



FONDEF
Fondo de Fomento al Desarrollo
Científico y Tecnológico



FACULTAD DE INGENIERÍA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE CHILE



Universidad de Concepción

PROYECTO FONDEF ID14110309

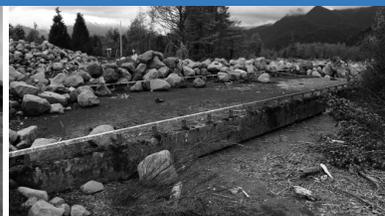
“Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional”

SÍNTESIS DE RESULTADOS ETAPA 1 - CIENCIA APLICADA

DIRECTORA
Alondra Chamorro, PhD.

DIRECTOR ALTERNO
Hernán de Solminihaç, PhD.

INVESTIGADOR PRINCIPAL UdeC
Tomás Echaveguren, PhD.



Autores

DIRECTORA

Alondra Chamorro, PhD.

Profesora Escuela de Ingeniería UC, Investigadora Asociada CIGIDEN.

DIRECTOR ALTERNO

Hernán de Solminihac, PhD.

Profesor Escuela de Ingeniería UC

INVESTIGADOR PRINCIPAL UdeC

Tomás Echaveguren, PhD.

Profesor Escuela de Ingeniería UdeC, Investigador CIGIDEN.

INVESTIGADORES

Joaquín Dagá (Estudiante MSc. UC)

Pablo Cartes (Investigador UC/Estudiante UdeC)

Manuel Contreras (Estudiante MSc. UdeC)

Felipe Baratta (Estudiante MSc. UC)

Gustavo Jimenez (Investigador UdeC-UC)

Alelí Osorio, PhD (Investigadora UC)

INDICE

1. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO FONDEF – PRIMERA ETAPA.....	9
2. DEFINICIONES CONCEPTUALES.....	12
2.1 EL CONCEPTO DE RIESGO.....	12
2.2 EL CONCEPTO DE EVENTO, AMENAZA Y DESASTRE.....	14
2.3 EL CONCEPTO DE VULNERABILIDAD.....	16
2.4 EL CONCEPTO DE AGENTE.....	19
2.4.1 Agentes de la Red Vial Nacional.....	19
2.4.2 Agentes Expuestos a la Amenaza Sísmica, Vulcanológica y Climática.....	20
2.4.3 Definición de Curvas de Fragilidad.....	21
2.4.3 El Concepto de Medida de Mitigación.....	22
2.6 EL CONCEPTO DE CURVA DE RESTAURACIÓN.....	24
2.7 EL CONCEPTO DE NIVEL DE SERVICIO.....	25
2.7.1 Nivel de Servicio en Caminos Bidireccionales.....	27
2.7.2 Nivel de Servicio en Caminos Multi-pista.....	28
3. FORMULACIÓN CONCEPTUAL DE LOS MODELOS DE RIESGO Y MITIGACIÓN.....	32
3.1 DISEÑO CONCEPTUAL DE MODELO DE RIESGO Y MITIGACIÓN.....	35
3.1.1 Datos de Entrada.....	36
3.1.2 Elementos del Modelo de Riesgo.....	36
3.1.3 Modelo de Mitigación.....	37
4. MODELACIÓN DE RIESGO DE PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA RED VIAL NACIONAL EXPUESTOS A AMENAZA SÍSMICA, VOLCÁNICA E HIDRO- METEREOLÓGICA.....	40
4.1 MODELO DE RIESGO SÍSMICO.....	40
4.1.1 Descripción de la Amenaza.....	40
4.1.2 Definición de Curvas de Fragilidad.....	41

4.1.3 Descripción General de Hazus-MH.....	44
4.1.4 Modelo de Riesgo de Puentes por Movimiento de Suelo.....	48
4.1.5 Intensidades de la Amenaza.....	49
4.1.6 Desarrollo de Modelo de Riesgo.....	50
4.2 MODELO DE RIESGO VOLCÁNICO.....	56
4.2.1 Descripción de la Amenaza.....	56
4.2.2 Modelo de Riesgos de Lahares para Puentes.....	61
4.2.3 Resultados Modelo de Volcamiento de Infraestructura.....	62
4.2.4 Categorías de Puentes Modelados.....	65
4.3 MODELO DE RIESGO HIDROMETEREOLÓGICO.....	67
4.3.1 Descripción de los Daños por Inundación.....	67
4.3.2 Mecanismo de Falla.....	68
4.3.3 Función de Estado Límite.....	70
4.3.4 Estimación de Altura de Inundación.....	71
4.3.5 Estimación de Altura de Vadeo.....	72
4.3.6 Daños Ocasionados en Puentes Producto de la Socavación.....	73
4.3.7 Mecanismo de Falla.....	74
4.3.8 Función de Estado Límite.....	79
4.3.9 Resultados.....	79
5. MODELOS DE MITIGACIÓN DE EVENTOS SÍSMICOS, VOLCÁNICOS E	
HIDROMETEOROLÓGICOS SOBRE PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA RED VIAL....	83
5.1 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE DAÑO.....	84
5.2 FORMULACIÓN DE ESTÁNDARES DE MITIGACIÓN.....	85
5.2.1 Estándar de Mitigación.....	85
5.2.2 Estrategias de Intervención.....	88
5.2.3 Operaciones de Mantenimiento Asociadas a cada Estándar y Estrategia de Intervención....	90
5.2.4 Estrategias de Intervención para cada Estándar de Mitigación.....	91
5.3 ELABORACIÓN DE CURVAS DE RESTAURACIÓN.....	94
5.3.1 Estimación de la Pérdida de Nivel de Servicio.....	95

5.3.2 Nivel de Servicio en Condiciones Normales.....	96
5.3.3 Nivel de Servicio en Condiciones Deficientes.....	97
5.3.4 Efectos de la Restricción de Carga.....	97
5.3.5 Estimación del Tiempo de Recuperación.....	98
5.3.6 Curvas de Restauración Genéricas para cada Estándar de Mitigación.....	99
5.4 MODELO DE SELECCIÓN TÉCNICA DE ESTRATEGIAS DE INTERVENCIÓN.....	102
5.5 MODELO DE EVALUACIÓN SOCIO-ECONÓMICA DE ESTRATEGIAS DE INTERVENCIÓN...	105
5.5.1 Escenarios de Evaluación.....	105
5.5.2 Costos de la Agencia Vial.....	106
5.5.3 Costos de los Usuarios.....	106
5.5.4 Evaluación de Escenarios.....	108
5.5.5 Recomendación de Intervención.....	109
6. CASOS DE ESTUDIO SOBRE EVALUACIÓN DE RIESGO EN ELEMENTOS QUE COMPONEN LA RED VIAL NACIONAL.....	112
6.1 MODELO DE RIESGO SÍSMICO.....	112
6.1.1 Aplicación del Modelo.....	116
6.2 MODELO DE RIESGO VOLCÁNICO.....	121
6.3 MODELO DE RIESGO HIDROMETEREOLÓGICO.....	135
6.4 CASOS DE ESTUDIO MODELO DE MITIGACIÓN.....	143
6.4.1 Mitigación de Riesgos por Inundación y Deslizamiento de Taludes.....	144
6.4.1.1 Descripción General del Caso de Estudio.....	144
6.4.1.2 Análisis de Resultados.....	147
6.4.2 Mitigación de Riesgos de Socavación en Puentes.....	149
6.4.2.1 Descripción General del Caso de Estudio.....	149
6.4.2.2 Análisis de Resultados.....	152
6.4.3 Mitigación de Riesgos por Sismos en la Plataforma.....	154
6.4.3.1 Descripción General del Caso Estudio.....	154
6.4.3.2 Análisis de Resultados.....	157
6.4.4 Mitigación de Riesgos Volcánico de Lahares en Puentes.....	159
6.4.4.1 Descripción General del Caso de Estudio.....	159

6.4.4.2 Análisis de Resultados.....	162
7. CONCLUSIONES.....	166
7.1 CONCLUSIONES PRIMERA ETAPA.....	166
7.2 FUTUROS DESARROLLOS.....	170
8. REFERENCIAS.....	173

1

INTRODUCCION AL PROYECTO FONDEF – PRIMERA ETAPA



PROYECTO FONDEF ID14I10309

“Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional”

1. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO FONDEF – PRIMERA ETAPA

En abril de 2015 se dio inicio al proyecto FONDEF – IdeA en dos Etapas ID14I10309, denominado “Investigación y Desarrollo de Modelos para Cuantificar y Mitigar el Riesgo de Eventos Naturales en la Red Vial Nacional”, a cargo de las instituciones beneficiarias Pontificia Universidad Católica de Chile y Universidad de Concepción. El proyecto además cuenta con la participación como entidades interesadas de la Dirección de Vialidad del ministerio de Obras Públicas de Chile (DV-MOP), la Oficina Nacional de Emergencias (ONEMI) y la Asociación de Concesionarios de Obras de Infraestructura Pública A.G. (COPSA).

Chile presenta una variedad de condiciones climáticas, morfología y base económica de norte a sur. Históricamente, esta heterogeneidad ha marcado la filosofía de desarrollo de la red vial, configurando así una estructura de espina de pescado organizado en torno a las rutas longitudinales que unen el país, y rutas laterales que interconectan esta suerte de columna vertebral con el borde costero y las ciudades costeras más importantes. En los últimos 20 años también se han desarrollado políticas de densificación de la red vial, la cual ha sido emplazada en territorios con una alta fragilidad debido a su condición morfológica. Esto determina que la red vial sea altamente vulnerable a eventos naturales que son propios del país, como: sismos, maremotos, erupciones volcánicas, inundaciones, deslizamiento de tierra, entre otros.

El problema abordado por el proyecto FONDEF ID14I10309. “Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional”, radica en el hecho que la red vial nacional se ve recurrentemente interrumpida por eventos naturales, afectando la movilidad y accesibilidad de sus usuarios. Lo anterior se traduce en sobre costos para el país, incurridos por los usuarios como también por el Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP), institución a cargo del mantenimiento de la red vial

interurbana, y Sociedades Concesionarias a cargo de la gestión de una porción de la red vial pública nacional. A la fecha, no existen modelos capaces de cuantificar objetivamente el riesgo de la red vial nacional ante los principales eventos naturales que la afectan, ni modelos que permitan mitigar los efectos de dichos eventos mediante estrategias de mantenimiento y/o redundancia en la red basado en criterios de optimización técnico-económica. Producto de ello, las agencias actúan una vez que el o los eventos se produjeron, generando así costos adicionales de inversión, los cuales podrían reducirse mediante la aplicación de estrategias preventivas que permitan reducir la vulnerabilidad de la red previa ocurrencia de un evento.

El principal objetivo del presente proyecto es desarrollar y validar modelos que permitan cuantificar el riesgo físico al que está afecta la red vial nacional producto de la amenaza de eventos naturales, considerando la vulnerabilidad física de la infraestructura y el nivel de exposición de esta ante un evento específico. En una primera etapa de investigación científica aplicada el proyecto se enfoca en desarrollar, validar y aplicar modelos de riesgo y proponer estrategias de mitigación considerando los principales elementos que componen la red vial expuestos a amenazas sísmicas, hidro-meteorológicas y volcánicas.

En una segunda etapa se realizará una investigación tecnológica para la aplicación de los modelos de riesgo y los efectos de estrategias de mitigación con una mirada sistémica a nivel de red. Se espera también incluir los efectos de la vulnerabilidad social en el análisis de la red e implementar los modelos y su aplicación en una plataforma computacional complementada con un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Para lograr el objetivo general de la Primera Etapa de Proyecto se debió cumplir los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar los eventos naturales que afectan con mayor recurrencia y significancia a la red vial nacional
2. Caracterizar los elementos de la infraestructura vial y usuarios que son más vulnerables ante eventos naturales más recurrentes.

3. Desarrollar un modelo que permita cuantificar el riesgo asociado a la amenaza de eventos naturales, considerando la vulnerabilidad de la infraestructura, el nivel de exposición ante un evento específico, la importancia estratégica de dicha infraestructura y la naturaleza aleatoria de los eventos naturales que afectan con mayor frecuencia la red vial nacional.
4. Desarrollar un modelo que permita asignar, mediante criterios de optimización técnica y económica, estrategias de mantenimiento para la mitigación de los efectos de eventos naturales que afectan con mayor frecuencia la red vial nacional.
5. Aplicar y validar a pequeña escala los modelos de cuantificación de riesgo y asignación de estrategias de mitigación mediante su aplicación a una subred vial en Chile representativa del espacio de inferencia considerado en el desarrollo de modelos.
6. Difundir la investigación y desarrollo llevado a cabo en el proyecto mediante seminarios internacionales realizados en Chile y participación en congresos nacionales e internacionales.

Para el satisfactorio cumplimiento de los objetivos planteados para la primera etapa del proyecto se planteó una metodología que se compone de tres fases o etapas que contemplan la ejecución de ocho actividades las cuales se presentan en el Diagrama de flujo de la Figura 1.1.

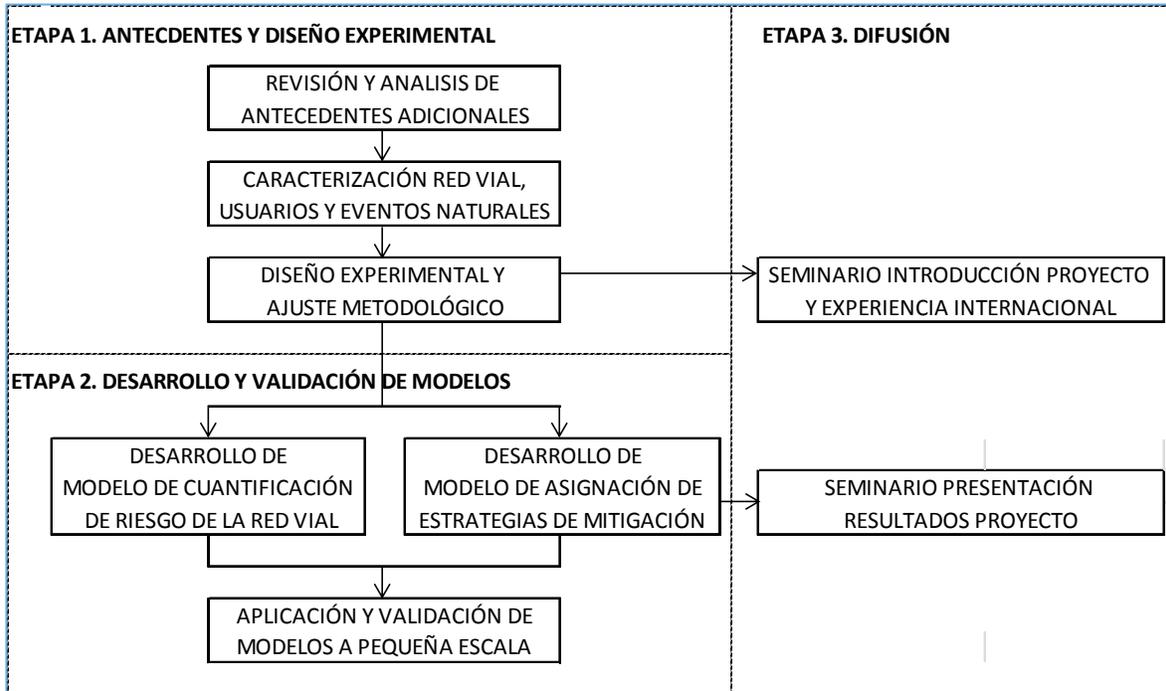


Figura 1.1. Diagrama de Flujo de Metodología de Investigación

Al concluir la primera etapa del proyecto es posible sostener que fue posible desarrollar y validar modelos a pequeña escala para cuantificar y mitigar el riesgo físico de elementos que componen la red vial nacional expuestos a amenazas sísmicas, hidro-meteorológicas y vulcanológicas. Se espera que al concluir satisfactoriamente la segunda etapa del proyecto el país contará con modelos y una herramienta de gestión que, una vez implementada, permitirá contar con una red vial más segura, confiable y resiliente ante la amenaza de eventos naturales a un menor costo total de mitigación respecto a la situación actual.

2

DEFINICIONES CONCEPTUALES



PROYECTO FONDEF ID14I10309

“Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional”

2. DEFINICIONES CONCEPTUALES

2.1 EL CONCEPTO DE RIESGO

El concepto de riesgo posee diversas acepciones, que están relacionadas con el ámbito en que se utiliza. No obstante lo anterior, es posible afirmar que en general posee una connotación negativa puesto que intenta describir la noción de efectos negativos sobre algún receptor (persona, naturaleza, sistema económico o infraestructuras) ocasionado por eventos raros, que el ser humano no puede controlar. Por ejemplo, un terremoto o una inundación de gran magnitud.

Tabla 2.1. Definiciones de riesgo

Autor	Año	Descripción
Haimes	2009	Medida de la probabilidad y severidad de efectos adversos sobre un receptor.
Berdica	2002	Considera dos elementos importantes: uno la probabilidad de que ocurra un evento con impactos negativos, y otro la extensión de las consecuencias una vez que el evento ocurre
Greiving	2004	La probabilidad de consecuencias negativas (pérdida de vidas, daños a las personas, daños a la propiedad, estilos de vida, sistema económico y daño ambiental), resultante de la interacción entre amenazas naturales o inducidas por el ser humano
Aven	2010	Es una medida de la probabilidad (P) y severidad de efectos adversos, siendo una combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento (A), sus consecuencias (C) y la interacción de estas en un escenario. $Riesgo = (A,C,P)$
Echaveguren	2011	Es el producto de la probabilidad (Pr) que ocurra un evento que tenga consecuencias (C) para un cuerpo receptor.

En general, un sistema de gestión de riesgos (SGR) posee siete etapas, las cuales se pueden aplicar a cualquier entidad, sistema o territorio de estudio, como se ve en la Figura 2.1 (Greiving, 2004; Free et al, 2006):

- Identificación de amenazas;
- Análisis del riesgo, localización, identificación y relación con los eventos naturales y/o antrópicos que constituyen la amenaza;
- Evaluación del riesgo, comparación del nivel de riesgo presente con el riesgo aceptable;
- Tratamiento del riesgo, definición de las medidas de mitigación;
- Definición del nivel de aceptación de riesgo para la sociedad;
- Comunicación del riesgo, mantenimiento de una base de información de apoyo a la toma de decisiones y
- Monitorización y seguimiento.

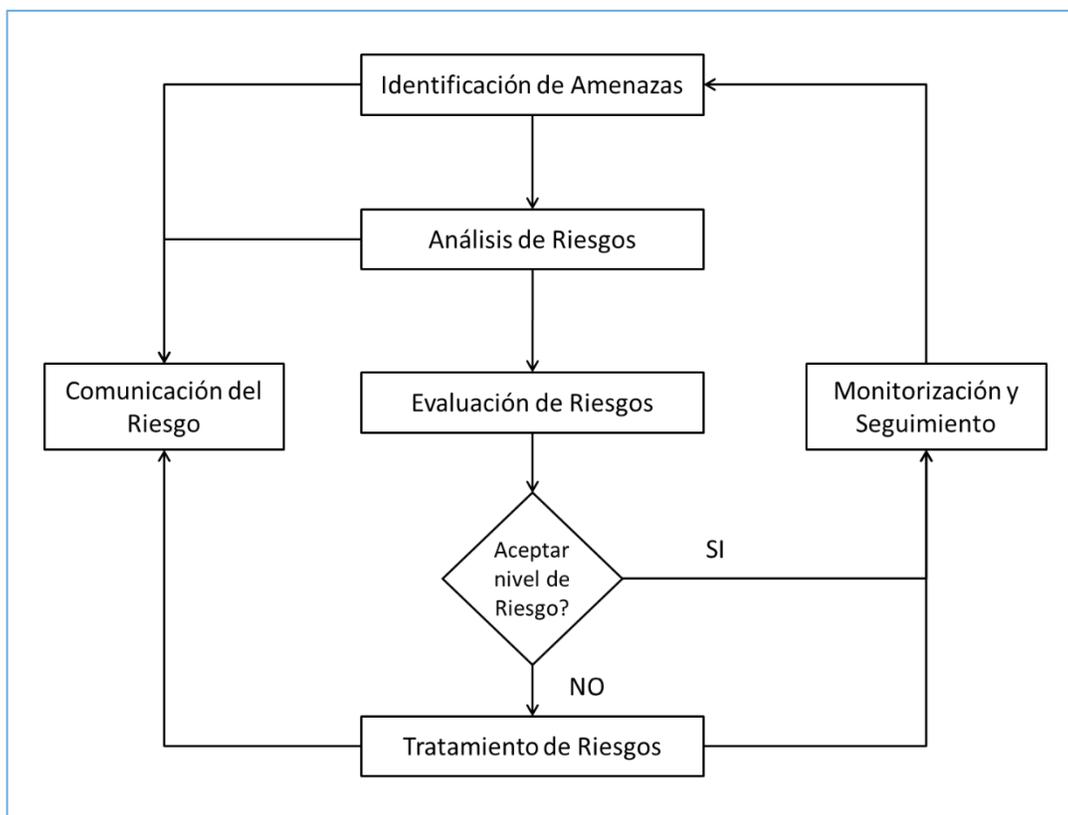


Figura 2.1. Esquema de gestión de riesgos (adaptado de Free et al, 2006)

2.2 EL CONCEPTO DE EVENTO, AMENAZA Y DESASTRE

Los eventos naturales son variaciones atmosféricas, hidrológicas y geológicas que ocurren sin que puedan ser previstas con certeza, y que, por su ubicación, potencia y frecuencia, pueden llegar a afectar al ser humano. Cuando un evento natural ocurre en un área poblada es un evento peligroso y por lo tanto se considera una amenaza natural. Una amenaza, en términos generales, se define como un evento físico o actividad humana potencialmente peligrosa, que puede causar muertes o daños permanentes a las personas, daños a la propiedad, alteración del sistema natural y/o económico o degradación ambiental (Greiving, 2004).

Por su parte, un evento natural extremo adquiere la connotación de desastre únicamente cuando el hombre y/o sus actividades y bienes están involucrados. Un desastre natural se define entonces como un evento peligroso que causa efectos o alteraciones ambientales (físicas, biológicas, sociales y económicas), de una magnitud suficiente para alterar la capacidad de los ecosistemas y de la sociedad, de modo tal que sus elementos de funcionamiento básico y sus equilibrios dinámicos se ven debilitados y/o destruidos, o en otros términos, debilitando la sustentabilidad ambiental de los sistemas natural y/o humano. En este sentido, los efectos de desastres naturales comprometen el desarrollo sustentable de las comunidades regiones o países. Los desastres naturales poseen tres dimensiones (Cardona, 1993): una dimensión temporal (eventos súbitos y/o muy prolongados), una dimensión espacial (aislados, dispersos, difusos) y una dimensión demográfica (cantidad de población humana afectada en sus dimensiones social, ecológica y económica).

De acuerdo a la clasificación del Banco Mundial, (World Bank, 2011), las amenazas naturales se clasifican en los grupos: biológicas, geofísicas, hidrológicas, meteorológicas y climatológicas. Estas últimas 3 forman parte de un grupo relacionado con el clima, denominadas amenazas hidro-meteorológicas. Para efectos de este trabajo, las amenazas naturales a considerar son:

Las amenazas antrópicas se refieren a aquellas originadas voluntariamente o involuntariamente (como los accidentes) por el hombre o por procesos productivos o elaborados o usados por el hombre. Entre las amenazas antrópicas involuntarias, se encuentran por ejemplo los accidentes industriales, explosiones, choques, contaminación. Entre las voluntarias, existen otras tales como los bloqueos, ataques u otro, que pueden afectar significativamente a los cuerpos receptores. Estas amenazas también se conocen como amenazas tecnológicas.

Las amenazas ambientales corresponden a efectos de segunda vuelta, es decir procesos ambientales inducidos, acelerados o magnificados por otros procesos, naturales o no que pueden producir efectos directos o indirectos sobre las personas, infraestructuras, sistema socio-económico y el mismo sistema natural. Entre ellas se encuentran los procesos erosivos acelerados (como por ejemplo aquellos que se producen con posterioridad a un incendio forestal), las inestabilidades de taludes (por ejemplo, debido a excavaciones para construcción de viviendas formales e informales, la degradación del suelo, pérdida de diversidad (por ejemplo por relleno de humedales), entre otros.

La Tabla 2.2 muestra un listado de las amenazas más relevantes. Algunas de ellas serán de carácter global en el territorio y otras de carácter local. Asimismo, algunas de ellas estarán presentes en algunos territorios y en otros no dependiendo del tipo y origen de la amenaza.

Tabla 2.2. Listado de amenazas (Cardona, 1993; EULA, 2012)

Amenazas Naturales	Amenazas Antrópicas	Amenazas Ambientales
Sismos	Incendios forestales y urbanos	Erosión
Tsunami	Explosiones	Inestabilidad
Deslizamientos (seco)	Bloqueos	Degradación
Deslizamientos (húmedo)	Ataques Terroristas	Pérdida de Diversidad
Asentamientos	Choques Marítimos	Desertificación
Licuación	Choques Terrestres	Desforestación
Inundaciones	Accidentes Aéreos	Cambio Climático
Crecidas	Accidentes con sustancias peligrosas	Incendios Forestales
Heladas	Destrucción de especies con valor económico	
Sequías	Epidemias	
Tornados	Guerras o perturbaciones civiles	
Erupciones Volcánicas	Contaminación	
Tormentas	Colapsos de estructuras (edificios, relaves, presas, centrales eléctricas, contenedores de combustible, túneles, puentes, etc.)	
Avalanchas	Derrames de Petróleo u otras sustancias peligrosas y/o radioactivas	

2.3 EL CONCEPTO DE VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad de una infraestructura puede definirse como la susceptibilidad a perder parcial o totalmente su serviciabilidad debido a eventos naturales. La serviciabilidad por su parte, corresponde a la habilidad de a una cierta infraestructura para prestar un servicio, dentro de los parámetros bajo la cual fue diseñada.

En el caso particular de la infraestructura de transporte, y a escala de red de transporte, la vulnerabilidad puede definirse como la susceptibilidad a incidentes que resultan en una reducción considerable de la serviciabilidad de la red (Berdica, 2002). La serviciabilidad de una red de transporte, puede definirse en términos de la accesibilidad, de la movilidad, para lo cual usualmente se usan indicadores topológicos a nivel de red, además del costo generalizado de transporte, compuesto por los costos de operación y de tiempo de viaje, accidentes y emisiones.

Existen diversos indicadores asociados a la medición de vulnerabilidad en redes de transporte. La mayoría de ellos se centran en los aspectos señalados en el párrafo anterior. En la Tabla 2.3 se hace una relación de los artículos revisados.

Tabla 2.3. Estudios de evaluación de vulnerabilidad en redes de transporte

Autor	Descripción
Lleras-Echeverri y Sanchez-Silva (2001)	Utilizan como indicador de vulnerabilidad la accesibilidad en la red usando algoritmo de Dijkstra para encontrar camino óptimo entre centroides. La accesibilidad la estiman usando el costo generalizado de transporte. Analizan como caso de estudio la red vial entre Bogotá y Cali, en Colombia
Sakakibara et al (2004)	Analizan la robustez de redes viales ante eventos naturales. Aplican la teoría de grafos para estimar la lejanía topológica entre centroides. Lo aplican a la región de Hansin en Japón, en donde se localizan las ciudades de Osaka y Kobe
Taylor et al (2006)	Evalúan la vulnerabilidad de una red vial en términos del costo generalizado del transporte y de la accesibilidad. Aplican también un índice de lejanía “Remotness index”) para evaluar la vulnerabilidad. Desarrollan un caso de estudio considerando la red vial de Australia
Murray et al (2008)	Desarrollan el concepto de evaluación multi-escenario para evaluar el efecto de la interrupción parcial de una red de transporte (ejemplificado en redes de carreteras y de gas). No proponen métodos, sino que más bien un concepto general de evaluación
Peterson y Church	Proponen un modelo para evaluar la vulnerabilidad de redes ferroviarias. Utilizan

(2008)	como criterio la vulnerabilidad de los puentes ferroviarios. La vulnerabilidad la evalúan en términos del costo alternativo de re-ruteo. Lo aplican a la red ferroviaria de Estados Unidos
Bell et al (2010)	Utilizan la teoría de juegos aplicando el modelo atacante-defensor combinado con modelos de asignación de tráfico, para evaluar la vulnerabilidad de una red vial ante ataques. El ataque es asimilado a una amenaza. Aplican el modelo a un sector de la ciudad de Londres
Valenzuela et al (2010)	Determinan la vulnerabilidad de puentes usando una escala semántica con niveles de vulnerabilidad. La separan en vulnerabilidad ante sismos y evento hidrológicos. Aplican el cálculo a puentes de la red vial principal de Chile
Echaveguren et al (2011)	Propusieron un índice de vulnerabilidad para caminos considerando el efecto de inundaciones, crecidas y deslizamientos. Lo aplicaron a la estimación de la vulnerabilidad de la red vial de Chile
Rocco y Ramirez-Marquez (2011).	Evaluaron la vulnerabilidad de una comunidad, en términos de la interconectividad entre comunidades. La aplicaron a una red telefónica de 52 nodos y 76 arcos, a una red de energía de 127 nodos y 171 arcos y a una red vial de 687 nodos y 789 arcos. Utilizaron un índice de conectividad que determinar cuándo y cuantos arcos se desconectan de la red debido a alguna amenaza, evitando la conexión directa
Luping y Dalin (2012)	Analizaron la vulnerabilidad de una red vial considerando como indicador el tiempo de viaje. Lo aplicaron a una red simulada
Taylor y Susilawati (2012)	Utilizaron índices de lejanía y de accesibilidad para estimar la vulnerabilidad de una red vial. Aplicaron el estudio a un sector de la red vial sur-oeste de Australia

Cuando la vulnerabilidad se analiza en su aspecto multidimensional, es necesario incorporar la noción de cuerpo receptor de las consecuencias. Esto tiene implicancias directas en el cálculo del riesgo mediante índices, dado que necesariamente se debe diferenciar también el cálculo de riesgo por receptor, como lo sugiere la Figura 2.2.

Territorio 1					
Amenaza	Receptores				IRa
	Personas	Infraestructura	Sistema Socio-Económico	Sistema Natural	
Natural	→				IRna
Antrópica	↓				IRan
Ambiental	↓				IRam
IRcr	IRp	IRi	IRse	IRn	

Figura 2.2. Matriz de interacción amenaza-receptor y su relación con el riesgo (EULA, 2014)

En la Figura 2.2 se muestra por ejemplo que, para la amenaza natural, es posible calcular un índice de riesgo (IRna) que pondera los efectos sobre los distintos receptores (personas, infraestructuras, sistema socioeconómico y sistema natural). Asimismo, en el sentido vertical, es posible determina el riesgo de un receptor, por ejemplo, de las personas (IRp) ante amenazas de tipo antrópico, natural y ambiental. Cada uno de los valores de riesgo de cada una de las celdas, se puede asociar a diversos niveles de riesgo, de manera de representarlos en cartografía mediante escalas de colores agregadas por la unidad territorial de análisis elegida.

2.4 EL CONCEPTO DE AGENTE

En términos generales, un agente es una entidad o componente de un sistema que es capaz de percibir y actuar por sí mismo y decidir qué debe hacer para alcanzar sus objetivos (Clymer, 2009). Se utiliza principalmente en la simulación de sistemas y de sistemas de sistemas, en donde se requiere estudiar procesos adaptativos. Se conoce como simulación basada en agentes (agent-based simulation, ABS). Posee la capacidad de modelar desde un elemento simple hasta elementos más complejos, como puede ser el comportamiento de tomadores de decisiones.

2.4.1 Agentes de la Red Vial Nacional

Dentro del marco de investigación se considera agente a toda entidad independiente (organización, empresa o persona) que, mediante sus atributos y reglas de

comportamiento, interactúa o reacciona frente a otros agentes dentro de un ambiente o situación. Los agentes son autónomos y tienen un objetivo por lograr, el cual le otorga reglas de comportamiento y toma de decisiones. Por otro lado, los agentes tienen protocolos de interacción con los demás agentes dentro de los cuales se destaca la comunicación. Asimismo, poseen la capacidad de responder frente a ambientes o situaciones, como es el caso de la ocurrencia de un evento natural.

Ya definido el concepto es posible identificar variados agentes con las características mencionadas dentro de la infraestructura vial nacional. Dentro de ellos se pueden distinguir 2 grupos. Por un lado, se diferencia un grupo de agentes que utiliza frecuentemente la infraestructura del país, es decir, los usuarios de la red propiamente tal. En este grupo se destaca el transporte particular, de pasajeros, de carga y de emergencia.

Por otro lado, se identifica un grupo de agentes constituido por las instituciones y empresas asociadas al sistema. Éstas no utilizan la red de manera directa pero sí interactúan con los demás agentes asociados a la red en las distintas situaciones. Dentro de éstas se destaca el Ministerio de Obras Públicas (MOP), los contratistas, los proveedores e instituciones como el SERNAGEOMIN y la ONEMI. Todas estas empresas e instituciones son vitales para el desarrollo y mantenimiento de la infraestructura nacional.

2.4.2 Agentes Expuestos a la Amenaza Sísmica, Vulcanológica y Climática

Los agentes descritos en la sección anterior se ven afectados de distinta manera dependiendo del tipo de amenaza. En el caso de la amenaza sísmica, es posible determinar un grupo de agentes que son más vulnerables que otros dependiendo de si corresponden a usuarios directos de la red, usuarios indirectos, y entidades o instituciones encargadas de la rehabilitación de la vía. Además, se considera que existen usuarios indirectos de la red que podrían llegar a ser críticos, dentro de los que se destacan las personas que necesitan de suministro de productos; que necesitan trasladarse por trabajo, por enfermedad, o por accidente; proveedores de productos que requieran despachar insumos; y fabricas que requieren de insumos para poder producir.

En el caso de las erupciones volcánicas, existen agentes que serán más susceptibles a ser afectados por el evento en función del territorio expuesto a la amenaza volcánica, lo cual se puede visualizar mediante los mapas de exposición nombrados anteriormente, y la relevancia de éstos en el sistema. Cabe destacar que, desde el punto de vista temporal, los agentes usuarios de la red son afectados durante la erupción, mientras que las empresas e

instituciones que componen el otro grupo de agentes se involucran principalmente después del evento.

