



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN-REY BALDUINO DE BÉLGICA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN-REY BALDUINO DE BÉLGICA

**APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE MULTICRITERIOS (TÉCNICOS,
AMBIENTALES Y COMUNITARIOS) PARA EL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.
UN CASO DE ESTUDIO, MEJORAMIENTO RUTA 47, SECTOR CUESTA CAVILOLEN,
REGIÓN DE COQUIMBO**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
INGENIERO DE EJECUCIÓN EN GESTIÓN Y
CONTROL AMBIENTAL

Alumno: Alejandro Pierre Pino Suanes

Profesor Guía:

Ing. Víctor Lizama Molina

Dr. Alejandro Hugo Urrutia Rubilar



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE
MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo:

APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE MULTICRITERIOS (TÉCNICOS, AMBIENTALES Y COMUNITARIOS) PARA EL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS. UN CASO DE ESTUDIO, MEJORAMIENTO RUTA 47, SECTOR CUESTA CAVILOLEN, REGIÓN DE COQUIMBO

Nombre del candidato(a): Alejandro Pierre Pino Suanes

Carrera / Grado: Ingeniero de ejecución en gestión y control ambiental

Campus: Concepción Departamento: Química y Medio Ambiente

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Víctor Lizama Molina, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 17 de agosto 2026. Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 17 de agosto 2026. Firma: 

Índice de Contenido

1. Introducción	3
1.1 Origen del proyecto	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Alcances del proyecto	4
2. Marco Teórico	6
2.1 Evaluación de alternativas en proyectos de infraestructura	6
2.2 Evaluación multicriterio en la toma de decisiones	6
2.3 Aplicación de metodologías multicriterio en proyectos viales	7
2.4 Métodos de evaluación multicriterio	8
2.4.1 Proceso analítico jerárquico (AHP)	8
2.4.2 Método de ponderación lineal	8
2.4.3 Métodos de superación (Outranking)	8
2.5 Aplicación de la evaluación multicriterio en el presente estudio	8
3. Desarrollo	10
3.1 Metodología	10
3.1.1 Identificación de factores de evaluación	11
3.1.2 Asignación y justificación de ponderaciones	11
3.1.3 Justificación del modelo	11
3.1.4 Estructura general del modelo	12
3.1.5 Definición de la formula por factor	12
3.1.6 Ejemplo de verificación y aplicación (Caso cuesta Cavilolén)	14
3.1.7 Selección de alternativas	15
3.1.8 Justificación del uso de evaluación multicriterio	16
4. Breve descripción del caso de estudio: Cuesta Cavilolén	17
4.1 Breve descripción de los componentes ambientales más relevantes	19
5. Identificación y descripción de las alternativas	30
5.1 Identificación de elementos de la ecuación	30
5.2 Análisis de alternativas: escala de ponderación y peso por elemento	31
5.3 Rango y ponderación de afectación de cada elemento: factor ambiental y social	32
5.4 Rangos y ponderación de afectación de cada elemento: factor ingeniería	34
6. Resultados	35
6.1 Descripción de alternativas	35
6.1.1 Factor técnico	35
6.1.2 Factor ambiental	39
6.1.3 Factor Humano	41
6.2 Resultados de análisis de alternativas	43
7. Conclusiones	45
8. Bibliografía	49

1. INTRODUCCION

1.1 Origen del proyecto

El desarrollo de infraestructura vial ha sido históricamente un elemento clave para el crecimiento económico, la integración y conexión territorial de los países. Tradicionalmente, el diseño y ejecución de proyectos de ingeniería se ha sustentado principalmente en criterios técnicos y económicos, tales como la eficiencia constructiva, los costos asociados y las condiciones geométricas del trazado. Sin embargo, durante las últimas décadas ha surgido una creciente preocupación por los impactos ambientales y sociales derivados de estas obras. La expansión de proyectos de gran escala ha evidenciado la necesidad de integrar nuevas variables en los procesos de planificación y toma de decisiones, con el fin de minimizar los impactos negativos sobre los ecosistemas y las comunidades locales.

En este contexto, el desarrollo de proyectos de infraestructura requiere incorporar una visión integral que considere y sincronice aspectos técnicos, ambientales y sociales. Esta aproximación busca asegurar que las decisiones de diseño no solo respondan a criterios de eficiencia técnica, sino que también contribuyan a la sustentabilidad ambiental y a la recepción positiva de la sociedad.

En Chile, esta evolución ha sido progresivamente incorporada en el desarrollo de proyectos públicos, particularmente a través de las políticas y normativas impulsadas por el Ministerio de Obras Públicas (MOP). Entre los hitos más relevantes destacan la creación de la Unidad Técnica de Medio Ambiente (UTMA) en 1990 y la promulgación de la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, que estableció el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Estas iniciativas han permitido fortalecer la incorporación de variables ambientales y procesos de participación ciudadana en las distintas etapas de desarrollo de los proyectos.

En este marco, surge la necesidad de aplicar metodologías que permitan evaluar distintas alternativas de diseño considerando simultáneamente múltiples criterios. Las metodologías de evaluación multicriterio constituyen una herramienta adecuada para este propósito, ya que permiten integrar variables heterogéneas dentro de un proceso estructurado de análisis y comparación de alternativas.

La presente investigación se enmarca dentro de esta perspectiva y propone una metodología de evaluación multicriterio aplicada al análisis de alternativas para el mejoramiento de la Ruta 47 en el sector Cuesta Cavilolén, ubicado en la Región de Coquimbo. Este tramo presenta condiciones geométricas complejas y una creciente demanda de tránsito asociada al desarrollo de actividades productivas en la zona, lo que hace necesario evaluar alternativas de mejoramiento que optimicen las condiciones de seguridad, desplazamiento y conectividad, minimizando al mismo tiempo los impactos ambientales y sociales.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar y aplicar una metodología de evaluación multicriterio que integre variables técnicas, ambientales y sociales para el análisis de alternativas de trazado vial, utilizando como caso de estudio el mejoramiento de la Ruta 47 en el sector Cuesta Cavilolén, Región de Coquimbo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar los principales factores técnicos, ambientales y sociales que influyen en el desarrollo del proyecto.
- Definir criterios de evaluación para cada uno de los factores considerados.
- Establecer ponderaciones relativas para los distintos criterios de evaluación.
- Aplicar una metodología de evaluación multicriterio para comparar las alternativas de diseño propuestas.
- Determinar la alternativa que presenta el mejor desempeño global considerando los criterios definidos.

1.3 ALCANCES DEL PROYECTO

El alcance del presente trabajo de titulación se define a través de las siguientes delimitaciones territoriales, metodológicas, técnicas y temáticas:

Delimitación territorial y geográfica:

- El área de estudio comprende el proyecto de mejoramiento vial de la Ruta 47, específicamente en el sector Cuesta Cavilolén, ubicado en la Región de Coquimbo.
- La extensión total del trazado considerado para el proyecto es de 11,5 km, abarcando desde la salida oriente del puente Cavilolén (km 21,3) hasta el sector Las Cañas Sur (km 32,8), conectando de forma directa las comunas de Los Vilos e Illapel.

Alcance metodológico y conceptual:

- El estudio se centra en el diseño y aplicación de una Metodología de Evaluación Multicriterio basada en el Modelo de Ponderación Lineal (WSM) para la toma de decisiones y el análisis comparativo de alternativas de trazado vial.
- La evaluación integra tres factores fundamentales dentro de la ecuación global del proyecto: Factor Técnico (X), Factor Ambiental (Y) y Factor Social (Z).

- Se contempla la asignación de ponderaciones específicas para cada criterio según la realidad del territorio (con un peso dominante del factor ambiental dado el entorno frágil de la zona) y la evaluación cuantitativa de dos alternativas de trazado proyectadas a distintas velocidades de diseño (40km/h y 50km/h).

Componentes y factores ambientales y sociales analizados:

- Medio Físico: Estudio centrado prioritariamente en la geología (Unidad Cavilolén), geomorfología y riesgos físicos asociados a la inestabilidad de taludes y movimientos de tierra.
- Medio Biótico: Análisis enfocado en la flora y vegetación, cuantificando específicamente la afectación a unidades homogéneas con especial énfasis en el impacto sobre la cobertura de Bosque Nativo
- Medio Humano y Cultural: Evaluación de la percepción comunitaria (participación ciudadana), presencia de asentamientos locales (como el sector Las Cañas Sur), elementos de patrimonio sociocultural (como la afectación de animitas) y el impacto del proyecto en las dinámicas productivas de la zona.

Límites y exclusiones del trabajo:

- El trabajo se restringe al análisis comparativo y la selección de la alternativa de diseño óptima. No abarca la ejecución de las obras constructivas ni la elaboración de los planes definitivos de ejecución en terreno.
- Sobre la base de la información del informe de procedencia de Consulta Indígena del estudio, el proyecto se circunscribe a un área sin afectación directa a tierras ni costumbres de comunidades indígenas protegidas, por lo que no se contempla el desarrollo ni la propuesta de un proceso de Consulta Indígena

2. MARCO TEORICO

2.1 Evaluación de alternativas en proyectos de infraestructura

El desarrollo de proyectos de infraestructura, particularmente en el ámbito del transporte y la ingeniería vial, requiere procesos de toma de decisiones complejos que involucran múltiples variables técnicas, económicas, ambientales y sociales. Tradicionalmente, la selección de alternativas de diseño se ha basado principalmente en criterios técnicos y económicos, tales como la factibilidad constructiva, los costos de inversión y las condiciones geométricas del trazado. Sin embargo, durante las últimas décadas se ha reconocido que este enfoque resulta insuficiente para abordar la complejidad de los proyectos de infraestructura moderna. Las obras de gran escala generan una amplia gama de impactos sobre el medio ambiente y sobre las comunidades humanas, por lo que su evaluación debe considerar también aspectos relacionados con la sostenibilidad ambiental, la protección de los ecosistemas y la aceptación social de las iniciativas.

En este contexto, los procesos de planificación y evaluación de proyectos han evolucionado hacia enfoques más integrales, que buscan equilibrar los distintos objetivos involucrados en el desarrollo territorial. Este enfoque ha sido particularmente relevante en proyectos de infraestructura vial, donde la selección de alternativas de trazado puede generar impactos significativos sobre el paisaje, los ecosistemas naturales, el patrimonio cultural y las actividades productivas locales.

Como respuesta a esta necesidad, se han desarrollado diversas herramientas metodológicas destinadas a apoyar los procesos de toma de decisiones en contextos complejos. Entre estas herramientas destacan las metodologías de **evaluación multicriterio**, las cuales permiten integrar variables heterogéneas dentro de un proceso estructurado de análisis y comparación de alternativas.

2.2 Evaluación multicriterio en la toma de decisiones

La evaluación multicriterio, también conocida como **Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)**, corresponde a un conjunto de métodos utilizados para apoyar la toma de decisiones cuando existen múltiples criterios que deben ser considerados simultáneamente. A diferencia de los métodos tradicionales basados exclusivamente en análisis económico, las metodologías multicriterio permiten incorporar variables que no necesariamente pueden ser expresadas en términos monetarios, tales como la calidad ambiental, los impactos sociales o la percepción de las comunidades.

Según [Dodgson et al. \(2009\)](#), la evaluación multicriterio puede definirse como un conjunto de técnicas que permiten comparar distintas alternativas mediante la evaluación de múltiples criterios que reflejan los distintos objetivos del proceso de decisión. Estas metodologías se caracterizan por estructurar el problema en una serie

de etapas que incluyen la identificación de criterios relevantes, la asignación de ponderaciones relativas y la evaluación del desempeño de cada alternativa respecto a dichos criterios.

Una de las principales ventajas de la evaluación multicriterio es su capacidad para integrar información proveniente de distintas disciplinas dentro de un mismo marco analítico. Esto resulta especialmente útil en proyectos de infraestructura, donde las decisiones suelen involucrar la interacción entre variables técnicas, ambientales y sociales. Asimismo, las metodologías multicriterio permiten mejorar la transparencia en los procesos de toma de decisiones, ya que hacen explícitos los criterios considerados y las ponderaciones asignadas a cada uno de ellos. De esta manera, se facilita la comprensión del proceso de selección de alternativas tanto para los equipos técnicos como para los actores involucrados en el desarrollo del proyecto.

2.3 Aplicación de metodologías multicriterio en proyectos viales

Las metodologías de evaluación multicriterio han sido ampliamente utilizadas en la planificación de sistemas de transporte y en la evaluación de proyectos de infraestructura vial. En este tipo de proyectos, la selección de alternativas de trazado suele implicar conflictos entre distintos objetivos, tales como minimizar los costos de construcción, reducir los impactos ambientales y mejorar las condiciones de seguridad y operación del camino.

Diversos estudios han demostrado la utilidad de las metodologías multicriterio para abordar este tipo de problemas. Por ejemplo, [Macharis et al. \(2009\)](#) aplicaron un enfoque multicriterio para evaluar alternativas de transporte sostenible, destacando la importancia de integrar variables ambientales y sociales dentro de los procesos de planificación.

