



Centro UC
CLAPES UC
Centro Latinoamericano de
Políticas Económicas y Sociales

INCORPORACIÓN DE RESILIENCIA EN LA EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS VIALES EN CHILE

Junio, 2026

Hernán de Solminihac | Miembro del Comité Ejecutivo CLAPES UC
Josefina Almendra Dagá | Investigadora CLAPES UC



DOC. DE TRABAJO
N° 164

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO.....	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. RESILIENCIA, DISTINTOS ENFOQUES.....	6
2.1 Resiliencia de la Infraestructura	6
2.2 Resiliencia del Servicio	7
3. EVIDENCIA INTERNACIONAL SOBRE RESILIENCIA.....	8
4. EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS ACTUAL.....	13
4.1 Análisis Costo-Eficiencia (CEA)	14
4.2 Análisis Costo-Beneficio (CBA)	18
5. EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS PROPUESTA	20
6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	30
6.1 Evaluación con Metodología Tradicional	34
6.2 Evaluación con Metodología Propuesta.....	36
7. CRITERIO DE ACEPTACIÓN DEL PROYECTO	42
8. RESPETAR EL CONCEPTO DE PROPORCIONALIDAD	45
9. CONCLUSIÓN	46
BIBLIOGRAFÍA.....	51
ANEXOS	57

INCORPORACIÓN DE RESILIENCIA EN LA EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS VIALES EN CHILE

RESUMEN EJECUTIVO

Chile es uno de los países con mayor exposición a amenazas naturales, especialmente sísmicas. Sin embargo, la evaluación social de proyectos de infraestructura vial continúa basándose en un enfoque determinista que no incorpora explícitamente el riesgo de interrupciones, impidiendo capturar el valor real de la resiliencia.

Este documento propone complementar el análisis costo-beneficio tradicional mediante un VAN probabilístico estimado con simulaciones de Monte Carlo y curvas de fragilidad sísmica. El resultado deja de ser un valor puntual y pasa a representarse como una distribución que refleja incertidumbre y riesgo, sin salir del marco analítico que el MDSF ya reconoce y valida.

La aplicación al Puente Los Molles de la Ruta 5 ilustra el potencial del enfoque: un proyecto que la evaluación tradicional rechaza por tener beneficios nulos en condiciones normales (con VANS negativo) pasa a tener un VANS esperado de \$43 mil millones bajo la metodología propuesta, revirtiendo completamente la decisión de inversión. El valor del proyecto no se manifiesta en condiciones ordinarias, sino en los escenarios de falla donde su aporte es sustancial.

Integrar resiliencia en la evaluación social no implica reemplazar la metodología vigente, sino fortalecerla. En un país altamente expuesto a desastres naturales, avanzar hacia una evaluación que internalice explícitamente el riesgo es un paso necesario para una asignación más eficiente y responsable de los recursos públicos.

1. INTRODUCCIÓN¹

La infraestructura de transporte no solo conecta territorios; sostiene la actividad económica, garantiza el acceso a servicios básicos y articula la vida cotidiana de millones de personas. Su verdadero valor, sin embargo, no se revela en condiciones normales de operación, sino cuando ocurre un evento extremo. Los registros sistemáticos de daños en la red vial muestran que, desde 1990 hasta 2021, aproximadamente 1.200 tramos han experimentado cortes debido a eventos hidrometeorológicos, totalizando más de 36.000 km de caminos afectados (MOP, 2011; Echaveguren et al., 2023). El terremoto del 27F de 2010 lo ilustra con especial claridad: el catastro del Ministerio de Obras Públicas (MOP) registró 1.702 puntos de daños en infraestructura pública, de los cuales el 86% correspondió a obras viales y sistemas de agua potable rural, equivalente a 1.554 kilómetros de caminos, puentes y accesos (El Cronista, 2011), con un costo de recuperación del orden de US\$523 millones (Gobierno de Chile, 2010). Terremotos, inundaciones o remociones en masa pueden interrumpir carreteras y puentes en cuestión de segundos, generando pérdidas económicas significativas y afectando de manera desproporcionada a las poblaciones más vulnerables. En este contexto, surge una pregunta central para la política pública: ¿están los sistemas actuales de evaluación social de proyectos capturando adecuadamente el valor de la resiliencia?

Tradicionalmente, en Chile, la evaluación social de proyectos (ESP) forma parte del Sistema Nacional de Inversiones (SNI), cuyo diseño institucional y metodológico es responsabilidad del Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MDSF), en virtud de las atribuciones que le confiere la Ley N°20.530. Esta ley actúa como el sustento normativo que permite al Estado chileno regular, a través del MDSF, la forma en que se evalúan y priorizan los proyectos, con el objetivo de garantizar el bienestar social y el uso eficiente de los fondos públicos (Echaveguren & Chamorro, 2025). Este ministerio define las metodologías oficiales de evaluación, revisa las iniciativas de

¹ Agradecemos la colaboración de Alondra Chamorro, Manuel Contreras y Alejandro Rivas en la elaboración de este documento.

inversión y emite el pronunciamiento técnico-económico (RATE) que habilita su ejecución.

A su vez, el proceso se rige por las Normas, Instrucciones y Procedimientos para la Inversión Pública (NIP), que constituyen el conjunto de reglas que aseguran que cualquier proyecto de inversión, incluyendo los de vialidad interurbana, cumpla con los estándares técnicos y económicos necesarios para avanzar dentro del sistema público. En el marco de la ESP, las NIP garantizan que las Iniciativas de Inversión (IDI) presentadas por organismos como la Dirección de Vialidad cumplan con criterios de eficiencia económica y equidad (Echaveguren & Chamorro, 2025). Solo si el proyecto satisface lo establecido en las NIP y demuestra ser socialmente rentable, el MDSF otorga un pronunciamiento favorable (como el RATE RS) que permite acceder a financiamiento público. En otras palabras, las NIP funcionan como el “manual de instrucciones” que orienta el gasto público hacia proyectos que maximizan el bienestar colectivo y aseguran un uso eficiente de los recursos del país.

Este marco institucional se complementa con la Ley N°21.364, que desde 2021 establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED), coordinado por el SENAPRED. En su implementación, el Decreto N°86 de 2023 designa al MOP como organismo técnico de monitoreo sectorial, responsable de vigilar el estado de la infraestructura de conectividad nacional (incluyendo carreteras, aeropuertos y vías marítimas) e identificar amenazas que puedan producir alteraciones físicas u operativas (Ministerio del Interior, 2023). Esta obligación legal otorga legitimidad adicional a la integración del análisis de riesgo en la evaluación social de proyectos viales: si el MOP tiene el mandato de monitorear y reportar el riesgo sobre la infraestructura de conectividad, resulta coherente que las metodologías del SNI permitan también valorarlo económicamente en la etapa de preinversión.

La evaluación social de proyectos de infraestructura en Chile se ha basado en metodologías que estiman beneficios y costos bajo escenarios promedio, priorizando variables como el ahorro de tiempo, la reducción de costos de operación vehicular y la disminución de la accidentabilidad. Si bien este enfoque ha permitido

asignar recursos con criterios de eficiencia económica, presenta una limitación estructural: no incorpora de manera explícita el riesgo de interrupciones asociadas a eventos extremos ni el valor de contar con sistemas redundantes capaces de mantener la conectividad cuando un activo crítico falla.

En los últimos años, se han desarrollado avances relevantes en Chile orientados a incorporar el riesgo de desastres en la evaluación social de proyectos. Destaca la metodología complementaria elaborada por el MDSF, que introduce el Índice de Riesgo de Desastres (IRD) como una herramienta multicriterio para comparar alternativas con y sin medidas de mitigación. Asimismo, a nivel sectorial y académico, el trabajo desarrollado por el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), en conjunto con la Dirección de Vialidad, ha permitido avanzar en la modelación del impacto de eventos extremos sobre la red vial. En particular, destaca el desarrollo del sistema SIGeR-RV, una plataforma de información geográfica basada en web diseñada específicamente para la gestión del riesgo en redes viales expuestas a múltiples amenazas naturales. SIGeR-RV permite evaluar de manera integrada cómo los eventos extremos afectan tanto la conectividad vial como a la población que depende de ella, estimando costos directos asociados a la reparación de infraestructura e indirectos asociados al aumento de tiempos de viaje ante interrupciones, e incorporando métricas de resiliencia vinculadas a la recuperación del servicio (Chamorro, Echaveguren, Pattillo, Contreras-Jara, Contreras, Allen, Nieto y de Solminihac, 2023).

Este documento propone avanzar hacia una evaluación que integre formalmente el concepto de resiliencia dentro del análisis costo-beneficio, incorporando la probabilidad de falla de infraestructuras críticas y modelando sus impactos a través de un enfoque probabilístico. Para ello, se revisan los distintos enfoques conceptuales de resiliencia, tanto a nivel de elemento físico como de sistema o red; se analiza la metodología vigente de evaluación en Chile; y se desarrolla una propuesta basada en un VAN probabilístico estimado mediante simulación de Monte Carlo. El objetivo no es reemplazar la evaluación tradicional, sino complementarla, permitiendo que la toma de decisiones públicas refleje no solo la eficiencia

económica esperada, sino también la capacidad del sistema para resistir, absorber y recuperarse frente a amenazas naturales.

2. RESILIENCIA, DISTINTOS ENFOQUES

Para analizar adecuadamente la resiliencia en proyectos de infraestructura, primero es necesario precisar qué se entiende por resiliencia y reconocer que existen distintos enfoques complementarios. Como se señaló en la introducción, las interrupciones en la red vial generan consecuencias que van mucho más allá del daño físico inmediato: afectan el acceso a servicios esenciales, elevan los costos logísticos y golpean de manera desproporcionada a las comunidades más vulnerables. Comprender cómo se conceptualiza y mide la resiliencia es, por tanto, un paso previo indispensable para evaluar adecuadamente las inversiones destinadas a reducir esos impactos. En términos generales, la resiliencia puede abordarse desde la infraestructura como elemento físico individual o desde el servicio que presta como parte de un sistema o red más amplia. Esta distinción es clave para comprender cómo se justifican y evaluar las inversiones en resiliencia.

2.1 Resiliencia de la Infraestructura

El primer enfoque corresponde a la resiliencia de la infraestructura, también llamada resiliencia del elemento o resiliencia física. En el contexto de activos viales (tales como puentes, calzadas, taludes, alcantarillas y estructuras de contención) esta dimensión se centra en la capacidad de cada obra en particular para resistir un evento adverso sin sufrir daños estructurales catastróficos, manteniendo así su función de diseño. Un puente que colapsa ante una crecida o una calzada que se corta por una remoción en masa no solo representa una pérdida de inversión pública, sino que puede aislar comunidades enteras durante semanas o meses, por lo que robustecer estos elementos individualmente constituye la primera línea de defensa del sistema vial.

Un componente central de este enfoque es la robustez estructural, entendida como la forma en que el diseño, los materiales y los estándares constructivos permiten que la infraestructura mantenga su servicio frente al impacto de una amenaza natural (Echaveguren & Chamorro, 2025). A ello se suma la capacidad física del elemento, que considera las medidas de adaptación y mitigación incorporadas directamente en el emplazamiento del proyecto, como muros de contención, refuerzos estructurales u otras soluciones de protección destinadas a resguardar la integridad de la obra (División de Evaluación Social de Inversiones, 2017). Finalmente, este enfoque también se relaciona con la vida de servicio de la infraestructura, ya que el robustecimiento del elemento busca extender el período durante el cual la obra cumple su función de diseño, reduciendo la probabilidad de reposiciones prematuras producto de daños provocados por eventos extremos (Echaveguren & Chamorro, 2025).

2.2 Resiliencia del Servicio

El segundo enfoque es la resiliencia del servicio, también denominada resiliencia del sistema o de la red. A diferencia del enfoque anterior, este no se concentra exclusivamente en el objeto físico, sino en la capacidad del sistema de transporte o del servicio asociado para seguir operando o recuperarse rápidamente después de un desastre. En este contexto, la redundancia de la red es un factor fundamental, ya que mide la existencia de rutas alternativas o sistemas de respaldo capaces de absorber los flujos cuando un tramo específico queda fuera de operación (Echaveguren & Chamorro, 2025). Otro elemento clave es la velocidad de recuperación, definida como la capacidad del sistema para restablecer la conectividad o el servicio en el menor tiempo posible tras un evento adverso, lo que suele expresarse como el tiempo promedio de interrupción evitada (Valdés, 2019). Asimismo, este enfoque incorpora la noción de interdependencia, reconociendo que la resiliencia de un servicio específico, como el suministro de agua, depende frecuentemente del funcionamiento de otros sistemas, como la red eléctrica o las

telecomunicaciones, para asegurar su continuidad operacional (División de Evaluación Social de Inversiones, 2017).

La diferencia fundamental entre ambos enfoques radica en su foco de análisis. Mientras la resiliencia del elemento protege principalmente la inversión física individual, la resiliencia del sistema se orienta a la estabilidad y continuidad del conjunto. Diversas fuentes advierten que la evaluación social tradicional en Chile tiende a centrarse en tramos o activos individuales, lo que puede llevar a perder de vista el efecto de la redundancia física y operacional de la red vial completa. Este enfoque limitado dificulta justificar socialmente ciertas inversiones en resiliencia que, aunque no eviten el daño de un elemento específico, sí permiten que el sistema en su conjunto siga funcionando. En síntesis, un elemento puede fallar físicamente (lo que alude a la resiliencia de la infraestructura), pero si el sistema presenta alta resiliencia del servicio gracias a la redundancia y a una rápida capacidad de recuperación, el servicio al usuario no se pierde totalmente.

3. EVIDENCIA INTERNACIONAL SOBRE RESILIENCIA

Antes de revisar la evidencia internacional, es necesario precisar que la resiliencia de la infraestructura vial no puede analizarse frente a un único tipo de amenaza. A lo largo del ciclo de vida de un proyecto, los activos están expuestos simultáneamente a dos categorías de eventos con características muy distintas: por un lado, fenómenos de alta intensidad y baja frecuencia, como sismos y tsunamis, que generan caídas abruptas del desempeño y períodos prolongados de recuperación; por otro, eventos de menor intensidad pero alta frecuencia, como inundaciones, remociones en masa y otros fenómenos hidrometeorológicos, que producen una degradación acumulada y recurrente que exige mantenciones periódicas. Como ilustra la Figura 1, cada intervención de mantenimiento representa una pérdida acotada de desempeño (área color verde), pero estas pérdidas se repiten con alta frecuencia a lo largo de toda la vida útil del proyecto. La suma de todas esas áreas pequeñas, asociadas a eventos recurrentes como aluviones,

inundaciones o remociones en masa, puede superar en términos de costos totales directos e indirectos al área grande pero única que genera la recuperación tras un evento catastrófico como un terremoto o tsunami (área color naranja). En otras palabras, lo que se pierde gota a gota por eventos frecuentes puede pesar más que lo que se pierde de golpe por eventos extremos. Esta observación cobra especial relevancia considerando que, en las últimas décadas, los eventos hidrometeorológicos han aumentado considerablemente en frecuencia e intensidad, de modo que los mayores costos de recuperación en muchos países, incluyendo Chile, se están concentrando precisamente en este tipo de amenazas, revirtiendo parcialmente la tendencia histórica que situaba a los grandes sismos como el principal driver de pérdidas en infraestructura.

