

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**ESTIMACION, CÁLCULO Y ANALISIS DE RATIOS DE  
COSTOS DIRECTOS DE EXCAVACIONES DE TUNELES  
POR EL METODO DE PERFORACION Y VOLADURA**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**MARIO IVAN PINO MENDOZA**

**Lima- Perú**

**2015**

## INDICE

RESUMEN.....	4
LISTA DE CUADROS.....	5
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS.....	8
<b>CAPITULO I: CONSIDERACIONES GENERALES.....</b>	<b>10</b>
1.1. ALCANCE Y APLICABILIDAD.....	10
1.2. CLASIFICACIÓN DE TÚNELES.....	10
1.3. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE LA ROCA.....	12
1.4. EQUIPOS DE EXCAVACIÓN DE TÚNELES.....	14
1.4.1. Equipos convencionales (Sistema Perforación y voladura).....	14
1.4.2. Excavación mecánica mediante tuneladoras (TBM) y máquinas de ataque puntual (rozadoras o martillos de impacto).....	18
1.5. PORTAL DEL TÚNEL (PÓRTICO DE ENTRADA, BOCAMINA, AFRONTONAMIENTO).....	19
1.6. INSTALACIONES AUXILIARES (SERVICIOS).....	21
<b>CAPÍTULO II: PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO - CICLO DE EXCAVACION.....</b>	<b>23</b>
2.1. TRAZO Y REPLANTEO DEL ESQUEMA DE TIRO DEL FRENTE.....	24
2.2. PERFORACIÓN DE LOS BARRENOS.....	24
2.3. CARGA DE LOS EXPLOSIVOS.....	25
2.4. VOLADURA (DISPARO, PEGA O TRONADURA).....	27
2.5. VENTILACIÓN O AIREACIÓN.....	27
2.6. DESQUINCHE, DESATE, PICOTONEO O SANEAMIENTO.....	27
2.7. LIMPIEZA O ELIMINACIÓN DE ESCOMBROS.....	27
2.8. SOSTENIMIENTO (SOPORTE).....	27
2.9. INSTALACIONES AUXILIARES.....	29
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGIA PARA LA ESTIMACION DE RECURSOS Y COSTOS.....</b>	<b>30</b>

3.1.	CONCEPTOS PREVIOS .....	30
3.1.1.	Costo Posesión o permanencia de equipos: .....	30
3.1.2.	Costo de Operación y mantenimiento:.....	30
3.1.3.	Costo de materiales e instalaciones auxiliares:.....	31
3.2.	ELABORACIÓN DE ESQUEMA GENERAL DEL PROYECTO.....	32
3.3.	SELECCIÓN DE EQUIPOS.....	33
3.3.1.	Sistema sobre rieles .....	33
3.3.2.	Sistema sobre neumáticos.....	34
3.4.	DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE EQUIPOS .....	35
3.4.1.	Equipos de cantidad fija:.....	35
3.4.2.	Cantidad de Camiones volquete: .....	35
3.4.3.	Cantidad de camiones mixer de bajo perfil: .....	36
3.4.4.	Cantidad de ventiladores: .....	36
3.4.5.	Cantidad de electrobombas: .....	40
3.5.	PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	42
3.5.1.	Posesión de equipos .....	42
3.5.2.	Operación de equipos.....	45
3.5.3.	Mano de obra: .....	46
3.5.4.	Materiales: .....	48
3.5.5.	Energía.....	50
<b>CAPITULO IV: ANALISIS DE LOS COSTOS EN DIFERENTES ESCENARIOS .....</b>		<b>52</b>
4.1.	RATIOS DE COSTOS POR METRO CÚBICO (M3) Y METRO LINEAL (ML) PARA DIFERENTES LONGITUDES DE TÚNEL.....	54
4.2.	RATIOS DE COSTOS POR METRO CÚBICO (M3) INCLUYENDO AL IMPACTO DE LA VENTILACIÓN.....	55
4.3.	RATIOS DE COSTOS POR METRO LINEAL (ML) INCLUYENDO AL IMPACTO DE LA VENTILACIÓN.....	59

4.4. VARIACION DE RATIOS DE COSTOS DEBIDO A VARIACIONES EN LA LONGITUD DE DISPARO .....	62
4.5. IMPACTO DEL COSTO DE LA ENERGIA EN LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES .....	64
<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>67</b>
5.1. CONCLUSIONES.....	67
5.2. RECOMENDACIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXOS .....	70

## RESUMEN

El presente informe de suficiencia describe brevemente los principales criterios técnicos y económicos que determinan el costo final de la excavación subterránea por el método de perforación y voladura.

Para esto, se explican primeramente los criterios técnicos que se deben considerar para posteriormente asignar un precio a los recursos utilizados.

Dentro de los criterios técnicos más importantes están la selección de la maquinaria a utilizar y la cuadrilla de mano de obra respectiva, así como también la selección de los equipos auxiliares como son los equipos de ventilación, los equipos de drenaje y los equipos para el suministro de energía.

Además de lo anterior descrito, se explica y analiza la variabilidad e impacto que tienen las condiciones del túnel en los costos directos de excavación subterránea. Las condiciones de mayor importancia son el tipo y calidad del macizo rocoso, la sección transversal del túnel y la longitud del túnel.

Para entender mejor el impacto que tienen las condiciones del túnel en su costo de excavación, se han estimado ratios de costos para diferentes casos. En cada caso se ha variado las condiciones de la excavación para así poder observar, mediante la ayuda de gráficos, las variaciones en los costos como resultado de los cambios de una condición a otra.

Por último, estos resultados gráficos se han interpretado para poder entender mejor el impacto que tienen los cambios de las condiciones iniciales, en el costo de la excavación subterránea.

## LISTA DE CUADROS

Tabla 1: Análisis del ciclo de excavación .....	36
Tabla 2: Calculo de caudal requerido.....	37
Tabla 3: Cuadro de factores de fugas de acuerdo a la condición del ducto.....	38
Tabla 4: Ejemplo de cálculo de capacidad de bombas de drenaje.....	41
Tabla 5: Conceptos principales de los costos de excavación subterránea .....	42
Tabla 6: Tiempos en minutos del ciclo de excavación por tipo de roca .....	43
Tabla 7: Ejemplo de cálculo de factores de incidencia .....	44
Tabla 8: Ejemplo de cálculo de costo de la cuadrilla de equipos.....	44
Tabla 9: Estimación de las horas de operación y sus factores de incidencia ...	45
Tabla 10: Estimaciones de tarifas de operación de la cuadrilla de equipos.....	46
Tabla 11: Estimaciones del costo de mano de obra por largo de túnel .....	48
Tabla 12: Ejemplo de estimación de costo de servicios por metro cúbico .....	48
Tabla 13: Ejemplo de incidencias de materiales .....	49
Tabla 14: Area por roca versus USD/m3 de explosivo .....	50
Tabla 15: Factores de potencia para cálculo de kW-h.....	51
Tabla 16: Ejemplo de cálculo de kW-h por m3 de roca .....	51
Tabla 17: Potencia recomendada de ventilador de acuerdo a largo y sección .	53
Tabla 18: Consideraciones del sostenimiento.....	53
Tabla 19: Costos por m3 para sección 5.00 x 5.00 .....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ejemplos de secciones de túneles .....	12
Figura 2: Clasificación geomecánica de Bieniawski .....	13
Figura 3: Parámetros del estado de las discontinuidades .....	13
Figura 4: parámetros de la orientación de las discontinuidades .....	14
Figura 5: perforadora manual tipo jackleg .....	14
Figura 6: perforadora mecanizada tipo jumbo .....	15
Figura 7: Cargador de bajo perfil – Scooptram .....	15
Figura 8: Pala eléctrica sobre llantas para carga continua .....	16
Figura 9: Pala eléctrica sobre rieles para carga continua .....	16
Figura 10: Pala Cavo .....	16
Figura 11: Cargador frontal .....	16
Figura 12: Camión de bajo perfil .....	17
Figura 13: Camión volquete de 15m3 .....	17
Figura 14: Shuttletrains - Equipo sobre rieles para transporte de escombros ..	17
Figura 15: Equipos auxiliares (ventilación, grupos electrógenos, etc) .....	18
Figura 16: TBM .....	18
Figura 17: Rozadora .....	19
Figura 18: Vista en planta de Portal .....	20
Figura 19: Vista en elevación del portal .....	20
Figura 20: Vista de perfil del Portal .....	20
Figura 21: Esquema de servicios auxiliares .....	22
Figura 22: Tuberías para aire, agua y desagüe .....	22
Figura 23: Esquema del ciclo de Perforación y Voladura .....	23
Figura 25: Zonas de un esquema de tiro .....	25
Figura 26: Esquema de carga de dinamitas .....	26
Figura 27: Secuencia de disparo, inicia en el cuele y termina con la zapatera .	26
Figura 28: Ejemplo de croquis de frentes de trabajos subterráneos .....	33
Figura 29: Calculo online de ventilación subterránea .....	38
Figura 30: Ejemplo de salida de datos del cálculo de ventilación .....	39
Figura 31: Factor de carga de explosivos de acuerdo a la roca y a la sección .	49
Figura 36: Costos unitarios por m3 para longitudes diferentes .....	54
Figura 41: Costos unitarios por ml para diferentes longitudes .....	55
Figura 42: Costos unitarios por m3 para L=500m .....	56
Figura 43: Costos unitarios por m3 para L=1,000m .....	56

Figura 44: Costos unitarios por m3 para L=1,500m .....	57
Figura 45: Costos unitarios por m3 para L=2,000m .....	57
Figura 46: Costos unitarios por m3 en roca 3 .....	58
Figura 47: Costos unitarios por m3 en roca 4 .....	58
Figura 48: Costos unitarios por ml para L=500m .....	59
Figura 49: Costos unitarios por ml para L=1,000m.....	60
Figura 50: Costos unitarios por ml para L=1,500m.....	60
Figura 51: Costos unitarios por ml para L=2,000m.....	61
Figura 52: Variación de costos por m3 por cambio de longitud de disparo.....	63
Figura 53: Porcentajes de variación de costos por m3.....	63
Figura 54: Costos por m3 considerando energía de Grupos Electrógenos .....	64
Figura 46: Costos por m3 considerando energía de subestación.....	64
Figura 56: Comparación porcentual de elegir G.E. o suministro por red .....	65

## LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS

<i>C:</i>	Coeficiente de rugosidad de Chezy
<i>cfm:</i>	Pies cúbicos por minute o “cubic feet per minute”
<i>D&amp;B:</i>	Perforación y Voladura o “Drill and Blast” (Perforación y voladura)
<i>Hp:</i>	Caballo de fuerza o “horsepower” (1hp =7 45.7 Watt)
<i>hr:</i>	Hora
<i>Km:</i>	Kilómetro
<i>kW:</i>	Kilowatts
<i>kW-h:</i>	Kilowatts-hora
<i>m.a.s.l.:</i>	Equivalente a m.s.n.m. (“meters above sea level”)
<i>m<sup>2</sup>:</i>	Metro cuadrado
<i>m<sup>3</sup>/min:</i>	Metros cúbicos por minuto
<i>m<sup>3</sup>/s:</i>	Metros cúbicos por segundo
<i>m<sup>3</sup>:</i>	Metro cúbico
<i>min:</i>	Minuto
<i>ml:</i>	Metro lineal
<i>MPa:</i>	Megapascales
<i>Pa:</i>	Pascales
<i>pcm:</i>	Pies cúbicos por minuto
<i>Q:</i>	Caudal o flujo volumétrico
<i>Rh:</i>	Radio hidráulico
<i>RMR:</i>	“Rock mass rating” (Clasificación geomecánica de Bieniawski)
<i>RQD:</i>	“Rock quality designation” (Indice de calidad de la roca)
<i>S:</i>	Pendiente o “slope” en inglés.
<i>TBM:</i>	Tunnel boring machine (tuneladora)
<i>USD:</i>	“United States Dollar” (Dólar americano)
<i>V [m/s]:</i>	Velocidad media del agua en tubería en metros por segundo.

## INTRODUCCION

De todas las actividades que desarrolla la ingeniería civil, que incluye la mecánica de suelos, geología y geotecnia, la excavación de túneles es sin duda, una de las obras de mayor complejidad y en la cual se aplican los estudios geológicos con más provecho y propiedad. Una vez determinado el sitio y las dimensiones básicas del túnel, los problemas o factores principales que afectan su diseño y construcción son: el factor geológico, el topográfico y el tecnológico.

Estas obras pueden tener un impacto económico muy alto dentro de la totalidad del costo de un proyecto, por lo que se convierten en elementos de decisión en cuanto a la ejecución de un proyecto. La excavación de túneles tiende a ser una actividad compleja, así como la estimación de los tiempos y rendimientos de ejecución de la excavación. Hay que señalar que es muy difícil encontrar análisis y estimaciones de ratios de costos sobre costos de excavación de túneles mediante perforación y voladura. Lo que se busca con el presente informe es presentar los criterios técnicos y económicos utilizados para estimar el costo de la excavación y así lograr un mayor entendimiento de los costos de excavación en túneles.

La estimación de acuerdo con esta metodología debe ser confiable dentro de los límites de aplicabilidad, sin embargo no se pretende darle un carácter de universal debido a la constante invención de nuevos procesos constructivos y cambios tecnológicos que van apareciendo a lo largo del tiempo. Por tal motivo, la metodología expuesta se puede aplicar únicamente a proyectos que utilicen procedimientos constructivos similares. Este modelo no aplica para túneles excavados con rozadoras ni con escudos TBM, su principal límite de aplicabilidad es a túneles excavados por el método de perforación y voladura.

La metodología que se desarrollará debe permitir el análisis de distintas configuraciones tanto de geometría del túnel como de la geología. Además de estos factores que son los de mayor importancia, hay otros factores como el agua (nivel freático) que alteran el correcto desenvolvimiento del ciclo de excavación. Su aparición afecta el ciclo de trabajo por completo dando como resultado atrasos o inclusive puede romper el ciclo de excavación y aumentando así significativamente el costo. También se puede mencionar otras características propias del terreno como fallas y fracturas importantes que son parte del riesgo geológico de la excavación de túneles.

## CAPITULO I: CONSIDERACIONES GENERALES

### 1.1. ALCANCE Y APLICABILIDAD

El presente informe tiene como propósito proveer criterios técnicos y económicos de tal manera que pueda ser una herramienta para el planeamiento y construcción de túneles excavados por el método de perforación y voladura. Si bien la tendencia mundial es excavar túneles de manera mecanizada con tuneladoras, en nuestro país se sigue utilizando predominantemente el sistema de perforación y voladura.

Los procedimientos que se describirán aplican para túneles excavados en roca, por lo tanto los túneles excavados en suelo no serán cubiertos en el presente informe.

Se abarcará los temas principales que influyen en el análisis del ciclo de excavación de túneles. El presente informe hace énfasis en el entendimiento de los procesos técnicos como una condición esencial para poder preparar los costos y a su vez comprender los ratios consecuentes.

Para los ratios de costos su aplicabilidad será para túneles excavados con perforación y voladura y de acuerdo a los límites de los siguientes parámetros:

Longitud hasta 2Km, sección transversal desde 18 hasta 36m<sup>2</sup>, excavación en una sola etapa, calidad de la roca desde un RMR=20 hasta RMR=100, equipos mecánicos sobre llantas, un solo frente de trabajo con una sola cuadrilla de trabajo, ventilación insuflante, energía para instalaciones proveniente de grupos electrógenos, eliminación de escombros, equipos de eliminación a botadero temporal a 300m

### 1.2. CLASIFICACIÓN DE TÚNELES

Dependiendo de su objetivo pueden ser:

**Túneles viales:** Son aquellos que se construyen con destino a carreteras, ferrocarriles, accesos vehiculares o sistemas de trenes metropolitanos.

**Túneles hidráulicos:** Son construidos para transportar agua, principalmente en hidroeléctricas, abastecimientos, sistemas de riego,

navegación, canalización, etc. Se caracterizan por llevar concreto y ser excavados con voladura controlada.

Túneles comunales: Son construidos principalmente en las ciudades con destino a pasos peatonales, cables, tuberías, etc.

Túneles mineros: Estas obras subterráneas son construidas para acceder a una explotación minera y sirve como vía para transportar materiales extraídos y suministros de explotación.

Túneles especiales: Se construyen con un objetivo en específico, pueden ser para instalar drenajes o equipos, investigaciones, realización de pruebas, maniobras militares, alojamiento de bandas transportadoras, etc.

Teniendo en cuenta su ubicación respecto a la geografía física del lugar, los túneles pueden ser en montaña, en plano o subacuáticos.

En montaña: Cuando la obra se realiza para atravesar un obstáculo montañoso del relieve.

En plano: Cuando el túnel se construye en terrenos planos, generalmente ubicados en las ciudades para dar solución a una vía o conducción.

Subacuáticos: Túneles que son construidos para salvar el obstáculo de una corriente superficial de agua, tales como un río, canal o estrecho de mar.

Dependiendo de la profundidad, también denominada cobertura o techo, los túneles pueden clasificarse en subsuperficiales, pocos profundos, medianamente profundos, profundos y muy profundos.

Subsuperficiales: Si la cobertura no supera los 50m.

Poco profundos: Si la profundidad se encuentra entre 50 y 200 m.

Medianamente profundos: Cuando la cobertura esta entre 200 y 500m.

Profundos: Construidos con coberturas de 500 a 1000m.

Muy profundos: Cuando las profundidades de construcción superan los 1000m.

Dependiendo de la sección: túneles de sección herraje, sección baúl, sección circular, rectangular, etc.

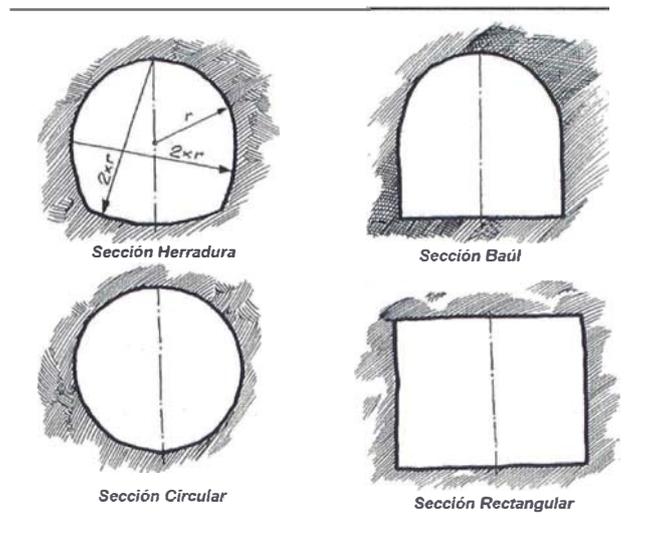


Figura 1: Ejemplos de secciones de túneles

### 1.3. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE LA ROCA

Existen diversos sistemas de clasificación geomecánica para la roca. Dentro de ellos podemos mencionar las clasificaciones de Terzaghi (1946), Deere (1967), Bieniawski (1973, 1989) y Barton et al (1974).

Para el presente informe se utilizará la clasificación de RMR (Rock mass rating) de Bieniawski. Esta clasificación fue desarrollada durante los años 1972-1973 y ha sido modificada en 1976 y 1979, en base a más de 300 casos reales de túneles, cavernas, taludes y cimentaciones. Actualmente se usa la edición de 1989 que coincide sustancialmente con la de 1979.

Para determinar el índice RMR de calidad de la roca se hace uso de los seis parámetros del terreno siguientes:

- 1) La resistencia a compresión simple del material
- 2) El RQD (Rock Quality Designation)
- 3) El espaciamiento de las discontinuidades
- 4) El estado de las discontinuidades
- 5) La presencia de agua

6) La orientación de las discontinuidades

El RMR se obtiene como la suma de las puntuaciones que corresponden a los valores de los seis parámetros mencionados.

Su valor puede oscilar entre 0 y 100. Bieniawski distingue cinco tipos o clases de roca según el valor del RMR.