En el ámbito de la ingeniería vial, las metodologías multicriterio han sido utilizadas para evaluar alternativas de trazado considerando criterios como:

- costos de construcción
- movimiento de tierras
- impactos sobre ecosistemas
- afectación de áreas protegidas
- riesgos geológicos y geomorfológicos
- impactos sobre comunidades locales

La integración de estos criterios dentro de un proceso estructurado de análisis permite comparar alternativas de manera sistemática y facilitar la selección de la opción que presenta el mejor equilibrio entre los distintos factores considerados.

Además, el uso de metodologías multicriterio permite incorporar el conocimiento de especialistas de distintas áreas, tales como ingenieros, geólogos, biólogos y profesionales del ámbito social, lo que contribuye a mejorar la calidad de las decisiones adoptadas durante las etapas de diseño de los proyectos.

2.4 Métodos de evaluación multicriterio

Existen diversas metodologías dentro del enfoque de evaluación multicriterio, cada una con características particulares y distintos niveles de complejidad. Entre los métodos más utilizados se encuentran:

2.4.1 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Analytic Hierarchy Process (AHP), desarrollado por Saaty (1980), es uno de los métodos multicriterio más utilizados. Este método se basa en la descomposición del problema de decisión en una estructura jerárquica de criterios y subcriterios, permitiendo realizar comparaciones pareadas entre ellos para determinar sus ponderaciones relativas.

2.4.2 Método de ponderación lineal

El Weighted Sum Model (WSM) o método de ponderación lineal corresponde a uno de los enfoques más simples y ampliamente utilizados dentro de la evaluación multicriterio. Este método consiste en asignar un peso relativo a cada criterio de evaluación en función de su importancia dentro del proceso de decisión. Posteriormente, cada alternativa es evaluada respecto a estos criterios, obteniendo un puntaje ponderado final. Este enfoque resulta especialmente útil en estudios de planificación y evaluación preliminar de alternativas, debido a su simplicidad y facilidad de aplicación.

2.4.3 Métodos de superación (Outranking)

Otros enfoques multicriterio incluyen métodos de superación, tales como PROMETHEE y ELECTRE, los cuales permiten comparar alternativas mediante relaciones de preferencia parcial entre ellas. Estos métodos suelen utilizarse en problemas de decisión más complejos que involucran un mayor número de criterios y alternativas.

2.5 Aplicación de la evaluación multicriterio en el presente estudio

En el presente estudio se utiliza un enfoque de evaluación multicriterio basado en ponderación lineal de criterios (WSM), debido a su simplicidad metodológica y a su adecuada adaptación al tipo de información disponible en el estudio de ingeniería del proyecto.

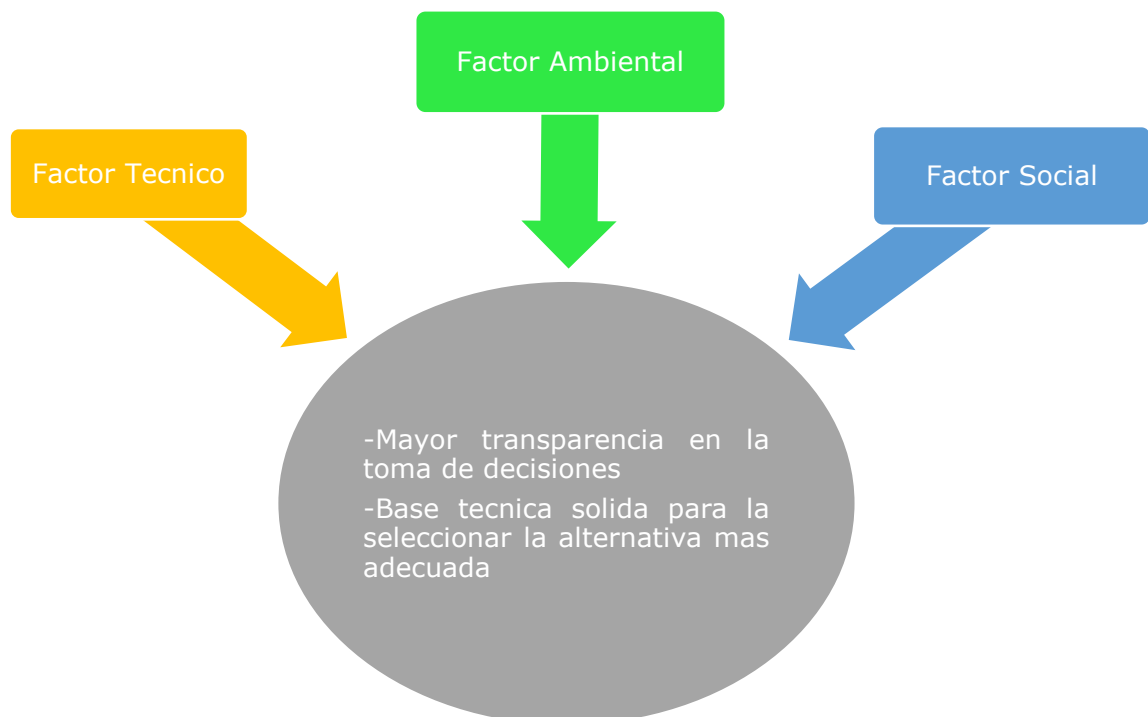
La metodología aplicada considera los siguientes factores de evaluación:

- **Factor técnico**
- **Factor ambiental**
- **Factor social**

Cada uno de estos factores incluye criterios específicos que permiten evaluar el desempeño de las distintas alternativas de trazado propuestas para el mejoramiento de la Ruta 47 en el sector Cuesta Cavilolén.

Posteriormente, a cada criterio se le asigna un peso relativo en función de su importancia dentro del contexto espacial del proyecto, permitiendo calcular un puntaje ponderado final para cada alternativa. Este enfoque facilita la comparación sistemática de las alternativas analizadas y permite identificar aquella que presenta el mejor equilibrio entre los distintos factores considerados en el estudio.

La aplicación de esta metodología contribuye a mejorar la transparencia del proceso de toma de decisiones y proporciona una base técnica para la selección de la alternativa más adecuada desde una perspectiva integral.



3. DESARROLLO

3.1 Metodología

El análisis de alternativas para proyectos de infraestructura vial requiere considerar múltiples variables que pertenecen a diferentes ámbitos del desarrollo del proyecto. En este contexto, la presente investigación emplea una metodología de evaluación multicriterio basada en ponderación lineal, la cual permite integrar variables técnicas, ambientales y sociales dentro de un proceso estructurado de análisis.

Este enfoque permite comparar distintas alternativas de diseño mediante la asignación de pesos relativos a cada criterio de evaluación y la posterior obtención de un puntaje global para cada alternativa.

La metodología utilizada se desarrolla en las siguientes etapas:

3.1.1 Identificación de factores de evaluación

Se definieron tres factores principales para el análisis de alternativas:

- **Factor técnico (X):** Considera variables asociadas al diseño geométrico del camino y a la factibilidad constructiva del proyecto.
- **Factor ambiental (Y):** Considera variables relacionadas con los impactos potenciales sobre los componentes físicos y bióticos del entorno.
- **Factor social (Z):** Considera variables relacionadas con la interacción del proyecto con las comunidades locales y la percepción social de la iniciativa.

La relación conceptual entre estos factores puede representarse de la siguiente manera:

$$\text{Proyecto} = X + Y + Z$$

Para cada uno de los factores se definieron criterios específicos de evaluación.

Factor técnico (X1+X2+X3...)

- Costos de construcción
- Movimiento de tierras
- Velocidad de diseño

Factor ambiental (Y1+Y2+Y3...)

- Afectación de unidades vegetacionales
- Riesgos geomorfológicos asociados a movimientos de tierra
- Afectación de patrimonio cultural

Factor social (Z1+Z2+Z3...)

- Percepción y aceptación del proyecto por parte de la comunidad

3.1.2 Asignación y justificación de ponderaciones

Con el propósito de dotar a esta investigación de un marco metodológico objetivo, sistemático y transferible, se desarrolló un Modelo Matemático Parametrizado de Asignación de Ponderaciones. Este modelo establece una regla de cálculo estandarizada que permite determinar de forma transparente los pesos absolutos de cada factor en función de las variables intrínsecas del proyecto (tipo de intervención y complejidad geométrica) y de las condiciones contextuales del entorno biogeográfico y socioeconómico en el cual se emplaza la obra.

3.1.3 Justificación del Modelo

La formulación del modelo se fundamenta en tres principios metodológicos y normativos de la evaluación de impacto ambiental en obras públicas:

1. **Principio de Equidad Inicial:** El modelo parte de la premisa analítica de una distribución equitativa de importancia entre las tres dimensiones del desarrollo sustentable (Técnica, Ambiental y Social), asignando una línea base teórica equivalente a un tercio del peso total (33,3%) para cada factor.
2. **Supremacía y Restricción Ambiental:** En coherencia con el marco normativo ambiental chileno y los lineamientos del Ministerio de Obras Públicas (MOP) respecto a la sostenibilidad de las infraestructuras, la dimensión ambiental debe constituir el eje orientador primario en la selección de alternativas. Por consiguiente, se define una restricción técnica de borde donde el Factor Técnico no puede superar el límite superior de 33,3% ($F_{\text{técnico}} \leq 33,3\%$), asegurando que las facilidades o conveniencias constructivas no enmascaren la vulnerabilidad ni la sensibilidad de los ecosistemas intervenidos
3. **Ajuste y Detección Territorial:** El peso final de cada factor se obtiene mediante la suma o resta de coeficientes de ajuste diferencial (Δ_i) sobre la línea base. Estos coeficientes ponderan objetivamente aspectos como:
 - a. La escasez macro-regional y fragilidad del recurso vegetal: Distinguiendo la criticidad ecológica que posee la remoción de biomasa en la zona semiárida y árida del país (donde los relictos de Bosque Nativo representan ecosistemas frágiles, acotados y de alto valor ecológico) en comparación con macrozonas de mayor abundancia y resiliencia forestal
 - b. El estado de antropización previo de la faja vial: Diferenciando la menor incertidumbre constructiva que supone la rectificación y ensanche de

un camino preexistente frente al impacto severo que genera la apertura de un trazado nuevo en suelo virgen.

- c. El rol de conectividad estratégica y dinámica socioeconómica: Ponderando el valor funcional y de integración territorial que la vía presta a las comunidades locales y sectores productivos regionales, independientemente de la densidad poblacional directa que borde el trazado.

3.1.4 Estructura General del Modelo

El porcentaje de ponderación final para cada factor ($P_{Técnica}$, $P_{Ambiental}$, P_{Social}) se determina según la siguiente ecuación base:

$$P = 33.3\% + \Delta_i$$

Donde Δ_i representa el ajuste neto por características específicas del proyecto y del territorio, sujeto a las siguientes restricciones:

- Suma total: $P_{Técnica} + P_{Ambiental} + P_{Social} = 100\%$
- Restricción técnica: $P_{Técnica} \leq 33,3\%$ (garantiza que la viabilidad técnica nunca enmascare ni sobrepase la relevancia de la evaluación socioambiental)

3.1.5 Definición de la Fórmula por Factor

A) Factor Ambiental ($P_{Ambiental}$)

El factor ambiental aumenta o disminuye desde su base del 33,3% según tres variables del entorno:

$$P_{Ambiental} = 33,3\% + (C_{macro} + C_{cobertura} + C_{sensibilidad})$$

A1. Coeficiente Macro-regional (C_{macro}): Refleja la escasez del recurso forestal e hídrico a escala país

- Arica a La Serena (Zona Árida/Hiperárida): +20% (Alta escasez de vegetación y fragilidad de oasis/quebradas).
- La Serena a Santiago (Zona Semiárida / Transición): +15% (Presencia de bosque nativo relictos, microclimas y relictos en laderas Sur/quebradas).
- Santiago a Concepción (Zona Mediterránea / Agrícola): +10% (Presencia de relictos y ecosistemas presionados por uso de suelo).
- Concepción al Sur (Zona Templada Húmeda / Abundancia forestal): 0% (Mayor resiliencia y abundancia de cobertura vegetal).

A2. Coeficiente de afectación a Cobertura de Bosque Nativo ($C_{cobertura}$)

- Afectación de Cobertura > 30% en el área de estudio: +10%
- Afectación de Cobertura entre 10% y 30%: +5%
- Afectación de Cobertura < 10%: 0%

A3. Coeficiente de Sensibilidad Ecológica y Áreas Protegidas ($C_{sensibilidad}$)

- Presencia de especies protegidas, alta interacción en cadena trófica (refugio/nidificación) o cercanía a Áreas Protegidas/Snaspe: +6,7%
- Sin hallazgos o baja sensibilidad: 0%

B) Factor Técnico ($P_{Técnico}$)

El peso del factor técnico disminuye en la medida en que la incertidumbre constructiva se reduce debido al estado de la zona a intervenir:

$$P_{Técnico} = 33,3\% - (A_{intervención} + A_{complejidad})$$

B1. Ajuste por Estado de Intervención del Terreno ($A_{intervención}$)

- Proyecto en faja preexistente / Zona antropizada (Mejoramiento/Ensanche): -15% (La menor incertidumbre sobre la faja existente reduce la necesidad de dar peso a lo constructivo por sobre lo ambiental).
- Trazado Mixto (Combinación de faja existente y variantes nuevas): -8%
- Apertura de camino nuevo en zona virgen (Greenfield): 0% (Mantiene la base del 33,3% sin sobrepasarla).

