos sin tratamiento. Este problema lo padece la ciudad de Barcelona que actualmente proyecta construir embalses subterráneos para recoger el agua de las lluvias torrenciales y así poder depurarlas después de la tormenta, evitando los vertidos directos al mar que afectan gravemente a las playas, sobre todo en época veraniega.

Se han construido numerosos túneles para el paso de cables y tuberías, e incluso algunos antiguos túneles ferroviarios, sobre todo bajo ríos, se siguen utilizando en la actualidad para llevar este tipo de servicios.

También se excavan grandes túneles para almacenamiento de petróleo y otras sustancias, o como refugio y defensa; y últimamente para el estacionamiento subterráneo de vehículos. Las aplicaciones de la solución túnel no cesan.

## **Túneles de carretera**

También los túneles para carreteras pueden ser, al igual que para el ferrocarril, cortos y largos; su definición en planta también tiende a ser en recta por ser el camino más corto y por lo tanto el más económico, aunque al igual que para el ferrocarril se construyen en curva si las condiciones del terreno a atravesar lo recomiendan o por otras causas. Las curvas pueden ser más cerradas (son normales radios de 400 m).

El perfil longitudinal sigue las mismas pautas que los anteriores en cuanto a las condiciones necesarias para la evacuación de las aguas por gravedad, tanto durante su construcción como posteriormente y siempre que sea posible. La diferencia más importante, comparándolos con los de ferrocarril es en la pendiente permitida: son pendientes normales las de 35 y 45 milésimas, e incluso se pueden utilizar en un tramo corto rampas de 65 milésimas, como en el caso de túneles subacuáticos en los que duplicando la pendiente se consigue reducir a la mitad la longitud del descenso hasta el nivel obligado.

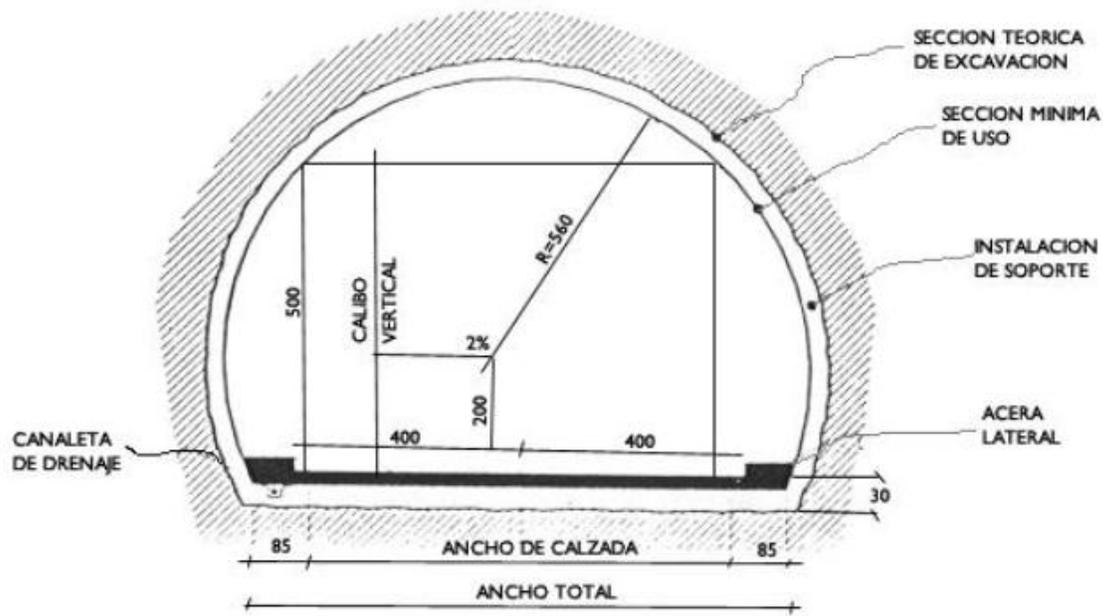


Fig.

2.05 Sección transversal de un túnel de carretera

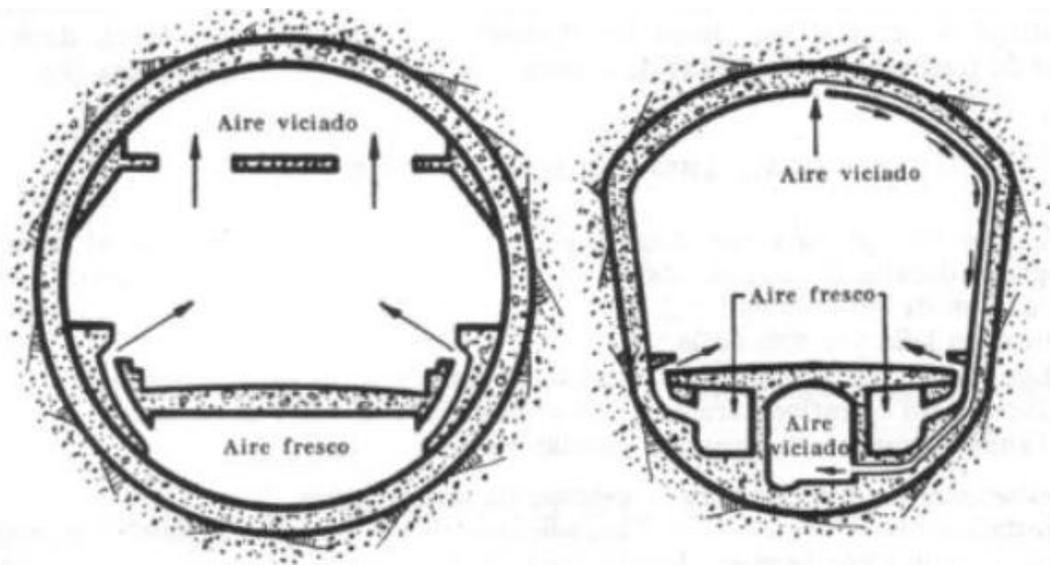
La sección tipo de los túneles de carreteras es un poco mayor que la del ferrocarril de vía doble. El ancho para dos carriles ronda los 9 m, y la altura libre es alrededor de los 5 m. Lo normal es que se construyan túneles de dos carriles únicamente ya que en todos los túneles el aumento del ancho repercute de manera desproporcionada en el costo, al tenerse no sólo que excavar un mayor volumen sino también aumentar el espesor del revestimiento. Por ello es preferible excavar dos túneles paralelos con dos carriles cada uno cuando las necesidades sean de cuatro vías (dos para cada sentido). Un túnel excepcional en lo que se refiere a la anchura es el de Saint-Cloud en la autopista del Oeste a la salida de París que dispone de cinco vías de circulación.



Fig.

2.06 Túnel de carretera de Saint-Cloud

En cuanto al equipamiento del túnel es necesaria una iluminación que debe ser potente en la entrada, sobre todo de día, y disminuir progresivamente hacia el interior cuando ya el ojo humano se ha adaptado al cambio de luminosidad exterior-interior. La ventilación debe prever hasta las situaciones de emergencia, como colapsos de tránsito e incendios. El proyecto de ventilación tiene gran influencia en el proyecto y la construcción del túnel, pues el paso de los conductos de aire ocasiona problemas de espacio, y los futuros pozos de ventilación del túnel se pueden utilizar durante la construcción para multiplicar los frentes de excavación del túnel y también como ventilación.



*Fig. 2.07 Ventilación del Holland-Tunnel y del Mont Blanc*

En algunos túneles de carreteras se permite el paso de peatones y ciclistas, con el inconveniente de que además del aumento de las dimensiones del túnel y su repercusión en el costo, los ciclistas retrasan el flujo total del tráfico y tanto ellos como los peatones requieren unas normas más altas de ventilación, ya que permanecen durante más tiempo en el interior del túnel y además realizan ejercicio. Es por todo ello que se construyen túneles aparte, para peatones y ciclistas, en aquellos países en los que es importante el transporte en bicicleta, o incluso por debajo de la plataforma de la carretera en cortos túneles subacuáticos de algunas ciudades. Estos túneles tienen unas restricciones mínimas, tanto de espacio como de pendientes.

## **Clasificación de túneles**

### **Según Ubicación**

Los túneles, según su ubicación en relación a las ciudades, pueden ser definidos como:

#### **Rurales**

Son túneles ubicados fuera del entorno urbano y que, en general, están destinados a atravesar obstáculos físicos tales como montañas o cuerpos de agua que resultan difíciles o inconvenientes de cruzar mediante puentes.

Los túneles rurales habitualmente tienen pocas restricciones espaciales. Por otra parte, en ellos suele ser más costoso el abastecimiento de agua y electricidad para la operación de los sistemas de incendio, iluminación, ventilación, controles y comunicaciones que puedan requerirse. En general, estos túneles son excavados en roca y suelos residuales (cruce de montañas) o suelos sedimentarios (cruce de ríos y otros).

#### **Urbanos**

Son túneles emplazados dentro de los límites de la ciudad y están fuertemente constreñidos espacialmente por las redes de servicios propios de las urbes modernas, como ser: redes de alcantarillado, redes de trenes subterráneos, redes de agua potable, redes de gas, redes de alimentación, eléctrica, teléfonos, fibra óptica, etc.

Los túneles urbanos son frecuentemente del tipo trinchera cubierta y excavados en suelos sedimentarios.

En los túneles urbanos los problemas de ventilación resultan, a veces, dificultados por el hecho de que no siempre se puede expulsar libremente el aire viciado proveniente del interior del túnel, debido a restricciones de carácter ambiental.

### **Según Características Constructivas**

Los túneles según sus características estructurales y de construcción pueden ser definidos como:

Túneles en roca (Normalmente a través de una montaña)

Túneles en suelo (Normalmente urbanos)

Túneles falsos (Construidos en hormigón armado y luego tapados con suelo. Generalmente se construyen antes de la entrada a los túneles en roca, para proteger a los vehículos de la caída de rocas).

Trincheras cubiertas (Estructuras de hormigón armado de sección rectangular, construidas en suelo y luego tapadas. Generalmente son urbanas)

Cobertizos (Estructuras de hormigón armado de sección rectangular construidos en zonas montañosas para proteger a los vehículos de las avalanchas de nieve. Estas estructuras generalmente son abiertas en uno de sus costados)

### **Según Clima y Altitud**

Resulta de especial importancia la ubicación geográfica (fundamentalmente altitud) en donde se ubique la obra y el clima del sector.

Toda obra localizada en altura considerable y en un clima lluvioso o sectores con filtraciones mayores, requerirá el diseño especial de canaletas conductoras – evacuadoras de aguas, las cuales deberán ser calculadas, dimensionadas y localizadas de manera que cumplan con el objetivo de mantener las pistas secas.

La ubicación geográfica determinará la posibilidad de congelamiento de aguas escurrientes o infiltradas a la obra para lo cual deberá procederse a neutralizar el fenómeno que provoque esta situación.

Hay dos fenómenos, particularmente peligrosos para los conductores, que se producen frecuentemente en túneles cordilleranos con exceso de agua, que deben evitarse a toda costa:

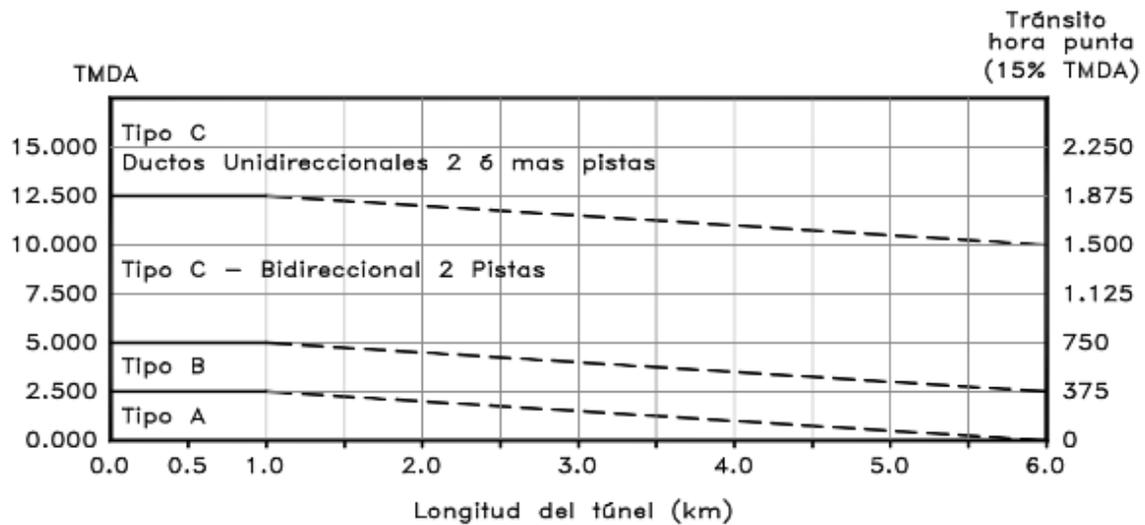
- Pavimentos con una película superficial de agua congelada, que se tornan muy resbalosos.
- Empañamiento repentino del parabrisas al ingresar un vehículo a baja temperatura a un túnel lleno de aire saturado y a mayor temperatura que el vehículo.

Para evitar estos fenómenos se deberá considerar en el proyecto la colocación de láminas térmicas, por ejemplo CARFOAM, las cuales evitan la generación de goteos y su posterior congelación de arriba hacia abajo (estalactitas) o de abajo hacia arriba (estalacmitas).

### **Según Equipamiento, según Flujo Vehicular y Longitud**

La Figura A. ilustra una clasificación de los Túneles en función del Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) y del Tránsito en Hora Punta asociado a dicho TMDA, versus la longitud del ducto; según ello se clasifican las obras en cuatro categorías, para las que en la Tabla B se indica el tipo de Equipamiento de Seguridad y Control con que debería contar el Túnel. El TMDA se debe considerar al horizonte de diseño de la obra y el Tránsito en Hora Punta como el de la Hora 30 a dicho horizonte.

FIGURA A



Las líneas punteadas de la figura corresponden a la frontera para la cual a un mismo TMDA, túneles de mayor longitud pasan a la categoría superior en cuanto a equipamiento deseable.

Se establece además que según sea la longitud del Túnel, cuando el tránsito de la hora punta es del orden de 1500 a 1900 Veh/h, se deben diseñar ductos unidireccionales de 2 pistas cada uno; pudiendo inicialmente construirse un ducto bidireccional, para luego construir el segundo ducto quedando ambos unidireccionales.

Debe tenerse presente que para los TMDA indicados entre un 20 y 40% son camiones y buses, según el camino de que se trate. En hora punta estos porcentajes suelen bajar a valores comprendidos en el rango de 7 a 18%.

El volumen de 12.500 Veh/día, para un túnel corto, que requeriría Ductos Unidireccionales corresponde al porcentaje menor de camiones y buses. Consecuentemente, para el límite superior de vehículos comerciales la línea divisoria entre túnel bidireccional y de ductos unidireccionales se desplazará hacia abajo, dependiendo entre otros factores de la pendiente longitudinal y del tipo de carretera de que se trate, es decir de la calidad del servicio que le corresponda.

La longitud de un túnel es fundamental en la determinación de las especificaciones de requerimientos de equipamiento, ya sea para implementación inmediata o a futura.

Debe tenerse presente que siempre es posible realizar el equipamiento de un túnel, en forma progresiva. Sin embargo, es necesario tomar las precauciones respectivas en el diseño de la sección básica y obras civiles, particularmente si se pretende habilitar sistemas de ventilación en etapas posteriores.

En todo caso, la clasificación apunta principalmente al tipo de equipamiento con que deberían contar los túneles y la decisión de construir uno o dos ductos deberá ser

tomada tras un estudio técnico económico que pondere adecuadamente todos los factores involucrados.

Un túnel de gran longitud pero de escaso tráfico puede considerar la postergación de cierta implementación, pero debe considerar en su diseño los espacios y/o condiciones específicas para estas implementaciones a futuro.

Según el tipo de túnel que corresponda de acuerdo a lo indicado, quedarán determinados los equipos de seguridad requeridos y/o recomendados en cada caso (Ver Tabla A).

TABLA A  
Equipamiento de Seguridad y Control en Túneles Mayores de 200 m.

Equipamiento	A	B	C	Observaciones
Luces de evacuación				
de emergencia	○	○	●	Luces cada 50 m.
Extintores de incendio	○	●	●	Cada 100 m Tipo C Cada 200 m Tipo B
Teléfono de emergencia	○	○	●	Cada 200 m.
Señales de servicios	●	●	●	En cada servicio.
Marcas en pavimentos				
Ojos de gato	●	●	●	Continuas.
Red de control de incendio	○	○	●	Diseñar ad hoc.
Vigilancia de TV.	○	○	●	Diseñar ad hoc.
Iluminación interior	○	●	●	Diseñar ad hoc.
Equipos eléctricos				
de emergencia	○	●	●	Diseñar ad hoc.
Control de altura	●	●	●	200 m antes de portales. Con pista auxiliar para detención fuera de la carretera.
●	Obligatorio			
○	Recomendable			

200 m antes de portales. Con pista auxiliar para detención fuera de la carretera. Las principales características de estos Sistemas de seguridad son las que se indican:

### **Luces de Evacuación de Emergencia**

Son luces usadas para indicar o mostrar el camino hacia las bocas de los túneles en caso de presencia de humo. Son equipos activados manual o automáticamente en caso de incendio. Debe tratarse de luz blanca que pueda verse a través del humo, instaladas en las paredes a 1 m sobre el pavimento y a lo menos cada 50 m una de otras, deben tener capacidad para permanecer a lo menos 1 hora encendidas.

### **Extintores de Incendio**

Debe tratarse de equipos puestos en nichos en las paredes del túnel dentro de cubículos iluminados con puerta de vidrio delgado fácil de romper en caso de requerimiento. Deben estar indicados con señalización adecuada, reflectante e iluminación interior.

A lo menos se considera un punto de ubicación cada 200 m. Teléfonos de Emergencia.

Estos teléfonos deben estar destacados, y deben funcionar de manera tal que emitan una señal al controlador con solo levantar el auricular no requiriendo discar ningún número.

Se deben instalar en nichos cubiertos con un semi techo. Su número debe ser uno cada 200 m de longitud de túnel.

### **Señales de Servicio**

Debe considerarse dentro del túnel la instalación destacada de señales camineras que indiquen la presencia de extintores de incendio, teléfono de emergencia, velocidad y otras condiciones especiales de la obra.

### **Marcas de Pavimento. Ojos de Gato**

Debe considerarse la instalación de este tipo de marcas reflectantes en el pavimento igual que su instalación en el camino exterior.

## CAPÍTULO III

### MÉTODO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

#### Sistema Tradicional

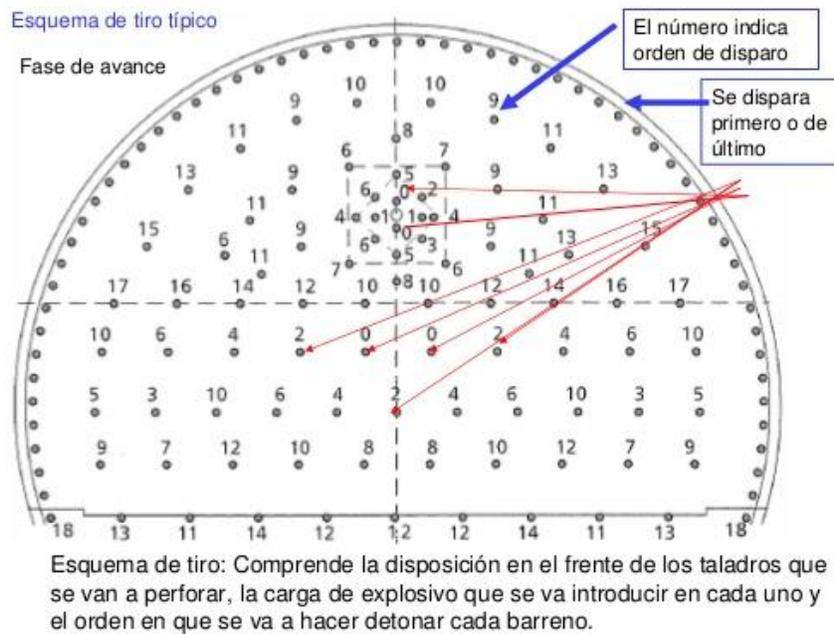
Los métodos de excavación de túneles mediante perforación y voladura dependen fundamentalmente en primer lugar, del tipo de terreno a atravesar.

De este modo cabe destacar por separado la excavación de túneles en roca y la excavación de túneles en suelos o terrenos blandos. En este estudio **nos centraremos siempre a la excavación en roca**, que es lo más común en los túneles de carretera.

