



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**DISEÑO ESTRUCTURAL PRELIMINAR DE UN TERCER TÚNEL VEHICULAR
EN LO PRADO, RUTA 68.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

VÍCTOR ANDRÉS NEIRA RUIZ

PROFESOR GUÍA
JUAN CARLOS POZO ROJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
SERGIO DECHER ANDREO
FELIPE OCHOA CORNEJO

SANTIAGO DE CHILE
2019

**RESUMEN DE MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero
Civil con mención en Estructuras,
Construcción y Geotecnia.
POR: Víctor Andrés Neira Ruiz.
FECHA: 29/05/2019
PROFESOR GUÍA: Juan Pozo Rojas.

DISEÑO ESTRUCTURAL PRELIMINAR DE UN TERCER TÚNEL VEHICULAR EN LO PRADO, RUTA 68.

En el presente trabajo de título, se realiza un estudio preliminar y de prefactibilidad económica de un nuevo túnel vehicular en el sector de Lo Prado, Ruta 68. Este trabajo, es realizado para la División de Construcción de la Dirección General de Concesiones de Obras Públicas, del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

El presente trabajo de título tiene como objetivo principal determinar la prefactibilidad de realizar un tercer túnel vehicular en el sector de Lo Prado, Ruta 68, denominado Túnel Lo Prado N°3.

Con este propósito, se propone un trazado referencial asociado a un corredor donde se recomienda ubicar la nueva obra. Con estos elementos se analiza un diseño geomecánico, con el cual se realiza una estimación de costos y tiempo de construcción para la obra.

La principal fuente de datos del diseño geomecánico ha sido el diseño e informe de construcción del Túnel Lo Prado N°2, el cual, junto a la documentación del Túnel Lo Prado N°1, constituyen una importante información base del macizo rocoso correspondiente al complejo de túneles Lo Prado.

Por otra parte, en base a una proyección del flujo de la autopista, obtenida de los datos del peaje Lo Prado, se realiza una estimación del beneficio social de la construcción de este túnel, ponderando la disminución en la demora de viaje en el sistema nuevo de túneles con el valor social del tiempo.

Finalmente, se realiza una Evaluación Social del Proyecto, a nivel de estudio preliminar, con el objetivo de analizar la prefactibilidad económica del proyecto Túnel Lo Prado N°3 bajo diferentes escenarios posibles propuestos, dada la complejidad de un proyecto público de estas características.

A mi familia, a mi pueblo y a mi Tierra.

¿Qué mundo escogerías, uno con pirámides o uno sin ellas?

La humanidad sueña con volar, pero su sueño está maldito.

Los aviones están destinados en convertirse en herramientas para la matanza y el sacrificio.

Aun así, yo escogí un mundo con pirámides en él.

Hayao Miyazaki – El viento se levanta (2013).

Agradecimientos

Muchas, pero muchas a todas las personas que me han permitido llegar hasta aquí, de todo corazón, muchas gracias.

Le doy las gracias a los integrantes de mi comisión, por aceptar este tema osado para un trabajo de título, dado que responde a un interés más propio que lo usual en esta facultad. Un agradecimiento en especial a mi profesor guía, profesor Juan Pozo, que siempre me alentó a terminar esto lo más rápido posible y que con pocas palabras supo orientar mucho de mis esfuerzos. Un agradecimiento en especial también a don “chino Véjar” que me ayudó en la parte final de mi trabajo de título, que significó un aprendizaje tremendo en una rama de la ingeniería que me apasiona que es la evaluación social de proyectos.

En la misma línea, agradecer a la institución de la Universidad de Chile que, con todas las cosas que queremos mejorarle, me permite llegar a esta instancia.

En un plano completamente distinto, quisiera agradecer a cada una de las amistades que he hecho en este lugar, desde la Escuela de Verano hasta ahora último, en el proceso de titulación. Debo mencionar a diferentes grupos humanos con los que he tenido la posibilidad de crear muchos recuerdos, emociones y aprendizajes de vida, los más simbólicos son: Física Experimental IV, Física I y II, juntas mechonas, movilizaciones 2011-2017, FONGSP, CEI 2015, TTVV, UPPM, Consejería de Escuela, la UNE (F), Senado, Ayudantías y Auxiliar de Intro a la Física, peras para n+1 ramos de civil y el Mecesup.

Un párrafo aparte es para mi núcleo constante de amistades en este periodo, en las que pude contar siempre para desconectarme de todas las máquinas, todo lo que es La Pasta, fuente inagotable de anécdotas, juegos, memes y emociones. Un apartado en específico para Carrillo, Héctor, Juanfe, Pablito, Rorro, Ocho, Varas y Taky, ustedes son amistades que difícilmente uno puede encontrar todos los días, con las que es un placer vivir y acompañarse; hacerse cariño, reflexionar y simplemente disfrutar.

De la misma forma debo señalar personas que han sido cruciales para seguir adelante en este ejercicio que se llama vivir, muchas gracias Memo, Reno, Doris y Nico, conversar con ustedes siempre le ha hecho muy bien a mi ser, gracias por permitirme apoyarme en ustedes y saben que pueden contar conmigo cuando quieran.

Así debo también agradecer a mis terapeutas, las novelas, el deporte, la música y el animé, no estaría en pie sin su ayuda, literalmente.

Para ir concluyendo, saludar a personas que llevo muy adentro de mí, docentes cruciales en mi vida que fueron fuente principal de mis más grandes crisis vocacionales al querer ser como ellas/os. Me refiero a Edith Machuca, Alejandra Riveros, Luis Álvarez Quevedo, Andrea Rodríguez Sepúlveda y Elliot Ávila Muñoz, no creo que puedan dimensionar jamás el tremendo aporte que le han hecho a mi vida con sus palabras y emociones, muchas veces se me aparecen en mi cabeza al momento de tomar una decisión o tomar una pausa para pensar con mayor detenimiento las cosas y pucha que me gustaría imitar algo de lo que ustedes han hecho por mí.

Finalmente, mis agradecimientos más importantes son para mis seres más amados, mi familia, mi núcleo y mi pareja. A mi familia, por recordarme siempre que soy del sur, que se puede amar a pesar de estar distanciados y por legarme su historia llena de sacrificio y esfuerzo.

A mi padre, a mi madre, a mi tía-hermana, a la Kala y el Auri, muchas gracias por formarme, por darme de comer, por darme todo lo necesario y más para vivir, por siempre hacerme sentir querido y permitirme siempre perseguir lo que creo justo y correcto, por estimularme desde que tengo uso de la razón a aprender y sentir, de verdad lo valoro todos los días de mi vida.

A mi amor, Diana Stephanie Cid Muñoz, por los cariños que nos damos todos los días, las mañanas y las noches son una alegría inmensa junto a ti, hacernos cariños, proyectar un futuro juntos, confiarnos nuestra historia, nuestros dolores y pasiones. Gracias por todo lo que haces por mí y por siempre darlo todo por construir una relación acorde a nuestra forma de pensar el mundo, por tus mañanas deliciosas, y finalmente, por tu infinita energía para sacar todo adelante, sea cual sea el contexto. Muchas Gracias.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo General.....	3
1.2.2	Objetivos Específicos.....	3
1.3	Metodología General.....	4
1.4	Alcances del trabajo.....	6
2	Marco Teórico.....	7
2.1	Túneles.....	8
2.1.1	Generalidades.....	8
2.1.2	Metodologías de Diseño Estructural.....	9
2.1.3	Caracterización del macizo rocoso.....	11
2.1.4	Estimación del Sostenimiento.....	19
2.1.5	Estimación de la presión sobre el revestimiento.....	19
2.2	Flujo Vehicular.....	20
2.2.1	Conceptos generales.....	20
2.2.2	Capacidad de una Carretera o Camino.....	20
2.2.3	Relación flujo-demora:.....	21
2.2.4	Periodización.....	22
2.3	Evaluación Social de Proyectos.....	23
2.3.1	Evaluación Socioeconómica de Proyectos de Inversión Pública.....	23
2.3.2	Enfoques de la evaluación.....	23
2.3.3	Precios sociales en el Sistema nacional de inversiones chileno.....	24
2.3.4	Flujo de Caja.....	25
3	Antecedentes Ruta 68.....	27
3.1	Sobre la carretera.....	28
3.1.1	Función de la carretera.....	29
3.1.2	Características de la demanda.....	29
3.1.3	Diseño de la Ruta 68.....	29
3.1.4	Ubicación Túneles.....	29
4	Ingeniería Básica.....	31
4.1	Prospecciones.....	32
4.1.1	Trabajos realizados.....	32

4.2	Resultados obtenidos	33
4.2.1	Topografía:.....	33
4.2.2	Marco Geológico Regional.....	33
4.2.3	Cartografía Geológica – Geotécnica.....	35
4.2.4	Materiales identificados	35
4.2.5	Estado tensional natural	37
4.2.6	Propiedades Roca Trazado Túneles Lo Prado	37
4.2.7	Secciones del Túnel Lo Prado N°2	42
4.2.8	Tiempos de construcción	44
4.3	Criterios de Diseño	46
4.3.1	Diseño del Trazado.....	46
4.3.2	Diseño de los portales	49
4.3.3	Diseño del soporte del Túnel Lo Prado N°3.....	49
5	Sección Transversal del Túnel Lo Prado N°3.....	50
5.1	Aspectos Generales	51
5.1.1	Túnel Lo Prado N°2	51
5.2	Diseño Sección Túnel Lo Prado N°3	53
5.2.1	Metodología	53
5.2.2	Resultados.....	54
6	Elección del Corredor para el Túnel Lo Prado N°3.....	55
6.1	Metodología.....	56
6.2	Criterios de elección	56
6.3	Ubicación del corredor y el trazado	57
6.4	Trazado de Referencia	59
7	Diseño Geomecánico del Túnel Lo Prado N°3	60
7.1	Metodología.....	61
7.2	Caracterización del macizo rocoso.....	62
7.2.1	Metodología	62
7.2.2	Resultados	66
7.2.3	Definición de Sostenimientos y Revestimientos.....	72
8	Costos y Tiempos de Construcción	75
8.1	Metodología.....	76
8.2	Resultados	77
8.2.1	Datos Utilizados	77
8.3	Cubicación.....	80

8.3.1	Abono por sección	80
8.4	Costo estimado del Túnel Lo Prado N°3	83
8.5	Tiempos de Construcción.....	85
9	Tiempos de viaje en el Sistema de Túneles Lo Prado	87
9.1	Metodología.....	88
9.2	Flujos.....	90
9.3	Periodización	92
9.4	Tiempos de Demora	94
9.4.1	Supuestos.....	94
9.4.2	Resultados.....	95
9.5	Ahorro de tiempo proyectado	98
9.6	Beneficios Asociados	99
10	Evaluación Social del Proyecto.....	100
10.1	Metodología	101
10.1.1	Montos de Inversión y Beneficios	102
10.2	Resultados	103
10.2.1	Escenario A	103
10.2.2	Escenario B	104
10.2.3	Escenario C	105
10.2.4	Escenario D.....	106
10.2.5	Escenario E	107
10.2.6	Resumen	108
11	Conclusiones y comentarios.....	109
11.1	Caracterización geográfica y geológica.....	110
11.2	Definición del Corredor y trazado de referencia	111
11.3	Diseño Geomecánico del Túnel	112
11.4	Estimación de los Costos y Tiempos de construcción	113
11.5	Estimación de los beneficios	114
11.6	Evaluación Social del Proyecto Túnel Lo Prado N°3.....	115
12	Bibliografía.....	117
A.	Anexos	118
A.1	Planos.....	118
A.2	Datos Túnel Lo Prado N°2.....	119
A.2.1	Diseño Túnel Lo Prado N°2	119
A.2.2	Tramos Construidos.....	121

A.3 Túnel Lo Prado N°3	123
A.3.1 División de Tramos	123
A.3.2 Resumen de Secciones	126

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Clasificación Geomecánica de Bieniawski Parámetros de clasificación.....	13
Tabla 2.2 Corrección por la orientación de las diaclasas	13
Tabla 2.3 Orientación de las diaclasas.....	14
Tabla 2.4 Clasificación de la calidad de la Roca según índice RMR	14
Tabla 2.5 Características Geotécnicas.....	14
Tabla 2.6 Rango de variación de parámetros índice Q	15
Tabla 2.7 Clasificación índice Q	16
Tabla 2.8 Equivalencia aproximada de las clasificaciones	17
Tabla 2.9 Valor Social del Tiempo para viajes interurbanos, año 2018.....	25
Tabla 3.1 Flujos mensuales Ruta 68	29
Tabla 4.1 Subunidades Litológicas del área de estudio.	36
Tabla 4.2 Largo presente en la calidad de la roca del Túnel Lo Prado N°1.....	38
Tabla 4.3 Largo presente en la calidad de la roca del Túnel Lo Prado N°2.....	39
Tabla 4.4 Litotipos existentes en el Túnel Lo Prado N°2.....	39
Tabla 4.5 Parámetros de Diseño del Túnel Lo Prado N°2.....	40
Tabla 4.6 Calidad de la Roca según el índice RMR del túnel construido	41
Tabla 4.7 Índice RMR promedio de los litotipos en la construcción del Túnel Lo Prado N°2	41
Tabla 4.8 Secciones Diseñadas en el Túnel Lo Prado N°2	42
Tabla 4.9 Detalle secciones diseñadas para el Túnel Lo Prado N°2	42
Tabla 4.10 Diferencias entre Proyecto y Construcción.....	43
Tabla 4.11 Avances mensuales de construcción del Túnel Lo Prado N°2 por frente	44
Tabla 4.12 Rendimientos medios de construcción del Túnel Lo Prado N°2.	45
Tabla 5.1 Dimensiones mínimas de la sección transversal	51
Tabla 5.2 Características sección transversal túnel lo prado N°2.....	51
Tabla 5.3 Parámetros del Túnel Lo Prado N°2	54
Tabla 5.4 Características Túnel Lo Prado N°3	54
Tabla 7.1 Tramos del Túnel Lo Prado N°2 según litotipo en planta.....	66
Tabla 7.2 Tramos Túnel Lo Prado N°3 según litotipo en planta	67
Tabla 7.3 Factores de Participación según Tramo del Túnel Lo Prado N°2	68
Tabla 7.4 Tramos ponderados según índice RMR para el Túnel Lo Prado N°3.....	69
Tabla 7.5 Largo Estimado de los litotipos en el Trazado propuesto del Túnel Lo Prado N°3	71
Tabla 7.6: RMR promedio por litotipo en trazado propuesto	71
Tabla 7.7 Secciones Diseñadas en el Túnel Lo Prado N°2	72
Tabla 7.8 Detalle secciones diseñadas para el trazado del Túnel Lo Prado N°3	73
Tabla 7.9 Secciones Construidas en Túnel Lo Prado N°2.....	73
Tabla 7.10 Resumen largo total secciones en trazado propuesto con marcos THN-29	74
Tabla 7.11 Resumen largo total secciones en trazado propuesto sin marcos THN-29	74
Tabla 8.1 Fuentes de los Parámetros para estimar el costo de los túneles	78
Tabla 8.2 Parámetros Generales Túneles Estudiados	78
Tabla 8.3 Precio Unitario de la Excavación del Túnel	79
Tabla 8.4 Precio unitario excavación.....	79
Tabla 8.5 Precio unitario de los elementos estructurales	79
Tabla 8.6 Distancia acumulada para cada sección	80
Tabla 8.7 Abono sección I, Túnel Lo Prado N°3.....	80

Tabla 8.8 Abono Sección II, Túnel Lo Prado N°3	81
Tabla 8.9 Abono Sección III, Túnel Lo Prado N°3	81
Tabla 8.10 Abono Sección IV, Túnel Lo Prado N°3.....	81
Tabla 8.11 Abono Sección IX, Túnel Lo Prado N°3.....	82
Tabla 8.12 Costos de ítems representativos del Túnel Lo Prado N°3	83
Tabla 8.13 Extrapolación del costo total del Túnel Lo Prado N°3.....	83
Tabla 8.14 Precios por metro lineal aproximados para el Túnel Lo Prado N°3	84
Tabla 8.15 Tiempos de Construcción estimados para el Túnel Lo Prado N°3	85
Tabla 8.16 Rendimientos considerados para el Túnel Lo Prado N°3	85
Tabla 9.1 Flujos promedio de los túneles lo prado, sentido s1	90
Tabla 9.2 Flujos promedio de los túneles lo prado, sentido s1	90
Tabla 9.3 Flujos promedio de los túneles lo prado, sentido s1	90
Tabla 9.4 Flujos promedio de los túneles lo prado, sentido s2.....	91
Tabla 9.5 Flujos promedio de los túneles lo prado, sentido s1	91
Tabla 9.6 Flujos promedio de los túneles lo prado, sentido s2.....	91
Tabla 9.7 Periodización de los flujos de los Túneles Lo Prado.....	92
Tabla 9.8 Periodización Sentido S1.....	92
Tabla 9.9 Periodización Sentido S2.....	92
Tabla 9.10 Flujos Promedio por modo.....	93
Tabla 9.11 Horas semanales de cada periodo por sentido	93
Tabla 9.12 Capacidad por sentido del sistema de túneles lo prado	94
Tabla 9.13 Flujos promedio en vehículos livianos equivalentes	95
Tabla 9.14 Tiempos y velocidades en la situación sin proyecto	95
Tabla 9.15 Tiempos y velocidades de viaje en la situación actual por sentido	96
Tabla 9.16 Tiempos de viajes anuales S1, situación sin proyecto.....	96
Tabla 9.17 Tiempos de viajes anuales S2, situación sin proyecto.....	97
Tabla 9.18 Tiempos de viajes anuales S1, situación con proyecto	97
Tabla 9.19 Tiempos de viajes anuales S2, situación con proyecto	97
Tabla 9.20 Diferencia de tiempos de viajes totales anuales	98
Tabla 9.21 Beneficios sociales por ahorro de tiempo	99
Tabla 10.1 Costos y beneficios del proyecto Túnel Lo Prado N°3.....	102
Tabla 10.2 Flujos de Caja Escenario A	103
Tabla 10.3 Indicadores de Rentabilidad escenario A	103
Tabla 10.4 Flujos de Caja Escenario B	104
Tabla 10.5 Indicadores de Rentabilidad escenario B	104
Tabla 10.6 Flujos de Caja Escenario C	105
Tabla 10.7 Indicadores de Rentabilidad escenario C	105
Tabla 10.8 Flujos de Caja Escenario D	106
Tabla 10.9 Indicadores de Rentabilidad escenario D	106
Tabla 10.10 Flujos de Caja Escenario E	107
Tabla 10.11 Indicadores de Rentabilidad escenario E	107
Tabla 10.12 Resumen de la rentabilidad de los diferentes escenarios.....	108
Tabla 11.1 Resumen de la rentabilidad de los diferentes escenarios.....	115
Tabla A.1 Índice de planos	118
Tabla A.2 Índice RMR del Túnel Lo Prado N°2 con sección de diseño asociada.....	119
Tabla A.3 Tramos construidos en el Túnel Lo Prado N°2.....	121
Tabla A.4 Cálculo de división de tramos bajo límite de litotipos en planta	123
Tabla A.5 Tramos con división incorporada.....	124

Tabla A.6 Diseño del Túnel Lo Prado N°3.....126

Índice de Figuras

Figura 2.1 Metodología propuesta por la sociedad austríaca de geomecánica.....	9
Figura 3.1 Imagen de la Ruta 68, incluye el tiempo de viaje estimado para un día laboral en horario normal.	28
Figura 3.2 Vista en planta de los túneles Lo Prado	30
Figura 3.3 Vista en Planta de los túneles Zapata.	30
Figura 4.1 Curvas de nivel del sector Túneles Lo Prado.	33
Figura 4.2 Perspectiva 3-D de los portales oriente de los túneles Lo Prado	47
Figura 4.3 Perspectiva 3-D de los portales poniente de los túneles Lo Prado.	47
Figura 4.4 Perspectiva en planta de los portales poniente de los túneles Lo Prado.....	48
Figura 5.1 Sección transversal propuesta	52
Figura 8.1 Diagrama tiempo camino de los rendimientos estimados para la construcción del túnel.....	86

1 Introducción

1.1 Motivación

La Ruta 68 es una autopista concesionada interurbana que conecta dos de las conurbaciones más grandes de Chile, el Gran Santiago con el Gran Valparaíso. Esto la hace una de las vías más transitadas del país, dada la alta población de ambos núcleos urbanos.

La autopista actualmente es operada por el consorcio Rutas del Pacífico S.A., en términos de proyecto, esta lleva el nombre de Interconexión Vial Santiago-Valparaíso-Viña del Mar, Ruta -68. Esta cruza las comunas de Estación Central, Lo Prado y Pudahuel en la Región Metropolitana, mientras que cruza las comunas de Casablanca y Valparaíso en la Región de Valparaíso.

La Ruta mide 110,21 km, los cuales tienen como origen en el cruce entre la Ruta con la Avenida Gladys Marín Millie (ex Pajaritos) y Avenida General Bonilla en la ciudad de Santiago, y su fin en la Avenida Argentina en Valparaíso.

En los últimos años, la demanda vial de la autopista ha crecido sostenidamente, llegando a niveles de congestión vehicular altísimos en determinadas fechas, principalmente en festividades y periodos estivales.

El ministerio, en conjunto con la concesionaria, han tomado medidas de operación vial para aumentar su capacidad en momentos críticos, como por ejemplo: los sistemas 3x1 ó 4x0, en los cuales se habilitan una o las dos calzadas de una de las direcciones en favor del sentido con mayor demanda.

Ahora bien, estas medidas se entienden como temporales y no generan una solución que cumplan la calidad del servicio requerida por el nivel de la autopista. Entonces, se hace necesario buscar medidas que permitan disminuir la congestión de la ruta.

Con esto, las ideas para poder resolver este problema se suelen agrupar de dos formas:

- Proyectos que aumenten la capacidad de la autopista, disminuyendo la congestión vehicular mientras la demanda vehicular se mantenga en un determinado rango.
- Proyectos alternativos a la autopista para conectar las dos conurbaciones.

El presente trabajo de título se centra en la primera de las opciones para mejorar la capacidad de la autopista en uno de sus tramos más complejos, el sistema de túneles. En específico, se centra en el sistema de Túneles Lo Prado, puesto que es el más restrictivo en términos de longitud, geografía y geología.

Además de este proyecto, existen más obras que buscan aumentar la capacidad de la autopista que se han ejecutado o que están en proceso de planificación, como el cambio de las plazas de peajes actuales a un sistema Free Flow [1], o el aumento a 3 pistas por eje de la ruta en la totalidad de su desarrollo.

Estas medidas generan un aumento de capacidad en diferentes tramos de la ruta, por ende, de no cambiar el sistema de túneles, el flujo vehicular sobre ellos aumentará

considerablemente, convirtiendo a estos tramos en los principales puntos de congestión de la autopista.

Realizar una ampliación a tres pistas de los túneles existentes es sumamente complejo, por una parte, se tiene todo el desafío de ingeniería desde el punto de vista geomecánico y estructural, por otro lado, se tiene el grave problema de paralizar parcial o totalmente los túneles durante su construcción, lo cual generaría una disminución de capacidad prolongada en la ruta.

Razón por la cual no se considera en el análisis la posibilidad de aumentar las pistas de los túneles existentes, sino que evaluar la construcción de un tercer túnel vehicular.

Como se menciona anteriormente, dado que un Túnel en el sector de Lo Prado es significativamente más caro que en el sector de Zapata, se toma esta obra para evaluar la prefactibilidad de la situación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general del trabajo es realizar un análisis de prefactibilidad de un nuevo túnel vial en el sector de Lo Prado, Ruta 68.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para realizar un análisis de prefactibilidad de un nuevo túnel vehicular para el sector de Lo Prado, es necesario definir los factores que permitan realizar la estimación de los costos y beneficios principales del proyecto, así como estudiar la normativa que regula este tipo de proyectos.

Así, se establecen los siguientes objetivos específicos para poder efectuar estas estimaciones:

- Caracterizar geográficamente y geológicamente el sector Lo Prado.
- Definir un área de ubicación para el túnel y un trazado factible para éste.
- Realizar un diseño geomecánico para este trazado.
- Estimar plazos y costos para dicho diseño.
- Estimar los beneficios sociales en base a los datos del flujo vial de la ruta 68.
- Realizar la evaluación social del proyecto en diferentes escenarios en base a las estimaciones.

1.3 Metodología General

La metodología de este trabajo de título se basa en el orden lógico propuesto en el manual de carreteras [2], el cual se corrobora con los proyectos de túneles observados en el proceso de trabajo de gabinete, los cuales son:

- Proyecto Túnel el Melón II.
- Proyecto Túnel Lo Prado N°2.
- Proyecto Túnel Zapata N°2.
- Proyecto Túnel Chamisero II.

Así, se define la siguiente estructura de trabajo:

- Recopilación de antecedentes y revisión de la normativa existente.
- Definición del Marco Teórico.
- Ingeniería Básica.
- Definición Geométrica del Túnel.
- Definición del Corredor para el Túnel.
- Diseño Geomecánico preliminar para el Túnel.
- Análisis del Flujo Vehicular.
- Evaluación Social de Proyectos.

En la fase inicial del trabajo, se realiza la identificación y recopilación de antecedentes claves para el trabajo de título, es decir, un trabajo de gabinete. En este proceso se revisan las normas pertinentes al diseño de túneles en Chile, proyectos similares y la normativa de evaluación social de proyectos.

Con estos elementos, se define el marco teórico para el diseño y evaluación de proyectos de túneles, todo bajo el nivel de un estudio preliminar, cuyos alcances se detallan en el apartado 1.4.

En la Ingeniería Básica se toman todos los antecedentes recopilados y se realizan trabajos adicionales con el fin de tener los elementos necesarios para realizar el diseño del túnel nuevo en términos viales y estructurales. Los antecedentes respecto a la demanda y flujo proyectado se analizan en una sección aparte, puesto que responden a elementos de los beneficios sociales.

Posteriormente, se realizan las definiciones para hacer el estudio de factibilidad del túnel:

- Se escoge un corredor por donde se recomienda ubicar el túnel.
- Se diseña un trazado tipo para dicho corredor, con el fin de facilitar el diseño estructural para modelar el problema y disminuir la incertidumbre de la estimación.
- Se realiza el diseño estructural para dicho trazado.
- Se realizan las cubicaciones de los elementos más representativos del diseño.

Con esto se obtienen los primeros elementos necesarios en el análisis del problema, que son la estimación del monto de inversión y sus plazos. Para obtener los beneficios de la obra se procede a realizar un análisis del flujo vehicular de la plaza de peaje del Túnel Lo

Prado actual, con el fin de comparar la situación actual con la hipotética del Túnel Lo Prado N°3 en operación. Para ello se establecen los siguientes pasos:

- Se transforman los flujos vehiculares a vehículos equivalentes en congestión.
- Se realiza una periodización en función del comportamiento del flujo en los diferentes intervalos horarios en los diferentes días de la semana.
- Se calculan flujos promedio para los diferentes periodos por cada tipo de vehículo.
- Se calculan los tiempos de demora en la situación con y sin proyecto por cada tipo de vehículo.
- Dada que la periodización está realizada para una semana, se pondera por el número de semanas anuales.
- Se calcula la diferencia de tiempo con y sin proyecto anualmente por cada tipo de vehículo.
- Finalmente, se pondera la diferencia de tiempo por el valor social del tiempo por cada tipo de vehículo.
- Así, aplicando una tasa de crecimiento del parque vehicular, se obtiene el beneficio social del túnel por año.

Con todos estos elementos se concluye, realizando una Evaluación Social de Proyectos en base a los costos y beneficios estimados bajo diferentes escenarios, inversión inmediata, inversión en un plazo determinado.

Finalmente se presentan las conclusiones de dichos escenarios.

1.4 Alcances del trabajo

El estudio desarrollado en este trabajo de título corresponde a la fase inicial de un proyecto de ingeniería, un estudio preliminar asociado a un análisis de prefactibilidad económica.

En el apartado 3.807.2 del Volumen 3 del Manual de Carreteras, se delimitan este tipo de trabajos con respecto al diseño de túneles. [2]

En detalle, los estudios para llevar a cabo los objetivos se efectúan en base a documentos existentes, esto es:

- Cartas topográficas existentes.
- Reconocimientos geológicos preliminares basados en bibliografía.
- Estudios anteriormente ejecutados.
- Examen de fotografías aéreas.
- Reconocimiento general del terreno.
- Reconocimiento básico del área de portales.

Así, se generan los bosquejos y se define la potencialidad de áreas para la ejecución de la obra. Con esto se resuelve toda la fase relativa al diseño geomecánico del túnel.

En lo relativo a la estimación de costos y beneficios, la estimación de costos se hace extrapolando datos de otro complejo de túneles, dados los impedimentos para cotizar directamente para el diseño de este proyecto no es factible.

En el caso de beneficios, se estima la disminución de las demoras en base a extrapolaciones de los datos de un mes en particular del año, no se consideran factores de expansión para todos los meses del año por un tema de capacidad de análisis de datos y extensión del trabajo de título en general.

Además, se asume que la única obra para disminuir la congestión en el sector Lo Prado es el tercer túnel, no se considera el escenario de un nuevo tren entre Santiago y Valparaíso, que alteraría la proyección del aumento de flujo vehicular.