B2. Ajuste por Complejidad Geométrica ($A_{complejidad}$)

- Baja a moderada exigencia geotécnica: -8,3%
- Alta exigencia geométrica (grandes cortes/movimientos de tierra en roca): 0%

C) Factor Social (P_{Social})

El factor social se ajusta combinando la densidad de afectación directa con la relevancia funcional de la vía:

$$P_{Social} = 33,3\% - (S_{conectividad} + S_{demografía})$$

C1. Ajuste por Conectividad Estratégica y Economía Local ($S_{conectividad}$)

- Ruta única/crítica para la integración de comunas, traslado de emergencias o desarrollo de sectores productivos (minería/agricultura): +11,7%
- Conectividad secundaria o con vías alternativas cercanas: 0%

C2. Ajuste por Densidad Demográfica Aledaña (*S_{demografía}*)

- Bajísimo o nulo asentamiento humano directo sobre el trazado principal (solo asentamientos acotados en extremos): -20%
- Asentamiento humano moderado a alto a lo largo de la ruta: 0%

3.1.6 Ejemplo de Verificación y Aplicación (Caso Cuesta Cavilolén)

Al aplicar esta fórmula estandarizada a las condiciones de tu caso de estudio, el resultado es el siguiente:

Factor Ambiental:

$P_{Ambiental} = 33,3\% \text{ (base)} + 15\% \text{ (Ubicación, Coquimbo)} + 10\% \text{ (Afectación de bosque)} + 6,7\% \text{ (Sensibilidad/Fauna)} = 65\%$

Factor Técnico:

$P_{Técnico} = 33,3\% \text{ (base)} - 15\% \text{ (Área antropizada)} - 8,3\% \text{ (complejidad geométrica)} = 10\%$

Factor Social:

$P_{Social} = 33,3\% \text{ (base)} + 11,7\% \text{ (Ruta crítica/estratégica)} - 20\% \text{ (Densidad demográfica)} = 25\%$

Resumen de ponderaciones finales:

Factor	Ponderación
<i>P_{Técnico}</i>	10%
<i>P_{Ambiental}</i>	65%
<i>P_{Social}</i>	25%

Factor Técnico (10%)

La baja ponderación asignada al aspecto puramente técnico se fundamenta en que las intervenciones propuestas corresponden al mejoramiento, ensanche y rectificación de un trazado vial preexistente (Ruta 47). Al desarrollarse en su mayor parte sobre una faja ya antropizada e intervenida, el proyecto no contempla la apertura de una vía completamente nueva en un entorno inalterado. Por lo tanto, la factibilidad constructiva y las variables geométricas representan un nivel de incertidumbre menor en comparación con el impacto en los demás componentes del entorno.

Factor Ambiental (65%)

El factor ambiental constituye el eje estructural de la evaluación multicriterio. Esta alta prioridad se justifica por la fragilidad ecosistémica propia de la zona semiárida de la Región de Coquimbo, donde la presencia de cobertura de Bosque Nativo (representante de más del 31% del área de estudio) es escasa y acotada principalmente a microclimas de laderas de exposición sur y quebradas. A diferencia de las zonas del sur de Chile donde la abundancia forestal atenúa relativamente el impacto a escala macro, en este contexto territorial la pérdida o fragmentación de vegetación nativa adquiere una gravedad crítica. Asimismo, esta cobertura vegetal cumple una función ecológica indispensable en la cadena trófica local, actuando como zona de nidificación, alimentación, refugio y reproducción para la fauna autóctona. Por consiguiente, los impactos derivados de las obras de corte, movimientos de tierra y remoción de vegetación hacen que la variable ambiental deba dirigir el proceso de selección de alternativas.

Factor Social (25%)

Aunque la densidad poblacional directamente asentada a lo largo del tramo de la cuesta es baja (restringiéndose principalmente a sectores como Las Cañas Sur al final de la ruta), el factor social fue valorado en un 25% atendiendo a la función estratégica de la infraestructura. La Ruta 47 constituye un eje de conectividad territorial indispensable entre las comunas de Los Vilos e Illapel, además de ser una vía crítica para el transporte asociado a actividades productivas regionales (actividad minera y agrícola) y para la atención de emergencias locales. Por ello, se elevó su ponderación respecto a una evaluación puramente demográfica para garantizar que la alternativa elegida mantenga una alta aceptación comunitaria y aporte significativamente a la integración socioeconómica del sector.

La mayor ponderación asignada al factor ambiental se justifica por la presencia de bosque nativo y por las características geomorfológicas del área de estudio, las cuales, al ser intervenidas por las acciones y obras, por ejemplo, asociadas al corte de vegetación o movimientos de tierra pueden generar impactos significativos sobre el ecosistema.

3.1.7 Selección de alternativa

La alternativa que obtiene el mayor puntaje total ponderado corresponde a la opción que presenta el mejor equilibrio entre los factores técnicos, ambientales y sociales considerados en el análisis.

$$\textbf{Alternativa 1} = (x_1 + x_2 + \dots x_n) + (y_1 + y_2 + \dots y_n) + (z_1 + z_2 + \dots z_n)$$

$$\textbf{Alternativa 2} = (x_1 + x_2 + \dots x_n) + (y_1 + y_2 + \dots y_n) + (z_1 + z_2 + \dots z_n)$$

$$\textbf{Alternativa } n = (x_1 + x_2 + \dots x_n) + (y_1 + y_2 + \dots y_n) + (z_1 + z_2 + \dots z_n)$$

3.1.8 Justificación del uso de evaluación multicriterio

Las metodologías de evaluación multicriterio han sido ampliamente utilizadas en la planificación de proyectos de infraestructura, ya que permiten integrar variables heterogéneas dentro de un mismo proceso de análisis. Este enfoque resulta particularmente útil en proyectos viales, donde la toma de decisiones debe considerar simultáneamente aspectos técnicos, impactos ambientales y aceptación social.

Diversos estudios han demostrado que la aplicación de metodologías multicriterio facilita la comparación sistemática de alternativas y contribuye a mejorar la transparencia en los procesos de decisión en proyectos públicos.

4. BREVE DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: CUESTA CAVIOLÉN

El inicio del Estudio se ubica a la salida oriente del puente del mismo nombre, aproximadamente en el km 21,3 de la ruta y su finalización es en el km 32,8 de la misma, llegando al sector Las Cañas Sur, en un tramo recto, permitiendo de esta manera un empalme con la ruta actual. La longitud total del proyecto es de 11,5 km. Cabe destacar que inmediato al punto de salida del puente se encuentra un cruce ferroviario.

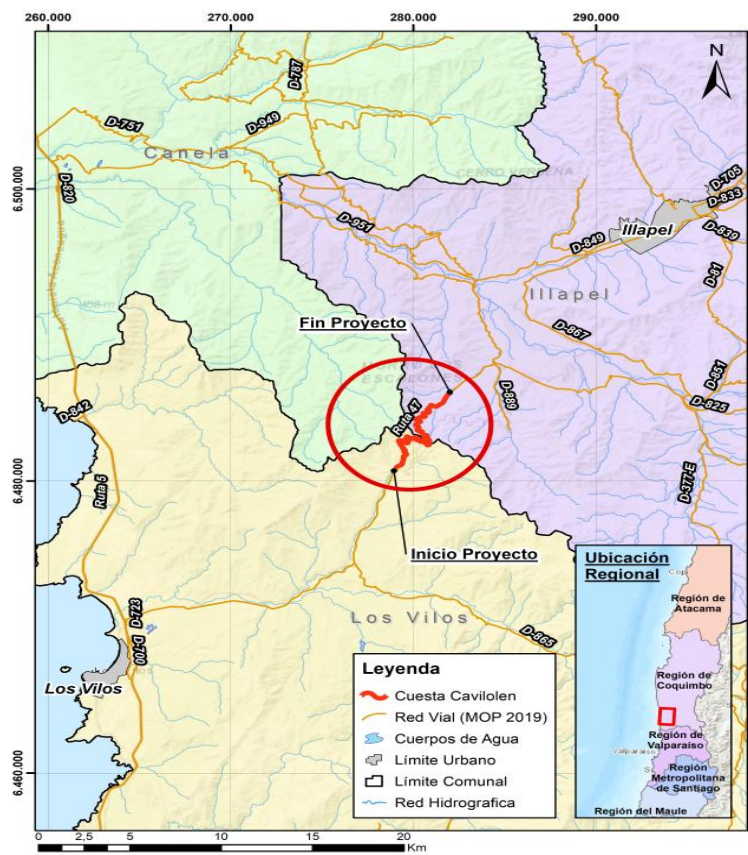


Figura 1. Área de estudio. Contexto nacional y regional.



A)



B)

Foto 1. A) Puente Caviolén (Dm 21.605) y B) Inicio desarrollo de la cuesta.

La cuesta se caracteriza por una geometría compleja de altas pendientes y curvas cerradas (Foto X), las cuales dificultan el flujo normal de vehículos que debido a las faenas mineras cercanas a la zona, crece cada vez más. El pavimento se encuentra en estado regular, presentando algunos problemas estructurales y deformaciones, además de grietas longitudinales y transversales. La calzada existente es bidireccional

de 7 m de ancho promedio con bermas de ancho variable y en algunos sectores inexistentes. En cuanto a la seguridad para el usuario, la cuesta está claramente demarcada, cuenta con tachas que no permite adelantamiento y se indica una velocidad máxima sugerida de 30 km/h en todo su desarrollo. Además, se cuenta con delineadores y la señalización respectiva, la cual debe ser mejorada. Junto a lo anterior existen algunos puntos para estacionamiento de emergencia debidamente señalizados (Foto 2) y barreras metálicas de doble onda. En cuanto al saneamiento, se observa bien conservado y está compuesto principalmente por soleras y cunetas en casi toda la longitud, obras de arte transversales y además bajadas de agua con sus respectivos embudos. En cuanto a paraderos de buses, solo se observan al final de la cuesta, único sector poblado.

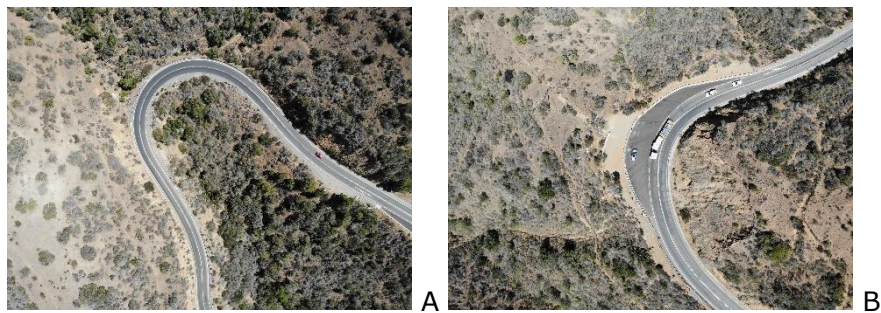


Foto 2. A) Curvas cerradas y B) Zonas para estacionamiento de emergencia

Debido a la necesidad de imponer un perfil más amplio al que existe actualmente y considerando que el trazado actual del tramo de la ruta en estudio se desarrolla prácticamente en su totalidad a media ladera, se considerará con especial énfasis para las alternativas de obras, la proyección de cortes, los que se podrían componer en un porcentaje importante de material rocoso y con alturas que en algunos casos podrían superar los 10 a 15 m. Debido a lo anterior se tomará en cuenta las consideraciones ambientales – cortes de bosque nativo - en conjunto con los respectivos estudios de estabilidad de taludes que sea necesario. Junto a lo anterior, se tendrá en cuenta que debido a la estrechez de la calzada actual pueden existir actualmente sectores de rellenos no controlados, los cuales deberán ser considerados en el proyecto, especialmente en algunos sectores de ensanches y áreas de estacionamientos de emergencia, las cuales deberán ser estudiadas tanto desde el punto de vista de su estabilidad como de la seguridad vial que brindan al usuario. Sin perjuicio del debido proyecto de seguridad vial, se tendrá especial énfasis en la época que la cuesta se ve afectada por neblina, considerando la demarcación adicional que sea necesaria. En el caso que los estudios lo indiquen, se proyectarán las estructuras o elementos de contención que aseguren la estabilidad tanto de la plataforma proyectada como de los taludes propuestos.