Las partes o trabajos elementales de que consta el ciclo de trabajo característico de las excavaciones mediante perforación y voladura son las siguientes:

- Replanteo en el frente del esquema de tiro.
- Perforación de los taladros.
- Carga de los taladros con explosivo (barrenos).
- Voladura y ventilación.
- Retirada del escombro y saneo del frente, bóveda y hastiales.

El esquema de tiro es la disposición en el frente del túnel de los taladros que se van a perforar, la carga de explosivo que se va a introducir en cada uno y el orden en que se va a hacer detonar cada barreno, diseñándose al principio de la obra en base a la experiencia y a una serie de reglas empíricas recogidas en los manuales sobre explosivos. Posteriormente, a lo largo de la excavación del túnel, se va ajustando en función de los resultados obtenidos en cada voladura.



La voladura de la destroza con barrenos horizontales, tiene la ventaja de que se utiliza el mismo sistema de trabajo y maquinaria que la fase de avance, pudiendo recortarse con la voladura la forma teórica del túnel. Por otro lado, la voladura en banco es más rápida de llevarse a cabo, con un consumo menor de explosivo, y no necesita ser retirado el escombro en cada voladura, pero requiere de un recorte posterior para conseguir el perfil del túnel en los hastiales.

Los taladros deben de tener una longitud de un 5 a 10 % superior a la distancia que se quiera avanzar con la *pega*, llamada longitud de avance, ya que siempre se producen pérdidas que impiden aprovechar al máximo la longitud de los taladros.

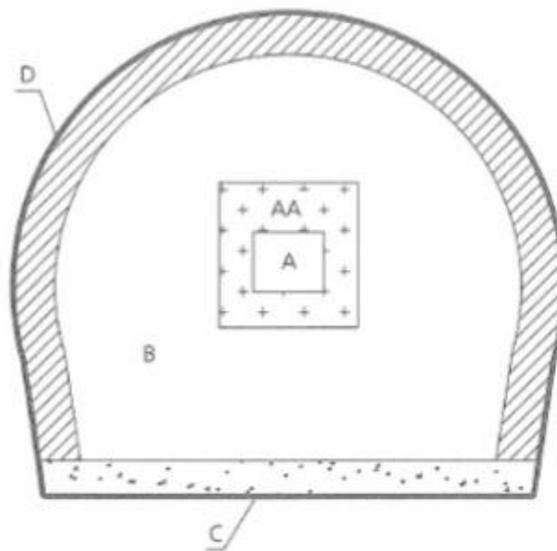
Las longitudes de avance típicas están comprendidas entre 1 y 4 metros y se fijan en función de la calidad de la roca, cuanto mejor es la calidad del terreno, mayores serán los avances posibles. Con una roca de calidad media-adecuada es habitual perforar taladros de 3 a 3,50 metros para avanzar entre 2,80 y 3,20 metros en cada voladura.

Para la perforación y voladura, la sección teórica del túnel se divide en zonas, en las que las exigencias, tanto de densidad de perforación, como de carga específica de explosivo y secuencia de encendido son distintas.

Las zonas en un esquema de tiro, tienen densidades de perforación y carga específica diferente. Estas zonas son:

- a.- Cuele (Zona A)
- b.- Contracuele (Zona AA)
- c.- Destroza (Zona B)
- d.- Zapateras (Zona C)
- e.- Contorno (Zona D)

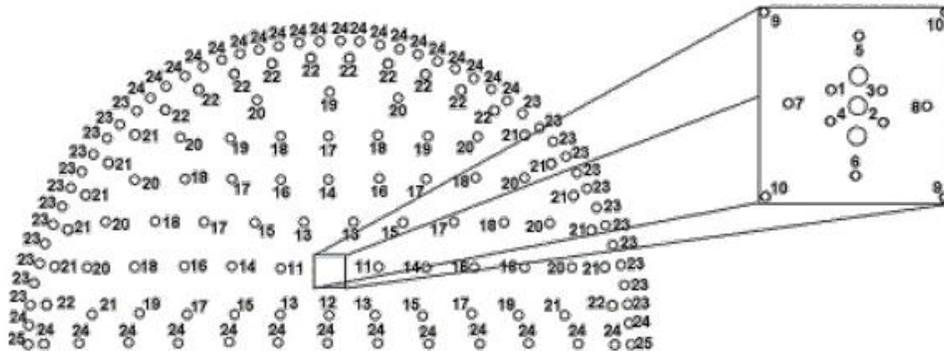
En la fig. se muestra la ubicación de estas zonas.



**Cuele:** El cuele es la fase de la voladura que dispara en primer lugar. Su finalidad es crear una primera abertura en la roca que ofrezca al resto de las fases una superficie libre hacia la que puede escapar la roca con lo cual se posibilita y facilita su arranque.

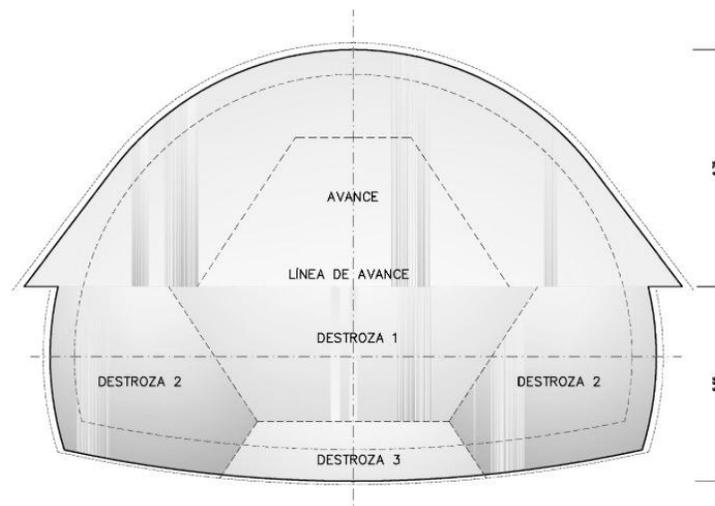
El cuele es sin duda la más importante de todas las fases de la voladura de un túnel en relación con el avance de la voladura.

Existen distintos tipos de cuele, los cueles en V y en abanico, que facilitan la salida de la roca hacia el exterior, pero tienen el inconveniente de que los taladros forman un ángulo con respecto al eje del túnel, por lo que su correcta perforación tiene una mayor dificultad y exige variar el esquema de perforación para cada longitud de avance. En túneles de secciones de excavación reducidas estos cueles no permiten grandes avances por voladura.



El cuele más usado por su simplicidad es el cuele paralelo. Consiste en un taladro vacío (barreno de expansión), sin explosivos, de mayor diámetro que el resto (de 75 a 102 mm) y, a su alrededor, tres o cuatro secciones de taladros cargados que explotan sucesivamente siguiendo una secuencia preestablecida. La misión del barreno de expansión es la de ofrecer una superficie libre que evite el confinamiento de la roca de modo que facilite su arranque. Su diámetro varía entre 100 y 300 milímetros. En ocasiones puede sustituirse por dos taladros vacíos de diámetro menor (2 x 75 mm).

**Destroza:** La destroza es la parte central y más amplia de la voladura, cuya eficacia depende fundamentalmente del éxito de la zona del cuele y contracuele, que es la zona crítica de la voladura.

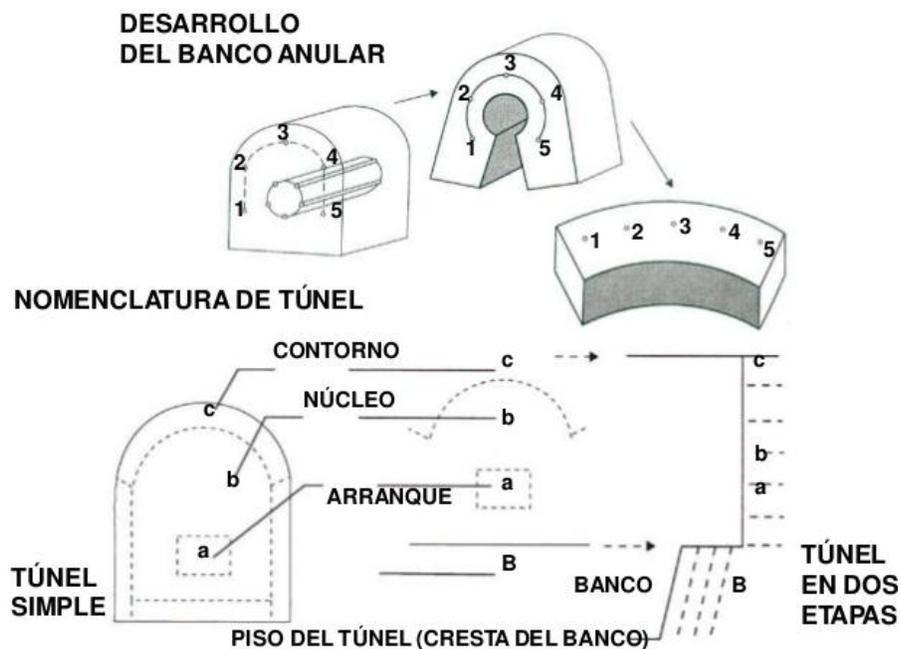


**Zapateras:** La zapatera es la zona de la voladura situada en la base del frente, a ras del suelo. Los taladros extremos suelen ir un poco abiertos "pinchados" hacia fuera

con objeto de dejar sitio suficiente para la perforación del siguiente avance. Los barrenos de las zapateras son los que más carga explosiva contienen ya que, aparte de romper la roca han de levantar ésta hacia arriba. Para evitar repiés, van ligeramente “pinchados” hacia abajo y son disparados en último lugar.



**Contorno:** Los taladros perimetrales o de contorno son importantes pues de ellos dependerá la forma perimetral de la excavación resultante. Lo ideal es que la forma real del perímetro del túnel sea lo más parecida posible a la teórica, aunque las irregularidades y discontinuidades de la roca dificultan dicho objetivo.



Existen dos técnicas de efectuar los tiros perimetrales: el recorte y el precorte. El recorte, que es la técnica más empleada, consiste en perforar un número importante de taladros paralelos al eje del túnel en el contorno, a la distancia conveniente (entre 45 cm y 100 cm) y con una concentración de explosivo pequeña o incluso nula. En la secuencia de encendido son los últimos barrenos en detonar. Por otro lado, la técnica del precorte se perfora un mayor número de taladros perimetrales y paralelos entre sí unas distancias entre 25 cm y 50 cm, con una concentración de carga explosiva entre 0,1 y 0,3 kg/m. Esta técnica exige una perforación muy precisa que asegure un buen paralelismo y una homogénea separación entre los taladros. En la secuencia de encendido, son los primeros en detonar, con lo que se crea una fisura perimetral que aísla y protege la roca de las vibraciones del resto de la voladura. La técnica del precorte, por su esmerada ejecución y costo elevado, es de uso poco frecuente en túneles, excepto en casos muy especiales.

### **Maquinaria de perforación**

La perforación de los taladros se puede hacer por dos procedimientos: el primero es mediante el uso de martillos manuales accionados por aire comprimido, y el segundo es mediante martillos hidráulicos montados sobre una maquina automóvil denominada jumbo.

**Martillos manuales:** Los martillos manuales de aire comprimido funcionan a percusión, es decir, la barrena golpea contra la roca y gira de forma discontinua entre cada percusión, separándose del fondo del taladro. El detritus es arrastrado hasta el exterior del taladro mediante agua, que tiene también la finalidad de refrigerar la barrena. Los martillos manuales son actualmente de uso poco frecuente, sólo se usan, obviamente, en túneles muy pequeños o de forma accidental, pues tienen rendimientos muy inferiores a los jumbos y requieren mucha mano de obra.



**Jumbos:** La máquina habitual de perforación es el jumbo, como se muestra en la imagen que incluimos más abajo. Consta de una carrocería de automóvil dotada de dos o tres brazos articulados, según los modelos. En cada brazo puede montarse un martillo de perforación (perforadora) o una cesta donde pueden alojarse uno o dos operarios y que permite el acceso a cualquier parte del frente. El funcionamiento de los jumbos es eléctrico cuando están estacionados en situación de trabajo y pueden disponer también de un motor Diesel para el desplazamiento. Los martillos funcionan a rotopercusión, es decir, la barrena gira continuamente ejerciendo simultáneamente un impacto sobre el fondo del taladro. El accionamiento es hidráulico, con lo que se consiguen potencias mucho más elevadas que con el sistema neumático. El arrastre del detritus y la refrigeración se consiguen igualmente con agua.

Los rendimientos de perforación que se consiguen en los jumbos hidráulicos modernos, pueden superar los 3,5 m/min de velocidad instantánea de perforación. Los jumbos actuales tienen sistemas electrónicos para controlar la dirección de los taladros, el impacto y la velocidad de rotación de los martillos e incluso pueden memorizar el esquema de tiro y perforar todos los taladros automáticamente. En este caso un único maquinista puede perforar una pega completa en unas pocas horas.



**Accesorios de perforación:** Los accesorios de perforación comúnmente usados son las varillas o barrenas y las bocas de perforación. Además se emplean manguitos y otros adaptadores para el ensamblaje de las piezas. Las barrenas de perforación son

simplemente barras de acero con un conducto interior para el paso del agua de refrigeración y unas roscas en los extremos donde se acoplan las bocas o los manguitos. La boca de perforación es la herramienta de corte, que generalmente es de metal endurecido (carburo de tungsteno) o widia, dispuesto en formas diversas: en cruz, en X o botones, con unos diámetros habitualmente comprendidos entre 45 y 102 milímetros.

La elección de un tipo u otro de boca, así como de sus diámetros, depende del tipo de maquinaria de perforación, de las características de la roca y del diámetro de los cartuchos del explosivo a introducir. Generalmente las bocas de botones son las que proporcionan un mayor rendimiento, al golpear la roca de forma más homogénea y ser más fácil la evacuación del detritus de roca. Para tal fin se pueden disponer varias entradas de agua frontales y también laterales. Para la elección del material de perforación y sus accesorios se recomienda el uso de los manuales especializados facilitados por los fabricantes.



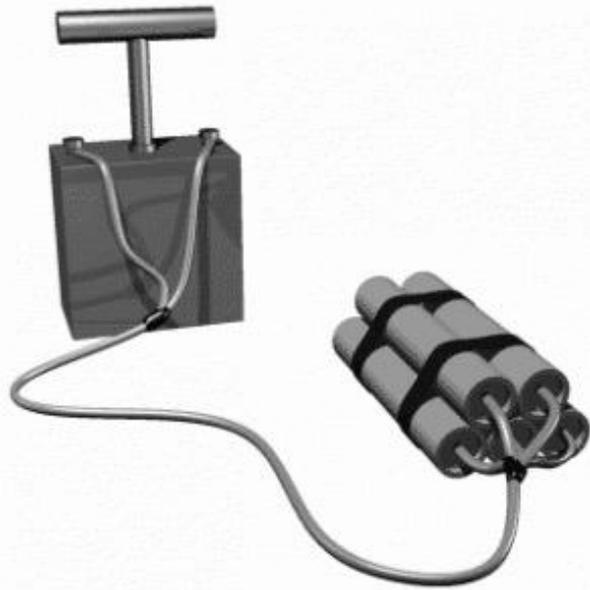
### **Explosivos y detonadores**

Los tipos de explosivo que deben utilizarse en túneles dependen de las características de la roca, principalmente de su densidad, resistencia a compresión y velocidad de propagación sónica de la roca. Además los explosivos, durante la detonación, deben generar gases no tóxicos, lo que limita el tipo de explosivos en interior. El tipo de explosivo también depende del grado de humedad existente en la roca.

El explosivo más utilizado para el cuele y contracuele, destroza y zapateras, es la GOMA-2 E-C o RIOMEX E20/40. El diámetro de los cartuchos deberá ser lo más próximo al diámetro de perforación de los taladros, compatible con su introducción dentro del barreno. La iniciación de la explosión en cada barreno se realiza en el cartucho cebo instalado en el fondo del barreno y que contiene un detonador.

La activación de los detonadores puede ser eléctrica o por impacto; en el primer caso se utilizan detonadores eléctricos. Por razones de seguridad, contra corrientes

parásitas, se utilizan exclusivamente detonadores de alta insensibilidad (AI). Una mayor seguridad ofrecen los detonadores de iniciación no eléctrica, tipo Nonel, cuyo uso sería especialmente aconsejable. Atendiendo a los tiempos de retardo, los detonadores pueden ser: instantáneos, de microretardo (retardo de 25 ó 30 msec), o de retardo (retardo de 0,5 seg).



El resto de los elementos que se utilizan para la voladura son los siguientes:

**Cañas:** Son tubos de PVC (tubos omega) abiertos longitudinalmente en cuyo interior se colocan los explosivos, cordón detonante, etc. Permiten introducir fácilmente todos los elementos en su disposición correcta dentro del taladro.

**Retacador:** El retacador es el material que cierra o tapona el taladro y de este modo impide que la energía debida a la explosión se escape por la boca del mismo. Normalmente se usan unos cartuchos de arcilla muy plástica.

**Explosor:** Es el mecanismo que produce la corriente eléctrica que da lugar a la explosión. Suelen estar basados en un condensador que se va cargando con una manivela o una batería y que cierra el circuito manual o automáticamente.

**Cables:** Los cables eléctricos que transmiten la corriente desde el explosor hasta los detonadores son los usados habitualmente en trabajos eléctricos.

### **Control de la vibraciones**

Las vibraciones producidas por las voladuras se transmiten por el terreno y pueden llegar a producir daños en edificios y estructuras próximas al túnel así como a la roca

circundante y al revestimiento. Por este motivo tiene interés el estudio de la ley que rige la propagación de las ondas sísmicas y los valores máximos de vibración admisibles en cada proyecto.

El factor principal que provoca los daños es la Velocidad Pico de Partícula, que se define como la velocidad máxima que alcanzan las partículas del terreno al vibrar por acción de la onda sísmica.



## MÉTODO DE PERFORACIÓN MEDIANTE TUNELADORAS

Una **tuneladora**, **T.B.M.** (del inglés *Tunnel Boring Machine*) o minador a sección completa es una máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de la fortificación para la sustentación del túnel si esta es necesaria, ya sea en forma provisional o definitiva.

La excavación se realiza normalmente mediante una cabeza giratoria equipada con elementos de corte y accionada por motores hidráulicos (alimentados a su vez por motores eléctricos, dado que la alimentación general de la máquina se realiza con energía eléctrica), aun cuando también existen tuneladoras menos mecanizadas sin cabeza giratoria. El empuje necesario para adelantar se consigue mediante un sistema de gatos perimetrales que se apoyan en el último anillo de sostenimiento colocado o en zapatas móviles (denominadas *grippers*), accionados también por gatos que las empujan contra la pared del túnel, de forma que se consigue un punto fijo desde donde empujan.

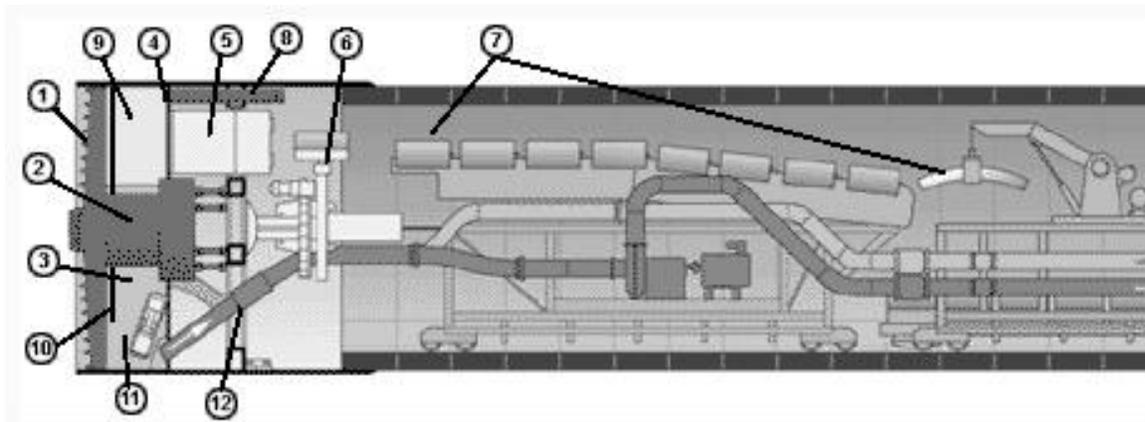
Detrás de los equipos de excavación y avance se sitúa el denominado "equipo de rezaga" de la tuneladora (o en denominación inglesa *back up*), constituido por una serie de plataformas arrastradas por la propia máquina y que, a menudo, ruedan sobre rieles que la misma tuneladora coloca, donde se alojan todos los equipos transformadores, de ventilación, depósitos de mortero y el sistema de evacuación del material excavado.