- 1) Clase I:  $80 < \text{RMR}$ , Roca muy buena
- 2) Clase II:  $60 < \text{RMR} < 80$ , Roca buena
- 3) Clase III:  $40 < \text{RMR} < 60$ , Roca media
- 4) Clase IV:  $20 < \text{RMR} < 40$ , Roca mala
- 5) Clase V:  $\text{RMR} < 20$ , Roca muy mala

LA CALIDAD DE LA ROCA SE PUEDE ESTIMAR A PARTIR DE LOS SIGUIENTES CARACTERES Y VALORES						
1 RESISTENCIA A LA ROCA SANA (MPa)	Ensayo carga puntual	> 10	4-10	2-4	1-2	+
	Compr. simple	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25 1-5 < 1
VALORACIÓN		15	12	7	4	2 1 0
2 RQD %		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25
	VALORACIÓN	20	17	13	8	3
3 SEPARACIÓN DISCONTINUIDADES		> 2m	0.6-2	0.3-0.6m	0.06-0.2m	< 0.06m
	VALORACIÓN	20	15	10	8	5
4 ESTADO DE CLASAS		Muy rugosa Discontinuas Borde sano y duro	Ligeramente rugosa e < 1mm Borde duro	Ligeramente rugosa e < 1mm Bordes blandos	Rellenos e < 5mm Abiertas Continuas	Rellenos blandos e < 5mm Continuas
	VALORACIÓN	30	25	20	10	0
5 PRESENCIA DE AGUA	Caudal en 10m túnel	Nada	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min
	$\alpha_{\text{agua}}$	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5
	Estado	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Mojado	Fluyendo
VALORACIÓN		15	10	7	4	0

Figura 2: Clasificación geomecánica de Bieniawski

GUÍA PARA VALORAR EL ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (SEGUN BIENIAWSKI)					
PARÁMETRO	VALORACIÓN				
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD (PERSISTENCIA)	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m
	6	4	2	1	0
APERTURA	Nada	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm
	6	5	3	1	0
RUGOSIDAD	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave
	6	5	3	1	0
RELLENO	Ninguno	Relleno duro	Relleno duro	Relleno blando	Relleno blando
	6	4	2	1	0
ALTERACIÓN	Inalterado	Ligeramente alterado	Modestamente alterado	Muy alterado	Descompuesto
	6	5	3	1	0
VALORACIÓN		15	10	7	4

Figura 3: Parámetros del estado de las discontinuidades

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI: ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES						
DIRECCIÓN PERPENDICULAR AL EJE DEL TÚNEL				DIRECCIÓN PARALELA AL EJE DEL TÚNEL		CUALQUIER DIRECCIÓN
Exc. a favor de buzamiento		Exc. a favor de buzamiento				
Buzamiento 45° - 90°	Buzamiento 20° - 45°	Buzamiento 45° - 20°	Buzamiento 20° - 45°	Buzamiento 45° - 90°	Buzamiento 20° - 45°	Buzamiento 0° - 20°
Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Medio	Muy desfavorable	Desfavorable

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI: CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES						
DIRECCIÓN Y BUZAMIENTO		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	MEDIO	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
VALORACIÓN PARA	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Figura 4: parámetros de la orientación de las discontinuidades

## 1.4. EQUIPOS DE EXCAVACIÓN DE TÚNELES

### 1.4.1. Equipos convencionales (Sistema Perforación y voladura)

En este sistema de excavación se realizan perforaciones en la roca, la cual posteriormente se carga con explosivos para ejecutar la voladura, luego se hace la remoción de escombros y el sostenimiento.

#### A. Equipos de perforación:

En este sistema de excavación se realizan perforaciones en la roca, la cual se puede realizar con barrenadoras de pie de empuje o con equipos electrohidráulicos, llamados "jumbos", para la colocación de explosivos, cuya cantidad a utilizar depende de las condiciones geológicas del sitio.

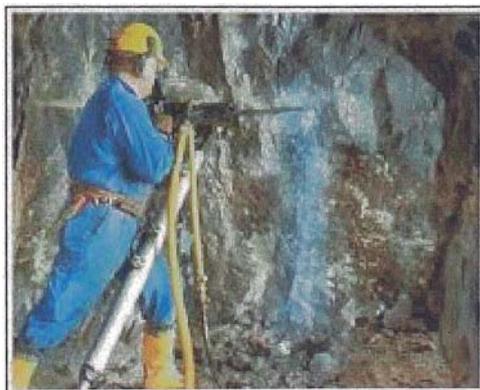


Figura 5: perforadora manual tipo jackleg



*Figura 6: perforadora mecanizada tipo jumbo*

B. Equipos de carga y transporte:

La extracción de los escombros se puede realizar de distintas maneras, equipo sobre llantas, por pequeños trenes sobre vía férrea, bandas transportadoras y otros. El parámetro restrictivo para que puedan operar estos equipos es el espacio disponible que tienen para realizar sus maniobras. Es por esto que muchos de estos equipos se fabrican de bajo perfil para poder operar en condiciones de poco espacio. El otro parámetro es la pendiente de la excavación. Cuando la pendiente es pequeña (<3%) se puede utilizar equipos sobre rieles. La ventaja de los equipos sobre rieles es que no contaminan pues se transportan y operan por medio de motores eléctricos. De esta manera se ahorra en ventilación.



*Figura 7: Cargador de bajo perfil – Scooptram*



Figura 8: Pala eléctrica sobre llantas para carga continua



Figura 9: Pala eléctrica sobre rieles para carga continua

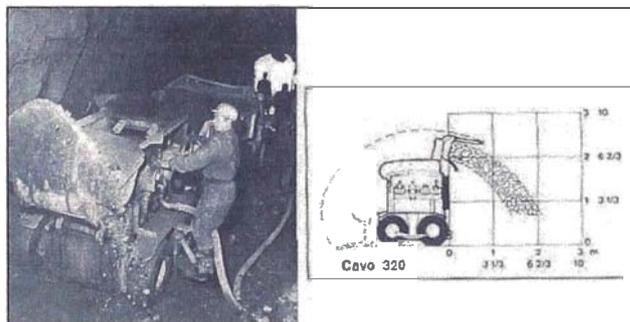
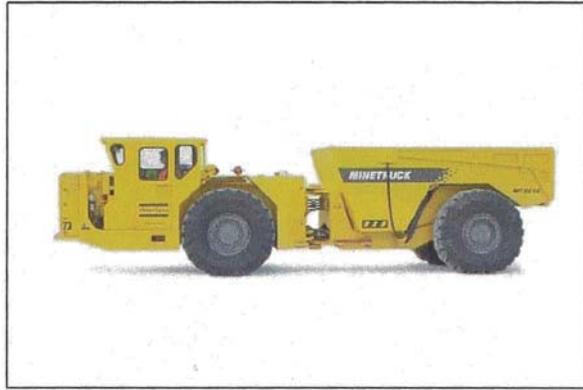


Figura 10: Pala Cavo



Figura 11: Cargador frontal



*Figura 12: Camión de bajo perfil*



*Figura 13: Camión volquete de 15m<sup>3</sup>*



*Figura 14: Shuttletrains - Equipo sobre rieles para transporte de escombros*

**Locomotoras**



**Plataforma elevadora**

**Ventiladores axiales**

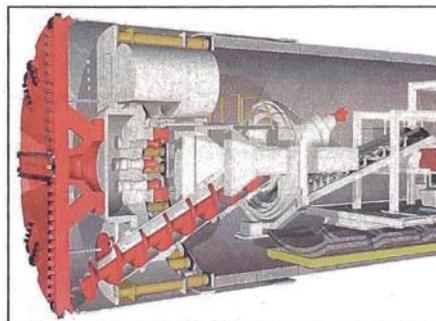


*Figura 15: Equipos auxiliares (ventilación, grupos electrógenos, etc)*

#### 1.4.2. Excavación mecánica mediante tuneladoras (TBM) y máquinas de ataque puntual (rozadoras o martillos de impacto)

##### A. Tuneladora (TBM):

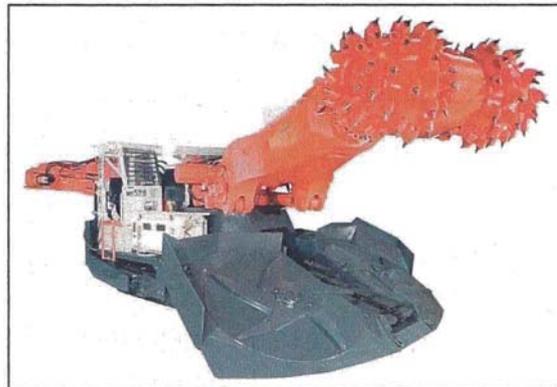
Es una máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de sostenimiento si este es necesario, ya sea en forma provisional o definitiva.



*Figura 16: Esquema de TBM*

## B. Rozadora:

Máquina excavadora que desarrolla un sistema de trabajo mediante un cabezal rotatorio, provisto de herramientas de corte de metal duro que incide sobre la roca y va montado sobre un brazo articulado; un sistema de recogida y transporte de escombros desde el frente hacia la parte trasera de la máquina completa, mediante el ensamblado de los mecanismos descritos a un chasis móvil sobre orugas.



*Figura 17: Rozadora (Marca Sandvik modelo MR520)*

### 1.5. PORTAL DEL TÚNEL (PÓRTICO DE ENTRADA, BOCAMINA, AFRONTONAMIENTO)

Para iniciar la excavación de un túnel se requiere hacer una excavación abierta de tal manera que pueda proveer la cobertura necesaria para iniciar la voladura del túnel. Se recomienda un valor de cobertura inicial que sea de dos a tres veces el valor del diámetro del túnel.

Además se conforma una plataforma de maniobras que es necesaria para que los equipos auxiliares del portal puedan emplazarse en un área que no interrumpa la entrada y salida de los equipos que van a trabajar dentro del túnel.



## 1.6. INSTALACIONES AUXILIARES (SERVICIOS)

Son aquellas instalaciones que se van colocando dentro del túnel para poder brindar las facilidades al frente de trabajo. Dentro de estas facilidades tenemos:

- 1) Línea de agua, que sirve para enviar el agua que requieren los equipos de perforación tanto para evacuación de los detritos de los barrenos como para el enfriamiento de las brocas.
- 2) Línea de desagüe, dependerá de la cantidad de agua de drenaje y la pendiente del túnel. De ser negativa en el sentido de avance, se tendrá que bombear el agua empozada.
- 3) Línea de aire comprimido, que transporta el aire de la compresora hacia los equipos neumáticos.
- 4) Línea de ventilación, compuesta por las mangas de ventilación y sus respectivos accesorios para llevar el aire de superficie hacia el frente de trabajo
- 5) Rieles, que se colocan en el piso cuando se utilice equipos de rieles.
- 6) Instalaciones eléctricas, que corresponden al cableado, tableros eléctricos, transformadores y todo lo necesario para llevar la electricidad desde superficie hasta el frente de trabajo.
- 7) Diversos:
  - a) Señalizaciones
  - b) Instalaciones para teléfono en túnel
  - c) Extintores
  - d) Botiquín, camilla, equipos de emergencia
  - e) Detectores de gases
  - f) Soportes metálicos para ventiladores
  - g) Bases para transformadores y ventiladores
  - h) Cisterna de almacenamiento de agua
  - i) Bombas neumáticas
  - j) Tanque pulmón para aire comprimido
  - k) Polvorín
  - l) Excavación y relleno de nichos/cámaras

- m) Caseta para tableros, grupos y compresora
- n) Puerta y malla de subestación eléctrica
- o) Equipo para pruebas (pernos, shotcrete)

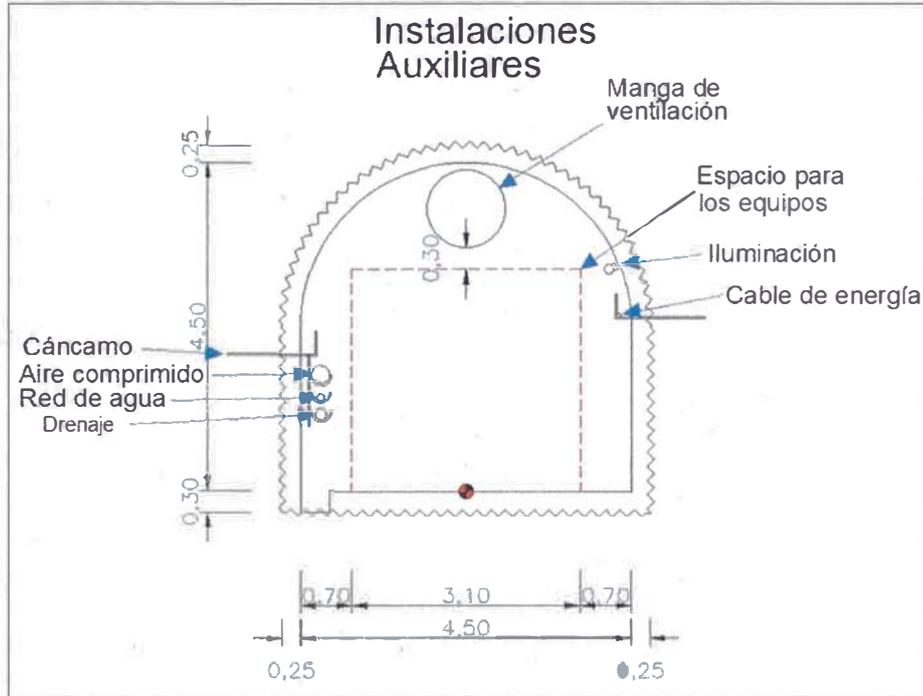


Figura 21: Esquema de servicios auxiliares



Figura 22: Tuberías para aire, agua y drenaje

## CAPÍTULO II: PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO - CICLO DE EXCAVACION

El ciclo de excavación en estudio es el que corresponde al método de perforación y voladura de túneles el cual es ejecutado de la siguiente manera:

- (1) Trazo y replanteo del esquema de tiro en el frente
- (2) Perforación de los barrenos
- (3) Carga de explosivos en los barrenos
- (4) Voladura (detonación, tronadura)
- (5) Ventilación del frente (aireación)
- (6) Eliminación o remoción de escombros (Limpieza)
- (7) Desquinche o desate para remover pedazos de roca suelta
- (8) Colocación de sostenimiento (soporte)
- (9) Avance de los servicios auxiliares



Figura 23: Esquema del ciclo de Perforación y Voladura

## 2.1. TRAZO Y REPLANTEO DEL ESQUEMA DE TIRO DEL FRENTE

El trazo y replante del esquema de tiro dependerá del diseño de la malla de voladura. Este diseño será de acuerdo a la geometría del túnel, a la calidad de la roca y el uso.

Cuando la geometría del túnel corresponde a secciones grandes entonces el área del frente es mayor y por lo tanto el nivel de confinamiento de la roca es menor si lo comparamos con túneles de sección pequeña. Por eso a mayores dimensiones de túnel, el espaciamiento entre las cargas explosivas es mayor que en túneles de menores dimensiones. Por lo tanto la cantidad de explosivo por metro cúbico (carga específica) es menor en las secciones grandes que en las pequeñas.

Por el contrario, la calidad de la roca sí varía directamente con la carga específica, pues a mayor calidad de la roca mayor es la cantidad de explosivo por metro cúbico que hay que utilizar.

Dependiendo del uso del túnel (si llevará concreto o no) se determina si se utilizará voladura controlada. La voladura controlada consiste en minimizar los daños de la voladura a la roca que está por encima del contorno teórico de excavación. Para minimizar estos daños se perforan barrenos perimetrales más juntos y que a su vez tienen cargas explosivas más ligeras. La mejor manera de controlar la sobre excavación es controlando la desviación de los barrenos perimetrales.

## 2.2. PERFORACIÓN DE LOS BARRENOS

La mayoría de túneles son excavados en una sola etapa, es decir, perforando y volando completamente todo el frente de trabajo en un solo disparo. Los barrenos son perforados a una profundidad un poco menos que el ancho del túnel y el arranque efectivo producido por el disparo es un poco más corto que lo perforado (alrededor del 90 por ciento de la longitud de los barrenos).

Hay que tener en cuenta que el presente informe abarcará los análisis para túneles excavados en una sola etapa sin embargo hay que tener en cuenta qué condiciones no permitirían que se excave a sección completa y se tenga que cambiar a dos o más etapas.

- Cuando la sección del túnel es muy grande como para que el jumbo pueda alcanzar las zonas más elevadas, esto es usual en cavernas subterráneas, túneles viales de gran sección, cámaras subterráneas para instalaciones especiales, etc.
- Cuando existe restricciones por control de vibraciones, esto es más frecuente en voladuras cercanas a zonas urbanas.
- Cuando la roca es tan débil que al excavarla en una sola etapa no tendría la suficiente estabilidad en bóveda y hastiales para que sea posible instalar el sostenimiento.

### 2.3. CARGA DE LOS EXPLOSIVOS

La carga de los barrenos se hace de forma manual. Para que los operadores puedan alcanzar las zonas más elevadas se auxilian de una plataforma elevadora.

La disposición de las dinamitas dependerá del tipo de barreno que se esté cargando.

El esquema de voladura y el orden de los disparos serán determinados por el especialista en voladuras.

Como criterio general el orden de voladura empieza por el cuele y contra cuele, luego sigue la destroza, el contorno y por último la zapatera (piso)

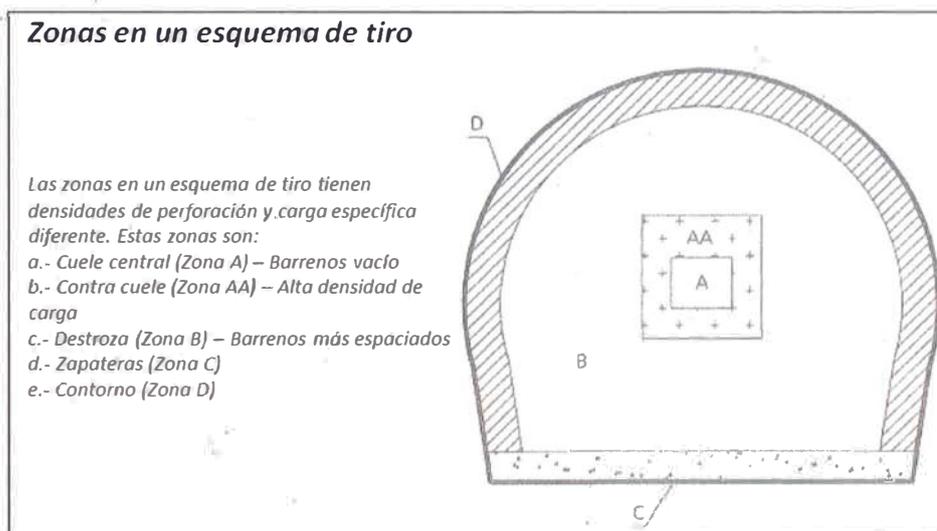


Figura 24: Zonas de un esquema de tiro

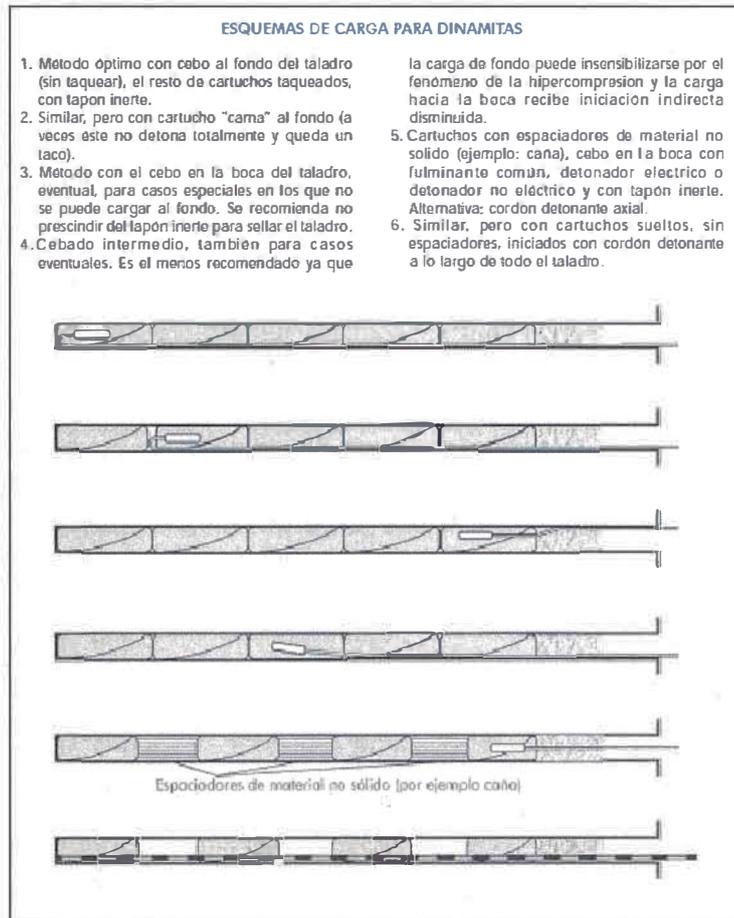


Figura 25: Esquema de carga de dinamitas

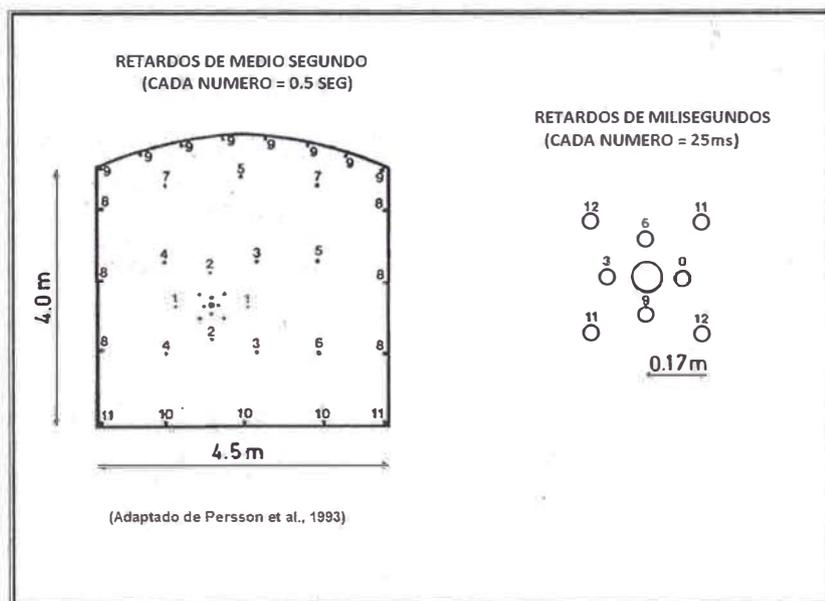


Figura 26: Secuencia de disparo, inicia en el cuele y termina con la zapatera

#### 2.4. VOLADURA (DISPARO, PEGA O TRONADURA)

Después de cargar barrenos se procede al aviso de evacuación de equipos y personal, para que una vez que el equipo esté en lugar seguro y el personal esté ubicado fuera del radio de peligro, se pueda dar inicio a la voladura. Se recomienda, por cuestiones de seguridad, que el radio de evacuación no sea inferior a los 500 metros.