Para los estudios ambientales del proyecto se considerarán los siguientes componentes:

Tabla 1. Medios ambientales estudiados por el proyecto

Medio Físico	Medio Biótico	Medio Humano
Calidad del aire y ruido	Flora y vegetación	Asentamientos, instrumentos de ordenamiento territorial, aspectos socio culturales, actividades económicas, infraestructura y equipamiento
Geología	Fauna	Patrimonio histórico y cultural: Arqueología
Geomorfología y riesgos físicos	-	Paisaje y sitios de interés turístico
Suelos	-	-
Hidrografía	-	-

Si bien todo componente ambiental es relevante debido a la conexión y alta interacción que existe entre ellos. Para nuestro caso de estudio hemos determinado, según la ubicación geográfica, Región de coquimbo; la topografía del sector, Montañoso; y la alta presencia de cobertura boscosa, los siguientes elementos como los más relevantes:

- a) Medio Físico: Geología, Geomorfología y riesgos físicos
- b) Medio Biótico: Flora y vegetación
- c) Medio Humano: Asentamientos, instrumentos de ordenamiento territorial, aspectos socio culturales, actividades económicas, infraestructura y equipamiento

Sin perjuicio de lo anterior, se determino un valor específico para cada elemento ambiental, el cual es detalle los siguientes capítulos.

4.1 Breve descripción de los componentes ambientales más relevantes

Medio Físico: Geología, Geomorfología y riesgos físicos

El proyecto conlleva la construcción de obras civiles distribuidas dentro de una unidad geológica principal denominada Unidad Cavilolén. En parte importante de las obras las rocas pertenecientes a dicha unidad, descrita por Rivano y Sepulveda (1991) como granodioritas de biotita y comprobado en terreno (foto 3)



Foto 3. Formación rocosa del sector

se realizarán sobre las secciones superiores del macizo rocoso, que normalmente se encuentra meteorizada a “maicillo” o fuertemente diaclasadas con bajos grados de la alteración. Los depósitos no consolidados representan una parte importante del inicio del tramo, estos pudiendo representar complicaciones al momento de realización de taludes, los cuales a través de su mala competencia podrían generar inestabilidad dadas las pendientes elevadas que estos presentan. En base a lo expuesto anteriormente, se recomienda un análisis geotécnico especializado orientado a los taludes ubicados entre los kilómetros 3 y 8. Dadas las características de roca meteorizada y diaclasada idóneas para la generación de desprendimiento de roca y laderas.

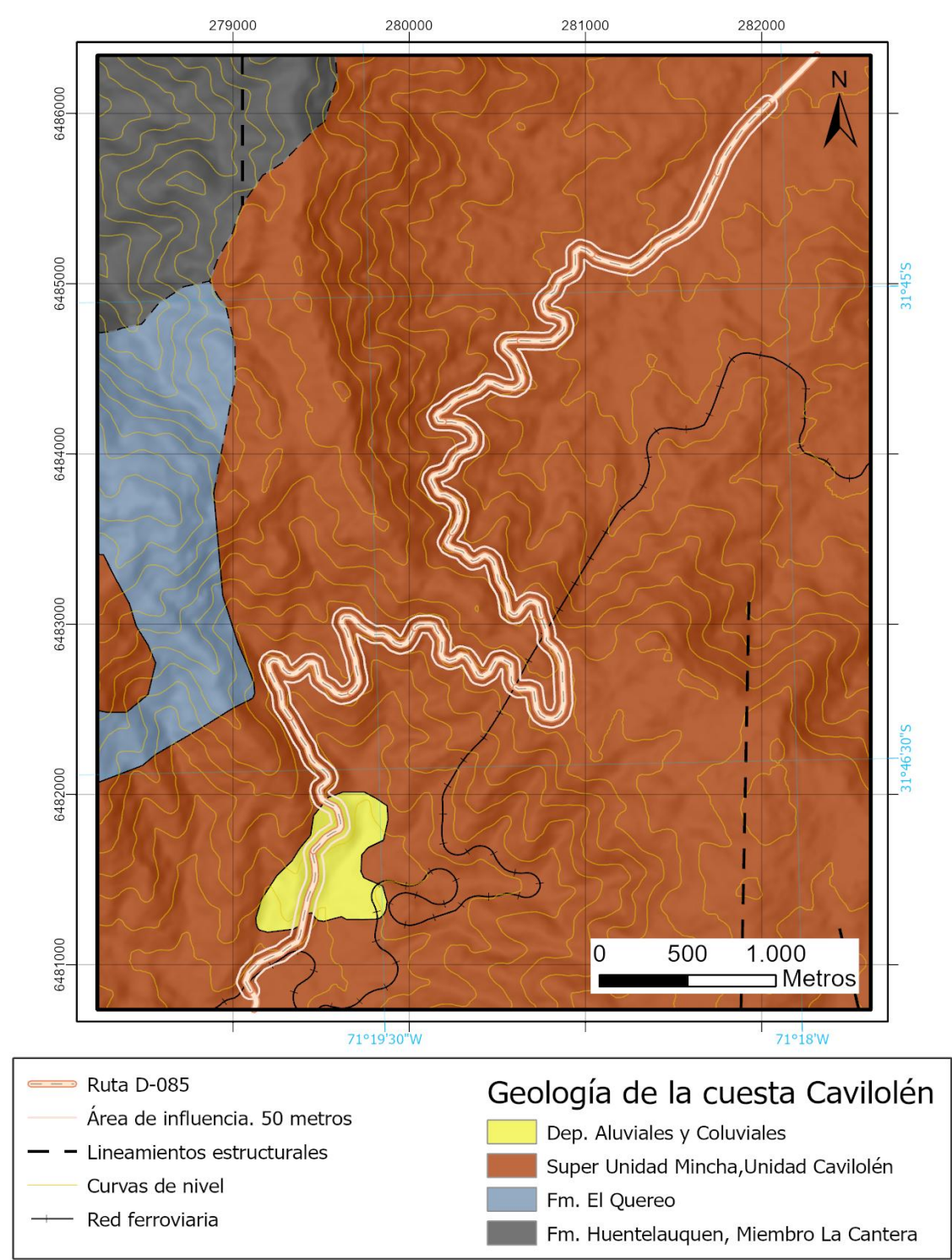


Figura 2. Mapa geológico de la cuesta Cavilolén. Modificado de Rivano y Sepúlveda, (1991).

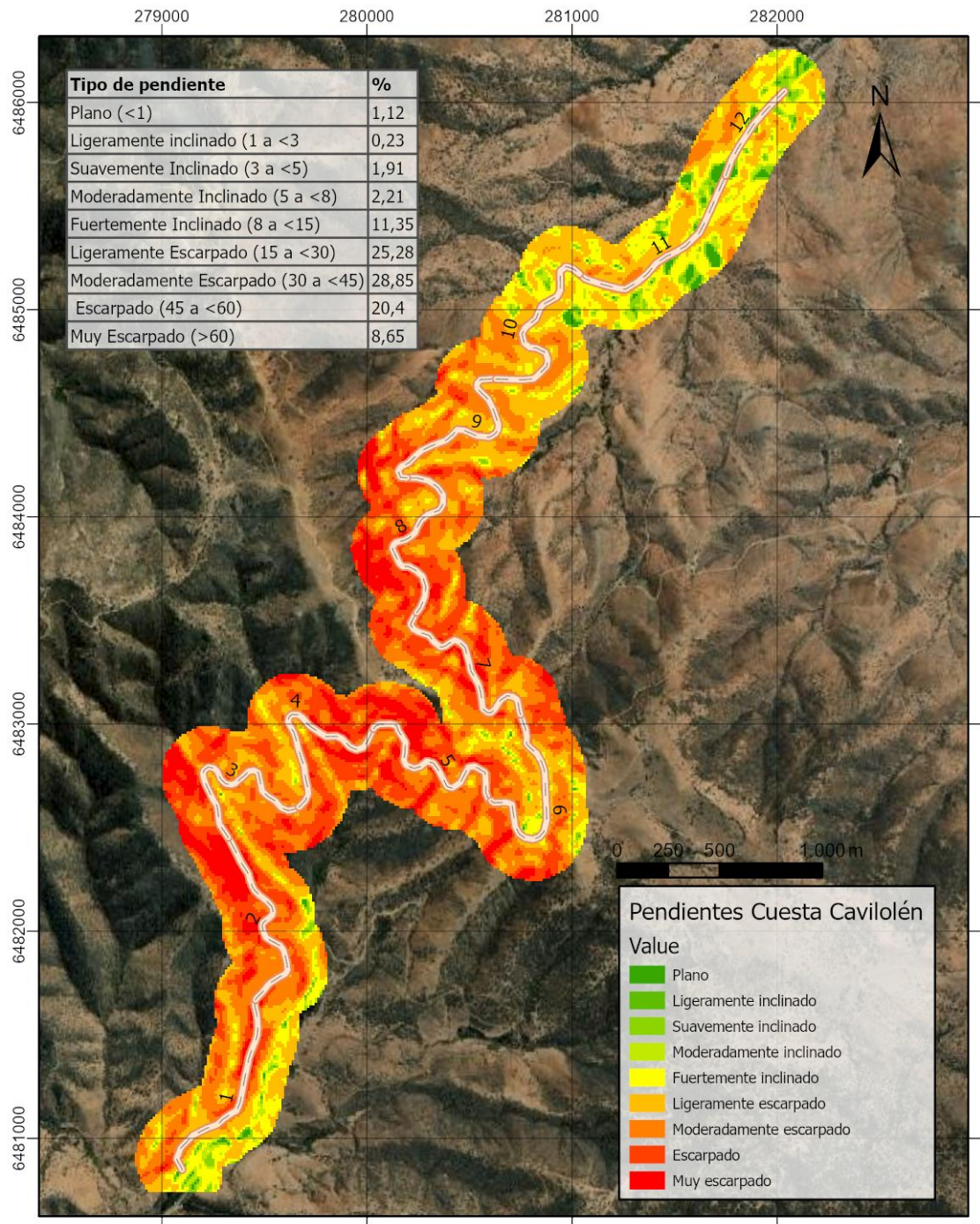


Figura 3. Mapa de pendientes de la cuesta Cavilolén. Clasificación basada en (SAG, 2011).

Medio Biótico: Flora y vegetación

Se identificaron 8 Unidades Homogéneas en el área de estudio del proyecto, a saber: Bosque Nativo, Plantaciones Forestales, Bosque de Exóticas asilvestradas, Matorral con árboles, Matorral Desértico, Formaciones arbóreas que no constituyen bosque y Zonas de escasa Vegetación e Infraestructura y equipamiento. Estas unidades homogéneas comprenden 85 formaciones vegetacionales.

Las unidades homogéneas dominantes corresponden a Bosque Nativo (31,01%), seguido de Matorral con árboles, con un 26,76% y Matorral desértico con 25,43% del área de estudio.

En el área de estudio se registraron las siguientes especies en categoría de conservación: *Alstroemeria pulchra* var. *pulchra*, *Puya chilensis*, *Eulychnia acida* y *Adiantum chilense* var. *chilense*, todas en categoría Preocupación menor “LC” según el RCE. Sin embargo, ninguna de ellas corresponde a especies arbóreas en categoría de conservación, por lo tanto, no se identifica la presencia de bosque nativo de preservación.