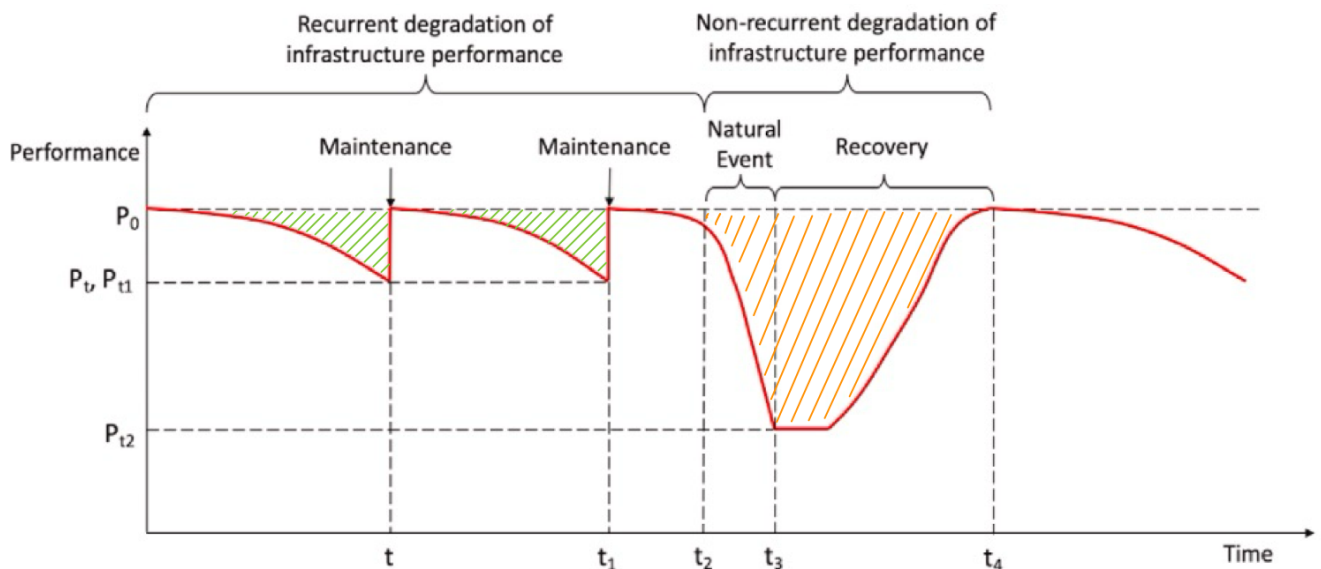


Figura 1. Desempeño de la infraestructura vial a lo largo del tiempo

Fuente: Cartes, Echaveguren, Chamorro & Allen (2021)

Si bien el presente trabajo centra su propuesta metodológica en el riesgo sísmico, dada la disponibilidad de herramientas como curvas de fragilidad y la particular

exposición de Chile a esta amenaza, es importante advertir que este enfoque no debe interpretarse como si la amenaza sísmica fuera la única relevante. Una evaluación que considere solo un tipo de peligro corre el riesgo de subestimar los beneficios totales de invertir en resiliencia, precisamente porque ignora la acumulación de pérdidas por eventos frecuentes. El marco propuesto debe entenderse, por tanto, como un primer paso replicable hacia una evaluación multi-amenaza más completa, y los beneficios estimados aquí deben leerse como una cota inferior del valor social que tendría una evaluación que integre el espectro completo de riesgos al que está expuesta la red vial.

Pasando a la evidencia internacional, esta muestra que invertir en infraestructura vial resiliente no solo es una medida preventiva, sino también una decisión altamente rentable desde el punto de vista económico y social. Según informes del Banco Mundial, en países de ingresos bajos y medios este tipo de inversiones genera un beneficio neto promedio de 4,2 billones de dólares (beneficio total esperado de realizar estas inversiones), lo que equivale a un retorno cercano a cuatro dólares por cada dólar invertido, al reducir costos futuros de reparación y pérdidas asociadas a interrupciones prolongadas del servicio (World Bank, 2019).

Más allá de los beneficios agregados, la falta de resiliencia en el transporte tiene impactos directos y severos sobre la calidad de vida de las personas. Un ejemplo ilustrativo es Kampala, en Uganda, donde inundaciones de magnitud moderada pueden bloquear suficientes calles como para impedir que más de un tercio de la población llegue a un hospital en caso de una emergencia médica. En términos económicos, estas interrupciones en el transporte y en otros sistemas críticos generan pérdidas que afectan a hogares y empresas por al menos 390.000 millones de dólares al año en los países en desarrollo, reflejando que los costos de la inacción recaen de manera desproporcionada sobre los más vulnerables (World Bank, 2019).

En este contexto, la experiencia internacional también muestra que la resiliencia no siempre se logra haciendo que cada infraestructura sea “indestructible”. En países como Perú, donde los deslizamientos de tierra interrumpen con frecuencia el tráfico, se ha observado que aumentar la redundancia de la red vial, es decir, contar con

rutas alternativas, puede ser una estrategia más eficiente y costo-efectiva que intentar diseñar carreteras completamente resistentes a este tipo de amenazas. Esto refuerza la idea de que la resiliencia debe pensarse a escala de red y no únicamente a nivel de activos individuales (World Bank, 2019).

Este enfoque sistémico es especialmente relevante frente a los riesgos sísmicos. A nivel global, los sismos representan cerca del 7% de las pérdidas anuales totales por daños directos en la infraestructura de transporte (Hallegatte, Rentschler y Rozenberg, 2019). Sus efectos son múltiples y complejos: pueden bloquear carreteras y vías férreas por rupturas de fallas o deslizamientos de tierra, provocar el colapso de túneles, generar desplazamientos de terraplenes por licuefacción del suelo y causar la inestabilidad o caída de puentes. Estas fallas físicas se traducen rápidamente en pérdidas de conectividad y en disrupciones económicas de gran escala.

Los impactos sobre la operatividad de las redes de transporte tras un sismo pueden ser dramáticos. En el terremoto de Kobe de 1995, la accesibilidad de la red de autopistas cayó en un 86% y la de los ferrocarriles en un 71% inmediatamente después del evento (Hallegatte, Rentschler y Rozenberg, 2019). Además, los efectos no se limitan al transporte terrestre. El terremoto de Hengchun en Taiwán en 2006 provocó deslizamientos submarinos que dañaron cables de fibra óptica, afectando gravemente a las aerolíneas y a la industria naviera de la región, lo que evidencia cómo las fallas en infraestructura crítica pueden amplificar las pérdidas económicas más allá del sector transporte (Hallegatte, Rentschler y Rozenberg, 2019).

En este escenario global, Chile aparece como un caso particularmente expuesto. El país se identifica entre los veinte con mayores daños anuales esperados en términos absolutos debido al impacto combinado de múltiples amenazas naturales sobre su infraestructura de transporte (Hallegatte, Rentschler y Rozenberg, 2019). A nivel mundial, una proporción muy significativa de carreteras, puentes y ferrocarriles está expuesta simultáneamente a varios peligros, siendo las inundaciones (especialmente las fluviales y superficiales) el riesgo dominante, seguidas por ciclones y terremotos. Sin embargo, Chile forma parte de un reducido grupo, cercano

al 8% a nivel global, en el que el principal peligro natural que concentra el riesgo relativo sobre la infraestructura de transporte es el riesgo sísmico, por sobre inundaciones o ciclones, como se muestra en la Figura 2.

Exposición Global de la Infraestructura de Transporte a múltiples Amenazas Naturales

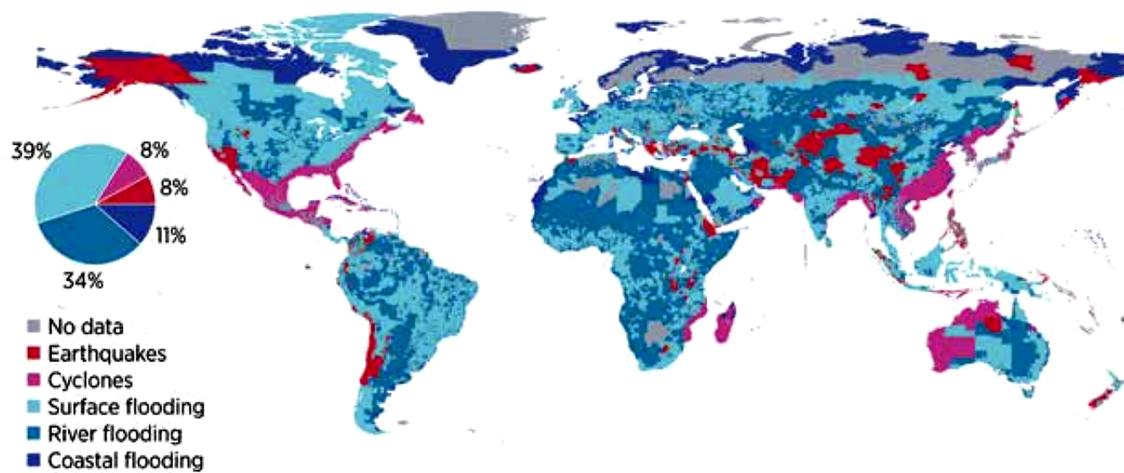


Figura 2. Exposición global de la infraestructura de transporte a múltiples amenazas naturales

Fuente: Hallegatte, Rentschler y Rozenberg (2019)

La evidencia nacional respalda esta exposición: como se mencionó anteriormente, desde 1990 hasta 2021, aproximadamente 1.200 tramos de la red vial registraron cortes por eventos hidrometeorológicos, sumando más de 36.000 km de caminos afectados (MOP, 2011; Echaveguren et al., 2023), mientras que solo el terremoto del 27F de 2010 generó 1.702 puntos de daño en infraestructura pública, el 86% en obras viales y sistemas de agua potable rural, equivalente a 1.554 km de caminos,

puentes y accesos (El Cronista, 2011), con un costo de recuperación estimado en US\$523 millones (Gobierno de Chile, 2010).

Esto refuerza la necesidad de evaluar y gestionar el riesgo de manera integrada, considerando el funcionamiento del sistema completo, de modo que los daños sean acotados y no se propaguen por la red, paralizando la economía y afectando el bienestar de la población.

4. EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS ACTUAL

Como se señaló en la introducción, la Ley N°20.530 otorga al MDSF la facultad de establecer las metodologías de evaluación social de proyectos y de pronunciarse sobre su rentabilidad social antes de que accedan a financiamiento público. El instrumento operativo a través del cual se ejerce esta facultad son las Normas, Instrucciones y Procedimientos para la Inversión Pública (NIP), emitidas conjuntamente por los Ministerios de Hacienda y de Desarrollo Social y Familia. Las NIP regulan el ciclo de vida completo de las iniciativas de inversión pública, definiendo los requisitos, fases y contenidos mínimos de los estudios en cada etapa (perfil, prefactibilidad, factibilidad y diseño) así como los criterios de análisis técnico-económico que deben satisfacerse para obtener el pronunciamiento favorable del MDSF (Echaveguren & Chamorro, 2025). En la práctica, las NIP funcionan como el estándar mínimo que toda iniciativa de inversión debe cumplir para ser considerada socialmente rentable y, por tanto, apta para ejecutarse con recursos públicos.

Para el sector transporte, el SNI cuenta con metodologías sectoriales diferenciadas según el modo. En vialidad interurbana, la metodología vigente, desarrollada por el MDSF (2017) y operacionalizada a través del Volumen N°1 del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad, estructura la evaluación en torno a la formulación del problema, la definición de alternativas, el cálculo de indicadores de rentabilidad social y la estimación de variables de transporte como el TMDA, velocidades de operación y costos vehiculares. Esta diferenciación se extiende a otros modos: el transporte ferroviario, por ejemplo, cuenta con su propia metodología publicada en

2016, que comparte la misma lógica general del CBA pero adaptada a las particularidades del modo, incorporando la visión multimodal y reconociendo que un proyecto ferroviario compite o se complementa con la red vial existente (MDSF, 2016).

Sin embargo, ambas metodologías comparten una limitación estructural relevante desde el punto de vista de la resiliencia: ninguna incorpora procedimientos para valorar el riesgo de interrupción del servicio ante eventos extremos ni los beneficios de invertir en infraestructura más robusta o en redes con mayor redundancia (Echaveguren & Chamorro, 2025). Esta omisión tiene implicancias asimétricas según el modo. En vialidad interurbana, la existencia de rutas alternativas puede atenuar parcialmente el impacto de una interrupción, ya que la red presenta cierto grado de redundancia física: si un tramo falla, los flujos pueden redirigirse por caminos paralelos, aunque con mayores tiempos y costos. En transporte ferroviario, en cambio, la infraestructura es por definición de trazado único, sin rutas paralelas de reemplazo, por lo que cualquier interrupción implica la pérdida total del servicio en ese corredor. Esta ausencia estructural de redundancia hace que la omisión del riesgo sea aún más crítica en el modo ferroviario, y refuerza la necesidad de incorporar criterios de resiliencia en la evaluación social de proyectos de transporte en general.

En la evaluación de proyectos de infraestructura en Chile coexisten hoy dos metodologías principales, cuya aplicación depende del tipo de proyecto y de la posibilidad de medir y valorar monetariamente sus beneficios. Estas metodologías buscan asegurar que los recursos públicos se asignen de manera eficiente, considerando tanto criterios económicos como sociales.

4.1 Análisis Costo-Eficiencia (CEA)

En la evaluación social de proyectos de infraestructura en Chile, el Análisis Costo-Eficiencia (CEA) (denominado en la literatura anglosajona *cost-effectiveness analysis*, y traducido en ocasiones al castellano como análisis de costo-efectividad)

se utiliza principalmente en proyectos cuyos beneficios no pueden ser valorizados monetariamente de manera confiable, como hospitales, jardines infantiles, plazas, espacios públicos y sistemas de agua potable. Esta metodología se aplica precisamente cuando no es factible estimar beneficios en términos monetarios con suficiente robustez (Echaveguren & Chamorro, 2025). Su uso es especialmente frecuente en segmentos de baja demanda, en proyectos de conectividad básica para comunidades aisladas y en iniciativas cuyo objetivo central es la seguridad vial.

Asimismo, se utiliza en zonas extremas, donde resulta difícil estimar los beneficios sociales de proyectos vinculados a la reducción del riesgo de desastres, pero donde igualmente se requiere inversión pública. En estos casos, se recurre al Plan Especial de Desarrollo de Zonas Extremas (PEDZE), una política pública chilena orientada a mejorar la calidad de vida de los habitantes de regiones aisladas y a promover un desarrollo territorial más equilibrado (de Solminihac, Hernández, Azúa & Padilla, 2020).