**Los rendimientos conseguidos con tuneladoras de cabeza giratoria son elevadísimos si se comparan con otros métodos de excavación de túneles, pero su uso no es rentable hasta una longitud mínima de túnel a excavar: hace falta amortizar el precio de la máquina y calcular el tiempo que se tarda en diseñarla,**



como hidroescudo, escudo con control de presión de tierra EPB, aire comprimido o escudo abierto. Hoy por hoy, es el tipo de escudo más utilizado en la construcción de túneles en ciudades para líneas de metro, ferrocarril, carreteras, etc. El sostenimiento del frente mediante fluidos es el método de operación más frecuente. Como medio de soporte y de transporte se utiliza una suspensión de bentonita. La mezcla agua/tierra/bentonita se trata en una planta separadora y La suspensión recuperada, se vuelve a introducir en el circuito.

**Esquema básico de un Mixshield:**



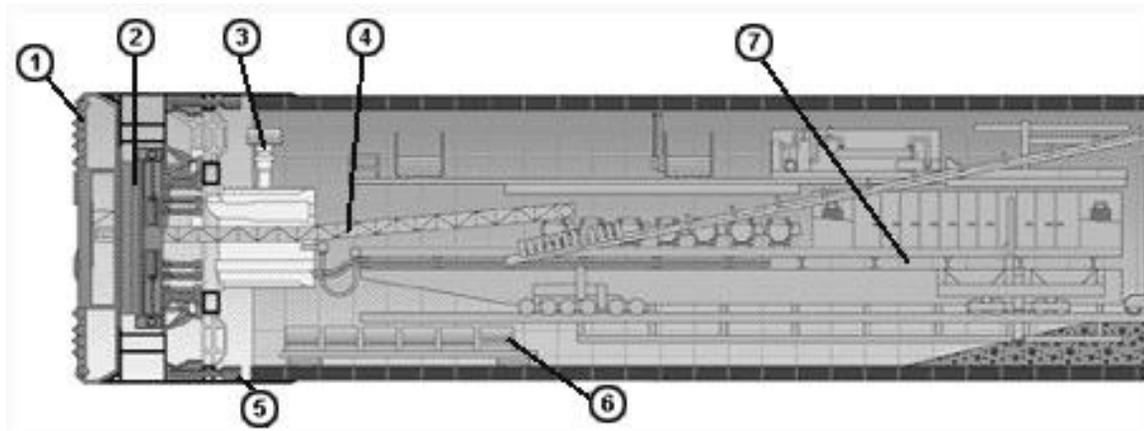
- |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1. Rueda de Corte.             | 7. Dovelas.                    |
| 2. Accionamiento.              | 8. Cilindros de propulsión.    |
| 3. Suspensión de bentonita.    | 9. Burbuja de aire comprimido. |
| 4. Sensor de presión.          | 10. Mamparo sumergible.        |
| 5. Exclusa de aire comprimido. | 11. Machacadora.               |
| 6. Erector de dovelas.         | 12. Tubería de extracción.     |

**Escudo para roca dura**

También denominados topos escudados ya que son utilizados en las mismas condiciones geológicas que los topos. Estos escudos se diferencian muy poco en la rueda de corte y en el sistema de extracción del escombro de los topos estándar. Sin embargo, son totalmente diferentes en el sistema de propulsión y en el escudo de protección. La seguridad es la ventaja fundamental que ofrece el topo escudado con relación al topo estándar y es que la excavación y el sostenimiento del túnel tienen lugar dentro del escudo protector, eliminándose el riesgo continuo que se corre en las instalaciones libres de sostenimiento. Otra ventaja importante que ofrece el escudo para rocas duras en contraste con el topo es, que el escudo permite colocar el revestimiento definitivo del túnel. De este modo con la colocación de las dovelas

prefabricadas de hormigón armado el túnel queda totalmente finalizado con el paso de la tuneladora.

### Esquema básico de un Escudo para roca dura:

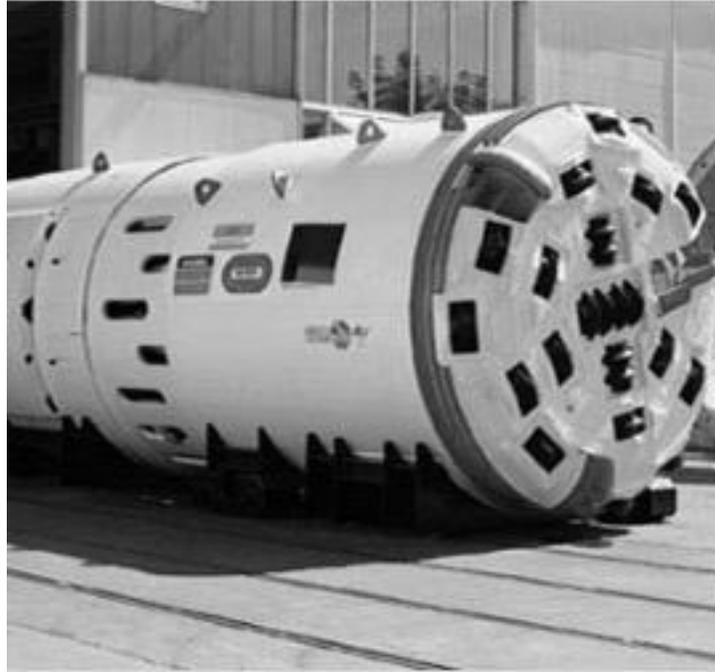


- |                          |                             |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1. Rueda de Corte.       | 5. Cilindros de empuje.     |
| 2. Accionamiento.        | 6. Dovelas.                 |
| 3. Erector de dovelas.   | 7. Cuadros de distribución. |
| 4. Cinta transportadora. |                             |

### El doble escudo

Los dobles escudos son tuneladoras con características mixtas entre el topo y el escudo. La característica principal es que está dotado de dos sistemas de propulsión independientes donde el primero de éstos corresponde al sistema de propulsión del escudo y el segundo con el del topo. El doble escudo es un escudo telescópico articulado en dos piezas que proporciona un sostenimiento continuo del terreno durante el avance del túnel. Las distintas posibilidades de trabajo que ofrecen los dobles escudos permiten conseguir unos rendimientos próximos a los de los topos, que los escudos para roca dura no podrían conseguir. Al igual que los escudos para roca dura los dobles escudos permiten realizar túneles a través de terrenos con geología cambiante e inestable que los topos no podrían realizar.

### Fotografía de un doble escudo:



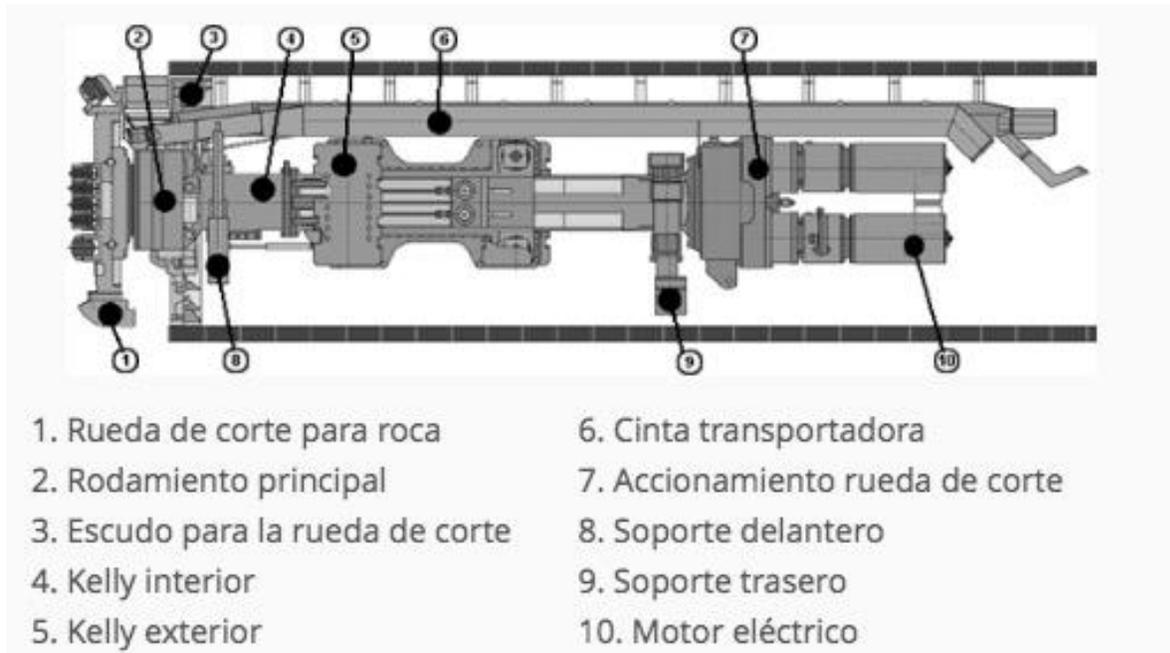
**El escudo delantero:** Sirve como estructura soporte de la cabeza de corte, contiene el rodamiento principal, la corona de accionamiento y los sellos interno y externo.

**El escudo trasero:** o escudo de anclaje, incorpora las zapatas de los grippers operables a través de ventanas. En su parte posterior incorpora el erector de dovelas y los cilindros de empuje para la propulsión en modo escudo normal.

### Topos

Los topes son tuneladoras diseñadas para poder excavar rocas duras y medias sin grandes necesidades de soporte inicial. Los elementos principales que forman un topo son dos, la cabeza de corte y la sección de anclaje, compuesta a su vez por: los codales o grippers, los cilindros y el Back up o carro estructural. En el diseño de un topo, la parte fundamental a estudiar con más detenimiento es la cabeza de corte y la posición de las herramientas de corte, discos de corte, rastrillos, cangilones de desescombro y copy cutters que se van a instalar en ella. La fuerza para realizar el avance se obtiene como reacción de los grippers contra el terreno.

## Esquema básico de un topo:



**El topo ensanchador** es, como su propio nombre indica, aquel topo que se utiliza para agrandar túneles y así evitar las consecuencias de las fuerzas de agarre en la excavación finalizada, ya que los topos ensanchadores tienen los grippers delante de la rueda de corte.

**Los topos para planos inclinados** están especialmente diseñados para la realización de túneles con pendientes mayores de 10% y que han llegado al 50%. Estos topos han sido utilizados en la construcción de funiculares subterráneos a estaciones de esquí, túneles de centrales eléctricas, minas, etc.

## CARACTERÍSTICAS DEL FUTURO TÚNEL

Están proyectados en total dos túneles unidireccionales, uno de ida y uno de vuelta, cada uno tendrá unos 13,9 kilómetros de largo y 12 metros de diámetro y estarán separados entre sí por 90 metros. Las vinculaciones entre ellos serán cada 500 metros a través de galerías de ventilación, túneles transversales de diferentes diámetros que servirán para la circulación de vehículos ligeros y ventilación.

El método de perforación que se piensa es combinado, usando tuneladora en la mayor parte del recorrido y el resto con método tradicional de voladuras. Del lado chileno, se comenzará haciendo un boquete de aproximadamente 1 kilómetro con método tradicional (usando explosivos), que permita la entrada de la tuneladora, que es una especie de tren de entre 70 y 100 metros de largo con una punta que al girar rompe la roca. La tunelera trabajará unos 10 kilómetros. Mientras tanto, del lado argentino se

"atacará" la roca, con el método tradicional alrededor de 3 kilómetros, hasta encontrarse con el agujero que vendrá haciendo la máquina desde Chile. En cuanto a la demora de la obra, se prevé un total de 5 años y un costo final de 800 millones de dólares.

## **IMPORTANCIA DEL PROYECTO**

Su importancia estriba en que políticos del Cono Sur piensan que se necesita colocar su producción exportable en el mercado mundial, teniendo como objetivo principal los mercados del Asia- Pacífico. Esto provocaría un incremento en el comercio incentivando la producción exportable en las áreas de influencia del Corredor. En Chile la Región de Coquimbo necesita la carga de los productores argentinos para que el funcionamiento su puerto sea más dinámico de lo que es actualmente. Mientras que para San Juan se espera la reactivación total de la zona norte, (Jáchal, Ischigualasto e Iglesia) de la misma, desde el punto de vista económico y turístico.

También la importancia radica en que es el principal componente corredor Porto Alegre - Coquimbo dentro del Mercosur, puesto que cada vez es mayor el intercambio comercial entre los países del Mercosur (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay) y Chile, y entre éstos y los mercados del Asia Pacífico. Se pronostica que se saturará la capacidad del Paso principal por el Túnel Cristo Redentor en Mendoza con el agravante de su indisponibilidad en las temporadas invernales (40 días promedio al año). Por su posición geográfica el corredor por el paso de Agua Negra representa una inmejorable alternativa de complementación ya que por un lado se encuentra alineado entre los Puertos de Porto Alegre en Brasil y Coquimbo en Chile, atravesando la zona productora central de Argentina y por otro la construcción del Túnel posibilita su disponibilidad durante todo el año.

### **Rutas que formarán parte en Brasil**

BR-290

### **Rutas que formarán parte en Argentina**

- Ruta Nacional 14
- Ruta Nacional 127
- Ruta Nacional 12
- Ruta Nacional 168
- Ruta Nacional 11
- Ruta Nacional 19
- Ruta Nacional 20
- Ruta Nacional 38
- Ruta Nacional 150



Esta vía interoceánica también permitirá el ingreso a Ischigualasto, un importante punto turístico y paleontológico de la Argentina.

### **Rutas que formarán parte en Chile**

- Ruta 41-CH

### **Principales ciudades que formarán parte en Brasil**

- Porto Alegre
- São Gabriel
- Uruguaiana

### **Principales ciudades que formarán parte en Argentina**

- Paso de los Libres
- Corrientes
- Paraná
- Santa Fe
- San Francisco
- Córdoba
- Carlos Paz
- Chamental
- San José de Jáchal

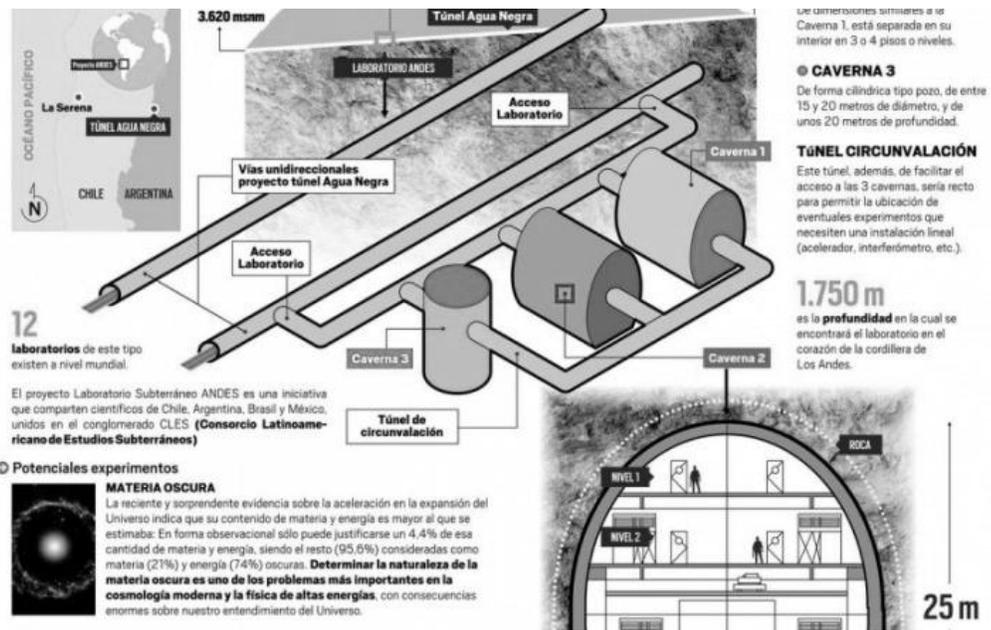
### **Principales ciudades que formarán parte en Chile**

- Vicuña
- La Serena
- Coquimbo

## **ANDES - LABORATORIO CIENTÍFICO SUBTERRÁNEO**

Una coordinación internacional de científicos sudamericanos han realizado estudios y solicitado la instalación, en el punto más profundo del túnel, de un laboratorio científico subterráneo, que consiste en un complejo de tres cavernas anexas, donde se puedan hacer experimentos de clase mundial en física de partículas, astrofísica, geofísica, biología y ciencias de medio ambiente, entre otros. El laboratorio, llamado ANDES (Agua Negra Deep Experiment Site), sería el tercero más profundo del mundo, a 1.750 m bajo la roca de la montaña, y el primero de este tipo en el hemisferio Sur del

planeta. Su administración estará a cargo de un organismo internacional latinoamericano denominado "Consortio Latinoamericano de Experimentos Subterráneos" (CLES). Este tipo de laboratorio subterráneo, debido a su gran profundidad, permite hacer experimentos de alta sensibilidad que quedan protegidos bajo la roca del permanente bombardeo de rayos cósmicos que llegan a la superficie terrestre.

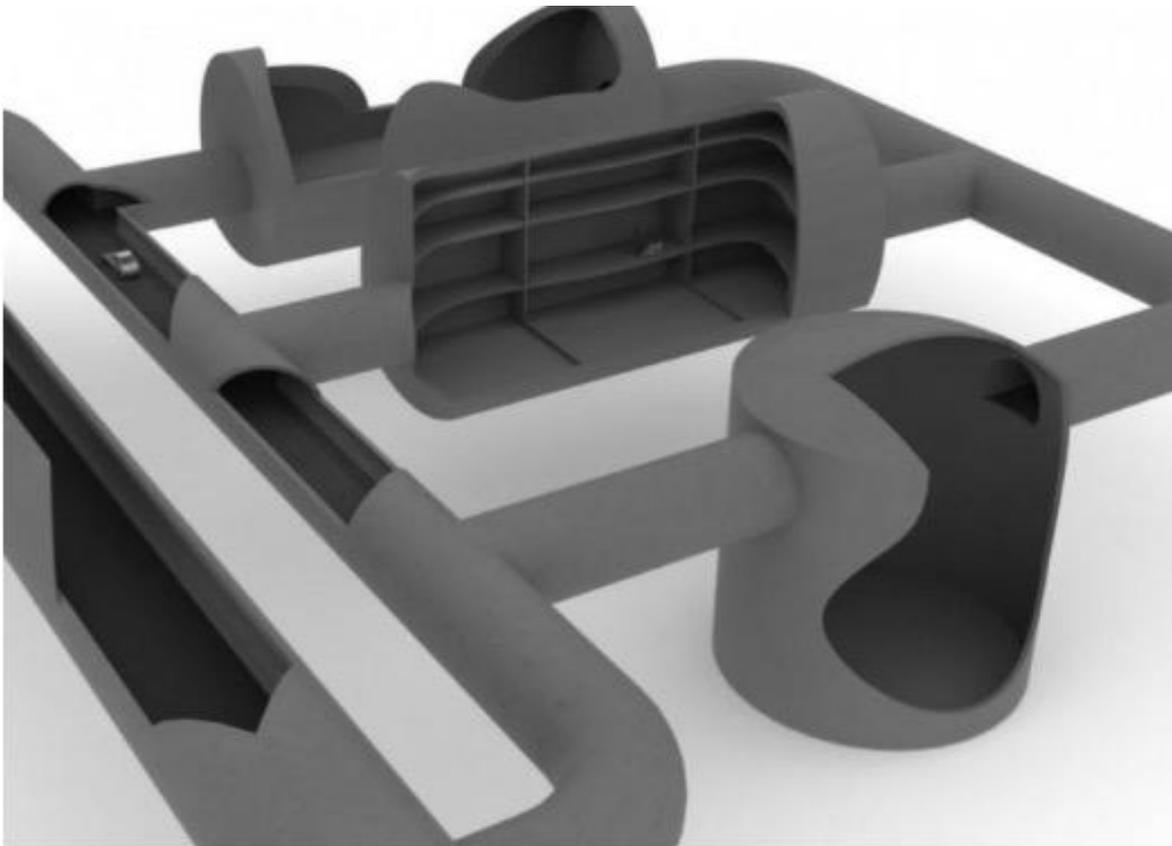


	Argentina	Chile
Ubicación	Provincia de San Juan	Región de Coquimbo
Vinculación	Ruta Nacional 150. Tramo: San José de Jáchal - Paso de Agua Negra. 160 km.	Ruta 41-CH. Tramo: La Serena - Paso de Agua Negra. 247 km.