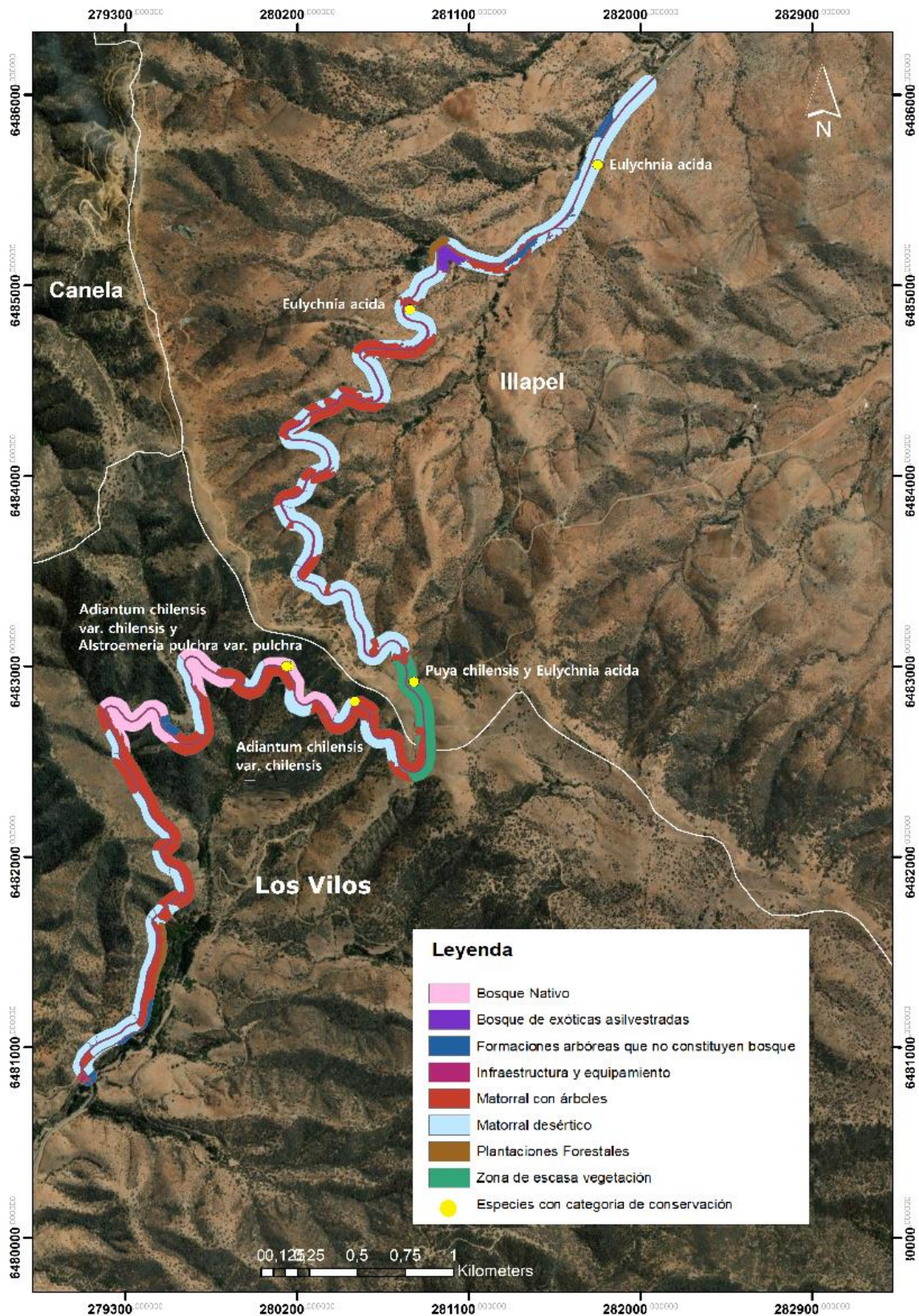


Figura 4. Mapa de Unidades Homogéneas y Especies en Categoría de Conservación.



Foto 4. A) Unidad homogénea "Bosque Nativo"; B) Unidad homogénea "Zona de escasa vegetación"; C) Unidad homogénea "Matorral desértico; D) Unidad homogénea "Matorral con árboles" y E) Unidad homogénea "Plantaciones forestales".

Medio Humano: Asentamientos, instrumentos de ordenamiento territorial, aspectos socio culturales, actividades económicas, infraestructura y equipamiento

ASENTAMIENTOS.

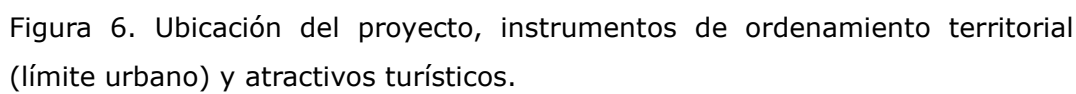
De acuerdo con la prospección realizada in situ, se constató la escasa presencia de grupos humano entorno a la ruta, específicamente en la vertiente este del camino – hacia Illapel - se observó grupos humanos con escasa densidad poblacional, asentamiento conocido como Las Cañas, ubicado aprox. en el km 31.400.



Figura 5. Asentamiento humano Las Cañas. Km 31.400. A) vista general vertiente este del camino y B) detalle del sector Las Cañas.

INSTRUMENTOS DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL.

El estudio se ubica en el área rural de las comunas de Illapel y Los Vilos, cuyos planos Reguladores no involucran el área de estudio (Figura 23), por otro lado, no se identificó ningún otro tipo de instrumento de Ordenamiento territorial, tales como parques nacionales, reservas, etc, o área de desarrollo indígena.



ASPECTOS SOCIO CULTURALES.

Monumentos.

Sólo se constató la presencia de Totems informativos en el sector Las Cañas Sur, ubicados en el Km 28.860, al lado Derecho de la ruta. En estos se relata el desarrollo de actividades productivas, tal vez ancestrales.



Foto 2. Totems descripción de actividades económicas ancestrales. Km 28.860, lado derecho de la ruta.

Fiestas.

Entorno a la ruta no se llevan cabo fiestas costumbristas, religiosas, culturales o espirituales ni ancestrales.

Comunidades vulnerables o protegidas.

El Estudio de Ingeniería, “Mejoramiento Ruta 47, sector Cuesta Cavilolen, región de Coquimbo”; se enmarca en un territorio caracterizado por la baja presencia de población indígena, según datos censales y con nula presencia de organizaciones indígenas, constituida al alero de la Ley 19.253. Se constató la presencia de la Asociación Indígena Antuvilú” localizada en el sector urbano de la comuna de Los Vilos, ubicada a 22 kilómetros al sur poniente del proyecto. Por otra parte, también se constató la existencia de comunidad Diaguita Taucán” en la comuna de Salamanca, a 32 kilómetros al oriente del proyecto, como aquellas organizaciones indígenas más cercanas al área de proyecto.

De este modo, en base a la información expuesta en el documento 1.8. INFORME ANÁLISIS DE PROCEDENCIA DE CONSULTA INDÍGENA del presente estudio y a juicio experto del consultor, no se recomienda la necesidad de realizar un proceso de consulta indígena, dado que si bien existe una asociación indígena al interior del territorio comunal de Los Vilos, los socios y familias que la componen, no ven alterada sus tierras, tampoco esta iniciativa generaría cambio en las tradiciones, costumbres ancestrales, prácticas religiosas, culturales o espirituales, no hay tierras indígenas en el área de influencia, tampoco existe un área de Desarrollo Indígena, ni se generarían modificaciones a las condiciones de uso y acceso a los recursos naturales, ni menos reasentamiento o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres.

Por otra parte, este estudio busca mejorar la condición de la cuesta Cavilolen, y la conectividad entre las comunas de Los Vilos e Illapel, generando con esto, mejoras en la calidad de vida de los campesinos que residen en el sector, así como optimizar los tiempos de desplazamiento, viajes al interior y mejorando la comercialización de los productos base de su actividad económica local.

ACTIVIDADES ECONÓMICAS.

En general, la escasa población que vive entorno a la ruta tienen su lugar de trabajo en Illapel, sin embargo, algunos desarrollan actividades económicas de subsistencia, relaciones con la agricultura y crianza de animales, tales como Aves de corral y ganado caprino (Foto 17).

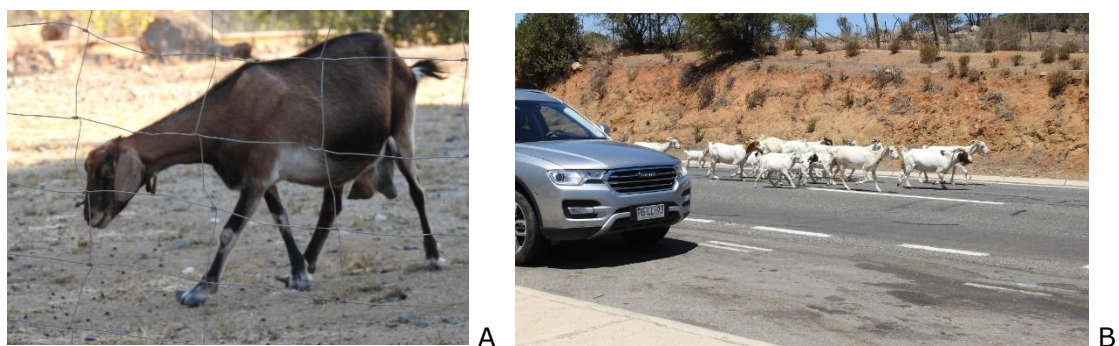


Foto 3. Presencia de ganado caprino, observado en gran parte de la ruta. A) Km 21.000 y B) 33.000.

INFRAESTRUCTURA Y EQUIPAMIENTO.

Infraestructura Comunitaria.

Entorno a la ruta no se constató la presencia infraestructura comunitaria, la más cercana y fuera del área de influencia del proyecto, corresponde a la sede la J.J.VV. Nueva Esperanza, la cual se ubica en el Km 34.000, lado derecho de la Ruta, cuya presidenta es la Sra. Yenny Carvajal (Foto 18).

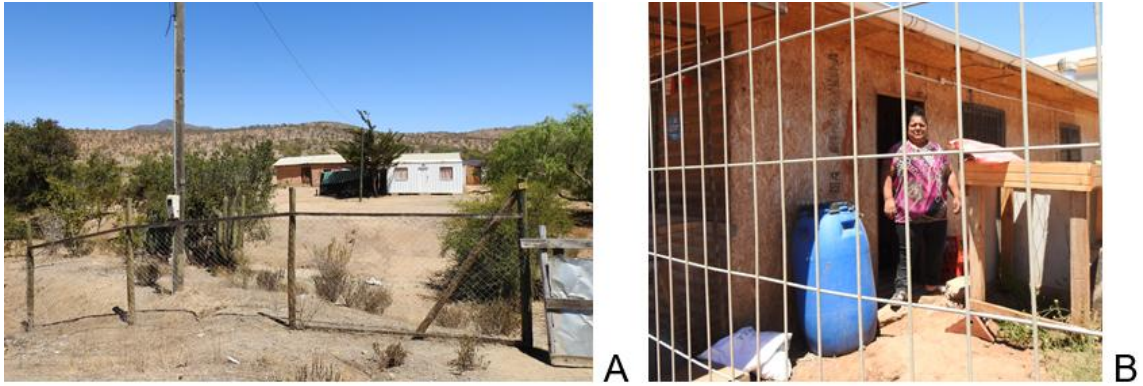


Foto 4. A) Ubicación sede JJ.VV. Nueva Esperanza y B) Sra. Yenny Carvajal, presidenta de la JJ.VV.

Equipamiento y Servicios Básicos.

Se observó infraestructura de servicios entorno a la Localidad de Las Cañas Sur. Con presencia de Luz eléctrica, alcantarillado y agua potable, cabe señalar que, aunque existe el sistema de agua, la comunidad no cuenta con el servicio. Km 28.860 (Foto 19).

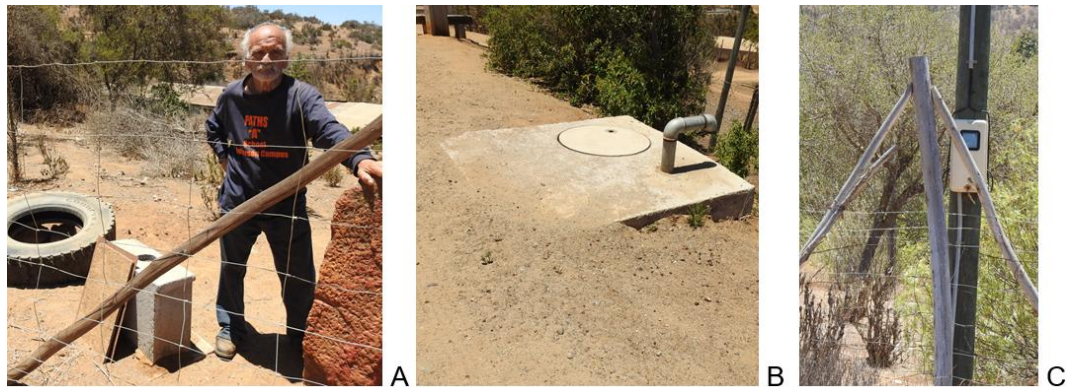


Foto 5. Infraestructura en la Localidad Las Cañas Sur. A) Sr. Rubén Cortez (entrevistado) y presencia de medidor de agua potable, B) Alcantarillado y C) Medido de energía eléctrica.

5. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.

Consiste en la descripción de los trazados tomando en cuenta aspectos geométricos (longitud, pendientes, movimientos de tierra, etc.) y ambientales (geomorfología, arqueología, afectación de uso del suelo, entre otros).

La información es derivada del estudio de ingeniería y visitas a terreno de tipo multidisciplinaria, cada alternativa es recorrida a pie destacando hitos naturales y culturales relevantes, y representada en cartografía temática con la superposición en planta de los antecedentes de ingeniería.