En cuanto a las amenazas climáticas, los agentes potencialmente afectados si bien coinciden con los descritos para amenaza sísmica y volcánica, el efecto geográfico y temporal resulta más acotado debido a la naturaleza de los eventos y la afectación física sobre la red. Por ejemplo, en el caso de interrupción de un camino por efecto de crecidas o inundación, es posible implementar rápidamente medidas de contingencia como son vadeos, rutas alternativas, puentes Bailey, que permitan la transitabilidad aun cuando esta no corresponda al nivel de servicio en condiciones normales de operación. En este sentido, es posible concluir que en general los agentes afectados son los mismos, pero con diferentes intensidades desde el punto de vista de la temporalidad y de los impactos sobre ellos en relación al sistema del cual participan.

2.4.3 Definición de Curvas de Fragilidad

Debido a la incerteza y a la aleatoriedad inherente de los eventos naturales, se hace necesario un enfoque probabilístico en el diseño y la evaluación de las estructuras (Nazari & Bargi, 2012). Las curvas de fragilidad definen la probabilidad de superar un estado de desempeño predefinido para diferentes niveles de intensidad de las amenazas, proporcionando un tratamiento probabilístico racional y coherente del daño o la pérdida. (Mackie & Stojadinovic, 2004). Para realizar el desarrollo de las curvas de fragilidad existen cuatro enfoques, que se diferencian entre ellos en el nivel de esfuerzo que requieren en su implementación y en términos de la precisión de los resultados:

- i) **Enfoque empírico:** se basa en la toma y análisis de datos obtenidos a partir de experimentos naturales o en laboratorio. Las curvas de fragilidad son creadas a partir del ajuste de una función a los datos obtenidos. Se requiere una base de datos de gran calidad y que contenga una cantidad de información suficiente.
- ii) **Opinión de expertos:** se basa en la opinión y criterio de personas capacitadas en el tema. Puede variar ampliamente los resultados dependiendo del nivel de rigor con que se implemente.
- iii) **Enfoque analítico:** se basa en modelos que caracterizan el estado límite del funcionamiento de un sistema. La curva de fragilidad se construye a partir del cálculo de la probabilidad de falla de esta, que van desde aquellas en las que es muy poco probable, hasta las que el daño es inminente.

- iv) **Enfoque híbrido:** Combina dos o más de los mencionados anteriormente, con la finalidad de reducir las limitaciones individuales de cada uno de los enfoques.

2.4.3 El Concepto de Medida de Mitigación

Una medida de mitigación se define como una acción destinada a compensar, atenuar o eliminar el daño producido por un impacto negativo sobre algún sistema o componente de un sistema de manera de evitar impactos indirectos y/o de segunda vuelta. Generalmente, las medidas de mitigación se aplican una vez manifestada la acción que activa dicho impacto negativo, caso en el cual tienen por objetivo actuar sobre los efectos.

Este concepto se puede adaptar al campo de la gestión de riesgos naturales que afecten el sistema de transporte de la siguiente manera: una medida de mitigación se define como una acción o grupo de acciones emprendida por una agencia vial destinada a: (a) recuperar o mejorar el nivel de servicio de una vía o red vial afectada por un evento natural una vez que se produce y modifica las condiciones de operación; (b) incrementar la robustez de la infraestructura para mejorar su desempeño en caso en que un evento natural la afecte, y (c), incrementar sistemática, programada y progresivamente la robustez de la infraestructura vial para adaptarla a condiciones ambientales progresivamente adversas, derivadas por ejemplo del cambio climático combinado con anomalías climáticas, lagunas sísmicas, efectos de cascada debido a peligros geológicos.

Las medidas de mitigación del primer grupo son de carácter reactivo, y tienen por propósito restaurar la transitabilidad una vez ocurrido un evento natural que la interrumpe. En el lenguaje de la Dirección de Vialidad se conocen como emergencias viales y se aplican mediante los mecanismos de ejecución de obras tradicionales del Ministerio de Obras Públicas: ejecución por administración directa en el caso de reacción inmediata ante las emergencias (por ejemplo, obras de despeje que generalmente no recuperan el nivel de servicio original pero sí permiten habilitar rápidamente al tránsito la vialidad) o mediante un contrato de obra pública destinado a recuperar el nivel de servicio original (obras de repavimentación, de restauración de taludes, recuperación de obras de protección fluvial).

Las medidas de mitigación del segundo grupo tienen por objetivo no solamente recuperar el nivel de servicio original, sino que también mejorarlo, de manera que la infraestructura vial se torne más robusta y, ante la ocurrencia de un evento natural, no resulta tan dañada o interrumpa totalmente la circulación vehicular. En estos casos se requiere un proyecto de ingeniería que establezca los rediseños necesarios de aplicar (por ejemplo, levantamiento de rasante, reubicación de estructuras, construcción de estructuras nuevas) y, puesto que

se está aplicando una mejora a la infraestructura, se habla de un aumento de estándar. Bajo este grupo de medidas de mitigación se pueden identificar dos estrategias: a) una intervención única que incrementa el nivel de servicio, b) una intervención programada que incrementa parcialmente el nivel de servicio en varios períodos de tiempo hasta alcanzar un nivel de servicio objetivo. El resultado en ambos casos es el mismo, no obstante, lo cual la diferencia radica en la duración de la inversión para alcanzar el objetivo. La elección de una u otra estrategia depende de una decisión técnico-económica-social que permita discriminar la mejor opción.

Las medidas de mitigación del tercer grupo se pueden asociar a medidas de adaptación permanente a ambientes hostiles, por lo cual pueden incluir medidas del segundo grupo como parte de una estrategia, o bien constituir una estrategia de adaptación independiente. Al igual que en el caso del segundo grupo de medidas de mitigación, se requiere un análisis técnico-económico para configurar la estrategia, pero con un horizonte de evaluación de muy largo plazo, de 20, 30 o más años. En este caso, la tasa inter-temporal de descuento cobra especial relevancia puesto que determina el valor inter-temporal del dinero y el costo de oportunidad de largo plazo.

En un contexto inter-temporal, las medidas de mitigación de los primeros dos grupos se pueden localizar como lo muestra la Figura 2.3. En dicha figura, en una etapa previa al evento natural, la medida de mitigación se define como refuerzo y, una vez ocurrido el evento natural, se cataloga como medida de recuperación, pudiendo ser de corto, mediano o largo plazo dependiendo de la magnitud del daño. La evaluación del riesgo por su parte, es un instrumento de carácter preventivo que actúa, en la línea de tiempo, como un instrumento de prevención y de atenuación del daño. Se podría considerar que es una medida de mitigación en si misma, pero de escala global y para todo tipo de infraestructura interactuante.

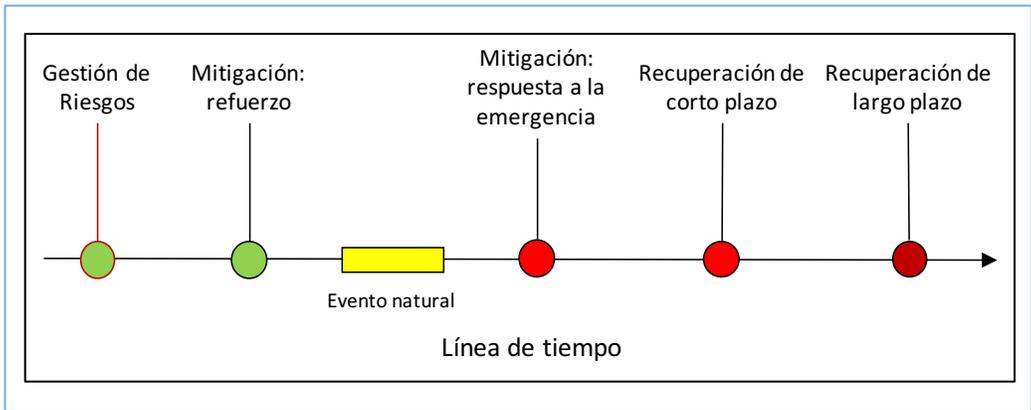


Figura 2.3. Línea temporal de aplicación de mitigaciones (Basoz y Kiremidjan, 1996)

2.6 EL CONCEPTO DE CURVA DE RESTAURACIÓN

Una curva de restauración representa el efecto directo de la pérdida de nivel de servicio de un elemento vial (por ejemplo, un talud, un puente o un túnel) y la tasa a la cual esta recupera su nivel de servicio en el tiempo. Puesto que la recuperación no es una propiedad intrínseca de una estructura, usualmente representa una medida de respuesta a una emergencia destinada a activar esa recuperación. En la Figura 2.4, desde un instante de tiempo arbitrario hasta un instante de tiempo t_1 , el elemento mantiene un cierto nivel de servicio NS_1 . En el instante t_1 ocurre un evento que reduce su nivel de servicio a NS_2 . Posteriormente se aplica una medida de restauración, que permite que la estructura recupere su nivel de servicio original en un lapso de tiempo igual a $t_2 - t_1$, el que se mantiene hasta t_3 que puede corresponder a la vida de servicio del elemento o bien al instante de tiempo en que ocurre otro evento natural que lo afecte.

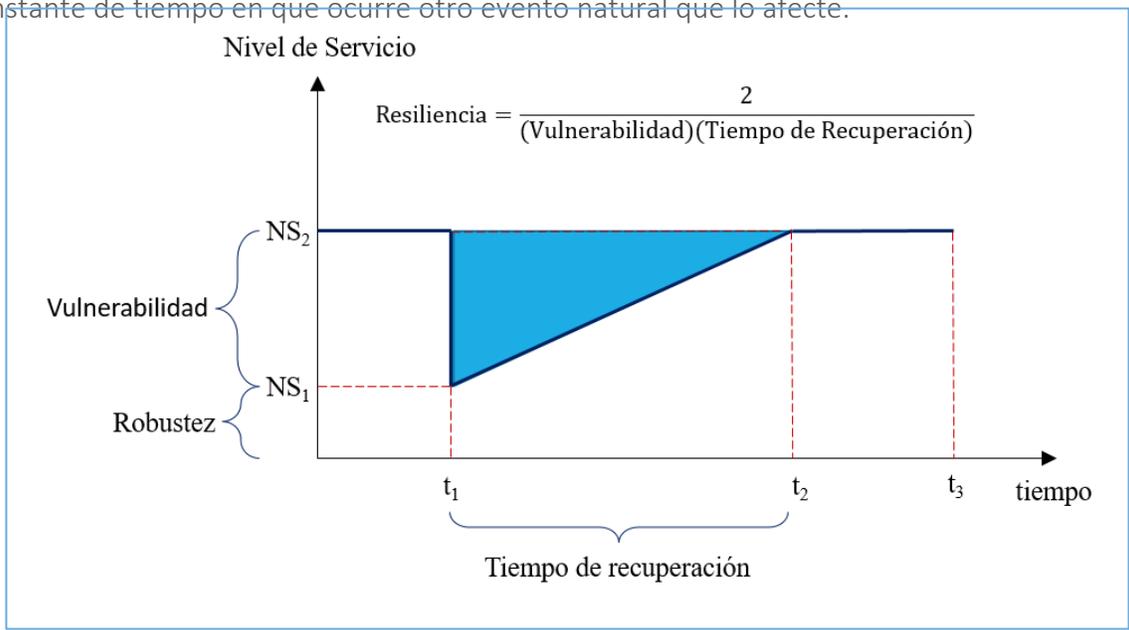


Figura 2.4. Esquema genérico de una curva de restauración (Buckle y Werner, 2003)

A partir de la Figura 2.4, se pueden definir diversos conceptos:

- Nivel de Servicio (NSi). Que se define como la condición de operación asociada al volumen de tránsito y a la capacidad de la vía. Se valor a través de medidas de eficiencia que dependen en caminos multi-pista de la densidad y en caminos bidireccionales de la velocidad promedio de viaje y/o de la demora por seguimiento, de acuerdo a TRB (2000 y 2010).
- Vulnerabilidad = $NS_2 - NS_1$. Pérdida de nivel de servicio debido al afecto de un evento natural.
- Robustez = NS_1 . Mínimo nivel de servicio después de actuar el evento natural. Representa la resistencia de la estructura. Cuando se corta totalmente un camino, $NS_1 = 0$.
- Resiliencia = $2/(t_2 - t_1)(NS_2 - NS_1)$. Corresponde al inverso del área comprendida por la vulnerabilidad y el tiempo de recuperación.
- Tasa de restauración: $(t_2 - t_1)$. Rapidez con que se recupera el nivel de servicio hasta su valor inicial.

Estos conceptos permiten determinar, respecto de una medida de restauración base, cual es la más eficiente: Aquella que reduce la resiliencia y que posee una tasa de restauración rápida.

2.7 EL CONCEPTO DE NIVEL DE SERVICIO

El nivel de servicio es una medida cualitativa de las condiciones de operación de una carretera y por tanto una medida cualitativa de la calidad de flujo. Sin embargo, el resultado se obtiene a partir de un análisis cuantitativo del flujo cuyo comportamiento difiere del tipo de camino en estudio. Por lo tanto, para definir el nivel de servicio con el que opera un tramo de carretera es necesario caracterizar el comportamiento según se trate de un camino bidireccional o multipista.

La Figura 2.5a muestra la curva velocidad-flujo que relaciona la pérdida de velocidad de la corriente vehicular a medida que aumenta el flujo de vehículos en una sección de

carretera. El máximo flujo horario que atraviesa una sección de pista durante un periodo de tiempo se conoce como capacidad (Q^*), el cual se expresa en (veh/h/pista).

Si las condiciones prevalecientes cambian a lo largo del trazado, la capacidad también cambia a lo largo del trazado. De esto es posible inferir que como el nivel de servicio depende de la calidad de flujo, si los parámetros que lo definen cambian, entonces el nivel de servicio también lo hace. Por lo tanto, el nivel de servicio se obtiene para un tramo de carretera con condiciones físicas y de operación definidas.

La Figura 2.5b muestra un esquema genérico inserto en la curva velocidad-flujo que define los límites de nivel de servicio, donde este se expresa con letras de la "A" a la "F", siendo "A" el mejor NS y "F" el peor NS.

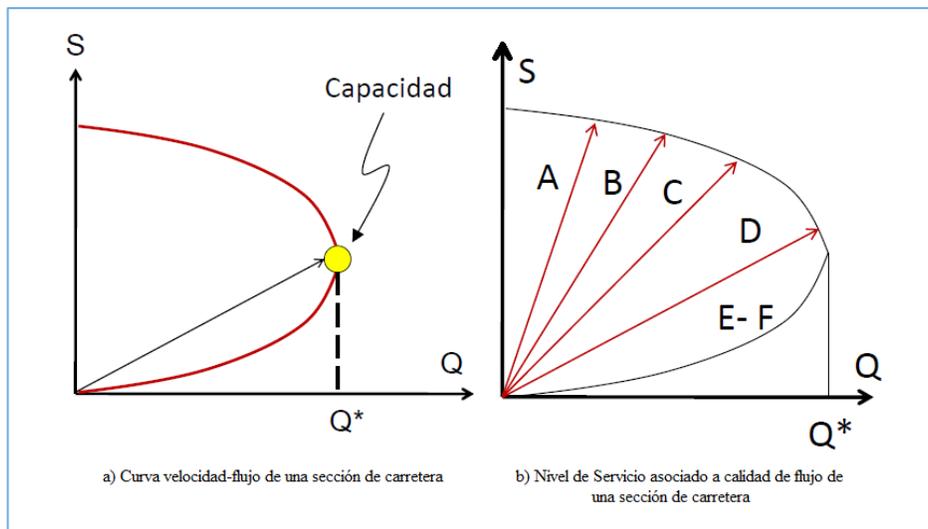


Figura 2.5. Relación velocidad-flujo, capacidad y nivel de servicio

El análisis sujeto en este estudio funciona bajo el supuesto que el flujo no se ve afectado por la ocurrencia de un evento natural, es decir los usuarios de la vía no deciden si realizar o no el viaje acorde a la presencia o no de una emergencia vial.

2.7.1 Nivel de Servicio en Caminos Bidireccionales

Los caminos bidireccionales (Figura 2.6) poseen una pista por sentido, sin mediana y con bermas estrechas. La velocidad máxima legal permitida son 100 km/h y las velocidades de proyecto van generalmente de 80 a 100 km/h (MOP, 2016a).

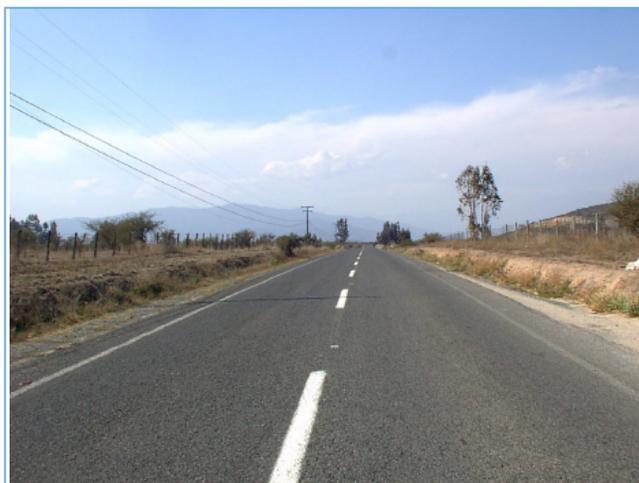


Figura 2.6. Camino bidireccional (Fuente: Archivo Tomás Echaveguren)

La maniobra de adelantamiento requiere la invasión de la pista en sentido opuesto, por lo que cuando aumenta el volumen (flujo) se forman pelotones y la posibilidad de adelantar disminuye. Si la posibilidad de adelantar disminuye, los vehículos más rápidos exhiben demoras al seguir a los más lentos a la espera de condiciones óptimas para adelantar. Por lo tanto la calidad de flujo depende directamente de la velocidad promedio de viaje y la posibilidad de adelantar. La posibilidad de adelantamiento depende de la longitud de pelotones formados por los vehículos más lentos y de la brecha que otorgue el flujo opuesto, donde su descriptor más representativo es el porcentaje de tiempo de seguimiento producto de la formación de pelotones.

La Figura 2.7 muestra la asignación de nivel de servicio para caminos bidireccionales en función de la velocidad promedio de viaje y el porcentaje de tiempo de seguimiento, donde

el mejor nivel de servicio se presenta para velocidades promedio de viaje elevadas y porcentaje de tiempo de seguimiento bajo, es decir la velocidad de la corriente vehicular es cercana a la velocidad de proyecto y las condiciones de adelantamiento se proporcionan de manera óptima. Al contrastar este escenario con la relación velocidad-flujo se obtiene que el mejor nivel de servicio se alcanza cuando el flujo es pequeño y la velocidad promedio de viaje se asemeja a la velocidad de flujo libre.

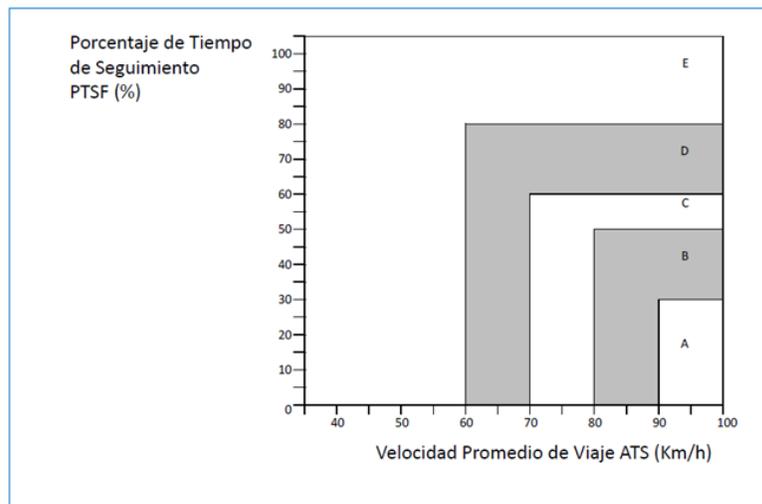


Figura 2.7. Asignación de nivel de servicio en caminos bidireccionales clase I (TRB, 2010).

2.7.2 Nivel de Servicio en Caminos Multi-pista

Los caminos multi-pista (Figura 2.8) poseen 2 o más pistas por sentido, con o sin mediana, bermas amplias, con control parcial de accesos y con pistas de entrada y salidas especiales. La velocidad máxima legal permitida es de 120 km/h y las velocidades de proyecto van de 80 a 120 km/h (MOP, 2016a).



Figura 2.8. Camino Multi-pista de 2 pistas por sentido. (Fuente. Archivo Tomás Echaveguren)

La maniobra de adelantamiento obedece un comportamiento diferente al caso de bidireccional, puesto que se hace por la pista izquierda sin invasión de pista en sentido contrario. En base a esto la posibilidad de adelantamiento depende únicamente de la longitud de pelotones de vehículos lentos, siendo menor el impacto de estos en la calidad de flujo en comparación al camino bidireccional.

La calidad de flujo y por ende el nivel de servicio está principalmente afectado por la geometría de la calzada y la densidad de accesos. Particularmente, los accesos con intersecciones no reguladas o bien intersecciones con pistas de convergencia o divergencia afectan al NS. La calidad del flujo depende de la velocidad promedio de viaje, de la densidad (veq/km/pista) y de la velocidad de flujo libre.

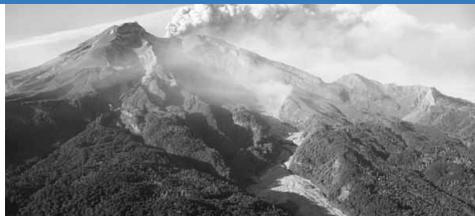
La Tabla 2.4 muestra la asignación de nivel de servicio para caminos multi-pista en función de la velocidad de flujo libre y la densidad máxima aceptada para cumplir con el respectivo nivel de servicio. El mejor nivel de servicio implica que para una velocidad de flujo libre determinada la densidad máxima aceptada es pequeña (menor a 7 veq/km/pista).

Tabla 2.4. Valores de Velocidad en Flujo Libre y Densidad Máxima asociados a cada Nivel de Servicio (TRB, 2010)

Velocidad Flujo Libre (km/h)	Densidad Máxima (Veq/km/pista)				
	A	B	C	D	E
100	<7	7-11	11-16	16-22	22-25
90	<7	7-11	11-16	16-22	22-26
80	<7	7-11	11-16	16-22	22-27
70	<7	7-11	11-16	16-22	22-28

3

FORMULACIÓN CONCEPTUAL DE LOS MODELOS DE RIESGO Y MITIGACIÓN



PROYECTO FONDEF ID14I10309

“Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional”

3. FORMULACIÓN CONCEPTUAL DE LOS MODELOS DE RIESGO Y MITIGACIÓN

El desarrollo de modelos para cuantificar el riesgo asociado a la amenaza de eventos naturales en la red vial nacional y mitigar sus efectos, surge de la necesidad de gestionar de manera integrada tanto las demandas por solicitudes de la red como de los eventos naturales que las afectan. Las primeras se han estudiado ampliamente en el ámbito de la gestión de infraestructura vial, donde tradicionalmente se consideran en la evaluación de alternativas de conservación aspectos técnicos y económicos. Para ello se han desarrollado modelos que predicen el comportamiento de distintos activos viales en el tiempo, y junto a ello, la aplicación de metodologías para la optimización de recursos durante el ciclo de vida de dichas infraestructuras.

En el caso particular de las demandas debidas a eventos naturales, la necesidad de gestión radica en el hecho de poder predecir en el corto y mediano plazo cuales son los lugares de la red vial más vulnerables a las principales amenazas que la afectan, disponer de la capacidad de conocer en que caminos es necesario invertir recursos para reducir su vulnerabilidad y tener la capacidad de conocer cuál es el tipo de inversión más adecuada para esos propósitos. Los esfuerzos de modelación, identificados a la fecha en la literatura, guardan relación con la cuantificación de la vulnerabilidad física de elementos que componen la red vial para una amenaza en particular bajo una perspectiva a nivel de proyecto.

Desarrollos recientes en el ámbito de la gestión de infraestructura vial han demostrado que la formalización e incorporación de aspectos sustentables en la toma de decisiones mejora considerablemente los efectos de las políticas públicas en quienes son sus beneficiarios finales (sean ellos usuarios y no usuarios). Según lo definido por las Naciones Unidas (UN, 2005) y el Informe Brundtland de desarrollo sustentable (WCED, 1987), una gestión sustentable requiere la consideración integrada y conjunta de criterios económicos,

ambientales y sociales. Con el objeto de viabilizar la aplicación de dicha definición a la toma de decisiones de mantenimiento de redes viales, el concepto de gestión sostenible se ha ampliado a considerar de manera integrada y conjunta aspectos técnicos, económicos, ambientales, sociales, financieros, políticos e institucionales a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura (SADC, 2003; Chamorro y Tighe, 2009; Chamorro, 2012; Torres-Machi, 2015, Videla et al., 2015).

Consecuentemente, en los últimos años se han realizado importantes esfuerzos para complementar las metodologías tradicionales de toma de decisiones, incorporando aspectos socio-políticos y ambientales, ya sea a través de modelos de decisión multi-criterio, indicadores combinados, optimización heurística, entre otros (Roberts et al., 2006; Bennett y Greenwood, 2004; Nathman et al., 2009; Torres-Machi, et al., 2015; Chamorro, 2012; Godoy et al., 2015; Valenzuela, 2007, Echaveguren et al., 2012). La consideración integrada de los siete aspectos en el ciclo de vida de la infraestructura resulta desafiante por cuanto los aspectos a evaluar son de muy distinta naturaleza. Asimismo, la importancia relativa de estos criterios varía según el ámbito en el que se realiza la evaluación. Así, por ejemplo, el aspecto social puede resultar especialmente importante en un ámbito en el que sea necesario mejorar la accesibilidad; mientras que en una región con alto valor medioambiental, puede resultar más prioritaria la evaluación ambiental. Ante la complejidad de considerar de forma integrada los siete aspectos identificados para una gestión sostenible, experiencias previas han demostrado las ventajas de incorporar, dependiendo de la índole del problema, al menos algunos de estos aspectos a los técnicos y económicos tradicionalmente considerados (Chamorro y Tighe, 2009; Torres-Machí, 2015).

Inspirado en las ventajas de lo desarrollado a la fecha en materia de gestión sustentable de infraestructura vial es que se plantea integrar criterios adicionales a los tradicionalmente considerados (técnico-económicos) en el desarrollo de modelos de riesgo y mitigación. Para lograr dicho cometido sumado a los alcances definidos para la aplicación de dichos

modelos, es que se deberán tomar en consideración los siguientes aspectos en el desarrollo de éstos:

Gestión a nivel de red: Los resultados que se obtengan de la aplicación de modelos deben ser tales que asistan a los tomadores de decisión en agencias a cargo de la gestión de la red vial nacional. Para ello, el nivel de detalle de la información requerida debe ser agregado y la cantidad de información suficiente. En este sentido será preferible incorporar en los modelos aquellas características con mayor incidencia en la vulnerabilidad para todos los caminos que componen la red, dejando para un posterior análisis información relevante para la definición de proyectos asociados a la mitigación.

Análisis sistémico de la red: El problema de toma de decisión a resolver mediante los modelos requiere incorporar características de elementos que componen un sistema y soluciones de mitigación aplicados a dichos elementos para la priorización de alternativas que maximicen la eficiencia del sistema. En este sentido, se deberá establecer jerarquías de elementos y subredes, y su aporte en la movilidad del sistema.

Integración de aspectos sustentables: Se deberá evaluar aquellos criterios más relevantes en la toma de decisiones sustentable para el problema bajo estudio. Dentro de ellos, se deberá establecer aquellas características que definen dichos criterios para que puedan ser evaluados de manera objetiva en la red.

Naturaleza estocástica de las amenazas: El desarrollo de modelos deberá incorporar la naturaleza estocástica de las amenazas y, por consiguiente, del riesgo inherente tanto de los elementos que componen la red como de la red en su conjunto. Para ello se plantea adaptar, como primera iteración de la modelación, modelos estocásticos existentes de riesgo y vulnerabilidad física.

Evaluación determinística y objetiva de variables que definen la vulnerabilidad de la red: Pese a la naturaleza estocástica del riesgo de la red sujeta a una determinada amenaza, se plantea la necesidad de definir una metodología de auscultación de la red y evaluación de características propias de agentes de manera objetiva y determinística. Lo anterior

permitirá asegurar en el largo plazo la generación de datos históricos confiables que garanticen repetibilidad independiente de las condiciones de evaluación que se apliquen (ejemplo: operador, equipamiento, recursos, etc.).

3.1 DISEÑO CONCEPTUAL DE MODELO DE RIESGO Y MITIGACIÓN

Para el desarrollo del modelo para cuantificar el riesgo asociado a la amenaza de eventos naturales en la red vial nacional, se plantea el diseño conceptual que se presenta en la Figura 3.1. Los componentes del diseño conceptual propuesto y su interacción son los siguientes:

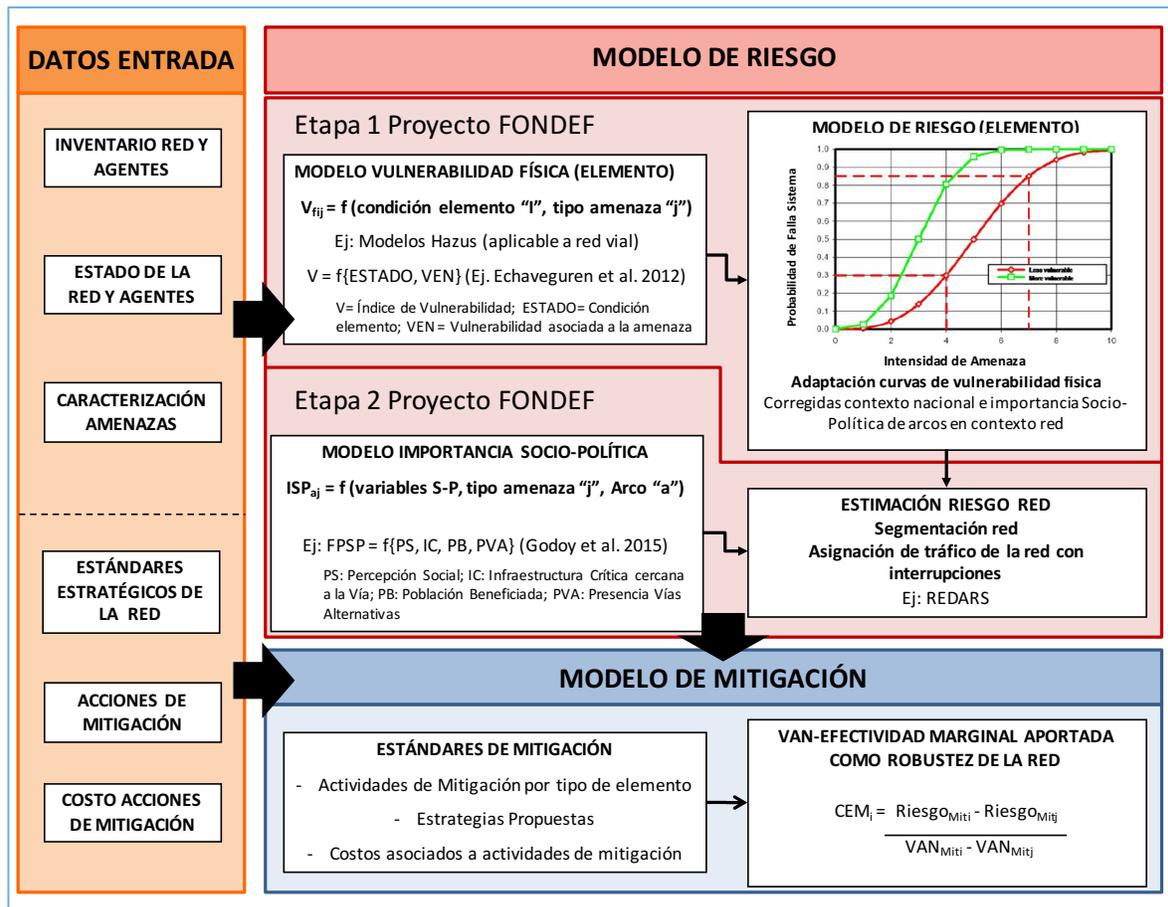


Figura 3.1. Diseño conceptual propuesto para el desarrollo de modelos de riesgo y mitigación

3.1.1 Datos de Entrada

Los datos de entrada para la cuantificación de riesgo se componen de información de inventario de la red, información recolectada e histórica sobre estado de la red vial y agentes, y la caracterización de amenaza bajo estudio. La información de inventario incluye información respecto a ubicación y tipo de caminos que componen la red vial, elementos que componen cada camino, localización de infraestructura crítica, tipos de usuarios, características del tráfico, actividad económica de caminos que componen la red, entre otros.

La información del estado de la red vial y agentes corresponde a la evaluación objetiva de la condición en que se encuentran en un instante dado en el tiempo las distintas variables a ser consideradas en los modelos de vulnerabilidad física e Importancia Socio-Política. Es decir, estado de características propias de elementos que componen la red que determinan su nivel de vulnerabilidad y condición de agentes que se ven afectados a la vulnerabilidad del sistema. Para tal efecto, se debe desarrollar una metodología de evaluación de información, que incluya: auscultación de variables asociadas a la condición física de elementos en terreno y metodología de cuantificación de variables socio-políticas a partir de otras fuentes (Ej. Censo, encuestas, etc).

La caracterización de amenazas corresponde a la selección de plataformas existentes que permitan cruzar la información de amenazas que afectan al país con la red vial, de manera de poder simular escenarios con distintas intensidades para la evaluación del riesgo de la red. Para el correcto referenciado de los datos de entrada es fundamental contar con un sistema de información geográfica.

3.1.2 Elementos del Modelo de Riesgo

El modelo de riesgos está definido por modelos de vulnerabilidad física de los elementos que componen la red vial ante cierta amenaza bajo estudio, por modelos de riesgo que permitan estimar la probabilidad de falla ante cierta amenaza y por su contextualización a

nivel de red mediante modelo de importancia socio-política y asignación a la red. El modelo se desarrolla en dos etapas.