Finalmente, la Evaluación Social de Proyectos, considera despreciar los costos de operación y otros beneficios que no sean la disminución de la congestión y el valor residual del proyecto Túnel Lo Prado N°3.

2 Marco Teórico

En los siguientes apartados se presentan los elementos teóricos utilizados para el desarrollo de este trabajo de título.

Por una parte, se expone teoría sobre la ingeniería de túneles, basado principalmente en lo expuesto en el capítulo 3.800 del Volumen N°3 del Manual de Carreteras, además de modelos teóricos utilizados en la construcción del Túnel Lo Prado N°2, que es relativo al estudio de mecánica de rocas y mecánica de suelos.

Por otro lado, se presentan elementos teóricos sobre la teoría de flujo vehicular, en lo relativo al cálculo de la demora de los tiempos de viaje en un túnel.

Finalmente, se presentan los elementos relativos a la evaluación social de proyectos, un contexto breve y los indicadores utilizados para analizar la rentabilidad de un proyecto en Chile.

2.1 Túneles

En los siguientes apartados se describen los elementos teóricos que se utilizan para realizar el análisis y diseño de los diferentes túneles de este trabajo.

2.1.1 Generalidades

La ejecución de proyecto de túneles ha tenido un importante desarrollo en la sociedad en las últimas décadas, tanto en la construcción de carreteras, como en obras hidráulicas, trenes, metros, por señalar algunos casos.

Chile no ha sido la excepción, el amplio crecimiento de la red del Metro de Santiago, los túneles presentes en carreteras como la Ruta 68 o la autopista Los Libertadores son buenos ejemplos de esto.

La ejecución de estas obras ha demandado el desarrollo de la Mecánica de Rocas y Suelos, y de la Geología Aplicada a la Ingeniería, además de técnicas de minería. Esto hace que el área de túneles tenga un carácter interdisciplinario entre las disciplinas asociadas.

A diferencia de otros diseños estructurales, las obras subterráneas se caracterizan por producirse en formaciones geológicas caracterizadas por su heterogeneidad y anisotropía, cuyo conocimiento siempre es limitado.

Además, el margen de maniobra en un proyecto de túneles es bastante limitado en comparación a otro tipo de obras, considerando que: el espacio es reducido, hay bajos niveles de iluminación y esto se traduce en condiciones de seguridad más desfavorables.

Finalmente, independiente que tan buenos sean el modelo geológico-geotécnico y el método de excavación propuestos, siempre existirán eventualidades no previstas que en terreno se van sorteando y solucionando (método observacional). El rediseño y las soluciones de ingeniería durante la construcción son habituales, lo que hace que la inversión en la exploración esté totalmente justificada, para reducir estas situaciones.

Así, queda de manifiesto que todos los elementos de diseño propuestos en este trabajo, tanto como en los posteriores estudios, estarán sujetos al avance en la obra y deberán ser constantemente analizados por la unidad de ingeniería en terreno respectiva.

2.1.1.1 Clasificación de Túneles

El manual de carreteras, en su apartado 3.801.202, define la clasificación de los túneles vehiculares en base a los siguientes criterios [2]:

- Ubicación: rural o urbano.
- Según Características constructivas: en roca, en suelo, túneles falsos, trincheras cubiertas o cobertizos.
- Clima y Altitud.
- Flujo Vehicular, Longitud y Equipamiento.

2.1.2 Metodologías de Diseño Estructural

A lo largo de la historia, la ingeniería de túneles ha tenido un desarrollo bastante largo. Desde sus orígenes, pasando por la minería, el transporte de agua, la ingeniería militar hasta llegar a la ingeniería civil.

En este apartado se describen dos de las metodologías de diseño y construcción que son relevantes en el estudio preliminar del Túnel Lo Prado N°3.

El primero es el Nuevo Método Austriaco de construcción de Túneles (NATM por sus siglas en inglés), método revolucionario en la construcción modernas de túneles a fines de los años 50s e inicios de los 60s, usado, en esencia hasta el día de hoy.

El segundo es una variante del NATM, utilizado por la empresa Geocontrol S.A., denominado Diseño Estructural Activo (DEA). Esta empresa es la que estuvo a cargo del diseño del Túnel Lo Prado N°2. Es en base a este diseño en el que se proyecta y calculan los costos de un nuevo túnel en el sector, por lo cual se exponen sus fundamentos y diferencias con el método austriaco.

En la figura 2.1 se observan los pasos esenciales de la metodología elaborada por la Sociedad Austríaca de Geomecánica para el diseño estructural de un túnel.

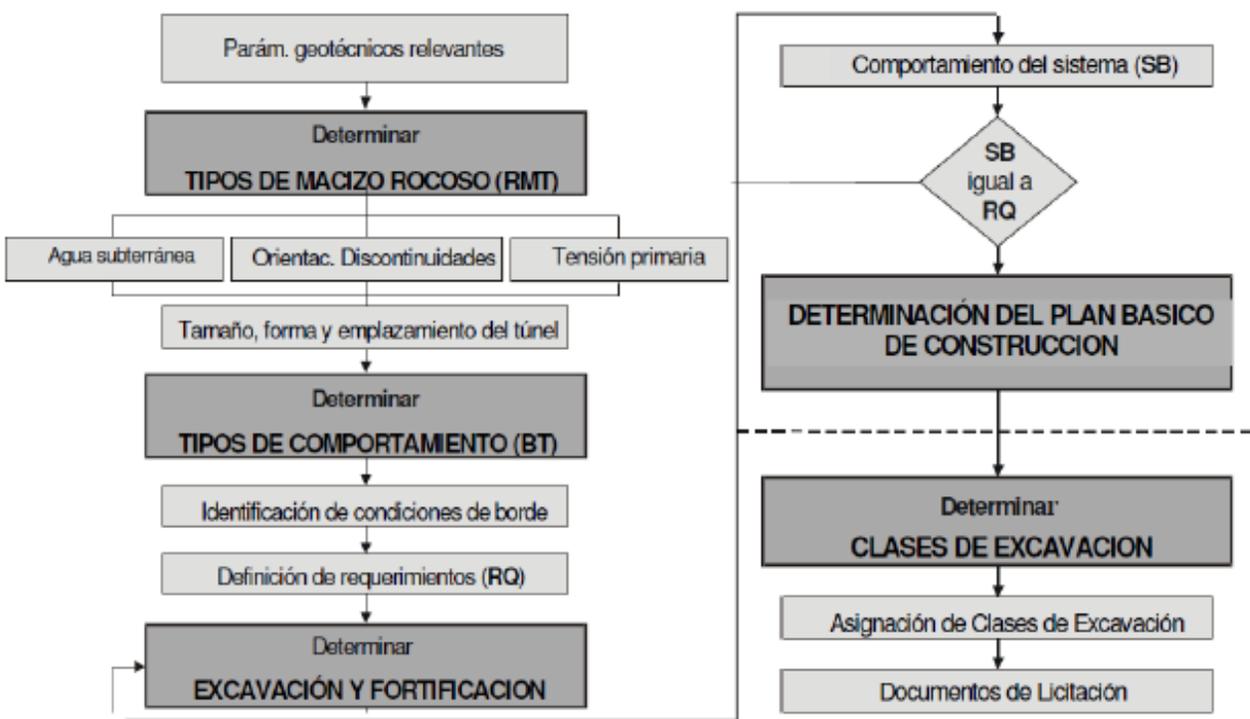


FIGURA 2.1 METODOLOGÍA PROPUESTA POR LA SOCIEDAD AUSTRÍACA DE GEOMECÁNICA.

2.1.2.1 Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles (NATM)

El Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles (NATM, por sus siglas en inglés), es un método de diseño y construcción de túneles modernos. Esta técnica ganó notoriedad en la década de 1960 basada en los trabajos de Ladislaus von Rabcewicz, Leopold Müller y Franz Pacher entre 1957 y 1965 en Austria. Su nombre radica de los cambios importantes que se realizaron en su momento en el diseño y construcción de túneles.

La diferencia fundamental entre este nuevo método de tunelización, a diferencia de los métodos anteriores, proviene de las ventajas económicas disponibles al aprovechar la fuerza geológica inherente disponible en la masa rocosa circundante para estabilizar el túnel. [3]

Los elementos esenciales del método son los siguientes:

- Uso de la resistencia del macizo rocoso como elemento estructural. La roca circundante al elemento estructural es el elemento principal de soporte del túnel.
- Uso de Hormigón Proyectado para el sellado y sostenimiento. Con el fin de evitar deformaciones excesivas en los momentos cercanos a la excavación.
- Medición y monitoreo constante de las deformaciones. Con el fin de evitar situaciones no planificadas.
- Al revestimiento inicial se le añade soporte activo, generalmente con elementos como pernos de anclaje, mallas y marcos de acero, dependiendo de la calidad de la roca.
- Cierre rápido de la base del anillo del túnel, con el fin de aprovechar la forma oval del túnel.
- Flexibilidad en el diseño y sus materiales. Entendiendo que el monitoreo en terreno va a entregar datos que pueden ser diferentes al diseño original, por lo que se debe tener en consideración el rediseño en terreno como una manera de ajustar o adecuar el diseño a las condiciones reales encontradas en terreno durante la construcción.
- Clasificación de la calidad del macizo rocoso. Indicadores para medir la calidad de la roca que permita ir definiendo diseños. Estas clasificaciones son motivo de estudio hasta el día de hoy.

2.1.2.2 Diseño Estructural Activo

La definición de sostenimientos y revestimientos del Túnel Lo Prado N°2 se realizó bajo la metodología de diseño denominada Diseño Estructural Activo (DEA), ejecutada por la empresa Geocontrol S.A.

La metodología DEA se basa en los principios del NATM, pero incluye nuevos conceptos. Principalmente, en vez de utilizar la clasificación de Lauffer (1958), el DEA utiliza el índice RMR de Bieniawski¹, para caracterizar las propiedades del macizo rocoso.

Con respecto al diseño del túnel, este método considera la interacción entre terreno y sostenimiento y los cuantifica mediante métodos numéricos de análisis para establecer los correspondientes equilibrios tenso-deformacionales.

¹ Este índice se explica en la sección de Caracterización del Macizo Rcoso.

De este modo, se establecen de forma más precisa, en función del terreno y de la secuencia de construcción, las cargas sobre el sostenimiento que, además, puede ser adecuadamente dimensionado en cada una de las fases de construcción.

Durante la construcción de la obra sólo se hace necesario caracterizar los frentes de avance para escoger el sostenimiento tipo que se ha diseñado y realizar comprobaciones sencillas, normalmente mediante medidas de convergencia, para constatar que el comportamiento tenso-deformacional real del terreno se corresponde con la proyectada.

En caso de que existan diferencias apreciables se modifican las características del sostenimiento, previamente en el proyecto, para adaptarse al terreno tras actualizar los cálculos de dimensionado, teniendo en cuenta las propiedades reales del terreno.

Con respecto al NATM, método que proporciona unos diseños eminentemente empíricos que deben ser contrastados con una instrumentación intensiva en obra, cuyos costos son elevados y generalmente retrasa los avances de los frentes, en la metodología DEA, el papel de la auscultación en obra queda bastante reducido y, además, se aumenta notablemente la objetividad del diseño al apoyarse este en cálculos más precisos.

En resumen, esta metodología se basa en estos tres aspectos:

- Caracterización del terreno, mediante trabajos de campo complementados con ensayos de laboratorio.
- Definición de las Secciones Tipo, mediante cálculos tenso-deformacionales.
- Control de la estabilidad de la excavación, mediante medidas de convergencia.

2.1.3 Caracterización del macizo rocoso

Parte crucial del diseño de un túnel es conocer la calidad y propiedades del macizo rocoso en el sector del trazado de este. Para ello existen diversos métodos y clasificaciones geomecánicas que permiten realizar esta tarea.

Entre las clasificaciones para túneles propuestas hasta el presente, destacan las de:

- Terzaghi (1946).
- Kauffer (1958).
- Deer et al. (1967).
- Bieniawski (1973).
- Barton et. al (1974 – 1993).

De las cuales, según el manual de carreteras en su apartado 3.804.101, las últimas dos proporcionan procedimientos cuantitativos aplicables a los sistemas modernos de sostenimiento y construcción de túneles. [2]

Estos métodos, parten de la combinación de algunos de los siguientes parámetros del macizo rocoso:

- Resistencia del material rocoso.
- RQD.
- Espaciado de discontinuidades.
- Orientación de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades:
 - Continuidad.
 - Separación.
 - Rugosidad.
 - Meteorización.
 - Relleno.
- Estructuras geológicas y fallas individualizadas.
- Infiltraciones.
- Estado tensional.

En el diseño del Túnel Lo Prado N°2 y por consiguiente en el del N°3, se utilizan los últimos dos índices.

2.1.3.1 Clasificación Geomecánica RMR

En el apartado 3.804.102 del manual de carreteras se describe esta clasificación de la siguiente forma [2]:

Esta teoría es desarrollada en Sudáfrica por Bieniawski en 1973, a partir de los datos levantados de 45 túneles, y posteriormente revisada por el mismo autor en 1976 y 1979.

Constituye, un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros de diseño y de sostenimiento. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación en términos del RQD.
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientaciones de las discontinuidades respecto a la excavación.

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento de la excavación se expresa por medio de un índice de calidad denominado "*Rock Mass Rating*" (RMR), que varía de 0 a 100.

Para aplicar la clasificación geomecánica RMR se divide el macizo rocoso a lo largo del eje del túnel, en un número de tramos que presenten características geológicas aproximadamente uniformes.

Para obtener el índice RMR se debe identificar en que rango está y que valoración tiene para cada parámetro presente en la tabla 2.1. Posteriormente, se efectúa la corrección por

la orientación de las diaclasas, aplicando la tabla 2.2 que tiene su fuente de datos según la tabla 2.3.

Finalmente, la clasificación del macizo y sus características geotécnicas se observan en las tablas 2.4 y 2.5 respectivamente.

TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN.

N°	Parámetro de clasificación		Rangos de Valoración						
	1	Resistencia de roca sana	Ensaye de carga puntual [MPa]	>10	4-10	2-4	1-2	En valores bajos se prefiere ensayos a compresión uniaxial	
Compresión Simple [MPa]			>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	6	3		
3	Separación entre diaclasas [m]		>2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	<0.06		
	Valoración		20	15	10	8	5		
4	Estado de las diaclasas		Muy rugosas Discontinuas Sin separaciones Bordes sanos y duros	Ligeramente rugosas Abertura < 1 [mm] Bordes duros	Ligeramente rugosas Abertura < 1 [mm] Bordes blandos	Espejos de falla o cono relleno <5 [mm] o abierta 1-5 [mm]. Diaclasas continuas	Relleno blando > 5 [mm] o abertura > 5 [mm] Diaclasas continuas		
	Valoración		30	25	20	10	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 [m] de túnel [l/m]	Nulo	<10	10-25	25-125	>125		
		Relación presión agua tensión principal. Mayor	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	Estado General		Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteos	Flujos		
	Valoración		15	10	7	4	0		

TABLA 2.2 CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DIACLASAS

Dirección y Buzamiento	Muy Favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy Desfavorable
------------------------	---------------	-----------	-------	--------------	------------------

Variación Para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

TABLA 2.3 ORIENTACIÓN DE LAS DIACLASAS

Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0° - 20° cualquier dirección
Excavación a favor de buzamiento		Excavación contra buzamiento				
Buz. 45° - 90°	Buz. 20° - 45°	Buz. 45° - 90°	Buz. 20° - 45°	Buz. 45° - 90°	Buz. 20° - 45°	
Muy Favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy Desfavorable	Media	Desfavorable

Así, se tiene la siguiente clasificación con sus respectivas características geotécnicas:

TABLA 2.4 CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ROCA SEGÚN ÍNDICE RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Valoración	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

TABLA 2.5 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento estimado y longitud	10 años con 5 [m] de vano	6 meses con 8 [m] de vano	1 semana con 5 [m] de vano	10 horas con 2,5 [m] de vano	30 min con 1 [m] de vano
Cohesión [kPa]	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
Angulo de rozamiento	> 45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	15°

2.1.3.2 Sistema Q

En el apartado 3.804.103 del manual de carreteras se describe esta clasificación de la siguiente forma [2]:

Desarrollado en Escandinavia por Barton, Lien y Lunde en 1974, a partir de 200 casos de excavaciones subterráneas, actualizado en 1993 con el respaldo de 1050 casos, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite establecer sistemas de sostenimientos para túneles y cavernas.

El sistema Q está basado en una evaluación numérica de seis parámetros que definen el índice Q. Este índice viene dado por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Donde:

- RQD: índice de la calidad de la roca (*Rock Quality Designation* en inglés), obtenida de los sondajes.
- J_n: índice de diaclasas que indica la cuantía de la fracturación.
- J_r: índice de rugosidad.
- J_a: índice de alteración que indica la alteración de las juntas.
- J_w: coeficiente reductor por la presencia del agua.
- SRF: *Stress Reduction Factor*, es un coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional en el macizo rocoso.

Así, los tres grupos formados con estos parámetros representan:

- $\frac{RQD}{J_n}$: el tamaño de los bloques.
- $\frac{J_r}{J_a}$: la resistencia al corte entre los bloques.
- $\frac{J_w}{SRF}$: la influencia del estado tensional.
-

El rango de variación entre los parámetros es el siguiente:

TABLA 2.6 RANGO DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS ÍNDICE Q

Parámetro	Rango
RQD	[0 – 100]
J _n	[0.5 – 20]
J _r	[0.5 – 4]
J _a	[0.75 – 20]
J _w	[0.05 – 1]
SRF	[0.5 – 20]

Así, la valoración de la calidad de la roca queda definida por los siguientes intervalos. El índice Q varía entre 0.001 y 1000.

TABLA 2.7 CLASIFICACIÓN ÍNDICE Q

Clasificación	Valor de Q
Roca excepcionalmente mala	[0.001 – 0.01]
Roca extremadamente mala	[0.01 – 0.1]
Roca muy mala	[0.1 – 1]
Roca mala	[1 – 4]
Roca media	[4 – 10]
Roca buena	[10 – 40]
Roca muy buena	[40 – 100]
Roca extremadamente buena	[100 – 400]
Roca excepcionalmente buena	[400 – 1000]

2.1.3.3 Correlaciones entre los índices RMR y Q

Existen diferentes proposiciones de correlaciones entre los índices RMR y Q, las señaladas por el manual de carreteras son las siguientes:

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (2)$$

$$RMR = 5.9 \ln Q + 43 \quad (3)$$

$$RMR = 5.4 \ln Q + 55.2 \quad (4)$$

$$RMR = 10.5 \ln Q + 41.8 \quad (5)$$

$$RMR = 5 \ln Q + 60.8 \quad (6)$$

Donde:

- (2) fue propuesta por Bieniawski, 1979, Sudáfrica.
- (3) fue propuesta por Rutledge y Preston, 1980, Nueva Zelanda.
- (4) fue propuesta por Moreno, E 1981, Asturias.
- (5) fue propuesta por Abad., J et al, 1983, Asturias.
- (6) fue propuesta por Cameron Clark y Budavari. 1981, Sudáfrica.

Finalmente, se establece siguiente equivalencia aproximada de las clasificaciones:

TABLA 2.8 EQUIVALENCIA APROXIMADA DE LAS CLASIFICACIONES

Clases RMR	Valores RMR	Clases Q	Valores Q
I	90 +/- 10 Muy buena	Extremadamente buena	>200
II	70 +/- 10 Buena	Buena a muy buena	20 – 200
III	50 +/- 10 Regular	Muy mala a buena	0.3 – 20
IV	30 +/- 10 Mala	Extremadamente mala	0.003 – 0.3
V	10 +/- Muy mala	Excepcionalmente mala	< 0.003

En este trabajo se utiliza la relación número (2), puesto que es la que se utilizó en los cálculos del Túnel Lo Prado N°2, en la que se obtiene el índice Q a partir de los índice RMR calculados.

$$Q = e^{\frac{RMR-44}{9}} \quad (7)$$

2.1.3.4 Criterio de Rotura Hoek - Brown

La empresa encargada de la construcción del Túnel Lo Prado N°2, utiliza como criterio de rotura en su diseño, el de Hoek-Brown, empleando las expresiones de Priest Brown. [4]

Esta metodología consiste en determinar las propiedades geomecánicas de la roca a partir de una minoración del índice RMR de Bieniawski. [5]

El criterio de rotura de Hoek-Brown está dado por la expresión:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2} \quad (8)$$

Donde:

- σ_1 : es la tensión principal mayor.
- σ_3 : es la tensión principal menor.
- m : es el parámetro relacionado con el carácter friccionante del macizo rocoso.
- σ_c : es la resistencia a compresión simple de la roca intacta.
- s : es el parámetro relacionado con la diferencia entre la resistencia a compresión simple del macizo rocoso y la de la roca intacta.

Los parámetros m y s pueden estimarse, para terrenos confinados como es el caso de un túnel, en función del parámetro m_i de la roca intacta propio de cada litología, y del RMR; mediante las expresiones de PRIEST-BROWN para macizos rocosos confinados, como es el caso de un túnel:

$$m = m_i \cdot e^{\frac{RMR-100}{28}} \quad (9)$$

$$s = e^{\frac{RMR-100}{9}} \quad (10)$$

La mayor parte de los programas de cálculo trabajan con el criterio lineal de Mohr-Coulomb; que está definido por la cohesión (c) y fricción (ϕ) del terreno.

Para utilizar la metodología de caracterización descrita en un modelo Mohr-Coulomb, es necesario linealizar la parábola que representa el criterio de Hoek-Brown.

Utilizando un criterio conservador, en el que se considera que se asimila la parábola a su secante en el punto de ordenada $\sigma_1 = \sigma_c$ y en la abscisa $\sigma_3 = \sigma_{3R}$, donde este último corresponde a un estado tensional dado, se tiene que los valores de la cohesión y la fricción del macizo rocoso están dados por:

$$\lambda_m = 1 - \frac{\sigma_c - \sqrt{s}}{\sigma_3} + \sqrt{\frac{\sigma_c}{\sigma_3} \cdot m + \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_3}\right)^2 \cdot s} \quad (11)$$

$$\phi_m = 2 \arctan \sqrt{\lambda_m} - 90 \quad (12)$$

$$C_m = \frac{\sqrt{s} \cdot \sigma_c (1 - \sin \phi_m)}{2 \cos \phi_m} \quad (13)$$

Donde:

- C_m : representa el valor de la cohesión del macizo rocoso
- ϕ_m : representa el valor del coeficiente del macizo rocoso.

De esta forma, según los estudios de Hoek et. al, que a su vez actualizan los estudios de Serafín-Pereira, el módulo de deformación se obtiene de la siguiente expresión [6]:

$$E = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \cdot 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad (14)$$

Donde:

- E : representa el módulo de deformación medido en [GPa].
- σ_c : representa la resistencia a compresión simple de la roca intacta medida en [MPa].

2.1.3.5 Propiedades de las discontinuidades

Cuando los macizos rocosos son competentes, lo cual suele suceder cuando su RMR supera el valor de 55 puntos, las inestabilidades más importantes suelen producirse a través de las discontinuidades existentes en la masa rocosa.

En estos casos el parámetro resistente más importante es la resistencia al corte de las discontinuidades que puede estimarse a partir de la expresión debida a Barton-Choubey:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[\phi_b + JRC \cdot \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (15)$$

Donde:

- τ : representa la resistencia al corte de la junta.
- σ_n : representa la tensión normal que actúa sobre las caras de la junta.
- ϕ_b : representa al ángulo básico de fricción de la superficie de la junta que, prácticamente, coincide con el ángulo de fricción residual de la matriz rocosa si la junta no está muy alterada.
- JRC = parámetro que caracteriza la rugosidad de la junta.
- JCS = resistencia a compresión simple de los labios de la discontinuidad, estimada a partir de ensayos de esclerometría con el martillo Schmidt.

2.1.4 Estimación del Sostenimiento

El sostenimiento de una excavación subterránea se estima de forma empírica utilizando las clasificaciones geomecánicas. Sin embargo, tiene las siguientes limitaciones:

- No se cuantifica el factor de seguridad.
- Diferentes parámetros pueden dar lugar al mismo índice RMR o Q procedente de casos que precisaron distintos sostenimientos.
- Es conveniente estudiar el sostenimiento del túnel en función de la idoneidad de la clasificación elegida.

2.1.5 Estimación de la presión sobre el revestimiento

Para la estimación de la presión sobre el revestimiento existen diversos métodos y expresiones a partir de ensayos en terrenos. Dado los alcances de este trabajo y siguiendo el diseño del Túnel Lo Prado N°2, se realiza un análisis litoestático del macizo rocoso.

2.1.5.1 Carga Litoestática

Así:

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot z \quad (16)$$

Donde:

- σ_v : representa a la tensión vertical.
- ρ : representa la densidad media del terreno.
- g : es la aceleración de gravedad.
- z : la profundidad.

2.2 Flujo Vehicular

En los siguientes apartados se describen los elementos teóricos que se utilizan para describir el flujo actual de la ruta 68 y modelar el flujo en los siguientes años.

2.2.1 Conceptos generales

En este apartado se presentan brevemente conceptos generales de la teoría de tráfico:

- Flujo o intensidad del tráfico: es el número de vehículos que atraviesan una determinada sección de la vía por unidad de tiempo. Esta variable corresponde al flujo promedio en el punto s_o durante el periodo T . Por su definición el flujo describe macroscópicamente la circulación.

$$q = m/T \quad (17)$$

- Donde:
 - q : representa al flujo vehicular.
 - m : representa a la cantidad de vehículos equivalentes.
 - T : representa el período.
- Demora: tiempo en el que un vehículo recorre un tramo establecido.
- Flujo libre: se considera flujo libre a aquel que en el que los vehículos transitan a la máxima velocidad establecida en el tramo, es decir, cuando teóricamente no interfieren entre sí.
- Capacidad: flujo máximo que puede soportar una determinada sección.
- Vehículo liviano: se considera como vehículo liviano a los automóviles y a las camionetas.
- Vehículos livianos equivalentes: se considera que la congestión generada por los diferentes modos de transporte no es igual, para simplificar el análisis, en este trabajo se considera que todos los vehículos pesados (buses y camiones) aportan el doble en términos de flujo al túnel en comparación a un vehículo liviano, a excepción de los camiones de más de 2 ejes, que aportan tres veces lo que un vehículo liviano.

2.2.2 Capacidad de una Carretera o Camino

El manual de carreteras, en su apartado 3.102.804, define la capacidad de la carretera o un camino como la intensidad máxima de vehículos que pueden pasar por una sección de un camino, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito y del camino. Normalmente se expresa como un volumen horario, cuyo valor no se puede sobrepasar a no ser que las condiciones prevalecientes cambien. [2]

En este mismo capítulo, se señala que la capacidad de un camino unidireccional de dos pistas es de: 2200 Vehículos Livianos por hora.

Con respecto a los túneles, la capacidad de una carretera se reduce drásticamente por diversos factores. Se considera que los principales son: la reducción del ancho de las calzadas y las bermas, la presencia de vehículos pesados asociada a las pendientes de estos y el tipo de conductor que circula es habitual en la ruta o no. [7]

Así, se estima que la capacidad de un túnel con las características de las utilizadas en este trabajo de título tiene una capacidad aproximada de 2600 vehículos livianos equivalentes en total, es decir, considerando ambas pistas.

Cabe destacar que la capacidad de un túnel bidireccional es considerablemente menor que a la de uno unidireccional.

2.2.3 Relación flujo-demora:

Un concepto tradicional en la teoría de tráfico es que la velocidad o su inverso, la demora, a través de un dispositivo vial es función del flujo circulante. [8]

Para modelar el tiempo de viaje promedio en el sistema de túneles Lo Prado, con y sin proyecto, se utiliza una función de volumen-demora, aplicando el modelo propuesto por la Oficina de Caminos Públicos (BPR por sus siglas en inglés) en 1964 [9].

$$t = t_o \left(1 + \alpha \left(\frac{q}{Q} \right)^\beta \right) \quad (18)$$

Donde:

- t : representa el tiempo de viaje promedio para un vehículo equivalente en un tramo.
- t_o : representa el tiempo de viaje en flujo libre.
- q : representa el flujo de vehículos equivalentes.
- Q : representa la capacidad.
- α, β : son parámetros que se calibran dependiendo del camino.

Para este trabajo el parámetro α es representado en función de los tiempos en flujo libre y el tiempo a capacidad. En cambio, el parámetro β es consultado directamente al Ministerio de Obras Públicas y tiene el valor de 2.8.

Así, ambos parámetros son definidos de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{t_c}{t_o} - 1 \quad (19)$$

$$\beta = 2.8 \quad (20)$$

Donde:

- t_c : es el tiempo promedio de viaje en el tramo a capacidad.
- t_o : es el tiempo promedio de viaje en el tramo cuando hay flujo libre.

2.2.4 Periodización

El proceso de periodización consiste en la determinación de una tipología de horas dentro de una semana, de manera que cada una de estas horas tipo posea características homogéneas en cuanto a los niveles de flujo, y a las estructuras de viaje.