5.1 Identificación de elementos de la ecuación

Factores y elementos

Tal como se indicó en la precedentemente, la ecuación de desarrollo de un proyecto de ingeniería bajo una mirada holística corresponde a:

$$\text{Proyecto} = \overbrace{X + Y + Z}^{\text{Factores}}$$

Cuyos factores X, Y y Z, consideran innumerables elementos, a saber:

$$\text{Proyecto} = \overbrace{(x_1 + x_2 + \dots x_n)}^{\text{Elementos técnicos}} + \overbrace{(y_1 + y_2 + \dots y_n)}^{\text{Elementos ambientales}} + \overbrace{(z_1 + z_2 + \dots z_n)}^{\text{Elementos sociales}}$$

Donde:

En el factor X, se distingue los siguientes elementos:

- X_1 = Diseño geométrico: Velocidad
- X_2 = Tiempos constructivos
- X_3 = Costos
- X_4 = Demanda: Uso de la ruta
- X_n = otros aspectos de ingeniería

En el factor Y, se distingue los siguientes elementos:

- Y_1 = Geomorfología
- Y_2 = Flora – Vegetación
- Y_3 = Fauna
- Y_4 = Patrimonio Arqueológico y/o Paleontológico
- Y_n = otros

En el factor Z, se distinguen los siguientes elementos:

- Z_1 = Presencia asentamientos humanos sensible: iglesia, JJ.VV., postas, escuelas, etc.
- Z_2 = Presencia de grupos humanos protegidos
- Z_3 = Expropiación: reasentamiento
- Z_4 = Grupos humanos cercanos a obras: afectación por ruido, vibraciones, emisiones, etc.
- Z_n = otros

La determinación de los elementos de cada factor corresponde al resultado de un proceso multidisciplinario, a cargo del especialista ambiental (Ing. Civil, Especialista en evaluación ambiental o proyectista)

5.2 Análisis de alternativas: escala de ponderación y peso por elemento.

El proceso de selección del trazado definitivo derivará de una discusión multi e interdisciplinaria. En ella, cada especialista fundamenta su opinión técnica respecto a ventajas y desventajas en función de la evaluación de los riesgos e impactos sobre el elemento de interés.

Previo a dicha opinión, es necesario cuantificar un conjunto de circunstancias que absorben la impronta del área de estudio y del diseño de ingeniería.

A continuación, se indican los principales elementos involucrados, según cada factor:

Factor: Ingeniería

Elementos

- Volúmenes de escarpe, cortes y terraplenes
- Velocidad de diseño
- Costo

Factor: Ambientales

Elementos

- Afectación del patrimonio cultural: Cuantificada en número de sitios o hallazgos afectados (N°)
- Afectación de bosque nativo: Cuantificada en superficie (ha)
- Afectación de unidades vegetacionales en estado de conservación: Cuantificada en unidades (N°)

Factor: Social

Elementos

- opinión y/o aprobación del proyecto por parte de la comunidad

En el seno de la discusión interdisciplinaria se procederá ponderar los elementos de cada factor en una escala porcentual, determinada por el grado de importancia del factor.

5.3 Rangos y ponderación de afectación de cada elemento: Factor ambiental y social

En esta etapa cada especialista, procedió a ponderar la afectación de cada elemento en escala de notas de 1 a 100, en 4 niveles distintos, donde cada nivel corresponde a:

Tabla 1. Rangos y Ponderación

Nivel de afectación:	Ponderación
Muy bajo	0-15
Bajo	16-30
Alto	31-75
Muy alto	76-100

Peso por elemento.

Corresponde al porcentaje de importancia por cada elemento y es determinado por cada especialista, según dirección por parte del Ingeniero encargado del proyecto. Para el caso de estudio se valorizaron todos los componentes ambientales según su importancia en el entorno y su nivel de afectación mencionado anteriormente.

En el caso de los valores calculados para el factor ambiental y social, se determinó lo siguiente:

Si valor porcentual del elemento es igual o mayor al 10% respecto del valor total del factor ambiental, este deberá ser considerado dentro de la ecuación final, donde procederá a tener una nueva valorización con relación a los 3 factores (ingeniería, ambiental y social)

Medio Físico	Peso del elemento	Relación Porcentual por elemento (%)	Relación Porcentual Total (%)
Calidad del aire y ruido	10	10%	3,3
Geología	30	30%	10,0
Geomorfología y riesgos físicos	40	40%	13,3

Suelos	10	10%	3,3
Hidrografía	10	10%	3,3
Total, Componente	100	100%	33,3

Medio Biótico	Peso del elemento	Relación Porcentual por elemento (%)	Relación Porcentual Total (%)
Flora y vegetación	80	80%	26,7
Fauna	20	20%	6,7
Total, Componente	100	100%	33,3

Medio Humano	Peso del elemento	Relación Porcentual por elemento (%)	Relación Porcentual Total (%)
Asentamientos, instrumentos de ordenamiento territorial, aspectos socio culturales, actividades económicas, infraestructura y equipamiento	20	20%	6,7
Patrimonio histórico y cultural: Arqueología	70	70%	23,3
Paisaje y sitios de interés turístico	10	10%	3,3
Total, Componente	100	100%	33,3

Según lo desarrollado, los elementos ambientales mas determinantes para la ecuación final son:

- a) Medio Físico: Geología, Geomorfología y riesgos físicos
- b) Medio Biótico: Flora y vegetación
- c) Patrimonio histórico y cultural: Arqueología

5.4 Rangos y ponderación de afectación de cada elemento: Factor ingeniería

Para esta etapa cada, la empresa a cargo de la ingeniería vial desarrollo su trabajo basado en imponer un perfil más amplio al que existe actualmente y considerando que el trazado actual del tramo de la ruta en estudio se desarrolla prácticamente en su totalidad a media ladera, lo cual considera la proyección de cortes a gran escala, los que se podrían componer en un porcentaje importante de material rocoso y con alturas que en algunos casos podrían superar los 10 a 15 m.

También se considero la necesidad de aumentar la velocidad de circulación de la ruta, la que actualmente es de 30 km/h.

Para poder dar cumplimiento a las necesidades antes mencionadas, se presentaron 2 trazados o alternativas, que se diferenciaron de la velocidad de diseño, siendo una para 40km/h y la otra para 50km/h.

Aunque la diferencia de velocidad pareciera no ser sustancial, desde el punto de vista geométrico están conllevan grandes diferencias en sus radios de giro y en los cortes de terreno generados. Junto a lo anterior, la valorización monetaria de la construcción de una u otra alternativa también fue sustancial.

La siguiente tabla detalla todas las diferencias entre alternativas y las valoriza de manera porcentual, de manera que sea más fácil determina que factores ingresan en la ecuación final

Alternativas	Velocidad de diseño (km/h)	valorización Monetaria (CLP)	Movimiento de tierra		
			Escarp e	Corte	terraplén
Alternativa A	40	36.709.224.590	21.891	1.374.348	93.351
Alternativa B	50	44.354.527.553	18.913	2.804.913	128.980
Diferencia %	25%	21%	-14%	104%	38%

En resumen, los posibles elementos que podrían ser parte de la ecuación final, en el apartado del factor de ingeniería son los siguientes:

- Velocidad de diseño
- Valoración monetaria (CLP)
- Escarpe
- Corte
- Terraplén

Si bien, desde el punto de vista porcentual, el elemento “corte” es quien más presenta diferencias entre las alternativas, es el elemento “Costo” quien asumen la responsabilidad final. Pues este elemento es indispensable en la decisión final por parte del ministerio de obras públicas, según sus planes de presupuestos.

6. RESULTADOS

Según el análisis anterior, los elementos de cada factor son los siguientes

Factor ingeniería (X):

Costo (X_1)

Factor ambiental (Y)

- Geología, Geomorfología y riesgos físicos (Y_1) (*Medio físico*)
- Flora y vegetación (Y_2) (*Medio Biótico*)
- Patrimonio histórico y cultural: Arqueología (Y_3) (*Medio Humano*)

Factor Social (Z)

- Resultados de la participación ciudadana

Quedando la ecuación del desarrollo de la siguiente manera

$$\text{Proyecto} = X + (Y_1 + Y_2 + Y_3) + Z$$

Finalmente, la alternativa seleccionada será aquella que obtenga el mayor valor en la sumatoria de las ponderaciones

6.1 Descripción de alternativas

6.1.1 Factor técnico.

ALTERNATIVA A. 40 (km/h)

A. Diseño geométrico

Se considera un mejoramiento del trazado en planta y vertical, disminuyendo la cantidad de curvas del camino existente de 112 a 73 curvas, con radio mínimo de 50 m, es decir con una V_p de 40 km/hr. Se contempla tercera pista para el tránsito de vehículos lentos.

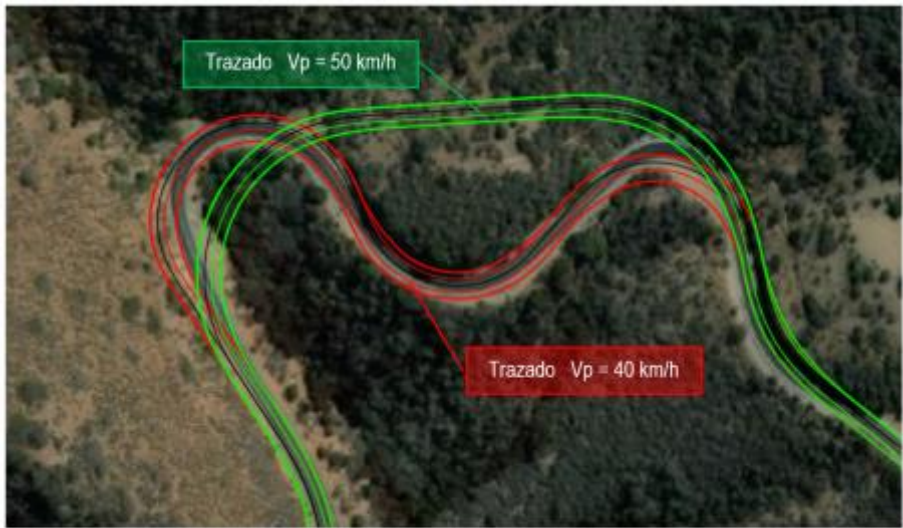


Figura 4: Trazado con distintas Vp sector km 23,9 al km 24,4

El perfil se compone de dos pistas de 3,5 m de ancho y una tercera pista de 3,0 m de ancho (**Figura 29**). En esta alternativa el ancho de berma se considera de 50 cm.

Como se mencionó en el punto anterior, el camino se dividió en dos sectores denominados Los Vilos e Illapel, cuya sectorización respecto del kilometraje del diseño geométrico es:

- Sector Los Vilos
Dm 21.605 al Dm 27.450
Longitud= 5.845 m
- Sector Illapel
Dm 27.140 al Dm 32.872
Longitud= 5.732 m

Extensión Alternativa A

- Dm 21.605 al Dm 32.872
Longitud= 11.267 m

B. Movimiento de tierra

El siguiente cuadro se indica el volumen acumulado (m³), para conformación de terraplenes y cortes de TCN.

Tabla 3. Rangos y Ponderación

Volumen (m ³)	Alt A: 40 (km/h)
Escarpe	21.891
Corte	1.374.348
Terraplén	93.351

C. Costos

El costo para la construcción de la alternativa A, asciende a la suma de \$ **36.709.224.590** y contempla las siguientes obras y acciones, Preparación del área de trabajo, movimiento de tierra, capas granulares, revestimientos y pavimentos, estructuras y obras conexas, drenaje y protección de la plataforma, elementos de control y seguridad y varios.

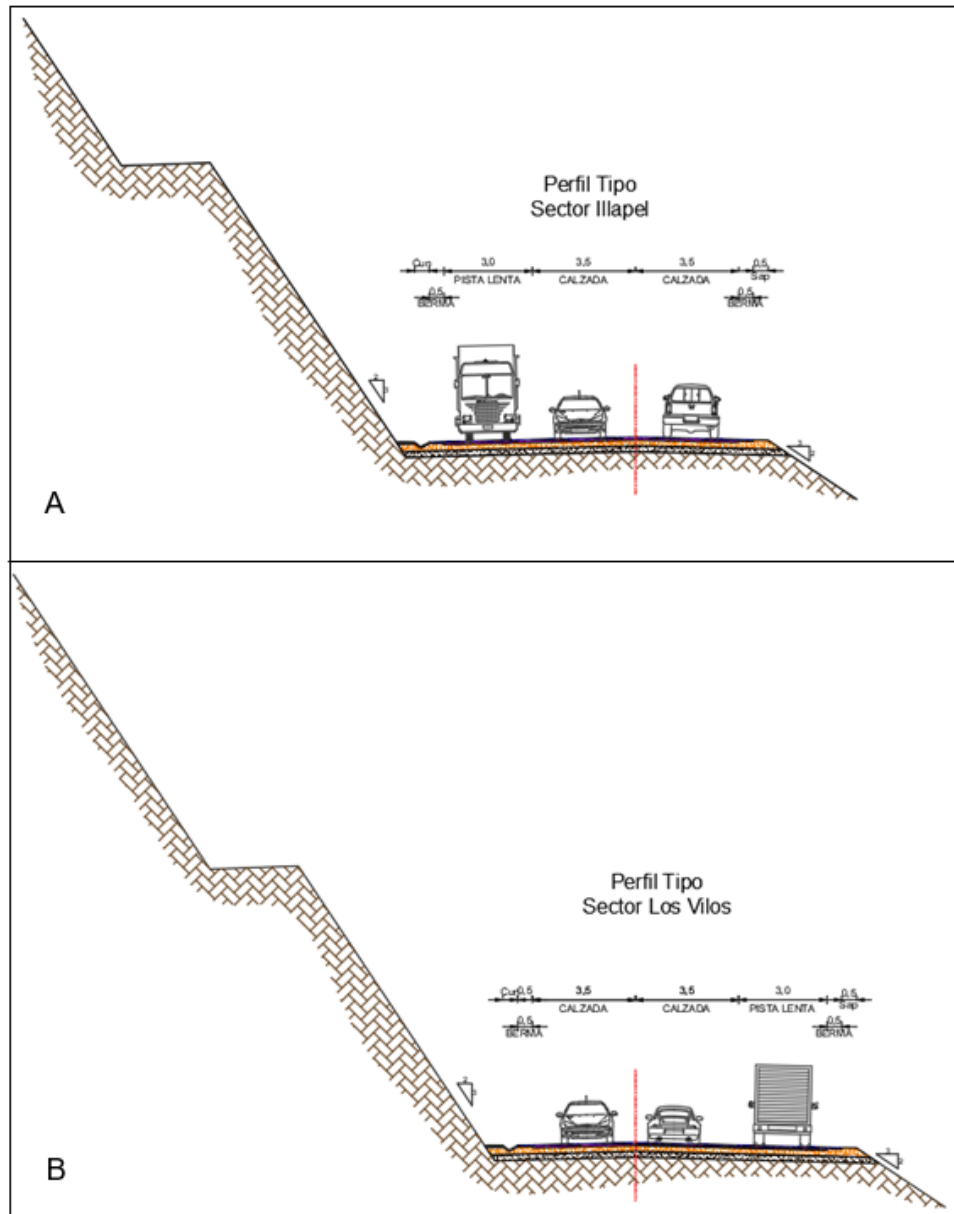


Figura x2. Perfil Tipo Alternativa A, A) Sector Illapel, Dm 27.140 al Dm 32.872 y B) Sector Los Vilos, Dm 26.605 al Dm 27.450.