En la primera etapa del proyecto FONDEF (Etapa de Investigación Aplicada que corresponde a la actualmente en desarrollo), se desarrollan el modelo de vulnerabilidad física y el modelo de riesgo por elemento a través de la adaptación de curvas de vulnerabilidad física. Como punto de partida para el desarrollo de modelos de riesgo se plantea adaptar modelos de vulnerabilidad física existentes incorporando la evaluación objetiva de las características que definen la vulnerabilidad de los elementos que componen la red nacional. Se espera adaptar a condiciones nacionales curvas de riesgo que permitan, para rangos de intensidad de amenaza observados históricamente, establecer la probabilidad de falla de elementos de la red dada su vulnerabilidad física.

En una segunda etapa del proyecto FONDEF (Etapas de implementación, que se postula a FONDEF e inicia al término de la primera etapa), se desarrollan los modelos de importancia sociopolítica a nivel de red, la integración de los modelos de riesgo a nivel de red la implementación en una plataforma. Se plantea desarrollar un índice que permita cuantificar la importancia relativa de los arcos que componen la red en términos sociopolíticos. A partir de la ponderación de ambos modelos se espera definir para cada elemento su vulnerabilidad física dado su contexto socio-político en la red vial.

3.1.3 Modelo de Mitigación

Dentro de la primera etapa del proyecto FONDEF se desarrollan modelos de mitigación, en los cuales se asignan distintas estrategias de mitigación considerando el riesgo al que está expuesto un elemento de la red. Las medidas de mitigación se definen como acciones destinadas a compensar, atenuar o eliminar el daño producido por un impacto negativo sobre algún sistema o componente de un sistema de manera de evitar impactos indirectos y/o de segunda vuelta. Generalmente, las medidas de mitigación se aplican una vez manifestada la acción que activa dicho impacto negativo, caso en el cual tienen por objetivo actuar sobre los efectos. En este sentido, una medida de mitigación que actúa

sobre los efectos, es una medida reactiva. Pueden aplicarse también sobre las causas que activan los impactos negativos directa o indirectamente, caso en el cual el factor que activa eventos negativos se elimina y por lo tanto el daño no ocurre. También suele denominarse medidas de mitigación que, aplicándose antes de que se produzca un evento negativo, tienen por propósito atenuar el daño que se produciría sobre un sistema o parte de él, si dicho evento se manifiesta.

Este concepto general se puede adaptar convenientemente al campo de la gestión de riesgos naturales que afecten el sistema de transporte de la siguiente manera: una medida de mitigación se define como una acción o grupo de acciones emprendida por una agencia vial destinada a: (a) recuperar o mejorar el nivel de servicio de una vía o red vial afectada por un evento natural una vez que se produce y modifica las condiciones de operación; (b) incrementar la robustez de la infraestructura para mejorar su desempeño en caso en que un evento natural la afecte, y (c), incrementar sistemática, programada y progresivamente la robustez de la infraestructura vial para adaptarla a condiciones ambientales progresivamente adversas, derivadas por ejemplo del cambio climático combinado con anomalías climáticas, lagunas sísmicas, efectos de cascada debido a peligros geológicos.

4

MODELACIÓN DE RIESGO DE PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA RED VIAL NACIONAL EXPUESTOS A AMENAZA SÍSMICA, VOLCÁNICA E HIDRO- METEREOLÓGICA



PROYECTO FONDEF ID14110309

“Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional”

4.MODELACIÓN DE RIESGO DE PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA RED VIAL NACIONAL EXPUESTOS A AMENAZA SÍSMICA, VOLCÁNICA E HIDRO-METEREOLÓGICA

4.1 MODELO DE RIESGO SÍSMICO

4.1.1 Descripción de la Amenaza

Chile es uno de los países latinoamericanos más propensos a sufrir un terremoto, debido a que se encuentra ubicado sobre el borde occidental de la placa Sudamericana, donde converge con la placa de Nazca (Madariaga, 1998). En el territorio nacional se reportan sismos a diario, y en los últimos 400 años se han registrado más de 20 sismos con magnitud superior a 7.5 Mw. El país sufrió el terremoto de Valdivia en el año 1960, que es el más intenso del que se tenga registro en la historia de la humanidad.

Existen tres tipos de borde de placas tectónicas: límites convergentes, límites divergentes y límites de falla transformante. Por su parte, Chile se encuentra ubicado sobre un límite convergente, que es el más destructivo de todos. Bajo el territorio nacional se subduce la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana con una velocidad de convergencia entre 6.5 y 7 cm/año (Barrientos, 2010).

Los eventos sísmicos son considerados una amenaza a la red vial debido a que los elementos que componen la infraestructura vial son propensos a fallar durante un terremoto, ya sea por el movimiento del suelo o por una falla de este. Al fallar uno de estos elementos se produce una pérdida o disminución de la conectividad, perjudicando tanto procesos productivos como a las personas que requieren trasladarse de un lugar a otro.

Los elementos más propensos a fallar durante un terremoto, según la evidencia vista en terreno y lo registrado en catastros realizados por el Ministerio de Obras Públicas y la Dirección de Vialidad luego de cada uno de los eventos, son los puentes, taludes de corte y terraplenes.

En el caso de los puentes los efectos más recurrentes son la caída de vigas, rotación de vigas, asentamiento de estribos, destrucción de losa de acceso y la destrucción de terraplén de acceso. Por otro lado, según el Manual de Carreteras Vol. 3 (MOP, 2015) en el caso de los taludes de corte, los más recurrentes son los deslizamientos, desprendimientos, flujos secos y húmedos, erosión en taludes, y se incluye además la caída de rocas; mientras que en los terraplenes se producen erosiones y deslizamientos, corrimientos en laderas, densificación de los rellenos, asentamientos por consolidación, flujo plástico o falla de corte, y asentamiento dinámico y licuación (MOP, 2015).

4.1.2 Definición de Curvas de Fragilidad

Debido a la incerteza y a la aleatoriedad inherente de los eventos sísmicos, se hace necesario un enfoque probabilístico en el diseño sísmico y en la evaluación de las estructuras (Nazari & Bargi, 2012). Las curvas de fragilidad definen la probabilidad de superar un estado de desempeño predefinido para diferentes niveles de intensidad de terremoto, proporcionando un tratamiento probabilístico racional y coherente del daño o la pérdida. (Mackie & Stojadinovic, 2004). Para realizar el desarrollo de las curvas de fragilidad existen cuatro enfoques, que se diferencian entre ellos en el nivel de esfuerzo que requieren en su implementación y en términos de la precisión de los resultados:

- i) **Enfoque empírico:** se basa en la toma y análisis de datos obtenidos a partir de experimentos naturales o en laboratorio. Las curvas de fragilidad son creadas a partir del ajuste de una función a los datos obtenidos. Se requiere una base de datos de gran calidad y que contenga una cantidad de información suficiente.

- ii) **Opinión de expertos:** se basa en la opinión y criterio de personas capacitadas en el tema. Puede variar ampliamente los resultados dependiendo del nivel de rigor con que se implemente.
- iii) **Enfoque analítico:** se basa en modelos que caracterizan el estado límite del funcionamiento de un sistema. La curva de fragilidad se construye a partir del cálculo de la probabilidad de falla de esta, que van desde aquellas en las que es muy poco probable, hasta las que el daño es inminente.
- iv) **Enfoque híbrido:** Combina dos o más de los mencionados anteriormente, con la finalidad de reducir las limitaciones individuales de cada uno de los enfoques.

c. Desarrollo de Curvas de Fragilidad

En el marco de la investigación, para el desarrollo o adaptación de las curvas de fragilidad, se estudiará un enfoque híbrido en que se combinan dos de los enfoques propuestos:

- i. **Enfoque empírico:** ya que se cuenta con una gran cantidad de datos de eventos que han ocurrido anteriormente y que fueron proporcionados por la Oficina Nacional de Emergencias (ONEMI) y la Dirección de Vialidad. Se cuenta con información de los daños ocurridos en las distintas infraestructuras y también con la intensidad en la ubicación geográfica de esta.
- ii. **Enfoque analítico:** debido a que la cantidad de datos empíricos no será suficiente, se propone complementar los datos con simulaciones analíticas. Sin embargo, la metodología de la simulación puede variar dependiendo del tipo de análisis numérico utilizado, el parámetro sísmico en que se desarrollan las curvas de fragilidad, y en la distribución de daños esperados para una intensidad determinada (Karakostas et al., 2006).

b. Desarrollo utilizando enfoque empírico

La información que se encuentra disponible comprende un registro geo-referenciado de los puentes e infraestructuras que fueron dañadas con el terremoto de 2010, y por otro lado se cuenta con información de las intensidades de la amenaza para cada punto geográfico. Por lo tanto, realizando un cruce de la información con el software ArcGIS, es posible obtener la información de la intensidad y del daño de cada infraestructura.

Luego, utilizando criterio de expertos es posible clasificar cada uno de los daños reportados en la información disponible como: sin daño, leve, moderado, extensivo o completo. A partir de esto, se pueden desarrollar las curvas de fragilidad analizando para cada intensidad qué porcentaje de la infraestructura se encuentra en cada estado de daño.

Sin embargo, cada uno de los elementos tiene características diferentes, por lo que las curvas de fragilidad desarrolladas de modo global no tendrían representatividad. Es por esto, que se propone clasificar cada uno de los elementos dependiendo de sus características, y realizar el procedimiento de desarrollo de curvas de fragilidad. El problema surge en este punto, dado que no se cuenta con información suficiente para la elaboración de curvas de fragilidad de manera empírica cuando se clasifican los elementos, dado que en algunas categorías se tendrían muy pocos datos. En este sentido, se propone la utilización de simulaciones.

c. Desarrollo utilizando enfoque analítico

Para el desarrollo de simulaciones, se ha revisado la literatura disponible acerca de la información de desarrollo de curvas de fragilidad para puentes. Generalmente, se realiza un análisis que compara la capacidad sísmica del elemento con la demanda a la que expone durante un terremoto. Karakostas et al. (2006) definieron una razón de daño que está determinada por el desplazamiento del elemento en relación al desplazamiento de fluencia, y dependiendo del valor de esta se definió un estado de daño. Se realizaron simulaciones de la capacidad versus la demanda y se obtuvieron curvas de fragilidad.

En el caso de esta investigación se propone el uso de una metodología similar a la expuesta, en donde se compare las capacidades de los elementos con la demanda sísmica.

4.1.3 Descripción General de Hazus-MH

Hazus-MH es un software desarrollado por la Federal Emergency Management Agency (FEMA) en conjunto con el National Institute of Building Sciences (NIBS). Su nombre proviene del acrónimo de *Hazard, United States (US) y Multi Hazard*. Es una metodología estandarizada para la estimación de daños y pérdidas consecuencia de un evento natural, ya sea sismo, huracán o inundación. Se basa en la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG), funcionando sobre la plataforma del software ArcGis. Este software combina aspectos científicos, como es la modelación de amenazas naturales, y de ingeniería, a través de las curvas de fragilidad estructural de diferentes infraestructuras (Schneider & Shauer, 2006; Nastev & Todorov, 2013).

Hazus-MH permite llevar a cabo una cuantificación de los daños a un elemento en particular causado por una amenaza natural específica en dimensiones físicas, económicas y sociales, para una determinada área geográfica (Hasenberg & Rad, 1999; citado en Beckmann & Simpsons, 2006).

El software es una herramienta modular, que puede ser utilizado de acuerdo a las necesidades que tenga el usuario o simplemente en base a la disponibilidad de recursos e información que se dispongan. En el contexto de esta investigación interesa estimar el daño físico de la red vial frente a la amenaza sísmica. Dicho daño físico es calculado a partir de curvas de fragilidad que se encuentran asociadas a un elemento en específico y relacionan la intensidad de la amenaza con la vulnerabilidad del elemento.

En cuanto a la cantidad de información requerida, Hazus-MH permite realizar análisis en tres niveles que se diferencian en el detalle de la información. El nivel 1 permite realizar estimaciones utilizando las bases de datos precargadas en el software, la que está adaptada de información de Estados Unidos (FEMA, 2003; citado en Beckmann & Simpson, 2006). El

Nivel 2 requiere de la proporción de datos por parte de agencias locales de emergencias, profesionales GIS, entre otros; y permite el ingreso de datos de inventario, amenazas y datos de daños (FEMA, 2003; citado en Beckmann & Simpson, 2006). El Nivel 3 es el que incorpora un mayor nivel de detalle y proporciona los resultados más confiables, pero requiere de la asistencia de expertos en áreas como la estructural y la geotécnica (FEMA, 2003; citado en Beckmann & Simpson, 2006).

a. Modelo General de Hazus-MH

En términos generales, el software Hazus-MH calcula el riesgo en términos de daño físico directo e indirecto, y pérdidas económicas y sociales directas e indirectas, en base a una función de la exposición a la amenaza, de los datos del inventario y de la vulnerabilidad de los componentes. La intensidad de la amenaza está asociada puede ser considerada de maneras diferentes que se detallan más adelante, pero dependen principalmente del evento que se simule y los efectos que este tenga en el suelo. Los datos de inventario consideran fundamentalmente las bases de datos de los elementos que componen cada grupo de infraestructura. La vulnerabilidad se modela mediante la utilización de curvas de fragilidad, que representan la probabilidad de sufrir daño dada una intensidad de la amenaza. Este modelo general se muestra en la Figura 4.1.

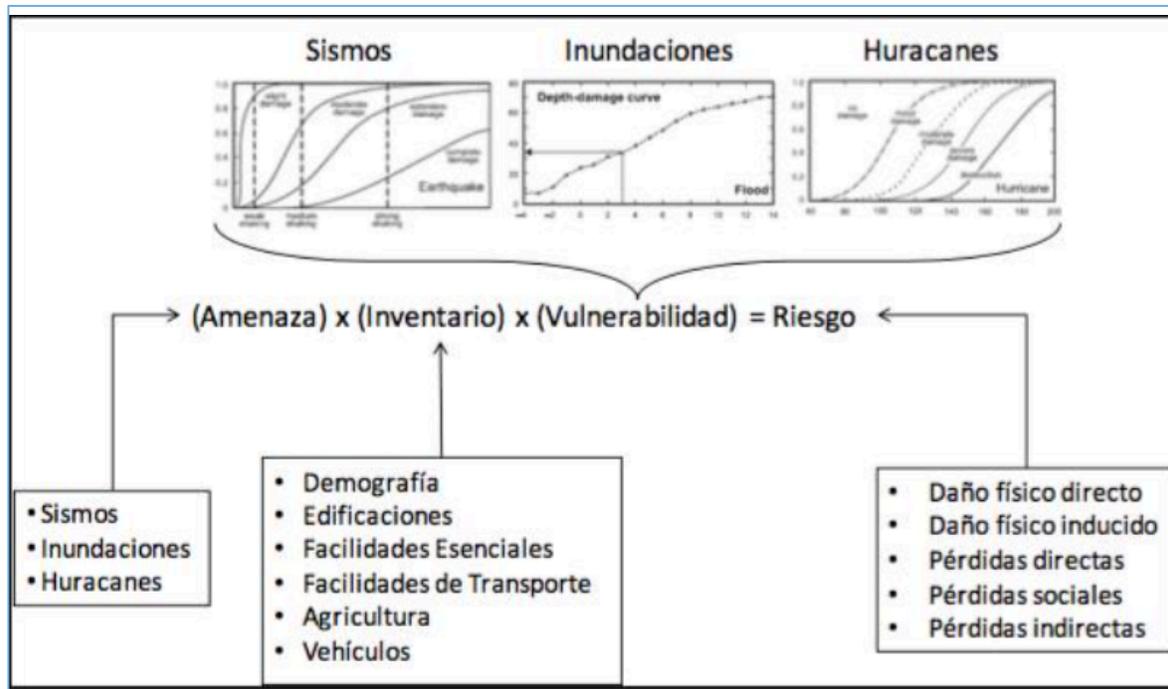


Figura 4.1. Modelo general de Hazus (Adaptado de FEMA, 2011)

b. Diagnóstico de Hazus-MH para Amenaza Sísmica en Sistemas de Carreteras

Los sistemas de carreteras están compuestos por caminos, puentes y túneles. Cada uno de estos elementos, según el manual técnico de Hazus-MH, pierde funcionalidad por diferentes motivos. En el caso de los caminos, se pierde funcionalidad principalmente por falla del suelo en el que se encuentra establecido, es decir, por licuefacción, deslizamiento de tierras o ruptura de fallas, y no por el movimiento en sí (FEMA, 2011). Diferente es en el caso de los puentes y túneles, que pierden funcionalidad ya sea por falla del suelo o también por el movimiento originado por el terremoto (FEMA, 2011).

Cada uno de los elementos tiene asociada una curva de fragilidad, que poseen una distribución acumulada log-normal, en la que, mediante la intensidad de la amenaza sísmica y la clasificación del elemento, pueden estimar el daño. Sin embargo, la intensidad de la amenaza se mide en forma diferente para cada elemento. En el caso de los caminos,

se requiere que las curvas de fragilidad estén definidas en términos de PGD (Permanent Ground Displacement) (NIBS, 1999). Para los puentes se requiere de curvas de fragilidad que estén definidas en términos de aceleración espectral a los 0,3 y a 1 segundo, y también en términos de PGD. Finalmente, en el caso de los túneles las curvas de fragilidad deben estar definidas en términos de PGD y PGA (Peak Ground Acceleration). A continuación, se presentan ejemplos de las curvas de fragilidad para cada uno de los elementos.

c. Requerimiento de INPUT de Hazus-MH

1. Movimiento de Suelo

Para realizar el modelamiento de la amenaza dentro del software, es necesario el ingreso de cierta información al sistema. En el caso del movimiento del suelo, existen tres posibilidades:

- i) Cálculo determinístico de un escenario de impacto de suelo.
- ii) Mapas probabilísticos de peligro sísmico.
- iii) Mapas de peligro sísmico suministrados por el usuario.

Sin embargo, en el caso del proyecto FONDEF se utilizarán los mapas de peligro sísmico suministrados por el usuario. Esto quiere decir que se simulará un terremoto con una magnitud y una localización específica. A partir de esto, se crearán los mapas de PGA, PGD y aceleración espectral.

2. Falla de Suelos

Según Hazus-MH el suelo puede fallar por tres motivos: susceptibilidad de licuefacción, deslizamiento de tierras y ruptura de superficie. Para modelar cada uno de estos es necesario cierto nivel de información.

- i) **Licuefacción:** Para evaluar la susceptibilidad de licuefacción es necesario contar con mapas geológicos, mapas de profundidad del agua del suelo, magnitud de momento del terremoto a simular.

- ii) **Deslizamiento de tierras:** En el caso del deslizamiento de tierras es necesario contar con mapas geológicos, mapas topográficos y mapas de condiciones del agua de suelo.
- iii) **Ruptura de superficie por falla:** Para evaluar la posibilidad de ruptura de la superficie se necesita contar con la localización en la superficie de los segmentos de falla activa que pueden romper durante un terremoto.

3. Sistemas de Carreteras

Como se ha mencionado anteriormente, los sistemas de carreteras están compuestos por caminos, puentes y túneles. El requerimiento de datos de inventario para el análisis incluye localización geográfica, clasificación y el costo de reemplazo de los componentes del sistema.

4.1.4 Modelo de Riesgo de Puentes por Movimiento de Suelo

El catastro de daños causados por el terremoto del 27F de 2010 reporta la información sin categorizarla por niveles de daño. Utilizando criterio de expertos es posible clasificar cada uno de los daños reportados en la información disponible como: sin daño, leve, moderado, extensivo o completo. La descripción de cada uno de estos estados de daño se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Descripción de los estados de daño

Estado de daño	Ligero/menor (ds2)	Moderado (ds3)	Extensivo (ds4)	Completo (ds5)
Puentes	Agrietamiento o astillado menor en los estribos, juntas, columnas o plataforma	Agrietamiento o astillado moderado en columnas Movimiento moderado de los estribos (menor a 5 cm)	Columnas con falla mayor, pero sin colapso Asentamientos mayores Movimiento significativo en las juntas	Colapso en las columnas Falla de fundación

4.1.5 Intensidades de la Amenaza

Los terremotos de grandes intensidades que ha sufrido el territorio nacional han presentado las mayores intensidades fuera del territorio continental, es decir en el mar. Esto se puede apreciar en la Figura 4.2. Es por esto, que los puentes chilenos no se encuentran expuestos a tan altos niveles de aceleración cuando ocurre un terremoto.

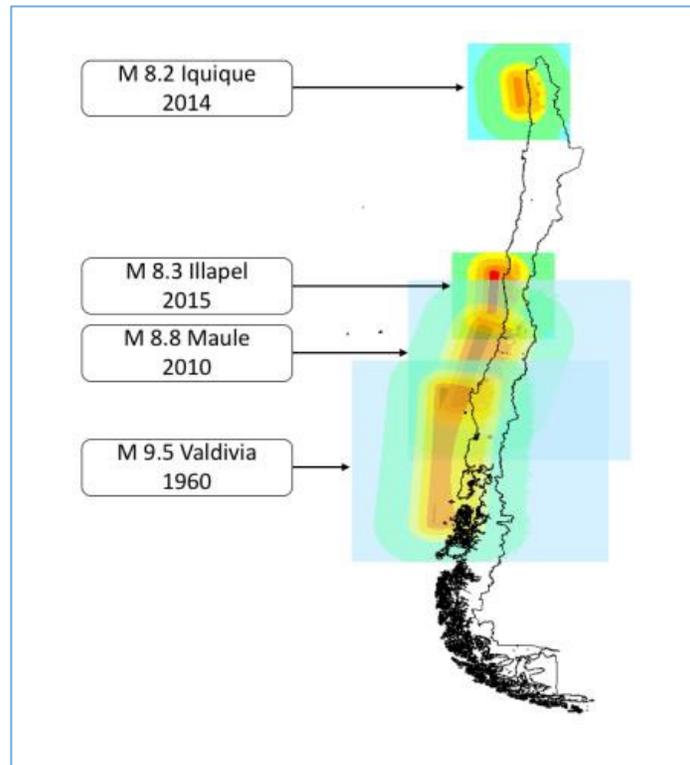


Figura 4.2. Aceleraciones máximas durante cada terremoto

Fuente: Elaboración Propia con datos USGS

4.1.6 Desarrollo de Modelo de Riesgo

El objetivo principal es validar las curvas de fragilidad entregadas por Hazus-MH para el caso chileno. Para esto, se tomó como base el catastro realizado post terremoto del 27F de 2010, y se asignaron estados de daño en base a la descripción de los efectos sobre cada elemento, de acuerdo al criterio de expertos.

Utilizando el software ArcMap, se interseccionaron el reporte de daños a la infraestructura con la intensidad de la amenaza, representada por aceleraciones en el caso de movimiento de suelo como mecanismo de falla. La Figura 4.3. ilustra las aceleraciones con los daños reportados en la VIII Región del Bio Bio.

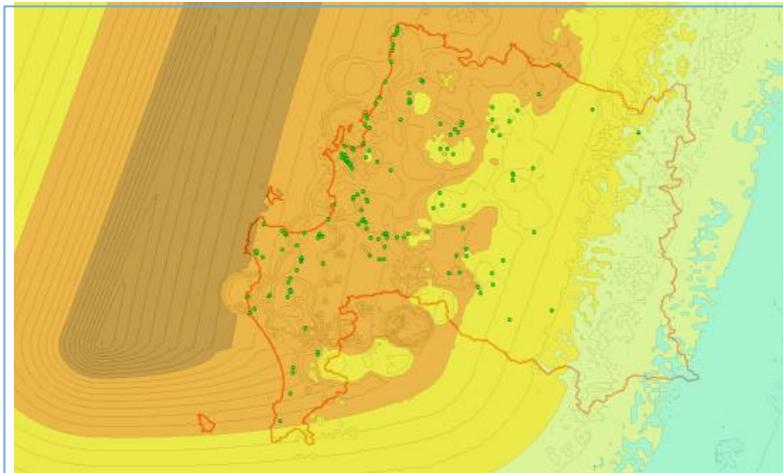


Figura 4.3. Cruce aceleraciones, con eventos registrados en la VIII Región
Fuente: Elaboración Propia con datos USGS y MOP

Luego de realizar la intersección de ambas capas (reportes de daño y aceleraciones) mediante el software ArcMap, se procesaron los datos y se obtuvieron curvas de fragilidad. Estas se muestran en la Figura 4.4.

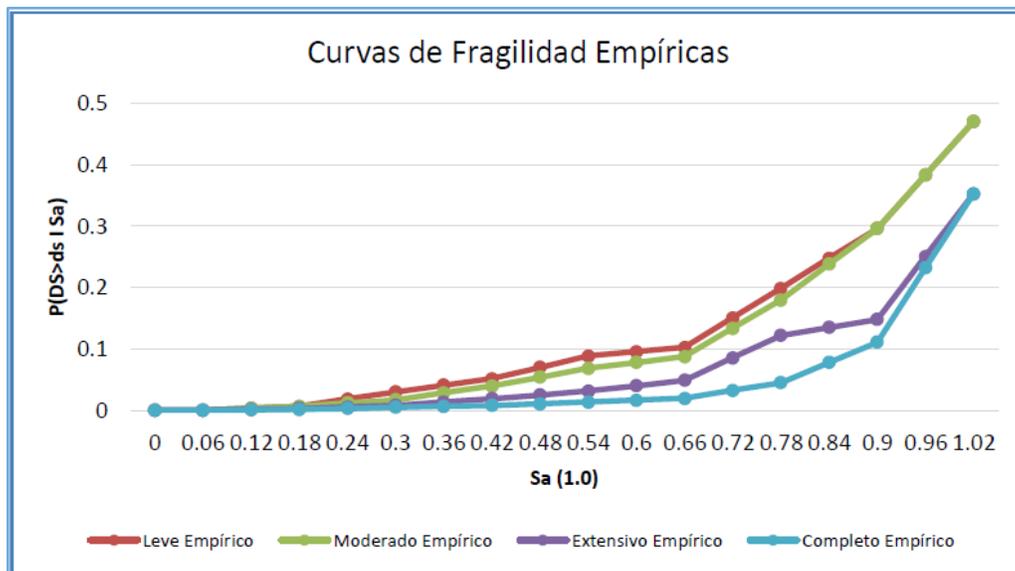


Figura 4.4. Curvas de Fragilidad Empíricas

Se puede ver que las curvas poseen valores de aceleración espectral (1.0) hasta valores cercanos a 1g. Esto se debe a lo que las intensidades mayores se encuentran fuera del territorio continental. A continuación, se calibraron curvas log-normales que se ajusten a los datos empíricos obtenidos.

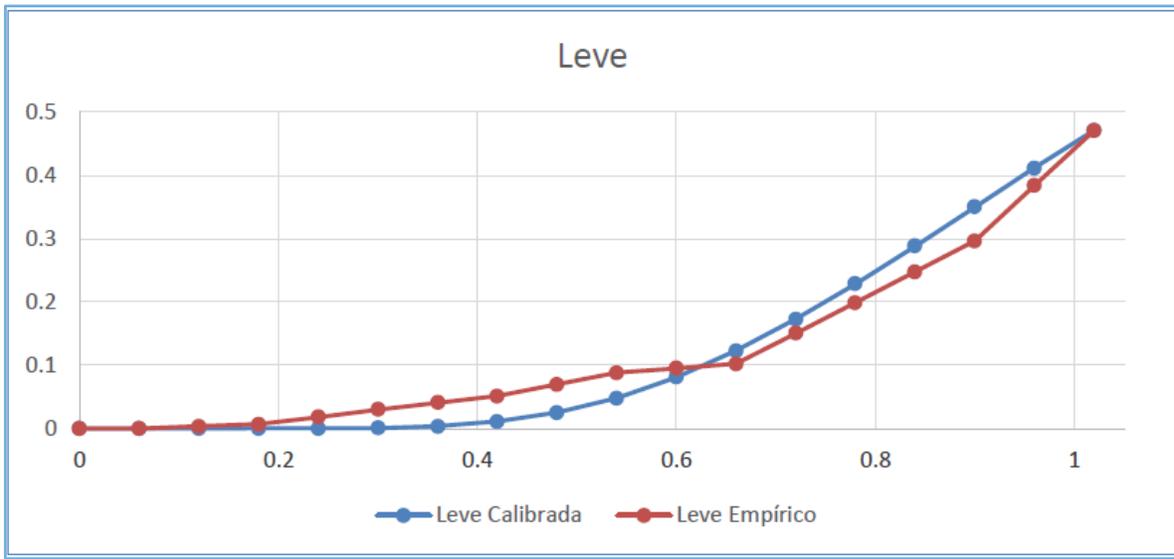


Figura 4.5. Adaptación de Curva Log-Normal a la Curva de Fragilidad Leve Empírica

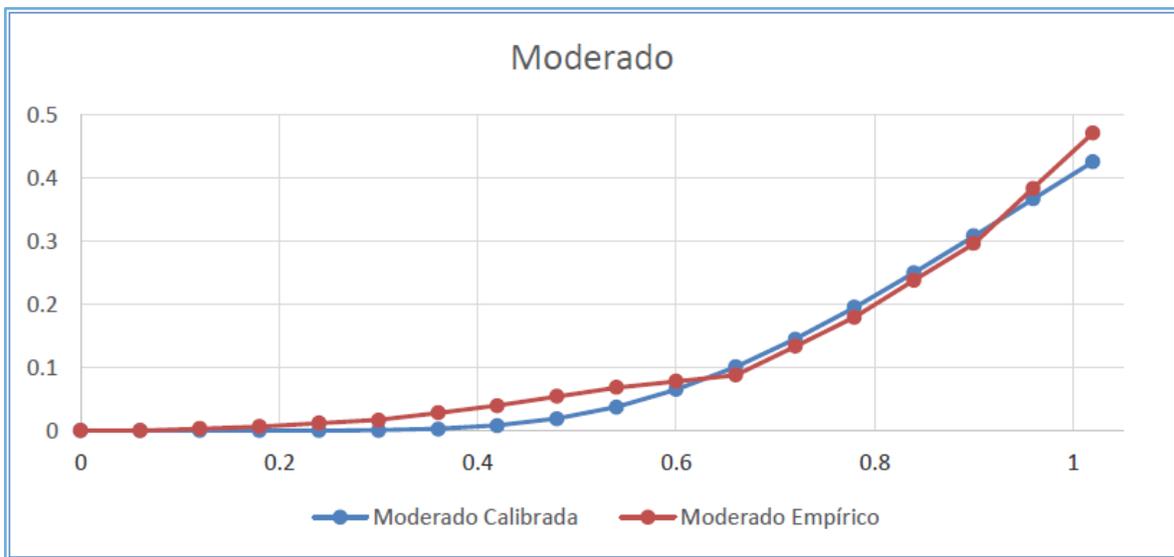


Figura 4.6. Adaptación de Curva Log-Normal a la Curva de Fragilidad Moderada Empírica

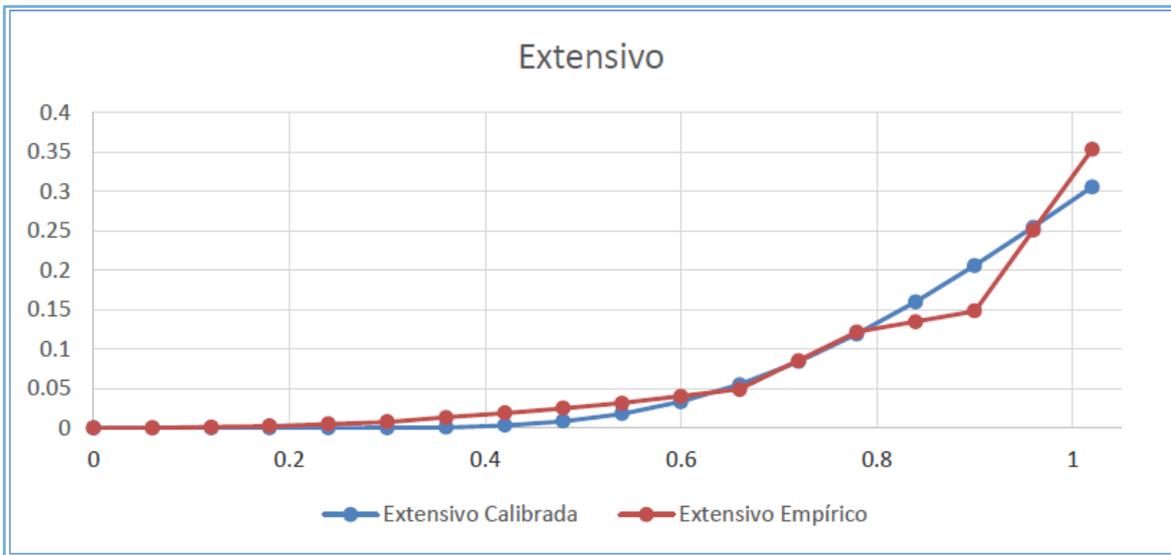


Figura 4.7. Adaptación de Curva Log-Normal a la Curva de Fragilidad Extensiva Empírica

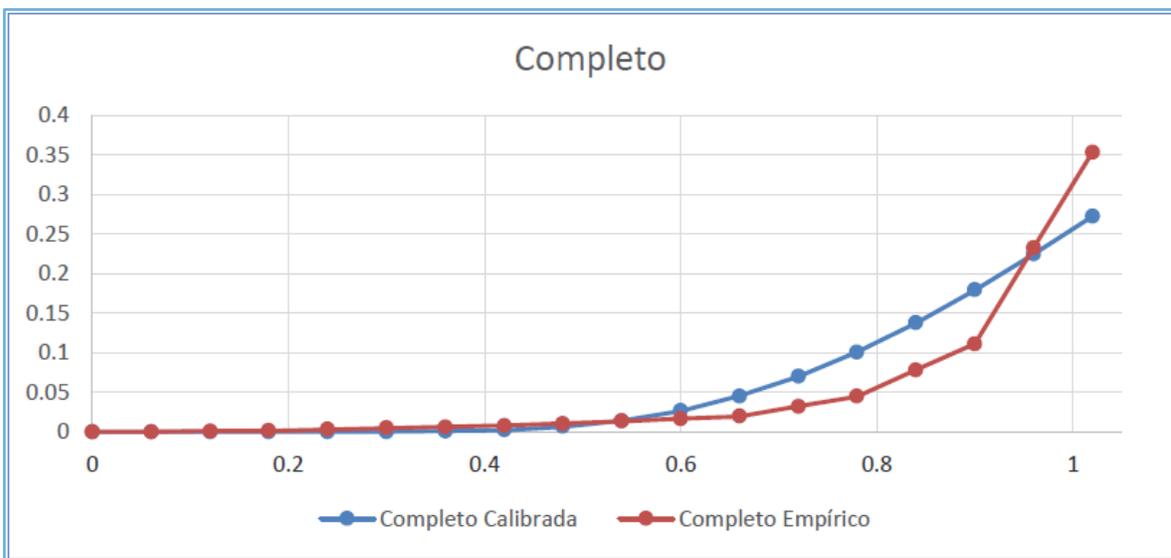


Figura 4.8. Adaptación de Curva Log-Normal a la Curva de Fragilidad Completa Empírica

Luego, las curvas adaptadas son prolongadas hasta valores más altos de intensidad de amenaza, para ver su comportamiento. Las curvas prolongadas se presentan a continuación.