Las periodizaciones comunes en autopistas como la ruta 68 comprenden a analizar los horarios punta dentro de un día, horario normal y el nocturno. Diferenciando el día laboral, con respecto al fin de semana y, dentro del fin de semana, diferenciando el viernes del domingo.

Como describe Gibson (2001), el flujo y la capacidad están sujetas a variaciones aleatorias y sistemáticas. Esta última da origen a la diferenciación de períodos que implica el supuesto de constancia del flujo promedio al interior de cada uno de ellos. No obstante, se suele imponer a los períodos una duración mínima, generalmente de 1 hora por razones prácticas de variada naturaleza. Si hay un patrón de variación sistemática dentro de este módulo mínimo, la periodización no dará cuenta de este. Cuando tal variación está acompañada de un grado de saturación alto, ignorarla lleva a subestimar la demora. Estas dos condiciones se dan a menudo en los períodos punta: el problema de la subestimación solo es importante en ellos. [8]

Bajo cada periodo se calcula el flujo promedio y sus consiguientes demoras en la situación con y sin proyecto, respectivamente. La diferencia permite establecer el tiempo reducido en los viajes gracias a la construcción del túnel, elemento principal del beneficio social de este proyecto. Su valorización es detallada en el apartado 2.3.

2.3 Evaluación Social de Proyectos

En los siguientes apartados se describen los elementos teóricos que se utilizan para realizar la evaluación del proyecto del Túnel Lo Prado N°3.

2.3.1 Evaluación Socioeconómica de Proyectos de Inversión Pública

En palabras del Ministerio de Desarrollo Social (2015), en el marco de las políticas públicas, las sociedades enfrentan el problema de asignar recursos escasos (naturales, de capital y humanos) entre infinitos usos, satisfaciendo determinadas necesidades y tal que se logre el máximo beneficio social. Para alcanzar este objetivo, las sociedades (o los Gobiernos en su representación), se valen de diferentes herramientas. Una de ellas y la mayormente recomendada cuando se pretende tomar tales decisiones en un marco de racionalidad, es la evaluación de proyectos. En este sentido, este instrumento permite a los tomadores de decisiones disponer de un método global con patrones comunes de comparación, para presentar las decisiones de asignación de recursos en el marco de las preferencias de la sociedad y con la premisa de cumplir los objetivos de crecimiento económico y la distribución del ingreso nacional. [10]

2.3.2 Enfoques de la evaluación

Tal y como señala el Ministerio de Desarrollo Social (2015), a diferencia de la evaluación privada, que sólo considera el análisis de beneficios y costos para el dueño del proyecto o el privado, valorizándolos a precios de mercado; la evaluación socioeconómica mide y valora en precios sociales los beneficios y costos de un proyecto, con el objetivo de escoger aquellos que maximicen el bienestar de la sociedad.

Por lo tanto, se consideran dos diferencias principales: se incluyen los efectos que la evaluación privada no considera relevantes, como por ejemplo externalidades y efectos intangibles; y se corrigen los precios, de forma tal de disponer de valores que reflejen el verdadero beneficio o costo para la sociedad de los bienes y servicios que entregará o demandará el proyecto.

La diferencia de los precios de mercado y precios sociales se debe principalmente a la existencia de distorsiones y regulaciones en los precios, tales como impuestos, subsidios, salario mínimo, restricciones a las importaciones, entre otros. Por lo tanto, este módulo implica la identificación y valoración de los beneficios y costos que tiene cada una de las alternativas de proyecto para la sociedad, de tal manera de determinar el impacto neto que tienen estos a lo largo del tiempo y seleccionar aquella que maximiza el bienestar social.

En la práctica, se identifican tres enfoques para realizar la evaluación socioeconómica:

- Costo-beneficio.
- Costo-efectividad.
- Costo-eficiencia.

El enfoque de evaluación utilizado depende del tipo de proyecto y de la posibilidad de identificar y/o cuantificar beneficios y beneficiarios. [10]

Dado el carácter público del proyecto del Túnel Lo Prado N°3, en este trabajo se realiza un Evaluación de Costo-beneficio, sin embargo, como los alcances son del nivel de un estudio preliminar e incluso en este estadio son de un nivel de ingeniería de perfil, los costos y beneficios analizados son reducidos.

En el estado de beneficios por la obra sólo se consideran:

- La disminución de las demoras de los viajes en el tramo del túnel ponderadas por el valor social del tiempo.
- El valor residual del proyecto túnel.

Desestimando disminución de emisión de gases contaminantes, accidentes, entre otras variables.

En términos de costos, sólo se considera el valor de la inversión, desestimando elementos como los costos operacionales, dados los alcances del trabajo, puesto que no se cuentan con antecedentes concluyentes en esta materia.

2.3.3 Precios sociales en el Sistema nacional de inversiones chileno

El Sistema Nacional de Inversiones chileno establece un conjunto de precios sociales que son utilizados para la evaluación de las distintas iniciativas de inversión pública. Estos precios se actualizan año a año y se encuentran en una permanente revisión y mejora metodológica, con el fin de contribuir a una asignación de recursos eficiente desde el punto de vista social y económico. [10]

El precio social que tiene relevancia en la Evaluación Social de este trabajo corresponde al Valor Social del Tiempo (VST).

2.3.3.1 Valor social del tiempo (VST)

El tiempo de las personas tiene como característica importante, desde un punto de vista económico, que es un bien no transable. Sin embargo, los individuos de una sociedad tienen una percepción del costo que significa para ellos el utilizar su tiempo (quizá el recurso más limitado de todos) en actividades que no le generan necesariamente utilidad directa o aumento de bienestar directamente.

En la actualidad, el enfoque del Ministerio de Desarrollo Social respecto al tratamiento de proyectos que generan cambios en la asignación de tiempo de las personas corresponde al de productividad, es decir, se valora el costo de oportunidad del tiempo utilizado en actividades que no generan recursos (o producen una disminución en la utilidad de los individuos), como, por ejemplo, viajar. En otras palabras, el tiempo se valora como la pérdida de producción que percibe la sociedad al dedicarse a tareas improductivas. [10]

El enfoque del cálculo del VST, para los tiempos de viaje y, por consiguiente, las demoras, corresponde a una suma ponderada del valor del tiempo de trabajo y el valor del tiempo de ocio. Así, el valor queda definido dependiendo del tipo de viaje, urbano o interurbano y el modo de transporte escogido.

El Ministerio de Desarrollo Social entregó los siguientes VST a fines del año 2018, para viajes interurbanos:

TABLA 2.9 VALOR SOCIAL DEL TIEMPO PARA VIAJES INTERURBANOS, AÑO 2018

Modo de transporte	VST [CLP\$/hr]
Autos y Camionetas	19161
Buses	141463
Camiones	8738
Autos y Camionetas con remolque	19647

2.3.4 Flujo de Caja

En finanzas, se entiende por flujo de caja una herramienta que permite determinar los flujos de ingresos y egresos en un periodo dado.

En el ámbito de proyectos de inversión, se utilizan para analizar la viabilidad de los proyectos, analizando los flujos anuales y calculando expresiones como el Valor Actual Neto (VAN) o la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Así, en el ámbito de la evaluación social de proyectos, dado que los costos y beneficios son calculados a su valor social, el resultado de la aplicación de estas herramientas se traduce en un análisis de costos-beneficios sociales de la factibilidad técnico-económica del proyecto.

2.3.4.1 Valor Actual Neto (VAN)

El valor actual neto (VAN), es una expresión matemática utilizada en finanzas, que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, a partir de una inversión inicial.

El procedimiento consiste en llevar a valor presente todos los flujos de caja, aplicando una tasa de descuento en cada periodo. Dicha tasa de descuento está definida por el Ministerio de Hacienda para los proyectos públicos, en este periodo tiene un valor del 6%.

Así, la expresión del VAN es la siguiente:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (21)$$

Donde:

- t : representa un periodo.
- F_t : representa el flujo en el periodo t .
- r : representa la tasa de descuento.
- I_0 : representa la inversión inicial.

Así, cuando el VAN resulta un valor positivo el proyecto es rentable en tiempo presente, en el caso de ser negativo no lo es, por lo que debe evaluarse postergar la inversión, o asumir el costo de su realización, a modo de subsidio.

En el caso de ser igual a 0, se entiende que el valor r corresponde a la tasa interna de retorno (TIR).

2.3.4.2 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno (TIR), es la media geométrica de los rendimientos futuros de una inversión, analizadas en un número determinado de periodos. Tal y como se señala en el apartado anterior, su valor se obtiene al calcular el valor para el cual el VAN es igual a 0.

Su interpretación en este trabajo sirve para analizar su comportamiento en relación a la tasa de descuento establecida por el Ministerio de Hacienda y por el crecimiento del parque automotriz, que da el valor del crecimiento de los beneficios anuales.

La literatura establece que si la TIR es mayor a la tasa de descuento r el proyecto debe aceptarse.

3 Antecedentes Ruta 68

En los siguientes apartados se presentan elementos de contexto general de la Ruta 68, con el objeto de establecer estos parámetros como conocidos en los desarrollos de los siguientes capítulos.

3.1 Sobre la carretera

La Ruta CH-68, conocida coloquialmente como Ruta 68, es una carretera que conecta las conurbaciones del Gran Santiago con la del Gran Valparaíso. Es una de las con más flujo en Chile, sobre todo en la época estival, dado el alto carácter turístico del litoral central.

Esta carretera, es parte del sistema de carreteras denominado Autopista Rutas del Pacífico, compuesta por la ruta CH-60, Ruta CH-62 y Ruta CH-60. Todas estas tienen como función conectar diferentes localidades de las Regiones Metropolitana y de Valparaíso. Estas rutas corresponden a la concesión del Consorcio Rutas del Pacífico S.A.

En específico, la ruta tiene una longitud aproximada de 111 kilómetros y del orden de 45 enlaces. Además, cuenta con dos pares de túneles unidireccionales, el conjunto de Túneles Lo Prado y el conjunto de Túneles Zapata.

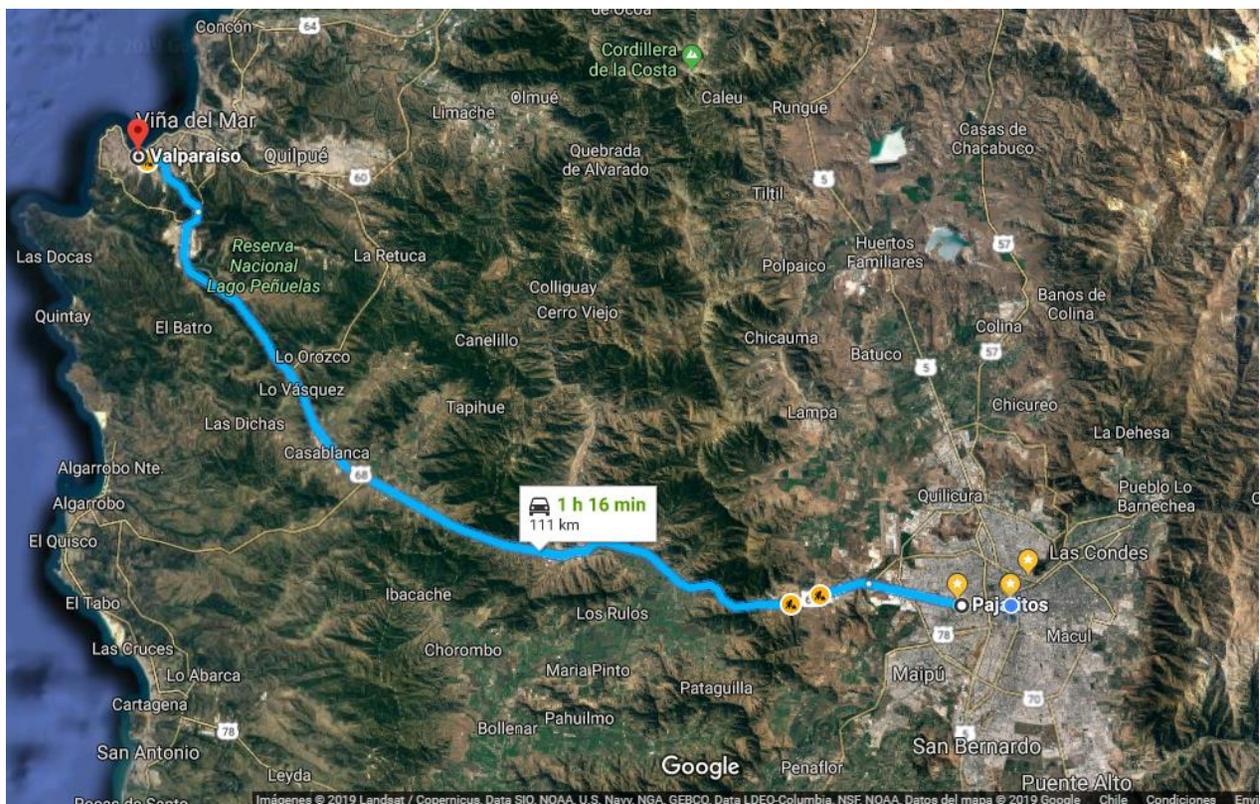


FIGURA 3.1 IMAGEN DE LA RUTA 68, INCLUYE EL TIEMPO DE VIAJE ESTIMADO PARA UN DÍA LABORAL EN HORARIO NORMAL.

3.1.1 Función de la carretera

La función principal de la carretera es la de conectar a alta velocidad las dos conurbaciones descritas anteriormente, por ella transitan: vehículos livianos, locomoción colectiva (buses interurbanos), camiones y camiones con remolque.

3.1.2 Características de la demanda

En datos otorgados por la empresa Axioma, encargada de los reportes de los flujos de la autopista, en el sector de los túneles lo Prado, la autopista tiene el siguiente flujo mensual promedio:

TABLA 3.1 FLUJOS MENSUALES RUTA 68

Año	Motos y Motonetas	Autos y Camionetas	Autos o Camionetas con Remolque	Bus de 2 ejes	Camión de 2 ejes	Bus de más de 2 ejes	Camión de más de 2 ejes
2016	8573	950827	3952	49221	58487	10297	64997
2017	8664	982380	6123	50475	56932	10735	73659
2018	9387	1022314	2371	49425	55117	10955	71869

3.1.3 Diseño de la Ruta 68

Actualmente, la ruta corresponde a una autopista de dos sentidos, con doble calzada en toda su extensión. En los sectores de alta pendiente cuenta con una tercera pista para vehículos con mayor carga. En tramos urbanos, en las conurbaciones de Santiago y Valparaíso, consta de tres pistas por lado.

La autopista está diseñada para una velocidad de proyecto de 120 [km/h].

3.1.4 Ubicación Túneles

La autopista cuenta con dos pares de túneles, los Túneles Lo Prado y los Túneles Zapata. Ambos se ubican en formaciones de la cordillera de la costa. Los primeros se encuentran en la separación de las comunas de Curacaví y Pudahuel, los segundos se ubican en el límite de las comunas de Curacaví y Casablanca, siendo también un límite entre las regiones de Valparaíso y Santiago.

En las figuras 3.2 y 3.3 se presentan imágenes obtenidas con el software Google Earth de la ubicación de ambos sistemas de túneles.

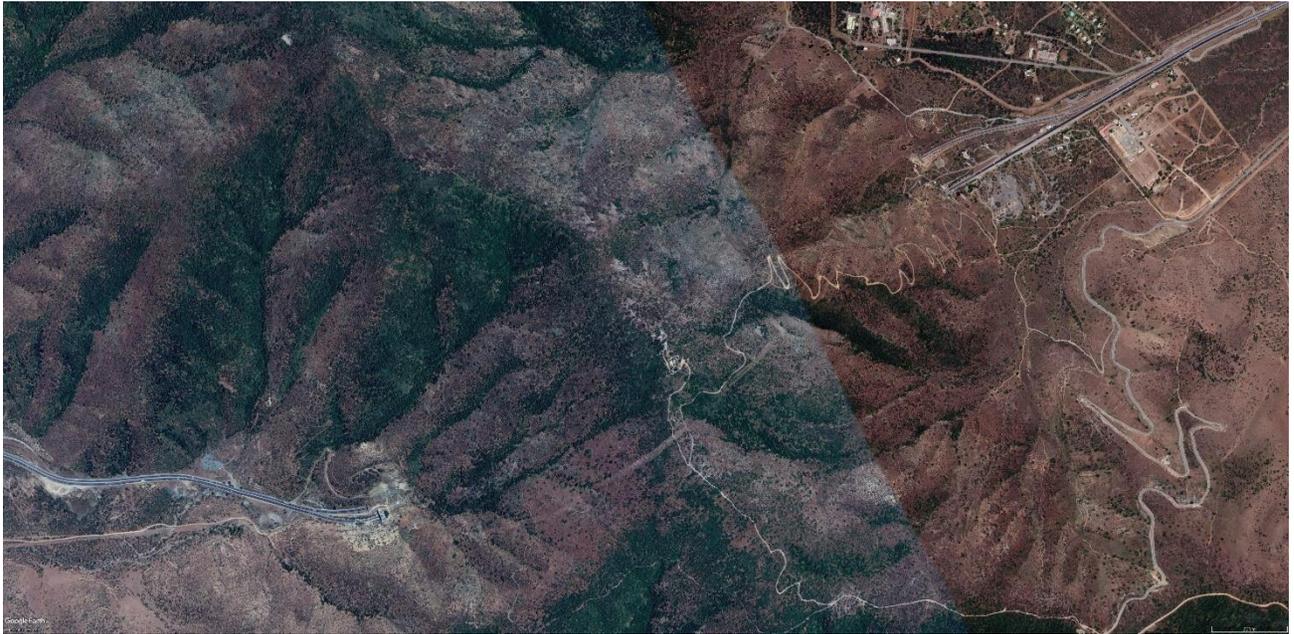


FIGURA 3.2 VISTA EN PLANTA DE LOS TÚNELES LO PRADO



FIGURA 3.3 VISTA EN PLANTA DE LOS TÚNELES ZAPATA.

4 Ingeniería Básica

En los siguientes apartados se presentan los trabajos recopilados y realizados para determinar:

- El corredor para el nuevo túnel y su trazado representativo, detallado en el Capítulo N°6 Elección del Corredor para el Túnel Lo Prado N°3.
- El diseño estructural de este, detallado en el Capítulo N°7 Diseño Geomecánico del Túnel Lo Prado N°3.
- La estimación de los plazos de la construcción del nuevo túnel, detallado en el Capítulo N°8 Costos y Tiempos de Construcción.

Los trabajos corresponden eminentemente a un exhaustivo trabajo de gabinete sobre el diseño y construcción del Túnel Lo Prado N°2, además de los antecedentes respectivos a este trabajo, los cuales incluyen documentos sobre la construcción del Túnel Lo Prado N°1.

4.1 Prospecciones

En los siguientes apartados se describen los trabajos realizados para definir:

- La ubicación del corredor para ubicar el trazado del nuevo túnel.
- Diseño de un trazado en planta tipo para el corredor.
- Diseño Geomecánico para este trazado.

Los documentos analizados corresponden principalmente a los estudios y análisis realizados para diseñar y construir el Túnel Lo Prado N°2. Además, son de suma relevancia los informes y planos de avance de su construcción, dado que estos cuentan la información de las secciones construidas, su largo, además de la calidad de la roca de forma continua.

Así, el nivel de información levantada permite decir que se dispone de dos “sondajes horizontales continuos”, correspondiente a la información obtenida de los dos túneles anteriores.

4.1.1 Trabajos realizados

4.1.1.1 Revisión de trabajos anteriores

El principal documento en el que se basa este trabajo es el informe realizado por la Sociedad Concesionaria Rutas del Pacífico S.A. sobre las obras realizadas en la Ruta 68 entre los años 1999 y 2003, que formalmente se denomina, proyecto de interconexión vial Santiago – Valparaíso – Viña del Mar [5].

En este documento, se recopilan los antecedentes y archivos para el diseño del Túnel Lo Prado N°2. Además, cuenta con datos obtenidos de la construcción de este mismo. En específico, de dicho informe se estudia el siguiente volumen:

- Concesión Internacional Interconexión Vial Santiago – Valparaíso – Viña del Mar, Sociedad Concesionaria Rutas del Pacífico S.A., Volumen II, Proyecto de Túneles, enero 2003.

En este documento, se referencian una serie de trabajos que son muy útiles para el desarrollo del trabajo del nuevo túnel. De estos trabajos, se destacan en función de su aporte los siguientes:

- Anteproyecto Túnel Lo Prado N.º 2. (Asíntota Ltda., 1997). Realizado para la Unidad Ejecutiva Concesiones de Carretera del Ministerio de Obras Públicas.
- Edades radiométricas de rocas intrusivas y metamórficas de la Hoja Valparaíso – San Antonio (I.I.G. Chile, 1972).
- Mapa Geológico del área de Valparaíso – Curacaví (Servicio Nacional de Geología y Minería, 1996)
- Elgueta, Roberto (1970), Geología del área de Lo Prado y estudio geotécnicos relacionados con el proyecto y excavación del túnel. (Universidad de Chile. Escuela de Geología).
- Cartografía Geológica -Geotécnica, Túneles Lo Prado (Geocontrol S.A., 1999).

4.2 Resultados obtenidos

En los siguientes apartados, se presentan los resultados relevantes para el diseño preliminar del Túnel Lo Prado N°3.

4.2.1 Topografía:

Las cartas topográficas utilizadas corresponden a las mismas con las que se diseñó el Túnel Lo Prado N°2. No se posee imágenes aisladas de las curvas de nivel del sector. En la figura 4.1 se presenta una imagen de las curvas de nivel mostradas por el software Google Maps como referencia. En todos los planos de diseño se presentan las curvas de nivel correspondientes al diseño del Túnel Lo Prado N°2.



FIGURA 4.1 CURVAS DE NIVEL DEL SECTOR TÚNELES LO PRADO.

La topografía del sistema de los túneles se presenta en el plano 4.1.

4.2.2 Marco Geológico Regional

El conjunto de túneles Lo Prado se encuentra situado en el Sector Central de la Cordillera de la Costa, en la transversal entre las ciudades de Santiago y Valparaíso.

En esta cordillera se presentan principalmente materiales pertenecientes al Basamento Metamórfico paleozoico y granitos pertenecientes a la orogenia hercínica (Granito de la costa) y de edad mesozoica (Granito Central). De forma minoritaria aparecen algunas formaciones estratificadas de edad jurásica y cretácica entre las que hay que destacar, por su afección al túnel, a la formación Lo Prado de edad cretácica. [11]

Desde el punto de vista geográfico, el conjunto de Túneles Lo Prado está situado en los primeros relieves de la Cordillera de la Costa, en el sector de Rinconada de Lo Aguirre, al Oeste de la ciudad de Santiago.

El conjunto de túneles se encuentra ubicados bajo el cerro San Francisco, que constituye la cumbre en la zona. Esto se aprecia en la figura 4.1, en la cual se señala la cumbre que supera los 1000 metros sobre el nivel del mar.

El relieve que atraviesan el conjunto de túneles sirve de divisoria de aguas del Estero Lo Aguirre a Oriente perteneciente al sistema fluvial del Estero de Lampa, y de una quebrada que desagua en el Estero Puangue, al Poniente. Esto influye directamente en la litología presente en la cara del cerro al poniente, el cual es descrito en el apartado 4.2.2.1.

Este relieve pertenece a la formación Lo Prado. Esta es una unidad marina con intercalaciones volcánicas formada por calizas, areniscas, brechas y conglomerados, además de lavas y tobas de composición fundamentalmente andesítica.

Las rocas intrusivas que afloran en el portal poniente del túnel pertenecen a la Unidad La Dormida del Batolito Central, cuya edad de acuerdo a los datos radiométricos del estudio del Servicio Nacional de Geología y Minería [12], estaría en el tránsito entre el Cretácico Superior y el Cretácico Inferior, intuyendo y generando procesos metamórficos a las rocas de la formación Lo Prado.

El contacto entre las diferentes unidades litológicas es concordante, esto se aprecia con claridad en el plano 4.2, perfil longitudinal de la construcción del Túnel Lo Prado N°2, donde los diferentes litotipos, representados con colores y siglas diferentes, mantienen una forma similar.

Desde el punto de vista estructural la formación de Lo Prado se dispone en una franja alargada de dirección NNW-SSE, en actitud homoclinal con rumbo N-170°/160°-E y manteos variables entre 45° y 75° hacia el Este. Numerosas fallas y fracturas cortan la secuencia estratigráfica destacando fallas de dirección N-80°-E y N-45°-E.

El marco geológico se completa con depósitos de recubrimiento cuaternario de naturaleza mayoritariamente, coluvial en la cabecera de las quebradas, y aluvial en la Rinconada de Lo Aguirre a oriente.

4.2.2.1 Contexto geológico-geotécnico del portal poniente

El Portal Poniente del túnel de Lo Prado N°3, al igual que el de los túneles anteriores, se sitúa una zona de contacto entre las rocas intrusivas del pórfido granítico y el de las andesitas.

Como consecuencia de este contacto intrusivo, las andesitas presentan un alto grado de procesos metamórficos, con alteraciones hidrotermales, que han arcillificado la roca, convirtiéndola en una roca de “mezcla”, cosa que se aprecia durante la construcción del Túnel Lo Prado N°2 y en los sondeos previos realizados. [5]

Con la construcción del portal poniente del segundo túnel, se confirma la existencia una zona de contacto fuertemente tectonizada y con alteraciones hidrotermales. El portal oriente no presenta características complejas.

4.2.3 Cartografía Geológica – Geotécnica

Para el diseño del Túnel Lo Prado N°2, la empresa Geocontrol S.A. realizó una cartografía geológica-geotécnica a escala 1/1000 del túnel en una franja del orden de 500 [m] a lo ancho del túnel, con ayuda de pares estereoscópicos a escala 1/20.000 y 1/4.000. Este trabajo fue estuvo a cargo de la Sra. Fernández Martín y el Sr. Galera de la empresa mencionada.

Es sobre esta cartografía que se presentan los trazados en planta de los túneles lo prado actuales y es sobre la que se realizaron los informes de avance de construcción del Túnel Lo Prado N°2.

4.2.3.1 Actualización de la cartografía

La información de esta cartografía es actualizada en función de los informes de construcción del Túnel Lo Prado N°2, en particular, gracias a los documentos de avance de diciembre del 2000 y enero del 2001, mediante planos de avance, en perspectiva longitudinal. Ambos documentos tienen como fecha de presentación Enero del 2003.

En estos documentos se presentan el diseño proyectado del túnel, con la caracterización del macizo rocoso respectiva, en contraste con la realmente construida. Dichos documentos corresponden a los planos 4.2 y 4.3.

Esta información es la esencial para realizar la estimación de costos del futuro túnel, en términos de cubicación. La actualización de la cartografía corresponde al plano 4.4, en el cual también se aprecian los trazados en planta de los túneles Lo Prado N°1 y N°2.

4.2.4 Materiales identificados

En el área de estudio de los Túneles Lo Prado, descrita en la cartografía, definida en la cartografía descrita en el apartado 4.2.3 (plano 4.2), se respetan las subunidades litológicas definidas por el trabajo de Elgueta en 1970 [13].

Así, los litotipos (subunidades litológicas) definidos son los siguientes:

- KLP 1: Andesitas y Queratófiros grises.
- KLP 2: Brechas conglomeráticas rojizas.
- KLP 3: Ocoítas gris verdosas.
- KLP 4: Calizas y areniscas grises.
- G: Pórfido cuarcífero claro.

Las cuatro primeras unidades son de carácter vulcano – sedimentarias y pertenecen a la formación Lo Prado, mientras que la última unidad es intrusiva y pertenece al Granito Central.

En el trabajo de Elgueta, también se diferencian algunas litologías hipabisales (lamprófidos, andesitas y ocoítas) de escasa presencia en el túnel, por lo que se decide prescindir de ellas, englobándolas en las cinco unidades descritas. [13]

Existe una aureola de contacto que el pórfido cuarcífero G ocasiona en la unidad KLP1, alterándola hidrotermalmente y empeorando sensiblemente sus propiedades mecánicas. A esta zona se le señala como KLP 1'.

Además de ello, se señalan las tres formaciones cuaternarias siguientes:

- Q_{co}: Escombros de falda (coluvial).
- Q_{al}: Aluvial.
- Q_x: Antrópico.

Estas presentan relevancia en la zona de los portales, en especial en el portal poniente, la cual se aprecia en los perfiles longitudinales, planos 4.2 y 4.3, donde se describe como esta interacción genera cierto grado de alteración en las andesitas presentes en el sector.

En resumen, se tienen las siguientes subunidades litológicas en el área de análisis del túnel:

TABLA 4.1 SUBUNIDADES LITOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Clasificación Elgueta	Subunidades litológicas
KLP1	Andesitas, Queratófiros Brechosos y Fluviales
KLP2	Brechas Conglomeráticas
KLP3	Ocoítas, Andesitas porfídicas
KLP4	Calizas y areniscas, margas
G	Pórfido Granodiorítico
KLP1'	Aureola de contacto entre KLP1 y G
Q	Formación Cuaternaria
Q _{co}	Escombros de Falda (Coluvial)
Q _{al}	Aluvial
Q _x	Antrópico

4.2.5 Estado tensional natural

Tal y como se señala en el Capítulo N°2 Marco Teórico, dado los alcances de este trabajo de título no se dispone de mediciones del estado tensional existente en el macizo rocoso, así que se homologan los supuestos realizados en el diseño del Túnel Lo Prado N°2.