ALTERNATIVA B. 50 (km/h)

A. Diseño geométrico

Se considera un mejoramiento del trazado en planta y vertical, disminuyendo la cantidad de curvas del camino existente de 112 a 55 curvas, con radio mínimo de 80 m, es decir con una **Vp de 50 km/hr**. Se contempla tercera pista para el tránsito de vehículos lentos.

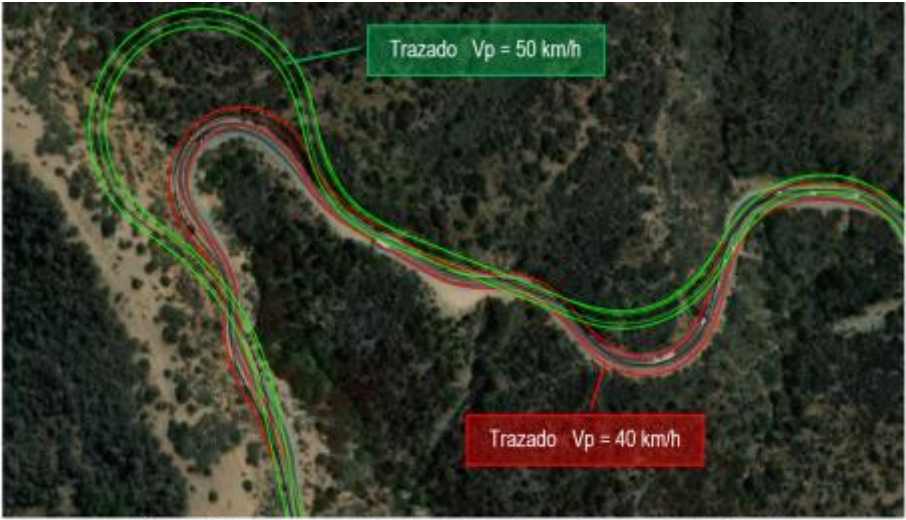


Figura 5: Trazado con distintas Vp sector km 24,9 al km 26,7

El perfil se compone de dos pista de 3,5 m de ancho y una tercera pista de 3,0 m de ancho (**Figura 30**). En esta alternativa el ancho de berma se considera de 50 cm.

Como se mencionó en el punto anterior, el camino se dividió en dos sectores denomina Los Vilos e Illapel, cuyos sectorizacion respcto del kilometraje del diseño geopmetrico es:

- Sector Los Vilos
Dm 21.605 al Dm 26.990
Longitud= 5.385 m
- Sector Illapel
Dm 27.140 al Dm 32.230
Longitud= 5.090 m

Extension Alternativa B

- Dm 21.605 al Dm 32.230
Longitud= 10.625 m

B. Movimiento de tierra

El siguiente cuadro se indica el volumen acumulado (m³), para conformación de terraplenes y cortes de TCN.

Tabla 5. Rangos y Ponderación

Volumen (m³)	Alt B: 50 (km/h)
Escarpe	18.913
Corte	2.804.913
Terraplén	128.98

C. Costos

El costo para la construcción de la alternativa B, asciende a la suma de \$ **44.354.527.553** y contempla las siguientes obras y acciones, Preparación del área de trabajo, movimiento de tierra, capas granulares, revestimientos y pavimentos, estructuras y obras conexas, drenaje y protección de la plataforma, elementos de control y seguridad y varios.

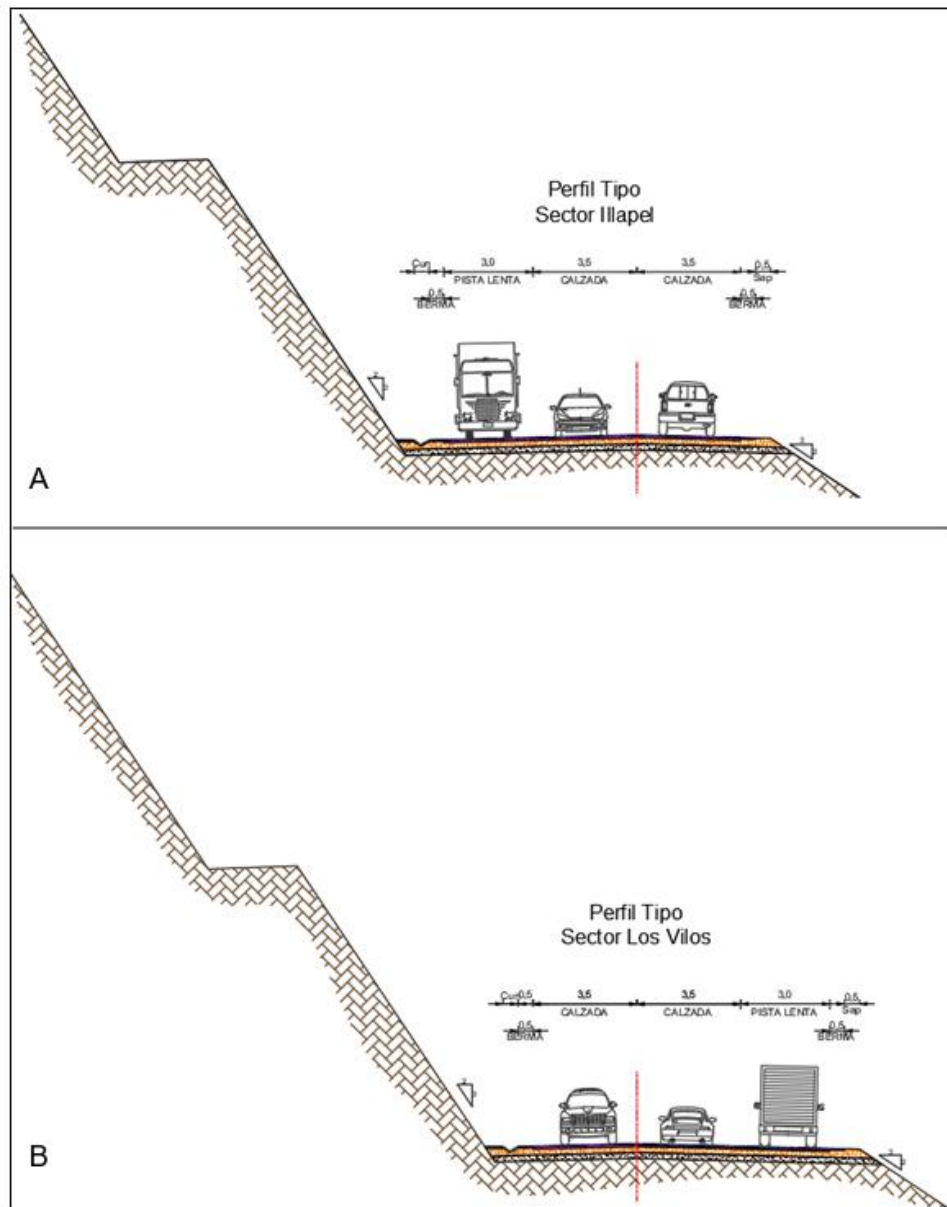


Figura X3. Perfil Tipo Alternativa B. A) Sector IIIapel, 27.140 al Dm 32.230. y B) Sector Los Vilos, Dm 26.605 al Dm 26.990.

6.1.2 Factor Ambiental.

ALTERNATIVA A. 40 (km/h)

A. Afectación de unidades ambientales.

A.1. Afectación de Patrimonio arqueológico

La alternativa afecta 8 animitas.

A.2 Afectación de Geología, geomorfología y riesgos físicos

La afectación a dicho medio físico tiene directa relación con los movimientos de tierra que podría realizar el proyecto, en ese sentido la alternativa A genera cortes de:

Alternativa A	Volumen (m³)
Escarpe	21.891
Corte	1.374.348
Terraplén	93.351

Esto se traduce ambientalmente en un mayor riesgo a la remoción de material que pudiese generar deslizamiento de tierra y alto riesgo de derrumbe si no se cuentan con las medidas de mitigación necesarias.

A. 3 afectación de unidades ambientales.

Respecto de las unidades vegetacionales más relevantes y sujetas a afectación, por la alternativa A, corresponden Bosque Nativo, Matorral Desértico y Matorrales con árboles (**Tabla 4**).

Tabla 4 Superficie (m²) de afectación de unidades homogéneas por alternativas.

Unidades Homogéneas	Alt A: 40km	
	Superficie Afectada (ha)	% total de afectación
Bosque de exóticas asilvestradas	0,12	0,33
Bosque nativo	10,12	27,46
Formaciones arbóreas que no constituyen bosque	0,43	1,17
Infraestructura y equipamiento	8,08	21,93
Matorral con árboles	8,13	22,06
Matorral desértico	8,78	23,83
Plantaciones Forestales	0,01	0,03
Zona de escasa vegetación	1,18	3,20
Total (ha)	36,85	100%

ALTERNATIVA B. 50 (km/h)

A. Afectación de unidades ambientales.

A.1. Afectación de Patrimonio arqueológico

La alternativa afecta un total de 8 animitas.

A.2 Afectación de Geología, geomorfología y riesgos físicos

La afectación a dicho medio físico tiene directa relación con los movimientos de tierra que podría realizar el proyecto, en ese sentido la alternativa A genera cortes de:

Alternativa B	Volumen (m³)
Escarpe	18.913
Corte	2.804.913
Terraplén	128.98

Esto se traduce ambientalmente en un mayor riesgo a la remoción de material que pudiese generar deslizamiento de tierra y alto riesgo de derrumbe si no se cuentan con las medidas de mitigación necesarias.

A.3. Afectación de unidades ambientales.

Respecto de las unidades vegetacionales más relevantes y sujetas a afectación, por la alternativa A, corresponden Bosque Nativo, Matorral Desértico y Matorrales con árboles (**Tabla 6**).

Tabla 6. Unidades vegetacionales más relevantes y sujetas a afectación.

Unidades Homogéneas	Alt B: 50km	
	Superficie Afectada (ha)	% total de afectación
Bosque de exóticas asilvestradas	0,22	0,54
Bosque nativo	13,30	32,42
Formaciones arbóreas que no constituyen bosque	0,46	1,12
Infraestructura y equipamiento	5,71	13,92
Matorral con árboles	8,37	20,40
Matorral desértico	10,96	26,72
Plantaciones Forestales	0,04	0,10
Zona de escasa vegetación	1,96	4,78
Total (ha)	41,02	100%

6.1.3 Factor Humano.

La participación ciudadana realizada el 19 de mayo del 2022 en el sector de las cañas sur, mostro resultados muy favorables por parte de la comunidad hacia la realización del proyecto. Mostrándose optimistas hacia el futuro, pues es un proyecto anhelado por años, que, si bien no tiene una relación directa con sus actividades cotidianas, mejoraría el uso actual de la ruta, aportando a descongestionar una zona altamente transitada por vehículos de alto tonelaje, que genera un taco que muchas veces impide el tránsito normal y genera enormes preocupaciones en casos de traslados de emergencia.

6.2 RESULTADO DEL ANÁLISIS DE ALTERNATIVA

Para el análisis final y determinar cuál alternativa es la mejor desde todos los puntos de vista de todos los componentes mencionados, es necesario realizar un último análisis, tomando en cuenta cada factor, añadiéndole un valor y creando una tabla comparativa entre las alternativas.