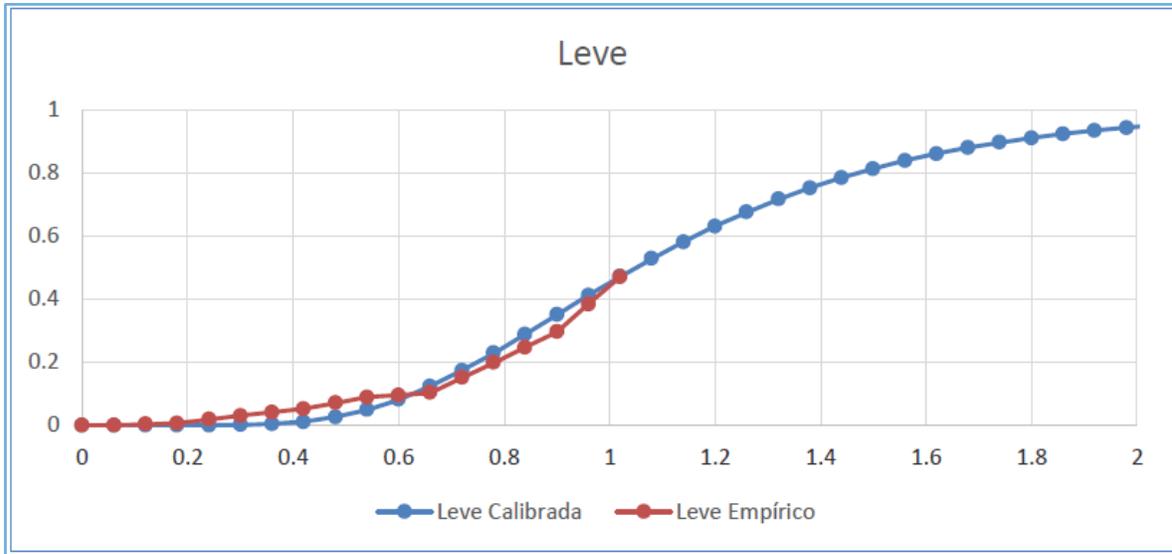


Figura 4.9. Prolongación de Curva Log-Normal a la Curva de Fragilidad Leve

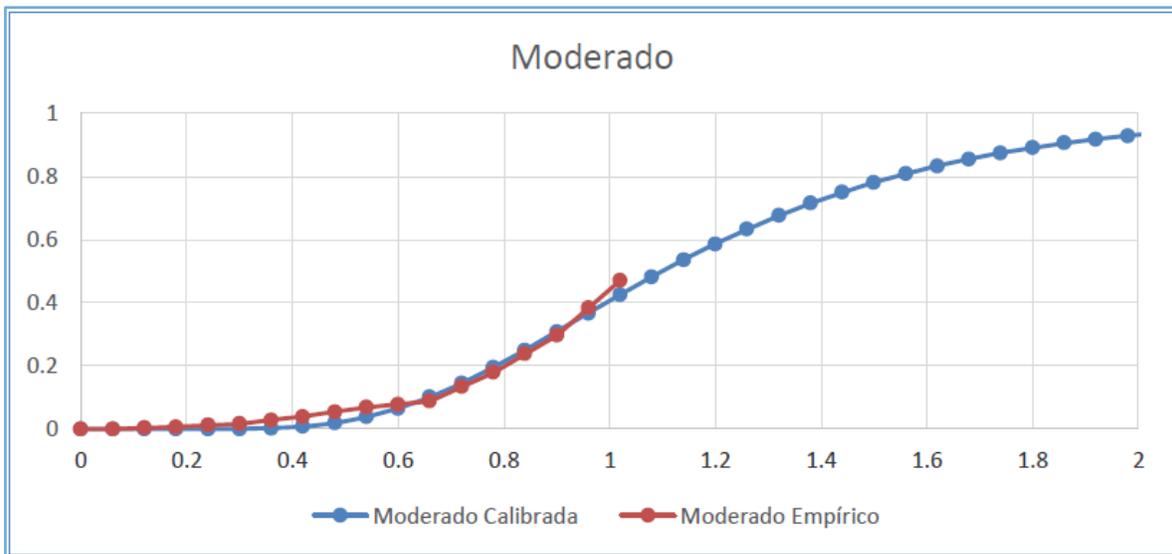


Figura 4.10. Prolongación de Curva Log-Normal a la Curva de Fragilidad Moderada

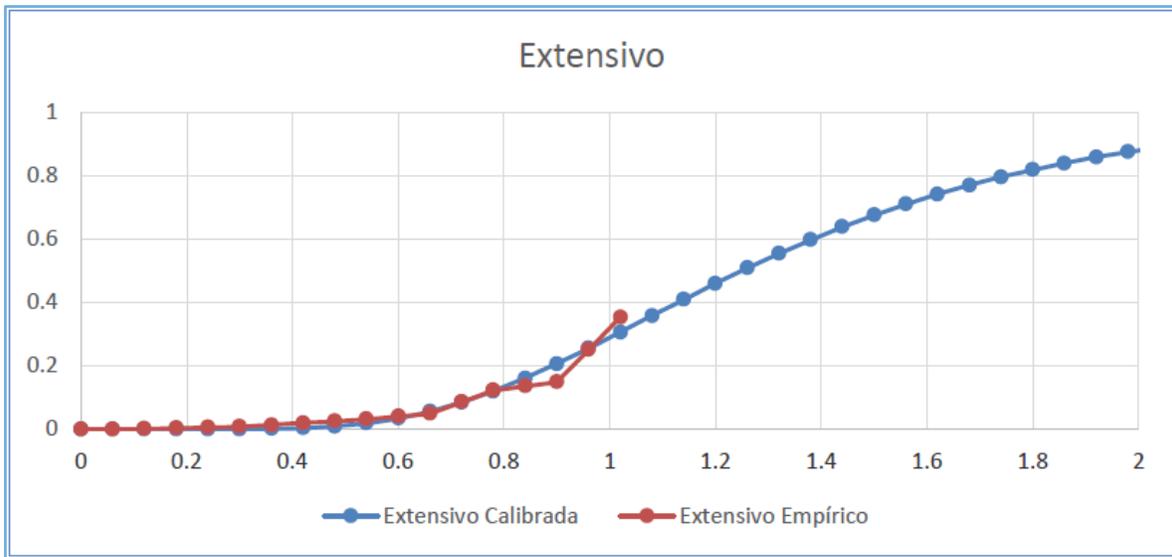


Figura 4.11. Prolongación de Curva Log-Normal a la Curva de Fragilidad Extensiva

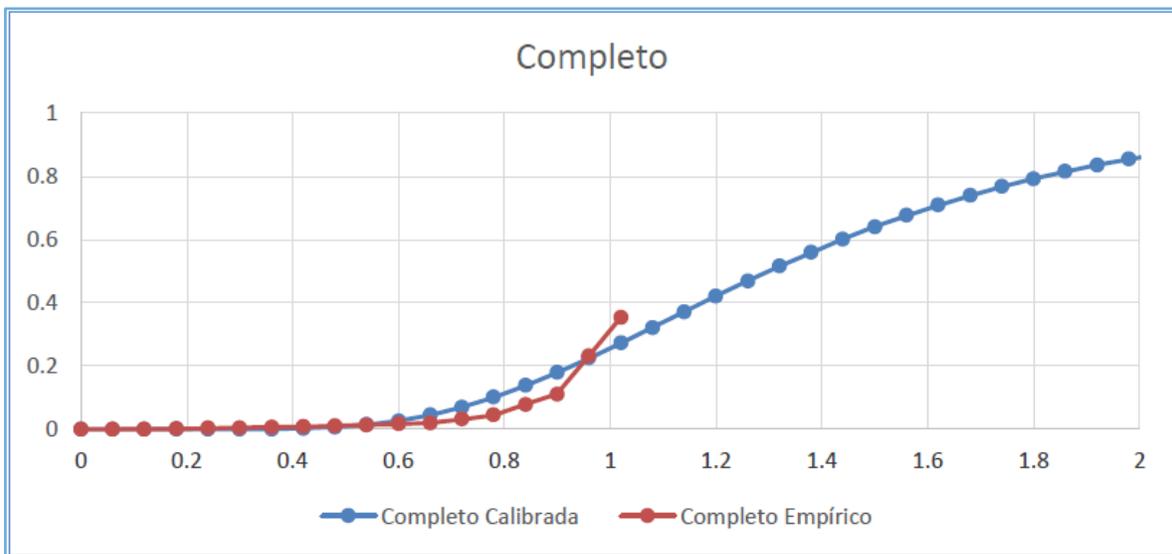


Figura 4.12. Prolongación de Curva Log-Normal a la Curva de Fragilidad Extensiva

Finalmente, en la Figura 4.13 se presentan las curvas log-normales calibradas, prolongadas hasta valores de $2g$. Los parámetros de las curvas calibradas se presentan a continuación, en la Tabla 4.2. La desviación se estableció en 0,4 para todas las curvas.

Tabla 4.2. Parámetros de las Curvas de Fragilidad Log-normales

Sa (1.0 s en g's)				
Clase	Leve	Moderado	Extensivo	Completo
Empírico	1.05	1.10	1.25	1.30

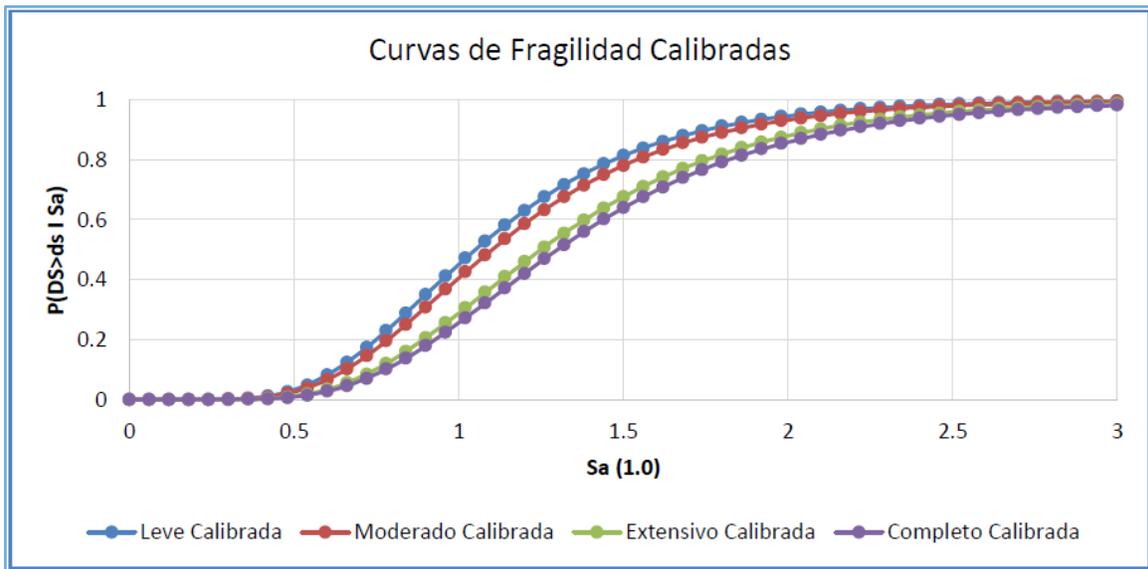


Tabla 4.13. Curvas Log-Normal calibradas en base a las Curvas Empíricas

4.2 MODELO DE RIESGO VOLCÁNICO

4.2.1 Descripción de la Amenaza

La amenaza volcánica o vulcanológica se asocia a la ocurrencia de uno o varios procesos volcánicos (lahares, caída de piroclastos, flujos piroclásticos, corrientes de lava). Estos se diferencian en los dos puntos relevantes que componen la definición de riesgo: su probabilidad de ocurrencia y sus consecuencias o impactos sobre la infraestructura vial. Dada la ocurrencia de una erupción volcánica, existe una probabilidad de ocurrencia

distinta asociada a cada uno de estos procesos volcánicos. De esta forma, la vulnerabilidad de la red varía dependiendo del proceso que conlleve el evento volcánico. Además, los procesos estudiados pueden afectar de distintas formas y magnitudes la infraestructura vial, y por ende la conectividad nacional.

a) Lahares

Flujos de material volcánico (o sedimento) y agua que se movilizan por las laderas del volcán. En otras palabras, son mezclas de elementos rocosos movilizadas por agua a través de barrancos y cauces fluviales. Se pueden generar por la fusión de un glaciar o por lluvias intensas. Los lahares están compuestos, en promedio, por una razón de agua a sedimentos de 1:2. Es decir, 1/3 de su volumen es agua y los 2/3 restantes son sedimentos. Pueden tener un alto alcance geográfico llegando en ciertos casos a afectar elementos ubicados a 100 km del cráter del volcán. Además, alcanzan velocidades de hasta 120 km/h con peralte de curva, lo que los hace más peligrosos.

En cuanto a los impactos que pueden tener los lahares en la infraestructura vial, estos son altamente perjudiciales para los puentes. Esto se debe a que los lahares transportan una cantidad importante de material y agua a altas velocidades, lo que puede afectar los cauces de los ríos y dañar las pilas, los estribos y la superestructura de los puentes. El colapso o deterioro de los puentes afecta de manera directa la conectividad de la red.

La vulnerabilidad de los puentes ante la amenaza de los lahares depende de la época del año en que ocurren y de las temperaturas del invierno anterior. La vulnerabilidad del puente aumenta en el caso de que la erupción ocurra al final del invierno, ya que en esta etapa del año hay más nieve acumulada y compactada en capas, asemejándose así al hielo, lo que genera un mayor flujo de lahares. Esto se ve acentuado si el invierno anterior tuvo bajas temperaturas porque esto conllevaría un mayor volumen de hielo y nieve en el volcán teniendo, por lo tanto, un mayor potencial de generación de lahares.

b) Caída de piroclastos

Fragmento sólido de material volcánico, generalmente roca ígnea, emitido y arrojado al aire durante una erupción. La solidificación de estos elementos ocurre en algún momento de la erupción volcánica, usualmente en el recorrido aéreo. La generación de piroclastos ocurre cuando el magma se fragmenta por explosiones. Si el magma emitido es muy viscoso, es decir, contiene mucha sílice, será más explosivo produciendo así más piroclastos. Cabe mencionar que generalmente es posible predecir la generación de piroclastos en una erupción, ya que las explosiones internas del magma producen microsismos en el volcán. Estos sismos se generan a una baja profundidad pero son de baja magnitud (menor a 4 en la escala de Richter), por lo que sólo pueden ser percibidos por sensores instalados en la zona.

La zona de impacto de la caída de piroclastos depende de la altura de emisión y de las condiciones ambientales. Sin embargo, el alcance geográfico de este proceso volcánico, exceptuando el caso de la ceniza, es menor al de los lahares, afectando solo a elementos cercanos al cráter. De esta forma, este proceso tiene un alcance menor sobre la red vial, teniendo así un menor potencial impacto sobre sus elementos, sin acentuarse en alguno en particular, como lo son los puentes en el caso de los lahares.

Los piroclastos pueden interrumpir el tránsito de un camino pero generalmente no destruyen la infraestructura, sólo impiden su uso. Sin embargo, la suspensión del tránsito de la ruta provoca efectos negativos en la conectividad, produciéndose así una pérdida temporal de la funcionalidad de la infraestructura afectada. Aun así, los piroclastos que caen sobre la infraestructura pueden ser despejados de manera rápida y fácil mediante el uso de maquinaria, lo que permite una recuperación pronta de la conectividad.

c) Flujos piroclásticos

Avalanchas incandescentes de gases y piroclastos, especialmente de ceniza. El material avanza a velocidades de hasta 500 km/h y a altas temperaturas (sobre 400°C). Si ocurre un flujo importante, destruirá todo lo que se encuentre en su trayectoria. Sin embargo, para producir efectos importantes en la población e infraestructura, la magnitud del flujo debe

ser elevada. Esto se debe a que en general la zona de impacto de este proceso, al igual que el caso de la caída de piroclastos, es baja. De esta forma, su ocurrencia afecta una superficie menor alrededor del cráter.

Un flujo de piroclastos se considera crítico si se expulsan más de 0,5 km³. La probabilidad de que ocurra en Chile un flujo de piroclastos de un volumen mayor al volumen crítico de 0,5 km³ es baja, lo que genera una disminución importante en el riesgo de este proceso. Aun así, a pesar de la baja probabilidad de ocurrencia, todos los volcanes activos de Chile han generado flujos piroclásticos importantes en el pasado, lo que indica que esto ocurrirá otra vez en el futuro. El volcán Villarrica, por ejemplo, ha emitido flujos de piroclastos importantes 16 veces en sus 14.000 años de historia, lo que indica que el evento tiene un período de recurrencia de 875 años, sin embargo, el último flujo ocurrió hace 1.620 años (Moreno, 2015).

d) Corrientes de lava

Material magmático fundido que expulsa un volcán ascendiendo a través de la corteza terrestre alcanzando la superficie. Al salir a la superficie, la temperatura de la lava oscilan entre los 700oC y los 1.200oC. La lava se genera cuando el magma sale a la superficie y escurre por gravedad sin la ocurrencia de explosiones. A pesar de su alta viscosidad, la lava puede fluir y recorrer largas distancias antes de solidificarse, momento en el cual se forman rocas ígneas. Si los magmas son más viscosos, es decir, contienen más sílice, la lava emitida será más gruesa, avanzará más lento y recorrerá menos distancia. Por el contrario, si el magma es más fluido o menos viscoso, la lava será más delgada, avanzará más rápido y recorrerá mayores distancias. El avance de las corrientes de lava es lento, alcanzando velocidades de 2 a 3 km/día. La zona de peligro o de exposición de los efectos de la lava son menores que las de los demás procesos. Sin embargo, toda zona afectada por la lava es destruida completamente.

De esta forma, considerando las frecuencias de afectación a la red vial y los efectos en la infraestructura vial de cada uno de los procesos volcánicos se puede concluir que los

lahares son el proceso volcánico crítico o más riesgoso para la infraestructura. Estos son altamente riesgosos, ya que tienen una alta probabilidad de ocurrencia al ocurrir un evento volcánico y pueden causar importantes impactos en la red vial, especialmente en los puentes. Esto se debe a que los lahares transportan una cantidad importante de material y agua a altas velocidades, lo que puede afectar los cauces de los ríos y dañar las cepas, las fundaciones, las pilas, los estribos y la superestructura de los puentes. El colapso o deterioro de los puentes afecta de manera directa la conectividad de la red. Esto se refleja al conocer que, durante los últimos siglos, los lahares han destruido más propiedad pública o privada que cualquier proceso volcánico (Vallance, 2015).

Tabla 4.3. Efectos y componentes de la infraestructura vial afectados ante los distintos procesos volcánicos (Soto y Sjöbohm, 2005)

Proceso volcánico	Elementos afectados	Efectos
Caída de piroclastos	Calzada, puentes	Recubrimiento de ceniza, baja visibilidad de señalización, deterioro o destrucción por impacto.
Flujos piroclásticos	Estructuras de drenaje, taludes, terraplenes, calzada, puentes	Obstrucción de desagües, erosión de taludes y terraplenes, derretimiento de asfalto, obstrucción, deterioro o destrucción de caminos y puentes.
Lahares	Estructuras de drenaje, taludes, terraplenes, calzada, puentes	Destrucción y arrastre, inundación, falla estructural, obstrucción, deterioro o destrucción de caminos y puentes.
Lavas	Calzada, puentes	Obstrucción de caminos, fusión del asfalto, destrucción de puentes.
Deslizamientos y avalanchas volcánicas	Calzada, puentes	Obstrucción de caminos, destrucción de puentes.
Sismos volcánicos	Calzada, taludes, terraplenes, puentes	Fallas en la base de caminos por deslizamiento, obstrucción, deterioro o destrucción de puentes.

4.2.2 Modelo de Riesgos de Lahares para Puentes

La descripción en detalle de la amenaza vulcanológica se encuentra en Dagá (2017), donde se especifica el comportamiento e impactos de los lahares, proceso volcánico crítico para la red vial, la vulnerabilidad de los puentes ante la socavación, y los conceptos básicos asociados a la teoría de confiabilidad y modelación analítica. El principal objetivo de este experimento es obtener las curvas de fragilidad de los elementos críticos de los puentes, definidos anteriormente, ante la acción de lahares de distintas intensidades.

La modelación del riesgo de lahares sobre puentes está definido por las funciones de falla anteriormente entregadas. La función de estado límite definida corresponde a la diferencia entre la función de oferta del puente, dada por el diseño ingenieril ante la socavación, y la demanda del lahar sobre el puente. Ambas funciones dependen a su vez de las variables definidas en el apartado anterior, algunas de las cuales tienen cierta incertidumbre o variabilidad probabilística.

La modelación debe iniciar definiendo de manera definitiva el estado de falla. Asimismo, se deben consolidar las funciones de oferta y demanda definidos. El estado de falla y las funciones de oferta y demanda permiten establecer la función implícita de estado límite ($g(X)=0$). En cuanto a la incertidumbre de las variables básicas (X), ya se explicaron cuáles variables serán consideradas determinísticas y cuáles probabilísticas. Junto con esto, se fijaron funciones de distribución de probabilidad para cada una de las variables estocásticas.

Tal como se señaló, para estimar la probabilidad de falla del puente debido a un lahar de cierta intensidad I_1 , se propone utilizar métodos de solución numérica como es el caso de las simulaciones Monte Carlo. Al realizar las simulaciones de Monte Carlo considerando un lahar de intensidad I_1 y las distribuciones de probabilidades de las variables aleatorias del sistema, descritas entre las variables independientes, se obtendrán distintos valores de la función de estado límite $g(X)$. Si esta función es menor a cero significa que el sistema del puente falla por el lahar de esta intensidad. Al sumar la cantidad de simulaciones en que se

obtuvo un valor menor a cero en esta función y dividir esta cantidad por el número total de simulaciones, se cuantifica la probabilidad de falla del puente debido a un lahar de intensidad I_L . Esto permitirá conocer las coordenadas de un punto de la curva de fragilidad asociada a la abscisa I_L . Este experimento debe ser realizado de manera reiterada para varios niveles de intensidad con el fin de poder tener la curva de fragilidad completa.

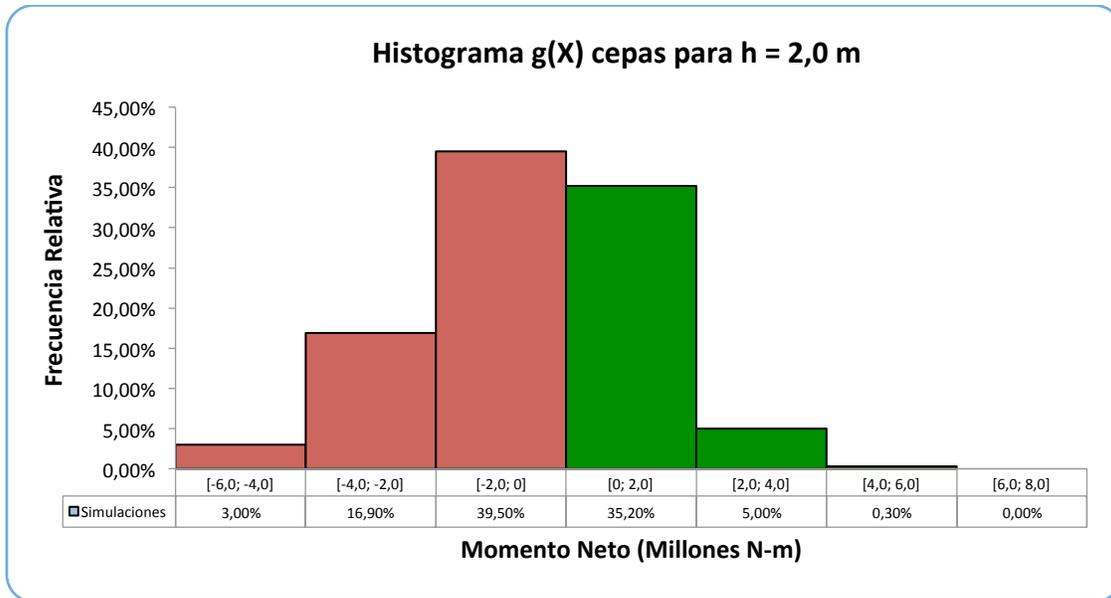


Figura 4.14. Ejemplo de histograma de frecuencias relativas de $g(X)$

4.2.3 Resultados Modelo de Volcamiento de Infraestructura

Siguiendo los pasos establecidos en la sección anterior se pudo obtener la curva de fragilidad del volcamiento de la infraestructura, tanto para el caso de las cepas como de los estribos. Estas curvas de fragilidad se muestran a continuación:

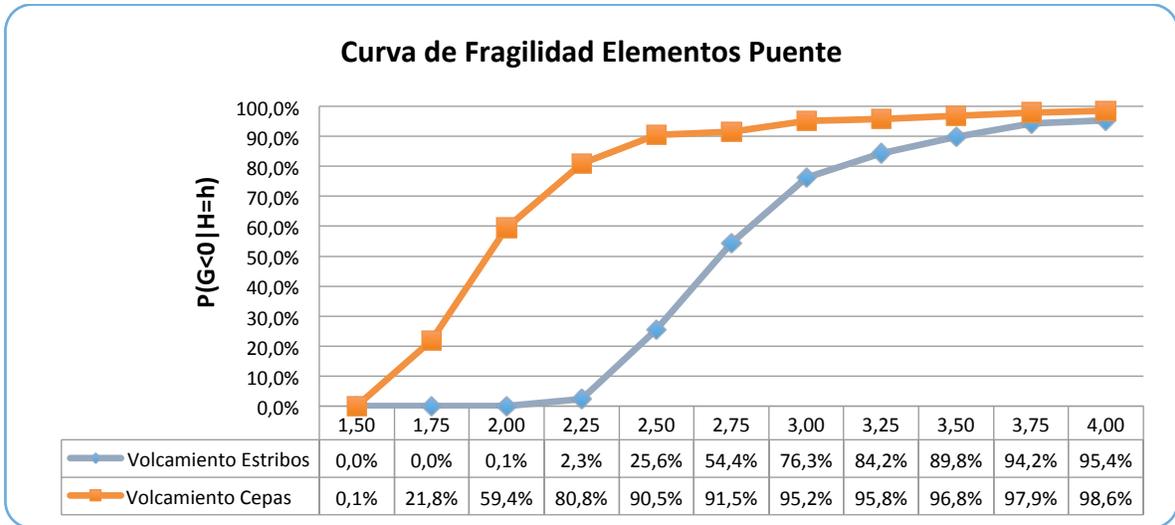


Figura 4.15. Curvas de fragilidad de volcamiento de infraestructura

Asimismo, se generaron gráficos que relacionan el momento neto que actúa sobre la infraestructura y la probabilidad de falla del elemento. Cabe destacar que si se tiene un momento neto negativo significa que el momento volcante es mayor al momento resistente y, por ende, ocurrirá volcamiento.

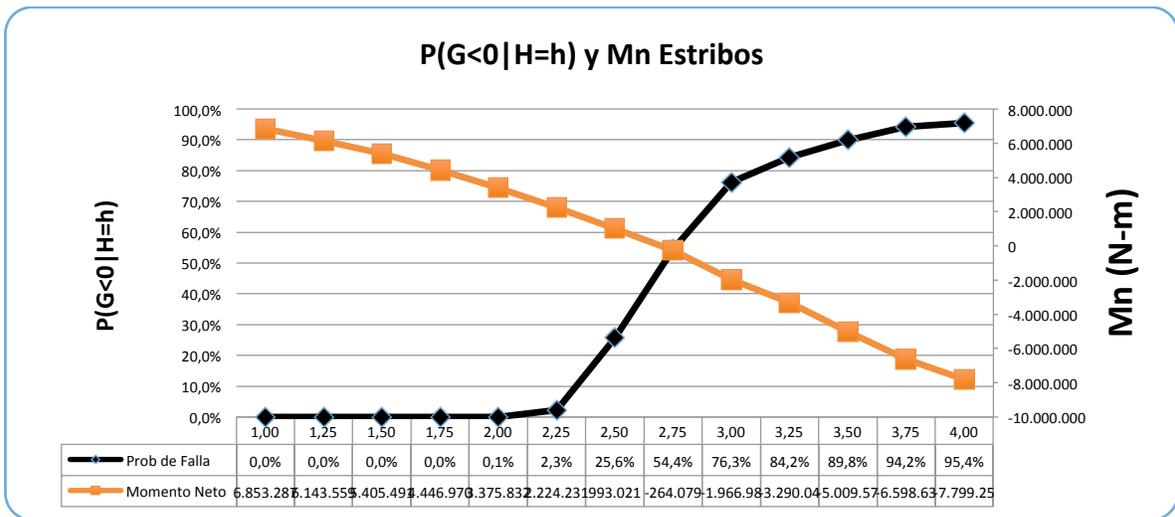


Figura 4.16. Curva de fragilidad y momento neto sobre estribo

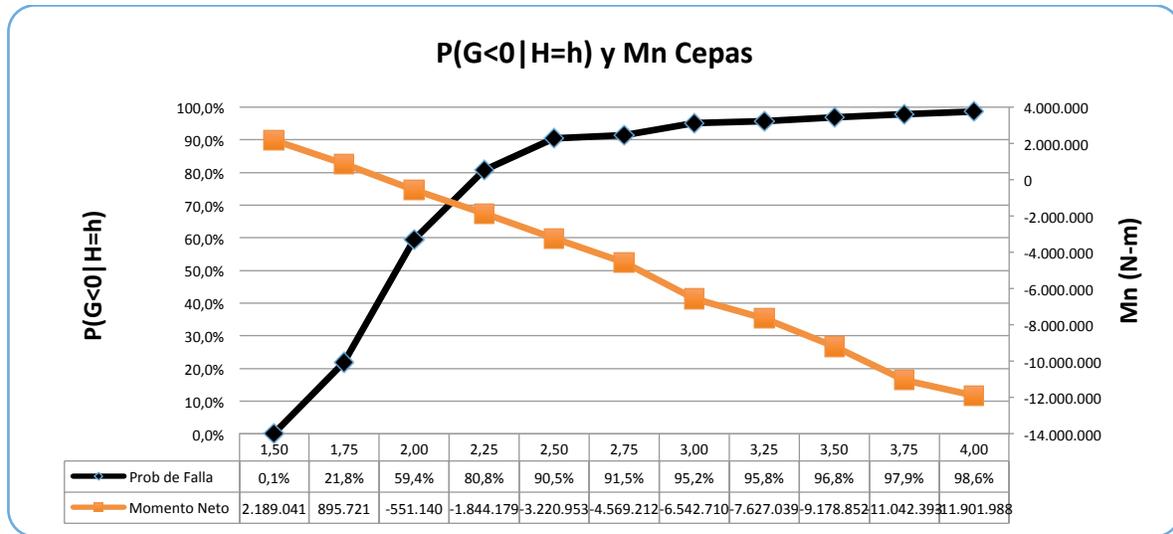


Figura 4.17. Curva de fragilidad y momento neto sobre cepa

Resultados Modelo de Deslizamiento de Tablero

De la misma manera que para el caso anterior, se realizaron simulaciones de Monte Carlo para generar la curva de fragilidad asociada al deslizamiento del tablero del puente, la cual es mostrada a continuación:

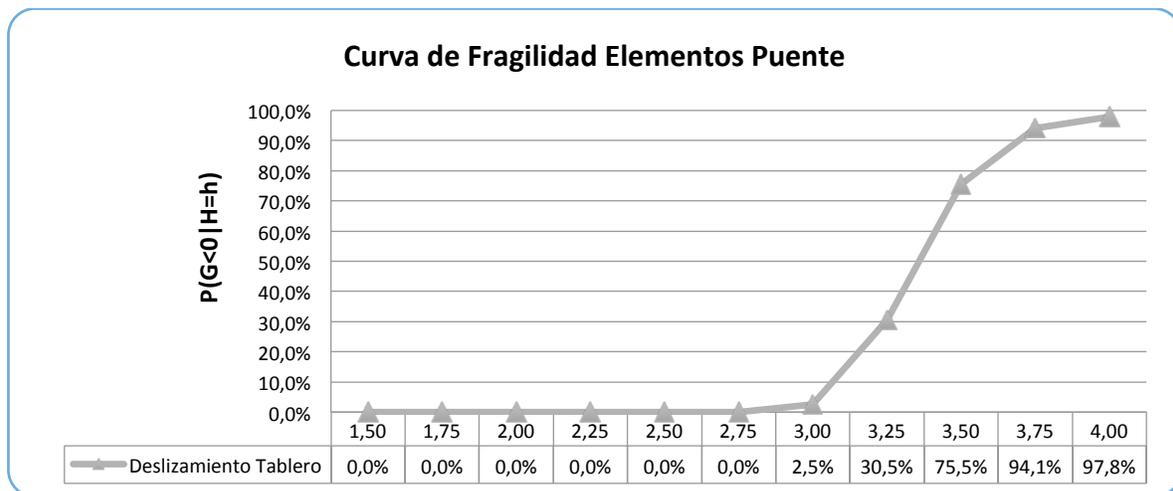


Figura 4.18. Curva de fragilidad de deslizamiento de tablero

Además, también se generaron gráficos que relacionan la fuerza neta que actúa sobre el tablero y la probabilidad de falla del tablero ante el lahar de cierta intensidad. Cabe destacar que si se tiene una fuerza neta negativa significa que la fuerza tangente hidrodinámica es mayor a la fuerza de roce y, por ende, ocurrirá deslizamiento.