En lo referente a las tensiones horizontales, se considera el contexto de cercanía a un margen activo convergente de placas, con subducción de la placa oceánica de nazca bajo la placa continental sudamericana. Por ello en esa dirección (E – W) cabe esperar un régimen de tensiones superior a la carga litoestática, así, se toma el siguiente valor:

$$K_o = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = 2 \quad (22)$$

Donde:

- $\sigma_{h,v}$: representa al estado tensional horizontal o vertical respectivamente.

En el caso de la dirección (N – S), se ha considerado un valor intermedio con un coeficiente de:

$$K_o = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = 0.8 \quad (23)$$

4.2.6 Propiedades Roca Trazado Túneles Lo Prado

En este apartado se presentan los datos obtenidos de la calidad de roca de ambos túneles, la calidad de esta se presenta según el índice RMR de Bieniawski con la correlación al índice Q de Barton.

Además, se presenta la metodología utilizada para el cálculo de la calidad en el Túnel Lo Prado N°2, puesto que es en base a estos datos en los que se basa el diseño preliminar para el futuro túnel.

4.2.6.1 Metodología

El trabajo fue realizado por la empresa Geocontrol S.A, que siguió una metodología propia basada en su experiencia de más de 100 proyectos de túneles. Esta consiste en minorar el RMR de Bieniawski, utilizando como criterio de rotura el de Hoek-Brown, y empleando las expresiones de Priest-Brown [4] para determinar los parámetros de rotura del macizo rocoso.

Con respecto a las discontinuidades, utiliza la expresión debida a Barton-Choubey. Estos criterios, que son consistentes con lo señalado en el manual de carreteras, son detallados en los apartados 2.1.3.3 y 2.1.3.4 del Capítulo N°2.

4.2.6.2 Túnel Lo Prado N°1

En el trabajo de Elgueta [13], se señala que los principales problemas geotécnicos durante la construcción del túnel se debieron al paso de zonas de falla y/o fractura. En términos relativos, se señala que la calidad en general tiene buenos comportamientos geotécnicos y se plantea que un cuarto tuvo un mal comportamiento, esto se detalla en la tabla 4.2.

TABLA 4.2 LARGO PRESENTE EN LA CALIDAD DE LA ROCA DEL TÚNEL LO PRADO N°1

Calidad de la Roca	Largo acumulado [m]	Porcentaje
Buena	1473	54%
Regular	621	22%
Mala	650	24%

Estos datos corresponden a observaciones relativas señaladas en el trabajo de Elgueta.

Cabe destacar, que los principales problemas de construcción de este Túnel estuvieron marcados por la incidencia de fracturas con rellenos arcillosos.

En el macizo rocoso se identifican diferentes subunidades litológicas, las que se presentan en la Tabla N°4.1 en el apartado 4.2.4. Para el diseño del Túnel Lo Prado N°2 se consideraron los siguientes valores representativos para cada una de ellas.

4.2.6.3 Túnel Lo Prado N°2

En la construcción de este túnel se presentan datos con un mayor nivel de detalle, puesto a la mayor precisión de los datos obtenidos en su construcción.

A partir de los trabajos realizados para el diseño de este túnel, se caracteriza al macizo rocoso con las siguientes calidades de roca según el índice RMR:

TABLA 4.3 LARGO PRESENTE EN LA CALIDAD DE LA ROCA DEL TÚNEL LO PRADO N°2

Calidad de la Roca	Largo acumulado [m]	Porcentaje
Buena	204	7.7%
Regular	2201	82.6%
Mala	260	9.7%

En específico, la calidad según los litotipos obtenidos en las estaciones geomecánicas fueron las siguientes:

TABLA 4.4 LITOTIPOS EXISTENTES EN EL TÚNEL LO PRADO N°2

Unidad	Litotipo	σ_c [MPa]	m_i	RMR
KLP 1	Andesitas	45	16	57 (72-43)
KLP 2	Brechas	40	18	50 (60-40)
KLP 3	Ocoítas	90	19	63 (67-60)
KLP 4	Areniscas	60	15	56 (63-50)
G	Pórfido	70	22	62 (67-58)
Falla	Milonita	20	6	37 (42-33)

A partir de estos datos y los supuestos mencionados respecto a su distribución de tensiones, se consideraron los siguientes recubrimientos:

- 100 m con una $\sigma_v = 2,7$ MPa.
- 200 m con una $\sigma_v = 5,4$ MPa.
- 300 m con una $\sigma_v = 8,1$ MPa.
- 550 m con una $\sigma_v = 14,85$ MPa.

Así, el diseño del túnel consideró las siguientes propiedades de las calidades de roca para el Túnel Lo Prado N°2:

TABLA 4.5 PARÁMETROS DE DISEÑO DEL TÚNEL LO PRADO N°2

Litotipo	RMR	ρ [t/m ³]	E [MPa]	ν	m	s	C [MPa]	ϕ [°]
Andesitas	(72-43) 57	2.85	10030	0.25	3.444	0.00842	0.7	49
							0.8	44
							0.9	41
							1.0	36
Brechas	(60-40) 50	2.65	6325	0.25	3.018	0.00387	0.4	48
							0.5	43
							0.6	40
							0.65	35
Ocoítas	(67-60) 63	2.85	20050	0.2	5.068	0.01639	1.8	55
							2.0	52
							2.1	49
							2.4	45
Areniscas	(63-50) 56	2.65	10940	0.25	3.116	0.00753	0.9	50
							1.10	45
							1.15	42
							1.25	38
Pórfido	(67-58) 62	2.75	16700	0.2	5.662	0.01467	1.3	55
							1.5	51
							1.6	48
							1.8	44
Milonita	(42-33) 37	2.50	2100	0.3	0.632	0.00091	0.17	29
							0.19	24
							0.20	22
							0.22	18

Los valores de la cohesión y ángulo de fricción entera corresponden a las cuatro alturas de análisis: 100, 200, 300 y 550 [m] ordenados de arriba hacia abajo respectivamente.

Sin embargo, según los datos obtenidos en la construcción de este túnel, se obtuvieron los siguientes valores promedios de calidad e índice RMR.

TABLA 4.6 CALIDAD DE LA ROCA SEGÚN EL ÍNDICE RMR DEL TÚNEL CONSTRUIDO

Calidad de la Roca	Largo acumulado [m]	Porcentaje
Buena	0	0.0%
Regular	2684	100.0%
Mala	0	0.0%

El detalle de estos datos se presenta en el anexo A.2.1. El promedio del índice RMR para los diferentes litotipos es el siguiente:

TABLA 4.7 ÍNDICE RMR PROMEDIO DE LOS LITOTIPOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL LO PRADO N°2

Litotipo	Largo [m]	RMR promedio	Desviación Estándar
G	321.1	47	3.2
KLP1	1495.7	48	4.1
KLP1'	532.8	47	3.4
KLP2	511.2	49	3.5
KLP3	205.7	44	1.8

4.2.6.4 Comentarios

Existe una gran diferencia entre las apreciaciones cualitativas del trazado del Túnel Lo Prado N°1 respecto a las construidas en el N°2. Si bien se mantiene el comportamiento respecto a las fallas, las lecturas del índice RMR indican que el macizo rocoso tiene una calidad dentro del rango regular. Lo cual puede ser aparentemente contradictorio, tiene su razón en las diferentes metodologías utilizadas para definir la calidad del macizo, en la construcción del primer túnel, no existía la clasificación RMR o Q, lo cual explica la notoria diferencia.

En el caso del Túnel Lo Prado N°2 propiamente tal, se aprecia una notable diferencia en las calidades de las rocas proyectadas con respecto a las obtenidas al efectuar el proyecto. Esto tuvo una directa repercusión entre las secciones diseñadas en el proyecto con respecto a las que se construyeron finalmente.

La razón de presentar la diferencia entre las calidades de rocas proyectas con respecto a las obtenidas en la construcción, es manifestar el rango de variabilidad que tienen los levantamientos hechos con respecto a lo que se construye en este tipo de macizos rocosos, cosa de suma relevancia para estudios más profundos sobre la factibilidad del proyecto.

4.2.7 Secciones del Túnel Lo Prado N°2

4.2.7.1 Secciones Diseñadas

Para el Túnel Lo Prado N°2 se diseñaron nueve secciones diferentes en función de la calidad de la roca según el índice RMR asociado a su Q equivalente, litotipo y altura del recubrimiento. A continuación, se describen los diferentes diseños:

TABLA 4.8 SECCIONES DISEÑADAS EN EL TÚNEL LO PRADO N°2

Sección	Litotipo	RMR Promedio	Q	Recubrimiento [m]
I	KLP1	57	4.2	0 – 250
	G	62	7.4	0 – 250
	KLP4	56	3.8	0 – 150
II	KLP1	57	4.2	250 – 450
	KLP3	63	8.3	0 – 450
	KLP2	50	1.9	0 – 250
III	KLP1	57	4.2	>400
	G	62	7.4	>250
IV	KLP2	50	1.9	250 - 400
V	KLP2	50	1.9	400 – 550
VI	FALLA	38	0.5	0 – 100
	KLP1'	38	0.5	0 – 100
VII	FALLA	38	0.5	>100
VIII	KLP1'	38	0.5	>100
IX	KLP1'	57	4.2	>50

La sección IX se diseña para las andesitas alteradas que están cercanas a los portales por las diferencias de estabilidad que suponen estas zonas. Las principales características de las secciones son las siguientes:

TABLA 4.9 DETALLE SECCIONES DISEÑADAS PARA EL TÚNEL LO PRADO N°2

Sección Tipo	Sellado [cm]	Marco		Pernos de Anclaje			HP-25 [cm]
		Tipo	Espaciado	Tipo	T [m]	L [m]	
I	3	-	-	φ 25	1.5	2	5
II	3	-	-	φ 25	1.5	2	10
III	3	-	-	φ 25	1.5	1.5	15
IV	3	-	-	φ 25	1.5	1.5	10+10
V*	3	THN-29	1	φ 25	1.5	2	7+13
VI*(1)	3	THN-29 ⁽²⁾	1	φ 25			13+7
VII*(1)	3	THN-29	0.75	φ 25			13+17
VIII*(1)	3	THN-29 ⁽²⁾	-	φ 25			
IX	3	THN-29	1	φ 25			15

En la que:

- El sellado se realiza con hormigón proyectado.
- Los pernos de anclaje varían de 3 a 3,5 [m].
- * excavación con avance y destroza.
- ⁽¹⁾ excavación con contrabóveda.
- ⁽²⁾ marco con pata de elefante.

4.2.7.2 Secciones Construidas

En términos de diseño, las secciones construidas no tuvieron diferencias significativas a las proyectadas, a excepción de la inclusión de marcos THN-29 a la sección III en varios tramos de la obra.

Esta decisión se fundamenta en la calidad de la roca obtenida y las deformaciones medidas. Esta información se aprecia en detalle en los planos 4.2 y 4.3, cabe destacar la gran diferencia entre las secciones planificadas con las construidas en términos de longitud, a continuación, se presenta una tabla comparativa entre el diseño proyectado y el ejecutado:

TABLA 4.10 DIFERENCIAS ENTRE PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN

Secciones	Largo Total Proyectado[m]	Largo Total Construido [m]	Porcentaje Construido
I	619	157	25%
II	890	1036.7	116%
III	384	1418.5	370%
IV	121	28.3	23%
V	342	28.3	8%
VI	76	0	0%
VII	43	0	0%
VIII	141	0	0%
IX	50	44	87%
Total	2665	2712	102%

Como se muestra en la tabla 4.10, la sección que más representó un aumento en su construcción, con respecto a lo planificado, fue la sección III, esto debido a que gran parte de la roca que se consideraba de calidad buena era regular, por lo que absorbe una porción considerable de ese rango, la sección II también aumenta parte su porcentaje por esta razón.

A su vez, roca que se consideraba de peor calidad, también fue solventada por esta sección. Esto corresponde a las secciones VIII, VII, VI y V, que en gran parte fueron reemplazados por la sección III, pero con la adicción de marcos THN-29.

El total de sección III construida con marcos es de 504.7 [m], esto da que prácticamente el 80% del túnel se construyó sin estos refuerzos.

El detalle de las secciones se presenta en los anexos, en los planos 4.5 al 4.9.

4.2.8 Tiempos de construcción

La excavación y construcción del Túnel Lo Prado N°2 tuvo una duración aproximada de 18 meses. Iniciándose en octubre de 1999 y terminando en marzo de 2001. La construcción fue realizada en dos frentes, donde el frente oriente tuvo su partida en octubre de 1999, en cambio el poniente comenzó en septiembre del año 2000.

Además de la excavación de los túneles principales, se construyeron tres galerías de conexión al Túnel Lo Prado N°1, de 135, 86 y 60 [m] respectivamente.

Los avances por mes fueron los siguientes:

TABLA 4.11 AVANCES MENSUALES DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL LO PRADO N°2 POR FRENTE

Mes	Oriente [m]	Poniente [m]	Total [m]
oct-99	8	-	8
nov-99	51	-	51
dic-99	64	-	64
ene-00	71	-	71
feb-00	85.6	-	85.6
mar-00	104	-	104
abr-00	178.8	-	178.8
may-00	101.2	-	101.2
jun-00	151.6	-	151.6
jul-00	184.7	-	184.7
ago-00	200	-	200
sept-00	204	13	217
oct-00	206.5	124.5	331
nov-00	183.6	169.5	353.1
dic-00	22.5	134.1	156.6
ene-01	112	81.4	193.4
feb-01	96.7	109.6	206.3
mar-01	-	15.3	15.3
Total	2025.2	647.4	2672.6

Así, se tienen los siguientes rendimientos medios:

TABLA 4.12 RENDIMIENTOS MEDIOS DE CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL LO PRADO N°2.

Promedio	Avance [m]	Desviación estándar [m]
Por frente, sin inicios y finales.	125.5	54.5
Por frente, considerando extremos.	111.4	63.7
Considerando ambos frentes a la vez	148.5	96.6

Cabe destacar como el rendimiento de avance comienza a aumentar considerablemente a medida que se aleja del portal oriente.

Esto se debe a la presencia de fracturas entre el contacto de los litotipos G, KLP1 y KLP2, además de fallas sucesivas. Esto se aprecia claramente en el plano 4.3, desde el P.K 21+400 al 21+800.

Esto es consistente a lo mencionado por el análisis de la construcción del Túnel Lo Prado N°1 en el trabajo de Elgueta [13]. Lo cual debe ser de consideración para la construcción de un nuevo túnel.

4.3 Criterios de Diseño

Como resultado del trabajo de la ingeniería básica, en este apartado se presentan las conclusiones y recomendaciones en torno al diseño de un nuevo Túnel en el sector de Lo Prado.

Si bien estas recomendaciones son utilizadas directamente en el desarrollo de los siguientes capítulos de este trabajo de título, son recomendaciones que son válidas para los trabajos posteriores que se realicen sobre la realización del Túnel Lo Prado N°3.

Así, se resumen las recomendaciones en tres ítems:

- Diseño del trazado.
- Diseño de los portales.
- Diseño del sostenimiento.

4.3.1 Diseño del Trazado

Las primeras consideraciones con respecto al diseño del trazado refieren a la ubicación del área donde se hace conveniente ubicar los pórtales del túnel, considerando simplemente la existencia de los túneles anteriores y su empalme con la Ruta-68.

Con respecto al portal oriente, la localización del área túnel tiene como restricción al norte el Centro de Estudios Nucleares de Lo Aguirre, cuyos deslindes están a unos 150 metros del Túnel Lo Prado N°2 hacia el norte. Hacia el sur no se tienen restricciones significativas en unos 500 metros.

En cambio, en el portal poniente, se tienen restricciones de consideración mayor. Hacia el costado norte de los túneles se tiene un abrupto cambio de cota, llegando en un sector hasta los 475 [msnm] en comparación a los 500 [msnm] aproximados de la salida del Túnel Lo Prado N°2.

Por el costado sur, en la salida del Túnel Lo Prado N°1, se encuentra una ladera que tiene una pendiente que desciende abruptamente unos 40 metros de altura hacia el túnel, mientras que, en el transcurso de 300 metros de desarrollo de la vía sur de la ruta, esta desciende abruptamente para desarrollar una quebrada hacia el valle de Curacaví.

Toda esta información se extrae del plano 4.4, que es la cartografía actualizada. Además, se incluyen unas imágenes obtenidas del software Google Earth para tener una noción visual más completa. Estas corresponden a las figuras 4.1 a la 4.3.

Considerando estos elementos, se propone que ubicar el Túnel Lo Prado N°3 por el lado norte es la mejor opción, puesto que sus restricciones en el portal poniente son menos restrictivas y si bien existe un rango acotado por el sector oriente, existe una franja lo suficientemente amplia para no interferir en el Centro de Estudios Nucleares Lo Aguirre.

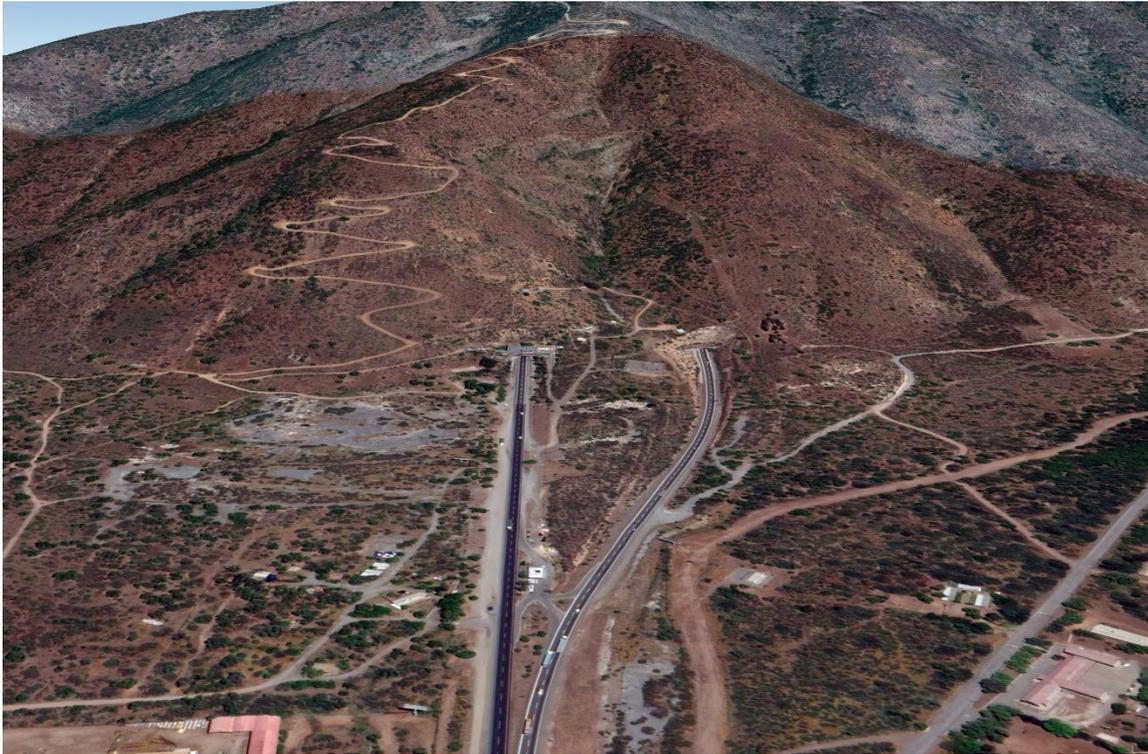


FIGURA 4.2 PERSPECTIVA 3-D DE LOS PORTALES ORIENTE DE LOS TÚNELES LO PRADO

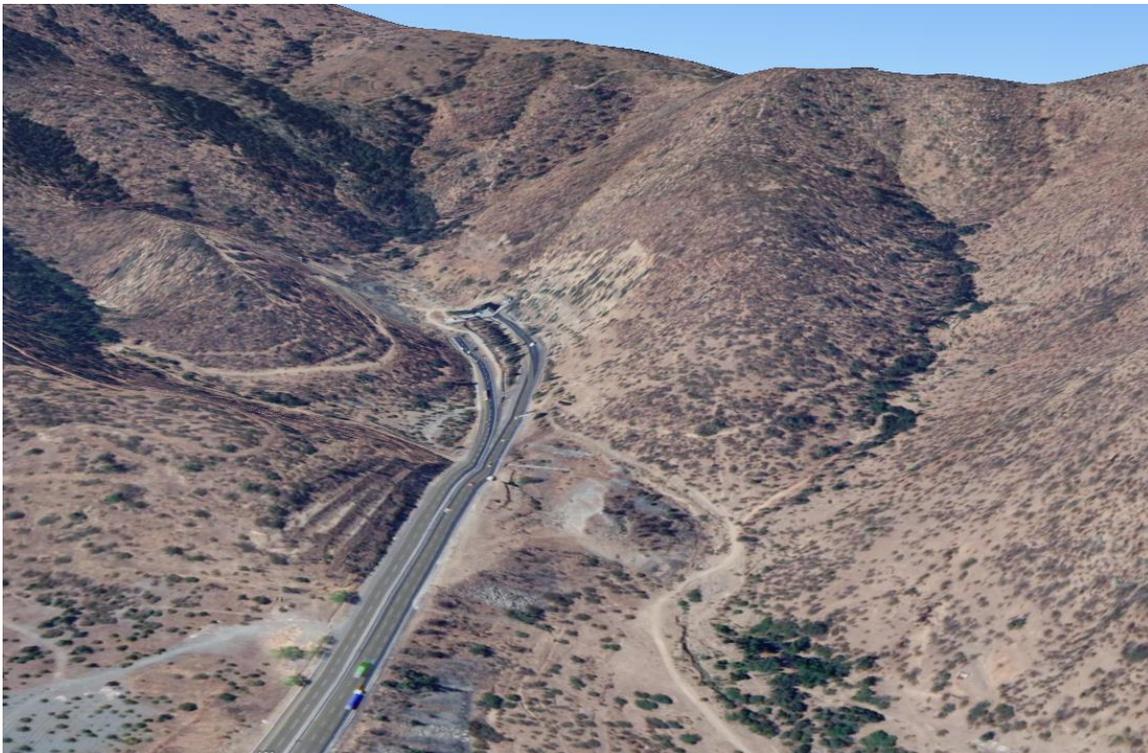


FIGURA 4.3 PERSPECTIVA 3-D DE LOS PORTALES PONIENTE DE LOS TÚNELES LO PRADO.

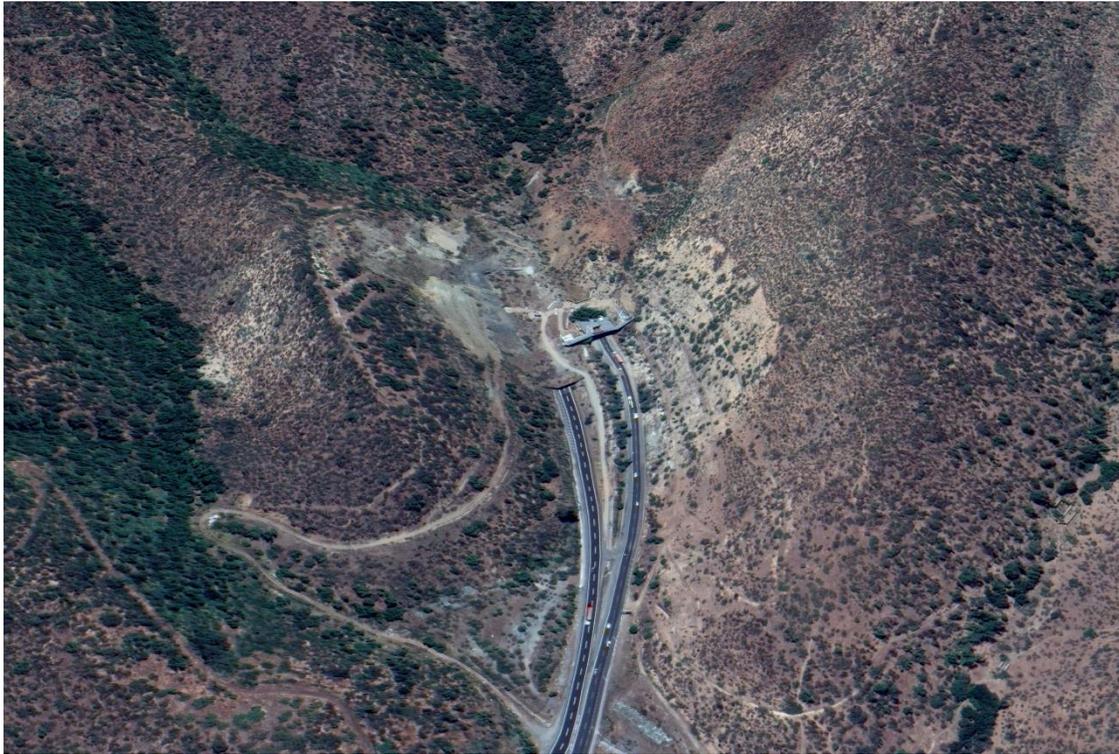


FIGURA 4.4 PERSPECTIVA EN PLANTA DE LOS PORTALES PONIENTE DE LOS TÚNELES LO PRADO.

Con respecto al trazado propiamente tal, los datos arrojados por la construcción de ambos túneles indican que las principales dificultades asociadas a la construcción del túnel estuvieron ligadas, fundamentalmente, al paso de zonas de falla y/o fractura.

La presencia de agua es muy baja y corresponde a goteos, las zonas presentes con goteos se aprecian con el color celeste en los planos 4.2 y 4.3 en el ítem presencia de agua.

La calidad del macizo rocoso es de un promedio eminentemente regular en la clasificación RMR de Bieniawski, en su mayoría andesitas. La experiencia del Túnel Lo Prado N°2, indica que las zonas más cercanas al portal oriente presentan un grado de fracturación más complejo, principalmente entre la zona de contacto entre el pórfido G y el resto de litotipos.

Así, el objetivo es ubicar el Túnel Lo Prado N°3 en un trazado que minimice las fallas posibles en el transcurso de su desarrollo y que este ubicado al norte de los complejos actuales.

Como criterio adicional al diseño del trazado, la variable a optimizar es que tan rentable es minimizar la cantidad de fallas por donde pasa la nueva obra, por sobre que tanto se aleja esta del Túnel Lo Prado N°2, dado que si se aleja mucho los túneles de conexión se hacen más largos, aumentando sus costes.

4.3.2 Diseño de los portales

Las consideraciones son las mismas que para el Túnel Lo Prado N°2, citando textualmente: En relación a los portales y con carácter general hay que señalar que la meteorización física afecta especialmente a las andesitas de la unidad KLP 1 y, sobre todo, a las litologías metamorfizadas de la unidad KLP 1'.

Asimismo, en menor medida, se observan amaillamientos en los pórfidos cuarcíferos de la unidad G.

Esta meteorización provoca la descomposición de la roca en espesores que de acuerdo con los sondeos y sísmica realizada, oscilan entre 4 y 6 m de suelo, alcanzándose la roca sana a partir de unos 40 m. Por ello en los portales deberán adoptarse diseños de taludes que garanticen la estabilidad de los cortes y túneles falsos. [5]

Para confirmar esta información, la recomendación es realizar sondeos exhaustivos en la zona que se recomienda realizar el portal poniente.

4.3.3 Diseño del soporte del Túnel Lo Prado N°3

Para diseñar el soporte del Túnel Lo Prado N°3 se recomienda extrapolar el diseño empleado en el Túnel Lo Prado N°2, puesto que la calidad de la roca debiese ser de los mismos niveles y las condiciones son similares. En el caso de encontrar un diseño óptimo dando la diferencia temporal con respecto al año de construcción, obviamente emplearla.

De mantenerse el diseño anterior para futuros estudios, estos consideran un sostenimiento a base de hormigón proyectado y pernos de anclaje para las rocas de mejor calidad. En las zonas más débiles, se consideran refuerzos de marcos THN-29, además, existe la posibilidad de realizar metodología de avance y destroza si es que se llegase a encontrar roca muy mala.

5 Sección Transversal del Túnel Lo Prado N°3

En los siguientes apartados se presentan los criterios adoptados para definir la sección transversal propuesta para el Túnel Lo Prado N°3.

La sección transversal se presenta en detalle en el plano 5.1.

5.1 Aspectos Generales

Bajo lo dispuesto por el manual de carreteras en su apartado 3.802.4, la sección transversal de un túnel debe tener como dimensiones mínimas las siguientes:

TABLA 5.1 DIMENSIONES MÍNIMAS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Parámetro	Dimensión Mínima
Gálibo Vertical	5 [m]
Ancho de pistas	3.5 a 4 [m] c/u
Bermas	0.5 [m] a c/lado
Aceras laterales	0.75 [m], salvo excepciones.
Pendiente transversal única	2%

Además, en los túneles con velocidad de proyecto mayor o igual a 100 [km/h], el ancho de las bermas deberá ser de 1,5 [m] pudiendo excepcionalmente reducirse a 1,0 [m]. [2]

Dado que la Ruta 68 es una autopista que cuenta con una velocidad de proyecto mayor a los 100 [km/h], el ancho de las bermas debiese ser como mínimo 1,0 [m], contando además el tema de las aceras laterales.