#### 2.5. VENTILACIÓN O AIREACIÓN

Luego se efectuará una ventilación de aproximadamente 30 minutos y se comprueba que la calidad del aire está dentro de límites permitidos para autorizar el retorno del personal al frente de trabajo. La manga de ventilación puede ubicarse cerca al frente de trabajo, a unos 15 m, para ventilar adecuadamente pero sin molestar a los trabajadores.

El sistema de ventilación convencional es el insuflante, el cual toma el aire de superficie y se lleva hacia el frente de trabajo por medio de ductos flexibles. La cantidad, diámetro y potencia de los ventiladores se calcularán de acuerdo con los equipos que estarán trabajando en el túnel, la cantidad de personal dentro, la sección del túnel, la longitud máxima a ventilar y la altitud.

#### 2.6. DESQUINCHE, DESATE, PICOTONEO O SANEADO

El paso siguiente es el desquinche o saneo que consiste en remover las rocas que representen un peligro potencial de desprenderse, luego se procede a la eliminación del material volado.

#### 2.7. LIMPIEZA O ELIMINACIÓN DE ESCOMBROS

Consiste en remover el material resultante de la voladura. Independientemente del sistema de eliminación escogido, se requerirán equipos de carga y de transporte. El material se depositará en el nicho más próximo disponible para no interrumpir el ciclo de excavación del túnel o sino y de ser posible se podrá llevar directamente a un botadero.

#### 2.8. SOSTENIMIENTO (SOPORTE)

Una vez efectuada la eliminación se procede a colocar el sostenimiento de acuerdo con la roca encontrada, lo cual será determinado por el geólogo a cargo y por la supervisión de la obra. Según la calidad de la roca se aplica el

patrón de sostenimiento indicado en planos y de acuerdo con las especificaciones técnicas correspondientes. El shotcrete se aplica en capas de acuerdo a lo indicado en las especificaciones técnicas y puede o no contener fibra metálica. Para esto se hace uso de una shotcretera vía húmeda con brazo robótico para lograr una mejor calidad, menor cantidad de polvo y reducir pérdidas de material. El abastecimiento se hace por lo general con camiones mixer de bajo perfil (4 m<sup>3</sup> de capacidad), dada las reducidas dimensiones de trabajo que se tienen en las obras subterráneas. Si la sección del túnel lo permite, se utilizan camiones mixer convencionales de 8m<sup>3</sup> para el abastecimiento, teniendo en cuenta que el camión no debe rozar a la manga de ventilación. Para la colocación de los pernos se perfora utilizando al mismo Jumbo. La perforación podrá ser con broca de 45 mm para pernos de 25 mm diámetro y no más de 4 m de largo; con broca de 51 mm para pernos de 32 mm de diámetro y no más de 4 m de largo; con broca de 64 mm para pernos que sean de más de 4 m de largo, salvo que el jumbo cuente con un juego de barras más delgadas. Una vez perforados los agujeros y limpiados se colocan los pernos, pudiendo colocarse con cápsulas de resina epóxica, cápsulas de cemento o inyección de lechada de cemento. Los pernos se levantan con la plataforma elevadora y el personal en esta, los va introduciendo en el agujero perforado. Cuando se coloquen cápsulas estas deben ponerse antes de introducir el perno, el cual debe entrar rotando, para lo que se auxilia del Jumbo que cuenta con un accesorio para este caso y luego se fija con tacos para que el perno quede en su lugar, por último se coloca la plancha y tuerca. Cuando se use inyección de lechada de cemento, primero se introduce el perno, las mangueras de inyección y las de ventilación luego se tapan el agujero para evitar caída de lechada y se inyecta hasta que ya no sale aire sino lechada de cemento por la manguera de ventilación, por último se colocan la plancha y tuerca. Para colocar cimbras, su transporte se hace en un camión auxiliar y su colocación con la ayuda de una plataforma elevadora. Se prepara la base de la cimbra nivelando y rellenando el piso con bolsacretos, donde se posa cada pata de la cimbra, acomodándose. Se fija cada pata de cimbra con un cáncamo de fierro de 1" de diámetro y de aproximadamente 1 m de largo con terminación en L para que sujete la pata de la cimbra a la roca. Una vez la cimbra en su posición se rellena con bolsas llenas de concreto fresco el

espacio entre la roca y la cimbra, para que trabaje en forma homogénea; se colocarán sus espaciadores entre cimbra y cimbra manteniendo una distancia de acuerdo a planos. Para el caso que se trate de sostenimiento que requiera de un paraguas de Spillings, se procede a perforar con el Jumbo, limpiar e introducir los pernos helicoidales de 25 mm de diámetro, de 6 m de largo y dispuestos en la bóveda entre las 10 y las 2, separados cada 50 cm, después deben seguir lo indicado para los pernos, es decir ser fijados con resina epóxica o lechada de cemento. Estos pernos se colocan sobre las cimbras y deben traslaparse 2 m.

## 2.9. INSTALACIONES AUXILIARES

El avance de las instalaciones auxiliares de agua para perforación, aire comprimido, ductos de ventilación y red eléctrica que incluye la iluminación dentro del túnel, se efectúa después de un número de ciclos, en función de la distancia avanzada.

## CAPÍTULO III: METODOLOGIA PARA LA ESTIMACION DE RECURSOS Y COSTOS

A diferencia de las obras superficiales, en donde se tiene frente abierto para que los equipos puedan trabajar la guardia completa, las obras subterráneas son obras de frente cerrado en donde los equipos a pesar de estar disponible durante la guardia completa, no puede trabajar durante todas las horas. Por ejemplo, cuando se está ejecutando las labores de limpieza (eliminación) en el frente, la shotcretera y los camiones mixer, que son equipos para proyectar shotcrete, se encuentran en espera en el portal del túnel; una vez que finalicen las actividades de eliminación, la shotcretera y los camiones mixer podrán ingresar para poder empezar los trabajos de sostenimiento con concreto proyectado.

Es por esto que se tiene que la metodología para estimar los costos en las obras subterráneas es diferente a la utilizada para estimar costos en superficie.

### 3.1. CONCEPTOS PREVIOS

Para empezar a desarrollar la metodología para la estimación de costos hay que desarrollar previamente algunos conceptos de costos para poder armar los costos de excavación.

#### 3.1.1. Costo Posesión o permanencia de equipos:

El concepto de costo posesión y permanencia de equipos se refiere al costo del equipo sin mantenimiento ni combustible, para calcularlo se considera el valor de adquisición del equipo, la vida útil, el valor de rescate, el interés del capital invertido, seguros y almacenaje. De ser equipo alquilado, se calculará de acuerdo con lo que indique el proveedor y teniendo en cuenta las horas mínimas mensuales que hay que pagar. Se recomienda tener separado este costo de posesión del costo de operación.

#### 3.1.2. Costo de Operación y mantenimiento:

Este costo incluye el mantenimiento, combustibles, lubricantes, filtros, neumáticos (u orugas) y herramientas necesarias para que el equipo pueda funcionar adecuadamente a lo largo del proyecto.

### 3.1.3. Costo de materiales e instalaciones auxiliares:

Este costo incluirá a los explosivos y a la suma de los costos de los materiales de las instalaciones auxiliares del túnel. Esta suma se repartirá entre todos los metros cúbicos de pago y será parte de los materiales que se requieren para la perforación y voladura. El listado de materiales que se incluirá es el siguiente:

- Línea de agua
- Línea de desagüe
- Línea de aire comprimido
- Línea de ventilación
- Rieles, de ser el caso.
- Instalaciones eléctricas, que corresponden al cableado, tableros eléctricos, transformadores y todo lo necesario para llevar la electricidad desde superficie hasta el frente de trabajo.
- Diversos:
  - Señalizaciones
  - Instalaciones para teléfono en túnel
  - Extintores
  - Botiquín, camilla, equipos de emergencia
  - Detectores de gases
  - Soportes metálicos para ventiladores
  - Bases para transformadores y ventiladores
  - Cisterna de almacenamiento de agua
  - Bombas neumáticas
  - Tanque pulmón para aire comprimido
  - Polvorín
  - Excavación y relleno de nichos/cámaras
  - Caseta para tableros, grupos y compresora

- Puerta y malla de subestación eléctrica
- Equipo para pruebas (pernos, shotcrete).

Como regla práctica, los materiales de las instalaciones auxiliares cuestan alrededor de 500 USD/ml de túnel excavado.

### 3.2. ELABORACIÓN DE ESQUEMA GENERAL DEL PROYECTO

Para poder elaborar los costos en una obra subterránea primero hay que identificar en un esquema general todo aquello que es parte del proyecto y que afectará al costo de la excavación subterránea. Dentro de este esquema general deben estar identificados:

- Accesos existentes y proyectados al sitio de obras y a cada uno de los frentes de trabajo.
- Ubicación de canteras, botaderos y las respectivas distancias de los accesos a estos.
- Indicar el volumen de las canteras y botaderos.
- Fuentes de agua
- Fuentes de energía (ver la posibilidad de obtener energía de la red nacional)
- Pueblos cercanos
- Campamentos
- Frentes de trabajo y cuadrillas de equipos
- Características principales de cada uno de los frentes: volúmenes de corte, de relleno, de concreto de acero.

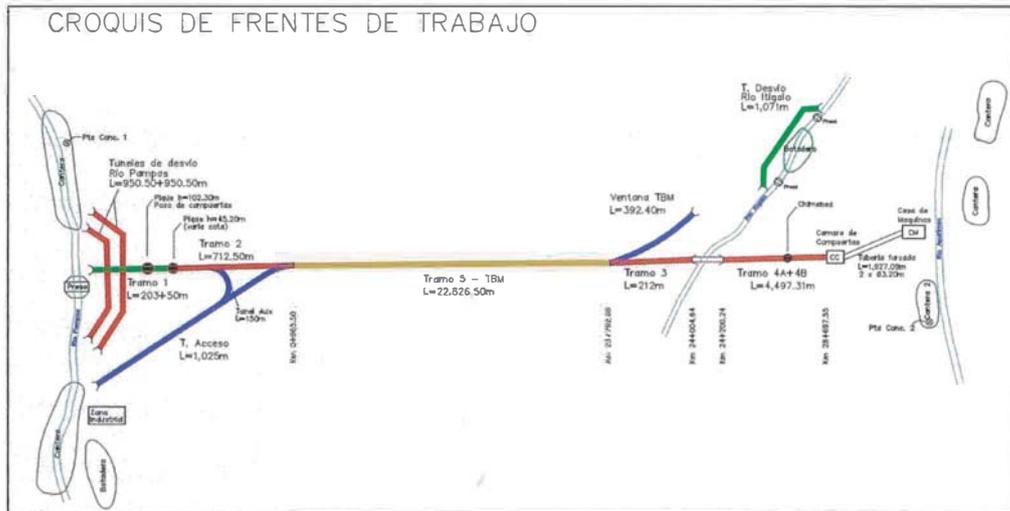


Figura 27: Ejemplo de croquis de frentes de trabajos subterráneos

### 3.3. SELECCIÓN DE EQUIPOS

El primer paso fundamental para determinar el costo de excavación subterránea consiste en determinar la cuadrilla de mano de obra y equipos que se va a utilizar.

En excavación subterránea con perforación y voladura básicamente se tienen dos sistemas de equipos de acuerdo con el sistema de locomoción: sistemas de equipos sobre rieles y sistemas de equipos sobre neumáticos.

#### 3.3.1. Sistema sobre rieles

Se caracterizan por ser, como su nombre lo dice, equipos de excavación que se transportan sobre rieles. Su principal característica es que son equipos que para su desplazamiento requieren de una locomotora que los empuje o los jale dependiendo del caso. La ventaja de este sistema es que al estar compuesto por equipos eléctricos, no existen las emisiones contaminantes de los equipos diésel sobre neumáticos por lo que el sistema de ventilación será diseñado únicamente para el personal dentro del túnel y para evacuar los gases de voladura. Sin embargo la desventaja de este sistema es que las pendientes en las que trabaja deben ser inferiores a 3% y además se debe contar con el stock suficiente de rieles para cubrir los metros lineales que tiene que excavar. Como regla práctica se recomienda utilizarlo en túneles cuya altura sea menor a 4.50m y cuya longitud no

presente dificultades para la ventilación. De 4.50m en adelante se recomienda los sistemas convencionales sobre neumáticos.

Los principales equipos sobre rieles que van dentro del túnel son:

- Jumbo de 1 o 2 brazos
- Pala eléctrica de carga continua (Haggloader 8HR)
- Shuttletrains
- Locomotoras de 10ton eléctricas a baterías.
- Plataformas auxiliares sobre rieles para transporte de personal y materiales
- Camiones mixer de bajo perfil montado sobre rieles

### 3.3.2. Sistema sobre neumáticos

Es el sistema más utilizado para la construcción de túneles en el Perú. Como su nombre lo dice, los equipos se desplazan sobre llantas y su sistema de locomoción es por medio de motores diésel. La ventaja de este sistema es que es que los equipos pueden trabajar en un rango más variado de pendientes pudiendo llegar a operar en pendientes del orden del 15%. La desventaja de este sistema es la contaminación que producen los motores diésel por lo que la ventilación tiene que ser diseñada para poder evacuar los gases de las emisiones de estos equipos.

Para el análisis de los ratios del presente informe se trabajará con los siguientes equipos subterráneos sobre llantas:

- Jumbo de 2 brazos
- Haggloader 10HR (pala eléctrica)
- Camiones volquete recortados de 12m<sup>3</sup>
- Camion utilitario para carga de materiales
- Plataforma elevadora
- Shotcretera vía húmeda con brazo robótico
- Camiones mixer de bajo perfil de 4m<sup>3</sup>

Equipos auxiliares: ventiladores, electrobombas, perforadoras manuales, martillos neumáticos, perforadora cop 1838 (va en stand by como reserva), equipo de inyección, perforadora diamec para sondeos.

### 3.4. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE EQUIPOS

Una vez seleccionados los equipos que se va a utilizar se procede a estimar la cantidad que se va a utilizar de cada uno de ellos.

#### 3.4.1. Equipos de cantidad fija:

Jumbo, haggloader, camión utilitario, plataforma elevadora, shotcretera con brazo robótico, equipo de inyección, perforadora diamec para sondeo: Se requerirán uno de cada uno por frente de excavación, para el presente informe se analizarán diferentes escenarios para túneles excavados por un solo frente. Por lo tanto se analizará para una unidad de cada uno de los equipos en mención. Lo que sí cabe resaltar es que hay que verificar las dimensiones de todos los equipos para que puedan operar adecuadamente dentro del túnel.

#### 3.4.2. Cantidad de Camiones volquete:

Su cantidad dependerá del volumen que pueden cargar, la cantidad de material a eliminar por disparo y la distancia desde el frente de excavación hasta el botadero. Para determinarlos se hace un análisis del ciclo de eliminación con lo que se calcula la cantidad máxima y promedio de camiones que se requerirá para la longitud de túnel en estudio. Este análisis se hace como sigue:

Tabla 1: Análisis del ciclo de excavación

ANÁLISIS DE CICLO DE EXCAVACION				
D10	Clasificación del cliente =	RMR	100-81	
D11	Longitud del tunel	m	1,000.00	
D12	<b>Características Geométricas:</b>			
D13	Seccion esperada	m <sup>2</sup>	38.58	
D14	<b>Datos sobre Barrenos:</b>			
D15	Longitud de perforacion/disparo (Con Jumbo)	m	4.50	
D20	Longitud barreno a Considerar (segun lo escogido)		4.50	
D21	<b>Condiciones y Factores:</b>			
D22	eficiencia de disparo	fraccion	0.93	
D23	esponjamiento	fraccion	0.60	
D24	<b>4- Datos del camion:</b>			
D25	Pasan camiones de ida y vuelta a la vez: 0=NO, 1=SI	escoger	0	
D26	Capacidad de tolva	m <sup>3</sup>	12.00	
D27	Factor de llenado de tolva	fracc	0.90	
D28	Velocidad cargado (en tunel)	kph	12.00	
D29	Velocidad descargado (en tunel)	kph	15.00	
D30	Velocidad cargado (en superficie)	kph	15.00	
D31	Velocidad descargado (en superficie)	kph	17.50	
D32	<b>5- DISTANCIAS:</b>			
D33	Distancia FIJA (tipo ventana)	km	0.00	
D34	Distancia Portal a Botadero (para Fase-1)	km	0.30	
D35	Distancia entre ensaches CRUCE camiones	km	0.50	
D36	<b>Excavacion con Haggloder</b>			
D37	Distancia entre ensaches cruce camiones	km	0.50	D34
D38	Cant Camiones Disponib elimin Directa en fase 1	un	3	
D39	Ciclo para max cant Camiones	min	20.48	D52+D53+2*(D54+D55)+D56+D57+D58
D40	<b>CANT MAX TEORICA CAMIONES (**para calculo de flota**)</b>	un	2.82	D38/(D52+D53)
D41	Volumen esponjado 1 disparo	m <sup>3</sup>	259.26	D481
D42	<b>Distancias:</b>			
D43	Dist FIJA (ventana y/o pasar otros tuneles, ***cuando exista)	km	0.00	D32
D44	Distancia en el tunel (sin Dist Fijas) = L/2	km	0.50	D10/1000/2
D45	Distancia total en tunel	km	0.50	D42+D43
D46	Distancia Portal a Botadero considerado para Fase 1	km	0.30	D33
D47	<b>Ciclo carga de camion con pala Schaeff:</b>			
D48	T carga 1 camion	min	4.50	(D25*D26)/D494*60
D49	T maniobra de camion al llegar	min	0.50	
D50	T maniobra de camion al retirarse	min	0.00	
D51	Tiempo para cargar 1 camion (teorico)	min	5.00	SUMA(D47:D49)
D52	<b>Ciclo de camion Frente - botadero:</b>			
D53	T carga	min	5.00	D50
D54	T espera por cruce de camiones	min	2.25	SI(D24=0,D36*0.5/D27*60+D36*0.5/D28*60,0)
D55	T ida cargado (tunel)	min	2.50	D44/D27*60
D56	T vuelta (tunel)	min	2.00	D44/D28*60
D57	T ida cargado (superficie)	min	1.20	D45/D29*60
D58	T vuelta (superficie)	min	1.03	D45/D30*60
D59	T descarga	min	2.00	
D60	T maniobras (si hubiera)	min	0.00	
D61	T ciclo de 1 camion a botadero (teorico)	min	15.98	SUMA(D52:D59)
D62	<b>Calculo tiempo de eliminacion:</b>			
D63	Cant viajes 1 camion	un	24.01	D40/(D25*D26) <sup>2</sup>
D64	Cant viajes a USAR	un	25.00	SI(REDONDEAR.MAS(D62,0)-D62<0.08,REDONDEAR.MENOS(D62,0),REDONDEAR.MAS(D62,0))
D65	Verifica sobra o falta camiones (Z): Z > 1 sobran	verifica	1.36	D37*(D52+D53)/D60
D66	Cant requerida de camiones (teorico) = Nc req	un	2.20	D60/(D52+D53)
D67	Cant de camiones a USAR = Nc usar	un	2.3	SI(D64<=1,D37,REDONDEAR.MAS(D65,1))
D68	Tandas teoricas de Nc	un	10.87	D63/D66
D69	Tandas enteras	un	10.00	REDONDEAR.MENOS(D67,0)
D70	Fraccion de tanda	fracc	0.87	D67-D68
D71	Viajes adicionales de 1 camion, para fraccion de tanda	un	2.00	REDONDEAR(D69*D66,0)
D72	T1 (si sobran)	min	186.25	(D52+D53)*D66*D68+D70*(D52+D53)+SI((Y(D68=0,D70=0),0,D54+D36/D27*60)
D73	T2 (si faltan)	min	179.29	(D60*D68)+D70*(D52+D53)+SI((Y(D68=0,D70=0),0,D54+D36/D27*60)
	<b>Tiempo a considerar en fase-1 (teorico)</b>	min	186.25	SI(D477=3,SI(D64>=1,D71,D72),0)

### 3.4.3. Cantidad de camiones mixer de bajo perfil:

Su cantidad dependerá de la cantidad de shotcrete que se debe colocar por cada disparo. Por lo general la cantidad de shotcrete requerido por disparo varia de 0 a 8m<sup>3</sup> con lo que con dos camiones mixer de bajo perfil de 4m<sup>3</sup> se está cubierto para el transporte de shotcrete.