Un laboratorio subterráneo en el corazón de la cordillera de Los Andes, que funcionará como centro de avanzada para científicos chilenos, argentinos, brasileños y mexicanos, será construido a 1.750 metros de profundidad como parte del proyecto del túnel binacional de Agua Negra, en la Cuarta Región.

Los sitios subterráneos de gran profundidad son muy escasos en el mundo algunos de estos son el SNOLAB de Sudbury, Canadá, y el SuperKamiokande, en Hida, Japón- y a la vez son “muy apetecidos en el mundo científico para hacer experimentos de alta sensibilidad, que no se pueden hacer en la superficie de la Tierra debido al constante bombardeo de los rayos cósmicos”, adelanta.



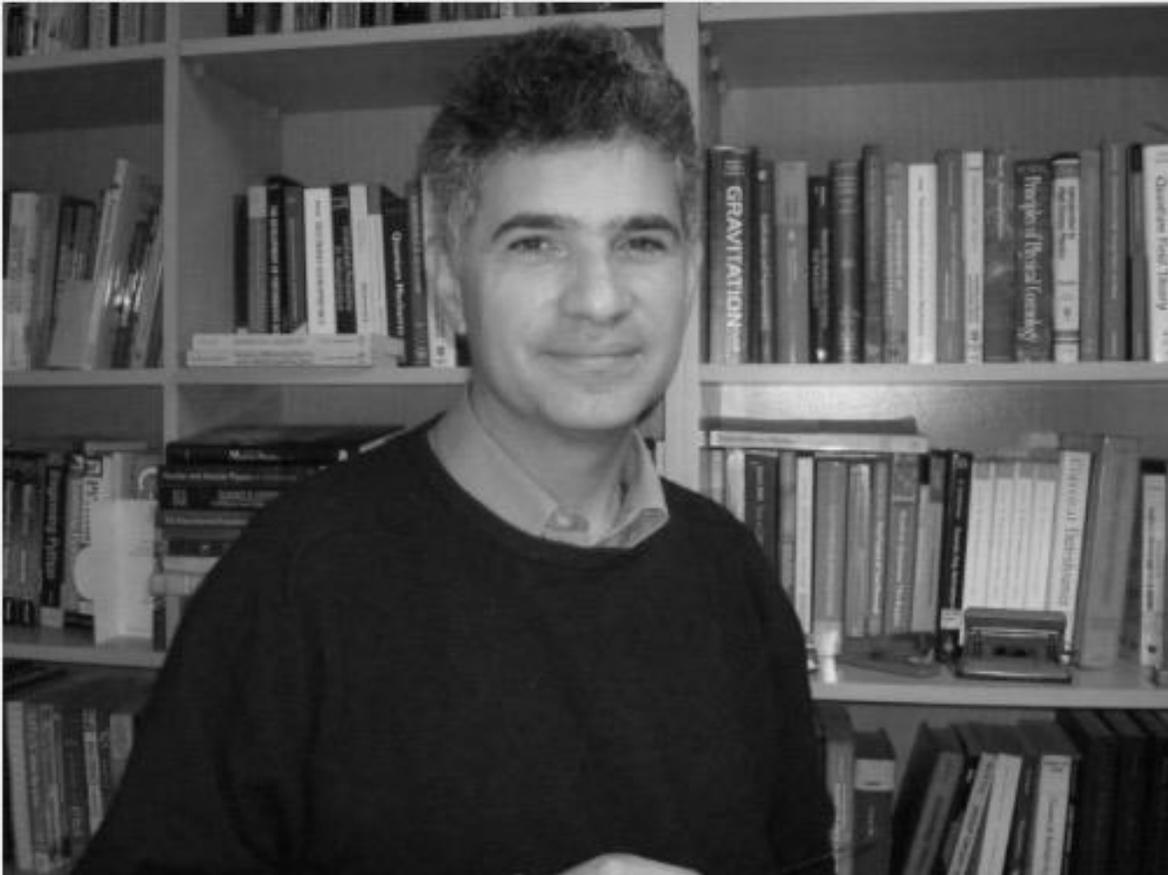
### **Utilidad múltiple**

El laboratorio subterráneo ANDES (Agua Negra Deep Experiment Site) es un laboratorio de gran profundidad, de carácter internacional, propuesto a ser construido en el punto más profundo del túnel Agua Negra bajo la cordillera, que unirá Chile con Argentina entre la región de Coquimbo y la provincia de San Juan. En el laboratorio además participan Brasil y México. Estos laboratorios subterráneos permiten hacer experimentos en física, geología, geofísica, sismología y biología. Facilitan el desarrollo de una gran variedad de industria de alta tecnología, y descubrir o desarrollar nuevos métodos que se aplican en la gran industria, explica el científico. “Por ejemplo, detectores de partículas de alta sensibilidad pueden usarse en aplicaciones de medición de contaminación ambiental, búsqueda de minerales en la

minería, estudio de fallas geológicas, efecto de la radiación -o la falta de ésta- en la reproducción celular y mutación genética”, dice.

A nivel de infraestructura, Dib señala que se requerirá, además del sitio bajo tierra, un laboratorio de apoyo en la superficie, es decir, un edificio donde haya oficinas, talleres y laboratorios de armado y estudio previo.

“Planeamos tener uno en Chile -posiblemente en La Serena- y otro en el lado argentino. Parte importante de estos laboratorios de apoyo será un centro de visitas, que funcione como museo interactivo, para dar a conocer la ciencia de estos centros”, comenta el científico.



*El científico Claudio Dib.*

### **Física atómica**

El túnel Agua Negra es una obra vial cuya construcción incluye la construcción del laboratorio. “El plan es que el financiamiento de la obra civil del laboratorio sea parte de la obra del túnel”, dice.” Para las agencias científicas de nuestros países, el costo de un laboratorio así es prohibitivo, sin embargo es un costo menor -aproximadamente 2%- comparado con el de la obra del túnel”.

El científico destaca que, en este sentido, una obra de gran envergadura como el túnel posibilita que una pequeña fracción adicional en el costo de obras públicas genere un enorme valor agregado en otras áreas como el desarrollo científico. Y que, por otra parte, los costos de operación del laboratorio los asumen las agencias científicas de los países miembros. Por último, los experimentos que se instalen en el laboratorio se



no hubiera nada”.

Aun así, como son tantos, la pequeña fracción que logra interactuar deja señales en los experimentos. “Pero por lo mismo, estos neutrinos son señales que vienen directamente desde el centro del Sol: son la única señal directa desde esa zona. La luz que recibimos del sol, en cambio, sólo viene de su ‘superficie’, la fotosfera”.

Otra posibilidad es la detección de neutrinos emitidos desde el interior de la Tierra, siendo estas las primeras señales directas de la composición química del interior de nuestro planeta.

“También se pueden recibir neutrinos desde las supernovas (explosiones de estrellas) que emiten casi toda su energía en forma de neutrinos. La materia oscura, por otro lado, se nota por sus efectos gravitatorios en astronomía, pero no se sabe qué tipo de partículas la componen. Lo que sí se sabe es que no puede ser materia normal hecha de átomos. Los experimentos subterráneos permitirían resolver esta interrogante. Ha habido búsqueda por años, pero no hay nada conclusivo aún. Experimentos en ambos hemisferios de la Tierra ayudarían a esclarecer estas búsquedas, porque hay algunos de los ruidos de fondo que podrían descartarse mejor”, dice.

## **Ingeniería del túnel**

Actualmente el camino entre La Serena y San Juan tiene una longitud de 515 kilómetros con 50 de ripio, el túnel reducirá la distancia en 25 kilómetros. El camino actual no es apto para el transporte de carga, sólo es transitable entre los meses de noviembre a comienzos de abril, permanece cerrado siete meses del año.

Con el túnel toda la vía estará pavimentada facilitando la circulación de camiones y vehículos livianos. La construcción del túnel se iniciará a fines del 2017 y se extenderá entre 8,5 a 10 años. Están proyectados dos túneles uno de ida y otro de vuelta, cada uno tendrá 13,9 kilómetros de largo y 12 metros de diámetro con dos carriles unidireccionales cada uno; estarán separados por noventa metros. La conexión entre las vías será cada 385 metros a través de galerías de ventilación. Desde Chile se accederá al túnel por la Ruta 41 (a 3.600 metros de altura) que conecta el Puerto de Coquimbo con el Paso Agua Negra y por el lado Argentino el ingreso se hará a 4.050 metros.

La seguridad vial es una ventaja importante de la solución adoptada, evita por completo los accidentes por colisiones frontales. Los dos túneles estarán conectados mediante galerías de conexiones vehiculares y peatonales en cantidad suficiente, para garantizar el escape de los usuarios de un túnel en emergencia hacia el otro.

El diseño propuesto presenta las siguientes ventajas: a) Inversión progresiva, al permitir una menor inversión inicial si se construye primero una manga; b) menores costos de operación, producto de un menor consumo de energía por parte del sistema de ventilación; c) riesgo geotécnico más limitado, frente a la alternativa de un túnel

bidireccional de mayor tamaño de sección transversal: d) Alta confiabilidad en la conexión internacional, ante el evento de cerrar una manga la otra se mantiene abierta permitiendo el flujo vehicular.

El complejo Agua Negra permanecerá abierto todo el año a diferencia del Túnel Cristo Redentor, en un año normal permanece cerrado por treinta días y si es lluvioso el cierre se extiende a 45 días.

Argentina financiará la construcción del túnel que asciende a \$1.550 millones de dólares, dando una garantía para que un privado acuda con financiamiento. De acuerdo a la proporción territorial a Chile le corresponde pagar el 28% de la obra, se cancelará cediendo el cobro del peaje hasta que se extinga la totalidad de la obligación. Se estima que transitarán 900 camiones de gran envergadura por día.

### **El impacto económico del proyecto.**

El impacto económico del túnel de Agua Negra está por definirse. Para el futuro bienestar de las poblaciones de las dos regiones resulta importante investigar los reales efectos económicos de la obra. Por la magnitud de la obra y sus costos financieros es interesante analizar las condiciones que deben cumplirse, para que no quede a nivel de un corredor transversal, sino que se avance un paso más y se desarrolle un real proceso de integración fronteriza entre la provincia de San Juan y la Región de Coquimbo.

Un corredor bioceánico tiene varias dimensiones, en su aspecto más elemental, que algunos autores llaman corredor transversal; corresponde a un paso que facilita el intercambio comercial entre dos regiones aisladas que requieren para su conexión diferentes modalidades de transporte (Inostroza & Espinoza; 2004). Un ejemplo hipotético: La exportación de productos agropecuarios del Estado de Santa Catarina en Brasil, que se transportarían en camión hasta el puerto de Coquimbo, son embarcados y transportados a China. En éste caso el impacto sobre las regiones intermedias es muy limitado y su efecto económico sería similar al impacto que tiene el actual movimiento de carga originado en Brasil y Argentina sobre la economía de la Región de Valparaíso.

El túnel de Agua Negra tendrá un real impacto si se convierte en una arteria que comunica a San Juan con Coquimbo promoviendo una verdadera integración fronteriza entre ambas regiones. Entendiendo por tal, la vigencia de un activo comercio entre ambas regiones, el flujo libre de personas con un tránsito importante y de carácter bidireccional, la provisión de bienes y servicios de empresas localizadas en una región a unidades productivas ubicadas en la otra (por ejemplo insumos para la minería desde empresas de San Juan a las minas en Chile) y una activa colaboración científica y tecnológica, entre otras materias.

La experiencia de los procesos de integración fronteriza que han resultado exitosos,

muestra que cuando los gobiernos nacionales han dejado a gobiernos regionales y locales la libertad de cooperar con sus estrategias de desarrollo económico y social transfronterizo (Kott; 2009) estos han dado resultado. Analizando un caso específico de cooperación, Carmen Magaña demostró que la implementación del TLC y sus acuerdos complementarios respecto a aguas compartidas crearon una base legal/institucional para el conflicto político, mientras que anteriormente las autoridades de las localidades fronterizas de México y Estados Unidos habían trabajado juntas para construir acuerdos de sentido común, y así solucionar los problemas de escasez hídrica que los afectaba.

En círculos académicos se señala que el análisis tradicional de la integración regional, especialmente en la Unión Europea, se centró en la tensión política entre organizaciones supranacionales; los últimos trabajos han comenzado a estudiar las relaciones institucionales desde la perspectiva de los multiniveles de gobierno del gobierno multiescalar (Morgan; 2005), colocando el acento en la acción independiente de los gobiernos locales y de la sociedad civil de las localidades interesadas, como los verdaderos artífices de los acuerdos fronterizos.

En el mundo, los procesos de integración fronteriza que han tenido éxito obedecen a la existencia de factores objetivos (complementariedad económica; sociales: relaciones de antigua data entre comunidades o étnicos). Se han concretado, mediante un acuerdo regional firmado por las autoridades nacionales o mediante la acción de grupos locales, que empujan a las autoridades nacionales a firmar acuerdos y protocolos que permiten la integración económica social y política.

En el caso de la Provincia de San Juan y de la Región de Coquimbo, el gran impulso para construir primero el camino y ahora el túnel y tener una vía de interconexión física que opere todo el año, ha venido principalmente de los gobiernos regionales y de las sociedades civiles. Estos han desarrollado numerosas actividades por más de diez años hasta convencer a los dos gobiernos de colocar el proyecto del túnel de Agua Negra en los primeros lugares de la agenda .

## **El corredor Bioceánico**

Actualmente opera un corredor bioceánico que une Porto Alegre en Brasil con los mercados de China. La ruta tiene dos vertientes del flujo de carga, por una parte, la que procede del Sur de Brasil y de las Provincias del Norte de Argentina; y por otra, la que proviene del centro-sur de Argentina, principalmente de la provincia de Buenos Aires. Hay una corriente de carga menor que viene de los puertos de Asia, se desembarca en Valparaíso y se traslada vía terrestre al centro y norte de Argentina y sur de Brasil. En los últimos años los flujos de carga también han aumentado por el activo comercio internacional entre Chile y Argentina y Chile con Brasil.

Diversos estudios demuestran que el aumento del flujo de carga es tan intenso, que se proyecta el colapso del túnel Cristo Redentor hacia el 2016 o 2017. Esto dio más

argumentos a quienes defendían la viabilidad del túnel Agua Negra como un paso complementario al túnel actual.

Los autores que defienden la idea de un corredor bioceánico que incluya el túnel agua Negra afirman que el área de influencia directa del corredor bioceánico central, abarcaría la región Sur de Brasil (20% de su PIB), Región Central de Argentina (17% de PIB), y región Centro Norte de Chile (25% de su PIB). En total, el PIB Regional del área llegaría a los 252.000 millones de dólares, según lo señaló el director de CRESPI en un seminario reciente.

Las autoridades chilenas de la Región de Coquimbo reconociendo la importancia del corredor bioceánico realizaron un viaje a las provincias del Norte de Argentina y al Estado de Santa Catarina en Brasil. El presidente de la comisión de infraestructura del CORE declaró “es muy sencillo para la gente imaginarse el corredor bioceánico como un camino, pero lo cierto es que no es tan así. El concepto más bien hace referencia a una conjunción de territorios, además de sus gobiernos y las voluntades (...) debemos pensar en una idea más integral, un gran territorio o una gran red. Y dentro de esa red, un papel fundamental corresponde al puerto de Río Grande” (Muñoz; 2010). También las autoridades Argentinas apuntan a lo mismo.

El real impacto económico del corredor Bioceánico que unirá Río Grande Do Sul con la región de Coquimbo en la Serena está por estudiarse, para así determinar la real magnitud de su impacto económico. Hasta ahora, sólo hay hipótesis sobre el tema y muy escaso avance en su medición empírica.

La factibilidad de una integración transfronteriza La Actividad Sectorial.

La Región de Coquimbo se ubica en el norte chico de Chile y su superficie se extiende desde los paralelos 29° 02' min al norte y 32° 16' de latitud sur, y desde el eje longitudinal 69° 49' oeste hasta el Océano Pacífico. En términos político limita al norte con la región de Atacama (Chile), al sur con la región de Valparaíso, al este con Argentina. Su superficie abarca 40.579,9 km<sup>2</sup>. Su capital es la ciudad de Serena distante 470 kms. de Santiago, la capital del país.

La provincia de San Juan se localiza al oeste del territorio Argentino, tiene una superficie de 92.789 kms<sup>2</sup>. limita al este y al norte con la provincia de la Rioja, al sur con Mendoza y al oeste con Chile. La separa de Chile el macizo montañoso de la cordillera de los Andes con alturas máximas superiores a los 6.000 metros.

La Región de Coquimbo y la Provincia de San Juan han orientado su estrategia de crecimiento económico hacia una apertura total de sus economías, con el objetivo de aprovechar al máximo la globalización y la pujante demanda externa por los bienes y servicios que se producen en sus territorios.

El gobierno de San Juan estableció su ideario en el documento “Segunda

Reconstrucción de San Juan” año 2003, que cimentó una política de apertura y de apoyo al sector exportador complementada por condiciones muy favorables para la inversión extranjera. En esta verdadera hoja de ruta, se fijaron como pilares básicos de desarrollo de la economía provincial: Agroindustria, Ganadería, Turismo y la Nueva Minería (Gob San Juan; 2008).

El modelo de desarrollo económico de Chile implantado en la década del ochenta contempla una apertura total de su economía al exterior. A partir de los años noventa ésta fue complementada con la firma de numerosos tratados de Libre Comercio, a la fecha Chile tiene tratados con más de 60 países.

En éste marco contextual las regiones del país aprovechan sus ventajas competitivas y los gobiernos regionales apoyan a las empresas exportadoras utilizando los instrumentos de política pública disponibles. Las dos regiones también tienen en común que al año 2000 ocupaban los últimos lugares en el desarrollo relativo de su país.

La apertura al mundo ha resultado exitosa, ambas regiones han vivido a fines de la primera década del siglo XXI una época de bonanza económica; su PIB ha crecido a tasas no vistas anteriormente, con una reducción significativa de los indicadores de desempleo.

La economía de San Juan ha crecido a una tasa promedio anual de 5,6% en el septenio (2003-2010). Parte de una profunda crisis, en el año 2003 la economía provincial estaba inmersa en una grave recesión y la economía decreció en un 13%. En el quinquenio (2006-2010) la situación cambio radicalmente y la tasa de crecimiento promedio fue del 11,5%, marcada por años excepcionales: 2007 un 14% y 2010 16%. Su estructura productiva también se ha transformado, ha aumentado la contribución del sector manufacturas junto a Servicios Personales y Sector Público, éste último se incrementó en siete años del 25,7% al 34,2%, impulsado por las empresas que prestan servicios a la minería y actividad vitivinícola ( Ver cuadro # 1).

Mientras que en el periodo (2003-2010) el PIB de la Región de Coquimbo se ha acrecentado a una tasa anual 2,3%, la mitad del promedio nacional 4,7%. El crecimiento de la economía regional también ha estado marcado por una inestabilidad permanente, con años de aumentos del PIB satisfactorio acompañados de un violento decrecimiento al año siguiente. Recientemente las cifras han mejorado radicalmente, el último trienio el incremento del PIB regional superó el 5,5% promedio anual.

En el sexenio (2003-2009) la transformación de su estructura productiva ha resultado substancial. El sector minería que al 2003 representaba el 18% del PIB regional, al 2009 alcanza al 34%. Las cifras provisorias del 2011 muestran que la tendencia se mantiene con un 38,8%, generando la actividad minera prácticamente el 40% del PIB regional (Mallat; 2012).

**Cuadro N° 1**

	Participación en el PIB por clase económica- San Juan Y Coquimbo (millones de Dólares)			
	2003		2010	
	San Juan	Coquimbo	San Juan	Coquimbo
Agropecuario- silvícola	14,3	8,0	7,5	4,8
Pesca	0,0	2,1	0,0	0,6
Minería	0,2	18,4	0,5	38,6
Industria Manufacturera	16,7	5,8	17,2	3,8
Electricidad, Gas, Agua	3,4	3,1	5,7	1,6
Construcción	5,1	8,5	9,0	9,1
Comercio, Restaurants, Hoteles	11,3	8,8	6,9	8,9
Transporte y Comunicaciones	7,1	9,6	3,2	6,5
Servicios financieros+ pro viviendas	16,2	15,6	15,8	9,6
Servicios Personales + Administración Pública	25,7	20,0	34,2	16,5
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

Hoy, empujada por la minería del cobre la economía regional experimenta un ciclo de bonanza económica con tasa de crecimiento de 6,5% el 2010 y 7,9% el 2011 y una tasa de desempleo de 5,5% en el trimestre móvil octubre-diciembre del 2011, que corresponde prácticamente a pleno empleo.