5.1.1 Túnel Lo Prado N°2

En el caso del Túnel Lo Prado N°2 no se cumple la reglamentación de las bermas completamente, dado el caso de la berma interior (berma sur), la cual mide 0.58 [m], por lo que la velocidad máxima de circulación es de 90 [km/h], además claro de la reglamentación propia de los túneles que reducen en 20 [km/h] la velocidad máxima con respecto a la de proyecto.

Así, este túnel, consta de las siguientes características:

TABLA 5.2 CARACTERÍSTICAS SECCIÓN TRANSVERSAL TÚNEL LO PRADO N°2

Parámetro	Dimensión
Gálibo Vertical	5 [m]
Ancho de pistas	3.5 [m]
Berma interior	0.58 [m]
Berma exterior	1.75 [m]
Aceras laterales	1.07 [m] ²
Pendiente transversal	2%

² Sólo en el lado norte, junto a la berma exterior.

Esto da que la sección tiene un ancho en calzada de 10,4 [m], considerando los elementos del estructurales del túnel, se tiene un ancho basal (B) de 11.26 [m]. Este valor es nominal, porque dependiendo de la sección se tienen unas diferencias no despreciables.

De esta forma, la sección se presenta en la figura 5.1, cuyo detalle se aprecia en el plano 5.1.

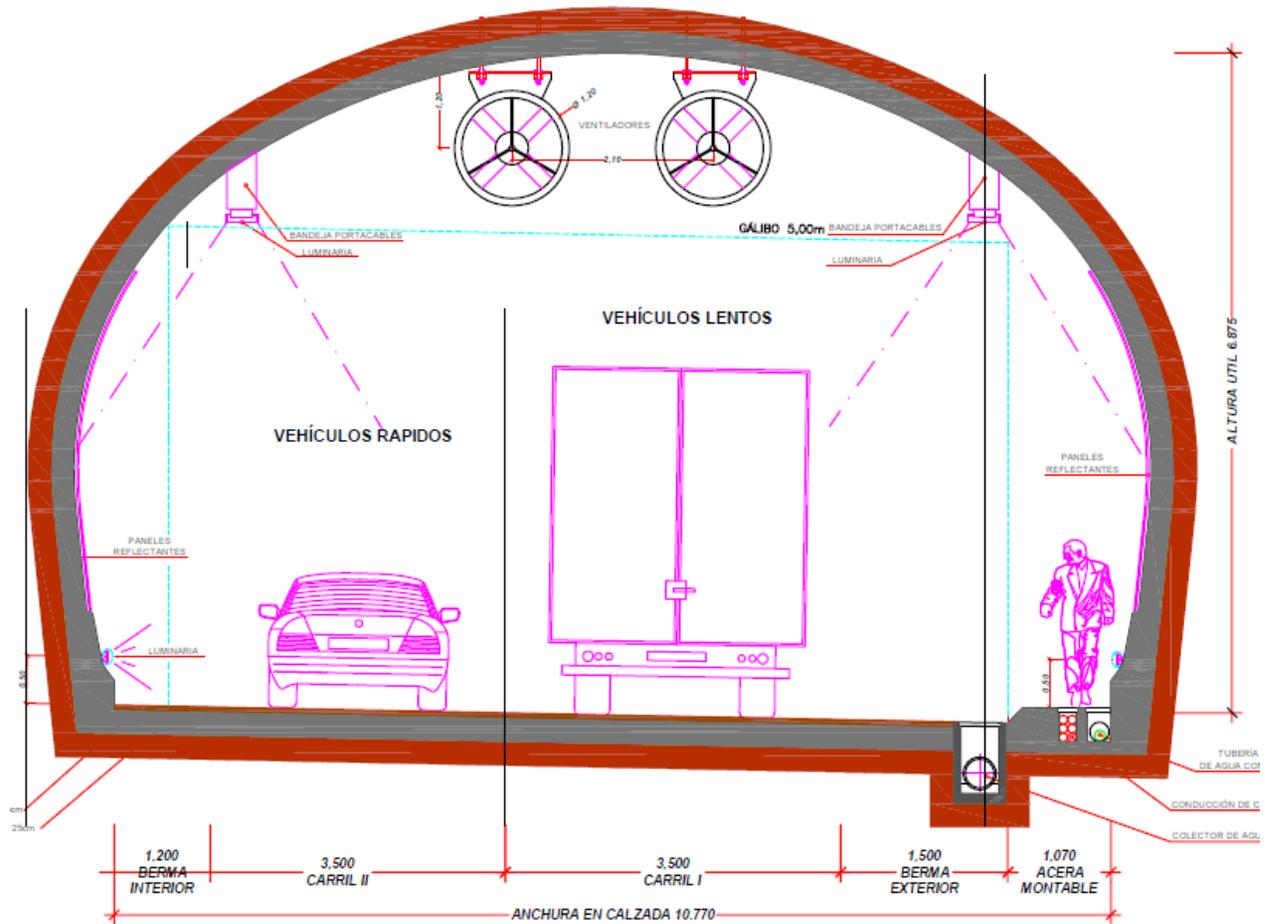


FIGURA 5.1 SECCIÓN TRANSVERSAL PROPUESTA

5.2 Diseño Sección Túnel Lo Prado N°3

Dados los antecedentes expuestos en el Capítulo N°4 Ingeniería Básica, se toma la decisión de buscar un diseño para la sección transversal que cumpla la normativa actual, sobre todo en el tema de las bermas, petición explícita de la Dirección de Concesiones, pero que permita extrapolar el Diseño Estructural de las secciones del túnel anterior.

Se asume arbitrariamente que al aumentar en el orden de un 5% el área de la sección anterior el diseño de las secciones debería mantener su validez estructural, y de variar, no debería ser tan significativo como para alterar en grandes términos la tributación de insumos, dígame volumen de hormigón proyectado, por ejemplo, por metro lineal de avance.

5.2.1 Metodología

La metodología escogida para la definición de la nueva sección apunta una forma que permita fácilmente encontrar una relación entre el ancho en pista y el área de excavación equivalente:

- Se revisa en detalle el ancho basal (B) de todas las secciones construidas en el Túnel Lo Prado N°2 y se calcula un promedio ponderado de este valor, en función de cuanto se utiliza dicha sección en el Túnel Lo Prado N°2. A este ancho se le denomina ancho promedio ponderado (B_{pp}).
- Se establece cual es la diferencia con respecto al ancho en calzada del Túnel (A_t), así se obtiene el valor de sobree ancho de la estructura sobre la calzada (S_{TB}).
- Dado que se conocen las áreas de excavación de las secciones, se procede a calcular los diámetros equivalentes (D_{eq}) de todas las secciones.
- Bajo la misma lógica que los anchos basales, se calcula el diámetro equivalente promedio ponderado (D_{eqpp}).
- Se calcula la diferencia promedio entre el diámetro equivalente promedio ponderado, denominado sobree ancho diámetro base (S_{DB}).
- Así, al escoger un ancho de pista arbitrario, al sumarle el sobree ancho de la estructura sobre la calzada se obtiene su ancho de excavación. Así, al sumar el sobree ancho diámetro base, se obtiene el diámetro equivalente de la sección. Con lo que se puede calcular el área de excavación de la sección.
- Con esto, se itera hasta encontrar un ancho de calzada que cumpla con los estándares del manual de carreteras y que esté dentro del rango del 5% de aumento de área de sección.

5.2.2 Resultados

Los parámetros de entrada de la iteración a partir del Túnel Lo Prado N°2 son los siguientes:

TABLA 5.3 PARÁMETROS DEL TÚNEL LO PRADO N°2

Parámetro	Magnitud [m]
Ancho promedio ponderado (B_{pp})	11.76
Ancho en calzada del Túnel (A_t),	10.40
Sobrecancho de la estructura sobre la calzada (S_{TB}).	1.63
Diámetro equivalente promedio ponderado (D_{eqpp}).	14.55
sobrecancho diámetro base (S_{DB})	2.79

A partir del proceso de iteración, se obtuvo que al definir el ancho en pista del Túnel Lo Prado N°3 en 10.77 [m] el aumento del área en sección con respecto a la sección promedio del Túnel Lo Prado N°2 es de un 5,1%.

Así, se utiliza este ancho en pista para definir la distribución en pista, que queda de la siguiente forma:

TABLA 5.4 CARACTERÍSTICAS TÚNEL LO PRADO N°3

Parámetro	Dimensión
Gálibo Vertical	5 [m]
Ancho de pistas	3.5 [m]
Berma interior	1.2 [m]
Berma exterior	1.5 [m]
Aceras laterales	1.07 [m] ³
Pendiente transversal	2%

Se decide mantener el tamaño de la acera lateral, distribuir mejor las bermas y hacer que ambas sean mayores a un metro. Lo ideal es que ambas fueran de 1.5 [m] de ancho, pero esto elevaría sobre un 10% de aumento del área, teniendo que sacrificar tamaño de la acera, lo cual no se recomienda, puesto que, al ser un túnel de una longitud considerable, necesita vía de escapes seguras a pie en caso de emergencia.

³ Sólo en el lado norte, junto a la berma exterior.

6 Elección del Corredor para el Túnel Lo Prado N°3

En los siguientes apartados se presentan los criterios definidos con los que se realiza la propuesta de corredor para ubicar un nuevo túnel vehicular en el sector de los túneles Lo Prado.

Los argumentos vertidos son a partir de los análisis realizados en el Capítulo N°4 Ingeniería Básica, basado principalmente en la experiencia de construcción del Túnel Lo Prado N°2.

El trazado de referencia de este corredor se presenta en el plano 6.1.

6.1 Metodología

El proceso para definir el corredor donde es factible ubicar el Túnel Lo Prado N°3, consiste en encontrar un sector donde los costos de realizarlo aseguren su factibilidad técnico-económica, bajo los alcances de un estudio preliminar.

Así, se busca definir un área que minimice los costos de su construcción asegurando una serviciabilidad requerida para los estándares de la autopista, siguiendo los estándares de seguridad definidos en la normativa existente.

Bajo lo definido en el apartado 4.3.1 del Capítulo N°4 Ingeniería Básica, las principales consideraciones para este análisis son:

- La calidad geotécnica del macizo rocoso.
- Presencia y orientación de las fallas en el trazado.
- Terrenos colindantes:
 - Geografía presente.
 - Construcciones aledañas.
- Distancia con túneles ya existentes.

Así, para escoger el corredor es necesario ver como ponderar estas variables, dado su nivel de importancia en el problema. Por lo que se define analizar cada una por separado, evaluar si existe incompatibilidad y concluir.

En el caso de existir una aparente incompatibilidad bajo un análisis diferente al realizado este trabajo, se establece la posibilidad de realizar algún sistema de puntuación para dirimir entre diferentes posibilidades.

6.2 Criterios de elección

Dados los elementos observados en el apartado 4.3.1. del Capítulo N°4 Ingeniería Básica, se establece que los elementos más complejos del problema de la ubicación son los siguientes:

- La presencia de fallas y su orientación con respecto al trazado.
- La geografía de la zona del portal poniente.
- Distancia con los demás túneles.
- El Centro de Estudios Nucleares Lo Aguirre.

La razón por la cual la calidad del macizo rocoso no juega un rol preponderante con respecto a la ubicación, es porque, en parámetros genéricos, existe una calidad de roca regular según el índice RMR. Además, sumado a los estudios realizados para la construcción del Túnel Lo Prado N°2, que describen con bastante precisión los litotipos presentes en el macizo rocoso, se poseen los datos en detalle de la construcción de este túnel, lo cual permite una extrapolación de datos con menos incertidumbre.

Es bajo este contexto, que se determina que el valor respecto a lo que es la excavación y construcción del eje vial del túnel tanto en un rango de 150 metros hacia el sur y norte del Túnel Lo Prado N°2.

6.3 Ubicación del corredor y el trazado

Bajo el supuesto que se quiere ubicar el nuevo túnel lo más cercano respecto a los otros dos, existen dos de los criterios que son en demasía condicionantes con respecto al resto. Estos son: la geografía en el portal poniente y la presencia de fallas.

La zona oriente del conjunto de los túneles es en demasía compleja, en el apartado 4.3.1 se detalla que realizar el nuevo túnel al sur de los túneles actuales hace mucho más compleja la construcción al salir hacia un sector con una abrupta pendiente que hace complejo un desarrollo y empalme suficiente de la autopista sin un movimiento de tierras de consideración, inclusive quizás sería necesario construir algún puente u obra similar.

A esto, se le suma el hecho que la distancia respecto al Túnel Lo Prado N°2 aumenta considerablemente, más de 150 metros en el tramo poniente, por lo que la extrapolación de datos pierde precisión.

Por lo cual, bajo este criterio, se asume que ubicar el nuevo túnel por el norte de los túneles actuales es una mejor opción.

La opción entre ambos túneles se descarta, puesto que en la misma salida del portal oriente se incumpliría la distancia mínima entre el eje de las vías señalada por el manual de carreteras, que en el caso de la sección propuesta sería del orden de 45 [m]. [2]

Con respecto a la presencia de fallas, se define que en el rango de aproximadamente 100 a 150 metros al norte del Túnel Lo Prado N°2 se pueden establecer trazados rectos o con curvas poco pronunciadas que eviten un gran número de fallas. En la cartografía (plano 4.4), las fallas se indican con el color violeta, así, se entiende que el objetivo es que los trazados eviten el mayor número de fallas posible y en el caso de que atravesen fallas, la orientación de este trazado forme el ángulo más cercano a 90 grados posible, en planta.

Con esto se define que en el rango de 100 a 150 metros al norte del portal oriente se recomienda ubicar el portal del Túnel Lo Prado N°3, en lo relativo al portal poniente, se establece que en el P.K. 24+200 de la ruta, alrededor de la cota 500 [msnm] es una zona óptima de salida. Esto porque en esta zona existe una zona con un rumbo de pendiente que permite una ubicación óptima del portal para que el eje se empalme de forma más fácil al camino existente.

Esto no deja de necesitar movimientos de tierra involucrados, sobre todo en el P.K. 24+400, donde existe un corte previo del cerro en la pista norte de la ruta. Ahora bien, de menor consideración a ubicar al túnel en el costado sur.

El rango de 150 metros de ubicación con respecto al Túnel Lo Prado N°2 es dado el Centro de Estudios Nucleares Lo Aguirre.

Por último, es necesario señalar que, si el nuevo túnel llega a ubicarse muy al norte con respecto a los actuales, los costos de las galerías de conexión crecerán bastante, por lo que se recomienda tener esto en consideración para definir el trazado en los estudios posteriores.

A modo de síntesis, la decisión con respecto a la ubicación del corredor se resume en los siguientes puntos: se tiene lo siguiente:

- La calidad de la roca, en términos de índice RMR, no representa un criterio preponderante al momento de ubicar el túnel, puesto que esta tiene un comportamiento relativamente uniforme en el desarrollo de la construcción del Túnel Lo Prado N°2.
- Es posible extrapolar este comportamiento en un rango de unos 200 metros hacia el norte y el sur, puesto que este es el rango de los estudios para el Túnel Lo Prado N°2, en términos de descripción de los litotipos.
 - Para aumentar el rango de extrapolación se recomienda hacer nuevos estudios, sobre todo en la zona más cercana al portal poniente, que es el costado con más grado de alteración fluvial.
- Dada la geografía del sector poniente de los túneles, se recomienda ubicar el Túnel Lo Prado N°3 en el costado sur, puesto que involucra movimientos de tierra sustancialmente menores para lograr un empalme con el estándar de la Ruta 68 dada su característica de autopista de alta velocidad.
- Para evitar la mayor cantidad de fallas posible, se establece que ubicar el túnel dentro de una franja ubicada de unos 100 a 150 metros al norte del Túnel Lo Prado N°2, en su portal oriente.
 - El portal poniente se recomienda ubicar en una zona de cota de 500 [msnm] a la altura de del PK 24+200 de la Ruta 68.
- Que la ubicación por el lado norte tiene un límite dado el Centro de Estudios Nucleares.
- El túnel nuevo no puede estar muy alejado de los anteriores por el aumento del costo de las galerías de acceso.

6.4 Trazado de Referencia

Para el diseño del trazado de referencia, se toman en consideración todos los elementos del apartado anterior y para simplificar el tema del diseño geométrico del trazado en planta, se decide diseñar con un trazado paralelo al inicio del trazado del Túnel Lo Prado N°2. La principal razón de escoger un trazado paralelo es que de esta forma se tiene un cruce perpendicular con las fallas del macizo rocoso en planta. Así, el trazado de referencia se ubica a unos 100 metros aproximadamente al norte de este túnel.

De esta forma, el trazado cruza 5 fallas. El portal poniente se ubica exactamente en la cota de 500 [msnm], como se sugiere en el apartado anterior.

El trazado de referencia se presenta en el plano 6.1, en este se presenta un empalme propuesto a la Ruta 68, que contaría con un rango de 1266 [m] en el sector oriente y de 572 [m] en el sector poniente.

Cabe destacar, que, bajo esta disposición, la propuesta de operación vial del conjunto de túneles sería que el Túnel Lo Prado N°3 fuese permanentemente en sentido hacia el poniente, es decir, Santiago hacia Valparaíso. El Túnel Lo Prado N°2 figuraría como reversible y el Túnel Lo Prado N°1 mantendría su sentido actual.

7 Diseño Geomecánico del Túnel Lo Prado N°3

En los siguientes apartados se presentan los trabajos realizados para la definición del diseño geomecánico del Túnel Lo Prado N°3 propuesto.

Los elementos de estudio tratados en el capítulo son los siguientes:

- Caracterización del macizo rocoso.
- Definición de sostenimientos y revestimientos.

7.1 Metodología

Dados los resultados de la Ingeniería Básica, en particular los mencionados en el apartado 4.3, se establece que, dentro del rango presentado en la cartografía, es posible extrapolar la calidad del macizo rocoso en función de los datos obtenidos en el Túnel Lo Prado N°2.

Es con esta base con la que se procede a realizar el diseño del Túnel Lo Prado N°3 para el trazado de referencia propuesto en el apartado 6.4 del Capítulo N°6 Elección del Corredor para el Túnel Lo Prado N°3.

Los pasos que se definen para realizar el diseño son los siguientes:

- Caracterización Geomecánica del Macizo Rocosos.
- División por tramos del Túnel Lo Prado N°2 en función de su calidad de roca.
- Identificación de los tramos equivalentes en el trazado propuesto para el Túnel Lo Prado N°3 a los tramos previamente definidos, con el fin de extrapolar los datos.
- Cuantificación de estas relaciones.
- Extrapolación de datos.
- Diseño de las secciones del Túnel Lo Prado N°3 para el trazado de referencia.

Cabe destacar, que las extrapolaciones de datos y las ponderaciones realizadas de esta sección amplían el nivel de incertidumbre con respecto al diseño, lo cual se reduce al realizar estudios para verificar dichos supuestos. Ahora bien, dado el alcance de este trabajo, se establece que esto es para tener una noción de los costos del túnel. Para estudios posteriores se hace de suma importancia verificar estos supuestos de una manera más precisa.

Por otro lado, los costos de la obra no sólo vienen dados por los elementos mencionados, pero en base al criterio profesional y construcciones de túneles similares, se asume que el costo de estos elementos representa un porcentaje representativo de la obra total, por lo que se toma como indicador principal.

Dicho porcentaje se estima en base a los costos de túneles similares, lo cual es detallado en el apartado correspondiente del Capítulo N°8 Costos y Plazos.

Finalmente destacar que todos los resultados en este capítulo responden al trazado de referencia utilizado para facilitar los cálculos, no representan en absoluto las distancias definitivas de las diferentes secciones del Túnel Lo Prado N°3.

7.2 Caracterización del macizo rocoso

Para la determinación de las principales propiedades geomecánicas del trazado de referencia del corredor propuesto para el Túnel Lo Prado N°3, se decide extrapolar las características geomecánicas del Túnel Lo Prado N°2, esto en base a lo señalado en el apartado 4.3.3 del Capítulo N°4 Ingeniería Básica.

La determinación de las propiedades del macizo rocoso se teniendo como base el índice RMR de Bieniawski del trazado del Túnel Lo Prado N°2. Los fundamentos de este índice y los criterios de diseño son descritos en el apartado 2.1.3 del Capítulo N°2 Marco Teórico. Los datos con los que se cuenta son descritos en el apartado 4.2 del Capítulo N°4 Ingeniería Básica. En resumen, estos son:

- Las diferentes unidades sublitológicas presentes en el macizo rocoso y su distribución tanto en vista en planta como en perfil longitudinal del trazado del Túnel Lo Prado N°2.
- Los índices RMR de la calidad de la roca proyectadas y las obtenidas en la construcción, asociadas, al diseño estructural respectivo del túnel.
- Las longitudes de las diferentes unidades, tanto en planta como de perfil longitudinal.
- Planos detallados con esta información, que corresponden a los planos 4.2 y 4.3.

Con estos datos que define un criterio de extrapolación de datos, la cual se describe en el siguiente apartado.

7.2.1 Metodología

El supuesto base para la extrapolación de los datos sobre la calidad del macizo rocoso es: la cercanía con el Túnel Lo Prado N°2 y la continuidad de los litotipos, por lo que se asume que el material extraído en este túnel debiese ser similar a lo que se extraiga en el trazado de referencia para el Túnel Lo Prado N°3, siguiendo la línea de los litotipos en planta.

Entonces, dado que se tiene la información de cómo se comportan en planta los litotipos, se asume que debajo de estos hay litotipos similares y con calidades de roca similares.

Ahora, el primer problema que surge es que los tramos construidos en el Túnel Lo Prado N°2 no son del largo exacto de estos litotipos en planta, mas, algunos tramos tocan más de uno. Además, la calidad de la roca está indexada por tramo construido, por lo que se traduce extrapolar de alguna forma estos tramos hacia el trazado propuesto para la nueva obra.

Dado que el fin es tener una aproximación y no una medición exacta, se procede a extrapolar por estos tramos, ponderando todos los tramos construidos por alguna relación establecida por el largo de los litotipos en planta en ambos trazados.

En resumen, para la extrapolación de los datos del Túnel Lo Prado N°2, se establece el siguiente procedimiento:

- Se define como origen el trazado en planta del Túnel Lo Prado N°2.
- Se identifican los litotipos que tienen expresión en ambos trazados en planta y se relacionan entre sí, teniendo como origen de datos a los del túnel N°2.
 - En algunos casos más de un tramo del trazado propuesto tienen origen en un solo trazado del segundo túnel.
- Se identifican los litotipos que no tienen expresión en el trazado del nuevo túnel.

Con estos resultados, se necesita definir una relación entre estos tramos. Se define una razón de proporción simple en base a su longitud en planta. Así:

- Se calculan los largos de los tramos con litotipos presentes en ambos túneles.
- Se calcula la proporción entre estos tramos.
 - En el caso de que más de un tramo del trazado propuesto para el tercer túnel tenga origen en un único tramo del segundo, se suman.
 - A esta proporción se le denomina factor de participación, con la idea de establecer cuánto “participa” el tramo del Túnel Lo Prado N°2 en el Túnel lo Prado N°3.

Con estas proporciones por tramo, se proceden a ponderar todos los tramos construidos bajo estos litotipos.

- Se multiplican los tramos construidos por los factores de proporcionalidad correspondiente a su litotipo en planta, a excepción de los tramos que se encuentren en uno más litotipos.
- Estos tramos se dividen en tramos suficientes para completar cada litotipo en su tramo correspondiente en el tramo de llegada.

Además, cabe destacar que los tramos en planta del Túnel Lo Prado N°2 para los cálculos se ponderan por un factor de disminución (menor a 1) correspondiente a la diferencia entre los largos en planta y la suma de los largos construidos totales.

En los siguientes apartados se presentan las expresiones matemáticas adoptadas para seguir el procedimiento definido.

7.2.1.1 Factor de Corrección

Dado que los largos de la suma de los tramos construidos y el del trazado en planta del Túnel Lo Prado N°2 de la cartografía difieren cerca de un 3%, se corrige por este factor todos los trazados en planta levantados para los cálculos. Este cálculo se hace con los largos totales del túnel, dado que es relativamente bajo con respecto al largo total.

$$f_1 = \frac{\sum TL_{TLP2_i}}{\sum TP_{TLP2_i}} \quad (24)$$

$$TP'_{TLP2_i} = f_1 \cdot TL_{TLP2_i} \quad (25)$$

Donde:

- f_1 : representa el factor de corrección entre los largos en planta y los largos construidos.
- $\sum TL_{TLP2_i}$: representa la suma de los tramos construidos del túnel, que a su vez representa el largo del túnel medido y oficial.
- $\sum TP_{TLP2_i}$: representa la suma de los tramos medidos del túnel en la cartografía en planta. Esta es según el proyecto, la cual difiere con el oficial en algunos metros.
- TP'_{TLP2_i} : representa los tramos en planta corregidos.

7.2.1.2 Factor de Participación

El factor de participación es el término que se define para nombrar la relación que tienen los litotipos según la cartografía en planta. Es por este factor que se ponderan los largos de los tramos construidos para poder exportar sus características y por ende su índice RMR. La expresión se define de la siguiente forma:

$$FP_i = \left(\frac{\sum TP_{TLP3}}{TP'_{TLP2}} \right)_i \quad (26)$$

Donde:

- FP_i : corresponde al factor de participación del tramo i.
- $\sum TP_{TLP3_i}$: corresponde a los tramos del trazado del Túnel Lo Prado N°3 que están asociados a un tramo del Túnel Lo Prado N°2.
- TP'_{TLP2_i} : corresponde al largo del tramo en planta modificado de un litotipo en el trazado del Túnel Lo Prado N°2.

7.2.1.3 Relación entre tramos

Relación entre largo del túnel lo Prado 3 y túnel lo Prado 2:

$$TL_{TLP3_i} = TL_{TLP2_i} \cdot FP_i \quad (27)$$

Donde:

- TL_{TLP3_i} : Representa el largo de un tramo del trazado en su perfil longitudinal del Túnel Lo Prado N°3.
- TL_{TLP2_i} : Representa el largo de un tramo del trazado en su perfil longitudinal del Túnel Lo Prado N°2.
- FP_i : es el Factor de Participación de dicho tramo.

7.2.1.4 Caso de tramos divididos

En el caso de tener tramos divididos, se calcula el porcentaje necesario del tramo que está en el límite para que se reparta en el tramo anterior y futuro para tener divisiones justo en los litotipos en planta.

7.2.2 Resultados

De esta forma, los tramos identificados en el trazado del Túnel Lo Prado N°2 en planta (plano 6.1), son los siguientes:

TABLA 7.1 TRAMOS DEL TÚNEL LO PRADO N°2 SEGÚN LITOTIPO EN PLANTA

Tramo	TP_{TLP2} [m]	Litotipo
1	355	KLP1
2	107	KIP4
3	15	Qal
4	11	KLP2
5	385	KLP1
6	30	KLP2
7	323	KLP1
8	80	KLP2
9	115	KLP3
10	98	KLP2
11	205	KLP1
12	52	klp2
13	45	KLP1
14	40	KLP4
15	33	KLP2
16	237	KLP1
17	45	KLP2
18	240	KLP1
19	120	Qco
20	45	Qal
21	117	KLP1'
22	70	Qco
Total	2768	

Tanto en la tabla 7.1 como en la 7.2 los tramos se ordenan de oriente a poniente, siendo el tramo 1 el más cercano al portal oriente.

Los tramos identificados en el trazado de referencia propuesto para el Túnel Lo Prado N°3 se presentan en la tabla 7.2.

TABLA 7.2 TRAMOS TÚNEL LO PRADO N°3 SEGÚN LITOTIPO EN PLANTA

Tramo	TP_{TLP3} [m]	Litotipo	Tramo asociado al TLP N°1
1	109	KLP1	1
2	408	KLP1	1
3	150	KLP4	2
4	114	KLP2	4
5	261	KLP1	5
6	30	KLP2	6
7	49	KLP1	7
8	310	KLP1	7
9	85	KLP2	8
10	103	KLP3	9
11	108	KLP2	10
12	105	KLP1	11
13	15	KLP2	11
14	74	KLP1	11
15	30	KLP2	12
16	95	KLP1	13
17	29	KLP4	14
18	54	KLP2	15
19	335	KLP1	16
20	88	KLP1	18
21	30	QCO	19
22	16	Qal	20
23	84	QCo	21
24	223	Qco	22
25	163	Qco	22

Los únicos tramos en planta del trazado del Túnel Lo Prado N°2 que no tienen expresión aparente en el tercer túnel son los n°3 y n°17.

Aplicando las fórmulas descritas en el apartado 7.2.1 de este capítulo, se tiene que los factores de participación son los siguientes:

TABLA 7.3 FACTORES DE PARTICIPACIÓN SEGÚN TRAMO DEL TÚNEL LO PRADO N°2

TP_{TLP2}	F.P.
1	1.50
2	1.44
3	0.00
4	10.65
5	0.70
6	1.04
7	1.14
8	1.10
9	0.92
10	1.14
11	0.97
12	0.59
13	2.16
14	0.74
15	1.67
16	1.46
17	0.00
18	0.38
19	0.26
20	0.37
21	0.74
22	5.69

Así, los Factores de Participación para cada tramo de construcción están determinados. Aplicando estos factores de participación a los largos de las secciones construidas del Túnel Lo Prado N°2, tabla 12.1, se tienen los siguientes tramos de diseño para el nuevo túnel.