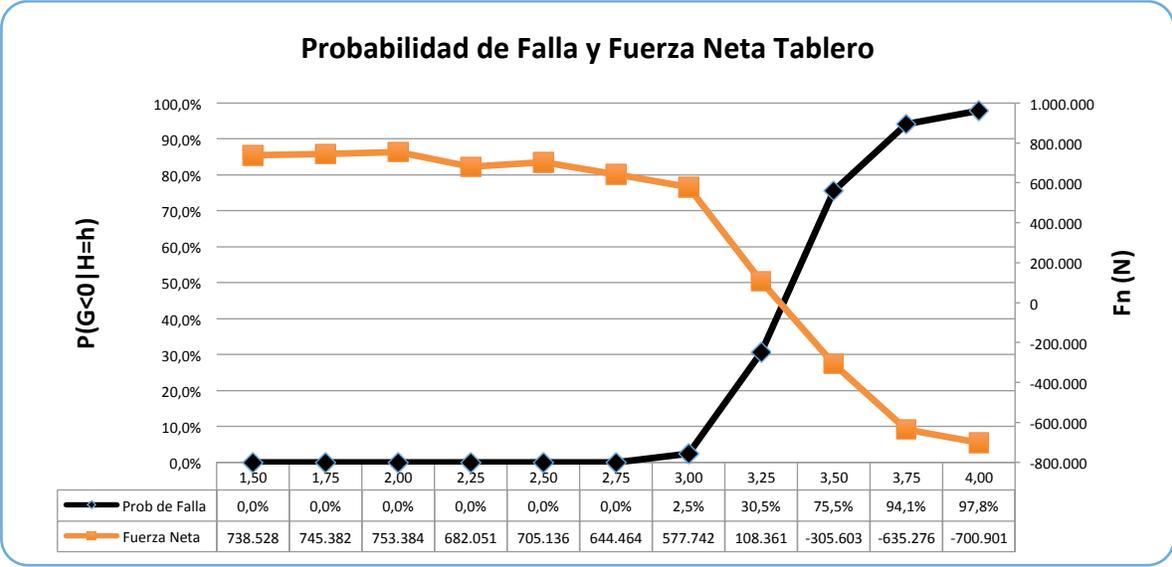


Figura 4.19. Curva de fragilidad y fuerza neta sobre tablero

4.2.4 Categorías de Puentes Modelados

Para poder realizar un análisis de riesgo vulcanológico a nivel macro sobre los puentes de una zona, se hace imperativo definir clases o categorías de puentes. Estas se establecerán según ciertos criterios y rangos de sus parámetros. De no ser así, se tendría que elaborar una curva de fragilidad para cada puente particular, lo que sería engorroso. De esta forma, se tendrá una curva de fragilidad para cada clase de puente, y no para cada puente.

Para esto se definieron dos categorías de puentes. Por un lado se tienen los puentes que no poseen cepas, es decir, que solo poseen estribos como fundación. Esta categoría es denominada C1 y representa el 75% de los puentes del país. Por otro lado, se definió la

categoría C2, la cual representa los puentes con una o más cepas. Los puentes de esta categoría son el 25% de los puentes restantes del inventario nacional de puentes.

Para obtener las curvas de fragilidad de estas dos categorías de puentes se consideró en cada simulación que la falla del puente ocurre cuando al menos uno de sus elementos falla. Por ejemplo, un puente de categoría C1 falla cuando ocurre volcamiento en el estribo o cuando ocurre deslizamiento del tablero.

Estas curvas fueron parametrizadas con el fin de obtener curvas de distribuciones de probabilidad acumulada que se asemejen a las curvas obtenidas por las simulaciones de Monte Carlo. Tras un test de bondad se obtuvo que las distribuciones que mejor se ajustan a las curvas obtenidas por las simulaciones en cada categoría son:

Puentes categoría C1:

$$h_{Falla\ C1} \sim \text{LogNormal}(\mu = 1,00; \sigma = 0,12)$$

$$h_{Falla\ C1} \sim \text{Normal}(\mu = 2,73; \sigma = 0,35)$$

Puentes categoría C2:

$$h_{Falla\ C2} \sim \text{LogNormal}(\mu = 0,66; \sigma = 0,17)$$

$$h_{Falla\ C2} \sim \text{Normal}(\mu = 1,95; \sigma = 0,27)$$

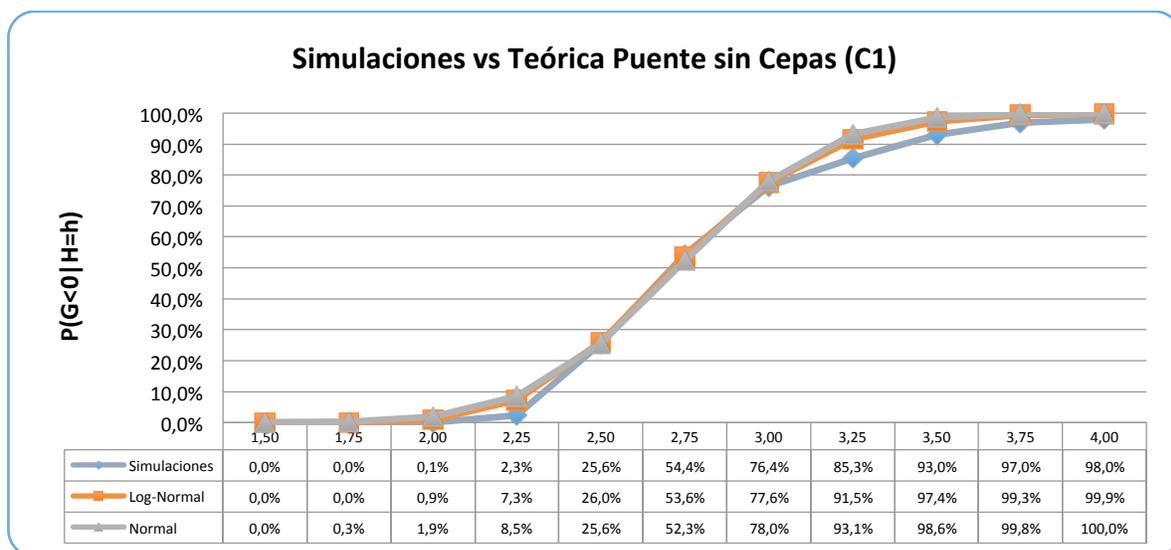


Figura 4.20. Curva de fragilidad de puente categoría C1

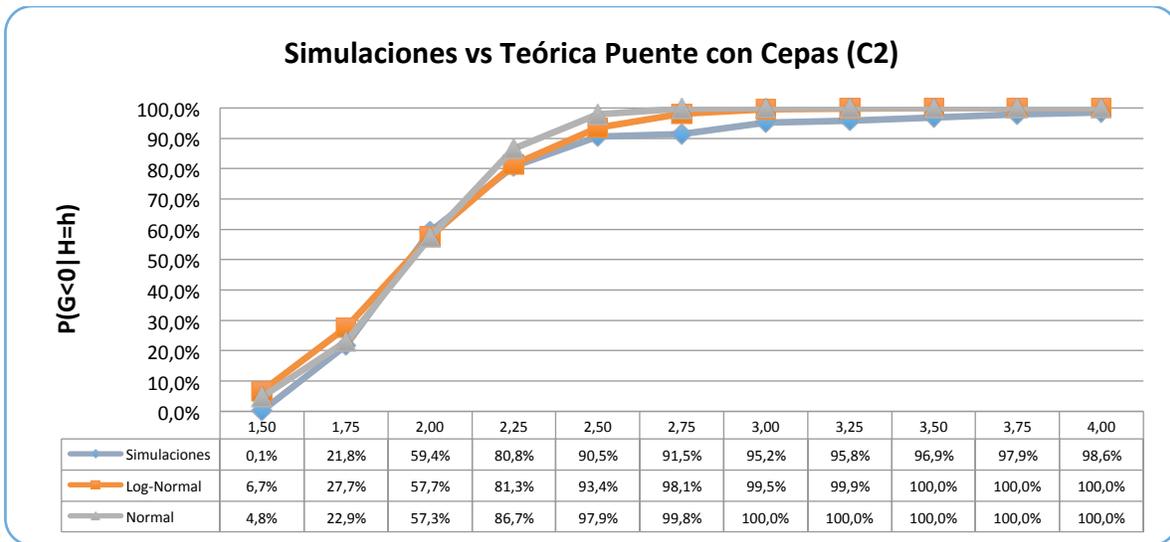


Figura 4.21. Curva de fragilidad de puente categoría C2

4.3 MODELO DE RIESGO HIDROMETEREOLÓGICO

4.3.1 Descripción de los Daños por Inundación

Se considera como inundación fluvial, a aquella que ocurre por el desbordamiento del cauce producto de una crecida. Esta tiene un mayor efecto en la inhabilitación de la plataforma, producto de la acumulación de agua, imposibilitando el tránsito seguro por el segmento de la vía. Una ilustración de inhabilitación de segmento de camino por inundación se aprecia en las Figuras 4.22 y 4.23. En la primera se tiene un corte de la vía por el desborde del río Trabancura, afectado además de la red, varias viviendas, dejando un total de 6.784 personas aisladas. En la segunda imagen se aprecia un detalle de otro camino cortado por efecto inundaciones.

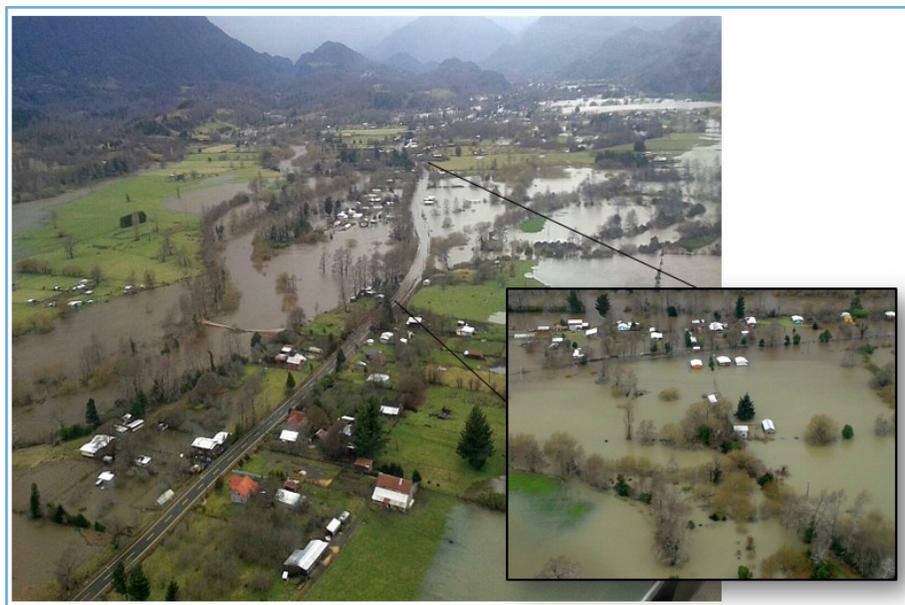


Figura 4.22. Desborde del río Trabancura en Curarrehue, Región de la Araucanía



Figura 4.23. Desborde del Río Queche en Hualaihué, Región de Los Lagos

4.3.2 Mecanismo de Falla

Este mecanismo de falla se enfoca principalmente en el usuario de la red vial, analizando la falla desde el punto de vista de la operación de la plataforma. Se considera que a una cierta

altura, denominada altura de vadeo o *Depth wading*, el vehículo presentara daños mecánicos, lo que imposibilitara la circulación a través del sector inundado (Figura 4.24).

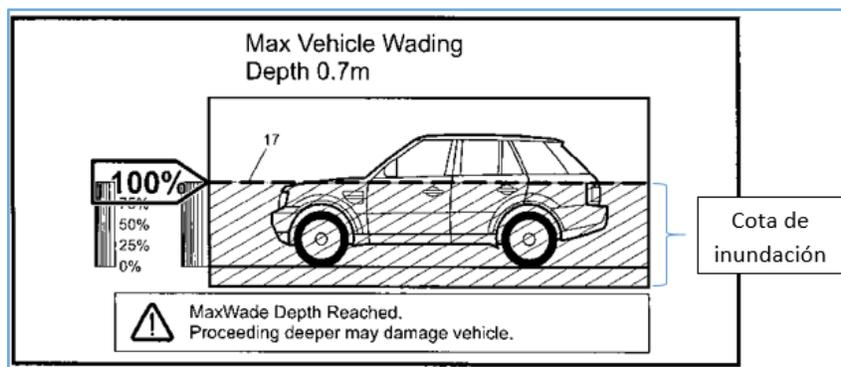


Figura 4.24. Representación de Depth Wading en vehículos livianos (Tran et al, 2011)

Esta altura depende del tipo de vehículo que circula por el segmento de la red. Así entonces, según la composición vehicular, se obtendrá el umbral de aceptación que represente todo el segmento. Para este mecanismo de falla, el vehículo mas afectado es el liviano. Dentro de este segmento, los vehículos tipo a considerar son los automóviles y las camionetas. De este modo, la altura umbral dependerá del tipo de vehículo y por lo tanto es una variable aleatoria que varía entre 40 y 70 cm, de acuerdo a Tran et al (2011).

El mecanismo de falla (Figura 4.24), depende de la altura de la cota de agua en el segmento de análisis y de la altura de la rasante de la plataforma. Por consiguiente, se analiza si esta pasa el nivel de aguas admitido para la circulación vehicular, entonces el camino se denota como en falla. El modelo de inundación permite estimar la altura de agua, de tal manera que es posible determinar de manera aproximada la distribución d probabilidades de la cota de agua utilizando un modelo de inundación simplificado, con el apoyo de modelación 2D usando HEC-RAS.

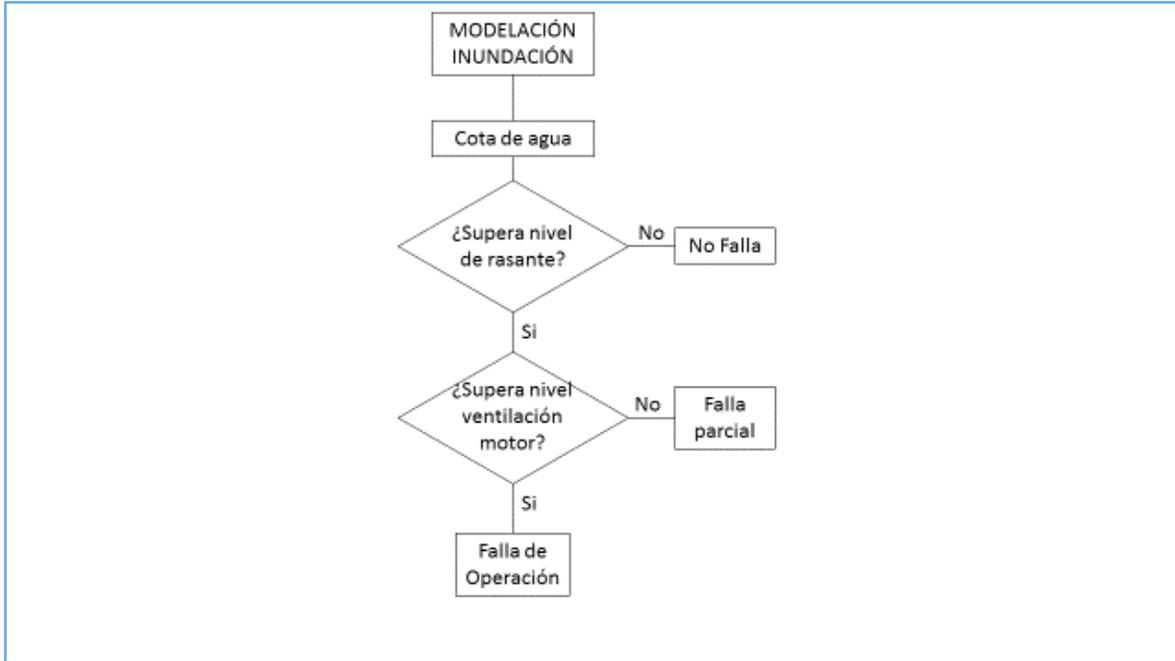


Figura 4.25. Algoritmo de funcionamiento del mecanismo de falla para inundaciones

4.3.3 Función de Estado Límite

La función de estado límite está dada por la diferencia entre la función de oferta o de capacidad del elemento y la función de demanda o de solicitudes. Para el caso de la inundación en plataforma la función de estado limite es similar (Ver Ecuación 4.3).

$$G(x) = h_{wading} - h_{inundación} \quad (4.3)$$

La demanda es la altura de agua producto de la inundación ($h_{inundación}$) y la oferta es la altura de vadeo de un vehículo liviano (h_{wading}). La altura de inundación es una variable aleatoria que depende del hidrograma de crecida, de la morfología del cauce y de su planicie de inundación. La altura de vadeo es una variable aleatoria que depende de la población de vehículos livianos que circulan por los caminos del País. En las secciones siguientes se desarrollan los modelos que permiten obtener las distribuciones de frecuencia de ambas variables.

4.3.4 Estimación de Altura de Inundación

Los antecedentes topográficos, granulométricos e hidrográficos de la zona de estudio son datos de entrada para obtener los parámetros hidráulicos necesarios para estimar profundidad de la inundación. Para estos efectos se debe realizar una modelación numérica bidimensional del fenómeno, empleando para ellos un software como HEC-RAS 2D. Esta modelación permite estimar la distribución de probabilidad de la altura de inundación mediante simulaciones sucesivas, variando los parámetros de intensidad de la crecida para un curso de agua y su planicie de inundación fija. Los datos de entrada para realizar esta modelación son:

- La geometría del cauce, consistente en (Perfiles transversales de la sección del cauce, pendiente longitudinal, longitud del cauce).
- Hidrología, el hidrograma de crecida, que provee el caudal de la crecida, como también el tiempo de duración del evento,
- la rugosidad del cauce, que requiere el uso de modelos complementarios como el método de Cowan (Chow 1959) o datos de la literatura, como por ejemplo Ven Te Chow (1959), en su obra Hidráulica de canales abiertos.

Las características de las variables que describen la función de demanda se resumen en la Tabla 4.4. En ella se muestra por cada dato de entrada, las variables que la describen, la dimensionalidad y su naturaleza (aleatoria o determinística).

Tabla 4.4. Variables de Entrada para Estimar la Altura de Inundación

Clase	Variable	Dimensión	Tipo	Método de Obtención
Geometría	Longitud del Cauce	Longitud	Aleatoria	Terreno o Simulación de Superficie
	Sección Transversal	Cota y posición	Aleatoria	
Hidrología	Información Fluviográfica	Volumen por tiempo	Aleatoria	Reportes del Sistema Nacional de Información de Agua (SNIA)
	Información Pluviométrica	Longitud	Aleatoria	
	Duración del evento	Tiempo	Aleatoria	
Rugosidad	Rugosidad	Adimensional	Aleatoria	Modelo

4.3.5 Estimación de Altura de Vadeo

La función de oferta corresponde a la altura de vadeo. Esta altura corresponde a aquella a la cual el vehículo no puede circular por terrenos inundados. De sobrepasar esa altura, se produce la falla mecánica al alcanzar el agua la altura de ventilación del motor. Por lo anterior, la altura de vadeo depende del tipo de vehículo que circula por el segmento inundado.

Considerando además que dicha altura depende del tipo de vehículo, es posible proponer modelos para tres clases: vehículos livianos (automóviles y camionetas), vehículos pesados (camiones) y buses. Los datos disponibles en Chile acerca del parque vehicular, permiten desarrollar un modelo simplificado para determinar esa altura en términos probabilísticos, para cada clase de vehículo. Eso teniendo en cuenta la gran diversidad de marcas, modelos y versiones de los vehículos que se encuentran disponibles en el mercado nacional.

Tran et al (2011) propone un valor determinista para vehículos livianos que alcanza un valor máximo de 0.7 m. Este valor se puede utilizar como una primera aproximación, pero en un modelo completo es pertinente considerar esta variable como variable aleatoria y elaborar

su distribución de probabilidad empírica y luego traducirla a una distribución analítica para estimar el estado límite.

4.3.6 Daños Ocasionados en Puentes Producto de la Socavación

Las crecidas son eventos de tipo encauzado recurrentes en Chile, alteradas por ciclos de eventos inducidos por los fenómenos del niño y la niña. Se pueden definir como un flujo de agua a gran velocidad, ya sea de manera súbita o paulatina. Afectan principalmente a los elementos que competen a cauces, como puentes y protecciones fluviales. Las crecidas por ser eventos de flujos de agua a gran velocidad, producen fenómenos erosivos en cepas y estribos de puentes, los cuales pueden provocar su colapso. Las Figuras 4.26 y 4.27 ilustran el caso de daños producidos por socavación en cepas y estribos.



Figura 4.26. Falla en la cepa N°1 del puente Nuevo de Naltahua sobre el Río Maipo, Región Metropolitana



Figura 4.27. Socavación en estribo de puente sobre Río Aragua en Venezuela

4.3.7 Mecanismo de Falla

En estados Unidos la socavación causa el 60 % de las fallas de puentes (Landers, 1992), Este es un fenómeno producido por un desequilibrio localizado entre la tasa a la cual el sedimento es arrastrado por la corriente fuera de una determinada zona del lecho y la tasa de sedimento alimentada hacia ella. El resultado es una profundización local del lecho, bajo la forma de una fosa o cavidad en el entorno de la estructura.

Este proceso tiene a alcanzad una condición de régimen o de estabilización. Es esta condición la que interesa principalmente cuantificar, puesto que puede llegar a afectar la capacidad de las fundaciones para soportar las cargas vivas y muertas del puente, y causar un posible colapso (MOP, 2016). Los tipos de socavaciones que pueden ocurrir en puentes se describen en la Tabla 4.5 y en la Figura 4.27.

Tabla 4.5. Tipos de socavación en puentes (IIHR, 2006)

Tipo de socavación	Definición
Socavación total	Se refiere a la profundidad de socavación total en las fundaciones del puente. Incluyendo la socavación general.
Socavación general	<p>Ocurre sin importar la existencia de puentes. Incluye socavación a corto y largo plazo.</p> <p>La socavación a largo plazo corresponde a la degradación progresiva del lecho en una escala de tiempo de varios años.</p> <p>La socavación a corto plazo corresponde a inundaciones estrechamente espaciadas, confluencias de escurrimientos o cambios en el cauce.</p>
Socavación localizada	Es la que puede ser directamente atribuida la existencia del puente, incluye la socavación por contracción y la de carácter local.
Socavación por contracción	Producida por el aumento de velocidad del escurrimiento, debido al estrechamiento producido por la existencia del puente. Se debe a un aumento en la tensión de corte en el lecho. (Maddison, 2012)
Socavación local	Corresponde a la remoción del material alrededor de cepas, fundaciones, estribos y terraplenes. Este tipo de socavación es causado por una aceleración del flujo al pasar un obstáculo, generándose un flujo turbulento y vórtices (Kattel y Eriksson, 1998)

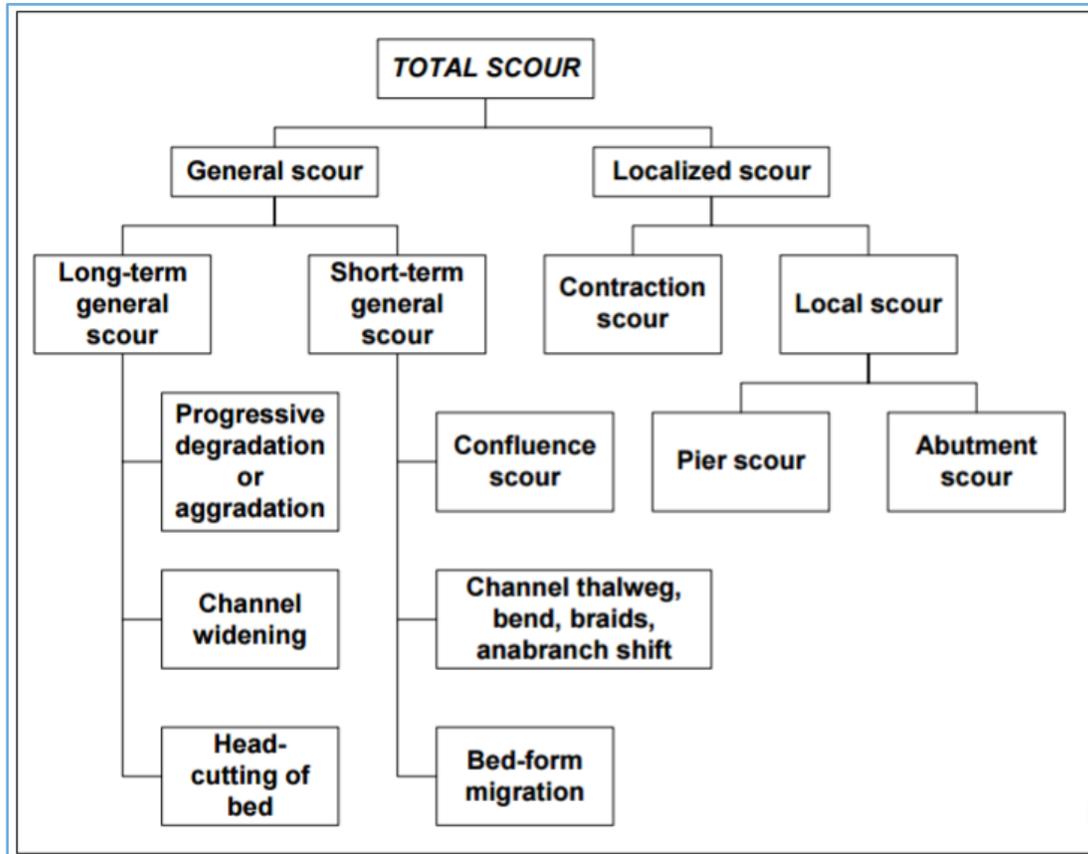


Figura 4.28. Tipos de socavación en puentes (IIHR, 2006)

En un puente pueden ocurrir simultáneamente todos los tipos de socavación de la Figura 4.28. El tipo de socavación que potencialmente produce más daño es la socavación local. Esta afecta esencialmente a cepas y estribos, como se aprecia en la Figura 4.29. Las cepas se ven afectadas por el fenómeno de socavación local, y los estribos por socavación por contracción.

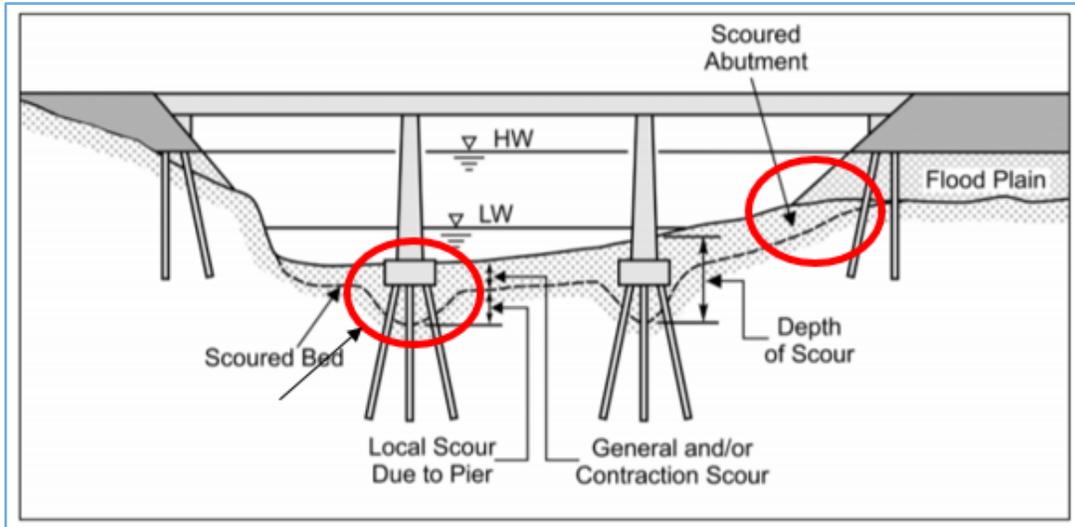


Figura 4.29. Representación gráfica de los tipos de socavación en estribos y cepas (IIHR, 2006)

La socavación en cepas y estribos se ilustran en las Figuras 4.30 y 4.31 respectivamente. Este mecanismo consiste en relaciona la profundidad de la socavación producida por crecida y la profundidad para la cual el puente fue diseñado. Particularmente, en Chile se diseñan puentes hidráulicamente para crecidas con periodo de retorno de 100 años, según el Manual de Carreteras (MOP, 2016).

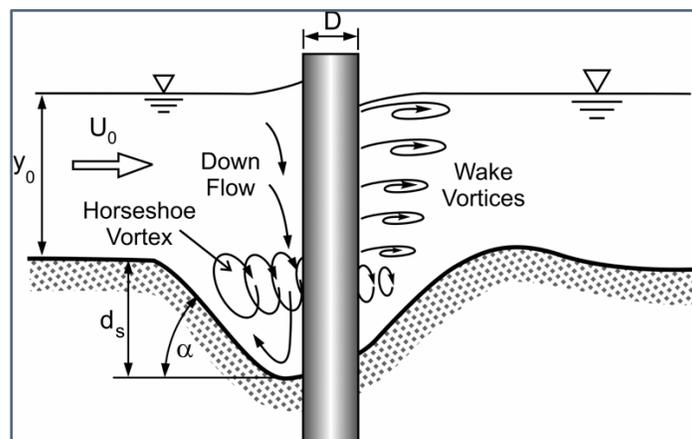


Figura 4.30. Representación gráfica de socavación en cepas (IIHR, 2006)

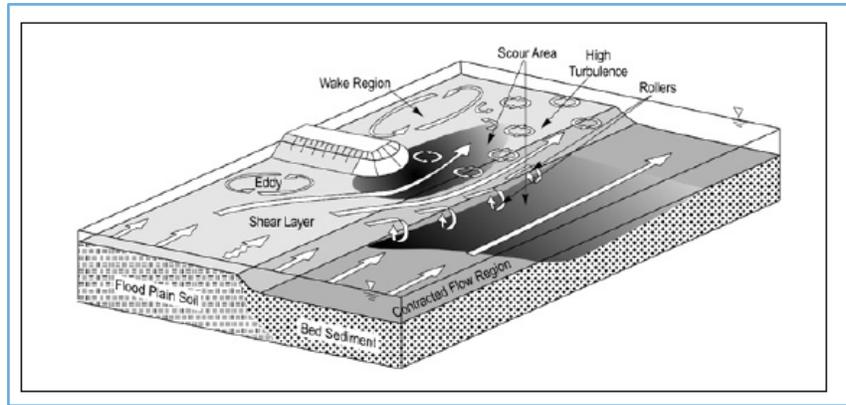


Figura 4.31. Representación gráfica de socavación en estribos (NCHRP, 2010b)

De este modo, el mecanismo de falla se queda representado por la Figura 4.32. Se asume que un puente falla si uno o ambos modos de falla se activan. La falla se produce cuando el nivel de socavación potencial es superior a la socavación de diseño.

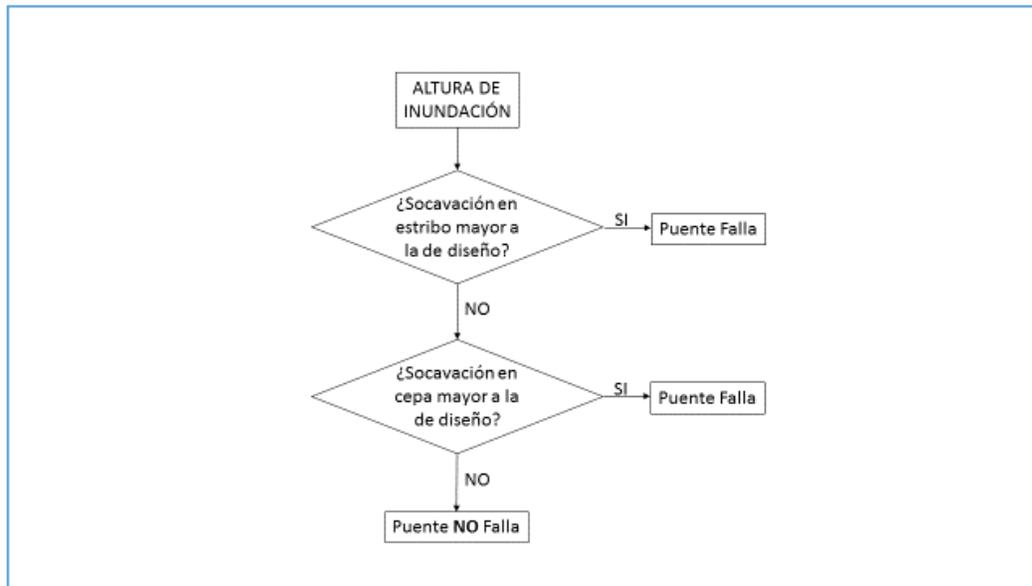


Figura 4.32. Funcionamiento del mecanismo de falla en puentes

4.3.8 Función de Estado Límite

Al igual que en el caso de vadeo, la función de estado límite representa el punto de falla, representado por la diferencia entre la profundidad de socavación de diseño ($S_{\text{diseño}}$) y la profundidad de socavación efectiva ($S_{\text{solicitud}}$), como lo muestra la Ecuación 4.4. Esta función de estado límite es válida tanto para la socavación en cepas como en estribos.

$$G(x) = S_{\text{diseño}} - S_{\text{solicitud}} \quad (4.4)$$

A continuación se presentan los desarrollos analíticos que permiten estimar las componentes de la función de falla descrita por la Ecuación 4.4.

4.3.9 Resultados

A partir de las funciones de estado límite se obtienen las curvas de fragilidad para socavación en cepas, del puente Trabuncura, sobre el río Perquilauquén, como se muestra en la Figura 4.33 y para socavación en estribos (Figura 4.34).

Para la socavación en cepas, es posible observar que, para una pendiente media ponderada de cauce mayor, la falla por socavación sucede para crecidas menores, y además que para un cauce como el considerado en el caso de estudio, crecidas sobre 4 metros, en el caso de una pendiente baja, y sobre 2 metros, para una pendiente mayor, aumentan exponencialmente el riesgo de socavación.