En el marco de este plan se utiliza una metodología de evaluación de costo-eficiencia, que permite priorizar y aprobar inversiones estratégicas, especialmente en infraestructura de conectividad y servicios básicos, que, debido a la baja densidad poblacional de estas zonas, no cumplirían con los criterios tradicionales de rentabilidad social utilizados en la evaluación de proyectos. De esta forma, el PEDZE facilita la materialización de inversiones que resultan fundamentales para la integración territorial y el bienestar de estas regiones (de Solminihac, Hernández, Azúa & Padilla, 2020).

Desde el punto de vista metodológico, el CEA no busca estimar el valor monetario de los beneficios, sino que compara los costos de distintas alternativas frente a un indicador físico o de desempeño común. En este marco, la alternativa considerada más eficiente es aquella que logra el menor costo por unidad de beneficio físico, utilizando indicadores como el costo por kilómetro habilitado, el costo por accidente evitado o el costo por habitante con acceso asegurado. Para expresar los resultados económicos, se emplean habitualmente el Valor Actual de los Costos (VAC) y el Costo

Anual Equivalente (CAE) (Comisión Asesora de Evaluación Social de Inversiones, 2022).

A pesar de su utilidad en ciertos contextos, el CEA no es el método predominante en la evaluación social de proyectos viales de mayor escala. Esto se explica, en primer lugar, porque la mayoría de los proyectos de vialidad interurbana generan impactos que son fácilmente mensurables y valorables en dinero. Beneficios como el ahorro en tiempos de viaje y la reducción de los costos de operación vehicular, incluyendo combustible, neumáticos y mantenimiento, pueden cuantificarse de manera relativamente precisa mediante herramientas como el modelo HDM-4 (Echaveguren & Chamorro, 2025). Gracias a esta capacidad de monetización, el sistema de evaluación prefiere el análisis costo-beneficio, ya que permite estimar directamente la riqueza neta que el proyecto genera para el país (Ministerio de Desarrollo Social, 2015).

Adicionalmente, el CEA presenta limitaciones metodológicas que restringen su aplicación generalizada en la red vial. Una de ellas es la dificultad para comparar proyectos que entregan beneficios de distinta naturaleza o calidad, dado que el método se enfoca exclusivamente en minimizar costos para alcanzar un objetivo físico fijo (Comisión Asesora de Evaluación Social de Inversiones, 2022). Otra limitación relevante es la invisibilidad de la calidad en la evaluación, lo que puede sesgar la toma de decisiones hacia proyectos de menor costo, pero también de menor beneficio social acumulado (Comisión Asesora de Evaluación Social de Inversiones, 2022).

Para incorporar explícitamente la resiliencia dentro de este marco de evaluación, en Chile se implementa, al interior del CEA, el método RD o Metodología de Riesgo de Desastres (Valdés, 2019). Este método es una herramienta complementaria diseñada para que los proyectos de infraestructura pública no solo sean rentables desde el punto de vista económico, sino también resilientes frente a catástrofes naturales. Su objetivo es evitar que una obra se interrumpa o se destruya por eventos como tsunamis o incendios, asegurando la continuidad de servicios básicos como salud o agua potable. El método RD se aplica principalmente en la etapa de

preinversión, cuando el proyecto se encuentra aún en nivel de idea o perfil, y se utiliza para definir la mejor ubicación y el diseño más adecuado.

El núcleo del método RD es el cálculo del Índice de Riesgo de Desastres (IRD), que combina tres componentes fundamentales. La exposición mide si el proyecto se emplaza físicamente en una zona de peligro, como una zona de inundación. La vulnerabilidad evalúa qué tan frágil es la infraestructura o la población que atiende el proyecto, considerando factores como materiales de construcción débiles o la ausencia de rutas de escape. La resiliencia, por su parte, refleja la capacidad del sistema para recuperarse y volver a operar tras un desastre (Valdés, 2019).

La aplicación práctica del método se estructura en cuatro pasos. En primer lugar, se realiza un análisis de amenazas para determinar si el terreno está expuesto a tsunamis, erupciones volcánicas, remociones en masa o incendios forestales, utilizando herramientas como el visor web “Chile Preparado” de SENAPRED y cuestionarios técnicos. En segundo lugar, si existe amenaza, se cuantifica el riesgo mediante el cálculo del IRD, el cual se ve en la Ecuación 1, y se compara con un umbral de tolerancia, el cual es considerablemente más bajo para servicios críticos, como hospitales, que para servicios no críticos, como parques.

$$IRD_a = E_a * V_a * (1 - Re_a) \quad (1)$$

IRD_a = Índice de Riesgo de Desastres del proyecto de la amenaza a, siendo a= 1: Tsunami, 2: Remoción en Masa, 3: Incendios Forestales, 4: Erupciones volcánicas, medido en una escala entre 0 y 1.

E_a = Exposición a la amenaza a, medida en una escala entre 0 y 1.

V_a = Vulnerabilidad asociada a la amenaza a, medida en una escala entre 0 y 1.

Re_a = Resiliencia asociada a la amenaza a, medida en una escala entre 0 y 1.

En tercer lugar, si el riesgo supera el límite permitido, el proyectista debe proponer medidas de gestión, que pueden incluir adaptación del diseño o de los materiales, mitigación mediante obras defensivas, o la relocalización del proyecto. Finalmente, en el cuarto paso, las alternativas se comparan usando un criterio de costo-eficiencia, seleccionando aquella que logra reducir el riesgo por debajo del umbral permitido al menor costo posible (Valdés, 2019).

4.2 Análisis Costo-Beneficio (CBA)

El Análisis Costo-Beneficio (CBA) es la metodología preferente para la evaluación social de proyectos de vialidad interurbana y de recursos hídricos en Chile, por lo que nos centraremos en ella, particularmente cuando los impactos del proyecto son medibles y valorables monetariamente. Este enfoque se utiliza cuando los beneficios principales pueden expresarse en dinero, lo que permite una comparación directa con los costos de inversión y operación asociados al proyecto.

En el CBA, los beneficios considerados se estiman principalmente a partir de los ahorros en tiempo de viaje, la reducción de los costos de operación vehicular (como combustible, neumáticos y mantenimiento), la disminución de la accidentabilidad y la reducción de emisiones contaminantes. Los costos, por su parte, incluyen la inversión inicial en obras, los gastos de conservación y mantención y, cuando corresponde, las expropiaciones, todos ellos ajustados a precios sociales para eliminar impuestos y distorsiones de mercado. La rentabilidad social del proyecto se evalúa mediante indicadores como el Valor Actual Neto Social (VANS), la Tasa Interna de Retorno Social (TIRS) y la Tasa de Retorno Inmediato (TRI). Para el cálculo de estos beneficios y costos, se emplea el modelo computacional HDM-4, mencionado anteriormente, calibrado para la realidad chilena, que simula la interacción entre los vehículos, el estado del pavimento y los beneficios sociales (Echaveguren & Chamorro, 2025).

Desde el punto de vista metodológico, la evaluación vigente estructura el proceso en cuatro etapas: formulación del proyecto, procedimiento de evaluación, cálculo de indicadores de rentabilidad y estimación de variables de transporte (MDSF, 2017). Entre las variables clave se encuentran la demanda vehicular, medida como Tránsito Medio Diario Anual (TMDA); el Valor Social del Tiempo (VST), que refleja la disposición de la sociedad a pagar por reducciones en los tiempos de viaje de pasajeros y carga; los costos de operación vehicular, calculados en función de la rugosidad del pavimento y de las características del tráfico; y el valor residual, que se reconoce como un beneficio en el último año del horizonte de evaluación, usualmente de veinte años, y representa el valor útil remanente de la infraestructura (Echaveguren & Chamorro, 2025).

A continuación, en la Ecuación 2, se presenta la metodología para calcular el VAN, donde el criterio de decisión de si se hace o no el proyecto es si este valor es mayor a 0.

$$VAN = F_0 + \frac{F_1}{(1+r)} + \frac{F_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{F_N}{(1+r)^N} \quad (2)$$

A diferencia del CEA, el análisis costo-beneficio no incorpora actualmente ningún modelo que considere explícitamente la resiliencia de la infraestructura frente a desastres naturales. La evaluación se centra en beneficios y costos esperados bajo condiciones normales de operación, sin internalizar de manera sistemática el riesgo de interrupciones, daños o pérdidas de servicio asociadas a eventos extremos, lo que constituye una limitación relevante en contextos de alta exposición a amenazas naturales como el chileno.

A continuación, se presenta una propuesta para la evaluación social de proyectos de inversión pública, enfocada específicamente en proyectos de vialidad, cuyo objetivo es incorporar de manera explícita el concepto de resiliencia dentro del proceso de evaluación. La propuesta surge a partir de la constatación de que las metodologías

actualmente utilizadas capturan adecuadamente los beneficios y costos bajo condiciones normales de operación, pero no internalizan de forma sistemática los impactos asociados a eventos extremos. En este contexto, el énfasis se pone en el riesgo sísmico, dada la alta exposición del país a este tipo de amenazas y su relevancia para la continuidad de la conectividad y del servicio vial. La incorporación de la resiliencia busca complementar la evaluación tradicional, permitiendo considerar no solo la eficiencia económica del proyecto, sino también su capacidad para resistir, absorber y recuperarse de sismos, reduciendo las interrupciones del servicio y las pérdidas sociales y económicas asociadas.

5. EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS PROPUESTA

La metodología de evaluación social vigente en el SNI estructura el análisis costo-beneficio en torno a cuatro componentes secuenciales: formulación del proyecto, procedimiento de evaluación, cálculo de indicadores de rentabilidad y estimación de variables de transporte (MDSF, 2017). La propuesta que se desarrolla a continuación no altera esta estructura ni introduce una metodología paralela. Por el contrario, busca acoplarse a ella, extendiendo cada uno de sus componentes para incorporar explícitamente el riesgo de eventos extremos y los beneficios asociados a la resiliencia. Esta decisión metodológica es deliberada: dado que invertir en resiliencia implica mayores costos de inversión inicial y una mayor incertidumbre en la captura de beneficios (factores que la evaluación tradicional tiende a penalizar), resulta indispensable demostrar que estos beneficios pueden estimarse con rigor dentro del mismo marco analítico que el MDSF ya reconoce y valida.

El punto de partida es el VAN determinista que actualmente se utiliza como criterio de decisión. En su formulación estándar, el VAN se calcula bajo supuestos promedio para todas las variables involucradas, entregando un único valor que resume la rentabilidad social esperada del proyecto en condiciones normales de operación. Este enfoque es apropiado cuando los beneficios y costos del proyecto son relativamente estables y predecibles a lo largo del horizonte de evaluación. Sin

embargo, cuando el proyecto está expuesto a amenazas naturales, este supuesto de estabilidad no se sostiene: un evento sísmico, una inundación o una remoción en masa pueden alterar radicalmente los flujos de beneficios y costos durante uno o varios años del horizonte de evaluación, generando pérdidas que el VAN determinista simplemente no captura.

La propuesta consiste en ampliar el cálculo del VAN hacia un **VAN probabilístico**, estimado mediante simulación de Monte Carlo, técnica que consiste en repetir el mismo cálculo un gran número de veces (de Gus, 2010). Esta extensión no modifica la fórmula del VAN ni los componentes que la integran; mantiene exactamente las mismas variables que hoy exige la metodología del MDSF (demanda vehicular expresada como TMDA, Valor Social del Tiempo, Costos de Operación Vehicular y valor residual) y las trata de la misma manera. Lo que cambia es que estas variables, en lugar de asumir un valor puntual fijo, se representan mediante distribuciones de probabilidad consistentes con su comportamiento observado, lo que permite que el resultado del VAN sea también una distribución y no un valor único, reflejando el riesgo y la incertidumbre del proyecto, tanto en sus beneficios como en sus costos. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de VAN probabilístico, donde el gráfico de la izquierda muestra la probabilidad acumulada del Valor Actual Neto, mientras que el de la derecha muestra su distribución de probabilidad.

Probabilidad Acumulada y Distribución de Probabilidad del VAN

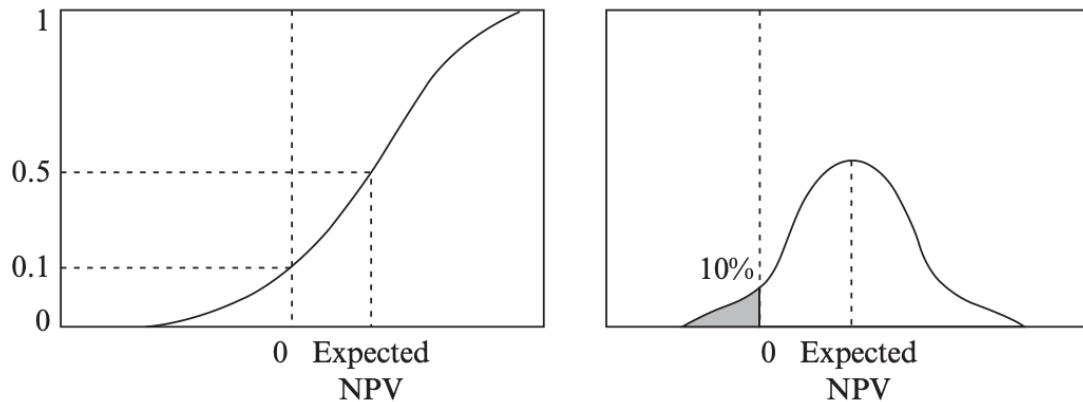


Figura 3. Probabilidad acumulada y distribución de probabilidad del Valor Actual Neto

Fuente: de Rus G. (2010)

Gracias a este procedimiento, el VAN del proyecto se representa como una distribución de probabilidad, lo que permite realizar afirmaciones del tipo “con un 90% de probabilidad, el VAN es mayor que cero”. Esta lectura es mucho más informativa para la toma de decisiones públicas que un único valor esperado, especialmente en contextos de alta exposición a amenazas naturales. Y lo hace sin salir del marco analítico del SNI: los mismos indicadores de rentabilidad que hoy exigen las NIP (VAN, TIR y TRI) siguen siendo los criterios de decisión, ahora enriquecidos con información sobre el riesgo y la incertidumbre del proyecto.

Al conjunto de variables que ya tenemos se incorpora una nueva, que es la que introduce explícitamente la dimensión de resiliencia: **la probabilidad de falla del activo existente** frente a una amenaza natural de magnitud determinada. Esta variable actúa dentro de la misma lógica de beneficios que ya reconoce el MDSF: cuando el activo principal falla, los usuarios deben desviar sus viajes, aumentan los tiempos de recorrido y se elevan los costos de operación vehicular. Todos estos

impactos ya son variables reconocidas por la metodología vigente; la diferencia es que ahora se activan condicionalmente a la ocurrencia de un evento, ponderados por su probabilidad. De este modo, la resiliencia no ingresa al análisis como un criterio externo o adicional, sino como una extensión natural de los beneficios que el MDSF ya mide: ahorro de tiempo de viaje y reducción de costos de operación vehicular, ahora también en escenarios de falla. En otras palabras, esta nueva variable corresponde a la probabilidad de falla de la infraestructura existente (la ruta principal), entendida como la posibilidad de que el activo actualmente en operación deje de prestar servicio durante el horizonte de evaluación. Esta falla incrementa el valor del proyecto alternativo, en la medida en que actúa como respaldo o elemento de redundancia dentro del sistema.