Los tramos construidos que quedan bajo dos tramos en planta son divididos según el criterio señalado en el subapartado 7.2.1.4 de la metodología. El detalle de esta división se inserta en el Anexo A.3.1.

TABLA 7.4 TRAMOS PONDERADOS SEGÚN ÍNDICE RMR PARA EL TÚNEL LO PRADO N°3

Tramo	Longitud [m]	RMR promedio	Litotipos presentes
1	30	43	KLP1
2	86	46	KLP1, KLP3
3	6	44	KLP3
4	5	41	KLP3
5	10	41	KLP3
6	58	43	KLP3
7	41	43	KLP1, KLP3
8	72	45	G
9	20	48	KLP1
10	11	55	KLP1
11	23	41	KLP1
12	27	43	KLP1
13	38	44	KLP1
14	38	49	KLP1
15	22	49	KLP1, G
16	11	46	KLP1, G
17	20	43	KLP1, KLP2, G
18	40	43	KLP1, KLP2, G
19	29	44	KLP2
20	4	47	KLP2
21	77	51	KLP1, KLP2
22	114	51	KLP1, KLP2
23	33	51	KLP1, KLP2
24	13	53	KLP1
25	17	56	KLP1
26	8	48	KLP1
27	5	56	KLP1
28	29	52	KLP1
29	5	41	KLP1
30	21	44	KLP1
31	5	48	KLP1
32	14	42	KLP1
33	10	43	KLP1
34	4	49	KLP1
35	73	49	KLP1
36	25	45	KLP1, KLP2, KLP3
37	30	45	KLP1, KLP2, KLP3
38	137	45	KLP1, KLP2, KLP3
39	222	50	KLP1, KLP2

40	7	50	KLP1, KLP2
41	78	52	KLP1', KLP2
42	39	52	KLP1', KLP2
43	12	46	KLP1, KLP1', KLP2, G
44	52	49	KLP1', G
45	24	49	KLP1', G
46	84	50	KLP1, KLP2
47	129	50	KLP1, KLP2
48	65	52	KLP1, G
49	2	52	KLP1, G
50	28	50	KLP1, G
51	95	50	KLP1, G
52	17	50	KLP1, G
53	2	50	KLP1
54	9	44	KLP1, G
55	11	44	KLP1, G
56	42	44	KLP1
57	55	44	KLP1
58	25	44	Falla
59	121	51	KLP1
60	110	56	KLP1
61	24	42	KLP1'
62	20	44	G
63	11	44	KLP1'
64	13	44	KLP1
65	13	52	KLP1
66	31	52	KLP1
67	5	52	KLP1
68	25	47	KLP1
69	16	47	KLP1
70	20	47	KLP1
71	25	45	KLP1', G
72	7	43	KLP1
73	32	51	KLP1
74	156	51	KLP1'
75	60	52	KLP1'
76	74	48	KLP1'
77	96	48	KLP1'

Así, se diseña el túnel, además de la altura de la clave, considerando que los litotipos presentes se presentarán con un largo del siguiente orden:

TABLA 7.5 LARGO ESTIMADO DE LOS LITOTIPOS EN EL TRAZADO PROPUESTO DEL TÚNEL LO PRADO N°3

Litotipo	Largo aproximado [m]
G	320
KLP1	1500
KLP1'	550
KLP2	500
KLP3	200
KLP4	0.0

Además, se calculan los índice RMR en promedio según litologías y sus respectivos desarrollos esperados. Así, se tienen que, en promedio, los índices de calidad para las litologías en el trazado propuesto deberían ser del siguiente orden:

TABLA 7.6: RMR PROMEDIO POR LITOTIPO EN TRAZADO PROPUESTO

Litotipo	RMR mínimo	RMR máximo	RMR ponderado
G	44	46	47
KLP1	41	56	48
KLP1'	42	52	47
KLP2	44	52	49
KLP3	41	46	44

Se adjuntan, los RMR máximos y mínimos para cada litología, a modo de referencia.

7.2.2.1 Conclusiones

El índice RMR no presenta grandes variaciones por litotipos, esto es esperable, dado que en los datos obtenidos de la construcción del Túnel Lo Prado N°2 se tenía este comportamiento y dada la relativa continuidad de sus litotipos en planta, no debía esperarse una gran diferencia en este comportamiento.

Esto genera que el diseño del sostenimiento esté determinado por la presencia de fallas y la altura del recubrimiento.

La distribución de la altura del recubrimiento del trazado propuesto es similar a la del túnel anterior, por lo que es posible exportar el diseño en función de los tramos establecidos para exportar la calidad del índice RMR sin pérdida de generalidad, esto bajo el entendido de los alcances de este trabajo.

7.2.3 Definición de Sostenimientos y Revestimientos

Bajo lo establecido en el Capítulo N°5 Sección Transversal del Túnel Lo Prado N°3, dado que el aumento de la sección inducido por el aumento de las bermas, detallado en el capítulo de la definición funcional del túnel, es del orden de un 5%, se considera que el diseño estructural del túnel lo prado N°2 es válido para realizar una buena estimación de costos y plazos para el trazado propuesto para el Túnel Lo Prado N°3, respetando el aumento proporcional en la sección.

Como se menciona en el apartado 4.2.7 del Capítulo N°4 de Ingeniería Básica, las secciones diseñadas para el Túnel Lo Prado N°2 fueron las siguientes:

TABLA 7.7 SECCIONES DISEÑADAS EN EL TÚNEL LO PRADO N°2

Sección	Litotipo	RMR Promedio	Q	Recubrimiento [m]
I	KLP1	57	4.2	0 – 250
	G	62	7.4	0 – 250
	KLP4	56	3.8	0 – 150
II	KLP1	57	4.2	250 – 450
	KLP3	63	8.3	0 – 450
	KLP2	50	1.9	0 – 250
III	KLP1	57	4.2	>400
	G	62	7.4	>250
IV	KLP2	50	1.9	250 - 400
V	KLP2	50	1.9	400 – 550
VI	FALLA	38	0.5	0 – 100
	KLP1'	38	0.5	0 – 100
VII	FALLA	38	0.5	>100
VIII	KLP1'	38	0.5	>100
IX	KLP1'	57	4.2	>50

Finalmente, con algunas modificaciones de diseño, se construyeron las secciones I, II, III, IV y IX, en la siguiente distribución de largos. Estas decisiones fueron por la calidad del macizo rocoso obtenidos, los litotipos obtenidos, el monitoreo en terreno de la deformación, entre otras razones. El detalle del diseño de las secciones se presenta en la tabla 7.8.

TABLA 7.8 DETALLE SECCIONES DISEÑADAS PARA EL TRAZADO DEL TÚNEL LO PRADO N°3

Sección Tipo	Sellado [cm]	Marco		Pernos de Anclaje			HP-25 [cm]
		Tipo	Espaciado	Tipo	T [m]	L [m]	
I	3	-	-	φ 25	1.5	2	5
II	3	-	-	φ 25	1.5	2	10
III	3	-	-	φ 25	1.5	1.5	15
IV	3	-	-	φ 25	1.5	1.5	10+10
IX	3	THN-29	1	φ 25			15

El sellado se realiza con hormigón proyectado, los pernos de anclaje varían de 3 a 3,5 [m].

Tal y como se menciona en el apartado 4.2.7 del Capítulo N°4 Ingeniería Básica, en algunos tramos se hicieron modificaciones de consideración, como a la sección III añadirle marcos metálicos THN-29.

Así, las secciones construidas en el Túnel Lo Prado N°2 fueron finalmente las siguientes:

TABLA 7.9 SECCIONES CONSTRUIDAS EN TÚNEL LO PRADO N°2

Sección	Longitud [m]
I	157
II	1037
III	914
III (Th)	505
IV	28
IX	44
Túnel Falso	17
Total	2701

Para el diseño del Túnel Lo Prado N°3 sólo se consideran las secciones I, II, III, IV y IX en el análisis. La sección III (Th), que refiere a la sección III con marcos THN-29 se considera sólo como III para la estimación general, aunque para la estimación de costos se tiene en cuenta la longitud que presenta estos marcos. El túnel falso se considera como sección IX puesto a no contar con una estimación precisa de cuanto sería el desarrollo de este túnel para el trazado de referencia propuesto.

De esta forma la extrapolación, de secciones desarrolla los siguientes largos totales en el trazado propuesto para el tercer túnel es la siguiente:

TABLA 7.10 RESUMEN LARGO TOTAL SECCIONES EN TRAZADO PROPUESTO CON MARCOS THN-29

Sección	Distancia acumulada [m]
I	250
II	1030
III	840
III (Th)	650
IV	40
IX	260
Total	3070

Y, sin considerar la sección III con marcos THN-29, la distancia acumulada de las secciones propuestas es:

TABLA 7.11 RESUMEN LARGO TOTAL SECCIONES EN TRAZADO PROPUESTO SIN MARCOS THN-29

Sección	Distancia acumulada
I	250
II	1030
III	1490
IV	40
IX	260
Total	3070

Estos valores corresponden a aproximaciones del diseño elaborado para el trazado de referencia, dados los alcances de este trabajo, se consideran como parámetros de referencia de los largos que tendrá el futuro túnel, el detalle de los largos y secciones asociadas a esta estimación se presentan en el anexo A.3.2.

Para analizar escenarios desfavorables respecto al diseño, se considera ponderar el cálculo del monto del costo total asociada a la cubicación de esta sección, por sobre el cálculo de rangos para este diseño, dado los alcances de este trabajo.

8 Costos y Tiempos de Construcción

En los siguientes apartados se presentan los criterios adoptados para realizar la estimación de costos y plazos de construcción del diseño geomecánico del proyecto, detallado en el Capítulo N°7 Diseño Geomecánico del Túnel Lo Prado N°3, para el trazado de referencia propuesto.

8.1 Metodología

Para estimar los costos del diseño propuesto en el Capítulo N°7 Diseño Geomecánico del Túnel Lo Prado N°3, se realiza un levantamiento de los presupuestos de proyectos de túneles similares.

Los proyectos analizados son los siguientes:

- Túnel Lo Prado N°2.
- Túnel Zapata N°2.
- Túnel El Melón II.
- Túnel Chamisero II.

La razón de la elección de estos túneles es porque atraviesan litotipos similares, principalmente andesitas y granitos; dos son del proyecto original del cual se basa este trabajo, los túneles Zapata N°2 y Lo Prado N°2, y los otros dos son túneles recientes, el Chamisero II inaugurado el 2017 y el Melón II en plena construcción, presentan valores ajustados a la fecha de la redacción de este documento. Además, los cuatro túneles son relativamente largos, superiores a 1,2 [km] de longitud.

En este análisis, se establece como ítems principales a analizar a los relativos a la excavación del túnel y su construcción. Así, se focaliza el análisis en los siguientes elementos:

- El volumen excavado para la construcción del túnel.
- El hormigón proyectado para la construcción del sellado, sostenimiento y revestimiento de las diferentes secciones.
- Pernos de anclajes y marcos THN-29.

Esto, dado que son elementos que son fácil de relacionar al largo del desarrollo de cada sección de diseño del túnel. Sin embargo, es necesario conocer cuál es su porcentaje de costo relativo con respecto al total del proyecto de la construcción de un túnel. Entiéndase como todo el proyecto a la suma de: construcción de los portales, movimiento de tierras, construcción de accesos viales, galerías de conexión, sistemas de iluminación y ventilación, entre otras obras.

8.2 Resultados

En los siguientes apartados se presentan los resúmenes de los presupuestos utilizados, la definición de precios unitarios y el cálculo aproximado del costo del Túnel Lo Prado N°3.

8.2.1 Datos Utilizados

Con respecto al Túnel Lo Prado N°2 y el Túnel Zapata N°2, se utilizan los presupuestos de licitación presentados por las diferentes concesionarias al momento de postular. Estas son:

- Rutas del Pacífico S.A.
- Ecorutas.
- Cicasa.
- Autopista de Peaje.
- Tribasa.

Detallándose los presupuestos de los siguientes ítems:

- Excavación del túnel.
- Obras de sostenimiento.
- Obras de revestimiento.
- Pavimento de hormigón.
- Sistema de iluminación.

Sólo en el caso de la excavación del túnel se tienen los precios unitarios en U.F por metro cúbico excavado [U.F./m³].

En el caso del Túnel El Melón II se cuenta con el presupuesto general del proyecto, elaborado por R&Q Ingeniería. Respecto al Túnel Chamisero II, se cuenta con el informe de avance final. En este se especifican los precios unitarios de todos los elementos de la construcción del túnel, estados de avance y costos por ítems.

Es en base a todos estos datos, que se estima que las obras asociadas a excavación y estructuración del túnel van del orden del 55% del proyecto. Además, dentro de estos dos ítems, los elementos más costosos son: el volumen de excavación, el hormigón proyectado, los marcos de acero y los pernos de anclaje.

En la tabla 8.1 se presenta la fuente de los parámetros para estimar el costo del Túnel Lo Prado N°3. Los ítems “movimiento de tierras (total)” y “estructuración túnel (total)” refieren a todo el costo asociado a esas etapas en ambos túneles, la excavación es sólo un ítem dentro del movimiento de tierras, al igual que el hormigón proyectado, marcos y pernos son algunos de la estructuración.

En la tabla 8.2 se presentan el área de la sección y la longitud de los túneles estudiados, a modo de tener una noción de comparación entre los diferentes proyectos.

TABLA 8.1 FUENTES DE LOS PARÁMETROS PARA ESTIMAR EL COSTO DE LOS TÚNELES

Ítems	Túneles
Movimiento de Tierras (Total)	Chamisero II y Melón II
Volumen excavado	Zapata N°2, Lo Prado N°2, Chamisero II y Melón II
Estructuración Túnel (Total)	Zapata N°2, Lo Prado N°2, Chamisero II y Melón II
Sellado	Chamisero II
Sostenimiento	Chamisero II
Revestimiento	Chamisero II
Solera	Chamisero II
Marcos THN29	Chamisero II
Pernos de anclaje	Chamisero II

TABLA 8.2 PARÁMETROS GENERALES TÚNELES ESTUDIADOS

Túnel	Largo [m]	Sección [m ²]
Túnel Lo Prado N°2	2886	83.11
Túnel Zapata N°2	1280	84.95
Túnel Chamisero II	1583	61.40
Túnel el Melón II	2796	88.01 ⁴
Túnel Lo Prado N°3	3067	87.39

Como se menciona anteriormente, en el caso del Túnel Lo Prado N°2 y el Zapata N°2 se tienen varios datos con respecto a la excavación, así que en base a todos esos valores más los del Chamisero y el Melón dos se procede a calcular un valor unitario para la excavación del túnel a través del cálculo de la media de estos datos, esto se presenta en la tabla 8.3 y la tabla 8.4. En la tabla 8.5 se presentan los valores para los elementos estructurales.

⁴ Este valor es una estimación, dado que el túnel presenta sección variable.

TABLA 8.3 PRECIO UNITARIO DE LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL

Concesionaria	Obra	Precio Unitario [UF/m ³]	Notas
Rutas del Pacífico	Túnel Lo Prado N°2	2.080	Licitación
EcoRutas	Túnel Lo Prado N°2	1.029	Licitación
Cicasa	Túnel Lo Prado N°2	2.077	Licitación
Autopista de Peaje	Túnel Lo Prado N°2	1.685	Licitación
Tribasa	Túnel Lo Prado N°2	1.500	Licitación
Rutas del Pacífico	Túnel Zapata N°2	2.286	Licitación
EcoRutas	Túnel Zapata N°2	1.166	Licitación
Cicasa	Túnel Zapata N°2	1.620	Licitación
Autopista de Peaje	Túnel Zapata N°2	1.309	Licitación
Tribasa	Túnel Zapata N°2	1.344	Licitación
Autopista Nororiente	Túnel Chamisero II	1.100	Informe Cierre
Túnel el Melón	Túnel el Melón	3.496	Informe Avance

Dado que el valor del Túnel el Melón escapa demasiado del resto, no se considera en el valor promedio presentado en la tabla 8.4.

TABLA 8.4 PRECIO UNITARIO EXCAVACIÓN

Parámetro	Magnitud
Promedio Excavación	1.563 [UF/m ³]

TABLA 8.5 PRECIO UNITARIO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Ítem	Unidad de medida	Precio Unitario
H-25 Proyectoado en Sellado	[UF/m ³]	21.94
H-25 Proyectoado Sostenimiento	[UF/m ³]	21.94
H-25 Proyectoado en revestimiento	[UF/m ³]	21.94
H-15 en masa en solera	[UF/m ³]	21.94
Pernos de anclaje	[UF/ud]	3.50
Marcos THN-29	[UF/kg]	0.107

8.3 Cubicación

En este apartado se presentan los abonos de las diferentes secciones diseñadas para el trazado de referencia del Túnel Lo Prado N°3 y la ponderación por los precios unitarios definidos en el apartado anterior. El desarrollo de las diferentes secciones es el siguiente:

TABLA 8.6 DISTANCIA ACUMULADA PARA CADA SECCIÓN

Sección	Distancia acumulada [m]
I	245
II	1030
III	1487 (651)
IV	42
IX	260
Total	3067

Se señala entre paréntesis en la sección III que existen 650 [m] aproximadamente de esta sección que contarán con marcos THN-29 en su diseño. Estas distancias son una referencia para calcular los costos, en base a un trazado particular diseñado para facilitar el cálculo, para futuros estudios considerar estos valores como un punto de referencia.

8.3.1 Abono por sección

Los abonos se obtienen directamente del proyecto del Túnel Lo Prado N°2, presentes en los planos 4.5 a 4.9 respectivamente. Los valores mencionados en estos planos son aumentados en un 5%, dado el aumento de la sección en este porcentaje. Si bien esto tiene una pérdida de precisión, al ser relativamente pequeño en consideración a los valores totales, se considera aceptable.

Así, el abono corresponde a lo presentado en los planos y el abono ponderado corresponde al valor aumentado, además en el caso del hormigón proyectado, se presenta en metros cúbicos por metro lineal, no en metros cuadrados, de ahí su drástica disminución.

TABLA 8.7 ABONO SECCIÓN I, TÚNEL LO PRADO N°3

Sección	Tipo de Abono	Magnitud	Abono	Abono ponderado	Unidad de medida
I	Excavación	-	81.34	85.5	[m ³ /ml]
	H-25 Proyectado en Sellado	3 cm	25.42	0.8	[m ³ /ml]
	H-25 Proyectado Sostenimiento	5 cm	25.31	1.3	[m ³ /ml]
	Pernos de anclaje	-	6.5	6.8	[Uds/ml]
	H-25 Proyectado en revestimiento	10 cm	21.01	2.2	[m ³ /ml]
	H-15 en masa en solera	-	2.72	2.9	[m ³ /ml]

TABLA 8.8 ABONO SECCIÓN II, TÚNEL LO PRADO N°3

Sección	Tipo de Abono	Magnitud	Abono	Abono ponderado	Unidad de medida
II	Excavación	-	82.51	86.7	[m ³ /ml]
	H-25 Proyectado en sellado	3 cm	25.59	0.8	[m ³ /ml]
	H-25 Proyectado Sostenimiento	10 cm	25.49	2.7	[m ³ /ml]
	Pernos de anclaje	-	6.5	6.8	[Uds/ml]
	H-25 Proyectado en revestimiento	10 cm	21.01	2.2	[m ³ /ml]
	H-15 en masa en solera	-	2.72	2.9	[m ³ /ml]

TABLA 8.9 ABONO SECCIÓN III, TÚNEL LO PRADO N°3

Sección	Tipo de Abono	Magnitud	Abono	Abono ponderado	Unidad de medida
III	Excavación	-	83.67	87.9	[m ³ /ml]
	H-25 Proyectado en sellado	3 cm	25.78	0.8	[m ³ /ml]
	H-25 Proyectado Sostenimiento	15 cm	25.67	4.0	[m ³ /ml]
	Pernos de anclaje	-	8.7	9.1	[Uds/ml]
	H-25 Proyectado en revestimiento	10 cm	21.01	2.2	[m ³ /ml]
	H-15 en masa en solera	-	2.72	2.9	[m ³ /ml]

TABLA 8.10 ABONO SECCIÓN IV, TÚNEL LO PRADO N°3

Sección	Tipo de Abono	Magnitud	Abono	Abono ponderado	Unidad de medida
IV	Excavación	-	84.85	89.2	[m ³ /ml]
	H-25 Proyectado en sellado	3 cm	25.95	0.8	[m ³ /ml]
	H-25 Proyectado Sostenimiento (1a Capa)	10 cm	25.85	2.7	[m ³ /ml]
	H-25 Proyectado Sostenimiento (2a Capa)	10 cm	25.49	2.7	[m ³ /ml]
	Pernos de anclaje	-	8.7	9.1	[Uds/ml]
	H-25 Proyectado en revestimiento	10 cm	21.01	2.2	[m ³ /ml]
	H-15 en masa en solera	-	2.72	2.9	[m ³ /ml]

TABLA 8.11 ABONO SECCIÓN IX, TÚNEL LO PRADO N°3

Sección	Tipo de Abono	Magnitud	Abono	Abono ponderado	Unidad de medida
IX	Excavación	-	83.67	87.9	[m ³ /ml]
	H-25 Proyectado en sellado	3 cm	25.78	27.1	[m ³ /ml]
	H-25 Proyectado Sostenimiento	15 cm	25.67	27.0	[m ³ /ml]
	Marcos THN-29	-	690.2	725.4	[Kg/ml]
	Pernos de anclaje	-	7	7.4	[Uds/ml]
	H-25 Proyectado en revestimiento	10 cm	21.01	22.1	[m ³ /ml]
	H-15 en masa en solera	-	2.72	2.9	[m ³ /ml]

8.4 Costo estimado del Túnel Lo Prado N°3

Ponderando los precios unitarios por el aporte de cada sección, se tiene que los precios para cada elemento en el trazado de referencia propuesto para el Túnel Lo Prado N°3 son:

TABLA 8.12 COSTOS DE ÍTEMS REPRESENTATIVOS DEL TÚNEL LO PRADO N°3

Totales	Unidad de Medida	Cantidad	Precio unitario	Unidad	Precio [U.F.]
Excavación	[m ³]	267854	1.750	[UF/m ³]	418712
HP-25 Sellado	[m ³]	9330	21.94	[UF/m ³]	204707
HP-25 Sostenimiento	[m ³]	16364	21.94	[UF/m ³]	359022
HP-25 Revestimiento	[m ³]	11948	21.94	[UF/m ³]	262146
H-15 Masa solera	[m ³]	8766	21.94	[UF/m ³]	192332
Pernos de anclaje	[Uds]	24622	3.50	[UF/Uds]	86179
Marcos THN-29	[Kg]	661202	0.107	[UF/kg]	70749
Total					1593845

Así, bajo el supuesto que esto representan del orden de un 55% del total del proyecto, se presenta el costo total proyectado en la tabla 8.13.

TABLA 8.13 EXTRAPOLACIÓN DEL COSTO TOTAL DEL TÚNEL LO PRADO N°3

Indicador	Precio [U.F.]
Costo 55%	1593845
Costo total	2897901

Con esto, se concluye que el monto de inversión estimado del proyecto del Túnel Lo Prado N°3 es del rango de 3 millones de Unidades de Fomento. La extrapolación considera todo lo relativo a lo que significa la construcción de este proyecto, esto incluye portales, túneles falsos, pavimentos, vías de acceso, etc.

Se adjunta como referencia el costo por metro lineal estimado en la tabla 8.14, la longitud del Túnel Lo Prado N°3 en el trazado de referencia es aproximadamente de 3067 [km].

TABLA 8.14 PRECIOS POR METRO LINEAL APROXIMADOS PARA EL TÚNEL LO PRADO N°3

Totales	Precio metro lineal [U.F./ml]
Excavación	137
H-25 Proyectado en Sellado	67
H-25 Proyectado Sostenimiento	117
H-25 Proyectado en revestimiento	85
H-15 en masa en solera	63
Pernos de anclaje	28
Marcos THN-29	23
Total elementos estructuración	520
Total Proyecto	945

8.5 Tiempos de Construcción

En el presente apartado se presenta una estimación general de cuanto debería ser los tiempos de construcción del Túnel Lo Prado N°3, en el caso de seguir el trazado de referencia propuesto.

En el apartado 4.2.8 del Capítulo N°4 Ingeniería Básica, se presentan los rendimientos de promedio de la construcción del Túnel Lo Prado N°2. Estos promedios, son excluyendo o incluyendo los extremos del túnel, es decir, la construcción de los túneles falsos y su respectiva conexión a los portales.

Asumiendo los rendimientos de la tabla 4.12, se tiene que la duración del túnel debería ser del orden de 24 a 27 meses considerando sólo un frente de excavación. Considerando dos frentes, con una distribución temporal a la de este túnel, se debería tener un rango de 19 a 20 meses de trabajo.

TABLA 8.15 TIEMPOS DE CONSTRUCCIÓN ESTIMADOS PARA EL TÚNEL LO PRADO N°3

Promedio	Valor [m/mes]	Duración [meses]
Un frente sin contar extremos	125.5	25
Con extremos	111.4	28
Dos frentes	148.5	21

Además, considerando la construcción de accesos, galerías de conexión, entre otras obras, es normal considerar dos meses adicionales para la puesta en servicio en provisoria. Esto, por ejemplo, es lo que se observa en el Túnel Chamisero II.

En el Túnel Lo Prado N°2, la diferencia entre el inicio de construcción del frente oriente con respecto al frente poniente fue de 11 meses. Considerando esta situación, se elabora un diagrama tiempo camino (figura 8.1), considerando 4 meses el inicio de faenas en la construcción del Portal Oriente.

Dados los rendimientos presentados en la tabla 8.15, se considera que el valor de un frente corresponde al rendimiento a favor de la pendiente y se calcula el valor para el valor en contra, asumiendo que se cumple el promedio de dos frentes. Además, se consideran valores de rendimientos estimados a pendientes de 2% en condiciones geológicas como los del sector del Túnel Lo Prado N°2. Estos se presentan en la tabla 8.16.

TABLA 8.16 RENDIMIENTOS CONSIDERADOS PARA EL TÚNEL LO PRADO N°3

Rendimiento	Frente	Valor [m/mes]	Tiempo Construcción [meses]
1	Poniente	125.5	21
	Oriente	171.5	
2	Poniente	100	23
	Oriente	150	

El rendimiento 1 corresponde a las estimaciones a partir de la construcción del Túnel Lo Prado N°2, en cambio el 2 corresponde a los valores asociados a una pendiente del 2%.

Con las consideraciones anteriormente mencionadas, se establece que el periodo de demora de construcción del Túnel Lo Prado N°3 es del rango de 20 a 25 meses.

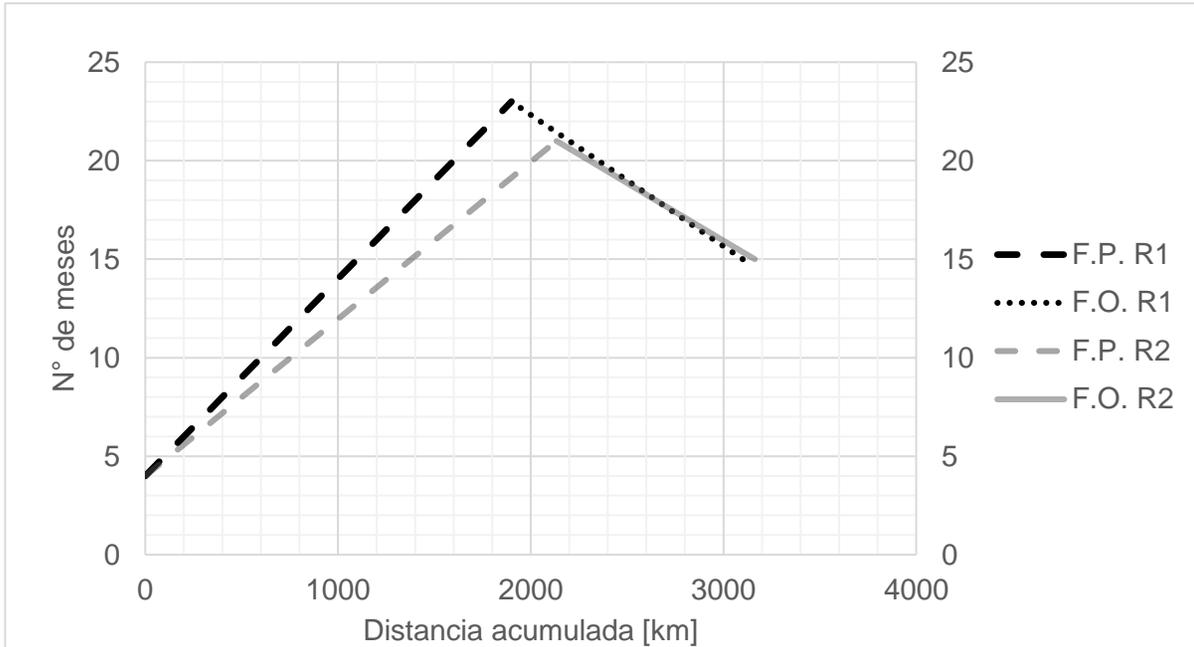


FIGURA 8.1 DIAGRAMA TIEMPO CAMINO DE LOS RENDIMIENTOS ESTIMADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL

9 Tiempos de viaje en el Sistema de Túneles Lo Prado

En los siguientes apartados se presentan los análisis realizados al flujo de la ruta 68 en la plaza de peaje Lo Prado, con el fin de proyectar la disminución de la demora de tiempos de viaje al construir el Túnel Lo Prado N°3.