De la Figura 4.33 es posible inferir la incidencia de la pendiente media ponderada del cauce en la socavación en cepas, pues se observa que, para una altura de 3 metros de agua en el canal, la probabilidad de falla para una pendiente de un 1% es cercana a 0. Mientras que, para la misma sección transversal y la misma crecida del río, pero con una pendiente de 5%, la probabilidad de falla se encuentra cercana al 95%.

A pesar de ser una curva para un curso de agua en particular, es posible generalizar que los puentes ubicados en sectores con pendientes medias elevadas, están expuestos a mayores probabilidades de socavación en cepas, debido a la velocidad que puede alcanzar la crecida.

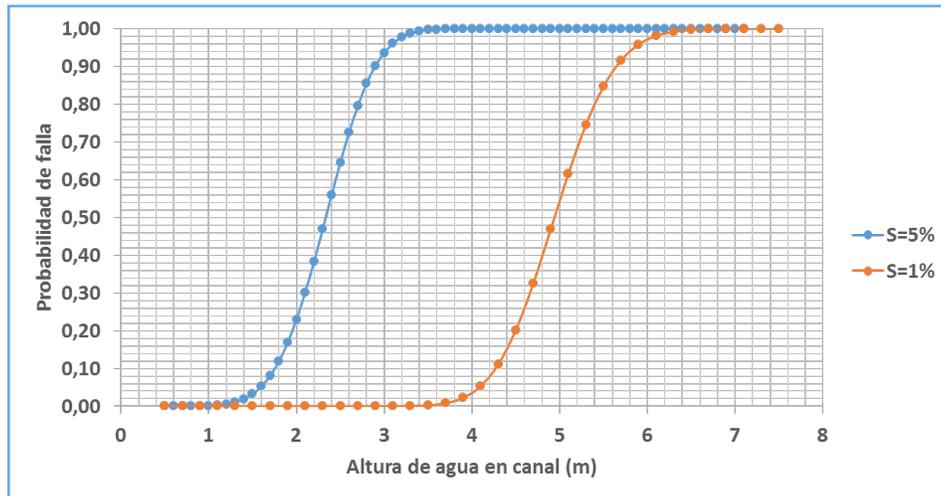


Figura 4.33. Curvas de fragilidad para socavación en cepas

En el caso de socavación en estribos (Figura 4.34), la probabilidad de falla en pendientes comienza a subir para crecidas desde 0,5 metros en adelante. Los extremos de la curva de fragilidad se comportan mal, debido en parte a la distribución beta utilizada para el caudal específico, pues esta no muestra los extremos de los datos, y además por la poca densidad de datos para alturas bajas.

La curva correspondiente a la pendiente del 1% posee los mismos problemas mencionados para la curva de pendiente 5%, pero los resultados entregados no tenían sentido físico alguno, por lo que se está trabajando, utilizando distribuciones distintas a la beta, pero que se ajusten de buena forma a los datos, con el objetivo de mejorar esta curva de fragilidad.

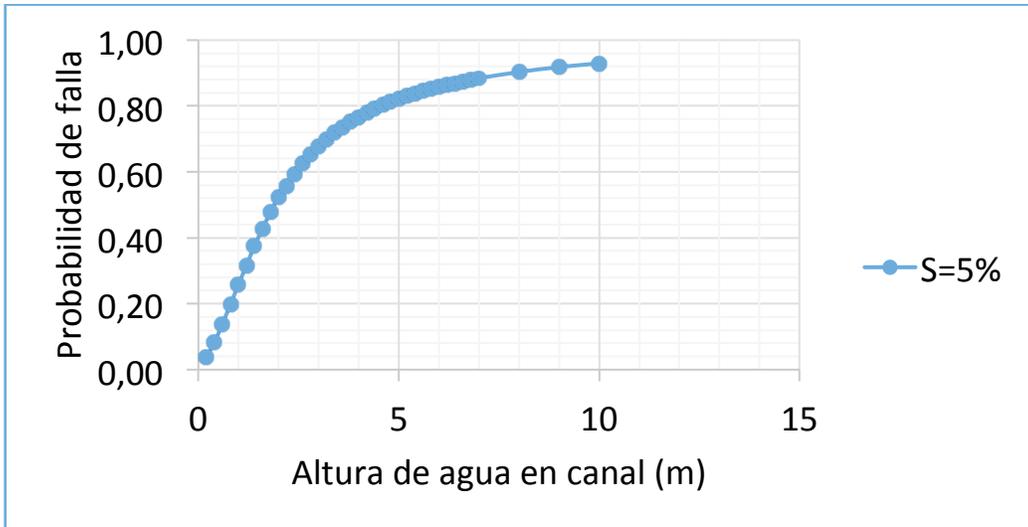


Figura 4.34. Curva de fragilidad para socavación en estribos

5

MODELOS DE MITIGACIÓN DE EVENTOS SÍSMICOS, VOLCÁNICOS E HIDROMETEOROLÓGICOS SOBRE PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA RED VIAL



PROYECTO FONDEF ID14I10309

“Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional”

5. MODELOS DE MITIGACIÓN DE EVENTOS SÍSMICOS, VOLCÁNICOS E HIDROMETEOROLÓGICOS SOBRE PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA RED VIAL

El modelo general de mitigación consta de los siguientes componentes, cuya interacción se muestra en la Figura 5.1. Posteriormente se desarrolla cada uno de ellos.

- a) Módulo de daño potencial, en el cual se determina el nivel de daño potencial en términos del número de pistas afectadas, de la longitud afectada y de la magnitud de dicho daño.
- b) Módulo de estándares, en términos de las estrategias, operaciones y partidas de obra técnicamente factibles, caracterizadas por su curva de restauración.
- c) Módulo de cálculo de curvas de restauración, en términos del nivel de servicio (NS) y del tiempo de recuperación.
- d) Módulo de selección técnica de estándares y estrategias, en términos de las que efectivamente incrementan la resiliencia en función del daño.
- e) Módulo de evaluación socio-económica en términos de la estimación de la rentabilidad social de las estrategias a aplicar y su efecto en la reducción de la resiliencia

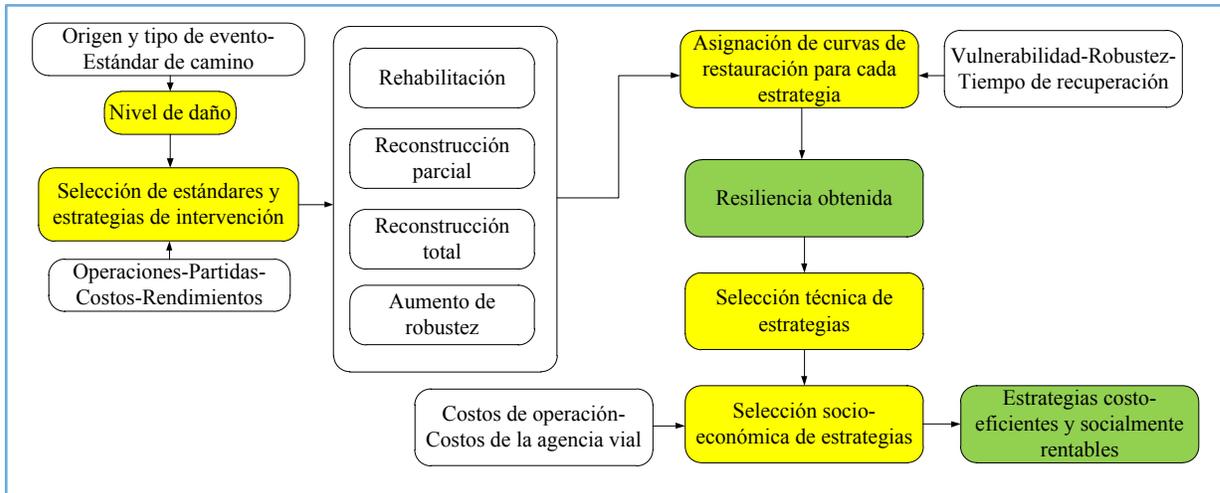


Figura 5.1. Esquema de los componentes del modelo de mitigación

5.1 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE DAÑO

Un evento de determinadas características y magnitud induce dos efectos sobre la infraestructura, los cuales dependen de su condición y del tipo de vía (bidireccional o multi pista): efectos físicos que involucran daños en los elementos que componen la calzada y en un número determinado de pistas y efectos sobre la operación, disminuyendo el NS a través de la restricción de velocidad, restricción de paso y generación de colas.

El nivel de daño se determina mediante la cubicación de los elementos dañados y de la medición del tramo total afectado, identificando en una primera instancia tres niveles: (a) daño leve que requiere principalmente extraer residuos de la calzada; (b) daño medio que requiere reconstruir parcialmente algunos elementos específicos; y (c), daño alto, que requiere la reconstrucción total de la calzada. Esta forma de cuantificar los daños permite estimar la duración de los trabajos para cada estrategia en evaluación y conocer el costo de cada una de ellas.

5.2 FORMULACIÓN DE ESTÁNDARES DE MITIGACIÓN

5.2.1 Estándar de Mitigación

Un estándar de mitigación es aquel nivel de intervención sobre un camino que persigue recuperar o mejorar su NS después de un evento natural que causa una interrupción total o parcial del tránsito. Está asociado a la magnitud de los trabajos a realizar dada la severidad del daño ocasionado por un evento natural determinado.

Tabla 5.1. Definición de estándares de medidas de mitigación

Estándares de mitigación	Descripción
Rehabilitación (reactivo)	Intervenciones destinadas a rehabilitar el tránsito del camino, pero no necesariamente la serviciabilidad de la infraestructura, mediante la remoción de materiales que obstaculizan el paso de vehículos y el libre escurrimiento de las aguas, como material producto de eventos con desprendimientos de taludes. Las medidas corresponden principalmente a operaciones de despeje.
Reconstrucción parcial /Reconstrucción total (reactivo)	Intervenciones destinadas a devolver a la obra deteriorada la condición inicial mediante técnicas que impliquen la renovación parcial o total del camino o de sus elementos existentes y se encuentren inutilizados o hayan sido destruidos, de manera que cumplan con los objetivos para los cuales fueron instalados. Reconstrucción parcial involucra actividades con daño medio (por ejemplo, destrucción de una pista en un camino bidireccional) y reconstrucción total con pérdida total de la infraestructura.
Aumento de robustez (preventivo o reactivo)	Intervenciones destinadas a reducir la pérdida de NS ante la ocurrencia de un evento, mediante obras que aumenten la robustez de la infraestructura (por ejemplo, revestimiento de talud, muros de contención, levantamiento de rasante, etc.). Los proyectos pueden incluir una mejora en el NS con respecto al inicial (por ejemplo, aumento del número de pistas).

Estos cuatro estándares pueden dar lugar a una ampliación de la clasificación dependiendo las características que se le asignen. Por ejemplo, la aplicación temporal

puede calificar el aumento de robustez como una mitigación si es antes del evento o bien como una acción en respuesta con consecuencias de disminución de vulnerabilidad. A su vez la reconstrucción parcial y total pueden ir con aumento de la robustez, aprovechando las consecuencias del evento para mejorar la futura respuesta de la infraestructura. Por lo tanto, si bien estos estándares cubren la generalidad de los casos, son las condiciones específicas de cada evento y los objetivos de cada proyecto los que determinarán sus configuraciones.

Es posible relacionar el daño sobre la infraestructura física con la pérdida de capacidad y NS que sufre el camino en estudio y por ende con la necesidad de un estándar de mitigación u otro. La decisión de optar por un estándar de aumento de robustez se independiza de la magnitud de daño, apuntando a un plan con objetivos de reducción de vulnerabilidad futura. Por lo tanto, es posible optar por este en cualquier nivel de daño y caída en el NS.

La Tabla 5.2 muestra la relación nivel de daño-degradación física-impacto sobre la capacidad y NS para un camino bidireccional y la Tabla 5.3 para un camino multi pista.

Tabla 5.2. Degradación física de la infraestructura en caminos bidireccionales

Nivel de Daño	Degradación Física	Impacto sobre la capacidad y NS
Leve	 <p data-bbox="440 642 716 667">Fuente: losandres.com.ar</p>	<p data-bbox="857 411 1377 590">Evento de baja magnitud. Demanda actividades de recuperación de transitabilidad. La pérdida de capacidad se ve afectada por las pistas afectadas. Si bien la caída de NS puede ser importante, la recuperación es rápida.</p>
Medio	 <p data-bbox="440 963 643 989">Fuente: Egon Wolf</p>	<p data-bbox="857 711 1377 1035">Evento de mediana magnitud que puede tener consecuencias importantes sobre la infraestructura, demanda actividades de reconstrucción parcial. Se asocia a una pérdida de capacidad del 50%, cuya operación se realiza en una pista con restricción de paso. La pérdida de NS es considerable debido a la disminución de la velocidad promedio de viaje y la generación de colas.</p>

Nivel de Daño	Degradación Física	Impacto sobre la capacidad y NS
Alto	 <p data-bbox="440 1533 643 1558">Fuente: Egon Wolf</p>	<p data-bbox="857 1260 1377 1514">Evento de gran magnitud con consecuencias de pérdida total de la infraestructura, demanda actividades de reconstrucción total. La pérdida de capacidad y NS es total y por un periodo de tiempo prolongado. El impacto depende de la existencia de rutas alternativas y sus restricciones de operación.</p>

Tabla 5.3. Degradación física de la infraestructura en caminos multi pista

Nivel de Daño	Degradación Física	Impacto sobre la capacidad y NS
Leve	 <p data-bbox="451 611 727 642">Fuente: www.laregion.es</p>	<p data-bbox="865 338 1378 625">Evento de baja magnitud. Demanda actividades de recuperación de transitabilidad. La pérdida de capacidad se ve afectada por el número de pistas que posee cada sentido y cuales se ven afectadas. La recuperación es rápida y por tanto el impacto no afecta de mayor manera la normal operación de la vía.</p>
Medio	 <p data-bbox="451 978 659 1010">Fuente: Egon Wolf</p>	<p data-bbox="865 684 1378 972">Evento de mediana magnitud puede tener consecuencias importantes sobre la infraestructura, demanda actividades de reconstrucción parcial. Se asocia a una pérdida de capacidad del 50%. Sin embargo, es posible configurar las pistas sobrantes como flujo bidireccional, mitigando el impacto sobre las condiciones de operación.</p>
Alto	 <p data-bbox="451 1325 659 1356">Fuente: Egon Wolf</p>	<p data-bbox="865 1052 1378 1297">Evento de gran magnitud con consecuencias de pérdida total de la infraestructura. Demanda actividades de reconstrucción total. La pérdida de NS es total y por un periodo de tiempo prolongado. El impacto depende de la existencia de rutas alternativas y sus restricciones de operación.</p>

5.2.2 Estrategias de Intervención

Una estrategia de intervención corresponde a un conjunto de operaciones realizadas con el fin de otorgar a la infraestructura la recuperación o mitigación de las consecuencias generadas por un evento determinado. Por lo tanto, está directamente asociada con un estándar de mitigación y busca solucionar un problema concreto, ya sea de recuperación de transitabilidad, recuperación de NS, aumento de estándar o

aumento de robustez, los cuales consideran una cantidad de operaciones, costos y tiempos de ejecución determinados.

El proceso de decisión de una estrategia de intervención no depende solo del estándar de mitigación asociado, sino que también del origen y características del evento y del tipo de camino al que afecta. La secuencia de caracterización de emergencias viales que se muestra en la Figura 5.2 es una adaptación de la propuesta por Mora (2016).

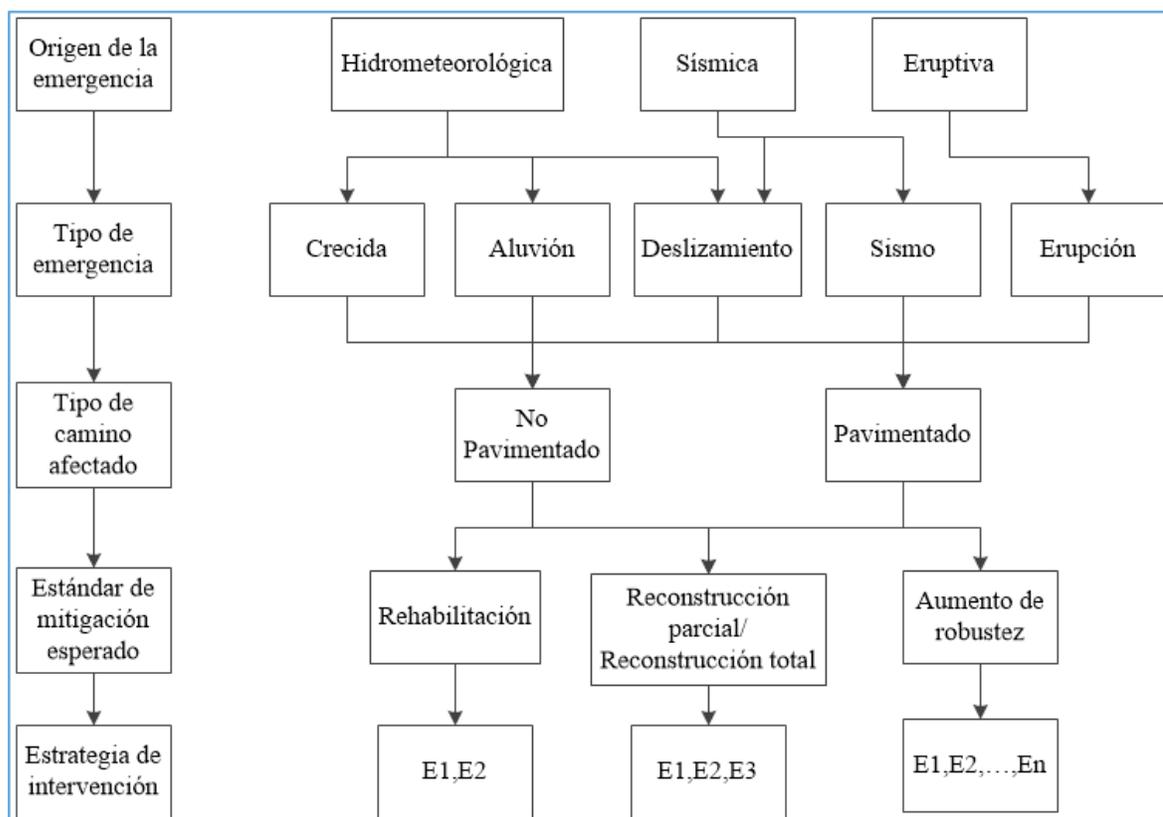


Figura 5.2. Secuencia de caracterización de emergencias viales adaptada de Mora (2016)

A partir de la secuencia de caracterización de emergencias viales se proponen 38 combinaciones que involucra el origen y tipo de emergencia, el tipo de camino y el estándar de medida de mitigación esperado que servirán de condiciones antecedentes de elección de las estrategias de intervención.

5.2.3 Operaciones de Mantenimiento Asociadas a cada Estándar y Estrategia de Intervención

Cada estándar de mitigación tiene un conjunto de estrategias de intervención formuladas con el fin de dar solución a un problema particular. Las estrategias a su vez están compuestas por un número de operaciones necesarias para la solución y dependiendo de la complejidad de estas operaciones pueden requerir un número determinado de partidas para realizarlas. La Figura 5.3 muestra el proceso secuencial de asignación de operaciones y partidas para cada estrategia de intervención, el cual define la configuración de entrada para elaborar las curvas de restauración.

Mora (2016) identificó 107 operaciones en los registros del MOP (2003, 2005 y 2009) que, combinadas, definen las estrategias de intervención. Con el fin de clasificar de manera más eficiente las operaciones para cada estrategia de intervención, se cotejaron los registros digitalizados por Mora (2016) con las operaciones de mantenimiento del Volumen 7 del Manual de Carreteras (MOP, 2016), diferenciando la operación de las partidas que la componen.

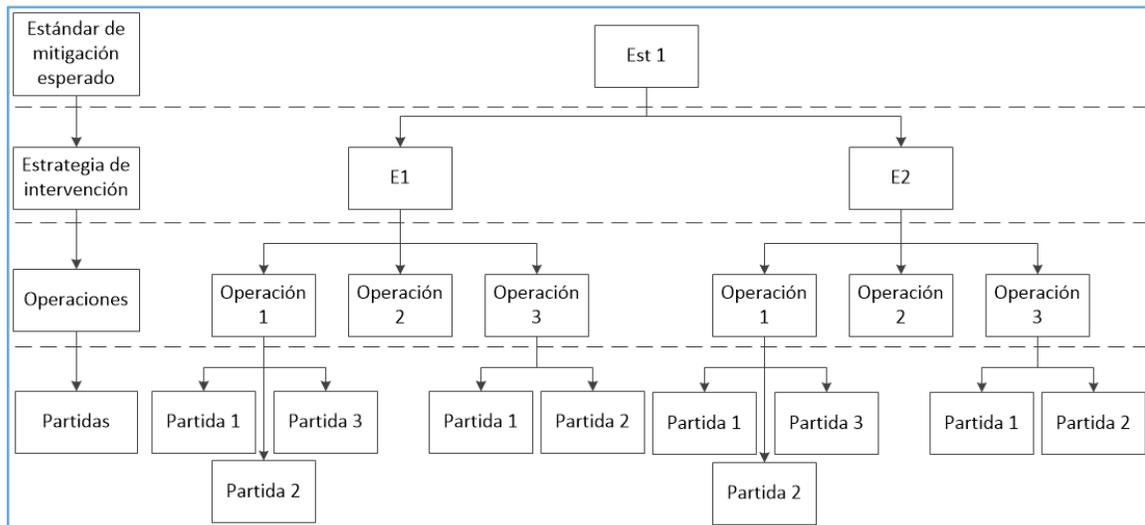


Figura 5.3. Elementos constitutivos de un estándar de mitigación

En total son 32 operaciones que se identificaron como potenciales para conformar estrategias de intervención y 71 partidas que conforman cada una de estas operaciones. El detalle técnico de aplicación de las operaciones y partidas se encuentra especificado en el Manual de Carreteras Volumen 7 (MOP,2016).

La cantidad de operaciones y las partidas involucradas necesarias para configurar una estrategia de intervención determinada dependen directamente de las características del evento ocurrido o del que probablemente ocurrirá, es decir, del escenario en el cual se están evaluando las estrategias de intervención y de las condiciones que presenta la infraestructura al momento de ocurrir la emergencia vial.

5.2.4 Estrategias de Intervención para cada Estándar de Mitigación

Las estrategias de intervención que a continuación se presentan abarcan el máximo posible de escenarios. Es decir, considera las posibles consecuencias de un evento natural sobre la infraestructura. Por ejemplo, para un evento de crecida en un camino no pavimentado y un estándar de mitigación de reconstrucción parcial se considera la necesidad de hacer un reperfilado de talud, reparaciones de infraestructura de hormigón como obras de arte, reconstrucción de fosos y contrafosos, conservación de alcantarillas, reperfilado de la calzada y reparación de áreas inestables, reparación de las bermas, posible reposición de barreras de contención y de existir puentes, reparación de su superestructura e infraestructura.

Sin embargo, la cantidad de operaciones dependerá de la magnitud del evento, de la existencia de los elementos a los que apunta cada operación y la vulnerabilidad de cada uno de ellos. Es por esto que al momento de elaborar la estrategia de intervención se debe seleccionar solo las operaciones necesarias para el caso en evaluación. La Tabla 5.4 a Tabla 5.7 resumen las estrategias asociadas a cada estándar de mitigación.

Tabla 5.4. Estrategias de intervención asociadas a un estándar de rehabilitación

Configuración	Origen de la emergencia	Emergencia	Nivel de estándar de camino	Remoción de suelos que obstruyen la calzada	Descarga de muros	Limpieza de drenaje	Reparación de barreras metálicas
1	Eruptiva	Erupción	No Pavimentado	X		X	
3	Eruptiva	Erupción	Pavimentado	X		X	
5	Sísmica	Deslizamiento	No Pavimentado	X	X	X	X
9	Sísmica	Deslizamiento	Pavimentado	X	X	X	X
13	Sísmica	Sismo	No Pavimentado	X	X	X	X
17	Sísmica	Sismo	Pavimentado	X	X	X	X
21	Hidrometeorológica	Crecida	No Pavimentado	X		X	X
25	Hidrometeorológica	Crecida	Pavimentado	X		X	X
29	Hidrometeorológica	Deslizamiento	No Pavimentado	X	X	X	X
33	Hidrometeorológica	Deslizamiento	Pavimentado	X	X	X	X

Tabla 5.5. Estrategias de intervención asociadas a un estándar de reconstrucción parcial

Configuración	Origen de la emergencia	Emergencia	Nivel de Estándar de camino	Reperfilado de taludes	Drenes de pavimento	Reconstrucción de cunetas revestidas	Reconstrucción de descargas de agua	Reemplazo y colocación de soleras	Reconstrucción de cunetas no revestidas	Hormigón estructural	Rec. de fosos y contrafosos no revestidos	Conservación de alcantarillas	Reperfilado de la calzada	Reparación de áreas inestables	Recebo de capas de rodadura y bermas	Reparación de elementos de apoyo	Reparación de superestructura de madera	Reparación de infraestructura de madera	Colocación de barreras metálicas de protección	Renovación de losas de hormigón	Reparación de pavimentos
6	Sísmica	Deslizamiento	No Pavimentado	X						X	X		X	X	X		X	X	X		
10	Sísmica	Deslizamiento	Pavimentado	X	X	X	X	X	X	X	X					X			X	X	X
14	Sísmica	Sismo	No Pavimentado	X						X	X		X	X	X		X	X	X		
18	Sísmica	Sismo	Pavimentado	X	X	X	X	X	X	X	X					X			X	X	X
22	HM1	Crecida	No Pavimentado	X						X	X	X	X	X	X		X	X	X		
26	HM	Crecida	Pavimentado	X	X	X	X		X	X	X	X				X			X		
30	HM	Deslizamiento	No Pavimentado	X						X	X	X	X	X	X		X	X	X		
34	HM	Deslizamiento	Pavimentado	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X			X	X	X

(¹): Hidrometeorológica

Tabla 5.6. Estrategias de intervención asociadas a un estándar de reconstrucción total

Configuración	Origen de la emergencia	Emergencia	Nivel de Estándar Camino	Reconstrucción de la plataforma	Reconstrucción total de puentes de madera
2	Eruptiva	Erupción	No Pavimentado	X	X
4	Eruptiva	Erupción	Pavimentado		
7	Sísmica	Deslizamiento	No Pavimentado	X	X
11	Sísmica	Deslizamiento	Pavimentado		
15	Sísmica	Sismo	No Pavimentado	X	X
19	Sísmica	Sismo	Pavimentado		
23	Hidrometereológica	Crecida	No Pavimentado	X	X
27	Hidrometereológica	Crecida	Pavimentado		
31	Hidrometereológica	Deslizamiento	No Pavimentado	X	X
35	Hidrometereológica	Deslizamiento	Pavimentado		
37	Hidrometereológica	Aluvión	No Pavimentado	X	X
38	Hidrometereológica	Aluvión	Pavimentado	X	X

5.3 ELABORACIÓN DE CURVAS DE RESTAURACIÓN

Elaborar las curvas de restauración involucra: estimar la pérdida de NS producto del evento natural a través de la modelación de las condiciones de operación pre y post-evento, estimar el NS final cuando se implementan mejoras, y estimar el tiempo de restauración que tomarán los trabajos en alcanzar el NS deseado. Por lo tanto, la elaboración de las curvas de restauración tiene tres etapas claramente definidas: (a) estimación de las condiciones de la infraestructura y operación previo al evento

mostradas en un NS constante, (b) la caída en el NS y (c) la recuperación mostrada por la recta con pendiente definida por la vulnerabilidad, el tiempo de recuperación y el NS objetivo.

5.3.1 Estimación de la Pérdida de Nivel de Servicio

La pérdida del NS (Δ NS) es un indicador de la vulnerabilidad de la infraestructura. A mayor pérdida del NS, mayor será la vulnerabilidad del segmento de red en estudio. La estimación del NS inicial se realiza en condiciones normales de operación y, por lo tanto, muestra la condición de la calidad de flujo sin evento.

La caída del NS (vulnerabilidad) se estima una vez que el evento natural afecta la infraestructura con consecuencias sobre la operación. Tiene relación directa con la magnitud del evento natural y la robustez inicial de la infraestructura.

El NS final, que puede ser igual al inicial (con o sin aumento de robustez) o bien inferior (degradación de la calidad de flujo producto del evento), se estima de acuerdo al estándar de mitigación en evaluación.

Para realizar una buena estimación de la pérdida del NS es necesario, para las medidas de mitigación activadas una vez ocurre el evento, diagnosticar en terreno el impacto sobre la infraestructura, identificar el número de pistas inhabilitadas y su longitud. Por otra parte, para las medidas de mitigación activadas previo a la ocurrencia del evento (medidas de mitigación de refuerzo) es necesario, en base a la experiencia y datos obtenidos de eventos pasados, estimar la magnitud del evento natural que afectará la infraestructura, previendo las consecuencias sobre la operación en términos del número de pistas inhabilitadas.

Para la estimación de los niveles de servicio, se supone que el flujo no cambia, es decir que los usuarios no declinan su intención de realizar el viaje producto de la posibilidad

de ocurrencia de un evento. Esto se hace para simplificar la obtención del NS, al no incluir el cambio de la matriz origen-destino de viajes en el análisis.

Las condiciones de borde para la modelación del NS consideran:

- a) Si un evento afecta solo una parte de una pista, la operación se puede mantener con restricciones principalmente de ancho y velocidad.
- b) Si un evento afecta la mitad de las pistas por sentido, la operación se mantiene con regulación de paso para los caminos bidireccionales y, transformando en flujo bidireccional los caminos multi pista.
- c) Si un evento afecta el total de la calzada, la operación se debe realizar por una vía alternativa.

El modelo de cálculo que permite realizar las modelaciones de la operación normal y con reducción de velocidad para caminos bidireccionales y multi pistas, se fundamenta en los modelos descritos en el HCM (TRB, 2000).

Para la modelación de operación con regulación de paso (bandereros), el *software* SIDRA INTERSECTION 5.1, herramienta creada para la modelación de intersecciones semaforizadas, permite simular el comportamiento de la regulación de paso como si fuesen semáforos.

5.3.2 Nivel de Servicio en Condiciones Normales

El HCM (TRB, 2000) expresa el NS en caminos bidireccionales en términos de la velocidad promedio de viaje y en el porcentaje de tiempo de seguimiento, a partir de características físicas de la infraestructura, como ancho de pista y berma, clase de camino y tipo de terreno, y operacionales tales como volumen horario, porcentaje direccional, porcentaje de zonas de no adelantamiento y porcentaje de vehículos pesados.

Para caminos multi pista el NS se expresa en términos de la velocidad promedio de viaje y la densidad de vehículos por kilómetro, a partir de características físicas de la infraestructura, como ancho de pistas, despeje lateral, presencia o no de mediana, número de pistas y tipo de terreno, y características operacionales, tales como el volumen horario por dirección, porcentaje de vehículos pesados y velocidad de flujo libre.

El *software* utilizado en la modelación es HCS2000.

5.3.3 Nivel de Servicio en Condiciones Deficientes

Para las condiciones operacionales deficientes que involucran reducción de velocidad, se utiliza HCS2000 de la misma forma que para operación normal, pero reduciendo el ancho de pista y de berma y otorgando 100% de zonas de no adelantamiento en caminos bidireccionales. Por otra parte, en caminos multi pista, se utiliza reduciendo el ancho de pista y despejes laterales.

Para la regulación de paso se utiliza SIDRA INTERSECTION 5.1, el cual entrega las demoras totales (veh-h), la velocidad promedio de viaje por la zona de influencia del semáforo y los largos de cola generados por la interrupción del tránsito, a partir de características físicas de la infraestructura, tales como ancho de pista, número de pistas, largo de la pista y zona de influencia, y operacionales tales como velocidad de acercamiento, tiempo de semáforos y velocidad promedio de viaje en flujo no interrumpido.

5.3.4 Efectos de la Restricción de Carga

La restricción de carga puede activarse luego de un evento natural debido a: (a) daños sobre el paquete estructural del camino y que obliga a imponer restricciones de tonelaje que puede circular sobre él; (b) debido a deformaciones permanentes del suelo; y (c)

debido al riesgo de licuefacción de terraplenes. Desde el punto de vista de segmentos de camino afectados, este efecto se puede modelar calculando tráfico equivalente a la carga máxima, lo cual permite incrementar artificialmente el volumen de tráfico y, por tanto, afectar el NS.

5.3.5 Estimación del Tiempo de Recuperación

La estimación del tiempo de recuperación requiere cuantificar dos variables: los rendimientos de las operaciones y partidas que conforman las estrategias de intervención y su planificación de ejecución, y la magnitud de daño potencial en términos de volumen de obra requerida.

Mediante la base de datos de Mora (2016) se obtienen los rendimientos asociados a las operaciones y partidas que configuran las estrategias de intervención. Entonces, con los planes de aplicación de las estrategias, el volumen de daño producto del evento y los rendimientos asociados se estima el tiempo de recuperación de cada estrategia. El cálculo corresponde a la multiplicación del volumen de daño por el rendimiento de la operación que da solución al elemento dañado.

El tiempo de recuperación se determina restando el tiempo de término de la última operación con el inicio de la ejecución de la primera operación. Eventualmente, a este tiempo se le agrega un tiempo adicional que considera la duración de estudios de ingeniería o de aprobación de recursos económicos para ejecutar las obras. Es importante notar que los tiempos que influyen en el tiempo de recuperación son aquellos asociados a operaciones que tienen consecuencias sobre el NS, es decir, que aquellas operaciones que se realizan fuera de la calzada no deben ser consideradas.

5.3.6 Curvas de Restauración Genéricas para cada Estándar de Mitigación

La aplicación de medidas de mitigación induce efectos a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura vial en términos de la modificación de la resiliencia, cuyos efectos son la reducción de vulnerabilidad, aumento de la robustez, y una reducción del tiempo de recuperación. El análisis que se presenta a continuación ilustra el caso en que un segmento de camino se ve afectado repetidamente por eventos naturales. Esto permite apreciar, por ejemplo, que una mejora ex-post puede también constituir una mitigación propiamente tal ante el siguiente evento.