### 3.4.4. Cantidad de ventiladores:

La cantidad de ventiladores dependerá de la cantidad de equipos diésel dentro del túnel, de la cantidad de personal, de la longitud del túnel, de la sección teórica del túnel y del diámetro del ducto que va a transportar el aire. Con estas variables es que se dimensiona la cantidad y potencia requerida de los ventiladores para poder impulsar el aire desde superficie hasta el frente del túnel.

Primer paso: Calcular la cantidad de caudal de aire requerido en el frente. Este cálculo se hace de acuerdo con la cantidad de hp de diésel dentro del túnel y la cantidad de personas. Según la norma peruana en lo que refiere a ventilación de estructuras subterráneas, se indica un caudal de 3m<sup>3</sup>/min por cada persona y 3m<sup>3</sup>/min/hp por cada equipo diésel trabajando dentro del túnel.

Para los escenarios analizados en el presente informe se tienen 1, 2 o 3 camiones de 440hp cada uno. La cantidad de personal dentro del túnel en un mismo tiempo es de 10 personas aproximadamente.

Tabla 2: Calculo de caudal requerido

Calculo de caudal requerido						
Fila	Descripción	Unidad	Caso-1	Caso-2	Caso-3	Formula
F4	Cantidad de camiones dentro del tunel	und	1	2	3	
F5	Potencia de camiones	hp	440	440	440	
F6	Fraccion de potencia de 1er camion	fracc	1.00	1.00	1.00	
F7	Fracción de potencia de 2do camion	fracc		0.25	0.50	
F8	Fraccion de potencia de 3er camion	fracc			0.25	
F9	Caudal requeridos para equipos diesel	m <sup>3</sup> /min	1,320	1,650	2,310	F5*3*SUMA(F6:F8)
F10	Cantidad de personal	pers	10.00	10.00	10.00	
F11	Caudal requeridos para personal	m <sup>3</sup> /min	30	30	30	F10*3
F12	Caudal requerido en el frente del tunel	m <sup>3</sup> /min	1,350	1,680	2,340	F9+F11
F13	Caudal requerido en el frente del tunel	m <sup>3</sup> /s	<b>22.50</b>	<b>28.00</b>	<b>39.00</b>	F12/60

Para la potencia requerida de ventiladores se utiliza el programa online <http://www.tunnel-ventilation.net> que se basa en la norma Swiss Standar 196 (Ventilation of underground structures). Solamente el caudal ingresado será calculado de acuerdo a lo indicado en nuestras normas, el resto será calculado por el programa que utiliza las fórmulas de pérdidas de carga de la norma SIA-196.

**Ventilation calculation according to SIA-Standard 196** Step 1

---

**Input of project title**

Company: Graña Y Montero, Av. Paseo de la Republica 4675, Madrid

Project:

Title 1:

Title 2:

---

**Input of parameters**

	Values	Remarks
Duct length	<input type="text" value="1500"/> m	Longitud del ducto flexible
Tunnel cross section	<input type="text" value="18.08"/> m <sup>2</sup>	Seccion transversal del tunel
min. air velocity	<input type="text" value="0.3"/> m/s	Mínima velocidad del aire en el tunel
Altitude	<input type="text" value="2000"/> m a.s.l.	m.s.n.m para calculo de densidad del aire
Average air temperature	<input type="text" value="20"/> °C	Temperatura promedio
Friction factor lambda	<input type="text" value="0.018"/>	Factor de friccion del ducto
Leakage factor f <sup>2</sup>	<input type="text" value="10"/> mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Factor de fugas
Delivery pressure at duct end	<input type="text" value="150"/> Pa	Presión de aire al final del ducto
Loss factor zeta	<input type="text" value="1"/>	Factor de perdidas por accesorios
Fan efficiency	<input type="text" value="80"/> %	Factor de eficiencia del ventilador
Max. pressure	<input type="text" value="15000"/> Pa	Limite maximo en ducto para las iteraciones
Production days	<input type="text" value="0"/> days	Opcional si se quiere estimar los kwh-h
Price of electric power	<input type="text" value="0"/> Euro/kWh	Opcional si se quiere estimar los usd de los kwh-h

---

**Input air quantity Q<sub>0</sub>**

Variant 1: Required air quantity

Q<sub>0</sub>  m<sup>3</sup>/s

Variant 2: According to diesel engine emissions

- Large machinery for excavation and loading
  - without particulate filters  kW
  - with particulate filters  kW
- Large machinery for transport and concreting
  - without particulate filters  kW
  - with particulate filters  kW

Figura 28: Calculo online de ventilación subterránea

Tabla 3: Cuadro de factores de fugas de acuerdo a la condición del ducto

**S-Duct (Grade S = Super)**  
New, very well and regularly assembled and maintained, with grown duct unit lengths >= 100 m and couplings little (very small leakage and friction factor).

**A-Duct (Grade A)**  
New, well-maintained and with little risk of damage built duct (small leakage and friction factor).

**B-Duct (Grade B)**  
For some time standing in operation or multiple set, regularly maintained duct (medium leakage and friction factor).

Duct grade	Leakage factor f <sup>2</sup>
S-Duct	5 mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
A-Duct	10 mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
B-Duct	20 mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

**Airflow in the tunnel**  
With a lead in the air tunnel or shaft profile accounts for quantity losses.

### Túnel 4.50x4.50 1500m

**Inputs**

Duct length: 1'500 m	Longitud del ducto flexible
Tunnel cross section: 18.1 m <sup>2</sup>	Sección transversal del túnel
Min. air velocity: 0.3 m/s	Mínima velocidad del aire en el túnel
Altitude: 2'000 m a.s.l.	m.s.n.m para cálculo de densidad del aire
Average air temperature: 20 °C	Temperatura promedio
Friction factor lambda: 0.018	Factor de fricción del ducto
Leakage factor f*: 10 mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Factor de fugas
Delivery pressure at duct end: 150 Pa	Presión de aire al final del ducto
Loss factor zeta: 1.00	Factor de pérdidas por accesorios
Fan efficiency: 80 %	Factor de eficiencia del ventilador
Max. pressure: 15'000 Pa	Límite máximo en ducto para las iteraciones
Production days: 0 days	Opcional si se quiere estimar los kWh
Price of electric power per kWh: 0.000 EUR	Opcional si se quiere estimar los usd de los kWh
Required air quantity Q <sub>0</sub> : 39.0 m <sup>3</sup> /s	Lo calculamos de acuerdo con norma de Perú

**Large machinery for excavation and loading**

without particulate filters: 0 kW	0.0 m <sup>3</sup> /s	Llenar si se quiere calcular de acuerdo al SIA-196
with particulate filters: 0 kW	0.0 m <sup>3</sup> /s	Llenar si se quiere calcular de acuerdo al SIA-196

**Large machinery for transport and concreting**

without particulate filters: 0 kW	0.0 m <sup>3</sup> /s	Llenar si se quiere calcular de acuerdo al SIA-196
with particulate filters: 0 kW	0.0 m <sup>3</sup> /s	Llenar si se quiere calcular de acuerdo al SIA-196

Total Q<sub>0</sub>: 0.0 m<sup>3</sup>/s

**Calculation**

Air quantity Q<sub>0</sub>: 39.0 m<sup>3</sup>/s --> Free input prevail  
Air density: 0.95 kg/m<sup>3</sup>

**Results**

Duct diameter [mm]	Air quantity Q <sub>1</sub> [m <sup>3</sup> /s]	max. duct pressure [Pa]	Fan power [kW]	Energy consumption [kWh]	Energy cost [EUR]	Fan
1'200	45.5	16'100	910	0	0	choose
1'300	44.8	10'750	600	0	0	choose
1'400	44.2	7'450	410	0	0	choose
1'500	43.7	5'300	290	0	0	choose
1'600	43.4	3'850	210	0	0	choose
1'700	43.0	2'900	160	0	0	choose

Print version

Figura 29: Ejemplo de salida de datos del cálculo de ventilación

Se puede observar que para un diámetro de ducto de 1.70m se requiere un ventilador de 160 kW. Así de esta manera calculamos la cantidad y potencia de ventiladores requeridos para los demás escenarios. Sin embargo para impulsar el mismo caudal pero con un ducto de 1.30m se requiere de 600kW de potencia entre todos los ventiladores. Esto nos muestra la importante influencia del diámetro del ducto en la potencia requerida de los ventiladores.

### 3.4.5. Cantidad de electrobombas:

El cálculo de la cantidad y potencia de las electrobombas dependerá principalmente del caudal de infiltración dentro del túnel, de la pendiente del túnel, de la longitud y diámetro de la tubería de desagüe.

Se calcula el caudal que se requiere bombear y la presión que se requiere para lograrlo. De existir mucha presión para impulsar, se colocarán baterías intermedias. Cada batería puede contar con 1 o más bombas. De ser excesivo el caudal a bombear, se podrán disponer de dos líneas de desagüe.

Las fórmula utilizada para determinar la presión de impulsión es la de Hazen y Williams para tuberías de agua.

Su formulación en función del radio hidráulico es:

$$V = 0,8494 * C * (Rh)^{0,63} * S^{0,54}$$

En función del diámetro:

$$Q = 0,2785 * C * (D)^{2,63} * S^{0,54}$$

Dónde:

Rh = Radio hidráulico = Área de flujo / Perímetro húmedo = Di / 4

V = Velocidad media del agua en el tubo en [m/s].

Q = Caudal ó flujo volumétrico en [m³/s].

C = Coeficiente que depende de la rugosidad del tubo.

90 para tubos de acero soldado.

100 para tubos de hierro fundido.

140 para tubos de PVC.

128 para tubos de fibrocemento.

150 para tubos de polietileno de alta densidad.

Di = Diámetro interior en [m]. (Nota: Di/4 = Radio hidráulico de una tubería trabajando a sección llena)

$S = [(Pendiente - Pérdida de carga por unidad de longitud del conducto) / S]$   
[m/m].

Esta ecuación se limita a usarse solamente para el agua como fluido de estudio, mientras que encuentra ventaja por solo asociar su coeficiente a la rugosidad relativa de la tubería que lo conduce, o lo que es lo mismo al material de la misma y el tiempo que este lleva de uso.

Para los escenarios de análisis planteados en el presente informe, se ha asumido un caudal representativo de 50l/s y que la excavación se hará en con pendiente negativa descendente de 0.18% y haciendo uso de líneas de desagüe con tuberías alvenius de fierro fundido Ø=10" (Coeficiente de material =100)

Tabla 4: Ejemplo de cálculo de capacidad de bombas de drenaje

Fila	CALCULO PERDIDA CARGA TOTAL (m)	Unidad	Cantidad	Formula
	<b>Calculo diametro economico:</b>		bombeo	
E181	Longitud del tramo (L)	m	1,500	
E182	Caudal (Q)	m3/s	0.050	
E183	Cantidad de lineas paralelas	un	1	
E184	Cantidad de baterías/Linea	un/linea	1	
E185	Cantidad de Bombas/ batería	un/bat	2	
E186	Altura o diferencia de cotas (h)	m	14.00	
E187	Coefic material y estado del tubo	s/u	100.00	
E188	Parametro ?? (X)	s/u	0.50	
E189	Fraccion de perdida carga accesorios	fracc	0.10	
E190	Caudal en cada linea (q)	m3/s	0.050	E182/E183
E191	Diametro economico (D)	m	0.244	$1.3 * E188^{0.25} * (E190)^{0.5}$
E192	<b>Calculo con diametro a usar:</b>			
E193	Diametro a usar (d)	m	0.25	
E194	Seccion del tubo a usar	m2	0.049	$(3.14/4) * E193^2$
E195	Velocidad del agua en el tubo (V)	m/s	1.02	E190/E194
E196	Verifica: $0.60 < V < 1.50$ m/s		ok	SI(Y(E195<1.5,E195>0.6),"ok","mal")
E197	Perdida de carga (Hf) por linea	m	3.24	$E181 * (E190 * (0.2785 * E187 * E193^{2.63}))^{(1/0.54)}$
E198	Perdida de carga por accesorios Ha (est)	m	0.32	E189 * E197
E199	<b>Para 1 Bomba:</b>			
E200	Modelo de bomba		MT-2140	Se elige de catálogo de bombas
E201	Potencia	kw	16	Se elige de catálogo de bombas
E202	Altura total	m	20	Se elige de catálogo de bombas
E203	Caudal max de bombeo	lps	30	Se elige de catálogo de bombas
E204	<b>Capacidad del Sistema:</b>			
E205	H tot = altura total de bombeo del Sistema	m	20	E202 * E184
E206	Q tot = caudal total de bombeo del Sistema	lps	60	E183 * E185 * E203
E207	<b>Capacidad requerida:</b>			
E208	H total requerido	m	17.56	$E186 + (E197 + E198) * E183$
E209	Q total requerido	lps	50.00	E182 * 1000
E210	<b>Verificación:</b>			
E211	ht bombas/ ht requerido	fracc	1.14	E205/E208
E212	Q bombas/ Q requerido	fracc	1.20	E206/E209
E213	<b>Mensajes:</b>			
E214	Verifica Altura total	aviso	ok	SI(E211<1,"mal","ok")
E215	Verifica Caudal total	aviso	ok	SI(E212<1,"mal","ok")
E216	Resultado de verificaciones	aviso	OK	SI(Y(E211<1,E212<1),"No pasa","OK")
E217	<b>RESULTADO:</b>			
E218	Cantidad Total de Bombas en el Sistema	un	2	E183 * E184 * E185

Para los escenarios en el presente informe se elegirá dos electrobombas de 16kW lo cuál es lo más común que se utiliza cuando se tiene poca infiltración dentro de la excavación subterránea.

### 3.5. PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE COSTOS

El procedimiento básico para determinar el costo es cuantificar cuántos recursos se va a requerir y que precio se le asignará a esas cantidades. En este caso los recursos o ítemes que van dentro del metro cubico de excavación subterránea sigue la siguiente estructura.

*Tabla 5: Conceptos principales de los costos de excavación subterránea*

Análisis de precio unitario para 1m3 de excavacion				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Subtotales
Posesion de equipos	dia			
Operación de equipos	m3			
Mano de obra	dia			
Materiales	m3			
Energía	Kw-h			

Cada uno de estos rubros debe ser cuantificado y costeados. Los valores obtenidos se colocarán en el área gris y por multiplicación simple se obtendrá el precio total del metro cúbico. El análisis para obtener los factores de cantidad y precio procede de la siguiente forma:

#### 3.5.1. Posesión de equipos

##### A. Cantidad de posesión:

Para determinar la cantidad de posesión de equipos se tiene que hacer un análisis del ciclo de excavación del túnel. Para esto se hace separadamente el análisis de cada actividad que interviene en el ciclo de excavación del túnel y luego se integra el resultado para obtener el avance por día por tipo de roca. Es con este avance y con la cantidad de metros lineales que se obtiene la cantidad de días de posesión de los equipos por cada tipo de roca. Estos días de posesión corresponden a toda la cantidad de días que ha permanecido la cuadrilla de equipos tanto en excavación como en sostenimiento. Por esto se tendrá que separar el total de días entre la cantidad que ha sido invertida en excavación y la cantidad que ha

sido invertida en sostenimiento. Luego al dividir la cantidad de días entre los metros cúbicos que se excavan se obtiene el factor de posesión de equipos por unidad de excavación. Ejemplo:

Supongamos que del análisis del ciclo de excavación el siguiente resumen de los tiempos de un disparo para una sección de 35.14m<sup>2</sup>:

Tabla 6: *Tiempos en minutos del ciclo de excavación por tipo de roca*

RESUMEN DE UN DISPARO (tiempos que afectan ciclo)		R-1	R-2	R-3B	R-4B
<b>EXCAVACION:</b>					
Sondeo	min	0	0	0	8
Bombeo de agua	min	0	0	0	3
Inyecciones	min	0	0	34	48
Drenes de alivio	min	0	0	0	3
Topografía, instalac, mapeo	min	90	81	69	59
Perforacion o excavacion	min	250	207	159	123
Carga y voladura	min	110	89	65	54
Retiro e ingreso	min	31	31	31	31
Ventilacion	min	30	30	30	30
Desquinche	min	22	18	16	13
Eliminacion	min	190	145	108	77
Tiempo excavacion, sin soportes=	min	<b>723</b>	<b>601</b>	<b>512</b>	<b>449</b>
<b>SOSTENIMIENTO:</b>					
Shotcrete sin malla	min	18	75	84	60
Pernos	min	32	86	117	73
Malla	min	0	0	0	18
Cimbras	min	0	0	0	78
Planchas	min	0	0	0	0
Marchiavantis / Spiling bars	min	0	0	0	87
Micropilotes	min	0	0	0	0
Tiempo de soportes que afectan al ciclo	min	<b>50</b>	<b>161</b>	<b>201</b>	<b>316</b>
<b>Ciclo total efectivo (c/traslape de excav y s</b>	min	<b>773</b>	<b>762</b>	<b>713</b>	<b>765</b>

De este resumen vamos a utilizar la fracción que representa la excavación respecto del total del ciclo. Con esta fracción de excavación, con el plazo total de su tipo de roca y con el volumen de pago, se calcula el factor de posesión como sigue.

Tabla 7: Ejemplo de cálculo de factores de incidencia

Fila	Cálculo del avance		R-1	R-2	R-3B	R-4B	Formula
E31	Duración de 1 ciclo	hr	12.88	12.70	11.88	12.75	
E32	Horas trabajadas al día	hr/día	22.00	22.00	22.00	22.00	
E33	Ciclos/día	dísparos/día	1.71	1.73	1.85	1.73	=E32/E31
E34	Avance efectivo por dísparo	m/disp	4.20	3.30	2.30	1.50	(Long taladro) - (0.30m)
E35	AVANCE DIARIO (efectivo)	m/día	7.17	5.72	4.26	2.59	=E34*E33
E36							
F37	Calculo de los factores de posesion		R-1	R-2	R-3B	R-4B	
E38	Cantidad de dísparos	un	89.3	113.6	163.0	250.0	=E39/E34
E39	Longitud por tipo de roca	m	375.0	375.0	375.0	375.0	
E40	Plazo	día	52.3	65.6	88.1	144.9	=E39/E35
E41	Volumen pagado /día (banco)	m <sup>3</sup> /día	252	201	150	91	(avance)*(seccion de pago)
E42							
E43							
E44	Tiempo de solo excavacion por dísparo	min/dísparo	723	601	512	449	=E16
E45	Tiempo de solo sostenimiento por dísparo	min/dísparo	50	161	201	316	=E26
E46							
E47	Fraccion de excavacion		0.94	0.79	0.72	0.59	=E44/SUMA(E44:E45)
E48	Fraccion de sostenimiento		0.06	0.21	0.28	0.41	=E45/SUMA(E44:E45)
E49							
E50	Plazo	día	52	66	88	145	=E40
E51	Días que va a excavacion	día	48.9	51.7	63.2	85.0	=E50*E47
E52	Días que va a sostenimiento	día	3.4	13.9	24.8	59.8	=E50*E48
E53							
E54	Volumen pagado	m <sup>3</sup>	13,177	13,179	13,177	13,176	=E41*E40
E55							
E56	Factor de posesion de excavacion	día/m <sup>3</sup>	0.00371	0.00393	0.00480	0.00645	=E51/E54

Al multiplicar estos valores de posesión por el costo diario de posesión de equipos, se obtiene el costo de posesión por metro cubico de excavación.

B. Costo de la posesión de equipos:

Para obtener el costo de la posesión de los equipos se tiene que tener listado y cuantificado a la cuadrilla de equipos que interviene en la excavación del túnel. A este listado de equipos se le debe de asignar el costo diario de posesión de cada uno de los equipos y sumar estos costos diarios para obtener el costo diario de la cuadrilla de equipos.