Una de las actividades importantes para un futuro proceso de integración es el sector turismo, resultando muy importante la afluencia de turistas extranjeros a la Región de Coquimbo. En la temporada de verano del 2012 en la ciudad de La Serena el número de turistas que llegaron a establecimiento formales de alojamiento fue 107.982, el número de pasajeros Argentinos.

alcanzó la cifra record de 19.545 participando en el 18,1% del total. Según las estimaciones de SERNATUR a los turistas que se alojaron en establecimientos formales es preciso agregar 539.910 que lo hicieron en algún tipo de casa y/ o hogar de familiares o alquilados, alcanzando una población flotante de 647.982 personas. La tasa de crecimiento promedio anual de los últimos ocho años es de 13,1%, cifra que refleja la potencia de la actividad. (Municipalidad de La Serena; 2012).

A las cifras anteriores es preciso agregar los turistas llegados a la ciudad de Coquimbo

y a las ciudades del interior (Vicuña y Ovalle), por lo que las autoridades del sector estiman en una cifra superior al millón el número de turistas que arribaron a la Región en la temporada estival del 2012.

La actividad turística no aparece desglosada en las cuentas nacionales, pero su crecimiento se puede medir analizando el sector “Comercio, Restaurants, Hoteles”. Su participación en el PIB se ha mantenido los últimos siete años a pesar del brusco crecimiento de la minería, esto confirma el robusto crecimiento del turismo en la Región. Otro sector de gran dinamismo es la construcción que acrecentó su participación en el PIB regional de un 8,5% a un 9,1%.

Del análisis anterior se desprende que la economía de la región de Coquimbo depende de la actividad minera, mientras se mantenga alto el precio del cobre y continúe aumentado la producción mantendrá un alto crecimiento la economía regional. Su dependencia de la minería es directa e indirecta, debido a que empleados de la Minería y de industrias conexas, compran propiedades en las ciudades de Serena y Coquimbo dinamizando la demanda de la construcción inmobiliaria.

## **Comercio Exterior**

La aplicación del modelo de apertura al mundo ha resultado un éxito. La Provincia de San Juan el 2003 participaba con 0,5% de las exportaciones de Argentina, al 2010 llegan al 3,1 %. Entre esos años las exportaciones de la provincia aumentan en 1.326,6% impulsadas por el complejo minero (básica- mente oro) que representa el 77% del total exportado (Subsecret. Min; s/f). En términos de composición de sus exportaciones el 83% de sus ventas al exterior el 2010 provino del enclave minero. Otros sectores muy dinámicos de la provincia son el complejo vitivinícola y hortícola.

Las exportaciones de productos ligados a la vid han tenido un componente explosivo, creciendo de manera significativa uva fresca, vinos a granel y vinos varietales. El principal varietal elaborado es Syrah con 3.266 hectáreas. Otros productos cuyas ventas crecen con fuerza y se multiplicarán los próximos años son el aceite de oliva y el tomate industrializado (Instituto Econ; 2009)

Las exportaciones de la Región de Coquimbo en Chile han crecido rápido desde el año 2003, se exportaban \$756 millones de dólares, al 2009 el valor exportado suma \$2.229 millones, triplicándose las ventas al exterior en el sexenio, alcanzando una participación del 4,5 % en el país, cifra que duplica a su participación en el PIB de 2,1%, y muestra la incidencia del sector exportador en la economía regional. La minería con \$1767 millones de dólares concentra el 79%, destacando las ventas de cobre con \$ 1.510 millones, uva \$ 213 millones, minerales de hierro \$112, concentrados de molibdeno \$82 y oro \$ 60. Las principales exportaciones no tradicionales son uva, palta Hass, jugos de uva, clementinas frescas y secas, moluscos e invertebrados.

En los próximos años se espera que continúe el fuerte crecimiento de las exportaciones regionales en base a minerales cobre, hierro, molibdeno a los que se agregará el oro. Desde el 2012 al 2017 se espera que se concreten \$7.000 millones de dólares de inversiones en la minería regional (Lizama; 2012).

Las exportaciones agropecuarias también presentan excelentes perspectivas en base a los cultivos existentes de nuez, almendras, avellanos y pecanos. A lo que se agregan la posibilidad de incrementar las ventas de vinos finos y pasas.

En síntesis, en el futuro el crecimiento de ambas regiones depende del comercio exterior y estará muy concentrado en la exportación de minerales, cobre en Chile y metales preciosos en la provincia de San Juan y en la actividad conexas que genera la minería.

La historia ha demostrado una y otra vez que los ciclos de mono exportación son efímeros, es necesario aprovecharlos para cimentar actividades económicas más duraderas. En este caso podría ser una matriz exportadora diversificada que incorpore productos de mayor valor agregado. Ambas regiones enfrentan el mismo desafío y esto abre muchas alternativas de colaboración en materia de inversiones conjuntas, intercambio de conocimientos e investigación aplicada a mejorar los productos exportables.

Las economías de la provincia de San Juan y la Región de Coquimbo tienden a concentrarse en la exportación de los mismos productos y resultan más bien competitivas que complementarias, pero esto abre la posibilidad de integración en base a empresas que provean insumos a la minería y a la agricultura o que presten servicios a estos sectores productivos.

Un estudio realizado por la Bolsa de Comercio de San Juan identificó 12 iniciativas de complementación binacional y se priorizaron algunas en base al juicio de una comisión de expertos. Los resultados indican que las actividades que resultan más atractivas y que conviene priorizar son: Fondo de Inversión Inmobiliaria (fideicomiso), Asistencia técnica en aspectos productivos, de calidad y penetración en mercados de aceite de oliva, Oferta inmobiliaria, Provisión de productos a la minería y Comercio de Sulfato de Cobre. A lo que se agrega la provisión de servicios a la minería por las expectativas de desarrollo de la actividad en los próximos años (Inst. Econ.; 2009).

Entendiendo que no existe una complementación productiva natural y la urgencia de desarrollar acciones de política que permitan materializar un mayor intercambio económico, se diseñó el Programa denominado Cooperación Económica Binacional, con la finalidad de lograr la complementación y cooperación económica entre empresarios de Coquimbo y San Juan. Se definieron cinco actividades prioritarias. El fondo de inversión inmobiliario-fideicomiso, Integración Regional de la Cadena olivícola, Integración regional de la Oferta inmobiliaria, Sulfato de cobre de la Región de Coquimbo para la agricultura de San Juan y Abastecimiento industria minera

metalífera chilena con industria minera no metalífera de San Juan (cal) (Inst. Econ; 2009).

También la actividad turística puede resultar muy favorecida por la construcción del túnel y la modernización de las rutas que comunican las principales ciudades con la frontera, al permitir un tráfico más fluido y con estándares de seguridad muy superiores a los vigentes actualmente. Para incentivar una mayor actividad turística las acciones que emprendan las autoridades gubernamentales como las iniciativas del sector privado resultan muy importantes.

Una alternativa muy interesante de asociatividad empresarial surge de los Tratados de Libre Comercio firmados por Chile con más de sesenta países, que permiten ingresar a esos mercados sin pagar aranceles, esto abre el camino para que una compañía Argentina venda un producto a una empresa chilena que le agrega aún más valor y lo coloca en mercados con trato preferencial. La representante de Prochile en una conferencia realizada en San Juan daba el siguiente ejemplo: si se exporta “mosto de uva de San Juan o Mendoza ya tiene valor agregado; lo llevo a Chile, se procesa y se transforma en jugo. Chile lo puede exportar a Corea con arancel cero, la Argentina lo haría con un 45% de arancel. Ahí hay un negocio” (Tiempo; 2012).

Cabe destacar, el decisivo rol que está jugando el sector privado en el proceso a través del Frente Agua Negra, del Comité de Integración Agua Negra y de los gremios empresariales de la Provincia de San Juan. Se firmó en la XXI sesión del Comité un acuerdo para fijar una estrategia de trabajo a largo plazo y generar una integración real, se está estudiando la figura legal de la unión transitoria de empresas, figura que no existe en Chile, pero de ser aprobada facilitaría el desarrollo de proyectos conjuntos entre empresas chilenas y su contraparte de allende los andes.

También la asociatividad permitiría a empresas ligadas al rubro de la construcción y servicios conexos, desarrollar emprendimientos conjuntos en las obras de infraestructura ligadas al túnel, está la construcción del propio Túnel, de las vías anexas: ruta Las Flores-Túnel Agua Negra, carretera Vicuña-Túnel y carretera Vicuña Puerto de Coquimbo o Ruta cinco para empalmar con la vía a un puerto que se construya al Norte o al puerto de Coquimbo, obras de ampliación del Puerto de Coquimbo, de construcción de un nuevo puerto, a lo que se agrega la doble vía Vallenar- La Serena. Obras de infraestructura que suman más de \$3.000 millones de dólares en inversiones directas.

A esto se agrega la posibilidad de desarrollar proyectos conjuntos para brindar servicios a la Minería de ambas regiones y a los yacimientos mineros que se encuentran en el límite de los dos países y desarrollarán su proceso productivo en las dos naciones.

La velocidad con que se avance en el proceso de integración entre la Provincia de San Juan y la Región de Coquimbo, dependerá en buena medida de la prioridad que le

concedan los gremios empresariales, hasta el momento el sector privado ha sido un actor muy relevante, primero logró dar visibilidad al túnel y luego aceleró la agenda de los gobiernos al incluirlo en el Protocolo de Maipú.

## **Conclusiones sociales del proyecto**

Entre la comunidades de la Provincia de San Juan y de la Región de Coquimbo hay una excelente relación, que se refleja en las acciones que ha desarrollado la sociedad civil, para lograr materializar primero el Paso Agua Negra y colocar ahora en los primeros lugares de la agenda binacional la construcción del túnel Agua Negra, cuya licitación se efectuó en el segundo semestre del 2013.

El túnel sienta las bases materiales para un corredor bioceánico con una esfera de influencia que abarca el Sur de Brasil, Paraguay y las provincias del centro norte de Argentina y Brasil. Cifras preliminares estiman el PIB regional en 252.000 millones de dólares.

La apertura de las economías de la Provincia de San Juan y de la región de Coquimbo al comercio internacional ha gestado ventajas competitivas muy relevantes y ha dinamizado sus economías con cifras de crecimiento del PIB regional superiores al 6% en el último quinquenio. De mantenerse la demanda internacional por productos anclas de ambas regiones y la inversión proyectada en minería a ambos lados de la frontera, en metales precios en San Juan y mineral de cobre para la región de Coquimbo, cabe esperar que cifras de crecimiento superiores al 6% anual estarán presentes a futuro tanto para San Juan como para la Región de Coquimbo.

Al analizar la composición del PIB sectorial y las exportaciones de las dos regiones las economías parecen competitivas, pero sí se estudia con más detalle y se busca la integración hacia atrás, surgen una serie de actividades productivas y de servicios que pueden realizar empresas situadas en un país a un consumidor final o intermedio localizado en el otro se abren incluso oportunidades muy interesantes de emprendimientos conjuntos.

Para que el proceso de integración llegue a buen puerto es muy importante la colaboración entre la sociedad civil y los gremios empresariales de los dos países. Serán estos con su acción, los que impulsaran reformas legales tan importantes como la unión transitoria de empresas que permitirá a empresarios de ambos países participar en emprendimientos conjuntos, que se mantendrán mientras dura una obra o el emprendimiento particular para el que se gestó la alianza entre dos o más empresas.

En síntesis, una integración transfronteriza entre la provincia de San Juan y la región de Coquimbo parece factible y alcanzable y dependerá de la decidida acción tanto de la sociedad civil como de las autoridades gubernamentales concretar esta iniciativa en el futuro.

## ANTECEDENTES RELEVANTES TÚNEL AGUA NEGRA.

**Tabla 1: Antecedentes relevantes del túnel Agua Negra**

02/07/1935	Se firma el Protocolo Adicional Agua Negra, donde se incorpora el paso.
1964	Los dos gobiernos acuerdan desarrollar las vías que permitirán concretar el Paso.
1965	Se inaugura el Paso Aguas Negras.
1977	Se bloquea el paso por conflicto entre Chile y Argentina.
1991	Se reabre el Paso Agua Negra
1996	Firma del Acuerdo de Complementación Económica MERCOSUR-CHILE. Protocolo adicional MERCOSUR-CHILE. "Programa de Inversiones para doce pasos fronterizos priorizados entre Chile y Argentina (1996-2000). I el Paso Agua Negra.
1999	Diagnóstico Área Interregional de Desarrollo Bioceánico.
2004	Diagnóstico de Transporte de Carga Internacional INECON
22/06/2005	Reunión del Grupo Técnico Mixto, decide desarrollar los estudios que permitan una conexión vial abierta todo el año por Paso Agua Negra.
6 y 7 04/2009	Comité de Integración "Paso Agua Negra". Deja constancia de apoyo a iniciativas orientadas a construcción del "Túnel Agua Negra"
2009	Argentina realiza el estudio y diseño del Túnel Agua Negra.
06/08/2009	Los Ministros de Relaciones Exteriores firman un Memorándum de Entendimiento entre la República de Argentina y la República de Chile sobre el Paso Agua Negra". Se comprometen a recepcionar, revisar y a pronunciarse sobre los estudios vinculados a la construcción del Túnel Agua Negra.
20/08/2009	Firma del Convenio de ejecución de "Diseño de Ingeniería Básica del Túnel de Agua Negra e Impacto Ambiental y de Pliego de Licitación"
16/10/2009	Se entregan los resultados del Estudio de Demanda y Pre factibilidad, mejoramiento Ruta 41 Chile. Paso Agua Negra. Túnel Internacional Región de Coquimbo. Los resultados indican una rentabilidad social y económica positiva.
30/10/2009	Los Presidentes de Chile y Argentina firman el Tratado de Maipú de Integración y Cooperación entre la República de Chile y la República de Argentina y Protocolo Complementario al tratado sobre la constitución de la Entidad Binacional para el proyecto Túnel Internacional Paso Agua Negra.
25/11/2009	El Tratado de Maipú y sus protocolos Complementarios son aprobados por el Parlamento de Chile.
26/01/2010	Constitución Entidad Binacional Túnel Paso Agua Negra.
2012	Firma de "Protocolo de Cooperación y Licitación de túnel Agua Negra".

**Tabla 2 Oportunidades de complementación productiva**

Provisión de servicios e insumos agrícolas	Sectorial	Recíproco
Asistencia técnica, capacitación y formación en aspectos productivos, de calidad y penetración de mercados -Desarrollo de proveedores (Uvas y derivados)	Uva y derivados	COQ a San Juan
Asistencia técnica en aspectos productivos, de calidad y penetración de mercados- Desarrollo de proveedores- Comercialización (aceitunas y aceite de oliva)	Aceitunas y aceite de oliva Hortalizas.	San Juan a COQ Coquimbo a San Juan.
Provisión de productos a la minería	Cal, piezas y partes para maquinarias e insumos	Recíproco
Provisión de servicios a la minería	Catering. Medicina en altura, análisis químico, mantención de maquinarias y equipos, asistencia técnica y capacitación	Recíproco
Comercio de sulfato de cobre	Sulfato de cobre	Coquimbo a San Juan
Venta de rocas de aplicación	Piedra caliza, travertinos	San Juan a Coquimbo
Desarrollo de cadena de frío para productos del mar.	Productos del mar	Coquimbo a San Juan
Circuito integrado de turismo	Rutas de vino, rutas gastronómicas, turismo arqueológico, turismo astronómico, turismo andino y ecoturismo.	Recíproco.
Turismo receptivo	Sol y playa	Coquimbo a San Juan
Oferta inmobiliaria	Casas o departamentos	Coquimbo a San Juan
Actividades de Construcción	Construcción de Infraestructura ligada a construcción del Túnel	Recíproca

## CAPÍTULO IV

### ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO

En todo el proyecto anteriormente descrito, se realizará una inversión total de \$1.550 millones de dólares, los que serán dedicados única y exclusivamente al desarrollo de la construcción del proyecto agua negra y se gastarán en un plazo entre 8 a 10 años.

En base a lo anterior se estimaron los siguientes costos de inversión:

**CUADRO 3.1: RESUMEN DE INVERSION APROXIMADA DE LA VIA A**

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR M\$	TOTALM\$
MEJORAMIENTOS AL TRAZADO DEL CAMINO	gl	1	3.500.000	3.500.000
TRATAMIENTO CALZADA 7 MTS	m	70.000	161	11.270.000
PUENTES	Nº	5	1.800.000	9.000.000
COBERTIZOS	Nº	5	1.750.000	8.750.000
EDIFICIOS E INSTALACIONES (PEAJES)	Nº	2	884.875	1.769.750
OTROS COSTOS	GL	1	500.000	500.000
<b>TOTAL</b>				<b>34.789.750</b>

Fuente: Elaboración propia en base a precios pavimento m2 SERVIU; ESTUDIO MEJORAMIENTO RUTA 41-CH, PASO AGUA NEGRA, TÚNEL INTERNACIONAL

#### 5.4.1.- Costos de Operación y Mantenimiento

La concesión de esta vía implica también incluir los costos de mantenimiento de la carpeta de rodadura y el despeje del camino en ciertas épocas del año, así como también la operación del peaje durante el periodo de 20 años.

**CUADRO 3.2: COSTOS DE CONSERVACION**

**Miles de pesos de Diciembre 2016**

	VALOR USD\$
CONSERVACION RUTINARIA	47.000.000 (20 AÑOS)
CONSERVACION PERIODICA (C/2AÑOS)	4.500.000.-
BACHEO PROFUNDO \$ A PARTIR DEL AÑO 2020	830.488 ANUALES

La política de conservación aplicada considera una conservación rutinaria en labores de roce y despeje de la faja, saneamiento, señalización, demarcación y perfilado de

bermas, además del retiro de la nieve de la calzada. Además se realiza una conservación periódica consistente en un sellado de grietas cada 5 años y un bacheo profundo de 100 m<sup>2</sup>/Km al año a partir de los 10 años de inicio de operación . Se considera una tasa de crecimiento de estos costos de un 1.5% en cada periodo respectivamente.

### 5.4.3.- Costos de Operación

Costos Plazas de Peaje, se incluyen los costos anuales del personal que labora en dichas instalaciones como el Administrador, Recaudadores, Personal para el traslado de dinero, Personal de Seguridad y Vigilancia y Cobradores.

Para los Costos de Operación del proyecto de mejoramiento del Paso Agua Negra se han asumido los siguientes parámetros tanto para el caso de los Costos Generales como para los Costos Administrativos y de Plazas de Peaje, considerando una tasa de crecimiento anual para todos ellos de un 1,00%:

**CUADRO 3.3: COSTOS GENERALES**

Costos Generales	Dólares	UF
Costo Arriendo Anual Oficinas	15,000	447
Costo Anual Material de Oficina	5,000	149
Costo Anual Agua	5,000	149
Costo Anual Luz	5,000	149
Costo Anual Teléfonos	10,000	298
Costo Anual Gas	5,000	149
Costo Anual Cafetería	2,000	60
Costo Anual Servicios de Aseo	4,000	119
Costo Anual Movilización (Camionetas)	7,500	223
Costo Anual Imprevistos	5,000	149
<b>Total Costos Generales</b>	<b>63,500</b>	<b>1,891</b>

Fuente: ESTUDIO MEJORAMIENTO RUTA 41-CH, PASO AGUA NEGRA, TÚNEL INTERNACIONAL (se utiliza una proporción a 3 meses)

**CUADRO 3.4: COSTOS ADMINISTRATIVOS**

Costos Administrativos	Cantidad	Dólares		UF	
		Sueldo Mensual	Total Anual	Sueldo Mensual	Total Anual
Directorio Sociedad Concesionaria	4	3,000	144,000	89	4,289
Gerente General	1	3,500	42,000	104	1,251
Secretaria Gerente General	1	750	9,000	22	268
Jefe Departamento Administración y Finanzas	1	2,000	24,000	60	715
Contador General	1	1,200	14,400	36	429
Asistente	1	850	10,200	25	304
Jefe Departamento Asesoría Legal	1	2,000	24,000	60	715
Abogado Asistente	1	850	10,200	25	304
Secretaria	1	600	7,200	18	214
Jefe Departamento Informática	1	2,000	24,000	60	715
Jefe Departamento Ingeniería	1	2,000	24,000	60	715
Asistente	1	1,200	14,400	36	429
Jefe Departamento Operaciones	1	2,000	24,000	60	715
Supervisor Unidades Operativas	1	1,200	14,400	36	429
Encargado Centro de Operaciones	1	1,000	12,000	30	357
Personal de Operaciones	4	500	24,000	15	715
Personal Call Center	3	400	14,400	12	429
Jefe Departamento Mantenimiento	1	2,000	24,000	60	715
Supervisor Unidades de Mantenimiento	1	1,200	14,400	36	429
Personal Mantenimiento	4	500	24,000	15	715
Jefe Seguridad y Vigilancia	1	1,200	14,400	36	429
Personal Seguridad y Vigilancia	2	400	9,600	12	286
<b>Total Costos Administrativos</b>	<b>34</b>		<b>522,600</b>		<b>15,567</b>

COSTOS PLAZA DE PEAJE	CANTIDAD	SUELDO MENSUAL (US\$)	TOTAL ANUAL (US\$) (7 MESES)
OFICINA			
ADMINISTRADOR	1	1.500	10.500
REACUDADORES (3 TURNOS)	3	900	18.900
PERSONAL TRASLADO DE DINERO	1	700	4.900
SEGURIDAD Y VIGILANCIA	1	700	4.900
CASSETAS (4)			
COBRADORES (3 TURNOS)	12	700	58.800
<b>TOTAL COSTOS MENSUALES DEL PEAJE US\$</b>			<b>98.000</b>

Fuente: Elaboración Propia

### 5.5.- Determinación del Flujo Vehicular por el Paso Agua Negra

Como una forma de determinar el flujo vehicular que a lo largo del año experimenta el Paso Agua Negra, ha sido necesario utilizar alguna estadística o registro del número de vehículos que salen o entran a Chile utilizando para ello dicho Paso.