9.1 Metodología

El objetivo de este capítulo es presentar la demora de los viajes promedio en un año en la situación con y sin proyecto, con el fin de calcular de esta forma los beneficios sociales del proyecto.

Para este fin, se le solicitan al Ministerio de Obras Públicas los flujos de la autopista en el Túnel Lo Prado, la información es obtenida de las plazas de peaje, la cual detalla la cantidad de vehículos que pasan por hora durante el mes de febrero del 2019.

Los flujos vienen detallados por tipo de vehículo, estos son los siguientes:

- Autos y Camionetas.
- Autos y Camionetas con remolque.
- Buses de 2 ejes.
- Buses de más de 2 ejes.
- Camiones de 2 ejes.
- Camiones de más de 2 ejes.
- Motocicletas.

Para el análisis de flujo se consideran todos los modos a excepción de las motocicletas. Así, el problema de la demora se modela de la siguiente forma:

- Se calculan los flujos promedios por horario por cada día de la semana.
- Se identifican los intervalos horarios representativos de la semana para establecer la periodización.
 - Esto se hace mediante análisis de conglomerados.
- Se calculan los flujos asociados a cada periodo definido, por tipo de vehículo.
- Con los flujos asociados, se calcula el tiempo de demora en el sistema de túneles con y sin proyecto, por tipo de vehículo.
- La diferencia de tiempo por tipo de vehículo es ponderada por el valor social del tiempo asociado a cada modo. Así se obtiene el beneficio social.
- Finalmente, se pondera la diferencia de tiempo por el valor social del tiempo por cada tipo de vehículo.
- Así, aplicando una tasa de crecimiento del parque vehicular, se obtiene el beneficio social del túnel por año.

En estos pasos se toman las siguientes consideraciones importantes:

- La razón por la cual se escoge el análisis de conglomerados es por su relativa sencilla implementación en el software Microsoft Excel y recomendación directa de una empresa asesora especializada en evaluación social de proyectos viales de concesiones.
- La modelación de los flujos se hace por sentidos, se establece como sentido 1 (S1) los viajes con sentido a Valparaíso y como sentido 2 (S2) los viajes con sentido a Santiago.
- La modelación considera que la influencia en la congestión es distinta por cada tipo de vehículo, por lo cual la periodización se realiza con los flujos en vehículos

equivalentes, en la que los camiones de más de 2 ejes equivalen a 3 veces a un auto o camioneta y en la que los buses de dos o más ejes y los camiones equivalen a 2 veces un auto.

- Se extrapolan los datos un mes con características más altas que el promedio anual, que es el mes de febrero, pero, a la vez sólo se consideran como beneficios los ahorros de tiempo, por lo que se considera dentro de los márgenes del alcance del trabajo.
 - La razón principal por la que se trabaja con los datos de febrero es por su disponibilidad inmediata al momento de realizar este trabajo.
 - Esto produce limitaciones importantes, los beneficios están sobre ponderados, razón por la cual se consideran varios escenarios en la evaluación social.

9.2 Flujos

A continuación, se presentan los flujos por vehículos equivalentes considerados en la periodización. Estos flujos son los promedios del mes de febrero del 2019. Las tablas 9.1 a 9.3 corresponden a los flujos en el sentido S1, es decir hacia Valparaíso y las tablas 9.4 a 9.6 corresponden a las con sentido S2, hacia Santiago.

TABLA 9.1 FLUJOS PROMEDIO DE LOS TÚNELES LO PRADO, SENTIDO S1

Día	00:00-01:00	01:00-02:00	02:00-03:00	03:00-04:00	04:00-05:00	05:00-06:00	06:00-07:00	07:00-08:00
Lunes	363	212	122	108	158	315	582	947
Martes	570	330	171	133	166	291	467	886
Miércoles	362	219	133	103	110	208	354	624
Jueves	358	254	143	96	136	290	577	1022
Viernes	306	226	153	132	167	289	488	857
Sábado	470	279	164	122	164	279	435	819
Domingo	370	227	137	108	128	197	292	569

TABLA 9.2 FLUJOS PROMEDIO DE LOS TÚNELES LO PRADO, SENTIDO S1

Día	08:00-09:00	09:00-10:00	10:00-11:00	11:00-12:00	12:00-13:00	13:00-14:00	14:00-15:00	15:00-16:00
Lunes	1057	1427	1610	1708	1680	1648	1656	1795
Martes	1341	1905	1956	1870	1852	1688	1622	1544
Miércoles	900	1358	1515	1567	1574	1374	1176	1077
Jueves	1139	1485	1630	1653	1650	1556	1397	1447
Viernes	1072	1446	1598	1642	1648	1655	1636	1750
Sábado	1180	1695	2059	2260	2338	2143	1802	1675
Domingo	801	1146	1353	1519	1494	1354	1123	1085

TABLA 9.3 FLUJOS PROMEDIO DE LOS TÚNELES LO PRADO, SENTIDO S1

Día	16:00-17:00	17:00-18:00	18:00-19:00	19:00-20:00	20:00-21:00	21:00-22:00	22:00-23:00	23:00-24:00
Lunes	1767	1770	1872	1856	1678	1407	1327	1018
Martes	1416	1462	1465	1360	1082	891	731	542
Miércoles	1079	1150	1209	1197	976	783	672	482
Jueves	1480	1588	1748	1659	1252	918	711	515
Viernes	1916	1938	2000	2114	1998	1651	1165	782
Sábado	1549	1430	1435	1366	1120	901	713	545
Domingo	1156	1246	1330	1352	1171	974	772	523

TABLA 9.4 FLUJOS PROMEDIO DE LOS TÚNELES LO PRADO, SENTIDO S2

Día	00:00-01:00	01:00-02:00	02:00-03:00	03:00-04:00	04:00-05:00	05:00-06:00	06:00-07:00	07:00-08:00
Lunes	511	268	163	168	187	345	1174	1973
Martes	316	220	164	142	151	232	681	1115
Miércoles	495	309	221	150	145	213	581	939
Jueves	1123	667	231	162	169	335	1144	1855
Viernes	307	295	319	284	250	286	822	1431
Sábado	633	486	357	193	176	252	653	1098
Domingo	459	256	166	141	123	189	460	855

TABLA 9.5 FLUJOS PROMEDIO DE LOS TÚNELES LO PRADO, SENTIDO S1

Día	08:00-09:00	09:00-10:00	10:00-11:00	11:00-12:00	12:00-13:00	13:00-14:00	14:00-15:00	15:00-16:00
Lunes	1702	1570	1559	1526	1577	1516	1452	1391
Martes	1134	1215	1282	1369	1344	1321	1197	1152
Miércoles	937	995	1071	1163	1329	1392	1342	1402
Jueves	1861	1722	1830	1598	1683	1526	1482	1424
Viernes	1495	1395	1456	1504	1603	1590	1558	1609
Sábado	1285	1264	1316	1435	1516	1413	1336	1257
Domingo	947	972	1055	1231	1338	1401	1395	1465

TABLA 9.6 FLUJOS PROMEDIO DE LOS TÚNELES LO PRADO, SENTIDO S2

Día	16:00-17:00	17:00-18:00	18:00-19:00	19:00-20:00	20:00-21:00	21:00-22:00	22:00-23:00	23:00-24:00
Lunes	1466	1543	1507	1398	1268	1076	825	560
Martes	1233	1339	1368	1392	1397	1286	1077	808
Miércoles	1595	1663	1768	1678	1574	1469	1300	1215
Jueves	1527	1574	1533	1383	1243	1055	840	570
Viernes	1690	1653	1630	1591	1475	1197	1008	753
Sábado	1370	1418	1577	1697	1663	1538	1281	870
Domingo	1728	2068	2110	2239	2071	1887	1616	1028

9.3 Periodización

La periodización se realiza mediante un análisis de conglomerados de los flujos del mes de febrero del año 2019.

Así, en la tabla 9.7 se establecen los diferentes grupos de análisis con su número asociado para ser representado en los diferentes horarios de la semana en las tablas 9.8 y 9.9.

TABLA 9.7 PERIODIZACIÓN DE LOS FLUJOS DE LOS TÚNELES LO PRADO

Periodo	Número
Punta Laboral Mañana	1
Día Laboral	2
Punta Laboral Tarde	3
Punta Viernes/Sábado Salida	4
Punta Vuelta	5
Día Fin de Semana	6
Noche	7

TABLA 9.8 PERIODIZACIÓN SENTIDO S1

Día	Intervalos horarios																								
Lunes	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	2	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	2	7	7	7
Martes	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	7	7	7	7
Miércoles	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	7	7	7	7
Jueves	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	2	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	7	7	7	7
Viernes	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	7	7	7
Sábado	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7
Domingo	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7

TABLA 9.9 PERIODIZACIÓN SENTIDO S2

Día	Intervalos horarios																								
Lunes	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	2	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	2	7	7	7
Martes	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	7	7	7	7
Miércoles	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	7	7	7	7
Jueves	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	2	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	7	7	7	7
Viernes	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	7	7	7
Sábado	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7
Domingo	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7

En las tablas 9.8 y 9.9, cada cuadro representa un intervalo horario de 1 hora de la semana. Bajo este análisis, aplicando el análisis de conglomerado a los diferentes intervalos, se obtiene que los flujos promedios por modo vehicular asignados es la siguiente:

TABLA 9.10 FLUJOS PROMEDIO POR MODO

Modo	Autos y Camionetas		Buses 2 ejes		Camiones más de dos ejes		Autos con Remolque		Buses más de 2 ejes		Camiones 2 ejes	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
1	1168	884	50	45	67	51	2	1	14	9	67	51
2	1015	1004	46	48	55	59	2	1	12	11	55	59
3	1250	985	55	56	53	70	3	1	17	10	53	70
4	1650	1174	47	55	51	60	2	1	15	12	51	60
5	0	1806	0	55	0	38	0	2	0	13	0	38
6	1036	1081	40	43	40	44	2	1	12	11	40	44
7	368	502	19	20	24	19	1	1	4	6	24	19

En la tabla 9.10 los flujos están medidos por hora. En la tabla 9.11 se incluyen cuantas horas a la semana están presentes los diferentes periodos de, valga la redundancia, la periodización.

TABLA 9.11 HORAS SEMANALES DE CADA PERIODO POR SENTIDO

Periodo	S1 [hrs]	S2 [hrs]
1	11	8
2	33	36
3	8	8
4	9	5
5	0	4
6	21	22
7	86	85

9.4 Tiempos de Demora

Los tiempos de demora son calculados mediante una función de flujo-capacidad, detallada en el apartado 2.2.3 del Capítulo N°2 Marco Teórico.

9.4.1 Supuestos

Para el modelo del tiempo de viaje promedio para los diferentes periodos de la periodización del conjunto de túneles lo Prado se han tomado los siguientes supuestos:

- Que el largo de influencia de los túneles en la demora opera en una longitud de 3.3 [km], de forma indiferenciada de cuál sea. Esto porque los cambios en la pista y la proximidad alteran el flujo en un rango aproximado de 150 a 300 [m] por túnel.
- Que la velocidad en flujo libre es lo señalado como velocidad máxima en el manual de carreteras 90 [km/h].
- Que la velocidad en capacidad es de 30 [km/h].
- Que los túneles tienen la misma capacidad de 1250 vehículos por calzada y que esta es constante, sea si el túnel es unidireccional o bidireccional.
 - Esto se hace para simplificar el cálculo, puesto que acorde a lo señalado en el marco teórico se está subestimando la capacidad de un túnel en el caso unidireccional y sobreestimando en el caso bidireccional.

Finalmente, en la situación con proyecto, se considera la siguiente capacidad por sentido dada la gestión vial propuesta para el Túnel Lo Prado N°3:

TABLA 9.12 CAPACIDAD POR SENTIDO DEL SISTEMA DE TÚNELES LO PRADO

Periodo	Capacidad S1 [veh/hr]	Capacidad S2 [veh/hr]	Operación TLP3
1	3750	3750	Bidireccional
2	3750	3750	Bidireccional
3	3750	3750	Bidireccional
4	5000	2500	Unidireccional S1
5	2500	5000	Unidireccional S2
6	3750	3750	Bidireccional
7	3750	3750	Bidireccional

Los resultados de la periodización presentados en la tabla 9.10 equivalen a los siguientes flujos, en términos de vehículo equivalente:

TABLA 9.13 FLUJOS PROMEDIO EN VEHÍCULOS LIVIANOS EQUIVALENTES

Periodo	QS1 [veh/hr]	QS2 [veh/hr]
1	1631	1249
2	1408	1420
3	1659	1469
4	2032	1609
5	0	2135
6	1343	1411
7	534	650

9.4.2 Resultados

Con las consideraciones presentadas en el apartado anterior, se tiene los siguientes tiempos de viaje promedio en la situación con y sin túnel. Se adjunta también la velocidad equivalente para tener un parámetro de referencia más evidente.

TABLA 9.14 TIEMPOS Y VELOCIDADES EN LA SITUACIÓN SIN PROYECTO

Periodo	Tiempo de demora situación actual [hr]		Velocidad situación actual [km/hr]	
	Sentido s1	s2	s1	s2
1	0.0589	0.0472	56.1	70.0
2	0.0514	0.0517	64.3	63.8
3	0.0599	0.0532	55.1	62.0
4	0.0777	0.0580	42.5	56.9
5	0.0367	0.0838	90.0	39.4
6	0.0495	0.0515	66.6	64.1
7	0.0376	0.0384	87.7	86.0

De esta forma, en la situación con proyecto, se tienen los siguientes valores:

TABLA 9.15 TIEMPOS Y VELOCIDADES DE VIAJE EN LA SITUACIÓN ACTUAL POR SENTIDO

Periodo	Tiempo de demora situación actual [hr]		Velocidad situación actual [km/hr]	
	S1	S2	S1	S2
1	0.0438	0.0400	75.3	82.4
2	0.0414	0.0415	79.7	79.5
3	0.0441	0.0420	74.8	78.6
4	0.0426	0.0580	77.5	56.9
5	0.0367	0.0434	90.0	76.0
6	0.0408	0.0414	80.9	79.7
7	0.0370	0.0372	89.2	88.7

De esta forma, ponderando por la cantidad de horas a la semana que representa a la semana cada periodo (Tabla 9.11), el flujo promedio de cada tipo de vehículo por hora y la cantidad de semanas al año, se tienen los tiempos de viajes por cada modo anuales. Así, se tienen los siguientes tiempos de viajes anuales por sentido, en la situación con y sin proyecto respectivamente:

TABLA 9.16 TIEMPOS DE VIAJES ANUALES S1, SITUACIÓN SIN PROYECTO

Periodo	Autos y Camionetas [hrs]	Buses dos ejes [hrs]	Camiones más de dos ejes [hrs]	Autos y Camionetas con Remolque [hrs]	Buses más de dos ejes [hrs]	Camiones más de dos ejes [hrs]
1	39324	1682	2240	74	478	2240
2	89439	4038	4844	143	1084	4844
3	31145	1376	1309	64	419	1309
4	60017	1716	1863	87	544	1863
5	0	0	0	0	0	0
6	56007	2167	2174	90	655	2174
7	61985	3227	3959	114	726	3959

TABLA 9.17 TIEMPOS DE VIAJES ANUALES S2, SITUACIÓN SIN PROYECTO

Periodo	Autos y Camionetas [hrs]	Buses dos ejes [hrs]	Camiones más de dos ejes [hrs]	Autos y Camionetas con Remolque [hrs]	Buses más de dos ejes [hrs]	Camiones más de dos ejes [hrs]
1	17354	880	1004	18	181	1722
2	97229	4659	5718	116	1092	5205
3	21812	1247	1552	32	219	1747
4	17711	825	905	16	188	2182
5	31489	966	665	32	226	0
6	63661	2537	2591	69	668	2381
7	85045	3390	3257	90	1000	3234

TABLA 9.18 TIEMPOS DE VIAJES ANUALES S1, SITUACIÓN CON PROYECTO

Periodo	Autos y Camionetas [hrs]	Buses dos ejes [hrs]	Camiones más de dos ejes [hrs]	Autos y Camionetas con Remolque [hrs]	Buses más de dos ejes [hrs]	Camiones más de dos ejes [hrs]
1	29262	1252	1667	55	356	1667
2	72080	3254	3904	116	873	3904
3	22943	1014	964	47	308	964
4	32863	940	1020	48	298	1020
5	0	0	0	0	0	0
6	46137	1785	1791	74	539	1791
7	60900	3171	3890	112	713	3890

TABLA 9.19 TIEMPOS DE VIAJES ANUALES S2, SITUACIÓN CON PROYECTO

Periodo	Autos y Camionetas [hrs]	Buses dos ejes [hrs]	Camiones más de dos ejes [hrs]	Autos y Camionetas con Remolque [hrs]	Buses más de dos ejes [hrs]	Camiones más de dos ejes [hrs]
1	14731	747	852	15	154	1281
2	78033	3739	4589	93	877	4195
3	17206	984	1224	25	173	1287
4	17711	825	905	16	188	1195
5	16318	500	345	17	117	0
6	51239	2042	2086	55	538	1961
7	82506	3289	3160	87	970	3177

9.5 Ahorro de tiempo proyectado

Con los resultados presentados en las tablas 9.16 a la 9.19, se obtiene que el ahorro de tiempo en un año por vehículo, en la situación con proyecto versus sin el proyecto, es la siguiente:

TABLA 9.20 DIFERENCIA DE TIEMPOS DE VIAJES TOTALES ANUALES

Situación	Autos y Camionetas [hrs]	Buses dos ejes [hrs]	Camiones más de dos ejes [hrs]	Autos y Camionetas con Remolque [hrs]	Buses más de dos ejes [hrs]	Camiones más de dos ejes [hrs]
Actual	672219	28711	32081	947	7480	32859
Proyectada	541929	23542	26396	761	6104	26332
Diferencia	130291	5169	5685	185	1375	6527

A modo de ejemplo, se estima que en un año se reducen 130291 horas de viajes en autos y camionetas gracias al proyecto.

9.6 Beneficios Asociados

Con los valores de la tabla 9.20 se procede a calcular los beneficios sociales por los ahorros de tiempo calculados. Los precios sociales adoptados para el valor social del tiempo se señalan en el apartado 2.3.3.1 del Capítulo N°2, Marco Teórico.

Así, comparando la situación con y sin proyecto, en un año se produce el ahorro presentado en la tabla 9.21.

TABLA 9.21 BENEFICIOS SOCIALES POR AHORRO DE TIEMPO

Situación	Autos y Camionetas	Buses dos ejes	Camiones más de dos ejes	Autos y Camionetas con Remolque	Buses más de dos ejes	Camiones más de dos ejes
Monto [MM\$]	2496	731	50	4	195	57
Total [MM\$]	3533					

10 Evaluación Social del Proyecto

En los siguientes apartados se presenta el resultado final de este trabajo de título, la evaluación social del proyecto con un enfoque de costos-beneficios, analizando como costos la inversión del proyecto y beneficios los ahorros de tiempo generados por la construcción de nuevo túnel y el valor residual al final del tiempo de evaluación.

10.1 Metodología

Para la evaluación social de proyecto Túnel Lo Prado N°3 se considera un análisis a 20 años desde el periodo en el que se realiza la inversión, se considera una tasa de descuento del 6% y como beneficios se consideran el tiempo ahorrado gracias la construcción del proyecto, ponderado por el valor social del tiempo, además, del valor residual del proyecto.

Los beneficios se consideran crecientes con una tasa de interés de un 4,5% por un periodo de 10 años desde que se inicia a presentar como beneficio, luego se considera constante por el periodo restante.

Se considera que el proyecto estará funcionando 3 años después de realizada la inversión económica.

Como indicadores de rentabilidad se consideran el VAN y la TIR, el primero para determinar si el proyecto es factible o no, el segundo para analizar qué tan lejos de ser rentable está, en caso de no serlo.

Se analizan diferentes escenarios para la fecha de construcción del túnel, entendiendo que un proyecto de esta naturaleza puede ser postergado o ser urgente dependiendo de variables más complejas que el análisis económico.

Así, los escenarios analizados son los siguientes:

- Escenario A: Inversión inmediata, año 2020, con tasa de crecimiento del flujo de un 4,5%.
- Escenario B: Inversión inmediata, año 2020, pero dividida en tres cuotas iguales del año 2020 al año 2022, considerando el tiempo de construcción y apertura del proyecto. Tasa de crecimiento de un 4,5%
- Escenario C: Inversión inmediata, año 2020, pero dividida en tres cuotas iguales del año 2020 al año 2022, considerando el tiempo de construcción y apertura del proyecto. Tasa de crecimiento de un 5,0%
- Escenario D: Inversión en el año 2025, considerando una tasa de crecimiento del 4,5%.
- Escenario E: Inversión en el año 2025, pero un 15% más alta que lo calculada y dividida en tres cuotas iguales del año 2025 al año 2027. Tasa de crecimiento de un 4,5%.

10.1.1 Montos de Inversión y Beneficios

Los montos de inversión y beneficios principales del proyecto Túnel Lo Prado N°3 son detallados en el Capítulo N°8 Costos y Tiempos de Construcción y en el Capítulo N°9 Tiempos de Viaje en el Sistema de Túneles Lo Prado.

TABLA 10.1 COSTOS Y BENEFICIOS DEL PROYECTO TÚNEL LO PRADO N°3

Flujo	Monto [MM\$]
Inversión	80700
Beneficio por ahorro de tiempo, año 2019	3533
Valor residual del proyecto	64560

10.2 Resultados

En los siguientes apartados se presentan los resultados de la Evaluación Social de los diferentes escenarios.

10.2.1 Escenario A

En el caso de tener una inversión inmediata, es decir, año 2020, con una tasa de crecimiento del flujo de un 4,5%, se tiene el siguiente flujo de caja, con VAN y TIR asociadas:

TABLA 10.2 FLUJOS DE CAJA ESCENARIO A

Año	Costos [MM\$]	Beneficios [MM\$]	Flujo
2020	80700		-80700
2021			0
2022			0
2023		4213	4213
2024		4402	4402
2025		4600	4600
2026		4807	4807
2027		5024	5024
2028		5250	5250
2029		5486	5486
2030		5733	5733
2031		5991	5991
2032		6261	6261
2033		6542	6542
2034		6837	6837
2035		6837	6837
2036		6837	6837
2037		6837	6837
2038		6837	6837
2039		6837	6837
2040		64560+6837	71397

TABLA 10.3 INDICADORES DE RENTABILIDAD ESCENARIO A

Indicador	Magnitud
TIR	5.3%
VAN	-6,407.8

10.2.2 Escenario B

En el caso de tener una inversión inmediata, es decir en el año 2020, pero dividida en tres cuotas iguales del año 2020 al año 2022, considerando el tiempo de construcción y apertura del proyecto. Además de una tasa de crecimiento de un 4,5%, se tiene el siguiente flujo de caja, con VAN y TIR asociadas:

TABLA 10.4 FLUJOS DE CAJA ESCENARIO B

Año	Costos [MM\$]	Beneficios [MM\$]	Flujo
2020	26900		-26900
2021	26900		-26900
2022	26900		-26900
2023		4213	4213
2024		4402	4402
2025		4600	4600
2026		4807	4807
2027		5024	5024
2028		5250	5250
2029		5486	5486
2030		5733	5733
2031		5991	5991
2032		6261	6261
2033		6542	6542
2034		6837	6837
2035		6837	6837
2036		6837	6837
2037		6837	6837
2038		6837	6837
2039		6837	6837
2040		64560+6837	71397

TABLA 10.5 INDICADORES DE RENTABILIDAD ESCENARIO B

Indicador	Magnitud
TIR	5.8%
VAN	-1,926.1

10.2.3 Escenario C

En el caso de tener una inversión inmediata, es decir en el año 2020, pero dividida en tres cuotas iguales del año 2020 al año 2022, considerando el tiempo de construcción y apertura del proyecto. Además de una tasa de crecimiento de un 5,0%, se tiene el siguiente flujo de caja, con VAN y TIR asociadas:

TABLA 10.6 FLUJOS DE CAJA ESCENARIO C

Año	Costos [MM\$]	Beneficios [MM\$]	Flujo
2020	26900		-26900
2021	26900		-26900
2022	26900		-26900
2023		4294	4294
2024		4509	4509
2025		4734	4734
2026		4971	4971
2027		5219	5219
2028		5480	5480
2029		5754	5754
2030		6042	6042
2031		6344	6344
2032		6661	6661
2033		6994	6994
2034		7344	7344
2035		7344	7344
2036		7344	7344
2037		7344	7344
2038		7344	7344
2039		7344	7344
2040		64560+7344	71904

TABLA 10.7 INDICADORES DE RENTABILIDAD ESCENARIO C

Indicador	Magnitud
TIR	6.1%
VAN	972.7

10.2.4 Escenario D

En el caso de tener una inversión en el año 2025, con una tasa de crecimiento del flujo de un 4,5%, se tiene el siguiente flujo de caja, con VAN y TIR asociadas:

TABLA 10.8 FLUJOS DE CAJA ESCENARIO D

Año	Costos [MM\$]	Beneficios [MM\$]	Flujo
2025	26900		-26900
2026	26900		-26900
2027	26900		-26900
2028		5250	5250
2029		5486	5486
2030		5733	5733
2031		5991	5991
2032		6261	6261
2033		6542	6542
2034		6837	6837
2035		7144	7144
2036		7466	7466
2037		7802	7802
2038		8153	8153
2039		8153	8153
2040		8153	8153
2041		8153	8153
2042		8153	8153
2043		8153	8153
2044		8153	8153
2045		64560+8153	72713

TABLA 10.9 INDICADORES DE RENTABILIDAD ESCENARIO D

Indicador	Magnitud
TIR	7.2%
VAN	10,447.4

10.2.5 Escenario E

En el caso de tener una inversión un 15% más alta a lo señalado en la tabla 10.1, en el año 2025, pero dividida en tres cuotas iguales del año 2025 al año 2027, considerando el tiempo de construcción y apertura del proyecto. Además de una tasa de crecimiento de un 4,5%, se tiene el siguiente flujo de caja, con VAN y TIR asociadas:

TABLA 10.10 FLUJOS DE CAJA ESCENARIO E

Año	Costos [MM\$]	Beneficios [MM\$]	Flujo
2025	30935		-30935
2026	30935		-30935
2027	30935		-30935
2028		5250	5250
2029		5486	5486
2030		5733	5733
2031		5991	5991
2032		6261	6261
2033		6542	6542
2034		6837	6837
2035		7144	7144
2036		7466	7466
2037		7802	7802
2038		8153	8153
2039		8153	8153
2040		8153	8153
2041		8153	8153
2042		8153	8153
2043		8153	8153
2044		8153	8153
2045		74244+8153	82397

TABLA 10.11 INDICADORES DE RENTABILIDAD ESCENARIO E

Indicador	Magnitud
TIR	6.2%
VAN	2,034.2

10.2.6 Resumen

A modo de resumen, se presenta los indicadores de rentabilidad asociada a cada escenario analizado:

TABLA 10.12 RESUMEN DE LA RENTABILIDAD DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS

Escenario	VAN	TIR	Rentable
A	-6.408	5.3%	No, amplio margen.
B	-1926	5.8%	No, margen considerable.
C	973	6,1%	Sí, estrecho margen.
D	10447	7.2%	Sí, amplio margen.
E	2034	6.2%	Sí, estrecho margen.

Las conclusiones y comentarios relativos al resultado de este capítulo son presentados en el apartado 11.6 del Capítulo N°11, Conclusiones y Comentarios, puesto que son las relativas al objetivo general de este trabajo de título.

11 Conclusiones y comentarios

En este capítulo se analiza el nivel de logro de los objetivos de este trabajo de título, estos están declarados en el apartado 1.2 del Capítulo N°1 Introducción.

Los objetivos son analizados en un orden inductivo, es decir, de lo más específico a lo más general, puesto que de esta forma se presenta el análisis con respecto al objetivo general al final, como la conclusión más relevante de este trabajo.

De esta forma se establecen las conclusiones y comentarios en el orden de los objetivos específicos, es decir, se comenta sobre:

- La caracterización geográfica y geológica del sector de los túneles Lo Prado.
- La definición del corredor y su trazado de referencia.
- El diseño geomecánico propuesto para el trazado.
- La estimación de costos y plazos del diseño.
- La estimación de beneficios sociales en base al flujo de la ruta 68.

11.1 Caracterización geográfica y geológica

La caracterización de la zona de los túneles Lo Prado fue realizada con un alto nivel de detalle en el proyecto del Túnel Lo Prado N°2 construido en el contrato concesionado vigente.