Ejemplo de costo de posesión diario para una cuadrilla de equipos sobre rieles:

Tabla 8: Ejemplo de cálculo de costo de la cuadrilla de equipos

Costo de posesion	cant	usd/hr	hr/día	usd/día
Jumbo de 2 brazos 282(sobre rieles)	1	60.00	6.51	390.44
Haggloader 8HR (sobre rieles), con cucharon	1	58.00	7.91	458.77
Shuttletrain de 11.5 m <sup>3</sup> / 14 m <sup>3</sup>	4	24.00	15.07	1,446.85
Locomotora de 10 to, electrica a baterias	4	32.00	8.55	1,094.21
Bateria	8	8.65	11.00	761.54
Cargador de baterias (1 por cada 2 baterias)	4	0.90	17.60	63.36
Carro para transporte de materiales	1	4.50	0.65	2.91
Carro para transporte de personal	1	4.50	0.65	2.91
Plataforma elevadora sobre rieles	1	4.50	6.33	28.48
Camion mixer de 4 m <sup>3</sup> , sobre rieles	2	21.00	1.42	59.64
Compresora electrica 1000-1100 pcm	1	11.33	5.71	64.67
Shotcretera vía húmeda -robot, 15-20 m <sup>3</sup> /h, con robot	1	120.00	2.11	253.77
Ventilador 110-120 kw	4	2.00	9.78	78.22
Perforadora cop 1838 (s.by)	1	14.67	0.00	0.00
Planta de concreto dosificadora mezcladora 20-30 m <sup>3</sup> /h	1	8.50	1.42	12.07
Cargador 950 (para planta concreto)	1	20.00	1.42	28.40
				<b>4,746.23</b>

Para este ejemplo se observa después de cálculos, el costo diario de posesión por equipo y sumando todo esto se obtiene el costo diario por toda la cuadrilla.

### 3.5.2. Operación de equipos

#### A. Cantidad de operación de equipos

Para cuantificar a la operación de los equipos se empleará como unidad de medida a las horas máquina de cada equipo. Para esto se utilizará también al resumen del ciclo de la excavación y los tiempos involucrados en cada actividad. Luego de eso se identifican qué equipos trabajan en cada una de las actividades y la fracción de participación que tienen en el desarrollo de las mismas. Al multiplicar la fracción de participación por actividad de cada equipo con el tiempo de cada una de las actividades, se va obteniendo la cantidad de horas máquina que trabaja cada equipo. Al final se hace un resumen del total de horas máquina por equipo y por tipo de roca y se divide entre la cantidad de m<sup>3</sup> que se excava. Es así como se obtienen los factores operativos de los equipos para 1m<sup>3</sup>. A modo de ejemplo se presentará de la cantidad de horas máquina para 1m<sup>3</sup> de roca tipo 1.

Tabla 9: Estimación de las horas de operación y sus factores de incidencia

		R-1													Fila	
		Cant. prod.	Jumbo M2 braz	Hagg 3m3/min	volq 15n semroc	camion utilit	Plataf Elevad	Compres 1200 pcm	Ventil 120 kw	Elecbom 16 kw, 21-man	Perfor neum	Mart neum	Dianec 232	Eq inyec 220 lpm		
<b>RESUMEN DE UN DISTRIBO EN ROCA</b>		1	1	2,30	1	1	1	1,5	2	4	4	4	1	1		
<b>EXCAVACION:</b>																
Sondeo	min	0	0,00					0,25	1,00	0,70					1,00	
Sondeo de agua	min	0							1,00	1,00					1,00	
Inyecciones	min	0								1,00	0,70				1,00	
Desmas de vial	min	0	0,00						1,00	0,70	0,75				0,00	
Topografía, instalac. empico	min	90					0,75		1,00	0,70						
Perforación o excavación	min	250	1,00					0,50	1,00	0,70	0,10					
Carga y voladura	min	110				0,20	0,75	0,70	1,00	0,70						
Retiro e ingreso	min	31	0,50	1,00		1,00		1,00	1,00	0,70						
Ventilación	min	30							1,00	0,70						
Desplumado	min	22		1,00			0,50	0,50	1,00	0,70			0,50			
Blindaje	min	190		1,00	1,00				1,00	0,70						
Tiempo excavacion =	min	723														
<b>SOSTENIMIENTO:</b>																
Sotocrete sin malla	min	18				0,10	0,75	1,00	1,00	0,70			0,50			
Pernos	min	32	0,50			0,10	0,75	0,25	1,00	0,70	0,10					
Malla	min	0				0,10	0,75	0,25	1,00	0,70	0,10		0,50			
Cimbras	min	0				0,10	1,00	0,50	1,00	0,70	0,10		1,00			
Planchas	min	0				0,10	1,00	0,50	1,00	0,70			1,00			
Manchamientos / Spilling bars	min	0	1,00			0,10	1,00	0,50	1,00	0,70	0,50					
Micropilotes	min	0	1,00			0,10	1,00	0,50	1,00	0,70					1,00	
Tiempo de soportes =	min	60														
<b>Ciclo total efectivo</b>	min	773	Minutos	266	243	551	53	192	213	1.160	1.082	113	44	0	0	F151
	G151/G150	h-m/disp	4,43	4,05	9,38	0,88	3,20	3,55	19,33	18,04	1,88	0,73	0,00	0,00		F152
	(Area)*L(disparo efec)	m3/disp	148	148	148	148	148	148	148	148	148	148	148	148		F153
	G152/G151	h-m/m3	0,0300	0,0274	0,0622	0,0060	0,0217	0,0241	0,1309	0,1222	0,0127	0,0050	0,0000	0,0000		F154

Para este ejemplo mostrado se ha tomado en cuenta a solamente los factores de participación que se encuentran dentro del área gris. Esto quiere decir en otras palabras que en equipos como el Jumbo o el Haggloader, se calculará las horas máquina que dedican a excavación exclusivamente y estas se costearán para el cálculo del costo del m<sup>3</sup>; las

horas que trabajen en sostenimiento serán cargadas a sostenimiento. En cambio en los equipos como el ventilador o la electrobomba, se calculara inclusive las horas máquina que trabajan durante todo el ciclo (excavación y sostenimiento) y serán cobradas dentro de excavación. Esto se hace con la finalidad de no distorsionar a los precios de sostenimiento debido a que la ventilación y el bombeo de agua son factores muy variables que dependen de las condiciones del entorno y pueden alterar seriamente a los precios.

#### B. Costo de operación de los equipos.

Para obtener el costo de operación se tiene que tener el costo de mantenimiento de los equipos, el respectivo consumo de combustible (para aquellos que sean de motor diésel) y el costo del galón de diésel.

*Tabla 10: Estimaciones de tarifas de operación de la cuadrilla de equipos*

Item	Descripción	Tarifa de Operación USD/hora	TARIFAS		Combustible Diesel D2	
			Mantenimie USD/hora	Combustible USD/hora	Consumo gal/hora	Costo per hora USD/hora
1	Jumbo de 3 brazos semi automatizado ( nuevo )	73.10	64.00	9.10	2.00	9.10
2	Perforadora cop 1838 (s.by)	6.00	6.00	0.00	0.00	0.00
3	Haggloder sobre llantas 10 HR-B	49.19	41.00	8.19	1.80	8.19
4	Camion volquete de 15 m3	20.93	5.00	15.93	3.50	15.93
5	Cargador frontal cat-950 (planta)	28.48	8.00	20.48	4.50	20.48
6	Shotcretera vía húmeda -robot, 20 m3/h ( usada CDA )	51.78	44.50	7.28	1.60	7.28
7	Compresora electrica 1000-1200 pcm	12.00	12.00	0.00	0.00	0.00
8	Plataforma elevadora MT732	30.60	21.50	9.10	2.00	9.10
9	Ventilador 90 kw	4.50	4.50	0.00	0.00	0.00
10	Ventilador 140-160 kw	6.00	6.00	0.00	0.00	0.00
11	Electrobomba 16 kw	0.73	0.73	0.00	0.00	0.00
12	Electrobomba flygh 37-43 kw	1.46	1.46	0.00	0.00	0.00
13	Grupo electrogeno 545 kw	116.52	9.50	107.02	23.52	107.02
14	Grupo electrogeno 440kw	95.39	8.30	87.09	19.14	87.09
15	Grupo electrogeno 350 kw	75.00	5.20	69.80	15.34	69.80
16	Grupo electrogeno 100 kw	26.75	5.00	21.75	4.78	21.75
17	Grupo electrogeno 150 kw	37.90	6.50	31.40	6.90	31.40
18	Planta de concreto dosificador 30-40 m3/h	38.00	38	0.00	0.00	0.00
19	Planta de concreto mezcladora 30-40 m3/h	59.00	59	0.00	0.00	0.00
20	Planta de concreto dosificadora 60 m3/h	49.50	49.5	0.00	0.00	0.00
21	Planta de concreto mezcladora 60 m3/h	71.50	71.5	0.00	0.00	0.00
22	Planta de concreto dosificadora 100 m3/h	64.00	64	0.00	0.00	0.00
23	Planta de concreto mezcladora 100 m3/h	96.00	96	0.00	0.00	0.00
24	Planta concretora dosificadora de 25 m3/h	10.59	10.59	0.00	0.00	0.00
25	Bomba concretora electrica 60 m3/h (H= 15 m)	33.00	33	0.00	0.00	0.00
26	Bomba concretora electrica 60 m3/h (H= 200 m)	38.00	38	0.00	0.00	0.00
27	Camion mixer de 8 m3 convencional	36.93	21	15.93	3.50	15.93
28	Camion mixer de 4 m3 bajo perfil Huron o similar	29.65	16	13.65	3.00	13.65

#### 3.5.3. Mano de obra:

Para la estimación diaria del costo de mano de obra se hace un listado de todo el personal que trabajará durante todo el día para ejecutar las labores

de la excavación subterránea. Se incluirá también al personal directo que asiste desde superficie a los equipos subterráneos así como los operadores de la planta de producción de shotcrete y de su cargador frontal que trabaja en las afueras del portal del túnel.

Para determinar la cantidad se asignarán dos operadores pesados (uno para turno de día y otro para turno de noche) para los siguientes equipos:

Equipo Jumbo para perforacion Rockdrill Equipo de carga en superficie (950 o 966) Haggloader (pala eléctrica) Scoop (2, 3.5 o 6yd3) Excavadora con martillo Shotcretera vía húmeda + robot Shotcretera via seca Planta de dosificadora de concreto Retrocargador
---

Dos operadores de equipo mediano para los siguientes equipos:

Camiones volquete (de 12 o 15m3) Camion mixer bajo perfil Camion mixer convencionales Perforadora Diamec
---

Dos operadores de equipo liviano para los siguientes equipos:

Camión utilitario Telehandler Compresora electrica Equipo inyección Winche de materiales Winche de personal
--

Además de los operadores en mención, se contará con dos capataces, dos topógrafos y operarios, oficiales y ayudantes para equipos manuales.

Para el caso del análisis de los ratios en estudio en el presente informe se ha tomado una cuadrilla diaria representativa de la siguiente manera:

Tabla 11: Estimaciones del costo de mano de obra por largo de túnel

MANO DE OBRA: (inc excav + pta conc)		Cuadrilla de acuerdo a la longitud de túnel			
Descripción	P.Unit. USD/hh	L= 500m	L=1000m	L=1500m	L=2000m
Topógrafo	11.83	2	2	2	2
Capataz	12.27	2	2	2	2
Operador Jumbo	12.27	2	2	2	2
Operador Pesado	11.83	8	8	8	8
Operador mediano	10.97	12	12	14	16
Operador liviano	9.95	8	8	8	8
Operario	9.99	8	8	8	8
Oficial	8.76	4	4	4	4
peon	8.02	4	4	4	4
<b>Subtotal cuadrilla</b>		<b>50</b>	<b>50</b>	<b>52</b>	<b>54</b>
<b>Subtotal USD/día de Mano de obra</b>		<b>5,782</b>	<b>5782.26</b>	<b>6023.6</b>	<b>6264.94</b>

Como se puede observar, la cuadrilla depende de la longitud del túnel. Esto se debe a que hay variaciones en la cantidad de los operadores medianos pues parte de estos varían de acuerdo con la cantidad de camiones que hay en el túnel. Cabe recordar que la cantidad de camiones varía de acuerdo con el ciclo de eliminación que depende directamente de la longitud del túnel y de la distancia del botadero en superficie.

#### 3.5.4. Materiales:

Dentro de este rubro se encuentran lo que son las instalaciones auxiliares del túnel y los explosivos con sus accesorios respectivos.

##### A. Cantidad:

Primeramente se hace el cálculo de las instalaciones auxiliares, este ítem dependerá de bastante rubros que comprenden principalmente a línea de agua, línea desagüe, línea de aire comprimido, línea de ventilación, líneas de distribución eléctrica, vías de rieles (de ser el caso) y otros materiales diversos. Para fines de estimación, se considera un ratio de 500USD/ml que va de acuerdo a las experiencias en proyectos desarrollados. Este costo se reparte entre todos los metros cúbicos de excavación y este monto se asignará dentro de la subpartida de materiales.

Tabla 12: Ejemplo de estimación de costo de servicios por metro cúbico

Descripción	Unidad	Cantidad
Sección de túnel	m2	35.14
Costo de instalaciones auxiliares	USD/ml	500.00
Costo de instalaciones auxiliares	USD/m3	14.23

Para las cantidades de explosivos, se tendrá que calcular los explosivos que se utilizarán por disparo en cada tipo de roca. Esta cantidad se multiplica por el número de disparos y se divide entre la cantidad de metros cúbicos de excavación.

Tabla 13: Ejemplo de incidencias de materiales

EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA / M3	Unidad	TUNEL 6.00x6.50			
		R-1	R-2	R-3B	R-4B
Conector	un	0.007	0.009	0.014	0.021
Aceros de perforacion	m	2.927	2.825	2.670	2.561
Dinamita 45%	kg	0.271	0.245	0.237	0.252
Dinamita 65%	kg	1.318	1.330	1.167	1.286
Dinamita 80%	kg	0.524	0.479	0.467	0.000
Exacorte	kg	0.000	0.000	0.000	0.000
Mecha	m	0.060	0.076	0.109	0.167
Cordon detonante	m	1.305	1.314	1.463	1.761
Fulminante	un	0.007	0.009	0.014	0.021
Fanel	un	0.683	0.824	1.078	1.494
Tuberia PVC 1"	m	0.992	0.913	0.878	0.861

De acuerdo con análisis de la cantidad de explosivos se ha determinado que esta cantidad depende principalmente de la sección a excavar y del tipo de roca.

- A mayor el área transversal del túnel, menor es la cantidad de explosivos por metro cúbico.
- A menor calidad de roca, menor es la cantidad de explosivos por metro cúbico.

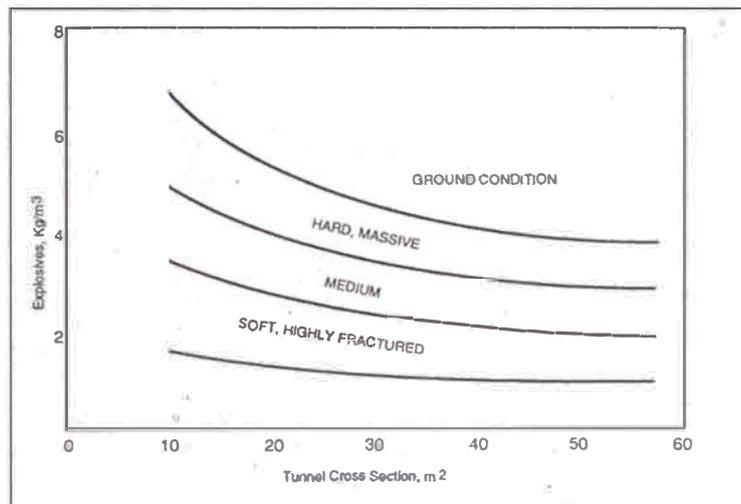


Figura 30: Factor de carga de explosivos de acuerdo a la roca y a la sección

B. Costo de materiales:

Para obtener el costo de explosivos se mandará a cotizar a proveedores autorizados como EXSA o FAMESA. Cabe indicar que para realizar estas cotizaciones es necesario indicar la ubicación del proyecto ya que estos materiales son cotizados directamente puesto en polvorín de la obra.

Para el presente informe se utilizarán ratios de costos de explosivos de acuerdo como sigue:

Tabla 14: Área por roca versus USD/m<sup>3</sup> de explosivo



Como se puede observar, al igual que lo que sucede con la cantidad de explosivos, a menor la calidad de roca, menor es el costo de explosivos, y a su vez a mayor el tamaño de la sección, es menor el costo de explosivos.

3.5.5. Energía

A. Cantidad:

Para medir la energía utilizada en túneles se utiliza los kW-h, para estimar cuántos kW-h se hace de similar manera que para calcular las horas máquina de los equipos. Este cálculo es solo para equipos eléctricos. Hay que tomar en cuenta que los equipos eléctricos no consumirán su carga al 100% ni tampoco trabajarán completamente en simultaneo, por eso es que se aplicará factores de carga y simultaneidad.

Tabla 15: Factores de potencia para cálculo de kW-h

Item	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Formula
Fila	FASES DEL CICLO DE EXCAVACION											Sumada			
	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	Arreglo de cables	
F180	FACTORES DE POTENCIA UTILIZADA:														
F181	BOMBEO:														
F182	Sondeo											43 SUMAPRODUCTO(F182B-F182C-F182D-F182E-F182F-F182G)			
F183	Bombeo de agua											75 SUMAPRODUCTO(F183B-F183C-F183D-F183E-F183F-F183G-F183H-F183I-F183J-F183K-F183L-F183M-F183N-F183O-F183P-F183Q-F183R-F183S-F183T-F183U-F183V-F183W-F183X-F183Y-F183Z)			
F184	Inyecciones											91 SUMAPRODUCTO(F184B-F184C-F184D-F184E-F184F-F184G-F184H-F184I-F184J-F184K-F184L-F184M-F184N-F184O-F184P-F184Q-F184R-F184S-F184T-F184U-F184V-F184W-F184X-F184Y-F184Z)			
F185	Drenes de alivio											75 SUMAPRODUCTO(F185B-F185C-F185D-F185E-F185F-F185G-F185H-F185I-F185J-F185K-F185L-F185M-F185N-F185O-F185P-F185Q-F185R-F185S-F185T-F185U-F185V-F185W-F185X-F185Y-F185Z)			
F201	Topografía, instalac, mapeo											180 SUMAPRODUCTO(F201B-F201C-F201D-F201E-F201F-F201G-F201H-F201I-F201J-F201K-F201L-F201M-F201N-F201O-F201P-F201Q-F201R-F201S-F201T-F201U-F201V-F201W-F201X-F201Y-F201Z)			
F202	Perforacion o excavacion											180 SUMAPRODUCTO(F202B-F202C-F202D-F202E-F202F-F202G-F202H-F202I-F202J-F202K-F202L-F202M-F202N-F202O-F202P-F202Q-F202R-F202S-F202T-F202U-F202V-F202W-F202X-F202Y-F202Z)			
F203	Carga y voladura											180 SUMAPRODUCTO(F203B-F203C-F203D-F203E-F203F-F203G-F203H-F203I-F203J-F203K-F203L-F203M-F203N-F203O-F203P-F203Q-F203R-F203S-F203T-F203U-F203V-F203W-F203X-F203Y-F203Z)			
F204	Retiro e ingreso											180 SUMAPRODUCTO(F204B-F204C-F204D-F204E-F204F-F204G-F204H-F204I-F204J-F204K-F204L-F204M-F204N-F204O-F204P-F204Q-F204R-F204S-F204T-F204U-F204V-F204W-F204X-F204Y-F204Z)			
F205	Ventilacion											180 SUMAPRODUCTO(F205B-F205C-F205D-F205E-F205F-F205G-F205H-F205I-F205J-F205K-F205L-F205M-F205N-F205O-F205P-F205Q-F205R-F205S-F205T-F205U-F205V-F205W-F205X-F205Y-F205Z)			
F206	Desquince											180 SUMAPRODUCTO(F206B-F206C-F206D-F206E-F206F-F206G-F206H-F206I-F206J-F206K-F206L-F206M-F206N-F206O-F206P-F206Q-F206R-F206S-F206T-F206U-F206V-F206W-F206X-F206Y-F206Z)			
F207	Eliminacion											180 SUMAPRODUCTO(F207B-F207C-F207D-F207E-F207F-F207G-F207H-F207I-F207J-F207K-F207L-F207M-F207N-F207O-F207P-F207Q-F207R-F207S-F207T-F207U-F207V-F207W-F207X-F207Y-F207Z)			
F208	SOSTENIMIENTO:														
F209	Shotcrete sin malla											180 SUMAPRODUCTO(F209B-F209C-F209D-F209E-F209F-F209G-F209H-F209I-F209J-F209K-F209L-F209M-F209N-F209O-F209P-F209Q-F209R-F209S-F209T-F209U-F209V-F209W-F209X-F209Y-F209Z)			
F301	Pernos											180 SUMAPRODUCTO(F301B-F301C-F301D-F301E-F301F-F301G-F301H-F301I-F301J-F301K-F301L-F301M-F301N-F301O-F301P-F301Q-F301R-F301S-F301T-F301U-F301V-F301W-F301X-F301Y-F301Z)			
F302	Malla											180 SUMAPRODUCTO(F302B-F302C-F302D-F302E-F302F-F302G-F302H-F302I-F302J-F302K-F302L-F302M-F302N-F302O-F302P-F302Q-F302R-F302S-F302T-F302U-F302V-F302W-F302X-F302Y-F302Z)			
F303	Cimbras											180 SUMAPRODUCTO(F303B-F303C-F303D-F303E-F303F-F303G-F303H-F303I-F303J-F303K-F303L-F303M-F303N-F303O-F303P-F303Q-F303R-F303S-F303T-F303U-F303V-F303W-F303X-F303Y-F303Z)			
F304	Planchas											180 SUMAPRODUCTO(F304B-F304C-F304D-F304E-F304F-F304G-F304H-F304I-F304J-F304K-F304L-F304M-F304N-F304O-F304P-F304Q-F304R-F304S-F304T-F304U-F304V-F304W-F304X-F304Y-F304Z)			
F305	Marchavantis / Spiling bars											180 SUMAPRODUCTO(F305B-F305C-F305D-F305E-F305F-F305G-F305H-F305I-F305J-F305K-F305L-F305M-F305N-F305O-F305P-F305Q-F305R-F305S-F305T-F305U-F305V-F305W-F305X-F305Y-F305Z)			
F306	Micropilotes											180 SUMAPRODUCTO(F306B-F306C-F306D-F306E-F306F-F306G-F306H-F306I-F306J-F306K-F306L-F306M-F306N-F306O-F306P-F306Q-F306R-F306S-F306T-F306U-F306V-F306W-F306X-F306Y-F306Z)			