Un ejemplo que permite clarificar esta lógica es el caso de una red que depende de un único puente y la evaluación de construir un segundo puente como ruta alternativa. Bajo el enfoque tradicional de evaluación, es probable que este nuevo proyecto (el segundo puente) no resulte conveniente, ya que el flujo vehicular esperado sería bajo en condiciones normales de operación. Sin embargo, este análisis omite un aspecto clave: qué ocurre cuando el puente existente falla. En ese escenario, el flujo de vehículos por la ruta alternativa aumentaría de manera significativa, elevando sustancialmente sus beneficios sociales. En consecuencia, el Valor Actual Neto Social del proyecto dejaría de ser un valor fijo y pasaría a depender de la probabilidad de falla del puente actualmente en servicio.

Este razonamiento se ilustra en el caso analizado por Chamorro, Echaveguren, Contreras, Contreras-Jara, Pattillo, Allen, Nieto, Dagá y de Solminihac (2023) en el camino Villarrica–Pucón. En condiciones normales de operación, el tiempo de viaje por la ruta principal es de aproximadamente 32 minutos. Sin embargo, cuando la vía óptima se interrumpe y no existe una ruta alternativa funcional, el tiempo de viaje aumenta drásticamente, alcanzando hasta 645 minutos. Este resultado muestra que el verdadero valor de una ruta alternativa no se manifiesta en el escenario base, sino precisamente en los escenarios de falla, donde permite evitar una pérdida casi total de conectividad. Así, aunque una ruta de respaldo pueda parecer poco atractiva bajo condiciones normales debido a su bajo flujo, su beneficio social aumenta

significativamente cuando se considera la probabilidad de falla del activo principal, lo que incide directamente en un mayor Valor Actual Neto Social esperado del proyecto. El verdadero valor social del proyecto de redundancia no se manifiesta en el escenario base, sino precisamente en los escenarios de falla, y el VAN probabilístico es el instrumento que permite capturarlo dentro del marco metodológico que el MDSF ya reconoce.

Identificar estas rutas alternativas y cuantificar las probabilidades de falla de los activos críticos permite a las agencias viales asignar los recursos de manera más eficiente, ya sea reforzando la infraestructura existente o planificando con anticipación medidas de restauración y redundancia. En síntesis, la resiliencia se sustenta en la capacidad del sistema para modelar escenarios de falla y garantizar opciones de respaldo que aseguren la continuidad del servicio, incluso cuando estas alternativas impliquen mayores costos operacionales para los usuarios.

Volviendo a la nueva variable mencionada, la probabilidad de falla del proyecto i frente a una amenaza a , esta se obtiene como el producto entre la probabilidad de falla condicionada a la magnitud de la amenaza y la probabilidad de ocurrencia de dicha amenaza. Formalmente, se expresa como:

$$\text{Probabilidad de falla}_i = (\text{Probabilidad de falla}_i | \text{Magnitud amenaza}_a) * \text{Probabilidad amenaza}_a \quad (3)$$

Para estimar la probabilidad de falla condicionada a la magnitud de la amenaza se utilizan las **curvas de fragilidad**. Las curvas de fragilidad son herramientas matemáticas utilizadas para representar la vulnerabilidad sísmica de una estructura, como un puente. En términos simples, estas curvas indican la probabilidad de que la estructura experimente un determinado nivel de daño (leve, moderado, severo o colapso) frente a un terremoto de cierta intensidad (Vial Paúl, 2022). No entregan una predicción exacta de falla, sino una medida probabilística del daño esperado, lo

que permite incorporar explícitamente la incertidumbre asociada al comportamiento estructural ante eventos sísmicos.

Estas curvas relacionan la intensidad del movimiento del suelo, usualmente medida mediante parámetros como la aceleración, con la respuesta de los elementos estructurales del puente. Para ello, se definen estados límite que permiten identificar el punto a partir del cual componentes críticos, como aisladores sísmicos o columnas, comprometen la integridad estructural y la seguridad de las personas. Gráficamente, las curvas se representan como funciones crecientes, donde un aumento en la intensidad del sismo se traduce en una mayor probabilidad de exceder niveles más severos de daño. Gracias a esta representación, es posible estimar de manera rápida el estado esperado de la estructura después de un sismo a partir de datos de aceleración medidos por instrumentos.

En la Figura 4 se presentan las curvas de fragilidad sísmica de un puente, diferenciadas según nivel de daño: daño severo y daño moderado. Estas curvas muestran la probabilidad condicional de que la estructura experimente cada nivel de daño en función del grado de demanda sísmica (medido a través del PGA, Peak Ground Acceleration, el cual nos dice el grado de aceleración máxima del suelo).

Los datos utilizados para su construcción fueron obtenidos del estudio “Development and comparison of seismic fragility curves for bridges based on empirical and analytical approaches” de Allen, Amaya, Chamorro, Santa María, Baratta, de Solminihac & Echaveguren (2021), el cual desarrolla y compara curvas de fragilidad sísmica para puentes chilenos mediante enfoques empíricos y analíticos, cuantificando la probabilidad de excedencia de distintos estados de daño ante diferentes intensidades de amenaza.

Curvas de Fragilidad

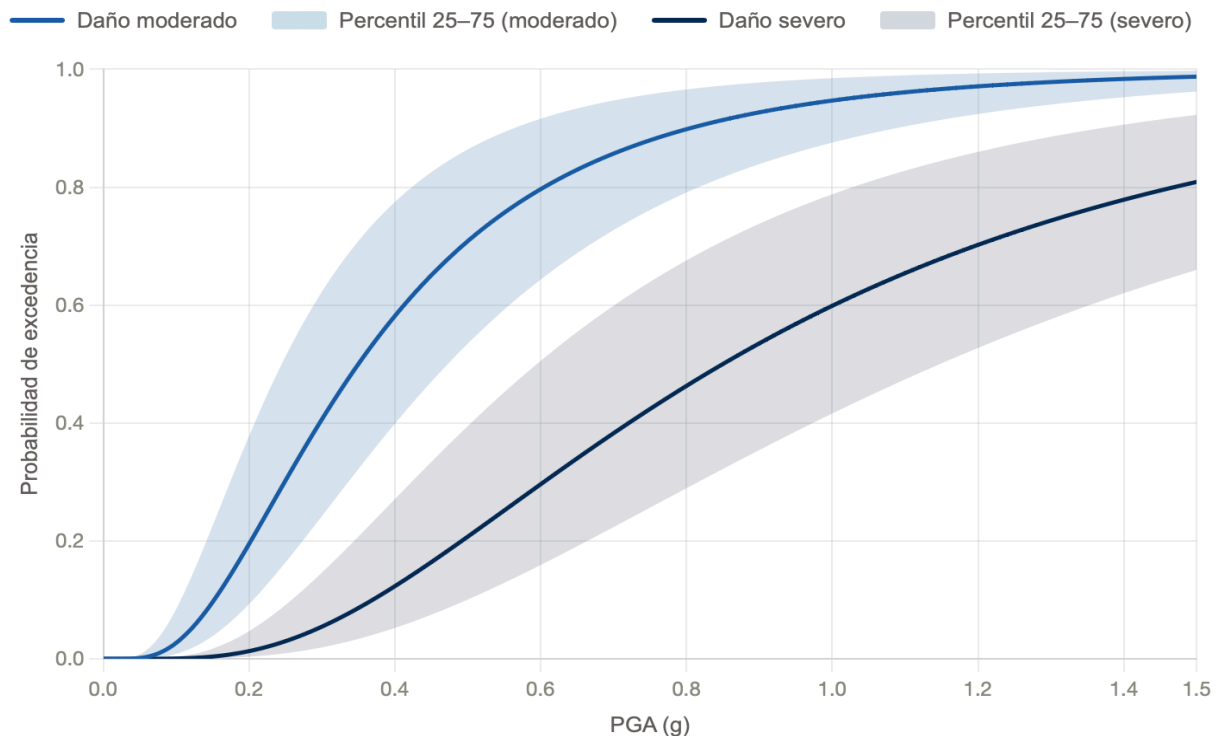


Figura 4. Curva de fragilidad sísmica de puentes asociada al estado de daño severo y moderado

Fuente: Allen, Amaya, Chamorro, Santa María, Baratta, de Solminihac & Echaveguren (2021)

En proyectos de vialidad, la construcción de curvas de fragilidad sigue un proceso técnico riguroso que combina ingeniería estructural, datos históricos y simulación computacional avanzada. El método más utilizado es el Análisis Dinámico Incremental, que comienza con la elaboración de un modelo estructural no lineal detallado en software especializado, incorporando el comportamiento inelástico de componentes críticos como aisladores sísmicos, topes de hormigón y rótulas plásticas en las columnas. Posteriormente, se seleccionan registros sísmicos reales que se escalan de forma incremental para alcanzar distintos niveles de aceleración espectral, lo que permite observar la respuesta del puente desde sismos leves hasta

eventos extremos. Estos análisis se ejecutan de manera automatizada mediante herramientas computacionales que aplican secuencialmente los registros y realizan análisis de tiempo-historia. A partir de la respuesta máxima de cada componente, se comparan las demandas estructurales con los estados límite definidos y se ajusta una función de distribución log-normal acumulativa que representa la probabilidad de exceder cada nivel de daño en función de la intensidad sísmica (Vial Paúl, 2022).

Los datos utilizados en este proceso provienen de múltiples fuentes. Los registros sísmicos históricos se obtienen a partir de catálogos oficiales, filtrados según el tipo de suelo y la zona sísmica del proyecto. La información sobre el comportamiento de componentes específicos, como aisladores sísmicos, se basa en ensayos de laboratorio realizados sobre dispositivos reales, lo que permite caracterizar su rigidez y capacidad de disipación de energía. Las propiedades geométricas y materiales del puente se extraen de los planos y memorias de diseño originales, mientras que la interacción suelo-estructura se modela a partir de estudios geotécnicos específicos del emplazamiento. Los estados de daño y los criterios de seguridad se definen conforme a normativas técnicas y estándares de diseño vigentes en vialidad (Vial Paúl, 2022).

Por otro lado, para estimar la probabilidad de ocurrencia de la amenaza, necesitamos obtener la distribución del PGA, la cual en el modelo no se define a partir de una función de probabilidad única y preestablecida (como podría ser una normal o lognormal aplicada directamente al parámetro), sino que surge como resultado de un proceso estocástico que integra múltiples componentes físicos y probabilísticos.

Para estimar la distribución del PGA se puede utilizar la metodología empleada en Allen et al. (2021). En primer lugar, se realiza una simulación de escenarios sísmicos mediante el método de Monte Carlo. En dicho estudio se generan 50.000 escenarios sísmicos sintéticos, variando la magnitud y la localización de los epicentros de acuerdo con modelos locales de recurrencia sísmica. Este procedimiento permite capturar la variabilidad inherente a la amenaza sísmica.

En segundo lugar, siguiendo con su metodología, para cada escenario simulado y para cada localización específica de un activo vial, se calcula el PGA esperado asociado a fenómenos de licuefacción. Este cálculo combina distintos desarrollos metodológicos: la formulación de movimiento fuerte propuesta por Joyner y Boore (1988), el indicador de susceptibilidad a la licuefacción desarrollado por Youd y Perkins (1987), y la relación de atenuación del movimiento del suelo formulada por Sadigh et al. (1986). Estas metodologías permiten estimar la intensidad del movimiento sísmico y su traducción en desplazamientos permanentes del terreno en cada sitio analizado.

Finalmente, los cálculos se complementan con información geológica local. En el caso chileno, se utiliza el mapa geológico elaborado por SERNAGEOMIN (2003), el cual permite clasificar los suelos según su susceptibilidad a la licuefacción. Esta clasificación es fundamental para asignar las categorías requeridas en el cálculo del PGA.

De este modo, la distribución del PGA no se impone ex ante, sino que emerge endógenamente del conjunto de simulaciones sísmicas y de la integración de modelos de amenaza, susceptibilidad y condiciones del suelo, siguiendo el enfoque desarrollado por Allen et al. (2021).

Es importante destacar que el foco de este trabajo no es la estimación precisa de la distribución del PGA, sino demostrar que es posible incorporar la probabilidad de falla de la infraestructura dentro del marco de evaluación social vigente. La distribución utilizada constituye una aproximación de referencia que permite ilustrar el funcionamiento de la metodología propuesta, no una estimación exhaustiva de la amenaza sísmica. En particular, el modelo supone independencia entre eventos sísmicos anuales, lo que implica que la probabilidad de ocurrencia de un sismo de alta intensidad se mantiene constante año a año, sin considerar que la ocurrencia de un evento mayor reduce transitoriamente la probabilidad de otro evento de magnitud similar en el corto plazo. Esta simplificación puede introducir sesgos en la estimación de las probabilidades de falla anuales, y constituye una limitación reconocida del ejercicio. Sin embargo, para los efectos de este trabajo, que busca

mostrar la lógica y la viabilidad de una evaluación social que internalice el riesgo sísmico, esta aproximación es suficiente y coherente con el nivel de detalle propio de una evaluación a nivel de perfil.

Una limitación relevante de la metodología propuesta, y de la evaluación social de proyectos en general, es que no incorpora el deterioro progresivo que experimenta la infraestructura a lo largo de su vida útil como consecuencia de las sollicitaciones acumuladas. En el marco institucional chileno, esto responde en parte a una definición metodológica explícita: los proyectos de conservación y mantención de infraestructura vial no están obligados a ingresar al SNI ni a someterse al proceso de evaluación social estándar, lo que significa que el deterioro y su gestión quedan fuera del horizonte analítico del CBA. Como resultado, la evaluación opera bajo el supuesto implícito de que la infraestructura mantiene sus condiciones de diseño durante todo el período de evaluación, lo cual raramente se cumple en la práctica.

Esta omisión tiene implicancias directas sobre la aplicación de las curvas de fragilidad. Estas curvas se construyen caracterizando el comportamiento estructural de un puente en su estado original de diseño, sin considerar la degradación acumulada que introduce la exposición repetida a cargas de tráfico, agentes ambientales o eventos sísmicos menores previos. En consecuencia, las probabilidades de falla que entregan las curvas tienden a ser optimistas: un puente con años de servicio y sollicitaciones acumuladas es estructuralmente más vulnerable de lo que la curva indica. A esto se suma que las medidas de mitigación o refuerzo, cuando se implementan, pueden recuperar parcialmente el nivel de servicio de la infraestructura, pero en general no la restituyen a su condición original de diseño. El resultado es que tanto la probabilidad de falla como los beneficios esperados de la resiliencia pueden estar subestimados, lo que refuerza la conveniencia de interpretar los resultados de la metodología propuesta como una cota inferior y no como una estimación puntual del riesgo real.