El macizo rocoso el cual atraviesan los túneles actuales y el proyectado en este trabajo, está conformado principalmente por los siguientes litotipos: Andesitas, Brechas, Ocoítas, Calizas, Areniscas y Pórfidos. Los cuales son clasificados y representados en los diferentes planos mediante las subunidades definidas por Elgueta (1970) [13]. Esta clasificación es la siguiente:

- KLP 1: Andesitas y queratófiros grises.
- KLP 2: Brechas conglomeráticas rojizas.
- KLP 3: Ocoítas gris verdosas.
- KLP 4: Calizas y areniscas grises.
- G: Pórfido cuarcífero claro.

En la construcción del Túnel Lo Prado N°2, se obtuvo principalmente andesitas y andesitas alteradas, del orden de un 65% del trazado se encontró este litotipo. Prácticamente no se encontraron calizas y areniscas. Esto se detalla en la tabla 4.7, presente en el apartado 4.2.6.

Las zonas más complejas de la construcción del túnel estuvieron asociadas a las fallas geológicas, estas se encontraron con mayor incidencia en las zonas más próximas al portal oriente, principalmente en las rocas alteradas por la interacción entre el pórfido G y los demás litotipos.

Con respecto a la geografía del sector, en los portales oriente no existen grandes eventos respecto a la ladera del macizo rocoso, puesto que la orientación de la ladera donde se ubican los portales está orientada prácticamente perpendicularmente al trazado de las vías, visto en planta. (plano 4.4).

Es de suma importancia resaltar que la calidad de la roca, en términos del índice del RMR de Bieniawski, es regular. Si bien los estudios de proyecto del Túnel Lo Prado N°2 señalaban que existían tramos con promedios altos y en las fallas se designaron tramos con calidad mala, en la construcción del túnel sólo se encontraron tramos con promedios regulares.

Para futuros estudios se recomienda realizar sondajes en los tramos cercanos a ambos portales, con énfasis en las zonas de falla y donde se prevea la interacción del pórfido G con los otros litotipos.

En la zona sur del portal poniente existen más eventos. Al norte de los túneles actuales existe un abrupto cambio de pendiente entre la del macizo rocoso hacia el valle de Curacaví. Por el lado norte existen varios cerros que están muy cerca del trazado actual de la ruta 68, incluso existen varios cortes de estos en su trazado. Sin embargo, existe un espacio con la cota similar al trazado de la ruta entre los P.K 24+200 y 24+400.

Si bien estos elementos son considerados en el diseño propuesto en este trabajo, son relevantes de mencionar para estudios posteriores.

11.2 Definición del Corredor y trazado de referencia

El proceso de la definición del corredor es relativamente sencillo bajo las experiencias de dos túneles previos en la zona y por los elementos presentados en el apartado anterior.

Esto es porque en la zona de los portales ponientes se hace imposible ubicar un nuevo portal al costado sur de los actuales sin considerar un movimiento de tierras de altas magnitudes, sin contar además con la necesidad de desarrollar un empalme que probablemente exija la construcción de un puente u obra similar.

Entre ambos túneles aparece como imposible puesto que, en la misma zona, los túneles están separados por 40 [m] aproximadamente, y con la sección propuesta para el tercer túnel, ninguna ubicación cumpliría la norma, que rondaría en los 45 [m] como espaciamiento mínimo entre ejes de las calzadas.

Bajo el mismo nivel de análisis, en la zona de los portales oriente, la obra está limitada al norte por el Centro de Estudios Nucleares Lo Aguirre. Así, en términos preliminares, sin ninguna consideración del macizo rocoso, se tiene una zona entre 45 y 150 metros en el portal oriente como factible para ubicar el tercer túnel, en cambio, en el portal poniente, se tiene como restricción una curva tal en el trazado que permite empalmar bien en el P.K. 24+400, lo cual difícilmente se dé alejando tanto el túnel de los portales, pero este trabajo no se ha cuantificado, entendiéndose que difícilmente se diseñe un túnel que se aleje de los anteriores.

Así, primeramente, se establece como franja máxima el rango de 45 a 150 metros. Ahora bien, lo que más se señala en los informes del proyecto del Túnel Lo Prado N°2 es que los principales problemas de la construcción de ambos túneles estuvieron dados por las fallas geológicas.

En el plano 4.4, se hace evidente que los primeros 80 metros al norte del Túnel Lo Prado N°2 interceden un número amplio de fallas, es posterior a este rango al cual se reduce considerablemente el número de fallas que se encuentra un eventual trazado del túnel.

Así, se escoge un trazado de referencia aproximadamente ubicado a unos 100 metros del Túnel Lo Prado N°2, con el fin de reducir el número de fallas, pero no más alejado entendiéndose que al hacerlo se pierde precisión de la caracterización geomecánica del trazado, además de encarecer los costos de las eventuales galerías de conexión.

Dados los alcances del trabajo no se hace un análisis más detallado de este problema de optimización, pero para definir un trazado más rentable se recomienda tener en consideración las siguientes variables:

- El coste de atravesar las diferentes fallas geológicas
- El coste lineal de las galerías de conexión.
- El coste lineal del largo del túnel.

Cabe destacar que el análisis de la pendiente del trazado también es importante, en este trabajo sólo se analiza estar dentro de la norma, pero no se analizó la posibilidad de ocupar este elemento para hacer más corto el trazado de referencia.

11.3 Diseño Geomecánico del Túnel

Dado que la sección transversal para el Túnel Lo Prado N°3 proyectada es mayor a la anterior, puesto que para diseñar el túnel a una velocidad de proyecto de 120 [km/h] es necesario aumentar el ancho de las bermas respecto al túnel anterior, no es posible extrapolar el diseño del Túnel Lo Prado N°2 sin hacer algunas consideraciones.

Dado que el objetivo principal de este trabajo es realizar una estimación de costos asociadas a la construcción del tercer túnel, el diseño propuesto se ha enfocado en compatibilizar el diseño del segundo túnel, tal que, bajo supuestos aceptables, se mantienen las condiciones estructurales respecto al Túnel Lo Prado N°2.

Estos supuestos dicen relación con que, de no superarse ciertos límites en torno a un 5% del aumento en la sección propuesta, no habrá mayores diferencias en las exigencias de sostenimiento y revestimiento en el trazado del nuevo túnel, lo cual se traduce en una estimación aceptable de los abonos de materiales del diseño, que concluye una estimación aceptable de los costos del nuevo túnel.

Esto, bajo el contexto de que la calidad del macizo rocoso presenta un comportamiento fácil de estimar, puesto el alto nivel de conocimiento de la zona dada la construcción reciente del segundo túnel, que opera como un sondaje horizontal, al igual que la documentación del primer túnel.

Se decide documentar el diseño proyectado para el primer túnel, puesto que, si bien no se necesitaron todas las secciones por la calidad de la roca obtenida, éstas podrían ser necesarias en el nuevo trazado. Esto deberá ser analizado con más detalles en los estudios de ingeniería posteriores.

Finalmente, se mantiene la numeración de las secciones anteriores, con el fin de no generar confusiones al momento de analizar los diferentes documentos.

11.4 Estimación de los Costos y Tiempos de construcción

Para realizar la estimación de los costos asociados a todo lo que conlleva la construcción del proyecto Túnel Lo Prado N°3, se realiza el análisis de precios unitarios de ítems relevantes en cuatro túneles similares desarrollados a nivel de ingeniería definitiva por el Ministerio de Obras Públicas.

Se decide analizar elementos que sean fáciles de ponderar por metro lineal de avance y de los cuales su porcentaje de costo con respecto al proyecto total de un túnel sea conocido. Es así, como de la evaluación de las diferentes partidas que componen un proyecto túnel, se concluye que el porcentaje de costo de los elementos analizados son del orden del 55% del proyecto total.

Los elementos analizados responden al movimiento de tierras, eminentemente la excavación del túnel, además de los elementos de estructuración de este, principalmente: hormigón proyectado, marcos y pernos de anclaje.

Con este procedimiento, se estima que el costo del proyecto asociado a la construcción del Túnel Lo Prado N°3 es del orden de 3.000.000 de unidades de fomento.

Para la estimación de los tiempos de construcción, se realiza una extrapolación sencilla en base a los rendimientos promedio del Túnel Lo Prado N°2, dada su similitud en términos geomecánicos.

Así, se concluye que, con una excavación y estructuración a dos frentes, el proyecto debería demorar alrededor de 22 meses. Sumado a esto, la construcción de accesos, puesta a punto, atrasos en proyectos de estas características, es de esperar que el proyecto demore del orden de 3 años en su entrega.

Como comentario adicional, el resultado del costo del túnel es similar al proyecto del Túnel el Melón II, que tiene un diseño similar en términos de tamaño de sección, pero con un macizo rocoso un poco más complejo, presenta suelo en parte del túnel, aun así, son comparables. Lo cual indica que los cálculos realizados son fiables.

11.5 Estimación de los beneficios

La estimación de los beneficios del proyecto Túnel Lo Prado N°3 tiene varios supuestos que son bastante debatibles y que deben ser precisados con mayor detalle en los estudios posteriores a este trabajo.

En primer lugar, la extrapolación de datos está realizada del mes de febrero del año 2019, un mes de temporada alta, si bien al ser reciente permite estimar de mejor forma el crecimiento de los flujos, pierde bastante precisión a la hora de extrapolar la periodización a todo el año.

De esta forma, se recomienda con creces realizar un cálculo de factores de expansión a los diferentes meses del año.

En segundo lugar, la simplificación del cálculo de la capacidad del sistema de los túneles Lo Prado debe ser revisada, por un lado, se subestima la capacidad de los túneles unidireccionales, por otro, se sobreestima la del túnel bidireccional.

Esto no necesariamente se traduce en aumento de la demora de los diferentes periodos analizados, pero probablemente se traduzca en otra propuesta de operación para los diferentes modos.

Finalmente, señalar, que los cálculos y propuestas del modelo de demora utilizados pueden ser refinados, en el caso particular de la función capacidad flujo, cuya elección se basa más en su relativa facilidad de aplicación dados los datos disponibles y alcances de este trabajo.

11.6 Evaluación Social del Proyecto Túnel Lo Prado N°3

La conclusión de este trabajo de título es, que, bajo los supuestos y modelaciones utilizadas, el Proyecto Túnel Lo Prado N°3 tiene varios escenarios donde es rentable socialmente, por lo que se recomienda realizar análisis de prefactibilidad y factibilidad más precisos.

Esto porque en la evaluación se hacen consideraciones importantes que deben ser analizadas cuidadosamente, la primera es la modelación del crecimiento del parque automotriz, esta se estima en base a los datos del IPC y en general, en estos proyectos se modela del 3% al 6% dependiendo del nivel de demanda de la autopista.

En el caso de este trabajo se modelan con 4,5% y 5% dado que es una autopista con una de las demandas más altas del país, pero este argumento debe ser justificado con mayor formalidad.

La segunda consideración de gran importancia es que no se aplican los costos de mantención de la autopista ni el aumento de accidentes por aumentar la velocidad de conducción, por otro lado, no se consideran otros beneficios como el funcionamiento con mayor eficiencia de los vehículos que se traduce en una disminución de los gases contaminantes.

Por último, el valor residual del proyecto y el estancamiento del crecimiento del parque automotriz han sido escogidos arbitrariamente en función de conversaciones con profesionales en la materia.

En lo relativo a los escenarios propiamente tal, la elección de estos se basa para ilustrar con mayor detalle los casos límites identificados en procesos de iteración.

El escenario A, que bajo un caso en el cual se le pusiera urgencia inmediata al proyecto y su construcción pudiese iniciar en algún momento del 2020 este difícilmente sería rentable, considerando que toda la inversión se realiza en ese periodo.

Ahora bien, si se consideran modelos en los cuales la inversión se realiza en periodos anuales, este se acerca considerablemente a la rentabilidad, el cual es el escenario B.

TABLA 11.1 RESUMEN DE LA RENTABILIDAD DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS

Escenario	VAN	TIR	Rentable
A	-6.408	5.3%	No, amplio margen.
B	-1926	5.8%	No, margen considerable.
C	973	6,1%	Sí, estrecho margen.
D	10447	7.2%	Sí, amplio margen.
E	2034	6.2%	Sí, margen considerable.

Al aumentar la tasa de crecimiento del parque automotriz a un 5%, el proyecto se considera rentable, aunque por un estrecho margen, el VAN baja un orden de magnitud y la TIR está bastante cercana a la tasa de descuento entregada por el Ministerio de Hacienda.

Finalmente se presentan dos escenarios donde el proyecto es bastante rentable, el D y el E. El D considera el mismo monto de inversión, repartido en tres periodos, para el año 2025, este es el escenario con mayor rentabilidad de los analizados, pero es también el menos preciso, puesto que la extrapolación de los datos del flujo vehicular es más distante, lo cual debe ser revisado con más detalle, por ejemplo, analizar si la demanda que genera esos ahorros de tiempo es posible.

Dado esa incertidumbre, se presenta el escenario E, en el cual se “castiga” el análisis aumentando el costo de la inversión en un 15%, mostrando un caso en el cual se asume, o que la estimación del Túnel Lo Prado N°3 fue muy generosa o que los beneficios serán menores a lo estimado.

Aún bajo ese escenario el VAN es positivo y la TIR considerablemente mayor a la tasa de descuento. Por lo que, bajo los alcances de este estudio, se considera que el proyecto Túnel Lo Prado N°3 es totalmente factible de comenzar a construir el año 2025 en adelante.

12 Bibliografía

- [1] BiobioChile, «Ruta 68 ya es "free flow": tiene pórticos tag en todos sus peajes y se puede transitar a 100 km/h,» Santiago, 2019.
- [2] Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, «Manual de Carreteras - Instrucciones y Criterios de Diseño,» vol. III, Santiago, 2018.
- [3] L. Özdemir, North American Tunneling 2006, Washington, DC: Taylor & Francis, 2006.
- [4] S. Priest y E. Brown, «Probabilistic Stability analysis of variable rock slopes,» *Trans. - Inst. Min. Metall., Sect. A*, vol. 92, pp. A1-A12, 1983.
- [5] Sociedad Concesionaria Rutas del Pacífico S.A., «Concesión Internacional Interconexión Vial Santiago - Valparaíso - Viña del Mar, Volumen II, Proyecto de Túneles,» 2003.
- [6] E. Hoek y B. E.T., Support of underground Excavations in Hard Rock, Balkema, 1995.
- [7] World Road Association Mondiale de la Route, «<https://tunnels.piarc.org/en/operational-safety-requirements-geometry/tunnel-traffic-capacity>,» 2015. [En línea]. [Último acceso: Mayo 2019].
- [8] J. Gibson, *Teoría de Flujos Vehiculares, Apuntes de Clase*, Santiago: Universidad de Chile, División de Ingeniería de Transporte, 2001.
- [9] Bureau of Public Roads, Traffic Assignment Manual, Washington D.C.: U.S. Dept. of Commerce, Urban Planning Division, 1964.
- [10] División Evaluación Social de Inversores, Subsecretaría de Evaluación Social, Ministerio de Desarrollo Social, Evaluación Socioeconómica de Proyectos de Inversión Pública, Santiago, 2015.
- [11] J. Muñoz-Cristi, «Contribución al conocimiento geológico de la Cordillera de la Costa de la Zona Central,» *Minerales*, nº 69, 1960.
- [12] R. Wall, P. Gana y Á. Gutiérrez, Mapa geológico del área de Valparaíso - Curacaví, Regiones de Valparaíso y Metropolitana, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, 1996.
- [13] R. Elgueta, Geología del área de Lo Prado y estudios geotécnicos relacionados con el proyecto y excavación del Túnel Lo Prado, Santiago: Universidad de Chile, 1970.

A. Anexos

A.1 Planos

Planos empleados y diseñados en este trabajo de título.

TABLA A.1 ÍNDICE DE PLANOS

Plano	Número
Topografía	4.1
Perfil Longitudinal 2000	4.2
Perfil Longitudinal 2001	4.3
Cartografía en planta	4.4
Sección I	4.5
Sección II	4.6
Sección III	4.7
Sección IV	4.8
Sección IX	4.9
Sección Transversal TLP 3	5.1
Trazado de referencia	6.1

A.2 Datos Túnel Lo Prado N°2

A.2.1 Diseño Túnel Lo Prado N°2

A continuación, se presenta el diseño del Túnel Lo Prado N°2 según su índice RMR, sección Tipo asociada y longitud del tramo.

TABLA A.2 ÍNDICE RMR DEL TÚNEL LO PRADO N°2 CON SECCIÓN DE DISEÑO ASOCIADA

Tramo	RMR	Sección Tipo	Longitud Tramo [m]
1	43	IX	20
2	43	V	58
3	58	V	88
4	37	VI	6
5	57	I	37
6	50	I	21
7	37	VI	4
8	58	I	90
9	50	II	27
10	37	VII	5
11	50	II	28
12	57	I	88
13	37	VII	10
14	57	I	57
15	57	II	80
16	57	II	80
17	50	IV	36
18	57	II	52
19	37	VII	11
20	57	II	47
21	50	IV	45
22	57	III	28
23	50	IV	40
24	63	II	111
25	50	V	126
26	38	VIII	33
27	62	III	34
28	38	VIII	25
29	57	III	12
30	57	III	38
31	50	V	45
32	52	III	207
33	50	V	25
34	57	III	64

35	57	II	200
36	37	VII	17
37	57	II	83
38	57	II	76
39	37	VIII	55
40	62	I	59
41	37	VIII	29
42	52	I	206
43	37	VI	9
44	52	I	61
45	37	VI	38
46	52	II	107
47	37	VI	20
48	58	IX	15
49	58	IX	15
50	-	"(1)"	4
51	-	Túnel Falso	29

A.2.2 Tramos Construidos

En esta sección se presentan los tramos construidos, se resaltan en negrita los tramos con los que no se contaba información precisa originalmente y que luego fueron ponderados para no afectar los cálculos de ponderación.

Los tramos se detallan según longitud, litotipos obtenidos, índice RMR promedio obtenido y sección construida.

TABLA A.3 TRAMOS CONSTRUIDOS EN EL TÚNEL LO PRADO N°2

Tramo	Largo [m]	Largo acumulado [m]	Litotipos obtenidos	RMR promedio	Sección Construida
1	20	20	KLP1	43	IX
2	58	78	KLP1, KLP3	46	III
3	4	82	KLP3	44	IV
4	3	85	KLP3	41	III
5	7	91	KLP3	41	IV
6	39	130	KLP3	43	III
7	27	157	KLP1, KLP3	43	III
8	48	205	G	45	III
9	14	218	KLP1	48	III
10	7	225	KLP1	55	II
11	16	241	KLP1	41	III
12	18	258	KLP1	43	IV
13	25	284	KLP1	44	III
14	25	309	KLP1	49	III
15	15	324	KLP1, G	49	III
16	8	331	KLP1, G	46	III
17	41	372	KLP1, KLP2, G	43	III
18	20	392	KLP2	44	III
19	3	395	KLP2	47	II
20	125	520	KLP1, KLP2	51	I
21	19	539	KLP1	53	II
22	24	563	KLP1	56	I
23	11	574	KLP1	48	II
24	8	581	KLP1	56	I
25	41	623	KLP1	52	II
26	8	630	KLP1	41	III
27	30	660	KLP1	44	III
28	7	666	KLP1	48	III
29	21	687	KLP1	42	III
30	14	701	KLP1	43	III

31	6	706	KLP1	49	III
32	105	811	KLP1	49	II
33	185	996	KLP1, KLP2, KLP3	45	II
34	200	1196	KLP1, KLP2	50	II
35	114	1310	KLP1', KLP2	52	II
36	13	1323	KLP1, KLP1', KLP2, G	46	III
37	78	1400	KLP1', G	49	II
38	207	1607	KLP1, KLP2	50	II
39	69	1676	KLP1, G	52	II
40	114	1790	KLP1, G	50	III
41	3	1793	KLP1	50	III
42	19	1813	KLP1, G	44	III
43	63	1875	KLP1	44	III
44	17	1893	KLP1	44	III
45	83	1976	KLP1	51	III
46	76	2052	KLP1'	56	III
47	55	2107	KLP1'	42	III
48	59	2165	KLP1'	44	III
49	29	2194	KLP1'	44	III
50	34	2228	KLP1	45	III
51	34	2262	KLP1	45	III
52	100	2362	KLP1	49	III
53	170	2531	KLP1, KLP1'	47	III
54	34	2565	KLP1', G	45	III
55	10	2575	KLP1'	43	III
56	70	2645	KLP1'	51	III
57	11	2656	KLP1'	52	IX
58	13	2669	KLP1'	48	IX
59	17	2686	KLP1'	Túnel Falso	(1)

A.3 Túnel Lo Prado N°3

A.3.1 División de Tramos

En la siguiente tabla se presenta la repartición que se hace de los tramos construidos que en su interior incluyen el cambio de litotipos en el plano en planta. La división se realiza repartiendo el tramo en un tramo anterior y uno posterior. El tramo anterior define el fin del litotipo, el posterior puede ser dividido nuevamente si llega a encontrarse con un nuevo fin de litotipos. Esto ocurre por ejemplo con el tramo 20, el cual es repartido dos veces más, lo cual se señala en el 20b y 20c.

En la tabla C1 se señala el detalle de las divisiones. En la tabla C2 se detalla la división final de tramos que al ser ponderada por los Factores de Participación otorgan los tramos de diseño para el Túnel Lo Prado N°3.

TABLA A.4 CÁLCULO DE DIVISIÓN DE TRAMOS BAJO LÍMITE DE LITOTIPOS EN PLANTA

Tramo	Largo Acc. [m]	Largo Acc. [m]	LP _{TLP2} [m]	F.R. Atrás	F.R. Adelante	Tramo Anterior [m]	Tramo Posterior [m]
Tramo 17	344	331	40.9	0.33	0.67	13.5	27.4
Tramo 20	448	394.8	125.3	0.43	0.57	53.5	71.8
Tramo 20 b	463	448.3	71.8	0.20	0.80	14.6	57.3
Tramo 20c	474	463	57.3	0.19	0.81	10.7	46.6
Tramo 33	847	811.3	184.7	0.19	0.81	35.8	148.9
Tramo 33b	876	847	148.9	0.20	0.80	29.1	119.8
Tramo 34	1190	996.0	200	0.97	0.03	193.6	6.4
Tramo 35	1267	1196.0	113.5	0.63	0.37	71.2	42.3
Tramo 37	1379	1322.5	77.5	0.73	0.27	56.3	21.2
Tramo 38	1474	1400.0	206.5	0.36	0.64	73.9	132.6
Tramo 39	1673	1606.5	69.1	0.96	0.04	66.3	2.8
Tramo 40	1723	1675.6	114.4	0.42	0.58	47.7	66.7
Tramo 40b	1767	1723	66.7	0.65	0.35	43.7	23.1
Tramo 42	1806	1793.2	19.3	0.65	0.35	12.6	6.7
Tramo 43	1838	1812.5	62.7	0.40	0.60	25.3	37.4
Tramo 47	2068	2051.6	55.1	0.29	0.71	16.1	39.0
Tramo 48	2111	2106.7	58.6	0.08	0.92	4.7	53.9
Tramo 52	2344	2261.9	100	0.82	0.18	82.4	17.6
Tramo 53	2461	2361.9	169.5	0.58	0.42	98.8	70.7
Tramo 53b	2504	2460.7	70.7	0.62	0.38	43.7	27.0
Tramo 56	2618	2575.3	70	0.61	0.39	42.6	27.4
Tramo 59	2686	2668.9	16.94	1.00	0.00	16.9	0.0

TABLA A.5 TRAMOS CON DIVISIÓN INCORPORADA

Tramo	Largo Tramos en Planta divididos [m]
1	20.0
2	57.5
3	4.0
4	3.0
5	6.5
6	38.5
7	27.0
8	48.0
9	13.5
10	7.0
11	15.5
12	17.8
13	25.3
14	25.4
15	14.5
16	7.5
17a	13.5
17b	27.4
18	20.2
19	2.7
20a	53.5
20b	14.6
20c	10.7
20d	46.6
21	18.5
22	23.9
23	11.0
24	7.8
25	41.2
26	7.5
27	29.7
28	6.7
29	20.5
30	13.7
31	5.7
32	105.0
33a	35.8
33b	29.1

33c	119.8
34a	193.6
34b	6.4
35a	71.2
35b	42.3
36	13.0
37a	56.3
37b	21.2
38a	73.9
38b	132.6
39a	66.3
39b	2.8
40a	47.7
40b	43.7
40c	23.1
41	3.2
42a	12.6
42b	6.7
43a	25.3
43b	37.4
44	17.4
45	83.2
46	75.8
47a	16.1
47b	39.0
48a	4.7
48b	53.9
49	28.5
50	34.0
51	34.1
52a	82.4
52b	17.6
53a	98.8
53b	43.7
53c	27.0
54	34.0
55	9.9
56a	42.6
56b	27.4
57	10.6
58	13.0

Así, todos los tramos del Túnel Lo Prado N°2 se encuentran bajo sólo un litotipo en planta para ser ponderados por un factor de participación.

A.3.2 Resumen de Secciones

El diseño del trazado de referencia propuesto para el Túnel Lo Prado N°3 se resume de la siguiente forma. Se incluye el índice Q de Barton en la tabla en caso de ser necesitado en futuros estudios.

TABLA A.6 DISEÑO DEL TÚNEL LO PRADO N°3

Tramo	Largo ponderado	RMR	Q	Sección Diseñada	Litotipo
1	30.0	43	0.8	IX	KLP1
2	86.3	46	1.2	III	KLP1, KLP3
3	6.0	44	1.0	IV	KLP3
4	4.5	41	0.7	III	KLP3
5	9.8	41	0.7	IV	KLP3
6	57.8	43	0.8	III	KLP3
7	40.5	43	0.8	III	KLP1, KLP3
8	72.1	45	1.1	III	G
9	20.3	48	1.6	III	KLP1
10	10.5	55	3.4	II	KLP1
11	23.3	41	0.7	III	KLP1
12	26.7	43	0.9	IV	KLP1
13	38.0	44	0.9	III	KLP1
14	38.1	49	1.7	III	KLP1
15	21.8	49	1.7	III	KLP1, G
16	11.3	46	1.2	III	KLP1, G
17	20.2	43	0.8	III	KLP1, KLP2, G
18	39.6	43	0.8	III	KLP1, KLP2, G
19	29.1	44	1.0	III	KLP2
20	3.9	47	1.4	II	KLP2
21	77.1	51	2.2	I	KLP1, KLP2
22	113.7	51	2.2	I	KLP1, KLP2
23	32.5	51	2.2	I	KLP1, KLP2
24	12.9	53	2.7	II	KLP1
25	16.7	56	3.8	I	KLP1
26	7.7	48	1.6	II	KLP1
27	5.4	56	3.8	I	KLP1
28	28.8	52	2.4	II	KLP1

29	5.2	41	0.7	III	KLP1
30	20.8	44	1.0	III	KLP1
31	4.7	48	1.6	III	KLP1
32	14.3	42	0.8	III	KLP1
33	9.6	43	0.8	III	KLP1
34	4.0	49	1.7	III	KLP1
35	73.4	49	1.7	II	KLP1
36	25.0	45	1.1	II	KLP1, KLP2, KLP3
37	30.4	45	1.1	II	KLP1, KLP2, KLP3
38	137.1	45	1.1	II	KLP1, KLP2, KLP3
39	221.5	50	1.9	II	KLP1, KLP2
40	7.0	50	1.9	II	KLP1, KLP2
41	78.2	52	2.4	II	KLP1', KLP2
42	39.1	52	2.4	II	KLP1', KLP2
43	12.0	46	1.2	III	KLP1, KLP1', KLP2, G
44	52.1	49	1.7	II	KLP1', G
45	24.1	49	1.7	II	KLP1', G
46	84.0	50	1.9	II	KLP1, KLP2
47	129.0	50	1.9	II	KLP1, KLP2
48	64.6	52	2.4	II	KLP1, G
49	1.6	52	2.4	II	KLP1, G
50	28.0	50	1.9	III	KLP1, G
51	94.5	50	1.9	III	KLP1, G
52	17.0	50	1.9	III	KLP1, G
53	2.4	50	1.9	III	KLP1
54	9.3	44	1.0	III	KLP1, G
55	11.3	44	1.0	III	KLP1, G
56	42.3	44	1.0	III	KLP1
57	54.5	44	1.0	III	KLP1
58	25.3	44	1.0	III	G
59	121.2	51	2.2	III	KLP1
60	110.4	56	3.8	III	KLP1
61	23.5	42	0.8	III	KLP1'
62	20.4	44	1.0	III	G
63	10.8	44	1.0	III	KLP1'
64	12.9	44	1.0	III	KLP1
65	12.9	52	2.4	III	KLP1
66	31.2	52	2.4	III	KLP1
67	4.5	52	2.4	III	KLP1
68	25.5	47	1.4	III	KLP1
69	16.0	47	1.4	III	KLP1

70	20.0	47	1.4	III	KLP1
71	25.2	45	1.1	III	KLP1', G
72	7.3	43	0.9	III	KLP1
73	31.5	51	2.2	III	KLP1
74	155.7	51	2.2	III	KLP1'
75	60.3	52	2.4	IX	KLP1'
76	73.9	48	1.6	IX	KLP1'
77	96.3	48	1.6	IX	KLP1'