Tabla 16: Ejemplo de cálculo de kW-h por m3 de roca

Columna	C	D	E	F	G	H	I	Formula
	RESUMEN DE UN DISPARO	R-1	R-2	R-3B	R-4B	kW para consumo		
EXCAVACION:								
Sondeo	hrs	0.0	0.0	0.0	0.1	83		
Bombeo de agua	hrs	0.0	0.0	0.0	0.1	75		
Inyecciones	hrs	0.0	0.0	0.6	0.8	92		
Drenes de alivio	hrs	0.0	0.0	0.0	0.1	70		
Topografía, instalac, mapeo	hrs	1.5	1.4	1.2	1.0	118		
Perforacion o excavacion	hrs	4.2	3.5	2.7	2.1	284		
Carga y voladura	hrs	1.8	1.5	1.1	0.9	187		
Retiro e ingreso	hrs	0.5	0.5	0.5	0.5	105		
Ventilacion	hrs	0.5	0.5	0.5	0.5	130		
Desquince	hrs	0.4	0.3	0.3	0.2	207		
Eliminacion	hrs	3.1	2.4	1.8	1.3	188		
Tiempo excavacion, sin soportes=	hrs	12.0	10.0	8.5	7.5			
SOSTENIMIENTO:								
Shotcrete sin malla	hrs	0.3	1.3	1.4	1.0	300		
Pernos	hrs	0.5	1.4	2.0	1.2	31.5		
Malla	hrs	0.0	0.0	0.0	0.3	181		
Cimbras	hrs	0.0	0.0	0.0	1.3	18.5		
Planchas	hrs	0.0	0.0	0.0	0.0	181		
Marchavantis / Spiling bars	hrs	0.0	0.0	0.0	1.5	31.5		
Micropilotes	hrs	0.0	0.0	0.0	0.0	31.5		
Tiempo de soportes que afectan al ciclo	hrs	0.8	2.7	3.4	5.3			
Ciclo total efectivo (c/ta etapa de excav y soporte)	hrs	12.8	12.7	11.8	12.8			
Kilowatts hora requerido por disparo	kW-h/disp	2,741	2,883	2,682	2,805	SUMAPRODUCTO(F313:F333,S1313:S1333)		
Avance efectivo por disparo	m/disp	4.20	3.30	2.30	1.50	Long Taladro - 0.30m		
Seccion de pago	m2	35.14	35.14	35.14	35.14	Seccion teórica del tunel		
Volumen pagado por disparo	m3/disp	148	116	81	53	F339*F340		
Energia por metro cubico	kW-h/m3	18.57	24.86	33.18	53.21	F337/(F339*F340)		

B. El costo del kW-h se calculará de acuerdo con el tipo de suministro disponible de energía eléctrica. Si es suministrado por una empresa de distribución, entonces el costo será simplemente la tarifa del kW-h acordado con el proveedor la cual podrá estar alrededor de los 0.05USD/kW-h. Cabe señalar que habría que calcular y cotizar los equipos y materiales para distribuir la electricidad desde el punto de entrega hasta el frente de labores. Si el suministro eléctrico es por grupos electrógenos entonces se dividirá el costo total de posesión, mantenimiento y combustible entre la cantidad de kW-h que requiere el proyecto y así se calculará el costo por kW-h. Como ratio se utilizará para el presente informe el valor de 0.27USD/kW-h el cual está en el orden de magnitud de costos de la energía eléctrica suministrada por grupos.

## CAPITULO IV: ANALISIS DE LOS COSTOS EN DIFERENTES ESCENARIOS

Para hacer el análisis de costos en diferentes escenarios primeramente se definirán los principales límites del análisis.

### Sobre el túnel, ventilación y energía

Longitud	500 - 2,000m
Area	18 - 36m <sup>2</sup>
RMR	20-100
Frente de trabajo	Cerrado: un solo frente
Tipo de ventilación	Insuflante
Suministro de energía	Por grupos electrógenos

### Sobre el equipo de excavación

Sistema: sobre neumáticos

- 1 Jumbo: convencional (sin sistema automatizado) de 2 brazos con perforadoras COP1838
- 1 Haggloader: modelo 10 HR de 3m<sup>3</sup>/min o similar.
- N Camiones: recortados de 12m<sup>3</sup> y de 440hp (Si Longitud del túnel =500 o 1000m, n=3 o si Longitud de túnel=1500 o 2000m, n=4)
- 1 camión utilitario para transporte de materiales.
- 1 Telehandler (plataforma elevadora)
- 1 Compresora eléctrica 1000-1100pcm
- 2 Electrobombas de 16kW
- 4 perforadoras manuales con pie de avance
- 4 martillos neumáticos
- 2 camiones mixer de bajo perfil de 4m<sup>3</sup>
- 1 planta dosificadora de concreto de 20-25m<sup>3</sup>/h
- 1 Cargador frontal 950
- 1 perforadora cop-1838 en stand-by

- Ventiladores de 90 kW, 110-120kW o 150-160kW (la cantidad y potencia dependerá de la sección y longitud del túnel). De manera resumida se tienen los siguientes ventiladores para los escenarios analizados:

Tabla 17: Potencia recomendada de ventilador de acuerdo a largo y sección

Dimensiones de Tunel		Longitud (m)			
Ancho	Alto	500	1000	1500	2000
4.00	4.50	1x90kW	1x160kW	4x160kW	6x160kW
4.50	4.50	1x90kW	1x160kW	4x160kW	6x160kW
4.50	5.00	1x90kW	1x90kW	2x90kW	2x120kW
5.00	5.00	1x90kW	1x90kW	2x90kW	2x120kW
5.00	5.50	1x90kW	1x90kW	2x90kW	2x120kW
5.50	5.50	1x90kW	1x90kW	2x90kW	2x120kW
5.50	6.00	1x90kW	1x90kW	2x90kW	2x120kW
6.00	6.00	1x90kW	1x90kW	2x90kW	2x120kW
6.00	6.50	1x90kW	1x90kW	2x90kW	2x120kW

### Consideraciones del sostenimiento

Tabla 18: Consideraciones del sostenimiento

Tipo de roca	Shotcrete	Pernos	Malla	Cimbras
Roca - 1	20% de lo calculado para Roca - 2	Pernos ocasionales, 20% de los pernos de bóveda de Roca-2	No aplica	No aplica
Roca - 2	5cm en bóveda y hastiales	Helicoidales en patrón 2.00x2.00 en bóveda y hastiales	No aplica	No aplica
Roca - 3	10cm en bóveda y hastiales	Helicoidales en patrón 2.00x2.00 en bóveda y hastiales	No aplica	No aplica
Roca - 4	15cm en bóveda y hastiales	Helicoidales en patrón 1.50x1.50 en bóveda y hastiales al 50%	Malla Ø=6mm 150mm x 150mm en bóveda y hastiales al 50%	Marcos reticulados 10-26-18 espaciados cada 1.50m al 50%

Como se observa en el sostenimiento de la roca 4 (RMR 20-40) hay una composición de un sostenimiento correspondiente a una roca de RMR30-40 y un sostenimiento correspondiente a una roca de RMR 20-30. Esto ocurre debido a que cuando se tiene roca 4, el sostenimiento puede llevar o no llevar cimbras

### Consideraciones de los costos

No se considerará el costo del sostenimiento, ni dentro del metro cubico ni dentro del metro lineal. La razón de no considerarlo obedece a que la cantidad de sostenimiento que hay en cada tipo de roca tiene mucha variabilidad porque depende de un diseño de acuerdo con las condiciones

particulares del proyecto. Para el análisis de los ciclos de los escenarios evaluados se ha considerado sostenimientos típicos de acuerdo con la calidad de la roca.

#### 4.1. RATIOS DE COSTOS POR METRO CÚBICO (M3) Y METRO LINEAL (ML) PARA DIFERENTES LONGITUDES DE TÚNEL

De acuerdo con las consideraciones, la metodología desarrollada y sin tomar en cuenta el efecto del gasto de energía ni el gasto de mantenimiento debido a la ventilación, se han preparado escenarios en los que se estima el costo de excavación para diferentes escenarios en los que se va variando el tipo de roca, el área de la sección y la longitud del túnel a excavar.

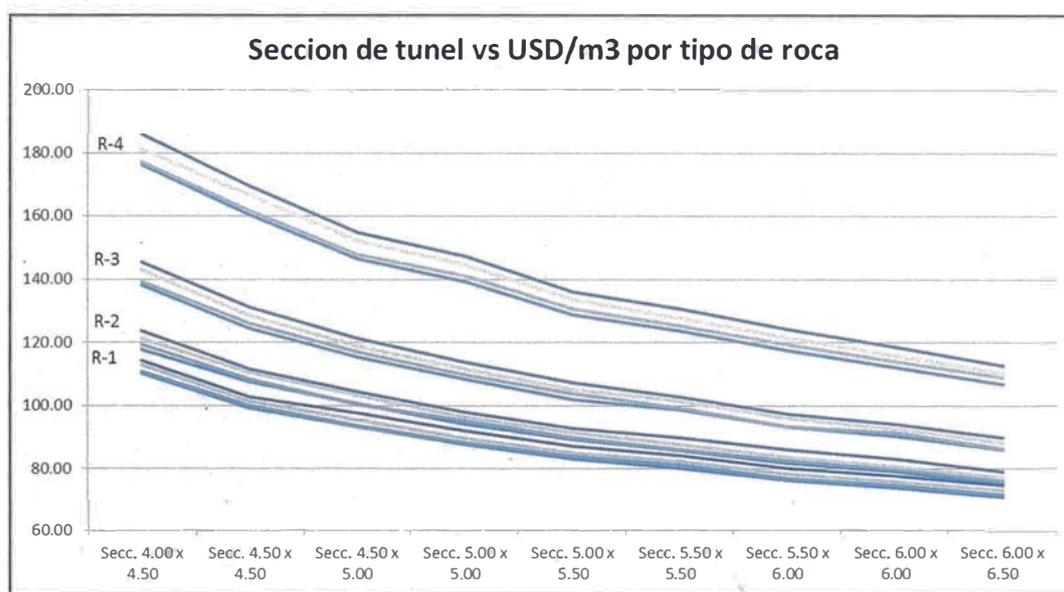


Figura 31: Costos unitarios por m3 para longitudes diferentes

En el gráfico se pueden observar que por cada tipo de roca existen 4 líneas. De abajo a arriba, cada una de estas líneas representa el costo para una longitud de túnel desde L=500m, L=1000m, L=1500m y L=2000m.

Como se observa, la longitud incide poco en el costo del m3 de excavación de túnel. A medida que la longitud del túnel va aumentando, el costo del m3 aumenta pero ligeramente. Este pequeño aumento se debe a que el ciclo de eliminación se hace más largo haciendo que los camiones tengan que utilizar mayor cantidad de horas-máquina para eliminar el volumen resultante del disparo.

Si a los costos de los gráficos mostrados los multiplicamos por el área transversal respectiva se obtiene el costo de excavación por metro lineal.

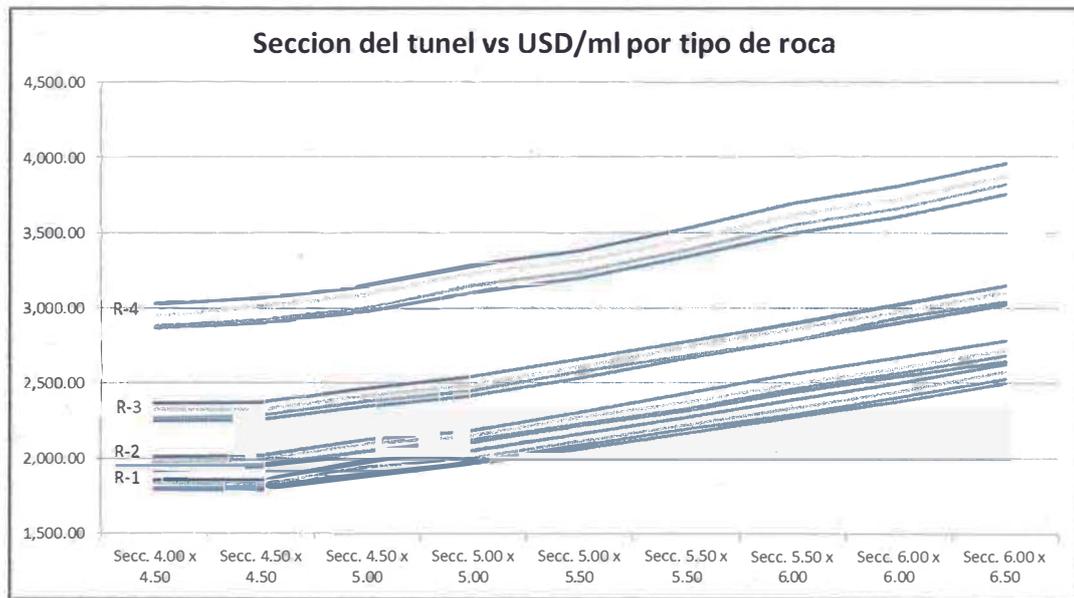


Figura 32: Costos unitarios por ml para diferentes longitudes

En el gráfico se pueden observar que por cada tipo de roca existen 4 líneas. De abajo a arriba, cada una de estas líneas representa el costo para una longitud de túnel desde L=500m, L=1000m, L=1500m y L=2000m.

Al igual que en los costos por metro cúbico, se observa que el costo por metro lineal no cambia sustancialmente al aumentar la longitud del túnel.

#### 4.2. RATIOS DE COSTOS POR METRO CÚBICO (M3) INCLUYENDO AL IMPACTO DE LA VENTILACIÓN

En los escenarios anteriores son costos hipotéticos que no consideran ventilación. Se hizo esta obviedad intencionalmente para evaluar variaciones de costos de acuerdo con la longitud y sección del túnel separadamente de las variaciones inducidas por la ventilación. Gracias a esto se puede descartar que las variaciones del tiempo ciclo de eliminación debido a cambios de longitud no son relevantes en el costo del túnel. Ahora en los siguientes escenarios se ha incluido el efecto de la energía y equipos involucrados en la ventilación del túnel.