Un tercer aspecto que la evaluación CBA tradicional no captura es el carácter sistémico de la red vial en un contexto de multi-riesgo. Cada elemento que compone la red (puentes, calzadas, taludes, túneles, alcantarillas) presenta un perfil de

vulnerabilidad distinto según el tipo de amenaza al que está expuesto. Un puente de hormigón armado y un terraplén compactado no responden de la misma manera frente a un sismo que frente a una inundación o una remoción en masa; la amenaza que resulta determinante para uno puede ser irrelevante para el otro. Esta heterogeneidad es análoga a la que existe en el ambiente construido urbano: las estructuras de madera son relativamente resistentes a sismos pero altamente vulnerables a incendios y tsunamis, mientras que las de albañilería presentan el perfil inverso. Ignorar esta diferenciación lleva a subestimar la vulnerabilidad real del sistema en su conjunto. Por esta razón, no es metodológicamente correcto construir un análisis de multi-riesgo simplemente combinando amenazas o aplicando la amenaza predominante a toda la red de manera uniforme. Un análisis verdaderamente sistémico requiere evaluar cómo cada tipo de amenaza afecta de manera diferenciada a cada elemento de la red, y cómo esas vulnerabilidades heterogéneas se propagan e interactúan a escala de sistema. Esta es una limitación reconocida de la metodología propuesta, que al centrarse en la amenaza sísmica y en un activo específico, no captura la complejidad del multi-riesgo a nivel de red, y constituye una dirección relevante para el desarrollo de evaluaciones más comprehensivas en investigaciones futuras.

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Para ilustrar con mayor claridad la metodología propuesta, se presenta un ejemplo comparativo entre la evaluación tradicional de proyectos y una evaluación que incorpora explícitamente el riesgo de falla. El caso analizado corresponde al puente Los Molles de la ruta 5 y su ruta alternativa.

El ejercicio se enmarca en una evaluación a nivel de perfil, que corresponde a la primera etapa formal del ciclo de inversión pública establecido por las NIP. En esta etapa, el objetivo no es realizar una evaluación exhaustiva con datos de terreno, sino determinar si la iniciativa es suficientemente promisorio como para justificar estudios más costosos en etapas posteriores. Por ello, los parámetros utilizados

(costos, flujos, tiempos de viaje y probabilidades de falla) se basan en información secundaria disponible y en supuestos referenciales. Si bien el nivel de sofisticación del enfoque probabilístico es mayor al que típicamente se exige en una evaluación a nivel de perfil, el ejercicio busca demostrar que la lógica de la metodología propuesta es compatible con la estructura del CBA vigente, y que puede aplicarse con distintos niveles de precisión según la etapa del ciclo de inversión y la información disponible.

Siguiendo la estructura de formulación y evaluación que establece la metodología del MDSF (2017), el análisis se organiza en los siguientes componentes: identificación del problema y población afectada, definición de alternativas, estimación de costos y beneficios, y cálculo de indicadores de rentabilidad social.

El caso analizado se basa en el estudio de de Solminihac, Tampier, Dagá y Perry (2019), que examina la resiliencia y redundancia estratégica de 195 puentes de la Ruta 5 entre Caldera y Pargua, identificando infraestructuras críticas ante desastres naturales y evaluando la calidad de las rutas alternativas disponibles para cada una. De los puentes analizados, se seleccionó el Puente Los Molles por presentar el menor índice de resiliencia de red: ante una eventual falla, la ruta alternativa disponible es excepcionalmente larga, la conectividad es difícil de mantener y el ahorro de tiempo que generaría contar con una ruta alternativa adecuada es considerablemente mayor que en el resto de los casos estudiados. Esta característica lo convierte en el ejemplo más ilustrativo para demostrar el valor social que la metodología propuesta es capaz de capturar y que el enfoque tradicional de evaluación ignora.

El proyecto consiste en la construcción de una ruta alternativa al Puente Los Molles de la Ruta 5, que opera como ruta principal en el corredor analizado. La intervención contempla la habilitación de un camino de aproximadamente 251 metros y la construcción de un puente de 27 metros, lo que permitiría contar con una vía de respaldo funcional ante una eventual falla del puente principal. En condiciones normales de operación, la ruta óptima entre los puntos de origen y destino (R0) tiene una duración de 25 minutos y una distancia de 43 km. Si el Puente Los Molles fallara y no existiera el proyecto, la ruta alternativa disponible (RA*) implicaría un tiempo

de viaje de 154 minutos y una distancia de 132 km, lo que representa un incremento de más de seis veces el tiempo de viaje normal. Con el proyecto ejecutado, la ruta alternativa propuesta (RAP) reduciría ese tiempo a 30 minutos y la distancia a 44 km, prácticamente equivalente a las condiciones normales de operación. Sin embargo, bajo la metodología de evaluación vigente, la probabilidad de falla del puente principal no se incorpora en la evaluación del proyecto alternativo, lo que impide capturar el beneficio social que este genera precisamente en los escenarios donde su valor es más significativo.

En la Figura 5 se presentan los trazados viales considerados en el análisis. En el panel superior izquierdo se muestra la ruta normal de operación (R0), correspondiente al recorrido óptimo cuando el Puente Los Molles de la Ruta 5 se encuentra operativo. En el panel superior derecho se presenta la ruta alternativa óptima disponible hoy en caso de falla del puente (RA*). Finalmente, en el panel inferior izquierdo se muestra la ruta alternativa propuesta (RAP) mientras que el panel inferior derecho presenta el detalle del trazado del proyecto en el área de intervención.

Trazados viales considerados en el análisis: R0, RA* y RAP



Figura 5. Escenarios de conectividad vial ante falla del Puente Los Molles: ruta normal (R0), alternativa actual (RA*) y alternativa propuesta (RAP)

Fuente: De Solminihac, Dagá & Perry (2019)

Conforme a la metodología del MDSF, la evaluación compara dos situaciones: la situación sin proyecto, que corresponde a la operación actual de la red, donde ante una falla del Puente Los Molles la única alternativa disponible es la ruta RA* de 132 km y 154 minutos; y la situación con proyecto, que contempla la construcción de un camino de 251 metros y un puente de 27 metros, habilitando la ruta alternativa

propuesta (RAP) de 44 km y 30 minutos, con el objetivo de restituir condiciones de conectividad cercanas a las normales ante una eventual interrupción de la Ruta 5.

6.1 Evaluación con Metodología Tradicional

Desde la perspectiva tradicional, el beneficio social de la ruta alternativa es igual a cero. La RAP no conecta localidades independientes ni mejora las condiciones de operación de rutas existentes: al tratarse de una vía de respaldo emplazada en paralelo a la Ruta 5, asumimos que su flujo vehicular en condiciones normales de operación es nulo. En consecuencia, no genera ahorro de tiempo de viaje, reducción de kilómetros recorridos ni disminución de costos de operación vehicular, ya que ninguno de estos beneficios se activa cuando el puente principal está operativo. Bajo la metodología vigente, un proyecto sin flujo en condiciones normales no produce beneficios cuantificables, por lo que la iniciativa resulta socialmente inviable antes incluso de calcular el VAN.

Para estimar los costos, se considera la construcción de un puente de 8,5 metros de ancho y 27 metros de longitud, junto con un camino de acceso de 251 metros que permite conectar la RAP con la red vial existente. Considerando un costo promedio de 40 UF por metro cuadrado, el costo del puente se calcula en función de su superficie total y utilizando costos promedio entre 20.000 y 35.000 UF por kilómetro para camino de doble calzada, el CAPEX total estimado asciende a aproximadamente \$655 millones (\$654.752.530).

En cuanto a los parámetros de evaluación, se considera un horizonte de 20 años y una vida útil promedio de 100 años para un puente, lo que permite incluir un beneficio por recuperación de valor residual de aproximadamente \$524 millones (\$523.802.024) (Ministerio de Obras Públicas, 2024). Asimismo, se asume un OPEX equivalente al 3,5% anual del CAPEX y una tasa social de descuento anual de 5,5% (Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2025).

Cabe señalar que la literatura de opciones reales aplicada a proyectos de ingeniería utiliza convencionalmente la tasa libre de riesgo como tasa de descuento, bajo el supuesto de neutralidad al riesgo que sustenta la valoración de instrumentos derivados (Cifuentes & Charlin, 2020; Cifuentes, 2021). Este enfoque tiene la ventaja de ser consistente con la teoría financiera de valoración de opciones y de no requerir estimaciones subjetivas de una prima por riesgo. Sin embargo, en el contexto de la evaluación social de proyectos públicos, el criterio relevante no es la neutralidad al riesgo de un inversionista privado, sino la rentabilidad social neta para la sociedad en su conjunto. Por ello, este ejercicio utiliza la tasa social de descuento de 5,5% anual establecida por el MDSF (Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2025), que refleja el costo de oportunidad de los recursos públicos y es el parámetro que las NIP exigen para que el pronunciamiento técnico-económico del SNI sea válido.

Bajo estos supuestos, y considerando que los beneficios directos y secundarios son nulos en la evaluación tradicional, el proyecto arroja un Valor Actual Neto (VAN) de aproximadamente -\$750 millones (-\$749.089.416). En consecuencia, desde la metodología vigente, la iniciativa sería socialmente inviable, ya que solo genera costos presentes y futuros sin beneficios cuantificables asociados al flujo actual.

En la figura 6 se presenta el flujo de costos sociales considerado en la evaluación del proyecto mediante la metodología tradicional.

Flujo de costos sociales del proyecto (RAP)

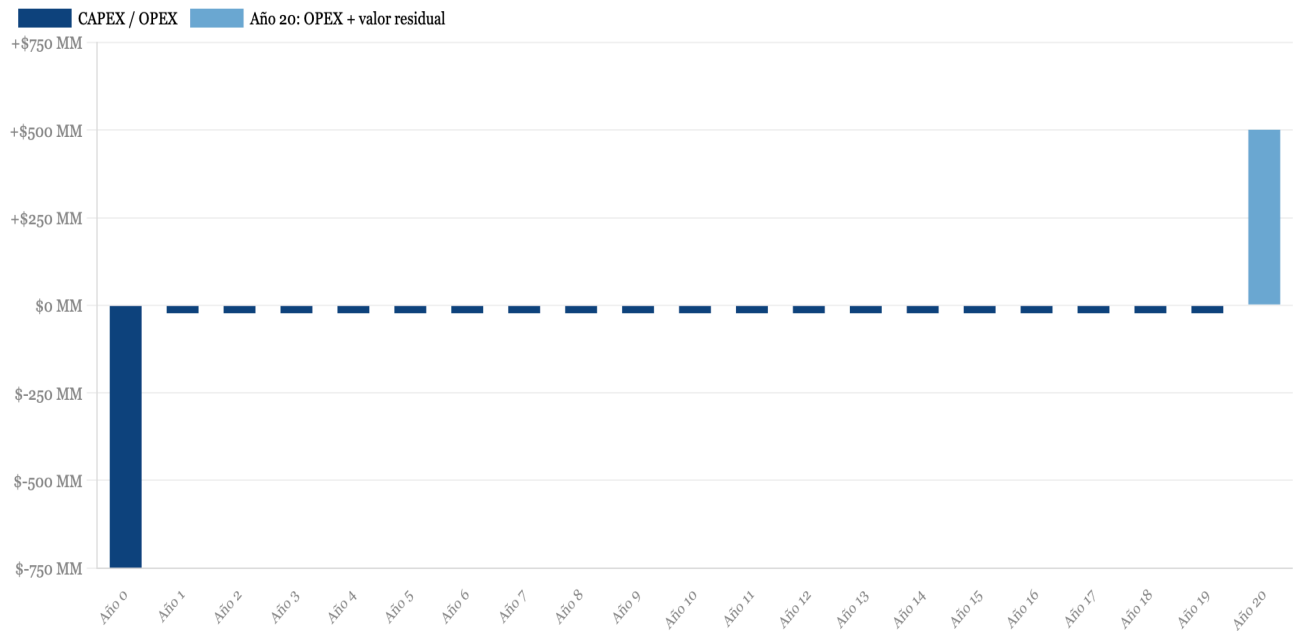


Figura 6. Mapa del tramo en estudio: RAP

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Obras Públicas (2024) y MDSF (2017)

6.2 Evaluación con Metodología Propuesta

La metodología propuesta mantiene exactamente los mismos parámetros, costos e indicadores de rentabilidad que exige el MDSF (VAN, TIR y TRI) y agrega una variable adicional: la **probabilidad de falla del puente Los Molles de la Ruta 5**. Esta variable se incorpora como un beneficio condicional dentro del mismo flujo de caja del VAN: cuando el puente falla, el proyecto genera beneficios por ahorro de tiempo de viaje y reducción de costos de operación vehicular para los usuarios desviados, que son exactamente las mismas variables que la metodología vigente ya reconoce.

Cabe señalar que la Ruta 5 opera bajo un régimen de concesión privada, lo que implica que su gestión del riesgo y los mecanismos de financiamiento ante eventos

de falla difieren de los aplicables a rutas administradas directamente por la Dirección de Vialidad. En una concesión, los contratos suelen establecer garantías, seguros y mecanismos de compensación específicos que distribuyen el riesgo entre el concesionario y el Estado de manera distinta a la inversión pública directa. Sin embargo, para efectos ilustrativos de la metodología propuesta, el presente ejercicio aplica la misma lógica de evaluación social utilizada en proyectos de vialidad pública, centrada en los beneficios para los usuarios y no en la estructura contractual de la ruta principal. Esta simplificación es coherente con el propósito del ejercicio, que es demostrar el funcionamiento del enfoque probabilístico y no realizar una evaluación exhaustiva del caso específico.

Primero, para estimar la probabilidad de falla se utilizan curvas de fragilidad sísmica que permiten estimar la probabilidad de que el puente experimente distintos niveles de daño ante un determinado grado de Peak Ground Acceleration (PGA), medida de intensidad sísmica que nos dice la aceleración máxima del suelo. Como vimos anteriormente, en el estudio “Development and comparison of seismic fragility curves for bridges based on empirical and analytical approaches” (Allen et al., 2021), presentan dos curvas de fragilidad diferenciadas: una asociada a falla severa y otra a falla moderada, las cuales se mostraron anteriormente en la Figura 4. En el primer caso, se asume que el 100% del flujo de la Ruta 5 se desvía hacia la RAP; en el segundo, que el 55% del flujo se redirige por la vía alternativa.

Las curvas de fragilidad entregan la probabilidad condicional de falla (severa o moderada) dado un cierto nivel de PGA. Para estimar la distribución del PGA se emplea la metodología descrita anteriormente. En el Anexo A se presenta la distribución de probabilidad obtenida para el año 1 del proyecto, la cual es similar a la del resto de los años de evaluación.