Para obtener la información requerida, se ha utilizado las estadísticas relacionada con el flujo vehicular terrestre que elabora el Servicio Nacional de Aduanas, y cuya información se encuentra registrada en la respectiva página web de la Institución.

La información disponible dice relación con el número de vehículos ingresados al territorio nacional por el Paso de Agua Negra así como el número de vehículos que han salido del país por dicho paso. Dicha información corresponde a los años 2007, 2008, 2009 y primer semestre del 2010.

Ademas se incorpora la información relativa a la serie estadística de tráfico terrestre entre los años 1997 2009 la cual permitirá realizar las proyecciones de flujos para el año de inicio de operación del proyecto.

Es preciso aclarar que en las estadísticas de Aduana aparece identificado el paso de Agua Negra como Rivadavia, que corresponde al nombre de la localidad.

Las estadísticas correspondiente al periodo de análisis se muestra a continuación:

**TRAFICO TERRESTRE AVANZADAS FRONTERIZAS  
ENTRADAS DE VEHICULOS, PASAJEROS Y CARGA PASO AGUA NEGRA**

Meses	VEHICULOS			VIAJEROS	CARGA
	Particulares	De Pasajeros	De Carga	Personas	kilos

**Año 2010**

Enero	2.125	27	0	8.744	0
Febrero	752	13	0	2.809	0
Marzo	236	6	0	689	0
Abril	209	8	0	705	0
Mayo	37	0	0	89	0
Junio	0	0	0	0	0
<b>Total 1º Sem.</b>	<b>3.359</b>	<b>54</b>	<b>0</b>	<b>13.036</b>	<b>0</b>

Fte. Servicio Nacional de Aduanas

**ENTRADAS DE VEHICULOS, PASAJEROS Y CARGA PASO AGUA NEGRA**

Meses	VEHICULOS			VIAJEROS	CARGA
	Particulares	De Pasajeros	De Carga	Personas	kilos

**Año 2009**

Enero	2.309	31	0	9.092	0
Febrero	1.020	16	0	3.923	0
Marzo	305	5	1	856	0
Abril	386	10	0	1.351	0
Mayo	30	0	0	74	0
Junio	0	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0	0
Noviembre	80	10	0	389	0
Diciembre	618	8	0	2.424	0
<b>Total Año</b>	<b>4.748</b>	<b>80</b>	<b>1</b>	<b>18.109</b>	<b>0</b>

Fte. Servicio Nacional de Aduanas

**Año 2008**

Enero	1.519	16	0	5.985	0
Febrero	601	15	0	2.434	0
Marzo	386	6	0	1.284	0
Abril	110	6	0	249	0
Mayo	60	1	0	159	0
Junio	0	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0	0

Noviembre	0	0	0	0	0
Diciembre	613	7	0	2.400	0
<b>Total Año</b>	<b>3.289</b>	<b>51</b>	<b>0</b>	<b>12.511</b>	<b>0</b>

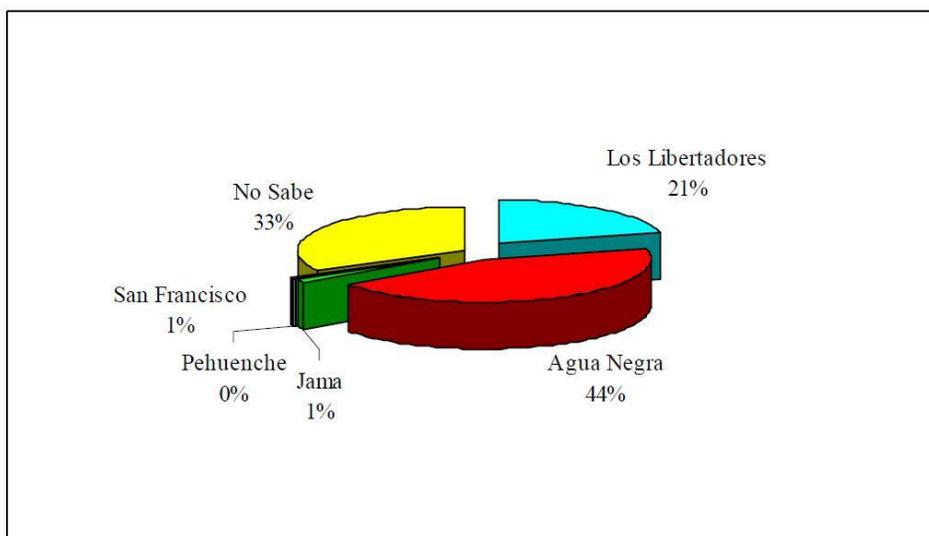
Fte. Servicio Nacional de Aduanas

### Año 2007

Enero	1.003	9	0	4.031	0
Febrero	592	10	1	2.182	3.500
Marzo	204	5	0	649	0
Abril	152	6	0	619	0
Mayo	0	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0	0
Diciembre	490	6	0	1.891	0
<b>Total Año</b>	<b>2.441</b>	<b>36</b>	<b>1</b>	<b>9.372</b>	<b>3.500</b>

Fte. Servicio Nacional de Aduanas

### Gráfico que representa el retorno de los Turistas Argentinos que ingresan por el paso Agua Negra



Fuente: Estudio Mejoramiento Ruta 41-Ch, Paso Agua Negra, Túnel Internacional

Para realizar la evaluación económica, se recopilaron datos de túneles similares, tanto en ritmo productivo, tamaño y método de extracción usado, además de información de libros de costos. Para hacer la comparación de manera efectiva, se deben identificar los puntos de diferencia entre ambos métodos. Estos son los costos de inversión (planta de relleno cementado, etc.), los costos operacionales,

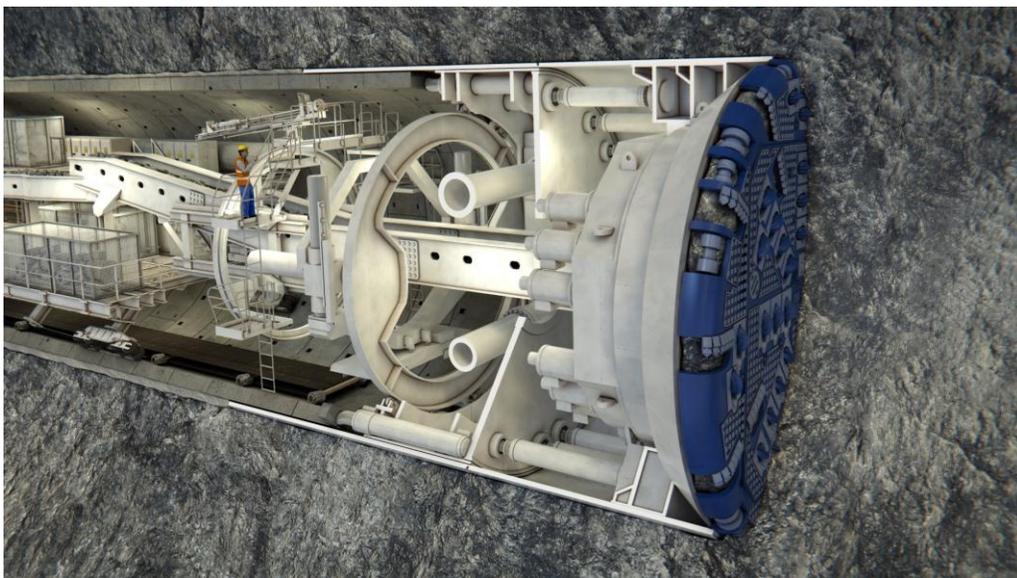
específicamente el costo túnel, y por último el riesgo de ambas alternativas, que impacta en la tasa de descuento a la cual se evalúan los proyectos.

De la bibliografía, se obtuvo que el costo de usar relleno cementado representa desde un 15 a un 30 [%] del costo total del túnel. Para realizar esta comparación económica, se utilizará el 30 [%]. Este costo mina considera todos los costos asociados al relleno, desde el transporte de la pasta, materia prima necesaria (ej.: cemento, fly ash.) costos de instalación (barricada) y monitoreo al momento de colocar el relleno en el caserón.

### **Método TBM**

La TBM representa una alternativa innovadora en la industria en Chile, sin embargo en el mundo han demostrado largamente su eficiencia, para excavar túneles de múltiples secciones (desde 30 centímetros hasta 16 metros) y grandes longitudes (desarrollo de túneles desde un par hasta varias decenas de kilómetros).

El principal fabricante de estas máquinas, la marca alemana Herrenknecht, que maneja el 66% del mercado mundial, ha presentado interés por evaluar la aplicación de esta tecnología en el desarrollo de labores mineras en operaciones de la corporación. Hasta el momento existe solo estimación aproximada de rendimientos y costos en desarrollos horizontales de estas características que ha sido respaldada por parte del fabricante.



## Análisis comparativo

De acuerdo a lo mostrado en los mapas de proceso, el uso de la tecnología de las TBM permite un desarrollo continuo de los túneles, ya que la TBM desarrolla las actividades de excavación, así como las de fortificación, en forma simultánea la mayoría de las veces, dado lo anterior, mejora significativamente los tiempos efectivos de trabajo por turno, eliminando las interrupciones propias de la perforación y tronadura, como son:

- Evacuaciones por tronadura
- Tiempos muertos por ventilación
- Detención de la frente de trabajo para fortificación, etc.

### Bases de la comparación de los métodos

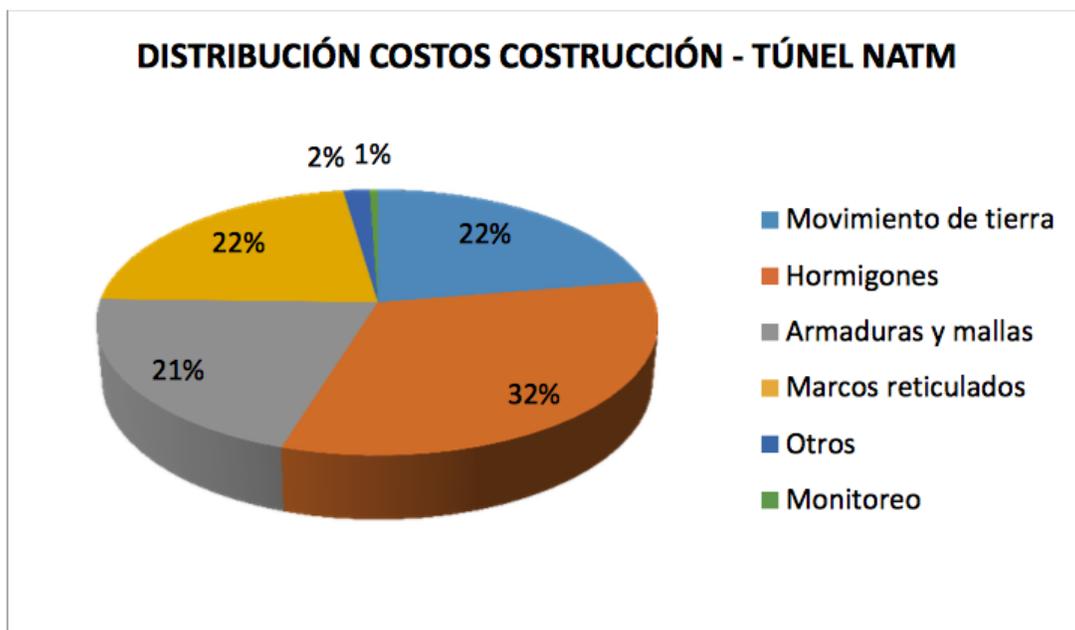
Para comparar las tecnologías de desarrollo horizontal entre sí, se considerará su aplicación sobre distintos sectores posibles. Por supuesto la viabilidad de cada tecnología no depende solamente de cuan económica y competitiva esta sea respecto a las otras, sino que además se deben considerar requerimientos mínimos de operatividad al momento de proponer estos sectores.

- Durante la pasada reunión del día 17 de Noviembre de 2016 entre personal del 1M2 y representantes de Herrenknecht, empresa que fabrica las TBM. Se ha establecido que la aplicabilidad de estos equipos, debido a las grandes dimensiones que todo el sistema requiere, esta sujeta a las características del diseño propuesto (longitud y sección de labores como también para el caso de diseños mineros, es muy influyente la distancia entre labores paralelas).
- En este punto se proponen diferentes niveles correspondientes a la mina Diablo Regimiento y posteriormente se cuantificarán los períodos y gastos requeridos según cada método.
- El método de excavación convencional (perforación y tronadura) ofrece mayor flexibilidad para establecer geometrías de excavación distintas. A efectos de establecer una base de costos para los distintos métodos de excavación se ha considerado una sección de 5.0x5.0 metros, que por las facilidades de ofrece cada método constructivos resultan con una geometria diferente.

## Sección de la labor a excavar con los distintos métodos

- El método convencional de excavación, permite mayor flexibilidad para ajustar la geometría del galibo a figuras geométricas con ángulos en sus vértices, condición no necesariamente deseable para la estabilidad de las labores.
- Para evaluar los rendimientos y costos de avance de la TBM, se debe primero evaluar la posibilidad que este tipo de máquinas presenta para desarrollar labores no circulares propias de los diseños mineros.
- Según la opinión del fabricante, añadiendo algunas modificaciones a los modelos convencionales de TBM, estos equipos podrían presentar la viabilidad de desarrollar túneles de secciones no circulares (aplicando rodillos de excavación detrás de la frente de excavación que ejecuten los vértices inferiores de la excavación).
- De no existir esta alternativa, el uso de las TBM convencionales implicaría desarrollar labores de sección mayor y el siguiente relleno a fin de nivelar el piso de las labores (área que también debe considerar la sección útil mínima de cada labor). En este análisis los rendimientos y costos de avance aproximados se determinarán a partir de esta última posibilidad.

## Cálculo de costos mediante método de Perforación mediante TBM



DESIGNACION	UN	CANT.
<b>Tramo 1 - Túnel en recta en gravas (L. Tramo = 507 m.)</b>		
<b>Movimiento de Tierras</b>		
Excavación	m <sup>3</sup>	29.935
<b>Hormigones</b>		
Sello de hormigón proyectado Grado H-35 e <sub>min</sub> =5 cm.	m <sup>2</sup>	10.196
Hormigón Proyectado Grado H-35 para revestimiento primario	m <sup>3</sup>	1.558
Hormigón Proyectado Grado H-35 para revestimiento secundario	m <sup>3</sup>	1.395
Hormigón Proyectado Grado H-35 de sellado de frentes	m <sup>3</sup>	59
Radier civil H-25	m <sup>3</sup>	1.345
<b>Armaduras y Mallas</b>		
Acero A 63-42H	kg	10.490
Malla electrosoldada C-295 Acero AT 56-50H o equivalente	m <sup>2</sup>	36.135
Puesta a Tierra	kg	620
<b>Marcos Reticulados</b>		
Marco Metálico tipo 95.28.22 (Cada 1,5 m.)	kg	151.547
<b>Paralización</b>		
Paralización mayor de 48 hrs. y menor de 5 días	un	3
Paralización mayor de 5 días. y menor de 21 días	un	3
<b>Instalación de Puntos de Referencia</b>		
Punto de Convergencia para medida topográfica	un	76
Punto de Convergencia para medida con cinta extensométrica	un	38
<b>Dispositivos de control</b>		
Hito nivelación superficial	un	3

A modo de ejemplo se muestra el análisis de precios unitarios para la excavación, una de las partidas más particulares en la construcción del túnel, que incluyen los costos de materiales, maquinarias, mano de obra y otros.

Nombre	Unidad	Cantidad	P. Unitario UF	Costo Unitario UF
<b>MATERIALES</b>				
Energía y consumos varios	un	0.03	0.949	0.028
Repuestos y consumibles	m <sup>3</sup>	1.00	0.015	0.015
			<b>Subtotal</b>	<b>0.043</b>
<b>MANO DE OBRA</b>				
Capataz	HH	0.040	0.881	0.035
Maestro Minero	HH	0.100	0.334	0.033
Ayudante Minero	HH	0.020	0.184	0.004
Operador Maquinaria	HH	0.020	0.277	0.006
Jornal Metro	HH	0.020	0.129	0.003
Mecánico	HH	0.020	0.334	0.007
Eléctrico	HH	0.020	0.334	0.007
			<b>Subtotal</b>	<b>0.094</b>
<b>MAQUINARIA Y EQUIPOS</b>				
Excavadora	HM	0.025	1.937	0.048
Cargador Frontal	HM	0.025	1.722	0.043
Camión desescombro	HM	0.020	1.076	0.022
Maquinaria auxiliar	HM	0.020	0.542	0.011
			<b>Subtotal</b>	<b>0.124</b>
<b>SUBCONTRATOS</b>				
Instalaciones Túnel	un	0.030	0.705	0.021
Varios	un	0.019	0.542	0.010
Transporte a botadero	m <sup>3</sup>	1.600	0.148	0.237
			<b>Subtotal</b>	<b>0.268</b>

Total Neto		0.529
Gastos Generales	24.28%	0.129
Utilidades	2.04%	0.013
Costo Unitario Neto	UF/m <sup>3</sup>	0.671

Notar que para esta partida, prácticamente la mitad del costo se lo lleva el transporte al botadero.

## Uso de Tuneladoras del tipo EPB

Para la estimación de los costos involucrados en la excavación del túnel interestación, mediante el uso de una maquina tuneladora del tipo EPB, se ha realizado un largo proceso de documentación, buscando información de los fabricantes de tuneladoras, contratistas especializados en obras subterráneas, antecedentes de proyectos realizados y por realizar. Pese a esto, la información disponible es muy escasa y poco detallada, sólo se cuenta con valores globales de la construcción de variadas líneas de Metro, que integran el total de las obras como estaciones, vías, talleres y material rodante. Por lo cual, calcular el costo en función de la longitud total del túnel resulta complejo, ya que cada obra se caracteriza por diferentes factores como la localización, nivel de instalaciones, geología, rendimientos esperados, instrumentación y control, número y complejidad de estaciones, etc.

En vista de la falta de información presente en documentos oficiales, se ha recurrido a memorias y tesis de universidades extranjeras, donde se han detallado valores de costos para los principales ítems involucrados en un proyecto de excavación mediante tuneladoras del tipo EPB.

Además se cuenta con un estudio de pre inversión a nivel de perfil del Proyecto Construcción de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett-Gambeta del Metro de Lima y Callao, que cuenta con valiosa información para el desarrollo de esta evaluación económica y se puede obtener de la página web de ProInversión (Agencia de Promoción de la Inversión Privada – Perú) .

Principales costos a considerar en la construcción de un túnel mediante máquinas tuneladoras

Los costos específicos de la construcción de un túnel dependerán de muchas variables, entre ellas la longitud, condiciones del terreno y logística, cada una de ellas debe ser estudiada al detalle para cada proyecto en particular.

Una buena estimación del costo de construcción de un túnel mediante tuneladora debe incluir como mínimo las siguientes categorías:

a) Dependientes del tiempo:

- - Instalaciones de faena.
- - Personal.
- - Costos energéticos, Agua y luz.

b) Independientes del tiempo (materiales: función longitud y diámetro principalmente):

- - Sostenimientos.
- - Inyecciones de mortero.
- - Tratamientos del terreno.
- - Cables alta tensión y fibra óptica.