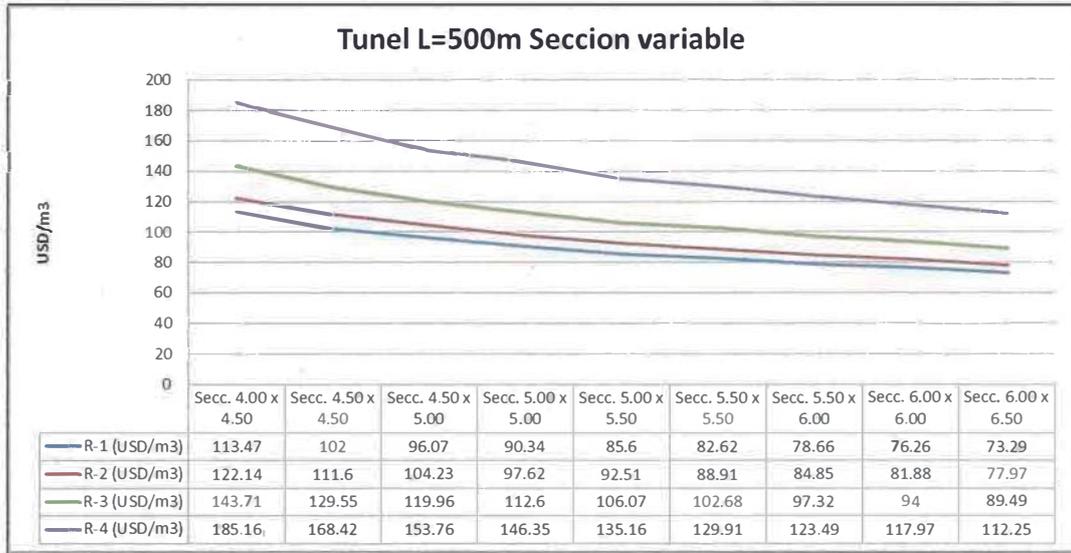


Figura 33: Costos unitarios por m³ para L=500m

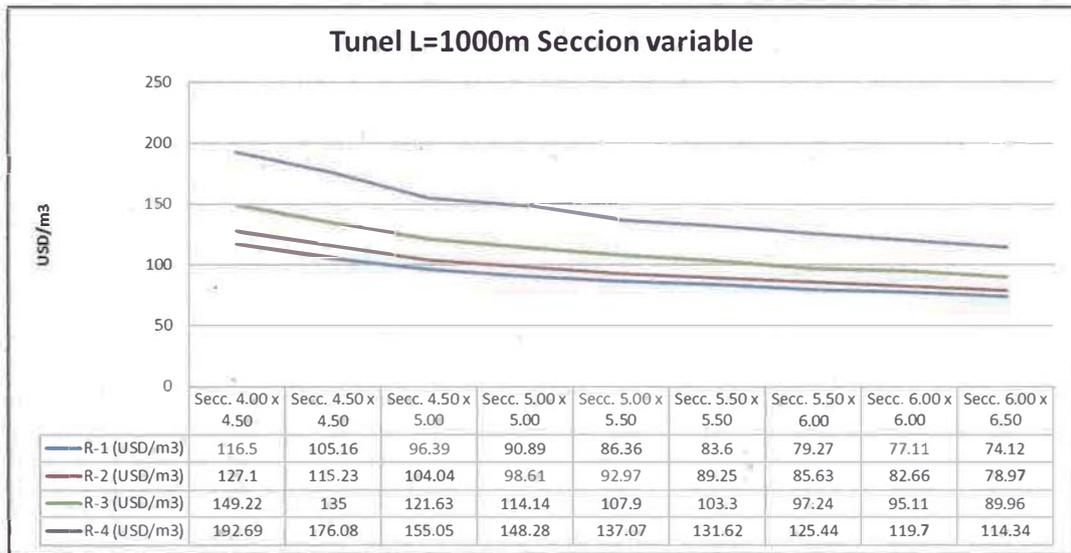


Figura 34: Costos unitarios por m³ para L=1,000m

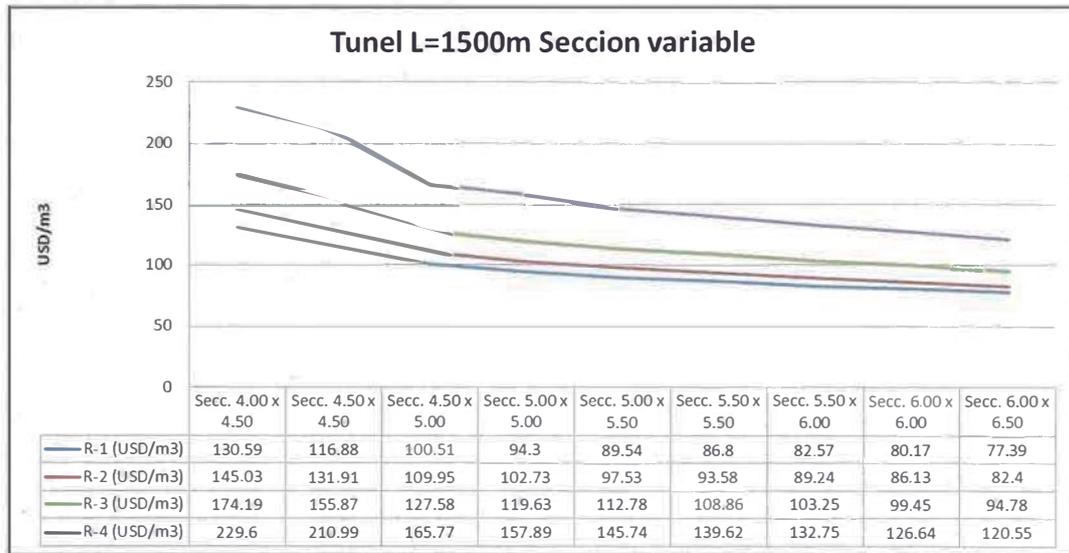


Figura 35: Costos unitarios por m³ para L=1,500m

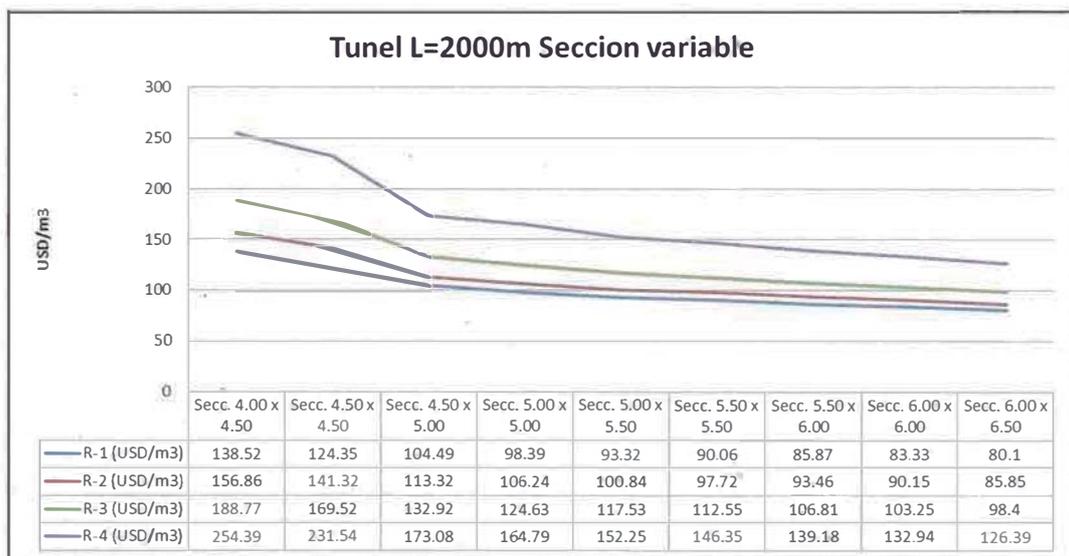


Figura 36: Costos unitarios por m³ para L=2,000m

Como se puede observar, en los túneles de menor sección (4.00x4.50 y 4.50x4.50) el aumento de costos se ha hecho más acentuado y sobretodo en las longitudes más largas (1500 y 2000m). Separando graficamente a las rocas 3 y 4 para ver el impacto de la longitud se obtiene lo siguiente:

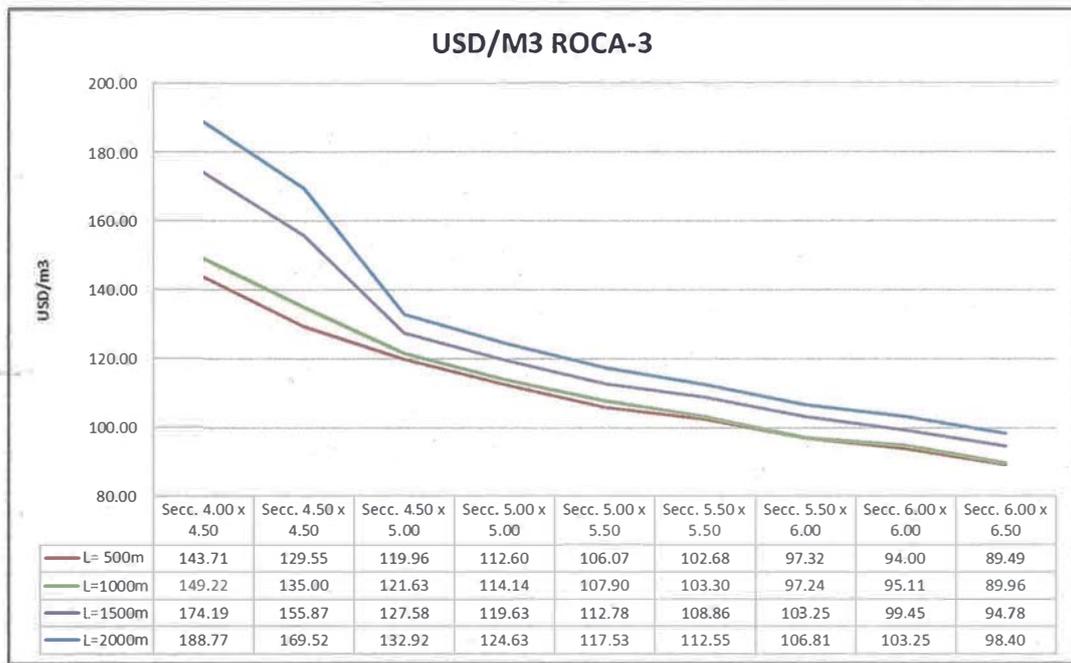


Figura 37: Costos unitarios por m3 en roca 3

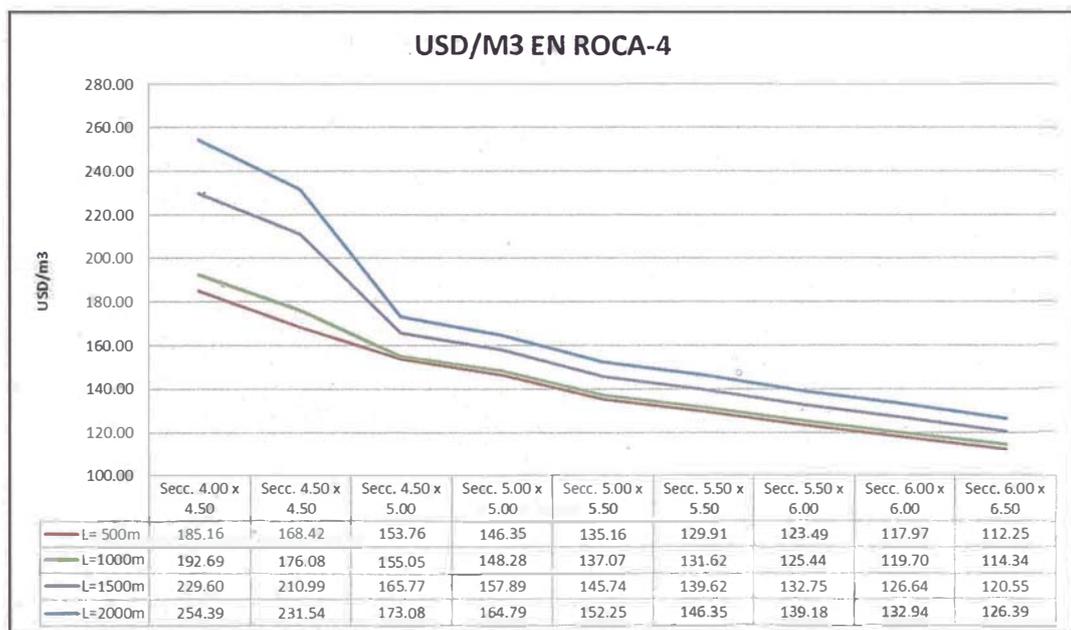


Figura 38: Costos unitarios por m3 en roca 4

Esto es debido a que la ventilación se hace crítica en las secciones más pequeñas y en los túneles más largos. En los túneles de 4.00x4.50 y 4.50x4.50 se ha hecho el análisis con ductos de 1.30m de diámetro a diferencia de los demás que se hicieron con ductos de 1.70m de diámetro. Se utilizaron ductos más pequeños debido a que es el mayor tamaño que

puede entrar para esa altura de bóveda sin que el ducto choque con los equipos subterráneos. En los ductos de 1.30m, la pérdida de carga es entre **3 a 4** veces más fuerte que en los de 1.70m, por tal razón la energía necesaria para impulsar el aire es mayor ya que la potencia de los ventiladores varía de manera directamente proporcional con la presión que tienen que suministrar.

#### 4.3. RATIOS DE COSTOS POR METRO LINEAL (ML) INCLUYENDO AL IMPACTO DE LA VENTILACIÓN

Ahora, a los escenarios anteriores se les multiplica por el area transversal respectiva de túnel para poder graficar los costos por metro lineal de excavación ya incluyendo a la ventilación.

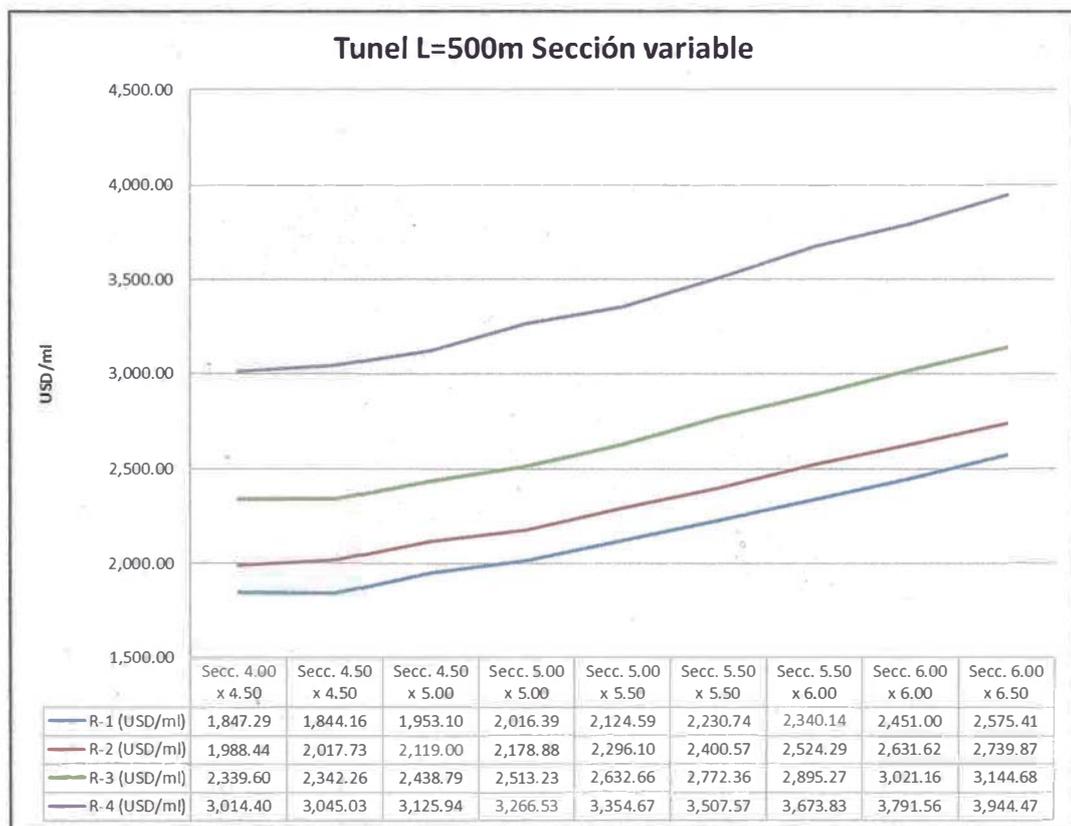


Figura 39: Costos unitarios por ml para L=500m

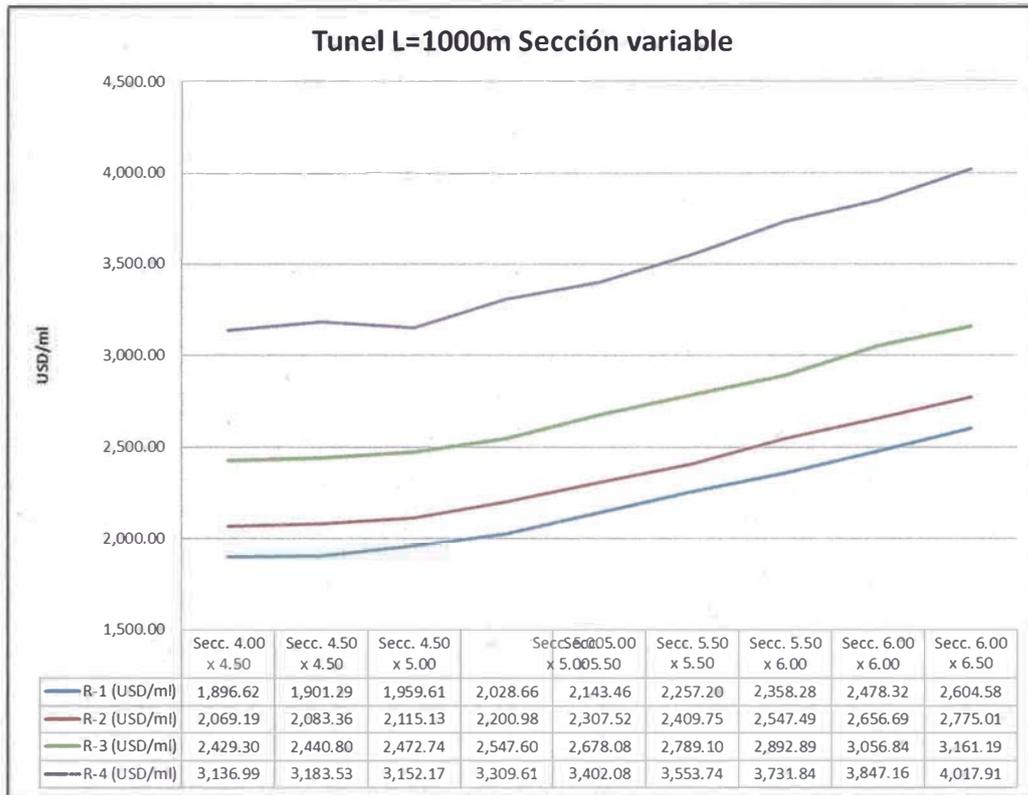


Figura 40: Costos unitarios por ml para L=1,000m

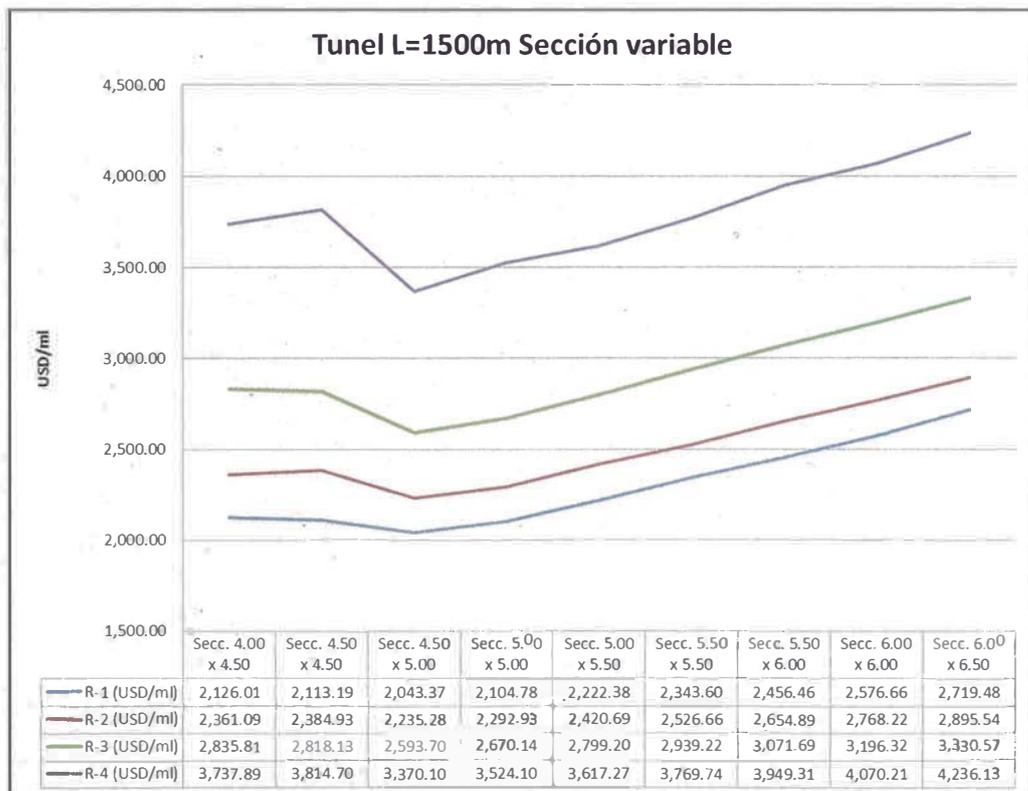


Figura 41: Costos unitarios por ml para L=1,500m

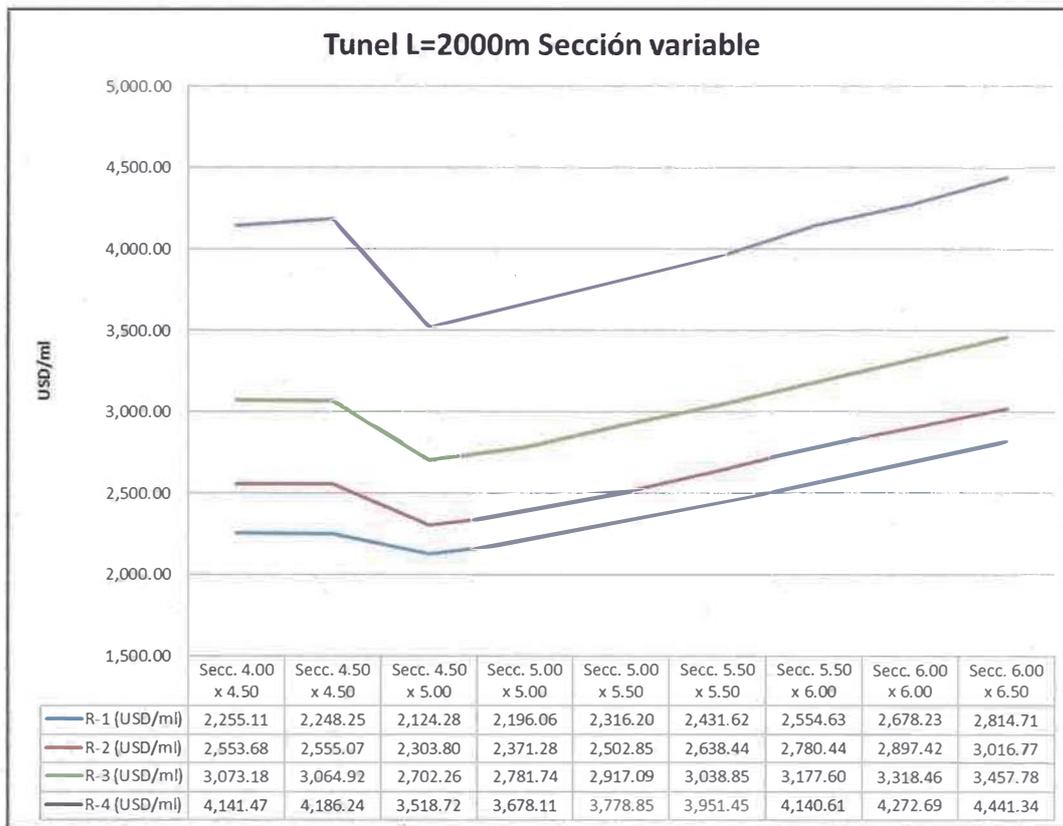


Figura 42: Costos unitarios por ml para L=2,000m

En estas gráficas podemos observar algo interesante y es que en los escenarios de longitud igual 1500m y 2000m los costos por metro lineal de los túneles más pequeños (4.00x4.50 y 4.50x4.50) muestran valores más elevados que los túneles de sección de 4.50x5.00, 5.00x5.00 y 5.00x5.50. Este efecto es debido a la fuerte cantidad de energía que se utiliza para impulsar el aire en ductos de 1.30m de diámetro. Al pasar de la sección 4.50x4.50 a la sección 4.50x5.00 se permite que haya más espacio en la zona superior de la sección del túnel por lo que se puede utilizar un ducto más grande. En este caso se pasó de utilizar un ducto de 1.30m a 1.70m de diámetro. Esto significa mayor cantidad de m<sup>3</sup> para excavar sin embargo el resultado es que hay menores costos si analizamos a todo como un conjunto. Por esto es que en túneles de sección reducida y longitud relativamente larga vale la pena estimar rápidamente al impacto de la ventilación en el costo con el fin analizar la posibilidad de agrandar las secciones indicadas en los planos y reducir los costos de excavación.