Con todos los insumos, se realizan 10.000 simulaciones Monte Carlo para cada uno de los 20 años del horizonte de evaluación. En cada iteración se simula si el puente falla y, de ocurrir, si la falla es severa o moderada. Los resultados indican que la probabilidad anual promedio de falla severa es aproximadamente 1,2%, mientras

que la de falla moderada es cercana a 2,3%, cuyas curvas de probabilidad se pueden ver en los anexos B y C respectivamente.

En caso de falla del Puente Los Molles, se supone que la totalidad del flujo de la Ruta 5 se desviaría hacia la RAP, dado que esta constituiría la única alternativa funcional de tiempo y distancia razonables. El flujo de la ruta alternativa propuesta pasaría a ser entonces la suma del flujo habitual de la RAP, aproximado a cero en condiciones normales, por las razones señaladas anteriormente, más el flujo completo proveniente de la Ruta 5. Según datos del MOP, el flujo diario promedio anual (TPDA) de la Ruta 5 en ese sector es de 30.391 vehículos, de los cuales un 10,21% corresponde a camiones y vehículos pesados (Dirección de Vialidad de Chile, 2025). Asimismo, se asume una tasa de crecimiento anual del flujo de 4%.

Es importante reconocer una limitación del enfoque adoptado en este ejercicio: el cálculo de beneficios supone que la totalidad del flujo de la Ruta 5 se desvía hacia la RAP ante una falla del puente, sin modelar el comportamiento real del tráfico en ese escenario. La metodología vigente del MDSF cuantifica costos y beneficios principalmente en términos de ahorro de tiempo de viaje y reducción de costos de operación vehicular, lo que es coherente con este supuesto simplificador. Sin embargo, en la práctica, ante una interrupción vial no todos los usuarios se desvían por la misma ruta ni de manera inmediata: algunos postponen sus viajes, otros buscan rutas alternativas distintas y la asignación del tráfico se redistribuye dinámicamente en función de la capacidad y las condiciones de cada arco de la red. Modelar este comportamiento con mayor precisión requeriría incorporar modelos de asignación de tráfico que consideren las demoras, la capacidad de cada ruta y la respuesta de los usuarios ante la interrupción, lo que constituye una mejora metodológica relevante para etapas posteriores del ciclo de inversión.

Por otro lado, en caso de falla del puente, también se genera un beneficio asociado a la reducción de los costos de operación vehicular, derivado principalmente del menor consumo de combustible. Este consumo depende de variables como la rugosidad del pavimento y la velocidad de operación, y se estima mediante un modelo de consumo calibrado a partir del modelo HDM-4. Este ahorro en costos de

operación se incorpora como un beneficio adicional dentro de la evaluación social del proyecto.

A partir de estos supuestos y estimaciones, se estima que cada vez que ocurre una falla severa del puente de la Ruta 5, el beneficio social asociado al proyecto asciende a aproximadamente \$96 mil millones de pesos. En caso de falla moderada, el beneficio corresponde al 55% de dicho monto, en línea con la proporción de flujo desviado.

Los costos del proyecto, el OPEX anual equivalente al 3,5% del CAPEX, la tasa social de descuento de 5,5% y el beneficio por recuperación del valor residual se mantienen idénticos a los considerados en la evaluación tradicional, conforme a los lineamientos del Ministerio de Desarrollo Social y Familia (2025).

Incorporando el componente probabilístico de riesgo, los resultados muestran que la probabilidad de que el Valor Actual Neto Social (VANS) sea mayor que cero alcanza aproximadamente un 94,4%. Además, el VANS esperado es considerablemente alto, en torno a \$43.480 millones de pesos. En la Figura 7 se presenta la distribución de los VANS obtenidos en las 10.000 simulaciones, mostrando la frecuencia relativa de cada resultado y el valor esperado correspondiente.

Valor Esperado del VANS

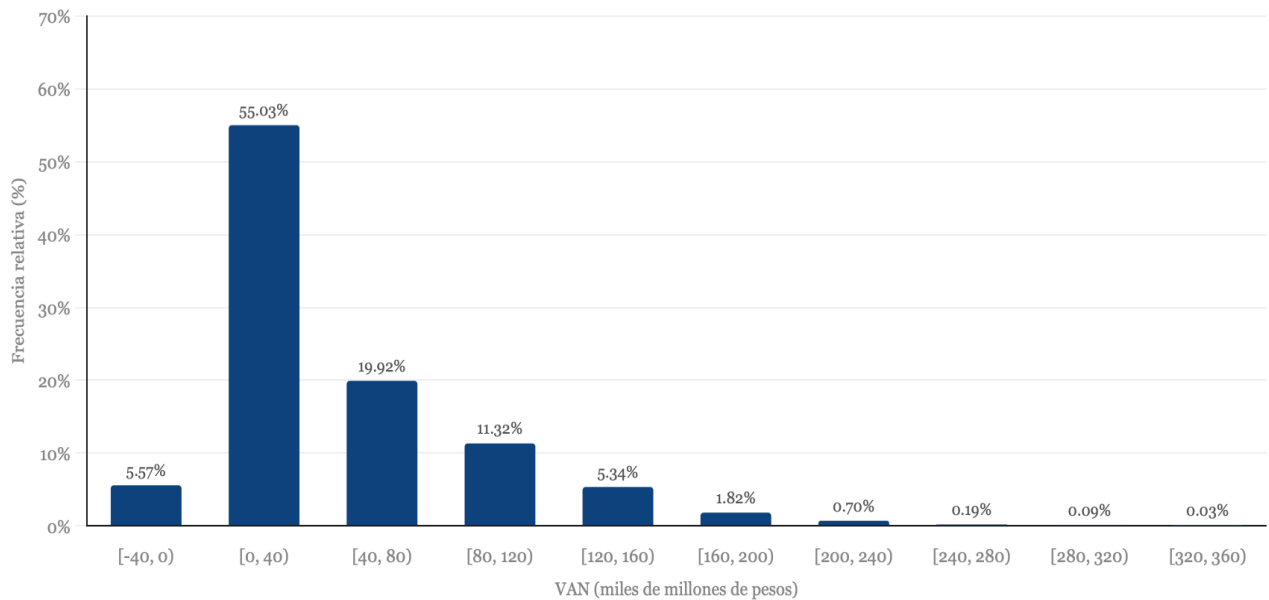


Figura 7. Distribución de probabilidad del Valor Actual Neto Social

Fuente: Elaboración propia a partir de Abrahamson, Gregor y Addo (2016); Allen, Amaya, Chamorro, Santa María, Baratta, de Solminihac & Echaveguren (2021); Joyner y Boore (1988); y Poulos, Monsalve, Zamora y de la Llera (2019).

En la Figura 8 se presentan las probabilidades acumuladas del Valor Actual Neto Social (VANS). Se observa que el percentil 10 se ubica aproximadamente en mil millones, mientras que la mediana se encuentra alrededor de \$26 mil millones.

Probabilidad Acumulada del VANS

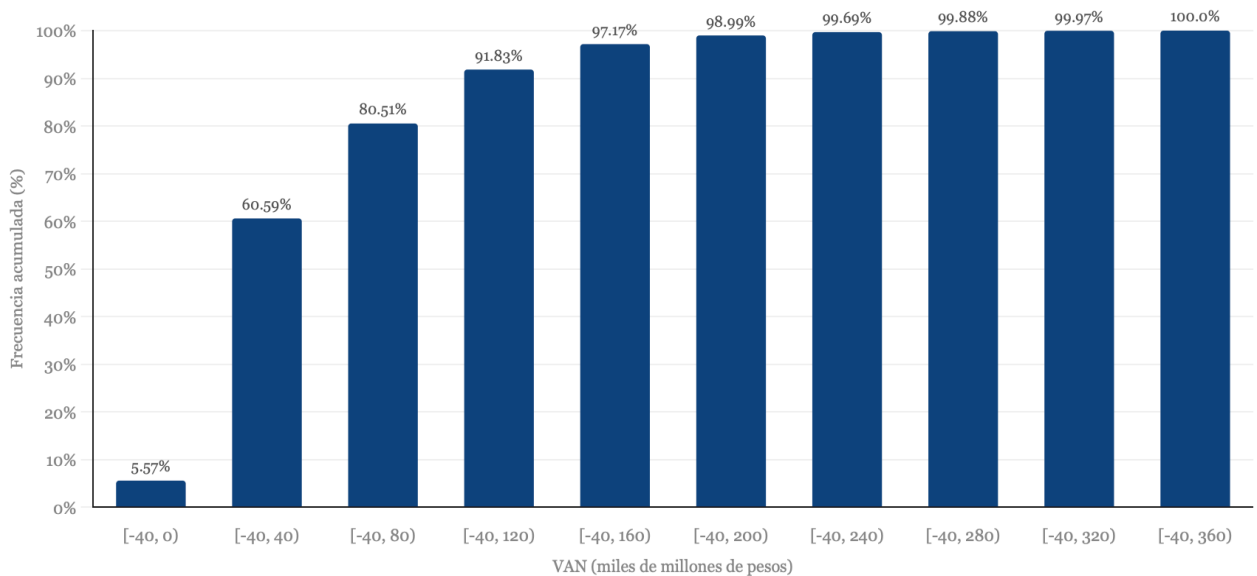


Figura 8. Probabilidad acumulada del Valor Actual Neto Social

Fuente: Elaboración propia a partir de Abrahamson, Gregor y Addo (2016); Allen, Amaya, Chamorro, Santa María, Baratta, de Solminihac & Echaveguren (2021); Joyner y Boore (1988); y Poulos, Monsalve, Zamora y de la Llera (2019).

Bajo la metodología incorporando riesgo, el proyecto resulta socialmente rentable: el VANS esperado es positivo y elevado, en torno a \$43.480 millones de pesos, y el percentil 10 también es positivo, lo que indica que incluso en escenarios desfavorables el proyecto tiende a generar valor social. Más aún, basta con que ocurra un único evento sísmico que provoque una falla severa o moderada del Puente Los Molles durante el horizonte de evaluación para que el VANS del proyecto pase a ser positivo, dado que el beneficio social asociado a evitar el desvío por la RA* de 154 minutos es de una magnitud suficiente para recuperar con creces la inversión realizada. Sin embargo, es importante no perder de vista una tensión inherente a este tipo de evaluación: si transcurren los veinte años sin que se produzca un evento de esa magnitud (escenario perfectamente posible dada la baja probabilidad anual

de falla), el proyecto no generará beneficios sociales y su VANS realizado será negativo. En otras palabras, aprobar este proyecto implica asumir una apuesta: se comprometen recursos públicos hoy a cambio de un beneficio que solo se materializará si ocurre un evento de baja probabilidad. Esta es precisamente la naturaleza de la inversión en resiliencia, y el VAN probabilístico permite transparentar esa apuesta en lugar de ignorarla, entregando al decisor público información más honesta sobre el riesgo que está asumiendo.

Una pregunta que surge naturalmente en este contexto es si resulta preferible construir dos puentes de menor capacidad que uno de gran envergadura, o bien invertir en una infraestructura única pero diseñada para resistir prácticamente cualquier evento extremo. La respuesta no es trivial y depende de los costos, las probabilidades de falla y la estructura de la red. Un puente de diseño excepcional puede reducir significativamente la probabilidad de falla del elemento, pero no la elimina completamente, y su costo marginal suele crecer de manera no lineal a medida que se elevan los estándares de resistencia. Más importante aún, este enfoque no resuelve el problema de la resiliencia del sistema: si el activo único falla, por improbable que sea, la interrupción del servicio es total y no existe alternativa. En cambio, una ruta alternativa actúa sobre una dimensión distinta de la resiliencia: **no busca evitar la falla del elemento, sino garantizar la continuidad del servicio ante esa falla.** Es precisamente esta distinción, entre resiliencia del elemento y resiliencia del sistema, la que justifica evaluar proyectos de redundancia vial mediante un enfoque que incorpore explícitamente la probabilidad de interrupción, en lugar de limitarse a exigir mayores estándares constructivos en la infraestructura existente.

7. CRITERIO DE ACEPTACIÓN DEL PROYECTO

Es fundamental definir el criterio bajo el cual se decide aceptar o rechazar un proyecto cuando la evaluación incorpora explícitamente incertidumbre. En este contexto, la pregunta relevante no es solo si el VAN esperado es positivo, sino cuál

es la probabilidad mínima de que el VAN sea mayor que cero para considerar socialmente conveniente la inversión (NPV-at-risk). Que el VAN esperado sea positivo es un punto de partida necesario pero no suficiente: constituye la condición mínima de aceptabilidad, pero no garantiza por sí solo la conveniencia social del proyecto, ya que no informa sobre la distribución de resultados posibles ni sobre la probabilidad de obtener un resultado adverso. Como señala el Banco Mundial, una vez que un proyecto es considerado aceptable en términos de su retorno esperado, el criterio de decisión estándar es maximizar el VAN esperado, sin que ello implique ignorar el riesgo asociado a la distribución de resultados (Institute for Transport Studies, University of Leeds, 2003). En otras palabras, el umbral de aceptación refleja el grado de aversión al riesgo del tomador de decisiones, que en este caso es el Estado.

Mientras menor sea la probabilidad exigida de obtener un VAN positivo, mayor será la disposición a asumir riesgo. Por el contrario, exigir una probabilidad elevada implica una postura más aversa al riesgo. No existe un criterio técnico universal que determine cuál debe ser ese umbral, ya que depende de la función objetivo del decisor, de sus restricciones presupuestarias y de su tolerancia a la posibilidad de pérdidas sociales.

Sin embargo, dado que el Estado administra recursos públicos y enfrenta responsabilidad intergeneracional, es razonable asumir que presenta una aversión al riesgo relevante. No existe un umbral universalmente establecido en la literatura para este criterio, ya que depende de la tolerancia al riesgo del decisor y del contexto institucional (Ministry of Transport New Zealand, 2019). Algunas guías de evaluación probabilística mencionan umbrales de referencia como el 75% de probabilidad de VAN positivo como regla para proceder con una inversión (DCF Modeling, 2025). Esta elección del umbral puede formalizarse en términos estadísticos: exigir que el VANS sea positivo con al menos cierta probabilidad equivale a fijar un nivel de significancia α , es decir, la probabilidad máxima aceptable de cometer un error tipo I, aprobar un proyecto que en realidad no es socialmente conveniente. La literatura estadística estándar utiliza convencionalmente $\alpha = 5\%$ como umbral de referencia (equivalente a exigir un 95% de probabilidad de resultado positivo),

aunque en contextos aplicados se acepta $\alpha = 10\%$ como criterio más permisivo (Scribbr, 2023). A modo de propuesta, este trabajo sugiere adoptar un criterio con $\alpha=10\%$, es decir, exigir que el proyecto tenga al menos un 90% de probabilidad de que el VANS sea positivo. Este umbral es más exigente que referencias como el 75% mencionado por guías de evaluación probabilística o el criterio implícito en documentos como el de Nueva Zelanda (Ministry of Transport New Zealand, 2019), pero más permisivo que el $\alpha = 5\%$ convencional en econometría. Por un lado, debido a la naturaleza desafiante de los eventos de baja probabilidad y alto impacto, los criterios de decisión deben ser más amplios y flexibles que los métodos tradicionales (Talarico, Reniers & Paltrinieri, 2016). Por otro lado, esta postura de mayor cautela se justifica por la naturaleza pública de los recursos involucrados y por la responsabilidad del Estado de evitar comprometer fondos fiscales en inversiones con alta probabilidad de resultados adversos. En consecuencia, la decisión de inversión no depende únicamente de un VAN esperado positivo o de un escenario base optimista, sino de que la densidad de probabilidad de los resultados respalde con solidez la conveniencia social del proyecto.