Si se aplican estrategias de intervención asociadas a la rehabilitación únicamente de la transitabilidad (rehabilitación), el NS se verá degradado en el tiempo, pudiendo incluso aumentar la vulnerabilidad de la infraestructura. Este efecto se aprecia en la Figura 5.5a. Si se aplican estrategias de intervención asociadas a la restauración de transitabilidad con aumento de robustez de elementos de la calzada, es posible que ante la ocurrencia de un evento futuro el NS vea atenuada su caída, efecto que se muestra en la Figura 5.5b. Las recuperaciones de transitabilidad se asocian generalmente a daños leves sobre la infraestructura producto de eventos naturales de magnitud leve.

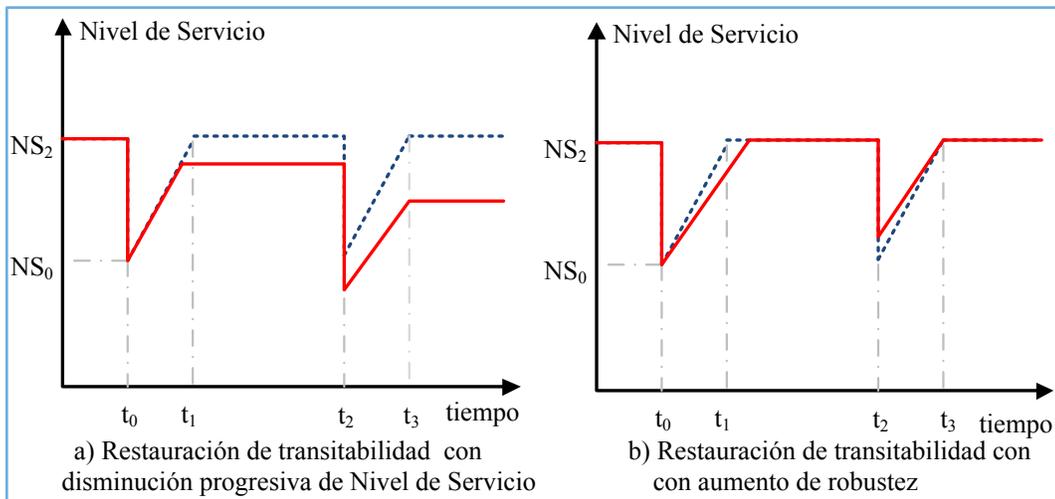


Figura 5.5. Curvas de restauración genéricas asociadas a la rehabilitación

Cuando se presentan eventos de mayor magnitud, los daños sobre los elementos que componen la calzada son mayores y, por lo tanto, los tiempos de recuperación también. Si solo se aplican estrategias asociadas a reponer los elementos dañados y/o destruidos, la respuesta de la infraestructura será la misma ante la ocurrencia de un nuevo evento natural, como lo muestra la Figura 5.6a. Por otra parte, si se aplican estrategias asociadas a reponer los elementos dañados y/o destruidos al mismo tiempo de mejorar sus condiciones de diseño, aumentando su robustez, la caída en el NS ante la ocurrencia de un nuevo evento será menor, al igual que su tiempo de recuperación, efecto que se aprecia en la Figura 5.6b.

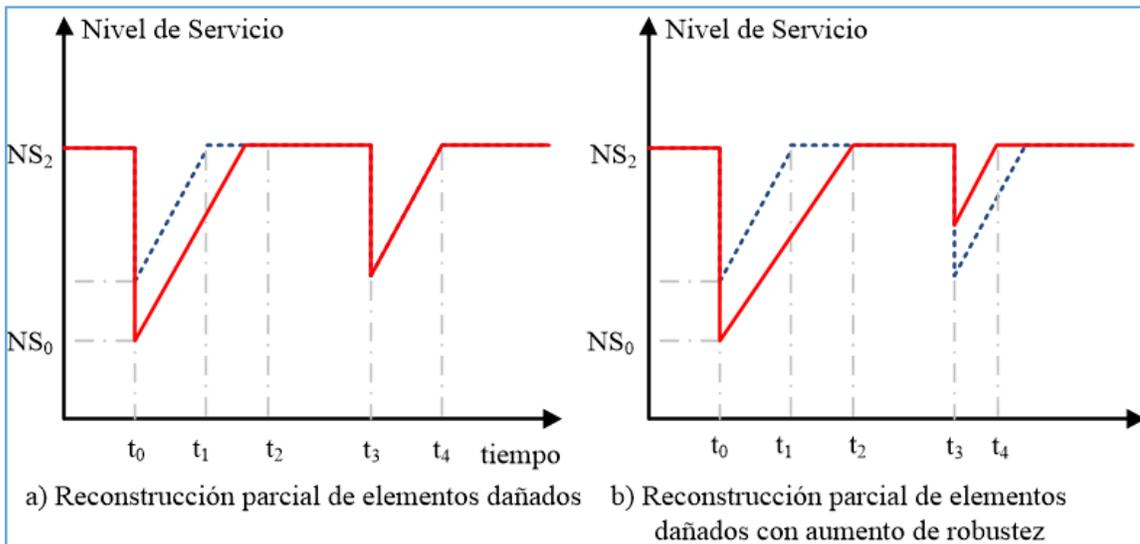


Figura 5.6. Curvas de restauración genéricas asociadas a la reconstrucción parcial

Si el evento natural produce pérdida total de la infraestructura, se debe poner en marcha la reconstrucción total. El NS cae a cero y los tiempos de recuperación son considerablemente mayores que en los otros casos. La Figura 5.7a muestra estrategias de intervención de reconstrucción total sin aumento de robustez, es decir ante la ocurrencia de un nuevo evento de magnitud que solo demande operaciones de recuperación de transitabilidad la caída en el NS será la misma. Por otra parte, la Figura

5.7b muestra estrategias de reconstrucción con operaciones de aumento de robustez bajo condiciones similares de eventos naturales.

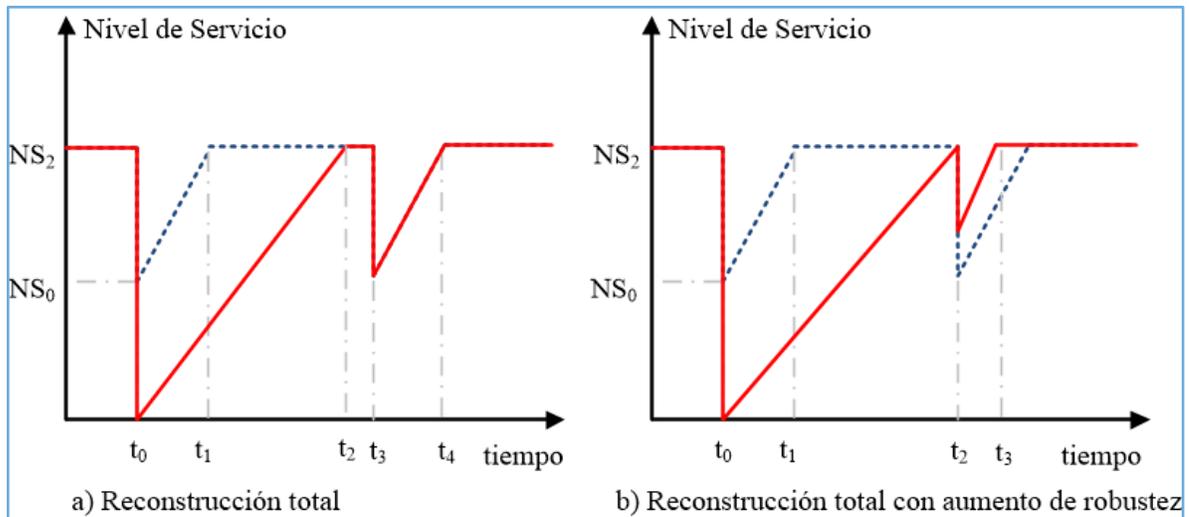


Figura 5.7. Curvas de restauración genéricas asociadas a la reconstrucción total

Existen algunos casos en que la estrategia de intervención no solamente se traduce en una reducción de la vulnerabilidad (y por consiguiente un incremento en su robustez), sino que también implica una mejora en el NS. Por ejemplo, una elevación de rasante con un mejoramiento integral de la sección transversal (por ejemplo, ensanche de bermas, y rebaje de taludes) o bien un desplazamiento de trazado para emplazarlo lejos de áreas de inundación, pueden traducirse en un aumento de capacidad y una reducción de la vulnerabilidad al mismo tiempo, efecto que se muestra en la Figura 5.8a.

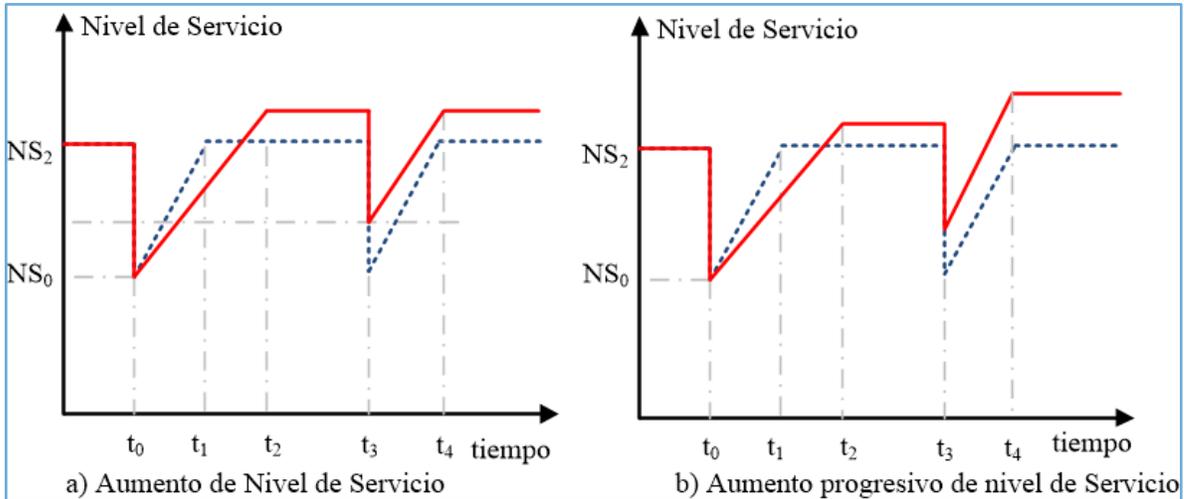


Figura 5.8. Curvas de restauración genéricas asociadas a estrategias de aumento de NS

Cuando se prevé que existen amenazas no normales que pudiesen afectar en el largo plazo la infraestructura como, por ejemplo, cambio climático en interacción o no con anomalías climáticas, lagunas sísmicas, factores aleatorios, es posible incorporar al modelo anterior el efecto de adaptación de la infraestructura, lo cual se traduce en un NS mejor que el original. La Figura 5.8b muestra un ejemplo para el caso de un proceso de largo plazo de adaptación de infraestructura. Se aprecia que progresivamente se incrementa el tiempo estándar de la vía, modificando su NS y reduciendo a la vez la vulnerabilidad, aun cuando la afectan eventos naturales normales o no-normales.

5.4 MODELO DE SELECCIÓN TÉCNICA DE ESTRATEGIAS DE INTERVENCIÓN

La evaluación técnica de diferentes estrategias de intervención se realiza a través de la superposición de curvas de restauración, donde se compara la resiliencia alcanzada por una estrategia de intervención base y la de cada estrategia de intervención en evaluación. Para representar físicamente el concepto de resiliencia fue necesario realizar dos modificaciones.

Primero, numéricamente la resiliencia corresponde al recíproco del área formada por la caída en el NS y el tiempo de recuperación, es decir, integrando la curva de restauración. De esta forma, que el modelo de mitigación busque la solución que posea la mayor resiliencia, implica seleccionar la estrategia que maximice el recíproco del área conseguida de la superposición.

Segundo, el comportamiento de recuperación de la curva, mostrado conceptualmente como una recta con pendiente, fue cambiado por una curva de tipo escalón, donde cada escalón está determinado por las consecuencias del evento y por las condiciones operacionales inducidas por los trabajos de cada operación y partida.

Por lo tanto, la evaluación de estrategias de operación pasa por encontrar las técnicamente factibles, es decir, cuyo diferencial de resiliencia sea mayor a uno. La Figura 5.9 muestra el modelo conceptual y la Ecuación 5.1 a 5.3 el proceso de cálculo para estrategias compuestas de dos condiciones operacionales diferentes asociadas a una operación, siendo el mismo para aquellas con mayor número de ambas.

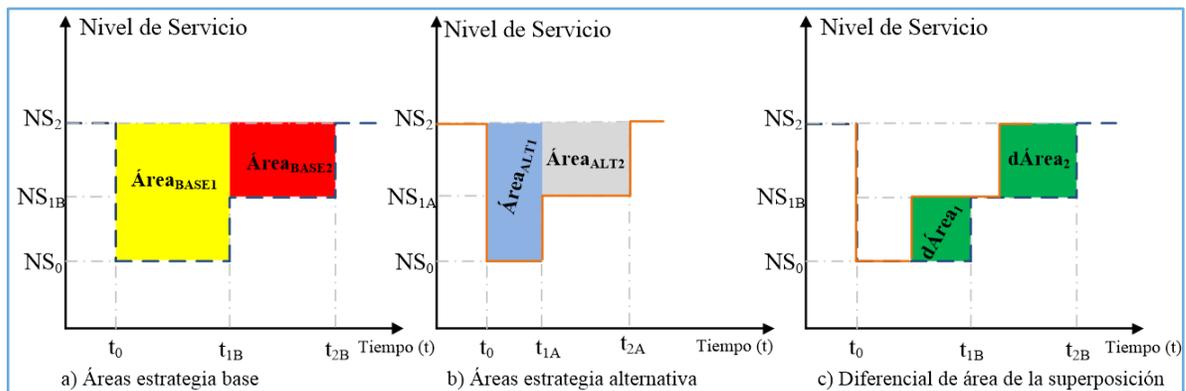


Figura 5.9. Modelo conceptual de evaluación técnica de alternativas

$$R_{BASE} = \frac{1}{(NS_2 - NS_0)(t_{1B} - t_0) + (NS_2 - NS_{1B})(t_{2B} - t_{1B})} \quad , \quad (5.1)$$

$$R_{ALT} = \frac{1}{(NS_2 - NS_0)(t_{1A} - t_0) + (NS_2 - NS_{1A})(t_{2A} - t_{1A})} \quad (5.2)$$

La estrategia alternativa es técnicamente factible si:

$$dR_{\text{superposición}} = \frac{R_{ALT}}{R_{BASE}} \geq 1 \quad (5.3)$$

donde,

NS_2 : NS antes del evento,

NS_0 : caída en el NS cuando ocurre el evento,

NS_{1B} : NS recuperado una vez finalizada la condición de operación uno asociada a la estrategia base,

NS_{1A} : NS recuperado una vez finalizada la condición de operación 1 asociada a la estrategia alternativa,

t_0 : instante de tiempo en el que ocurre el evento natural,

t_{1B} : instante de tiempo en el que finaliza la condición operacional 1 asociada a la operación de la estrategia base,

t_{2B} : instante de tiempo en el que finaliza la condición operacional 2 asociada a la operación de la estrategia base. Instante de tiempo en el que se recupera totalmente el NS_2 ,

t_{1A} : instante de tiempo en el que finaliza la condición operacional 1 asociada a la operación de la estrategia alternativa, y

t_{2A} : instante de tiempo en el que finaliza la condición operacional 2 asociada a la operación de la estrategia alternativa. Instante de tiempo en el que se recupera totalmente el NS_2 .

Debido a que el comportamiento de la infraestructura puede diferir a partir del primer evento, por la aplicación de la estrategia analizada, es necesario repetir el procedimiento para cada evento durante el periodo de evaluación. Sin embargo, el caso de mitigación previa no se considera en el diferencial de resiliencia, puesto que forma parte del costo hundido de las medidas de mitigación.

5.5 MODELO DE EVALUACIÓN SOCIO-ECONÓMICA DE ESTRATEGIAS DE INTERVENCIÓN

Basado en el modelo propuesto por Echaveguren *et al.* (2012), se busca a través de indicadores de rentabilidad social y de resiliencia seleccionar de un conjunto de estrategias técnicamente factibles las que sean económicamente rentables y técnicamente eficientes, de manera de que, en un elemento se seleccione la estrategia con mayor rentabilidad social y mayor incremento en resiliencia (o mayor reducción de riesgo). El indicador de rentabilidad social es el valor social actual neto (VSAN).

Para cada estrategia de intervención en evaluación es necesario calcular los costos de operación incurridos por los usuarios ante la operación deficiente generada por los eventos, y los costos de la agencia vial incurridos en la aplicación de cada estrategia.

5.5.1 Escenarios de Evaluación

Los escenarios de evaluación permiten realizar la evaluación social de las alternativas. En el modelo se definen los siguientes dos escenarios:

- a) Escenario base: corresponde a medidas provisorias de corto plazo, destinadas principalmente a la reposición de transitabilidad.

- b) Escenario alternativo: corresponde a una medida de mitigación que puede ser considerada definitiva, destinada a recuperar el NS pudiendo incluir la mejora de este.

5.5.2 Costos de la Agencia Vial

Los costos de la agencia vial (CAV) corresponden a los incurridos en la aplicación de las estrategias en evaluación, los que dependen de los costos unitarios de las operaciones y partidas que componen la estrategia y de la magnitud de obra requerida. El cálculo del CAV para un año es mostrado en la Ecuación 5.4.

$$CAV = \sum_{i=1}^n CU_i CO_i \quad (5.4)$$

donde, CU_i es el costo unitario de la partida i y CO_i es la cantidad de obra asociada a la partida i .

5.5.3 Costos de los Usuarios

Echaveguren *et al.* (2000) proponen una metodología para puentes extrapolable a infraestructura vial, donde caracterizan los costos a los usuarios asignados por tipo de efecto. Los costos de los usuarios (COP), correspondientes a aquellos incurridos por operación deficiente, en términos de los tiempos de viaje y consumo de insumos, son la suma de: los costos por demoras de reducción de velocidad (C_{RV}), por regulación de paso (C_{RP}), por aumento del tiempo de viaje por re ruteo (C_{TV}) y por aumento de insumos por re ruteo (C_{OP}).

Costos de demoras por reducción de velocidad:

$$C_{RV} = \left(\frac{L}{V_i} - \frac{L}{V_r} \right) V_h t_{RV} \sum VST_{\text{TipoVeh}} \%_{\text{TipoVeh}} \quad (5.5)$$

donde, L es la longitud de zona de trabajo en km; V_i y V_r son la velocidad inicial y reducida en km/h; V_h es el volumen horario en veh/h, t_{RV} es el tiempo de reducción de velocidad en horas, VST_{TipoVeh} es el valor social del tiempo de viaje de cada tipo de vehículo en \$/veh-h, y $\%_{\text{TipoVeh}}$ es el porcentaje de cada tipo de vehículo.

Costos de demoras por regulación de paso:

$$C_{RP} = D_{RP} t_{RP} \sum VST_{\text{TipoVeh}} \%_{\text{TipoVeh}} \quad (5.6)$$

donde, D_{RP} son las demoras totales por reducción de velocidad en veh-h/h, obtenidas de SIDRA INTERSECTION 5.1, t_{RP} es el tiempo de regulación de paso en horas, VST_{TipoVeh} es el valor social del tiempo de viaje de cada tipo de vehículo en \$/veh-h, y $\%_{\text{TipoVeh}}$ es el porcentaje de cada tipo de vehículo.

Costos de aumento de tiempo de viaje por re ruteo:

$$C_{TV} = \left(\frac{L_{ao}}{V_{ao}} - \frac{L_d}{V_d} \right) V_h t_{TV} \sum VST_{\text{TipoVeh}} \%_{\text{TipoVeh}} \quad (5.7)$$

donde, L_{ao} y L_d son la longitud del arco original y desvío en km, V_{ao} y V_d son la velocidad de operación en arco original y desvío en km/h, V_h es el volumen horario en veh/h, t_{TV} es el tiempo de necesidad de re ruteo en horas, VST_{TipoVeh} es el valor social del tiempo de viaje de cada tipo de vehículo en \$/veh-h, y $\%_{\text{TipoVeh}}$ es el porcentaje de cada tipo de vehículo.

Costos de operación por mayor consumo de insumos por re ruteo:

$$C_{TV} = (L_{ao} - L_d)V_h t_{OP} \sum \frac{VSC_{TipoVeh}}{\eta_{TipoVeh}} \%_{TipoVeh} \quad , \quad (5.8)$$

donde, L_{ao} y L_d son la longitud del arco original y desvío en km, V_h es el volumen horario en veh/h, t_{OP} es el tiempo de necesidad de re ruteo en horas, $VSC_{TipoVeh}$ es el valor social del combustible de cada tipo de vehículo en \$/litro, $\eta_{TipoVeh}$ es el rendimiento de cada tipo de vehículo en km/litro, y $\%_{TipoVeh}$ es el porcentaje de cada tipo de vehículo.

5.5.4 Evaluación de Escenarios

La evaluación de escenarios consiste en contrastar el escenario base con cada escenario alternativo. Para ello se calcula en cada escenario el costo anual equivalente (CAE) en función de los costos de los usuarios (COP) y costos de la agencia vial (CAV). El horizonte recomendado (t) es de 5 años de manera que minimice la incertidumbre de ocurrencia de los eventos y la precisión con respecto a utilizar uno largo, y la tasa social de descuento constante (i) de un 6% (Ministerio de Desarrollo Social, 2016) no pierda validez.

Las ecuaciones para la obtención del costo anual equivalente para cada escenario son las siguientes:

$$CAE_{SITUACION-BASE} = \left\{ \sum_{t=1}^5 \frac{COP + CAV_{SITUACION-BASE}}{(1 + i/100)^t} \right\} \quad y \quad (5.9)$$

$$CAE_{\text{ESCENARIO-ALTERNATIVO}} = \left\{ \sum_{t=1}^5 \frac{COP + CAV_{\text{ESCENARIO-ALTERNATIVO}}}{(1 + i/100)^t} \right\} \quad (5.10)$$

El VSAN permite escoger la alternativa que posee un mayor beneficio social en comparación al escenario base, el cual expresa el ahorro incurrido por aplicar una medida de mitigación diferente de la base. Se calcula como la diferencia entre el costo anual equivalente de la situación base respecto de cada escenario alternativo según la Ecuación 5.9.

$$VSAN = CAE_{\text{ESCENARIO-ALTERNATIVO}} - CAE_{\text{SITUACION-BI}} \quad (5.11)$$

Si el VSAN es positivo, la aplicación de medidas destinadas a reducir la vulnerabilidad de la vía es socialmente rentable. En caso contrario, no lo es.

5.5.5 Recomendación de Intervención

La recomendación de intervención es:

- a) Si el VSAN es negativo, se debe mantener las operaciones relacionadas con la medida de mitigación base.
- b) Si el VSAN es positivo y existe solo una medida de mitigación, se debe invertir en ella.
- c) Si el VSAN es positivo y existe más de una medida de mitigación, se tiene:
- d) $VSAN_1 \approx VSAN_2$, se selecciona la alternativa que posee el mayor diferencial de resiliencia dR.
- e) $VSAN_1 \neq VSAN_2$, se debe dividir el beneficio social (VSAN) por la inversión asociada a cada una de las alternativas (índice Vi) según:

$$V_1 = \frac{VSAN_1}{CAE_{\text{ESCENARIO-ALTERNATIVO-1}}} \quad y \quad (5.12)$$

$$V_2 = \frac{VSAN_2}{CAE_{\text{ESCENARIO-ALTERNATIVO-2}}} \quad . \quad (5.13)$$

Posteriormente se calculan las variaciones (dRj) en los índices de resiliencia según:

$$dR_1 = \frac{R_{\text{ESCENARIO-ALTERNATIVO-1}}}{R_{\text{SITUACIÓN-BASE}}} \quad y \quad (5.14)$$

$$dR_2 = \frac{R_{\text{ESCENARIO-ALTERNATIVO-2}}}{R_{\text{SITUACIÓN-BASE}}} \quad . \quad (5.15)$$

Se selecciona la alternativa que tenga un producto (VidRj) mayor. Esto implica que la mejor alternativa tendrá una razón beneficio/inversión alta y, a la vez, una variación relevante de la resiliencia (dR).

6

CASOS DE ESTUDIO SOBRE EVALUACIÓN DE RIESGO EN ELEMENTOS QUE COMPONEN LA RED VIAL NACIONAL



PROYECTO FONDEF ID14110309

“Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional”

6. CASOS DE ESTUDIO SOBRE EVALUACIÓN DE RIESGO EN ELEMENTOS QUE COMPONEN LA RED VIAL NACIONAL

6.1 MODELO DE RIESGO SÍSMICO

La validación del modelo de cuantificación de riesgo sísmico sobre los puentes de la red vial nacional se basa en el contraste de los datos utilizados para la elaboración empírica del modelo con los datos utilizados para la validación de este. En este caso, la elaboración del modelo fue realizada a partir de todos los reportes de daños ocurridos durante el terremoto M8.8 del 27F de 2010, y la validación será a partir de los datos limitados a la VIII región.

Las curvas de fragilidad elaboradas a partir del modelo desarrollado entregan al usuario el valor empírico de la probabilidad de falla de un puente a partir de todos los datos registrados. Este valor de probabilidad, para ser validado, debe ser comparado con la probabilidad de falla empírica obtenida de los daños registrados en la VIII región.

La información necesaria para realizar la validación del modelo de riesgo en puentes por movimiento de suelo es, en primer lugar, el área geográfica de la VIII Región del Bio Bio, para acotar los puentes a esta zona. En segundo lugar, se requieren los detalles de los puentes que se encuentran dentro de esta área geográfica. En tercer lugar, se requiere la intensidad de la amenaza, medida en aceleración espectral (1.0) en cada punto. En la Figura 6.1 se ilustra la información requerida.



Figura 6.1. Información requerida para el proceso de validación

Además, es necesario contar con los reportes de daño efectuados en la VIII región, para saber que niveles de daño presentó cada estructura de manera posterior al terremoto.

Luego de realizar el proceso de validación, se sobreponen los puntos para las diferentes intensidades de la curva de los datos de validación (VIII Región) sobre todos los demás datos.

Información de Daños en Infraestructura

Durante el terremoto del Maule M8.8 en 2010, aproximadamente 300 puentes sufrieron algún nivel de daño. Esta cifra representa menos del 3% del total de puentes en Chile. De estos puentes, 20 puentes sufrieron colapso de sus vanos (Buckle et al., 2012, citado en Toro et al., 2013).

Un estudio realizado por Toro et al. (2013) tuvo por objetivo analizar estadísticamente 88 pasos ubicados en una sección de la ruta 5. Se definieron cuatro distintos estados de daño, desde sin daño hasta colapso de puente. Hace un análisis por el tipo de tope, el ángulo de esviaje y por zona sísmica.

Por otro lado, se utilizan los catastros realizados por la Dirección de Vialidad y por las empresas concesionarias luego de que se produjo el terremoto. Se expone una descripción del daño, pero no se presenta el estado de daño al que fue expuesto.

Validación de Curvas de Fragilidad

Teniendo la información de los puentes de la VIII región, en conjunto con el reporte de daños y las intensidades, se pueden establecer diferentes puntos empíricos que se ubican a lo largo de la curva de fragilidad. Todos estos puntos están basados en información histórica del terremoto M8.8 en 2010. A continuación, se muestran los puntos sobre la curva calibrada. La curva azul corresponde a la curva de fragilidad calibrada, mientras que los puntos naranjos corresponden a los puntos basados en la información de la VIII región.

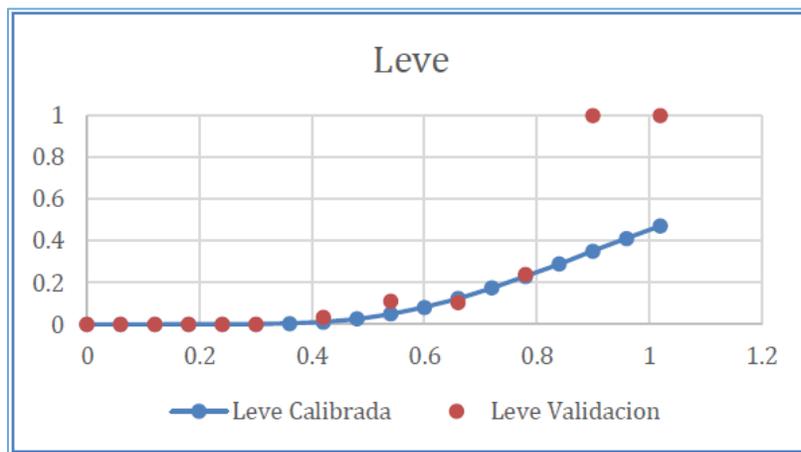


Figura 6.2. Puntos de validación sobre curva de fragilidad leve calibrada

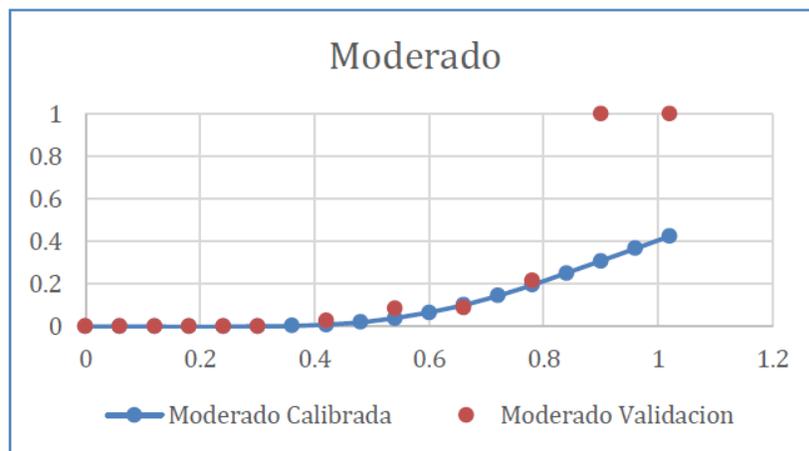


Figura 6.3. Puntos de validación sobre curva de fragilidad moderada calibrada

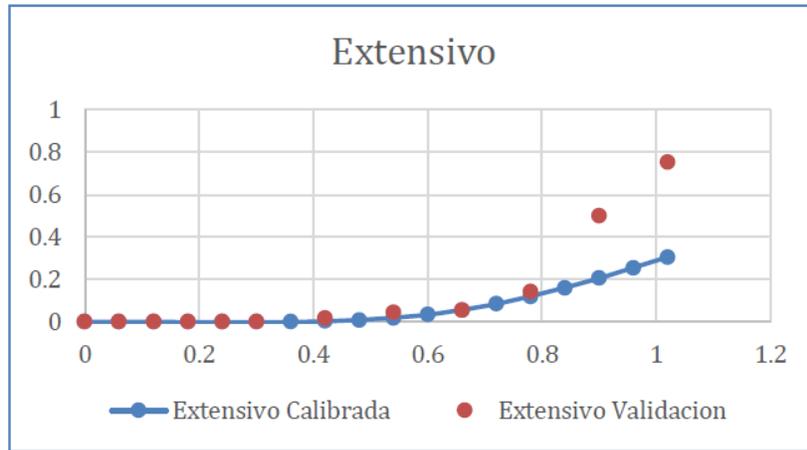


Figura 6.4. Puntos de validación sobre curva de fragilidad extensiva calibrada

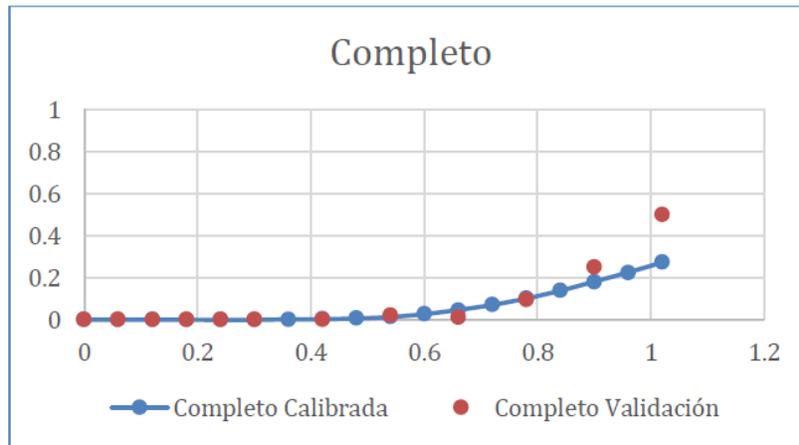


Figura 6.5. Puntos de validación sobre curva de fragilidad extensiva calibrada

Se puede concluir a partir de lo que se aprecia en los gráficos que las curvas de fragilidad representan de buena manera los puntos con los que se pretende validar. Sin embargo, existe un error en los valores de intensidad de los extremos.

Test de Bondad de Ajuste – Chi Cuadrado

La validación del modelo se llevará a cabo utilizando un test de Bondad de Ajuste. El test escogido es el Chi-Cuadrado. En este caso se define una hipótesis nula, que corresponde a

que X presenta una distribución con determinados parámetros. Por el otro lado, se define como hipótesis que X no presenta dicha distribución.

H0: X tiene una distribución log-normal con parámetros obtenidos en el desarrollo del modelo.

v/s

H1: X no tiene dicha distribución.

Para aceptar o rechazar la hipótesis nula, se debe comparar el valor observado de la curva de fragilidad con el valor teórico de la función log-normal.

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(\text{observada}_i - \text{teórica}_i)^2}{\text{teórica}_i} \quad (5.1)$$

6.1.1 Aplicación del Modelo

Una vez desarrollado y validado el modelo de riesgo sísmico sobre los puentes de la red vial chilena, será aplicado en un caso de estudio asociado a un puente en específico. Este puente será expuesto a diferentes niveles de intensidades de amenaza para obtener las probabilidades de daño dado una determinada aceleración espectral.

Primero se definirán cuáles serán los escenarios de evaluación, es decir, el puente que será sometido y el evento sísmico al que será expuesto. El puente será clasificado en una categoría dependiendo de las características de este, y dada la categoría se le asignará una curva de fragilidad. Los parámetros de estas curvas serán modificados por el coeficiente de esviaje. A continuación, se debe estimar la aceleración en la ubicación específica del puente en estudio, mediante mapas de aceleración provistos por el USGS. Toda la información detallada anteriormente, de la amenaza y de los puentes, debe ser ingresada en el modelo para así poder estimar la probabilidad de que este falle.