El resultado final de todas las variables mencionadas dará la respuesta a la mejor alternativa para el proyecto

Para tal efecto el primer paso es realizar la tabla de ponderaciones con la cual cada factor será evaluado con nota de 1 a 4 según una ponderación gradual que indica si su aporte al proyecto es bueno o malo

Pon:	Ponderación
Muy Bueno	4
Bueno	3
Regular	2
Malo	1

Junto a lo anterior es necesario dar una ponderación a cada factor de la ecuación. Para tal efecto se considero todo lo estudiado en el área del proyecto, con el equipo de ingeniería vial, conversaciones con la comunidad, resultados de líneas de bases y ponderaciones junto al mandante, dando como resultado lo siguiente:

Factor técnico.

El proyecto es una “mejora” a un camino ya existen, que, si bien es prioridad para la comunidad, el hecho de no llegar a realizarse, tampoco conllevara mayor problema al ya existente, junto a lo anterior, la materialización del proyecto conlleva un gran gasto publico que dependerá solo de los gastos asignados cada año, por tales motivos, el factor técnico tiene 10% de ponderación dentro de la ecuación.

Factor ambiental.

De acuerdo con lo mencionado en los apartados anteriores, el factor ambiental es clave para el desarrollo del proyecto dada su ubicación, la exposición del sol de la ladera en la cual se ubica, su ubicación geográfica y su grave escasez hídrica, la gran cantidad de remoción de material que será necesaria para la construcción y la directa relación entre lo mencionado y la afectación al bosque nativo aledaño al camino existente.

Luego de conversaciones inter y multidisciplinarias la ponderación para el factor ambiental es del 65%.

Factor social.

La opinión de la comunidad cada vez es más fundamental para el desarrollo de cualquier proyecto y este caso no dejar de serlo, y aunque la comunidad aledaña a este proyecto se encuentra solo al final del mismo, no dejar de ser importante su opinión por su uso habitual y su conexión, casi única, para trasladarse a distintos lugares de la zona.

Luego del resultado de la participación ciudadana, donde la comunidad se pronuncio a favor del proyecto, pero realizando algunas mejoras en sus métodos de construcción, añadiendo algunos ítems específicos como señalización e iluminación se decidió darle un valor del 25% al factor social.

En resumen, las ponderaciones para cada factor son las siguientes

- Factor técnico: 10%
- Factor ambiental: 65%
- Factor social: 25%

Finalmente, para obtener la ponderación definitiva por cada alternativa solo es necesario multiplicar el porcentaje de cada factor por la nota de ponderación. Representado de la siguiente manera.

Alternativas	Factor técnico (10%)		Factor Ambiental (65%)						Factor Humano (25%)		Ponderación Final
	Costos (\$)	10 %	Geología, geomorfología y riesgos (m3)	25 %	Afectación Bosque Nativo (ha)	35%	Afectación patrimonio (Nº)	5%	Aprobación	25%	
	Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	Peso	
A	36.709.224.590	0,30	1.374.394	0,75	10	1,05	8	0,05	SI	1,00	3,15
B	44.354.527.553	0,20	2.804.913	0,25	13	0,35	8	0,05	SI	1,00	1,85

Tabla de matriz de valorización de cada alternativa

A	3	A	3	A	3	A	1	A	4
B	2	B	1	B	1	B	1	B	4

Tabla de ponderaciones

7. CONCLUSIONES.

De acuerdo con la matriz de evaluación multicriterio y los análisis realizados, la Alternativa A (Velocidad de diseño $V_p = 40$ km/h) resulta ser la opción recomendada al obtener una ponderación final de 3,15 frente a los 1,85 alcanzados por la Alternativa B ($V_p = 50$ km/h).

Esta selección se respalda fuertemente en los siguientes factores técnicos, ambientales y sociales:

Factores Técnicos y Económicos:

- Menor Costo Financiero: La Alternativa A requiere una inversión total de \$36.709.224.590 CLP, lo que representa un ahorro de \$7.645.302.963 CLP (aproximadamente un 21% más económica) en comparación con los \$44.354.527.553 CLP de la Alternativa B.
- Viabilidad Constructiva y Geometría: Aunque la Alternativa B eleva la velocidad en 10 km/h, esto obliga a generar radios de giro más amplios que impactan severamente el terreno. La Alternativa A mantiene soluciones geométricas de menor envergadura, reduciendo la necesidad de ejecutar obras complejas como cortes masivos, terraplenes desmedidos o muros de contención de gran altura

Factores Ambientales:

- Menor Alteración Geomorfológica y Riesgos Físicos: La Alternativa A involucra un volumen de corte de 1.374.348 m³, lo que es menos de la mitad del volumen requerido por la Alternativa B (2.804.913 m³). Esto disminuye drásticamente la intervención sobre las pendientes de la ladera, reduciendo la alteración del paisaje y el riesgo potencial de desprendimientos o deslizamientos de tierra.
- Protección del Bosque Nativo y Vegetación: La Alternativa A afecta un total de 10,12 ha de Bosque Nativo (27,46% del total afectado por la alternativa), mientras que la Alternativa B afecta 13,30 ha (32,42%). Asimismo, la superficie total intervenida en unidades homogéneas vegetacionales es menor en la Alternativa A (36,85 ha) en comparación con la B (41,02 ha)
- Patrimonio Cultural: Ambas alternativas presentan el mismo nivel de afectación sobre el patrimonio identificado, interviniendo únicamente 8 animitas.

Factores Sociales:

- Ambos trazados cuentan con la aprobación y percepción favorable de la comunidad según el proceso de participación ciudadana. La comunidad

considera el proyecto como un anhelo de años que descongestionará la ruta y mejorará los tiempos de traslado y emergencias entre Los Vilos e Illapel. Sin embargo, la Alternativa A logra estos beneficios sociales minimizando las molestias asociadas a mayores tiempos u obras de construcción.

Las ponderaciones asignadas en el estudio responden a una matriz parametrizada y fundamentada en la realidad territorial y técnica del proyecto:

Factor Técnico (10%):

- Justificación: El proyecto corresponde a una obra de mejoramiento, rectificación y ensanche sobre una faja vial preexistente (Ruta 47) y antropizada. Al no tratarse de la apertura de un trazado completamente nuevo en suelo virgen, la incertidumbre constructiva y la complejidad técnica son menores. Además, la factibilidad técnica está supeditada al marco presupuestario del sector público. Por la regla del modelo, el factor técnico se reduce para evitar que la conveniencia constructiva enmascare los impactos ambientales.

Factor Ambiental (65%):

- Justificación: Se establece como el eje primario y dominante de la evaluación debido a la alta fragilidad del ecosistema semiárido en la Región de Coquimbo. La presencia de Bosque Nativo en la zona representa más del 31% del área de estudio y se concentra en quebradas y laderas específicas. La remoción de vegetación y los grandes movimientos de tierra en este entorno generan una pérdida ecológica crítica y de difícil recuperación.

Factor Social (25%):

- Justificación: Aunque la densidad demográfica directa a lo largo del tramo es baja (asentamiento acotado en Las Cañas Sur), la Ruta 47 posee un rol estratégico clave como vía única de conectividad entre Los Vilos e Illapel, el transporte de la producción agrícola/minera local y la gestión de emergencias. Se eleva su peso respecto a lo meramente demográfico para garantizar la aceptación comunitaria y la integración territorial.

En conclusión, la evaluación holística e integrada de las dimensiones del proyecto — expresada mediante la ecuación general Proyecto = X + Y + Z (donde X representa los Factores Técnicos, Y los Ambientales y Z los Sociales)— demuestra cuantitativa y cualitativamente que la Alternativa **A** ($V_p = 40\text{km/h}$) constituye la solución óptima y sustentable para el mejoramiento de la Ruta 47 en la Cuesta Cavilolén.

El incremento de 10 km/hr en la V_p tiene un fuerte impacto en los sectores más restrictivo del trazado de la cuesta. Por lo que el desarrollo de soluciones con una V_p

mayor a las mencionadas generará en los sectores más restrictivos obras complejas de materializar, por que necesariamente se deberán ejecutar cortes de gran envergadura o terraplén y muros de contención de alturas considerables, lo que inducirá una mayor afectación de las unidades ambientales relevantes, tales como el bosque nativo.

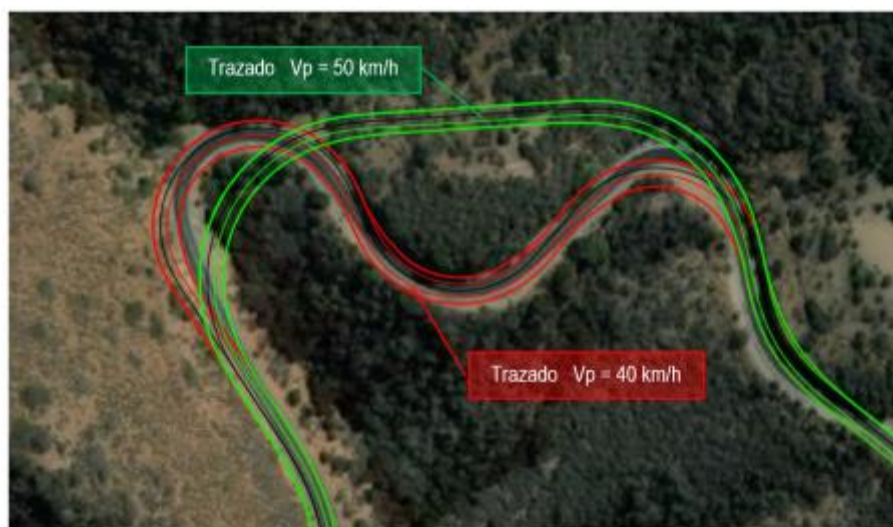


Figura 7. Trazado con distintas Vp sector Km 23,9 al km 24,4



Figura 8. Trazado con distintas Vp sector Km 24,9 al km 26,

A través del modelo matemático parametrizado, se determinaron ponderaciones finales de 10% para el Factor Técnico (X1: Costo), 65% para el Factor Ambiental (Y1: Geología y Riesgos, Y2: Bosque Nativo, Y3: Patrimonio) y 25% para el Factor Social (Z1: Aprobación Ciudadana). Al aplicar la función de valoración global $Alternativa_n = (x_1 + \dots + x_n) + (y_1 + \dots + y_n) + (z_1 + \dots + z_n)$, la Alternativa **A** alcanzó una ponderación final de 3,15 puntos frente a los 1,85 puntos de la Alternativa B.

Este resultado valida matemáticamente una opción que, al tiempo que satisface las demandas sociales de conectividad y seguridad vial entre Los Vilos e Illapel con pleno respaldo comunitario, minimiza los impactos críticos del entorno al reducir el volumen de cortes a menos de la mitad ($1.374.348m^3$ vs. $2.804.913m^3$) y proteger más de 3 hectáreas de Bosque Nativo en una zona semiárida frágil (10,12ha vs. 13,30ha), todo

esto optimizando el gasto público con un ahorro presupuestario superior a los \$7.600 millones de pesos. De este modo, la Alternativa **A** se consolida como la propuesta técnicamente más sólida, económicamente factible y ambientalmente responsable para la ejecución de la obra.

La utilización de métodos comparativos lineales permite justificar matemáticamente en cualquier memoria o evaluación de impacto ambiental por qué un proyecto en el norte semiárido o sobre una faja existente pondera distinto que un proyecto de apertura en el sur de Chile. Además, entrega un sustento metodológico sólido ante comisiones evaluadoras, demostrando que los porcentajes no fueron asignados al azar, sino derivados de una matriz parametrizada.

Cabe destacar que la formulación matemática e iterativa aplicada en este estudio no constituye un esquema rígido ni estático, sino más bien una estructura parametrizada perfeccionable tanto en forma como en fondo.

Esta flexibilidad metodológica resulta ser, precisamente, la mayor virtud del modelo: al no tratarse de un algoritmo lineal de ponderación fija, permite incorporar futuras calibraciones en las funciones de valor y en la definición de sus coeficientes de ajuste diferencial (Δ_i).

De esta forma, la metodología consolida una matriz adaptable y transferible a diversos tipos de proyectos de infraestructura y contextos territoriales, siempre que exista un conocimiento técnico-operativo adecuado del entorno biogeográfico y se mantenga una definición rigurosa y explícita en las reglas de borde de sus factores principales.

8. BIBLIOGRAFIA Y FUENTE DE LA INFORMACION

Dodgson, J., Spackman, M., Pearman, A., & Phillips, L. (2009).

Multi-Criteria Analysis: A Manual.

Department for Communities and Local Government, London.

Macharis, C., Springael, J., De Brucker, K., & Verbeke, A. (2009).

PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis.

European Journal of Operational Research.

Saaty, T. L. (1980).

The Analytic Hierarchy Process.

McGraw-Hill.