Aplicando este criterio al caso analizado, el proyecto de ruta alternativa al Puente Los Molles sería aprobado. El VANS esperado es positivo y elevado y el percentil 10, que representa el peor decil de resultados simulados, también es positivo, lo que significa que incluso en los escenarios más desfavorables considerados por la simulación el proyecto genera valor social neto. En consecuencia, la probabilidad de obtener un VANS positivo supera con holgura el umbral del 90% exigido bajo el criterio $\alpha=10\%$, cumpliendo así la condición de aprobación propuesta. Este resultado contrasta de manera elocuente con la evaluación tradicional, que rechazaría el proyecto por tener beneficios nulos en condiciones normales de operación, evidenciando que la metodología probabilística no solo enriquece la lectura del riesgo, sino que puede revertir decisiones de inversión que el enfoque determinista descartaría sin mayor análisis.

8. RESPETAR EL CONCEPTO DE PROPORCIONALIDAD

Teniendo en cuenta la metodología presentada anteriormente, y aun cuando esta permite incorporar explícitamente el concepto de resiliencia, es importante reconocer que no resulta aplicable a todo tipo de proyectos. Esta limitación no solo se explica por la falta de información disponible en ciertos casos, sino también por la necesidad de respetar el principio de proporcionalidad. Dicho principio establece que la profundidad y complejidad de la evaluación deben ajustarse a las características de cada iniciativa, con el objetivo de optimizar el uso de los recursos públicos y mejorar la eficiencia en la gestión del Estado.

La aplicación del principio de proporcionalidad responde, en primer lugar, a la necesidad de optimizar recursos y capacidades limitadas. Los organismos públicos responsables de formular y evaluar proyectos enfrentan restricciones tanto presupuestarias como de capacidad técnica. En este contexto, resulta fundamental priorizar los esfuerzos institucionales hacia aquellas iniciativas que, por su magnitud, complejidad o nivel de riesgo, representan una mayor exposición para el erario público o generan impactos sociales significativamente más altos (Comisión Asesora de Evaluación Social de Inversiones, 2022). Aplicar el mismo nivel de exigencia a todos los proyectos implicaría diluir recursos en evaluaciones que no lo justifican.

En segundo lugar, la proporcionalidad busca evitar plazos de aprobación excesivos. Según la Comisión Asesora de Evaluación Social de Inversiones (2022), someter a todos los proyectos al mismo rigor analítico, especialmente a aquellos de menor cuantía, genera una presión innecesaria sobre los procesos de evaluación. Esto se traduce frecuentemente en retrasos injustificados para iniciativas pequeñas, afectando la agilidad de la inversión pública. Bajo un enfoque proporcional, los proyectos de bajo costo y bajo riesgo pueden ser evaluados y aprobados de manera más expedita, sin sacrificar estándares básicos de calidad.

Otro elemento central es la reducción de la incertidumbre y la adecuada gestión de riesgos. Las distintas etapas del ciclo de vida de un proyecto (perfil, prefactibilidad y factibilidad) tienen como objetivo aumentar gradualmente la certidumbre respecto

de los costos y beneficios (Comisión Asesora de Evaluación Social de Inversiones, 2022). En este sentido, las fuentes destacan que los proyectos con alta probabilidad de riesgos constructivos, financieros o de sobrecostos requieren análisis técnico-económicos más profundos antes de comprometer recursos públicos. En contraste, para proyectos de baja cuantía o sin riesgos constructivos relevantes, un esfuerzo de evaluación exhaustivo no se justifica, por lo que se recomiendan esquemas de evaluación simplificados.

Este enfoque es coherente con los estándares y prácticas internacionales promovidas por la OCDE. La experiencia comparada muestra que, en la mayoría de los países desarrollados, la revisión técnica no es igualmente exhaustiva para todos los proyectos. Por el contrario, los sistemas de inversión pública concentran su atención en iniciativas de mayor tamaño, relevancia o importancia estratégica. Un ejemplo claro es el Reino Unido, donde el Tesoro revisa únicamente los denominados “Grandes Proyectos”, delegando la aprobación de las iniciativas de menor escala a los ministerios sectoriales, lo que demuestra que la revisión centralizada resulta eficiente solo en casos de alta magnitud y riesgo (Comisión Asesora de Evaluación Social de Inversiones, 2022).

Finalmente, el principio de proporcionalidad también se justifica por el costo de generar información, especialmente en la evaluación ex post, una vez ejecutada la obra. No resulta eficiente destinar recursos significativos a la recolección de información compleja para evaluar proyectos pequeños cuyos resultados esperados no justifican una inversión elevada en análisis. En estos casos, el costo del proceso evaluativo puede superar los beneficios de la información obtenida.

9. CONCLUSIÓN

A modo de conclusión, el presente trabajo muestra que incorporar explícitamente la resiliencia en la evaluación social de proyectos no es simplemente un refinamiento metodológico, sino una necesidad estructural en un país altamente expuesto a amenazas naturales como Chile. La revisión conceptual permitió distinguir entre

resiliencia del elemento y resiliencia del sistema, destacando que la continuidad del servicio no depende únicamente de la robustez física de una infraestructura individual, sino también de la existencia de redundancia y capacidad de recuperación a nivel de red.

El análisis comparativo entre la metodología tradicional y la propuesta probabilística evidencia que el enfoque determinista, basado en un VAN único bajo condiciones normales de operación, resulta insuficiente para capturar el valor social asociado a escenarios de falla. Al incorporar la probabilidad de interrupción mediante simulaciones Monte Carlo y curvas de fragilidad, el VAN deja de ser un valor puntual y pasa a representarse como una distribución que refleja explícitamente el riesgo. Esto enriquece la toma de decisiones públicas, al permitir evaluar no solo la rentabilidad esperada, sino también la probabilidad de resultados adversos o favorables.

El caso aplicado al Puente Los Molles de la Ruta 5 y su ruta alternativa propuesta (RAP) ilustra con claridad el potencial de esta metodología. Bajo la evaluación tradicional, el proyecto resulta socialmente inviable: en condiciones normales de operación, la RAP no genera flujo alguno y, por tanto, sus beneficios son nulos. Sin embargo, al incorporar la probabilidad de falla del puente principal, el panorama cambia radicalmente. Basta con que ocurra un único evento sísmico que provoque una falla severa o moderada del Puente Los Molles para que el VANS del proyecto sea positivo, dado que el beneficio social de evitar el desvío por la ruta alternativa actual de 154 minutos y 132 km es de una magnitud suficiente para recuperar con creces la inversión. El VANS esperado bajo la metodología probabilística asciende a \$43 mil millones de pesos, con un percentil 10 también positivo, lo que cumple con creces el criterio de aceptación propuesto con $\alpha=10\%$. En este caso, la metodología probabilística no solo modifica la lectura del riesgo, sino que revierte completamente la decisión de inversión.

Sin embargo, la metodología propuesta enfrenta limitaciones relevantes que deben reconocerse. En primer lugar, la evaluación opera sobre un horizonte fijo de veinte años, lo que implica asumir que es posible caracterizar con suficiente precisión la

probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos dentro de ese período. Para amenazas con patrones de recurrencia relativamente estables, como eventos hidrometeorológicos, este supuesto es razonable. Para los terremotos, donde la capacidad de predicción temporal es limitada, la lógica del VAN probabilístico sobre un horizonte fijo puede subestimar o sobreestimar el riesgo real.

En segundo lugar, las curvas de fragilidad utilizadas caracterizan el comportamiento estructural de la infraestructura en su estado original de diseño, sin considerar el deterioro acumulado por solicitaciones repetidas a lo largo de la vida útil. Las medidas de mitigación pueden recuperar parcialmente el nivel de servicio, pero en general no restituyen la infraestructura a su condición original, lo que implica que las probabilidades de falla estimadas tienden a ser optimistas.

En tercer lugar, la metodología supone que la totalidad del flujo se desvía por la ruta alternativa ante una falla, sin modelar el comportamiento real del tráfico ni la asignación dinámica de flujos entre arcos alternativos, lo que introduce un sesgo en la estimación de beneficios.

En cuarto lugar, el análisis se centra exclusivamente en la amenaza sísmica, dejando fuera otros riesgos naturales relevantes para Chile, como erupciones volcánicas, remociones en masa e inundaciones de origen hidrometeorológico. Dado que cada elemento de la red vial presenta un perfil de vulnerabilidad distinto frente a cada tipo de amenaza, una evaluación verdaderamente multi-riesgo requeriría modelar cómo estas amenazas afectan de manera diferenciada a cada componente del sistema, lo que excede el alcance de este trabajo pero constituye una dirección prioritaria para investigaciones futuras.

En quinto lugar, el modelo supone que ante una falla del activo principal, la infraestructura de la ruta alternativa permanece operativa. Sin embargo, ante un evento sísmico o climático de magnitud suficiente, ambas estructuras podrían verse afectadas simultáneamente, dado que se ubican en proximidad geográfica y comparten la misma zona de amenaza. En la práctica, esta probabilidad de falla conjunta tiende a ser reducida cuando ambas infraestructuras tienen distintos años

de construcción, lo que implica diferencias en sus estándares de diseño, materiales y estado de deterioro acumulado, factores que se traducen en perfiles de vulnerabilidad distintos frente a una misma intensidad de demanda. No obstante, esta correlación espacial entre activos no es nula, y su omisión puede llevar a sobreestimar los beneficios de la ruta alternativa en escenarios de evento extremo. Incorporar explícitamente la dependencia entre las probabilidades de falla de ambas estructuras constituye una extensión metodológica relevante para investigaciones futuras.

También se reconoce que este tipo de evaluación más compleja no debe aplicarse indiscriminadamente. El principio de proporcionalidad resulta clave para resguardar la eficiencia del sistema de inversión pública, ajustando la profundidad del análisis al tamaño, riesgo e impacto potencial de cada proyecto. No todos los proyectos justifican un modelamiento probabilístico avanzado, pero aquellos que involucran activos críticos con baja resiliencia de red, como puentes en corredores de conectividad nacional sin alternativas razonables, sí requieren una evaluación que internalice adecuadamente la incertidumbre.

Con todo, las limitaciones identificadas no invalidan la propuesta sino que orientan su implementación gradual. En ese sentido, se propone incorporar la metodología probabilística como instancia piloto dentro del sistema de evaluación social vigente, aplicable en una primera etapa a proyectos de infraestructura vial crítica que cumplan criterios de selección basados en exposición a amenazas naturales, baja resiliencia de red y magnitud del impacto potencial sobre la conectividad. Esta incorporación no requiere reemplazar los instrumentos actuales del SNI, sino complementarlos: el VAN determinista continuaría siendo el criterio principal de decisión, mientras que el VANS probabilístico operaría como criterio de contraste que permite identificar proyectos cuya viabilidad social depende de escenarios de riesgo no capturados por la evaluación estándar. Una implementación piloto permitiría, además, validar los supuestos metodológicos en contextos reales, afinar los parámetros de las curvas de fragilidad con datos observados y generar aprendizaje institucional progresivo en el MDSF y la Dirección de Vialidad.

Avanzar hacia una evaluación social que integre resiliencia y riesgo no implica abandonar los criterios tradicionales de eficiencia económica, sino complementarlos. En un contexto de cambio climático y alta exposición sísmica, la política pública debe evolucionar desde una lógica centrada exclusivamente en el escenario promedio hacia una visión que incorpore explícitamente la incertidumbre y la continuidad del servicio como parte del bienestar social. Solo así será posible asignar recursos públicos no solo de manera eficiente, sino también de manera responsable frente a las generaciones presentes y futuras.

BIBLIOGRAFÍA

Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23–44.

Allen, E., Amaya, T., Chamorro, A., Santa María, H., Baratta, F., de Solminihac, H., & Echaveguren, T. (2021). Development and comparison of seismic fragility curves for bridges based on empirical and analytical approaches. *Structure and Infrastructure Engineering*.

Allen, E., Chamorro, A., Poulos, A., Castro, S., de la Llera, J. C., & Echaveguren, T. (2021). Sensitivity analysis and uncertainty quantification of a seismic risk model for road networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*.

Cartes, P., Echaveguren Navarro, T., Chamorro Giné, A., & Allen Binet, E. (2021). A cost-benefit approach to recover the performance of roads affected by natural disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.

Chamorro, M., Echaveguren, T., Pattillo, C., Contreras-Jara, M., Contreras, M., Allen, E., Nieto, N., & De Solminihac, H. (2023). SIGeR-RV: A web-geographic information system-based system for risk management of road networks exposed to natural hazards.

Cifuentes, A., & Charlin, V. (2020). Valuation of engineering projects using real options: A volatility-free framework based on closed-form expressions (Documento de Trabajo N°69). CLAPES UC.

Cifuentes, A. (2021). Valuation of a toll road with a potential to expand: A comparison between two real options-based approaches (Documento de Trabajo N°104). CLAPES UC.

Comisión Asesora de Evaluación Social de Inversiones. (2022). Informe de la Comisión Asesora de Evaluación Social de Inversiones 2022: Revisión del diseño institucional de la evaluación social de inversiones en Chile y recomendaciones (Sistema Nacional de Inversiones).

DCF Modeling. (2025). An in-depth overview of cost-benefit analysis. <https://dcf-model.com/blogs/blog/overview-cost-benefit-analysis>

de Rus G. (2010). Introduction to Cost-Benefit Analysis: Looking for Reasonable Shortcuts. Edward Elgar Publishing Inc. Massachusetts. <https://jaimedv.com/eco/4c1-cba/gines-de-rus--cost-benefit-analysis--book.pdf>

de Solminihac Tampier, H., Dagá Kunze, J., & Perry Vives, J. (2019). Redundancia de puentes de la Ruta 5 entre Caldera y Pargua (Documento de Trabajo N.º 54). CLAPES UC. <https://clapesuc.cl/investigacion/doc-trabajo-no54-redundancia-de-puentes-de-la-ruta-5-entre-caldera-y-pargua>

de Solminihac, H., Hernández, L., Azúa, G., & Padilla, R. (2020). Evaluación del diseño, implementación y resultados del Plan Especial de Desarrollo de Zonas Extremas (PEDZE) (Documento de Trabajo N.º 91). Centro Latinoamericano de Políticas Económicas y Sociales (CLAPES UC). <https://clapesuc.cl/investigacion/doc-trabajo-n91-evaluacion-del-diseno-implementacion-y-resultados-del-plan-especial-de-desarrollo-de-zonas-extremas-pedze>

Dirección de Vialidad de Chile. (2025). Plan nacional de censo vial. Ministerio de Obras Públicas de Chile. <https://vialidad.mop.gob.cl/plan-nacional-de-censo-vial/>

División de Evaluación Social de Inversiones. (2017, diciembre). Metodología complementaria para la evaluación de riesgo de desastres de proyectos de infraestructura pública. Sistema Nacional de Inversiones, Ministerio de Hacienda de Chile.