- - Costo del botadero de escombros.
- - Mantenimiento maquinaria (revisiones periódicas de motores, cambio piezas, circuitos hidráulicos, limpieza).
- - Consumos maquinaria, herramientas de corte.

c) Fijos:

- - Transporte y montaje maquinaria.
- - Instalación de faena, instalación y retirada de oficinas, talleres, acopios, planta dovelas.

d) Maquinaria:

- - Escudo EPB.
- - Maquinaria auxiliar, Back up.
- A continuación se indicará el costo de algunos de los ítems enumerados anteriormente, lo que servirá como referencia para tener una idea de la magnitud de los costos involucrados en la implementación de un proyecto con TBM. Los valores indicados a continuación se han recopilado de una tesis doctoral de origen sueco (Isaksson, 2002) y de una tesis española (Sáenz, 2007), ambas relacionadas con la estimación de los costos asociados al trabajo con máquinas tuneladoras.
- Costos dependientes del tiempo

## Personal

Se considera un trabajo continuo 7 días a la semana, con dos turnos diarios de 10 horas cada uno para todo el personal necesario, desde la dirección hasta los empleados a pie de obra pasando por los operadores de la tuneladora. Los costos asociados al personal quedan definidos por el siguiente valor:

Costo esperado: 400.000 USD/mes Maquinaria general

El costo de la maquinaria general de la obra, como generadores, grúas, cargadores, camiones, etc. Se estiman en un costo aproximado de:

Costo esperado: 20.000 USD/mes

## Maquinaria tuneladora

El costo del funcionamiento de la máquina tuneladora incluye principalmente mantenimiento, reparaciones y limpieza, se estima en:

Costo esperado: 30.000 USD/mes

## Costos independientes del tiempo

### Sostenimiento

Como se ha visto en capítulos anteriores, las dovelas de hormigón prefabricado corresponden al elemento principal del sostenimiento de las excavaciones realizadas con tuneladora y un buen suministro de ellas es clave para el éxito de la obra. En vista de estos antecedentes, nace la necesidad de implementar una fábrica propia dovelas, cercana a la obra. Los costos asociados a esta partida se agrupan de la siguiente forma:

Costo del revestimiento (materiales, fabricación y transporte de dovelas) ■□7.000 USD/ml de túnel

Costo de la planta de dovelas  
■□4.000.000 USD

### Tratamientos al terreno

Los costos de los tratamientos destinados a mejorar las condiciones de estabilidad y excavabilidad del terreno, presenta los siguientes valores por metro cúbico de excavación. Estos tratamientos tienen un costo elevado, por lo cual deben ser bien administrados.

Costo esperado: 300 USD/m<sup>3</sup> de excavación

### Instalaciones auxiliares

Conductos de ventilación y cables de alta tensión necesarios para la alimentación de la tuneladora, así como la fibra óptica empleada como medio de transmisión de las comunicaciones desde el frente, corresponden a los costos principales de esta partida y se valoran por cada metro lineal excavado con el siguiente valor:

Costo esperado: 300 USD/ml

### Eliminación del material excavado

Esta partida está destinada a los costos correspondientes al transporte del material excavado desde el frente de trabajo al vertedero. El costo final se compone por el costo de la cinta transportadora, evidentemente en función de la longitud, el costo del uso de dicha cinta y finalmente el costo del transporte desde el lugar de acopio al vertedero incluido el costo asociado a su uso. El resultado se muestra a continuación:

Costo cinta transportadora: 170 USD/ml

Costo uso de cinta: 2.5 USD/m<sup>3</sup> de excavación

Coste de transporte al vertedero: 7 USD/ m<sup>3</sup> de excavación

#### Mantenimiento

El mantenimiento de la tuneladora, se concentra principalmente en la rueda de corte, con recambios de picas y discos cortadores, ascendiendo a un valor en función del volumen excavado, aproximado de:

Costo esperado: 20 USD/m<sup>3</sup> de excavación

#### Inyección de mortero en el gap

Esta última partida de los Costos incluidos en la categoría de independientes del tiempo, se considera que el material a emplear para la inyección es un mortero convencional. Por lo tanto el costo aproximado queda definido por:

Costo esperado: 90 USD/ m<sup>3</sup> de excavación

#### Costos fijos

##### Montaje maquinaria

Los costos de montaje de la tuneladora varían ampliamente dependiendo del país, los costos laborales, las normas laborales, tipo de máquina, el tamaño de la máquina, la ubicación de la zona de montaje (en la montaña, en la ciudad), el tipo de inicio (pique, portal, etc).

El costo de montaje para una pequeña tuneladora puede ser tan poco como USD 200.000 mientras que el costo de montaje para una máquina muy grande, en un pique, podría ser tan alta como USD 2.500.000. Este costo considera el personal especial de la empresa que construye la máquina, su transporte, alojamiento, herramientas, etc.

##### Costos de maquinaria

##### Tuneladora

El costo de una maquina tuneladora dependerá de varios factores, dentro de los más importantes está el tamaño (diámetro construido), tipo de tuneladora y características especiales solicitadas por el comprador. Así una TBM simple para roca tendrá un valor inferior que un escudo EPB de un diámetro importante.

Según información entregada por fabricantes, el costo de una máquina tuneladora del tipo EPB con un diámetro aproximado de 12 m, tiene con costo estimado en:

Costo esperado: 30.000.000 USD

##### Maquinaria auxiliar

De la partida correspondiente a la maquinaria auxiliar se presenta a continuación un listado de los elementos que lo componen. Su evaluación económica se basa, en datos de la maquinaria empleada para la ampliación del metro de Madrid.

- - Back up
- - Locomotoras
- - Vagonetas
- - Pórtico
- - Silo Mortero
- - Ventilador
- - Bomba Inyectora

El costo total aproximado de la maquinaria auxiliar dependerá del tipo de tuneladora con la que se trabaja, pero se estima en el siguiente valor

Costo esperado: 7.000.000 USD

Calculo de costos para proyecto mediante el uso de tuneladora tipo EPB

Tal como se mencionó anteriormente, para calcular el costo por unidad de longitud de la construcción del túnel aguas negras mediante el uso de máquinas tuneladoras del tipo EPB, se considerarán datos extraídos del Estudio de Pre inversión a nivel de perfil del Proyecto Construcción de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett-Gambeta del Metro de Lima y Callao. Este proyecto se encuentra actualmente en su primera etapa de construcción, que considera aproximadamente 10 km de Línea 2 construidos por el método NATM, mientras los dos escudos EPB y Slurry son montados para dar inicio a las siguientes etapas.

Los costos del equipo TBM van a estar en directa relación con el tamaño del equipo y sección además de las características geológicas del lugar que se desea perforar.

El siguiente cuadro muestra el desglose de los costos de la TBM para un a sección de 5.0 X 5.0 metros.

Régimen de Trabajo de TBM		
Nº turnos	2	Turno/ día
Turno	12	Hr./ turno
Tiempos de ciclo TBM		
Almuerzo y cena	1,00	Hr./ turno
Disponibilidad	10,00	Hr./ turno
Entrada al túnel	0,75	Hr./ turno
Cambio de equipo	0,00	Hr./ turno
Revisión y chequeo	0,60	Hr./ turno
Servicios	0,70	Hr./ turno
Excavación	7,95	Hr./ turno
Fortificación	0,00	Hr./ turno

Cuadro 4. Criterios para el cálculo del rendimiento de avance del método TBM

Costos de Avances con TBM	
	2 turnos de 12 horas
Excavation	
Picas	195,00 US\$/m
EE	39,00 US\$/m
Mano de Obra	71,50 US\$/m
Mantenimiento	108,60 US\$/m
Costo de capital	600,00 US\$/m
Fortificación	
Jumbo	0,00 US\$/m
Camión Plataforma	0,00 US\$/m
Lechadora	0,00 US\$/m
Pernos	46,50 US\$/m
Lechada	23,25 US\$/m
Malla	41,07 US\$/m
Aceros de perforación	3,88 US\$/m
Mano de Obra	0,00 US\$/m
Extracción de Marina	
Camiones	85,80 US\$/m
Equipos de Apoyo	21,45 US\$/m
Mano de Obra	19,97 US\$/m

Servicios	
S/E eléctricas	0,00 US\$/m
Red de agua	4,25 US\$/m
Red de aire	7,20 US\$/m
mangas de Ventilación	10,60 US\$/m
Red drenaje	7,20 US\$/m
Equipos de Apoyo	8,47 US\$/m
Camión Mixer	0,23 US\$/m
Compresor	1,22 US\$/m
Herramientas	0,85 US\$/m
EE servicios	10,78 US\$/m
Materiales varios	41,52 US\$/m
Mano de Obra	26,62 US\$/m
<b>Costos de Avances con TBM</b>	
<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>	<b>1374,96 US\$/m</b>
<b>Gastos Generales</b>	<b>46%</b> <b>632,48 US\$/m</b>
<b>Utilidades</b>	<b>8%</b> <b>28,87 US\$/m</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>2036,32 US\$/m</b>

Cuadro 7. Resumen de costos equipo TBM.

Al realizar la tabla anterior de costos operacionales, se calculo en base a un túnel de diámetro de 5.0 X 5.0 metros, por lo que debemos multiplicar el COSTO FINAL TOTAL POR 3 para amplificarlo al túnel requerido de 12 metros hábiles (13 metros incluyendo espacios de dovelas), dando un resultado de:

**\$6.108 USD POR CADA METRO DE AVANCE (SIN INCLUIR DOVELAS)**

Cada tuneleadora tiene un costo de diseño y fabricación de \$37.500.000 USD para las medidas y especificaciones de roca solicitadas.

El transporte desde el país de fabricación hasta el destino final, más el ensamblaje de las máquinas, tiene un costo de \$3.000.000 USD de dólares por cada tuneleadora y puede tardar hasta 3 meses en transporte y 2 meses en ensamblaje.

Instalar una fábrica de dovelas a las afueras del túnel \$4.000.000 USD, al estimar el valor de fortificación con dovelas por cada metro de avance se obtiene un valor de \$7.000 dólares app.

Costos total de dovelas para fortificación de ambos túneles \$190.000.000 USD

# Costos mediante TBM

Total

## AGUA NEGRA

Elemento	Costo
2 TBM 13 m diámetro (1 m de uso en dovelas)	\$81.000.000,00
COSTOS X AVANCE DE TBM (13.900 X 2= 27.800 metros)	\$235.863.326,00
FÁBRICA Y COSTOS TOTALES DE DOVELAS DE FORTIFICACIÓN	\$194.000.000,00
<b>COSTO TOTAL MEDIANTE TBM</b>	<b>\$510.863.326,00</b>

En resumen, al usar el método de perforación mediante Tuneleadora, tendríamos **un costo total de \$510.863.326 USD**, esto considerando el mejor de los casos en donde se puede proceder a perforar ambos túneles mediante TBM, sin la necesidad de incorporar el sistema tradicional en la perforación. En cuanto al tiempo se indica que en un proceso óptimo, estas máquinas tendrían un nivel promedio de perforación de 7,5 metros diarios de avance por cada frente de trabajo, debido al gran diámetro requerido para el túnel y la roca dura existente en el terreno a operar. Por lo que si hablamos de plazo, **se calculan 6 años de trabajo** considerando tiempos muertos de cambio de turno, colaciones, mantenciones obligatorias, y sucesos inesperados en estas gigantescas máquinas. Se debe mencionar que este proceso operacional involucra solamente las perforaciones en línea recta de los túneles solicitados y no incorpora ningún tipo de estocada, ni peatonal, ni vehicular, debido al pequeño radio de giro en que debiesen actuar las TBM, radio imposible para este tipo de maquinarias.

El resultado muestra que la construcción de los túneles mediante el uso de máquinas tuneladoras, tiene un costo que bordea en un 15% más al método NATM. Esta diferencia puede justificarse por la gran inversión que requiere la implementación de este método, partiendo por la compra de la tuneladora, la maquinaria auxiliar, la fábrica de dovelas y las instalaciones de faena, hasta llegar a la propia operación del escudo, que requiere de personal especializado de mucha experiencia, además de los insumos y herramientas que se cambian constantemente.

DADO LO ANTERIOR SE INFORMA QUE **EL MÉTODO DE PERFORACIÓN MEDIANTE TUNELEADORAS (TBM'S), NO ES APTO EN FORMA ÚNICA, PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO "AGUA NEGRA"**, DEBIDO A NO ESTAR FACULTADO TÉCNICAMENTE PARA EL DESARROLLO COMPLETO DE LOS PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DE ESTA OBRA.

### Cálculo de costos mediante método de Perforación y Tronadura tradicional.

El túnel diseñado para el uso de relleno cementado, requiere las siguientes inversiones, divididas en inversiones de equipos túnel, equipos planta (se incluye infraestructura) y desarrollo de infraestructura del túnel. Estos datos se despliegan en las Tabla 13. Los precios de todos los equipos se obtuvieron del libro “Mine and Mill Equipment Cost” (2011).

**Tabla 13** Inversión equipos para túnel mediante sistema tradicional

<b>Equipo Mina</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario [US\$]</b>	<b>Precio Total [US\$]</b>
<b>Perforadora Jumbo</b>	4	\$ 549,000.00	\$ 2,196,000.00
<b>Perforadora Simba</b>	4	\$ 449,000.00	\$ 1,796,000.00
<b>LHD 7 [yd<sup>3</sup>] tele comandado</b>	6	\$ 800,000.00	\$ 4,800,000.00
<b>LHD 5 [yd<sup>3</sup>]</b>	2	\$ 300,000.00	\$ 600,000.00
<b>Camión Toro 30 ton</b>	16	\$ 485,900.00	\$ 7,774,400.00
<b>Camión de Explosivos</b>	4	\$ 554,000.00	\$ 2,216,000.00
<b>Camión Servicios</b>	4	\$ 242,000.00	\$ 968,000.00
<b>Camionetas de Servicio</b>	8	\$ 50,000.00	\$ 400,000.00
<b>Ventiladores Principales</b>	6	\$ 588,000.00	\$ 3,528,000.00
<b>Ventiladores Auxiliares</b>	6	\$ 174,000.00	\$1,044,000.00
<b>Camión Shotcrete</b>	4	\$ 396,000.00	\$ 1,584,000.00
		<b>TOTAL</b>	<b>\$ 26,906,400.00</b>

Estos cálculos son solo para uno de los dos túneles que se deben desarrollar, es por ello que se deben multiplicar por dos estos cálculos totales, para así considerar el equipo a utilizar en forma paralela en ambos túneles requeridos para la construcción del proyecto “AGUA NEGRA”.

$$\$26.906.400 \text{ USD} \times 2 = \$53.812.800 \text{ USD}$$

**COSTOS TOTALES DE EQUIPOS PARA OPERAR EN PROYECTO AGUA NEGRA MEDIANTE EL MÉTODO DE PERFORACIÓN Y TRONADURA.**

Consideraciones para el cálculo del rendimiento de avance del método Convencional	
Turnos por día	2
Horas Disponibles por turno	10
Rendimiento de la fortificación	12,2 m <sup>2</sup> /hora
Distribución de Pemos	1,2m entre corridas
	1,2m entre pernos
Rendimiento marina	0,03 horas/m <sup>3</sup>
Tiempo de carga por disparo	1,5 horas
Aislamiento y tronadura	0,7 horas
Acuñadura	1,5 horas
Ventilación	1 hora
Distancia de la frente al punto de acopio	200 m

Cuadro 3. Criterios para el cálculo del rendimiento de avance del método convencional

El detalle de los costo de excavación de este método de observa a continuación, cabe destacar que es a partir de una sección de 5.0 x 5.0 metros.

Costo Tunnel con Perforación y Tronadura	
2 turnos de 12 horas	
Costo equipamiento	
Jumbo 2 bombas	84,94 US\$/m
Plataforma del camión	13,17 US\$/m
LHD 6 yd <sup>3</sup>	61,58 US\$/m
Descarga camion	116,80 US\$/m
Compresor	8,92 US\$/m
Costo operacionales equipos	
Jumbo 2 bombas	39,47 US\$/m
Plataforma del camión	15,59 US\$/m
LHD 6 yd <sup>3</sup>	76,54 US\$/m
Descarga camion	73,56 US\$/m
Compresor	7,56 US\$/m
Materiales e insumos	
Energia electrica	25,66 US\$/m
Agua	2,50 US\$/m
Explosivos	111,11 US\$/m
Steel for blasting	65,78 US\$/m
Steel for rock bolting	18,00 US\$/m
Diesel	56,00 US\$/m
Rock bolts	50,00 US\$/m
Mortar	25,00 US\$/m
Malla	39,98 US\$/m
Mortar inyector	5,90 US\$/m

Labores	
Perforación y Tronadura	42,47 US\$/m
Carga	21,24 US\$/m
Descarga	42,47 US\$/m
Movimiento del Material	42,47 US\$/m
Servicios	42,47 US\$/m
Servicios	
Planta Eléctrica	38,22 US\$/m
Red de agua	4,25 US\$/m
Red de aire	7,20 US\$/m
Ventilación	10,60 US\$/m
Red de drenaje	7,20 US\$/m
Soporte de equipamiento	40,00 US\$/m
Herramientas	3,55 US\$/m
Servicios eléctricos	34,40 US\$/m
Varios	91,62 US\$/m
<b>Costo Tunel con Perforación y Tronadura</b>	
<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>	<b>1326,22 US\$/m</b>
	<b>56,97 US\$/m<sup>3</sup></b>
Gastos Generales	46%
	610,06 US\$/m
Utilidades	8%
	106,10 US\$/m
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>2042,38 US\$/m</b>
	<b>87,73 US\$/m<sup>3</sup></b>

Cuadro 6. Resumen de costos equipo P&T.

Al realizar la tabla anterior de costos operacionales, se calculo en base a un túnel de diámetro de 5.0 X 5.0 metros, por lo que debemos multiplicar el COSTO FINAL TOTAL POR 3 para amplificarlo al túnel requerido de 12 metros hábiles (13 metros incluyendo espacios de dovélas), dando un resultado de:

**\$6127 USD POR CADA METRO DE AVANCE (SIN INCLUIR FORTIFICACIÓN)**

# Costo TOTAL mediante P&T

Total

## AGUA NEGRA

Elemento	Costo
EQUIPO DE P&T PARA AMBOS TUNELES	\$53.812.800,00
COSTO DE AVANCE POR CANTIDAD TOTAL DE METROS	\$206.267.593,60
COSTO DE FORTIFICACIÓN COMPLETA	\$180.000.000,00
<b>COSTO TOTAL MEDIANTE P&amp;T</b>	<b>\$440.080.393,60</b>

En resumen, al usar el método tradicional de PERFORACIÓN Y TRONADURA (P&T), tendríamos **un costo total de \$440.080.393 USD**, esto considerando el desarrollo completo de galerías, estocadas (vehiculares y peatonales), chimeneas de ventilación, galería subterránea de ventilación y el laboratorio científico. En cuanto al tiempo se indica que en un proceso óptimo, este método de perforación tradicional tendría un nivel promedio de perforación de 4 metros diarios de avance por cada frente de trabajo, debido al gran diámetro requerido para el túnel y la roca dura existente en el terreno a operar. Por lo que si hablamos de plazo, **se calculan 10 años de trabajo** considerando tiempos muertos de cambio de turno, colaciones, mantenciones obligatorias, y sucesos inesperados en el desarrollo del túnel. Se debe mencionar que este proceso operacional involucra solamente las perforaciones en línea recta de los túneles solicitados y no incorpora ningún tipo de estocada, ni peatonal, ni vehicular, debido al pequeño radio de giro en que debiesen actuar las TBM, radio imposible para este tipo de maquinarias.

DADO LO ANTERIOR SE INFORMA QUE **EL MÉTODO TRADICIONAL DE PERFORACIÓN Y TRONADURA NO ES APTO**, EN FORMA ÚNICA, **PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO “AGUA NEGRA”**, DEBIDO A ENCONTRARSE POR SOBRE EL LÍMITE DE PLAZOS DE CONSTRUCCIÓN PARA ESTA OBRA.

Debido a los antecedentes entregados anteriormente, **se procede a realizar un estudio técnico-económico de ambos métodos combinados**, para la realización y el correcto desarrollo del proyecto “AGUA NEGRA”.

## **MÉTODO COMBINADO.**

### **ANTECEDENTES PRINCIPALES**

En este proyecto son los siguientes:

- - Longitud: 13.9 km.
- - Tipología estocadas: principalmente Cut and Cover.
- - Geología: El suelo que predomina corresponde al típico suelo aluvial del cono de deyección del río Rímac, grava pobremente gradada con arena y cantos rodados (GP)
- - Método constructivo de túneles: Escudos EPB y Slurry, pequeño tramo NATM.
- - Presupuesto total: USD 1.550 millones.