#### 4.4. VARIACION DE RATIOS DE COSTOS DEBIDO A VARIACIONES EN LA LONGITUD DE DISPARO

Aumentar o disminuir la longitud de disparo puede impactar fuertemente en los costos de excavación de túneles. Cuando se aumenta la longitud de disparo, se aumenta la cantidad de metros lineales de perforación que hay que hacer en el frente, así como también el metrado de limpieza y sostenimiento por ciclo, sin embargo el avance promedio se ve afectado positivamente porque los tiempos fijos de cada ciclo se diluyen entre un mayor metrado de roca excavada. Por eso aumentar la longitud de disparo reduce el costo promedio de la excavación sin embargo el límite de cuanto se puede avanzar por disparo será determinado por el geólogo especialista en el mismo campo. Mientras mayor sea la longitud de disparo existe mayor cantidad de roca descubierta durante la etapa de desquinche, limpieza y sostenimiento, lo que implicaría un mayor riesgo de posibles derrumbes debido al mayor espacio que se le da a la roca para deformarse.

Para mostrar lo señalado se ha elegido como escenario de estimación a un túnel de sección 5.00 x 5.00m y L=1,000m

*Tabla 19: Costos por m<sup>3</sup> para sección 5.00 x 5.00*

<b>Seccion 5.00x5.00 L=1000m</b>	<b>R-1</b>	<b>R-2</b>	<b>R-3</b>	<b>R-4</b>
Longitud de disparo (m)	4.20	3.10	2.10	1.50
USD/m <sup>3</sup>	92.6	102.9	121.8	159.4
<b>Seccion 5.00x5.00 L=1000m</b>	<b>R-1</b>	<b>R-2</b>	<b>R-3</b>	<b>R-4</b>
Longitud de disparo (m)	4.50	3.60	2.60	1.80
USD/m <sup>3</sup>	90.9	98.6	114.1	148.3
<b>Seccion 5.00x5.00 L=1000m</b>	<b>R-1</b>	<b>R-2</b>	<b>R-3</b>	<b>R-4</b>
Longitud de disparo (m)	4.80	4.10	3.00	2.20
USD/m <sup>3</sup>	89.6	94.3	108.7	134.0

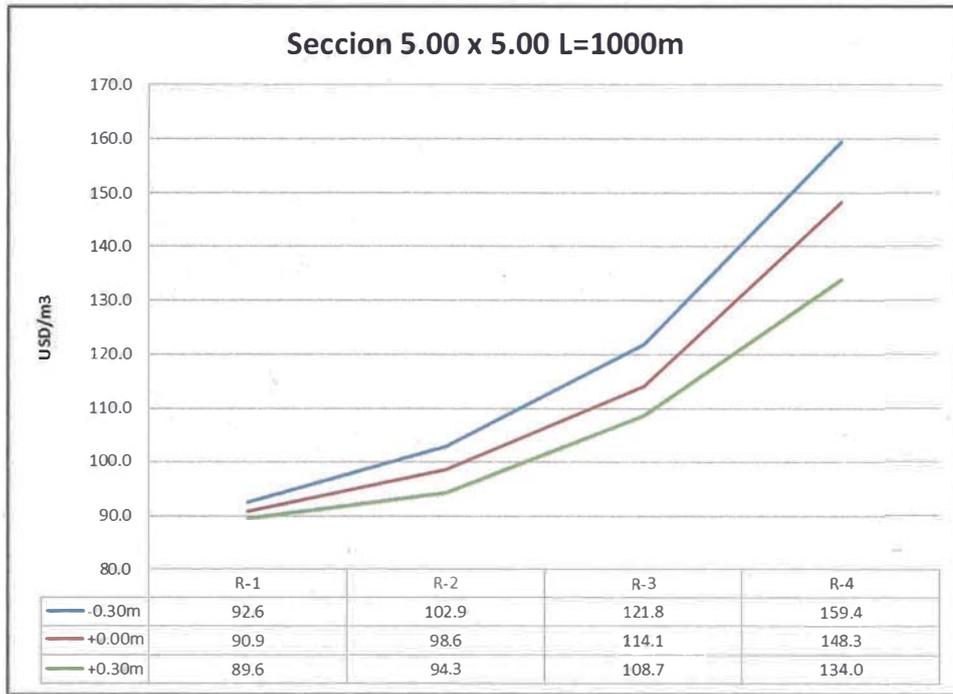


Figura 43: Variación de costos por m<sup>3</sup> debido a cambio de longitud de disparo

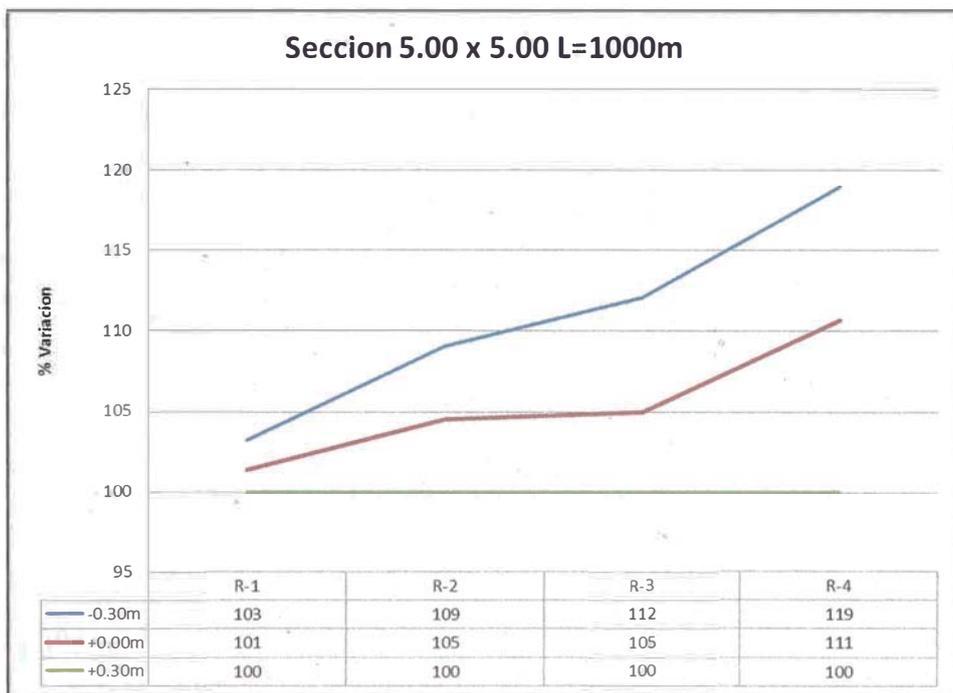


Figura 44: Porcentajes de variación de costos por m<sup>3</sup>

#### 4.5. IMPACTO DEL COSTO DE LA ENERGIA EN LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES

La energía en la excavacion de obras subterráneas puede provenir de las redes de alta tensión o puede ser generada en la misma obra por medio de grupos electrógenos. Si la energía es traída por medio de una red de alta tensión a través de cables, entonces su costo en promedio es de 0.06 USD/kW-h. En cambio si la energía tiene que ser producida mediante grupos electrógenos entonces su costo puede estar entre 0.26 a 0.30 USD/kW-h. Dependiendo de la fuente de suministro de la energía se analizará dos escenarios, en el primero la energía será suministrada por grupos electrógenos y en la segunda será suministrada por la red eléctrica nacional.

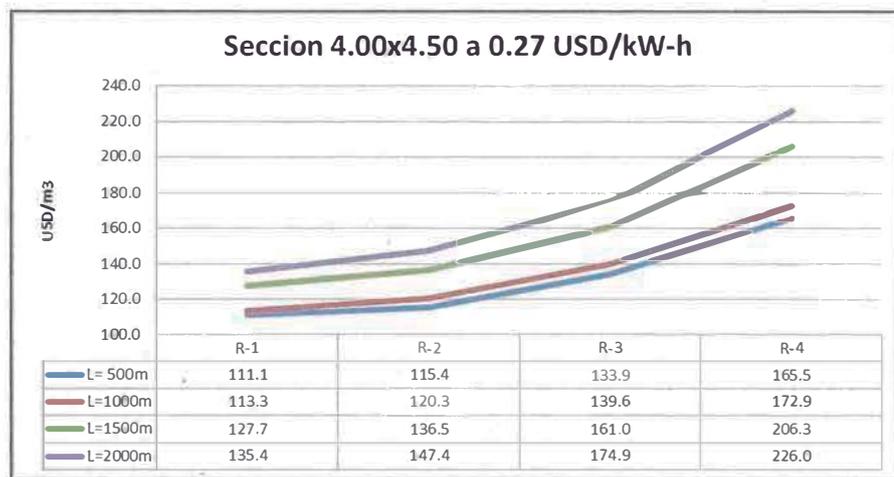


Figura 45: Costos por m<sup>3</sup> considerando energía de Grupos Electrónicos

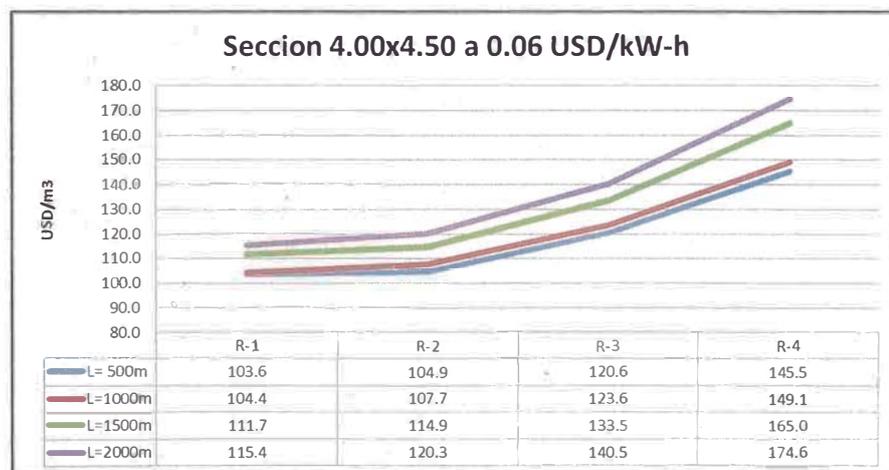


Figura 46: Costos por m<sup>3</sup> considerando energía de subestación

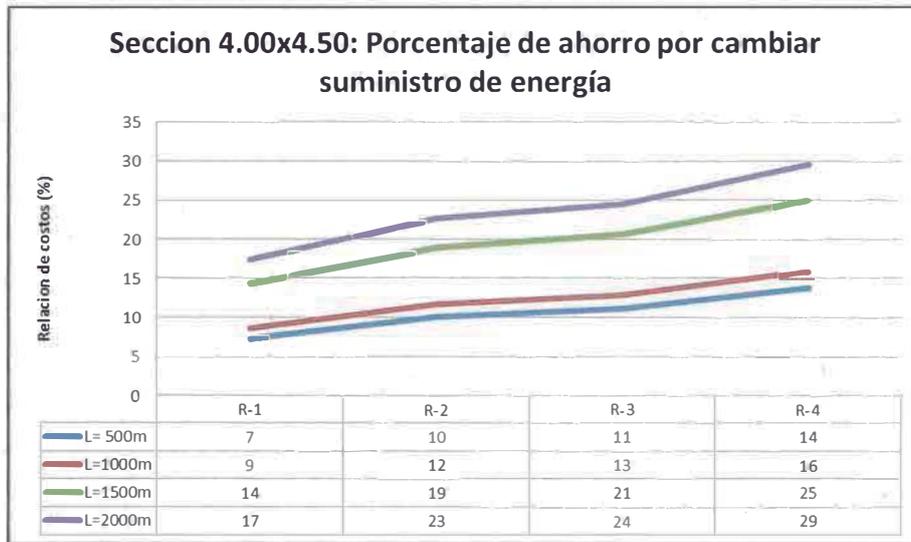


Figura 47: Comparación porcentual de elegir G.E. o suministro por red

Al igual que en los graficos anteriores, se hace una simulacion similar pero para una seccion de mayor area.

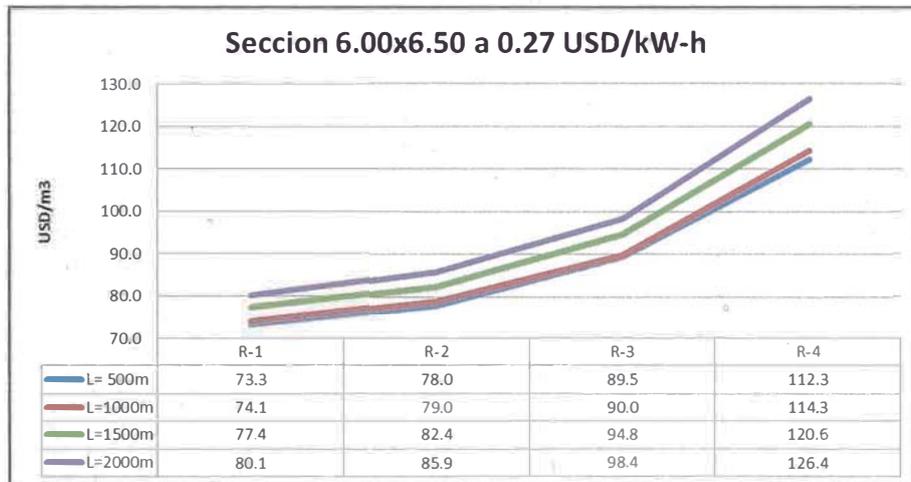


Figura 48: Costos por m3 considerando energía de Grupos Electrógenos

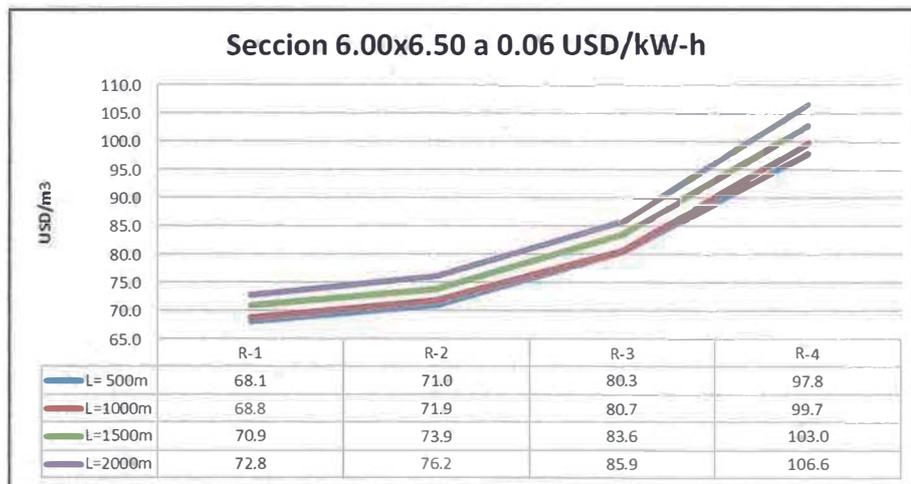


Figura 49: Costos por m<sup>3</sup> considerando energía de subestación

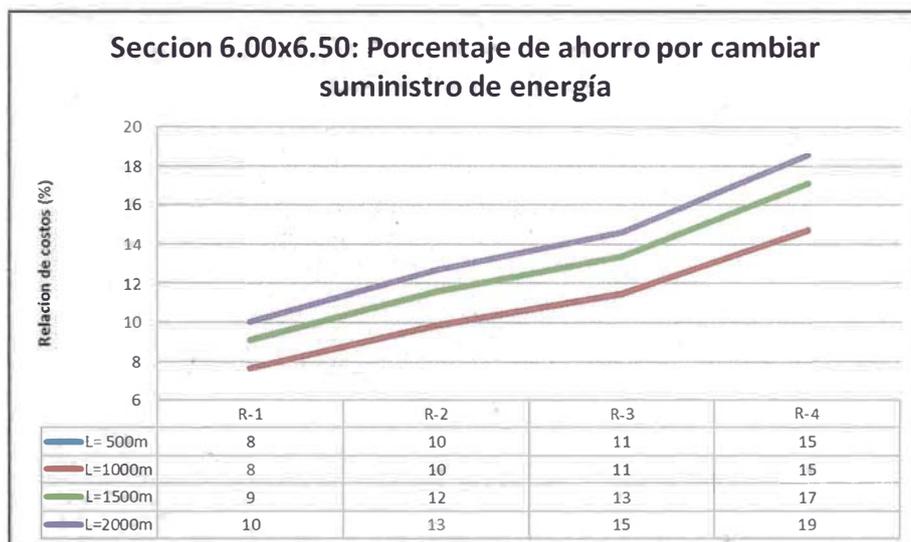


Figura 50: Comparación porcentual de elegir G.E. o suministro por red

## CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

A medida que la longitud del túnel va aumentando, el costo del m<sup>3</sup> aumenta. Este incremento se debe principalmente a dos factores, el aumento de la duración del ciclo de eliminación y el aumento de energía (kW-h) consumida para la adecuada ventilación.

Se ha determinado que cuando se profundiza la longitud del túnel, el incremento de costo de excavación debido a la necesidad de incrementar el tamaño de la flota de camiones es muy inferior al incremento ocasionado por un mayor consumo de kW-h para ventilación.

El impacto en el costo directo de aumentar la longitud de disparo es beneficioso sin embargo no es tan significativo en porcentajes, sin embargo si se analiza junto con la consecuente reducción de plazo y la reducción de permanencia del personal indirecto, se podría obtener un beneficio más considerable.

La ventilación, y su gasto de energía respectivo, son factores muy importantes cuando se analiza túneles de reducida sección (menor a 20m<sup>2</sup>) y de longitud (1500m a más)

Cambiar el diseño de la sección de un túnel por una sección más grande no significa necesariamente que el costo resultante del metro lineal sea más caro.

En las secciones más pequeñas (<20m<sup>2</sup>), pequeños cambios en el diseño de la ventilación pueden generar grandes diferencias en la cantidad de kW-h consumidos.

Utilizar energía de la red eléctrica nacional significa un ahorro de costos, este ahorro de costos de hace más notable cuando se trata de túneles de sección pequeña y en túneles de gran longitud (>1500m). Esto se debe a que el sistema de ventilación puede llegar a consumir una cantidad de kW-h similar o superior que la cantidad consumida por los equipos eléctricos que trabajan en el frente de labores.

## 5.2. RECOMENDACIONES

En las obras subterráneas, al igual que en las obras de superficie, se debe de seguir considerando la filosofía de utilizar el equipo más grande posible, es decir también se aplica el principio de economía de escala que indica que a mayor producción, menor es el costo unitario. Sin embargo, para la excavación subterránea, hay que agregar que se debe tener en cuenta el tamaño y las maniobras de cada maquinaria, tanto en tránsito como en operación, para así evitar posibles daños materiales o personales.

Cuando se tenga un túnel cuya sección es menor a 20m<sup>2</sup> se recomienda analizar la posibilidad de agrandar la sección y analizar si los costos totales se pueden reducir debido a que el sistema de ventilación de una sección de mayor área consume menos energía y por tanto su costo de operación es menor.

Para evitar que el incremento de la longitud del túnel impacte significativamente en el costo de excavación, se debe habilitar un botadero temporal que se encuentre muy cerca al portal del túnel para que de esta manera los camiones puedan entrar y salir rápidamente y consecuentemente con la mínima cantidad de ellos, tener cubierto al ciclo de limpieza sin que el cargador tenga esperas o tiempos improductivos.

Se debe analizar junto con un geólogo la posibilidad de aumentar la longitud de cada disparo para así disminuir los costos de excavación. Este análisis debe hacerse de tal manera que este incremento en la longitud de disparo no afecte al diseño de sostenimiento ni a la seguridad del personal del túnel.

Se recomienda utilizar en lo posible, energía proveniente de la red eléctrica más próxima al proyecto, pues existe un considerable ahorro de costos en su utilización

## BIBLIOGRAFÍA

- EXSA S.A. "Manual práctico de voladura"
  
- Khanna R.K. (2008) "Ventilation of long tunnels" World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety – India.
  
- López Jimeno, Carlos "Manual de túneles y obras subterráneas". Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas
  
- Robles Espinoza, Nerio (1994) "Excavación y Sostenimiento de Túneles en roca" – Lima Perú
  
- Rojas, Silvio (2009) "Métodos de excavación de túneles". Universidad de Los Andes Facultad de Ingeniería Departamento de Vías y Geotecnia - Venezuela.
  
- U.S. Army Corps of Engineers (1997) "Tunnel & Shafts in Rock" – Washington DC