Echaveguren, T., & Chamorro, A. (s. f.). Integración de riesgo y resiliencia en la evaluación social de proyectos de vialidad interurbana.

Echaveguren, T., Fernández, M.P. & Muñoz, G. (2023). Actualización del método de evaluación rápida de riesgos hidrometeorológicos en la red vial. 14º Congreso internacional PROVIAL. 6 -10 de Octubre de 2023, Pucón, Chile.

El Cronista. (2011, 25 de febrero). La reconstrucción de Chile, a un año del terremoto. <https://www.cronista.com/we/La-reconstruccion-de-Chile-a-un-ano-del-terremoto-20110225-0018.html>

Gobierno de Chile. (2010). Plan de Reconstrucción Terremoto y Maremoto del 27 de Febrero de 2010. <http://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/pdf/plan-reconstruccion-resumen-ejecutivo.pdf>

Hallegatte, S., Rentschler, J., & Rozenberg, J. (2019). Lifelines: The resilient infrastructure opportunity (World Bank Publications). World Bank.

Inesa-Tech. (s. f.). Curvas de fragilidad: qué son y para qué se utilizan.

Institute for Transport Studies, University of Leeds. (2003). Risk & uncertainty analysis. Toolkit for the Economic Evaluation of World Bank Transport Projects. <https://www.its.leeds.ac.uk/projects/WBToolkit/Note2.htm>

Joyner, W. B., & Boore, D. M. (1988). Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion. In Earthquake engineering and soil dynamics II, Proceedings of American Society of Civil Engineers Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, (pp. 43–102), Park City, Utah. American Society of Civil Engineers.

Joyner, W. B., & Boore, D. M. (1988). Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion. En Proceedings of Earthquake Engineering & Soil Dynamics II, GT Div/ASCE, Park City, Utah, June 27–30, 1988.

Mechler, R. (2016). Reviewing estimates of the economic efficiency of disaster risk management: opportunities and limitations of using risk-based cost–benefit analysis. *Natural Hazards*, 81, 2121–2147. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-016-2170-y>

Ministerio de Desarrollo Social (MDSF). (2016). Metodología para la evaluación socioeconómica de proyectos de transporte ferroviario. División de Evaluación Social

de Inversiones. <https://sni.gob.cl/wp-content/uploads/Metodologia-Transporte-Ferroviario-2016.pdf>

Ministerio de Desarrollo Social. (2015). Evaluación socioeconómica de proyectos de inversión pública. Subsecretaría de Evaluación Social, División de Evaluación Social de Inversiones.

Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MDSF). (2017). Metodología de evaluación social de proyectos de vialidad interurbana. Santiago: MDSF. <https://sni.gob.cl/storage/docs/Metodologia%20Vialidad%20Intermedia%20052017.pdf>

Ministerio de Desarrollo Social y Familia, Subsecretaría de Evaluación Social, División de Evaluación Social de Inversiones. (2025). Precios sociales: Reporte anual 2025. Sistema Nacional de Inversiones.

Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (2023). Decreto N°86. Reglamento que regula los organismos técnicos para el monitoreo de amenazas; organismos técnicos para el monitoreo sectorial; los instrumentos para la gestión del riesgo de desastres; y los procedimientos de elaboración de los mapas de amenaza y los mapas de riesgo. SENAPRED. https://web.senapred.cl/wp-content/uploads/2024/02/Decreto-86_17-OCT-2023.pdf

Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2011). Estudio básico catastro georreferenciado de riesgos y peligros naturales en la red vial. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Chile.

Ministerio de Obras Públicas de Chile. (2024). Circular aclaratoria N° 8: Construcción Puente sobre el Canal de Chacao. https://www.mop.gob.cl/archivos/2024/06/Circular_Aclaratoria_8_Construccion_Puente_Chacao.pdf

Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Obras Públicas. (2013). Confección de curvas flujo-velocidad en vialidad urbana e interurbana: Informe final. Gobierno de Chile.

Ministry of Transport New Zealand. (2019). Incorporating and assessing travel demand uncertainty in transport investment appraisals (Research Report 620). NZ Transport

Agency. <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/620/620-Incorporating-and-assessing-travel-demand-uncertainty-in-transport-investment-appraisals.pdf>

Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., & de la Llera, J. C. (2019). An updated recurrence model for Chilean subduction seismicity and statistical validation of its Poisson nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1), 66–74.

Sadigh, K., Egan, J., & Youngs, R. (1986). Specification of ground motion for seismic design of long period structures. *Earthquake Notes*, 57(1), 13.

Scribbr. (2023, enero 18). Type I and Type II errors | Differences, examples, visualizations. <https://www.scribbr.com/statistics/type-i-and-type-ii-errors/>

SERNAGEOMIN. (2003). Mapa geológico de Chile.

Talarico, L., Reniers, G., & Paltrinieri, N. (2016). Cost-benefit analysis for low-probability, high-impact risks: Tutorials and examples. En *Dynamic risk analysis in the chemical and petroleum industry* (pp. 207–217). Elsevier.

Tapia, P., Roldán, W., & Villacis, C. (2002). Vulnerabilidad sísmica de las ciudades del norte de Chile: Arica, Antofagasta y Copiapó. En *VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Valparaíso, Chile.

Valdés Rojas, O. (2019). *Infraestructura pública resiliente al riesgo de desastres: desarrollo metodológico para su evaluación en el marco del Sistema Nacional de Inversiones* [Tesis de magíster, Universidad de Chile]. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.

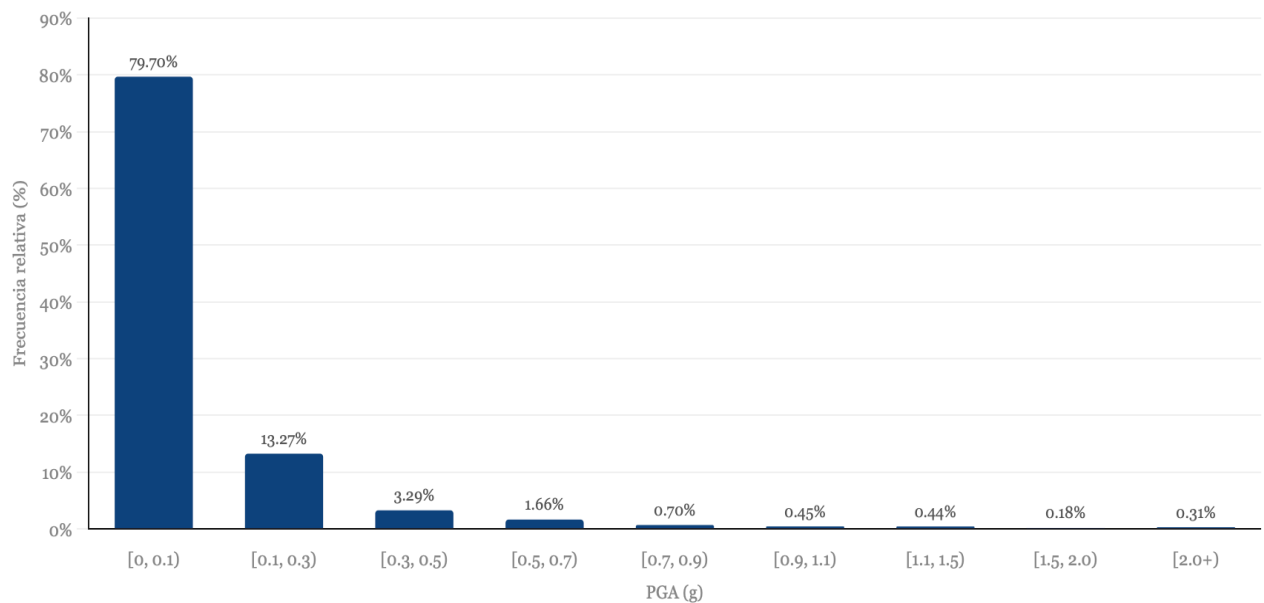
World Bank. (2019, June 19). \$4.2 trillion can be saved by investing in more resilient infrastructure, new World Bank report finds [Press release]. World Bank.

Youd, T. L., & Perkins, D. M. (1987). Mapping of liquefaction severity index. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(11), 1374–1392.

ANEXOS

Anexo A: Función Distribución de los Valores de PGA

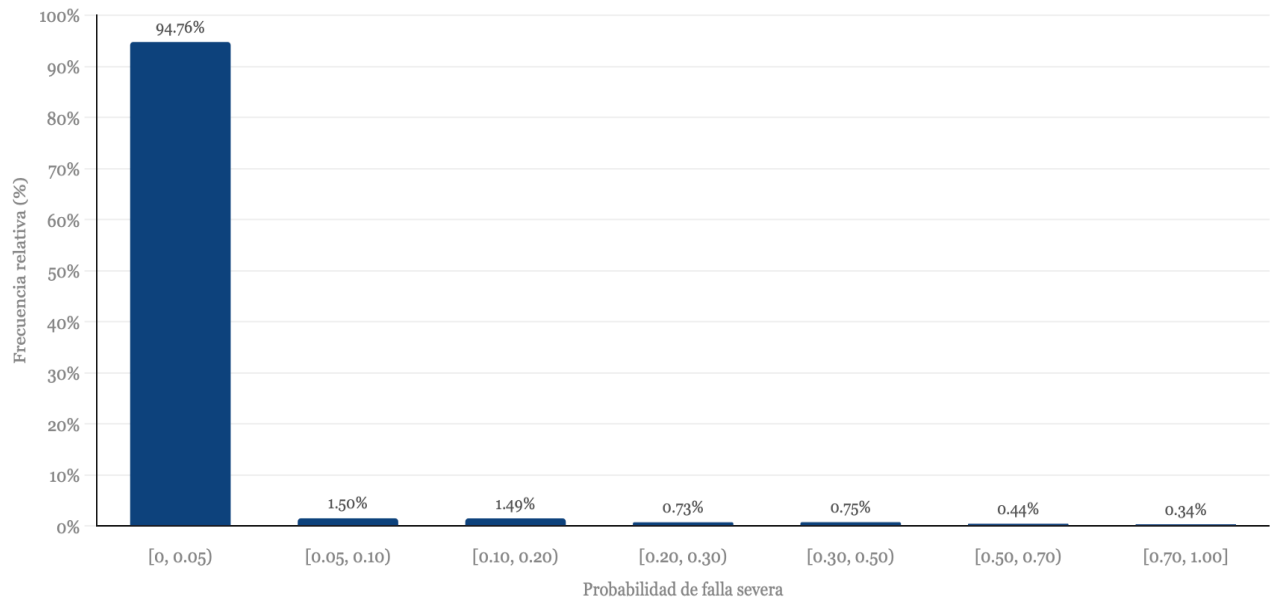
Función Distribución de Probabilidad PGA



Fuente: Elaboración propia a partir de Abrahamson, Gregor y Addo (2016); Joyner y Boore (1988); y Poulos, Monsalve, Zamora y de la Llera (2019).

Anexo B: Frecuencia Distribución de Probabilidad de Falla Severa en Puente

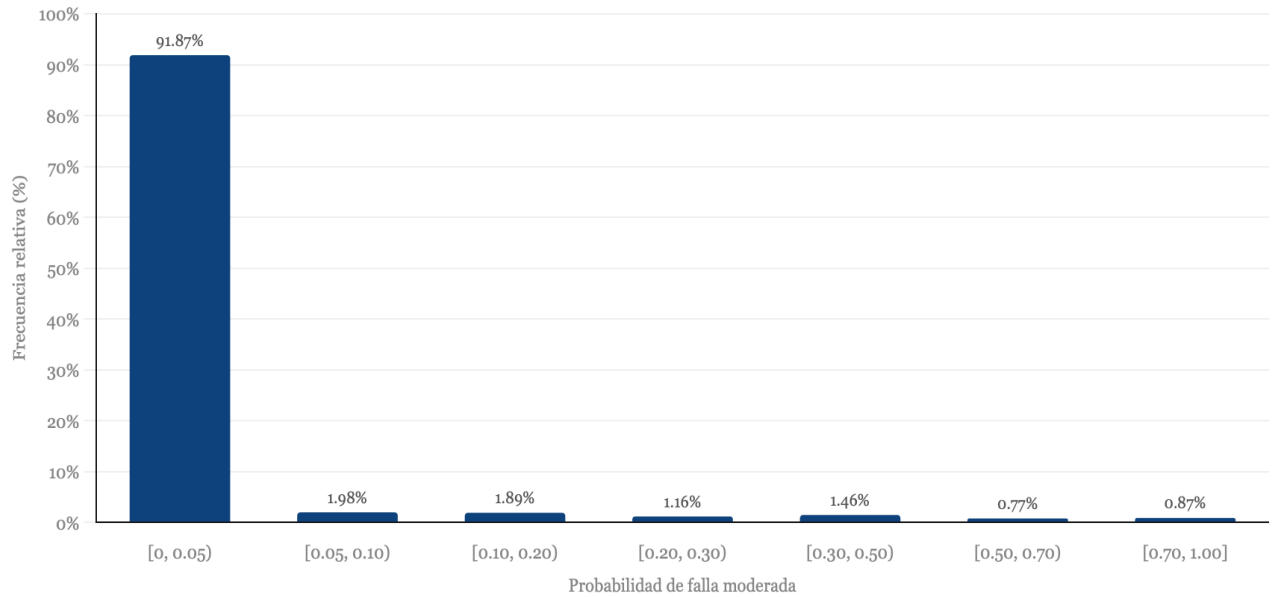
Función Distribución de Probabilidad Falla Severa



Fuente: Elaboración propia a partir de Abrahamson, Gregor y Addo (2016); Allen, Chamorro, Poulos, Castro, de la Llera y Echaveguren (2022); Joyner y Boore (1988); y Poulos, Monsalve, Zamora y de la Llera (2019).

Anexo C: Función Distribución de Probabilidad de Falla Moderada en Puente

Función Distribución de Probabilidad Falla Moderada



Fuente: Elaboración propia a partir de Abrahamson, Gregor y Addo (2016); Allen, Chamorro, Poulos, Castro, de la Llera y Echaveguren (2022); Joyner y Boore (1988); y Poulos, Monsalve, Zamora y de la Llera (2019).



clapesuc



@clapesuc



@clapes_uc



Clapes UC



ClapesUC



www.clapesuc.cl