Por la cercanía y las características geológicas, este proyecto de la ciudad de Lima servirá como base de datos para la determinación del costo esperado al aplicar el mismo método de construcción en Chile, ya que el costo de construcción y traslado de una tuneladora, ya sea desde EEUU, Europa o Asia, debiera ser muy similar. Por otro lado, al tratarse de licitaciones internacionales, los contratistas que participan en ellas son prácticamente los mismos en toda la región.

<b>ITEM</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
A. Infraestructura	Miles USD	2.936.103
B. Imprevistos	Miles USD	293.610
C. Gastos Accesorios a la Realización de la Infraestructura	Miles USD	234.888
D. Materia Rodante	Miles USD	871.500
E. Expropiaciones	Miles USD	217.500
Base Imponible Total (A+B+C+D+E)	Miles USD	4.553.602
IGV (Impuesto)	Miles USD	819.648
<b>INVERSION TOTAL</b>	<b>Miles USD</b>	<b>5.373.250</b>

El ítem infraestructura incluye la construcción de todos los elementos que forman la nueva línea, como estaciones, pozos y túneles. La Tabla 9.14 muestra el detalle de las distintas partidas que integran la infraestructura para el proyecto del Metro de Lima, de aquí se desprende el monto disponible para la construcción del túnel interestación, información clave para poder determinar el costo unitario del túnel.

Un monto cercano a los 1.550 millones de dólares es el destinado para la construcción del túnel completo del proyecto “AGUA NEGRA”, 13.9 kilómetros que se excavarán con tuneladoras y método NATM.

En esta instancia utilizaremos parámetros económicos ya descritos anteriormente que nos servirán como base para el desarrollo de los costos totales del método combinador de TBM y P&T.

Una información clave que se debe agregar es que el sector donde existen curvas de radios más prominentes, y de imposible acceso para las tuneleadoras es por el lado chileno, por lo que la perforación mediante sistema tradicional debiese empezar por ahí, y por una longitud no mayor a 4 kilómetros en cada túnel.

Otro beneficio a agregar es que gracias al presupuesto económico que se maneja, se pueden incorporar dos tuneleadoras gigantes que den la capacidad de perforar 13 metros de diámetro para al mismo tiempo ir instalando dovelas de fortificación que ocuparan 0,5 metros en cada lado, dejando disponible los 12 metros de diámetro solicitados por el mandante. También es beneficioso que desde el lado Argentino la cota de trabajo es superior a la del lado Chileno, por lo que las TBM’s, tendrían un punto a favor para su desplazamiento hacía el interior de cada túnel.

Para determinar los costos totales del método combinado, es necesario que calculemos los costos independientes a cubrir con cada método en particular, estos son directamente relacionados con la longitud en que se utilizará cada uno, para posteriormente hacer una sumatoria de ellos y dar con el costo final de la obra.

En lo que respecta al método tradicional de perforación y tronadura es necesario comprar todos los equipos que se describieron en la evaluación económica anterior, para utilizar estos de forma paralela al uso de las TBM's por el otro lado fronterizo. El avance en los frentes de trabajos a través del método tradicional no será superior a los 4 kilómetros en cada túnel y a esto se le deben agregar 5 kilómetros más en labores auxiliares como las estocadas vehiculares y peatonales, la chimenea de ventilación por el lado argentino, el sub-túnel de ventilación de por el lado chileno y el laboratorio científico subterráneo "ANDES" (Agua Negra Deep Experiment Site). Estas labores se deben iniciar por el lado fronterizo Chileno, debido a la complejidad del inicio del proyecto en el sector y al diseño de curvas de menor rango incluidas en el proyecto.

En cuanto al sistema de TBM respecta, se deben adquirir dos tuneledoras que permitan la perforación de un diámetro de 13 metros para el posterior recubrimiento de fortificación por dovelas, dejando habilitado los 12 metros de diámetro que solicita el mandante; las máquinas se deben comprar con sistema de compra integral, el que incluye el diseño de estas, la construcción, transporte, instalación, montaje, y el equipo de profesionales experimentados que permitan el correcto y óptimo desarrollo de las TBM's. Para calcular los costos que nos genera la utilización de este sistema es necesario agregar en la sumatoria del método, la compra de las dos máquinas completas con todo lo anteriormente descrito, también los valores totales de avances por la cantidad de metros que no debería superar los 10 kilómetros de longitud por cada túnel desde la frontera Argentina a la Chilena, más los costos de fortificación del túnel y sus labores auxiliares por completo.

# COSTO TOTAL MÉTODO COMBINADO

Total

## AGUA NEGRA

Elemento	Costo
EQUIPOS DE PERFORACIÓN Y TRONADURA PARA AMBOS TUNELES	\$53.812.800,00
2 TBM INSTALADAS DE 13 m (Dovelas ocupan 1 m) DE DIÁMETRO (SIN FORTIFICACIÓN)	\$81.000.000,00
COSTO DE AVANCE CON TBM (10.000 m X 2 = 20.000 m)	\$169.680.000,00
COSTO DE AVANCE CON P&T (13.000 m incluidos ambos túneles, estocadas, chimeneas, galerías Subterráneas y cavernas científicas de laboratorios)	\$79.651.000,00
COSTO DE FORTIFICACIÓN COMPLETA	\$204.126.200,00
<b>COSTO TOTAL MEDIANTE P&amp;T</b>	<b>\$588.270.000,00</b>

**COSTO TOTAL DEL TÚNEL:**

$$C_{\text{túnel}} = 588.270.000 \text{ USD}$$

$$C_{\text{túnel}} = C_{\text{NATM}} + C_{\text{TBM}}$$

En resumen, al usar el método tradicional de **PERFORACIÓN Y TRONADURA (P&T)**, **combinado con el método de PERFORACIÓN MEDIANTE TUNELEADORA (TBM)**, tendríamos **un costo total de \$588.270.000 USD**, esto considerando el desarrollo completo de galerías, estocadas (vehiculares y peatonales), chimeneas de ventilación, galerías subterránea de ventilación y el laboratorio científico. En cuanto al tiempo, se indica que en un proceso óptimo, este **método de perforación** tendría un nivel de avance mixto, debido a que cada método maneja su propio promedio de avance particular, pero hemos logrado estimar el tiempo operacional total que debería tomar el desarrollo del proyecto "AGUA NEGRA", por lo que si hablamos de plazo, **se calculan 6 años de trabajo** considerando tiempos muertos de cambio de turno, colaciones, mantenciones obligatorias, y sucesos inesperados en el desarrollo del túnel. Se debe mencionar que este proceso de desarrollo operacional involucra la obra bruta completa

de construcción y fortificación de cavernas, túneles, chimeneas, estocadas, y toda obra que se relacione con la perforación y fortificación de algún nivel o sub-nivel subterráneo, pero **no contempla la obra vial de diseño y pavimentación de calzadas de ningún tipo, ni ninguna obra que no se halla mencionado anteriormente.** Por lo que queda un plazo disponible de alrededor de 4 años y un poco más de 900 millones de dólares, para el desarrollo de la segunda parte de la obra, la cual se basa en establecer instalaciones definitivas, instalar sistemas de ventilación y de emergencias, pavimentación y definición de bermas, calzadas, carreteras y todo lo necesario para lograr la operatividad del túnel.

DADO LO ANTERIOR SE INFORMA QUE **EL MÉTODO COMBINADO DE PERFORACIÓN** QUE INVOLUCRA TBM Y P&T, **ES APTO Y VIABLE**, EN FORMA ÚNICA Y EXCLUSIVA, **PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO “AGUA NEGRA”**, DEBIDO A ENCONTRARSE DENTRO DE LOS RANGOS PARA DAR CUMPLIMIENTO A ESTE MEGA PROYECTO.

## **Comparación Perforación y tronadura v/s TBM (según indicadores).**

### **Ventajas y desventajas de cada método.**

#### **Perforación y tronadura:**

- **Interferencias**

Presenta varias interferencias producto de los períodos de evacuación e instalación entre las distintas tareas que componen el procedimiento de trabajo. Las principales son antes y después del disparo y el posicionamiento de equipos.

- **Logística asociada**

Necesita un adecuado control de la logística requerida, debido a los múltiples equipos involucrados.

- **Tiempos de operación efectivos**

Bajo tiempos de operación efectivos producto del gran número de interferencias presentes.

- **Mano de obra requerida**

9 personas por turno para perforación, fortificación, carguío, transporte y servicios.

- **Flexibilidad**

Alta flexibilidad en traslado (todos los equipos involucrados son mecanizados), como a distintos diseños y tamaño de labores. Alta flexibilidad y adaptación a distintas durezas y características de la roca.

- **Construcciones adicionales**

Equipos que permiten el tránsito y posicionamiento sin necesidad de labores adicionales para ello.

#### **\*Constantes mínimas de aplicabilidad**

Este método no presenta restricciones en cuanto al diseño de los diferentes niveles para operar.

- **Factor seguridad y calidad de trabajo**

A nivel de seguridad, este método respecto a los otros representa la mayor probabilidad de ocurrencia de incidentes, principalmente debido a la presencia de explosivos en el método.

#### **Tunnel Boring Machine (TBM)**

- **Interferencias**

Baja interferencia puesto que el equipo ejecuta de manera simultánea la excavación y fortificación.

- **Logística asociada**

Presenta un potencial importante en este método debido a las variadas tareas que la TBM ejecuta simultáneamente.

- **Tiempos de operación efectivos**

Potencial importante en cuanto a los tiempos de operación efectiva debido a que el equipo ejecuta las distintas tareas, por lo que no hay grandes interferencias.

- **Mano de obra requerida**

Va a depender del tamaño y características de la excavación.

- **Flexibilidad**

Bajísima flexibilidad en el traslado y reposicionamiento (máquinas de 60 mt de largo que requieren radios de curvatura de 40 metros). Alta flexibilidad en cuanto a la posibilidad de excavar en distintas geologías.

- **Construcciones adicionales**

Debido a la dimensión de estas máquinas, su montaje suele demorar dos meses, además se necesita para ello una grúa de gran tonelaje y, en ocasiones, el desarrollo de la primera parte del túnel por métodos tradicionales.

- **Constantes mínimas de aplicabilidad**

Necesita túneles de un largo mínimo para que sea contendiente su instalación, de acuerdo a lo visto en la pasantía, sobre 3000 metros.

- **Factor seguridad y calidad de trabajo**

Menor probabilidad de ocurrencia de incidentes respecto al método convencional, debido principalmente a la eliminación del uso de explosivos, y mejores condiciones operacionales al eliminar la presencia de polvos y gases post tronadura.

### **Posibles sectores de aplicación de las TBM**

Dentro de los múltiples sectores de aplicación de la tecnología de las TBM en Chile, se pueden destacar los siguientes:

- Niveles de ventilación, acarreo y transporte de grandes minas en explotación.
- Dentro de los niveles de ventilación, esta tecnología tiene un alto potencial, ya que genera paredes lisas lo que favorece la circulación de aire a través de los túneles.
- Accesos principales de nuevos proyectos mineros.
- Realización de los túneles de las nuevas líneas y extensiones del metro de Santiago.

- Construcción de colectores de aguas servidas.
- Túneles camineros.

En todos estos, se pueden lograr altos rendimientos promedios, los que disminuye significativamente los tiempos de realización de los trabajos.

Cabe destacar que en Europa, el uso de estas máquinas se ha masificado para la construcción del metro, reemplazando al método NATM.

## Conclusiones y recomendaciones

Con toda la sumatoria de información entregada en los capítulos anteriores, se determina que no existe posibilidad alguna de definir y planificar el desarrollo del proyecto "AGUA NEGRA" a través de un solo método de perforación, debido a que si bien el tradicional sistema de perforación y tronadura se adecua a los costos, es muy extenso en cuanto a los tiempos destinados para el fin de la obra, por lo que no se enmarca en los parámetros solicitados, y a su vez, el tecnológico e innovador sistema de perforación de avance mediante tuneadoras se adecua al presupuesto y cumpliría con los plazos para entrega, pero este, no permite el desarrollo a cabalidad de los planos del proyecto, que involucran múltiples estocadas de interconexión entre los túneles (peatonales y vehiculares), el desarrollo de chimeneas de ventilación, de galerías subterráneas al túnel principal, de laboratorios científicos auxiliares y varios otros, siendo muy pequeños los radios de giro para estas gigantescas máquinas de más de 150 metros de longitud.

El uso de las TBM representa impactos positivos a nivel de seguridad operacional (eliminación de tronadura y daños secundarios en labores), mejora las condiciones medioambientales (disminución de polvos y gases post tronadura) y mejora los contornos de las labores, pero en este proyecto en particular no se puede operar únicamente con este sistema debido a las características del proyecto, haciendo de este, una mega obra mundial y la más grande de Latinoamérica.

A través de este largo y extenso estudio hemos logrado determinar que se hace obligatorio el uso del método combinado, que involucra por completo los dos sistemas de perforación estudiados, actuando estos de forma paralela, comenzando con la perforación mediante el sistema tradicional de P&T desde el lado fronterizo Chileno (3.600 msnm) en dirección hacia Argentina, dando avance a una longitud inicial de 3 kilómetros, pudiendo esta ampliarse hasta 4, de forma paralela y simultánea en ambos túneles paralelos, para, al mismo tiempo iniciar la perforación desde la frontera Argentina (4.100 msnm) en dirección a Chile, mediante el sistema de TBM, perforando simultáneamente en ambos túneles, gracias a la potencia y tecnología de 2 gigantescas máquinas de más de 150 metros de longitud cada una, que tienen la virtud de perforar y fortificar al mismo tiempo (TBM Escudo); estas trabajarán prácticamente sin detenerse, por alrededor de 10 kilómetros de longitud, hasta lograr encontrarse con las perforaciones que vendrán desde el lado Chileno, dando origen así, a una gran extensión subterránea que formará la parte fundamental y ente principal faltante para la composición del corredor Bioceánico que logrará la conexión desde el océano Pacífico al Atlántico, rompiendo fronteras e interconectando países, para el directo beneficio económico de las naciones involucradas y de múltiples factores positivos, explicados a cabalidad es este estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

- AETOS (1989). “Diccionario Glosario Técnico de Túneles y Obras Subterráneas”. Inglés-Español. AETOS, Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas.
- Alonso, E. “Apuntes de la asignatura de Túneles. Teoría 1a Parte.:Historia de los túneles”. UPC, E.T.S.E.C.C.P.B. Edición 2002.
- COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE MADRID. “Construcción: Primeros túneles”.  
Dirección: [http://www.coiim.es/enla/Industria/primeros\\_tuneles.htm](http://www.coiim.es/enla/Industria/primeros_tuneles.htm)
- Juncà Ubierna, J. A. (1997). Capítulo 1, Historia de los túneles y su evolución tecnológica. “Manual de Túneles y Obras Subterráneas”. Editor: Carlos López Jimeno et al. Madrid : Gráficas Arias Montano, 1997 (1082p.) 1a edición.
- Miliarium.com Ingeniería Civil y Medio Ambiente. “Historia y Grandes Hitos de la Ingeniería de Túneles” Dirección:  
<http://www.miliarium.com/Monografias/Tuneles/Welcome.asp>
- Amberg, F. 2015. Selection of TBMs – Case Histories. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 115 diap.
- Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES). 2000. New Recommendations on Choosing Mechanized Tunneling Techniques. Francia. 32 pp.
- Audureau, J. 2015. Tunnel & Site Logistics. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES- CHILE). 40 diap.
- Babendererde S., Hoek E., et al. 2005. EPB-TBM Face Support Control in the Metro do Porto Project, Portugal. Proceedings of the RETC 2005. Seattle.
- Babendererde, L. 2015. Advantages or Disadvantages of Mechanized Tunnelling. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 50 diap.
- FCC Construcción. 2007. Informe Técnico 116: Tuneladora Tizona – Circunvalación Sur M-30 Madrid. España. 101 pp.
- Fernández R. 2011. Innovaciones tecnológicas en la construcción con tuneladoras. Revista de Obras Públicas, N°3525, 2011. España. pp 45-66.
- Fowler, M., et al (ed). 2012. North American Tunneling 2012: Proceedings of the North American Tunneling Conference 2012. Indianapolis, Indiana, USA: Society of Mining, Metallurgy & Exploration. 869 pp.
- Giraldo, E. 2010. Las máquinas tuneladoras tipo “TBM” como alternativa al sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles caso: Desarrollo de túneles en Yuncan. Master Thesis. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. 256 pp.
- Godos, C. 2013. Concesión de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett – Av. Gambetta de la Red Básica del Metro de Lima y Callao. [diapositivas]. Perú, Agencia de Promoción de la Inversión Privada. 35 diap.

- Gomes, A. 2015. Situation of Mechanized Tunneling in Chile. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 33 diap.
- González del Tánago J. 2013. Ingeniería de detalle de la obra civil de la Línea 6 del Metro de Santiago (Chile). 2° Conferencia Internacional Túneles y Construcciones Subterráneas. Lima, Perú. 41 diap.
- 113
- Grasso, P. 2015. Risk & Safety Management in Tunnelling. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 133 diap.
- Guglielmetti, V (ed). 2008. Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control. Londres, UK: Taylor & Francis Group. 528 pp.
- Herrenknecht. 2015. Example 2: Soft ground tunnelling for subway. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 60 diap.
- Höfer-Öllinger, G. 2015. Ground Investigations for TBM Projects. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 53 diap.
- Lawrence, R., et al (ed). 2010. North American Tunneling 2010: Proceedings of the North American Tunneling Conference 2010. Portland, Oregon, USA: Society of Mining, Metallurgy & Exploration. 994 pp.
- Leyton, F., Sepúlveda, S., et al. 2011. Seismic zonation of the Santiago Basin, Chile. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile.
- López Jimeno, C (ed). 1997. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. Madrid, España: Entorno Gráfico. 1082 pp.
- Melis M. 2005. Las tuneladoras de 3 carriles de la M-30. Revista de Obras Públicas, N°3454, 2005. España. pp 71-106.
- Metzger C., Colzani G., et al. 2009. Selection, design and procurement of North America's Largest Mixshield TBM for Portland, Oregon's East Side CSO Tunnel. Proceedings of the RETC 2009. Las Vegas.
- MINTRA Comunidad de Madrid. 2007. La Ejecución de Túneles con Tuneladora en el Plan de Ampliación de la Red del Metro de Madrid 2003-2007. Madrid. 21 pp.
- Ozdemir, L (ed). 2004. North American Tunneling 2004: Proceedings of the North American Tunneling Conference 2004. Atlanta, Georgia, USA: A.A. Balkema Publishers. 581 pp.
- Peila, D. 2015. Ground improvements in mechanized tunnelling. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 64 diap.
- Peila, D. 2015. Soil Conditioning & Slurry Operation. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 90 diap.
- Perri, G. 2008. Construcción mecanizada de túneles urbanos mediante TBM. Presentado en III Seminario Andino de Túneles, Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Túneles y Obras Subterráneas (ACTOS). 82 diap.

- 114
- Requena, M. 2011. Análisis del rendimiento y parámetros de una tuneladora. Master Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España. 106 pp.
- Robbins. 2015. Management & Examples of Difficult Hard Ground Projects. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 63 diap.
- Rocha H. 2013. Métodos constructivos de túneis metroviários: a experiência do Metro de São Paulo. Seminário Metrô em Curitiba – Contribuições da Engenharia. Brasil. Comité Brasileiro de Tuneis. 91 diap.
- Sáenz, I. 2007. Estimación de coste y plazo de ejecución en proyectos de túneles mecanizados. Minor Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España. 90 pp.
- SECTRA. 2013, Plan Maestro de Transporte 2025 Santiago. Santiago. 236 pp.
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. 2009. Operación y mantenimiento de escudos: PRESENTE Y FUTURO. Journal of Chemical Information and Modeling. Barcelona, España. 73 pp.
- Universidad de Chile. 2003. Incidencia Sísmica en Obras Civiles y Habitacionales de la Cuenca y Zona Cordillerana de Santiago. Proyecto FONDEF D0311066, 2003. Santiago, Chile.
- Vicario D. 2004. Obras de construcción de la Línea 9 del Metro de Barcelona. Tramo 4B. Sagrega – Gorg. Revista de Obras Públicas, N°3447, 2004. España. pp 25-31.

## LINKOGRAFÍA

<http://www.cosasexclusivas.com/2009/02/tuneladora-o-tbm-cifras-y-fotos.html>  
video de tuneledora interesante

<https://www.youtube.com/watch?v=Q41vzLjwZqM> como funcionan las tuneledoras al interior de la tierra

<https://www.youtube.com/watch?v=MUYdnzcQXhk> perforación, transporte y fortificación  
VIDEO

<https://ingenieriaenlared.wordpress.com/2013/01/03/bertha-la-tuneladora-mas-grande-del-mundo/> tuneledora mas grande del mundo