Definición de Escenarios de Aplicación

a) Paso Superior Lo Echevers

El paso superior Lo Echevers está dentro de la Autopista Vespucio Norte Express, y es un paso superior de 3 vanos. Su infraestructura y las vigas son de hormigón. Posee tres vanos. A continuación, en la Figura 5.6 se presenta el emplazamiento del paso superior.

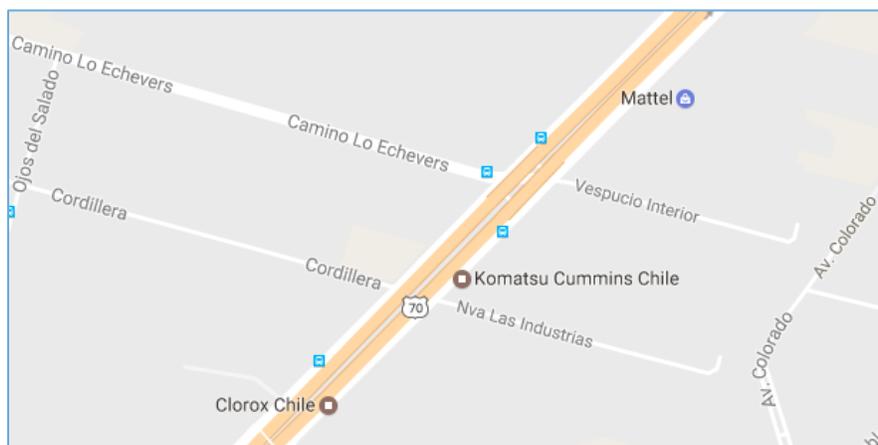


Figura 6.6. Emplazamiento del paso superior Lo Echevers

b) Puente El Teniente

El puente El Teniente está ubicado en la Ruta 5 Norte. Su infraestructura y las vigas son de hormigón. A continuación, en la Figura 6.7 se presenta el emplazamiento del paso superior.

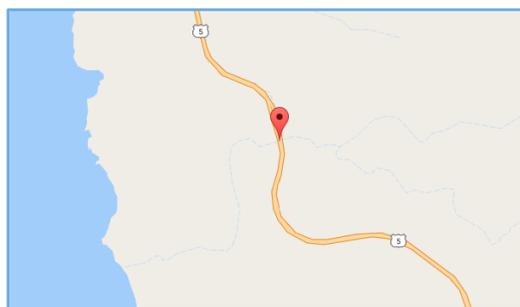


Figura 6.7. Emplazamiento del puente El Teniente

Definición de Escenario Sísmico a Evaluar

Los escenarios sísmicos a evaluar en la aplicación del modelo de riesgo sísmico sobre los puentes de la red vial chilena serán los que han afectado recientemente al territorio nacional.

a) Escenario 1

El Escenario 1 corresponde al terremoto M8.8 del 27F de 2010, que afectó a gran parte del territorio nacional, siendo percibido desde la IV hasta la X Región. Las aceleraciones espectrales (1.0) que se registraron estuvieron en el rango de 0.02g-1.74g. En la imagen a continuación se presentan las aceleraciones espectrales que afectaron a las regiones de Chile.

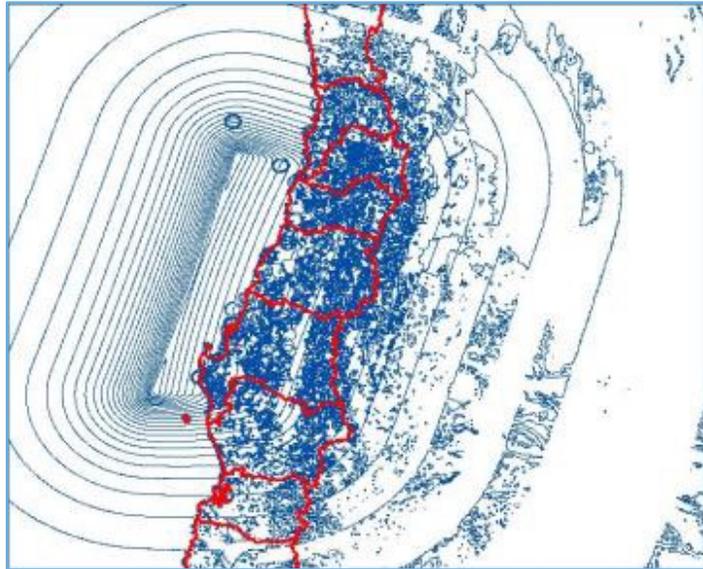


Figura 6.8. Aceleraciones espectrales del terremoto M8.8 de 2010

b) Escenario 2

El Escenario 2 corresponde al terremoto M8.3 de 2015 con epicentro en Illapel, y siendo percibido en gran parte del territorio nacional, desde la II hasta la VI Región. Las aceleraciones espectrales (1.0) que se registraron estuvieron en el rango de 0.06g-1.06g.

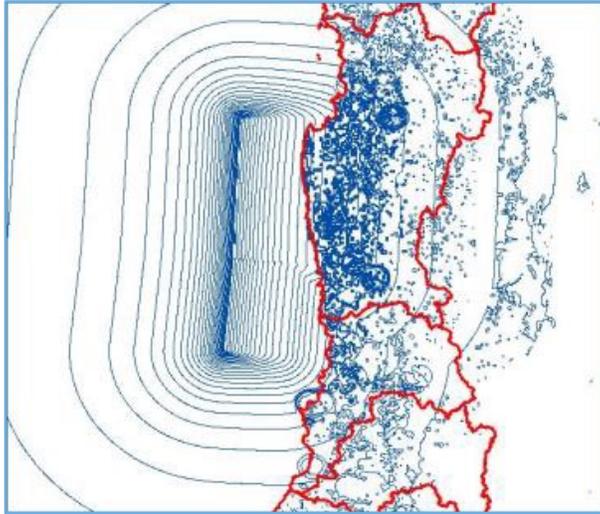


Figura 6.9. Aceleraciones espectrales del terremoto M8.3 de 2015

c) Otros escenarios sísmicos

Para definir un evento sísmico hipotético, es necesario determinar una magnitud, epicentro y profundidad. Como medida de intensidad de la amenaza, se requieren mapas de PGA, PGV y Sa. Para construir los mapas requeridos se deben utilizar Ground Motion Prediction Equations (GMPEs).

Un estudio realizado por Aguirre et al. (2017) utilizó las ecuaciones propuestas por Abrahamson et al. (2016) para el cálculo del PGA y de la aceleración espectral, ya que estas han sido testeadas satisfactoriamente en el terremoto del Maule 2010. El mismo estudio utilizó las ecuaciones desarrolladas por Kanno et al. (2006) para el cálculo del PGV.

Resultados de la Aplicación del Modelo

Contando con la información del tipo y características del puente y con las intensidades de amenaza, es posible estimar la probabilidad de daño mediante el uso del modelo de riesgo sísmico, basado en curvas de fragilidad.

Luego de realizar el cruce de la intensidad de la amenaza con la curva de fragilidad, se permite estimar la probabilidad de daño de cada escenario sobre el puente en estudio. A

continuación, en la Tabla 6.1 y 6.2 se detalla la información, para cada uno de los puentes en estudio.

Tabla 6.1. Probabilidad de falla de paso superior Lo Echevers

N°	Intensidad (g)	Sin Daño (%)	Leve (%)	Moderado (%)	Extensivo (%)	Completo (%)
1	1.12	41.9	4.6	12.7	3.7	37.1

Tabla 6.2. Probabilidad de falla de puente El Teniente

N°	Intensidad (g)	Sin Daño (%)	Leve (%)	Moderado (%)	Extensivo (%)	Completo (%)
1	0.48	97.5	0.6	1.1	0.2	0.6

Cabe destacar que el paso superior Lo Echevers sufrió colapso durante el terremoto del 27F de 2010, mientras que el puente El Teniente presentó descenso en los terraplenes de acceso a este.

Aplicación del Modelo en Hazus-MH

El software Hazus-MH estima las probabilidades de daño de los elementos basados en las curvas de fragilidad. El software tiene la capacidad de modificar los parámetros de las curvas con las que trabaja. Es por esto, que los parámetros a utilizar son los que se han calibrado en el desarrollo del modelo.

El procedimiento para aplicar el modelo en Hazus-MH comprende una serie de pasos:

- Adaptación del área geográfica: para esto se debe eliminar un estado cualquiera de la base de datos de Hazus-MH y adaptar una región nacional que se quiera estudiar.

- Incorporación de la infraestructura: mediante el uso del software complementario CDMS, se incorpora los puentes a la nueva región creada. Se requiere información acerca de las características del puente para poder clasificarlo dentro de una categoría.
- Modificación de las curvas de fragilidad: en el software se pueden modificar los parámetros de las curvas de fragilidad. En este paso, se deben ingresar los parámetros estimados en el desarrollo del modelo de riesgo sísmico.
- Incorporación del evento sísmico: es posible ingresar mapas de eventos sísmicos. Se puede ingresar un evento ocurrido en el pasado, como es el caso del terremoto 27F, o crear un nuevo evento sísmico y estimar las aceleraciones mediante el uso de las Ground Motion Prediction Equations (GMPE).

6.2 MODELO DE RIESGO VOLCÁNICO

La validación del modelo de cuantificación de riesgo volcánico o vulcanológico sobre la red vial nacional de basa en el contraste o comparación entre la información analítica obtenida como *output* e información histórica o empírica de efectos de lahares históricos sobre puente en el caso nacional. El modelo de riesgo de lahares desarrollado, al utilizar métodos analíticos y probabilísticos, fue elaborado a partir de fundamentos físicos y de expresiones recomendadas en la literatura.

Todo esto genera una necesidad de validar el modelo analítico desarrollado mediante el uso de información empírica. Las curvas de fragilidad elaboradas a partir del modelo desarrollado entregan al usuario el valor analítico de la probabilidad de falla de un puente de una categoría (*C1* o *C2*) sometido a un lahar de determinada intensidad medida como profundidad en metros. Este valor de probabilidad analítica, para ser validado, debe ser comparado con la probabilidad de falla empírica, la cual se obtiene estadísticamente de registros históricos. Para esto se debe comenzar por investigar acerca de los lahares generados históricamente en Chile. Posteriormente, dentro de este mismo conjunto, se

debe estudiar sobre los lahares que alcanzaron puentes en su trayectoria, ya que lógicamente los lahares que no fluyen por puentes no están dentro del análisis. Finalmente, se debe investigar acerca de los efectos o impactos que causaron los lahares que alcanzaron puentes, específicamente en estas infraestructuras.

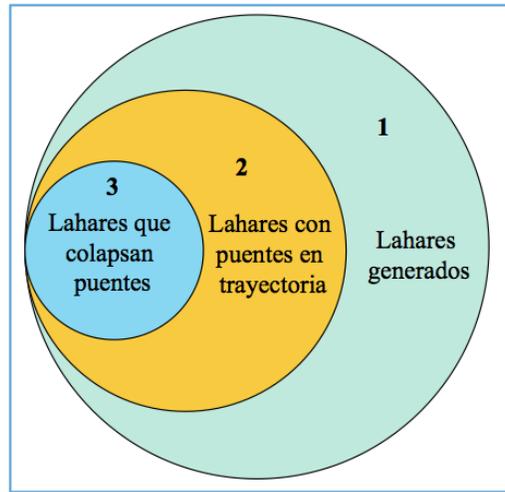


Figura 6.10. Conjuntos de información de lahares para la validación

Para desarrollar todo este proceso de búsqueda de información se elaboró un listado de lahares históricos de Chile. Para completar este listado se llevó a cabo una revisión bibliográfica completa que hace alusión a los lahares ocurridos en el país en el pasado. Para que un lahar histórico registrado en la literatura sea añadido al listado, la información debe contener al menos tres datos:

- Información de la intensidad del lahar histórico medida como profundidad.
- Información si el lahar alcanzó puentes y cuáles.
- Información si el lahar causó el colapso de puentes y cuáles.

Esta información es necesaria para poder determinar puntos empíricos de la curva de fragilidad. La información de la intensidad del lahar, medida como profundidad, entrega la

abscisa del punto empírico. La proporción de los puentes alcanzados que fueron destruidos por lahares de esa intensidad representa la ordenada del punto empírico.

De esta forma, en el proceso de búsqueda de información de lahares históricos se siguió el siguiente diagrama de flujo para completar el listado de registros de flujos laháticos empíricos:

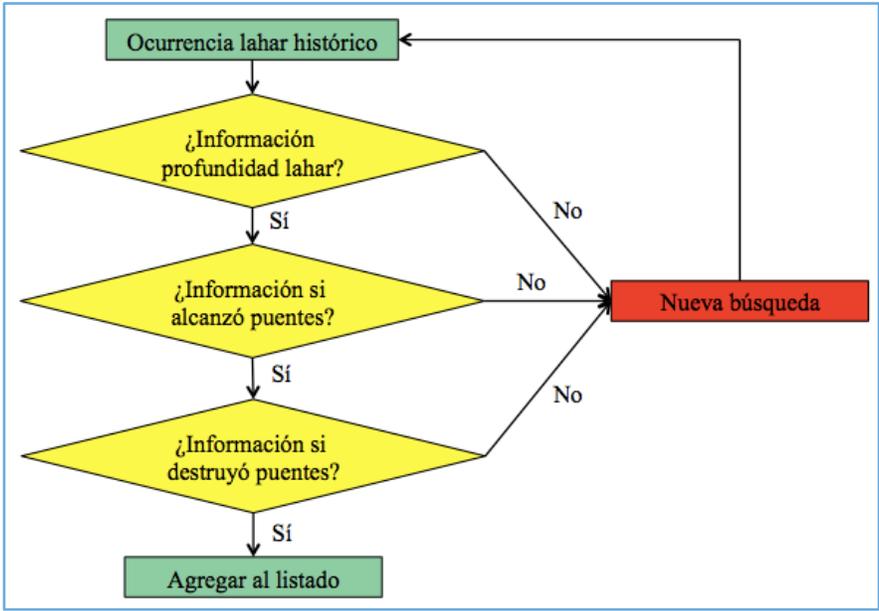


Figura 6.11. Diagrama de flujo de búsqueda de información de lahares históricos

Flujo de Tareas para la Aplicación

Una vez desarrollado y validado el modelo de riesgo vulcanológico sobre la red vial nacional, este será aplicado en un caso de estudio asociado a una sub-red chilena. Este caso de aplicación estará compuesto a su vez por distintos escenarios de erupciones de distinta magnitud que generen lahares de variadas intensidades. Para esto se debe partir por definir cuáles serán los escenarios de evaluación, es decir, cuál será el volcán asociado a la simulación y la sub-red a evaluar. Posterior a esto, se deben caracterizar los lahares generados en cada escenario, es decir, obtener atributos como su alcance geográfico, su profundidad, su velocidad, su ancho, etc. Luego, se deben identificar todos los puentes que

se verían alcanzados geográficamente por los lahares generados en los distintos escenarios. Junto con esto, se deben obtener los atributos físicos de estos puentes, como son su largo, su material, su gálibo, etc. Toda esta información de la amenaza y de los puentes debe ser ingresada en el modelo para así poder estimar la probabilidad de que falle cada uno de los puentes alcanzados por los lahares de cada escenario. Estos resultados deben ser finalmente analizados, lo que permite desprender ciertas conclusiones.

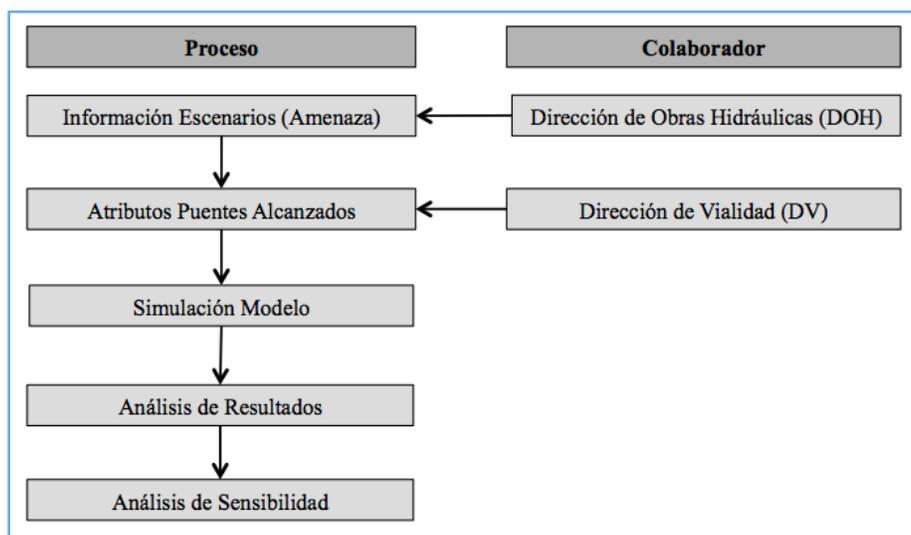


Figura 6.12. Procesos y colaboradores para la aplicación del modelo de riesgo vulcanológico

Definición de Escenarios de Aplicación

Los escenarios de eventos volcánicos a utilizar para la aplicación del modelo de riesgo vulcanológicos de lahares sobre puentes se basa un estudio titulado “Construcción Mitigación Riesgos Volcánicos y Geológicos Asociados, Comunas de Villarrica, Pucón y Curarrehue, Región de la Araucanía”, elaborado por el Instituto Nacional de Hidráulica (2013) y mandado por la Dirección de Obras Hidráulicas. El objetivo de dicho estudio fue representar el flujo de lahares de distintos escenarios mediante sistemas computacionales para determinar el potencial peligro producido por el Volcán Villarrica, en las Comunas de Villarrica, Pucón y Curarrehue.

El uso de este estudio como base para la aplicación del modelo de riesgo sobre puentes desarrollado se debe a la información espacial asociada a los lahares que entrega la investigación del INH. En dicho estudio se utilizaron los software FLO-2D y LAHARZ para modelar los potenciales lahares que se podrían generar en distintos escenarios. La modelación realizada por el INH entre información espacial de la profundidad y de la velocidad de los lahares de las distintas cuencas para cada escenario. Esta información de la amenaza es de gran utilidad para aplicar el modelo de riesgo desarrollado.

En dicho estudio se modelaron tres escenarios definidos por GEOESTUDIOS (2013) en base a criterios como el dinamismo eruptivo, los procesos volcánicos desarrollados en cada tipo de erupción, la interacción entre los productos volcánicos y el glaciar, y el tamaño del glaciar y el porcentaje de fusión de este.

Estos escenarios fueron definidos para todas las cuencas o cauces asociados al Volcán Villarrica. Estos fueron divididos en tres grupos o zonas:

- Zona 1: Zanjón Seco, Correntoso, Molco y Huichatio.
- Zona 2: Chaillupén y Voipir.
- Zona 3: Turbio, Pedregoso y Trancura.

Cabe destacar que el modelo de riesgo vulcanológico sobre puentes será aplicado exclusivamente a la Zona 1, ya que está afecta la Ruta 199-CH, camino que une Villarrica y Pucón. Este camino contiene variados puentes y es muy transitado, especialmente en la época de verano.

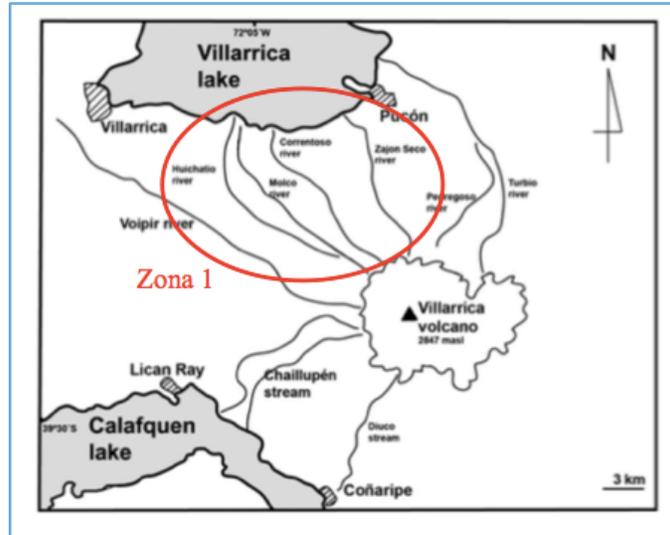


Figura 6.13. Cauces de la Zona 1 de modelación (Zanjón Seco, Correntoso, Molco y Huichatio)

En base a esta información, GEOESTUDIOS definió los siguientes escenarios de modelación, para lo cual se consideró que los lahares generados contienen sólido, agua hielo y nieve máxima.

Escenario 1

El Escenario 1 de erupción para la modelación de riesgo de lahares sobre puentes corresponde a una erupción hawaiano-estromboliana. Este tipo de erupciones tiene un periodo de recurrencia estimado de 5 a 10 años. Además, cabe destacar que este escenario presenta lahares asociados con velocidades y caudales similares a los estimados para el caso de la erupción del Volcán Villarrica del año 1971, lo que hace que sea un escenario interesante para modelar su riesgo sobre los puentes. En este caso, las velocidades de los lahares en la parte media alta alcanzan los 10 a 14 m/s, mientras que en zonas más bajas alcanzan los 5 m/s aproximadamente. En cuanto a los caudales, en este escenario se generan lahares de 5.000 a 20.000 m³/s, dependiendo del cauce y zona (INH, 2013).

Escenario 2

El Escenario 2 para la modelación de riesgo de lahares sobre puente, por su parte, corresponde a una erupción sub-pliniana. El periodo de recurrencia aproximado para este tipo de eventos es de 800 años. De manera similar al caso anterior, la erupción del Volcán Villarrica del año 1949 generó flujos laháricos con atributos similares a los de este escenario. Para el caso del Escenario 2, las velocidades de los lahares en la parte media alta alcanzan los 8 a 15 m/s, mientras que, en zonas más bajas, al igual que en el Escenario 1, alcanzan velocidades de 5 m/s aproximadamente. Además, en este escenario se presentan lahares con descargas máximas de entre 710 y 15.000 m³/s.

Resulta importante señalar que a pesar de que este escenario sea más destructivo en términos generales que el Escenario 1, los lahares generados en el Escenario 2 tienen volúmenes menores que los asociados al Escenario 1. Esto se debe a que en el caso del Escenario 2, debido a su alta explosividad asociada, parte del glaciar colapsaría sin que exista tiempo para la fusión del glaciar y nieve, y por ende la generación de lahares. De esta forma, los lahares no son el proceso volcánico crítico para el Escenario 2, sino que lo serían los flujos piroclásticos, cenizas, etc. (INH, 2013).

Escenario 3

Finalmente, el Escenario 3 de evento volcánico para la modelación de riesgo de lahares sobre puentes es una erupción pliniana, la cual se estima tiene un periodo de recurrencia de 10.000 años. Para modelar los lahares de este escenario, el INH tuvo dificultades asociadas a la falta de registros y datos de este tipo de erupciones. Es por esto que para estimar el volumen de agua de los lahares se consideró el supuesto de que todo el glaciar y nieve se derretería, descendiendo con los flujos laháricos. Es supuesto se ve fundamentado en la instantánea fusión del glaciar causada por las altas velocidades de los flujos piroclásticos que se generarían en este escenario.

Los volúmenes de los lahares generados en cada cauce del Volcán Villarrica para cada uno de los escenarios modelados en el estudio del INH se muestran en la Tabla 6.3. Estos volúmenes fueron estimados por GEOESTUDIOS (2013). Al analizar los valores de los volúmenes mostrados en la Tabla 6.3 se puede destacar lo mencionado anteriormente, que los volúmenes de los lahares del Escenario 2 son menores a los del Escenario 1, a pesar de que este último se asocia a una erupción de menor explosividad. Además se destaca que los cauces de la Zona 3 son los que presentan lahares de mayores volúmenes para los tres escenarios estudiados, especialmente el Río Turbio.

Tabla 6.3. Volumen de lahares generados en los distintos escenarios de modelación en cada cauce del Volcán Villarrica (GEOESTUDIOS, 2013)

Cuenca	Volumen lahar Escenario 1	Volumen lahar Escenario 2	Volumen lahar Escenario 3
	(10 ⁶ *m ³)	(10 ⁶ *m ³)	(10 ⁶ *m ³)
Estero Challupén	83,82	51,65	476,47
Estero Seco	46,35	8,47	119,12
Río Voipir	29,44	6,09	114,71
Estero Huichatio	17,21	1,32	51,47
Estero Molco	27,12	2,12	69,12
Estero Correntoso	19,94	3,18	91,18
Zanjón Seco	28,50	4,50	114,71
Río Pedregoso	60,41	21,41	277,94
Río Turbio	204,59	270,50	2.273,53
Total	517,38	369,24	3.588,24

Información de Lahares Generados y Puentes Alcanzados

Tal como se señaló anteriormente, una vez definidos los escenarios de evaluación para la aplicación del modelo de riesgo vulcanológico sobre puentes, se debe obtener información asociada a los lahares generados en cada escenarios y los puentes alcanzados por estos. En cuanto a esto último, considerando que se decidió aplicar el modelo de riesgo solo a la sub-red vial de la Zona 1, se puede conocer *a priori* el nombre de los puentes alcanzados por los lahares de los cauces asociados a esta zona. Recordando que la Zona 1 está compuesta por los cauces Zanjón Seco, Correntoso, Molco y Huichatio, se puede conocer los puentes que cruzan dichos cauces mediante información georreferenciada. Asimismo, también se pueden conocer los atributos físicos de estos puentes alcanzados. Los nombres de los puentes alcanzados por los cauces de la Zona 1 junto con los atributos de las infraestructuras son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 6.4. Atributos de puentes que cruzan cauces Zanjón Seco, Correntoso, Molco y Huichatio.

Nº	Puente	Ruta	Cauce	Categoría	Largo (m)	Gálibo (m)	Ancho (m)	Material Infra	Material Super
1	Carmelito	199-CH	Zanjón Seco	Sin Cepa (C1)	18,2	4,2	8,3	Hormigón Armado	Hormigón Armado
2	Zanjón Seco	S-881	Zanjón Seco	Sin Cepa (C1)	20,4	2,8	4,2	Hormigón Armado	Madera
3	Seco	S-887	Zanjón Seco	Con Cepa (C2)	13,2	3,0	4,2	Madera	Madera
4	Correntoso	199-CH	Correntoso	Con Cepa (C2)	72,5	5,5	8,3	Hormigón Armado	Hormigón Armado
5	Molco	199-CH	Molco	Con Cepa (C2)	32,0	4,5	8,3	Hormigón Armado	Hormigón Armado
6	Huichatio	199-CH	Huichatio	Con Cepa (C2)	30,5	3,2	8,3	Hormigón Armado	Hormigón Armado
7	Conquil	S-845	Huichatio	Sin Cepa (C1)	15,3	3,5	4,4	Madera	Madera

Por otro lado, siguiendo los procesos nombrados en la Figura 6.12, se deben conocer los atributos específicos de los lahares generados en cada uno de los tres escenarios estudiados. Dicha información fue obtenida a partir del estudio del Instituto Nacional de Hidráulica (2013), en el cual se modelaron los lahares de estos escenarios con el software FLO-2D. Este estudio permitió determinar las profundidades y velocidad de los lahares de las distintas cuencas de manera espacial. Esto también permite conocer el ancho de los lahares. De esta forma, a través de esa modelación se puede conocer la profundidad, la velocidad y el ancho de los lahares de los cauces asociados a la Zona 1 (Zanjón Seco, Correntoso, Molco y Huichatio), específicamente en la zona de ubicación de los puentes nombrados en la Tabla 5.8, los cuales cruzan dichos cauces. En las figuras 6.14, 6.15 y 6.16 se muestra la modelación en FLO-2D realizada en el estudio del INH para estimar la profundidad y velocidad de los lahares de los tres escenarios en la Zona 1.

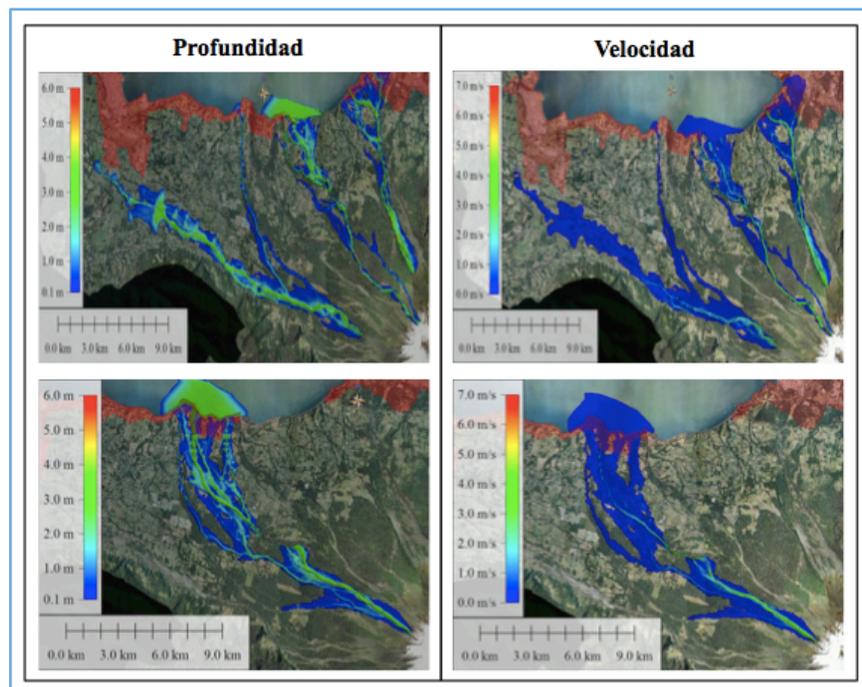


Figura 6.14. Profundidad y velocidad de lahares en cauces Zanjón Seco, Correntoso, Huichatio (Superior) y Molco (Inferior) de Escenario 1 (INH, 2013)

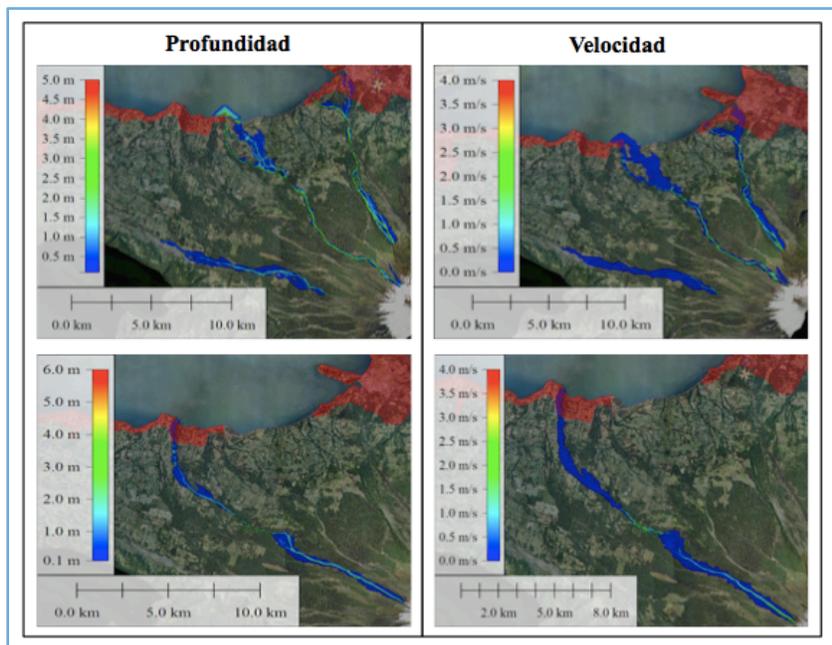


Figura 6.15. Profundidad y velocidad de lahares en cauces Zanjón Seco, Correntoso, Huichatio (Superior) y Molco (Inferior) de Escenario 2 (INH, 2013)

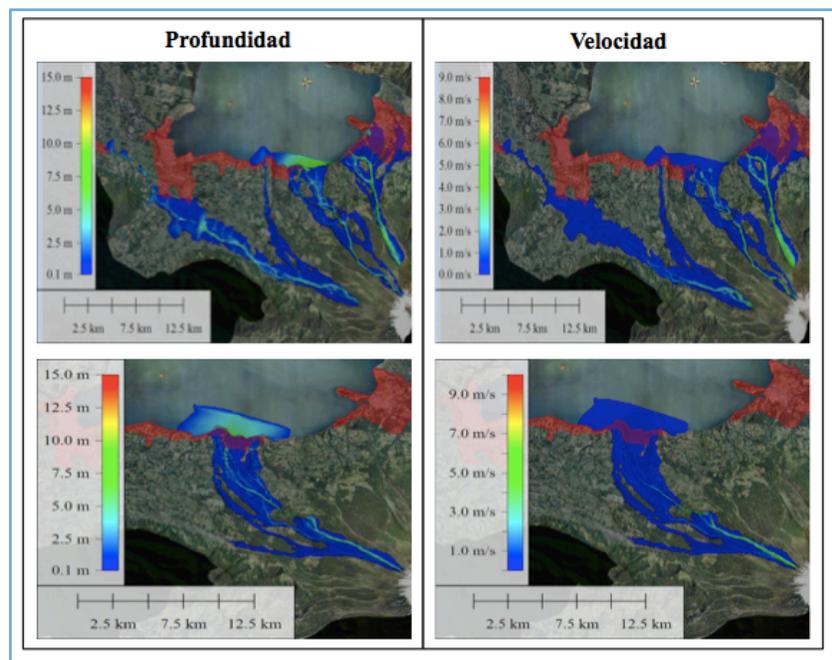


Figura 6.16. Profundidad y velocidad de lahares en cauces Zanjón Seco, Correntoso, Huichatio (Superior) y Molco (Inferior) de Escenario 3 (INH, 2013)

Conociendo la distribución espacial de la profundidad y de la velocidad de los lahares de la Zona 1 generados en cada uno de los escenarios de modelación a partir del estudio del INH, resulta posible conocer estos atributos para el punto específico en donde se encuentran los puentes alcanzados por estos. Junto a esto, también es posible conocer el ancho de los lahares en la zona de los puentes. Todos estos atributos de los lahares en el sector de cada puente estudiado se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.5. Atributos de lahares de Zona 1 en puentes para cada escenario (INH, 2013)

Nº	Puente	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
		Altura lahar (m)	Velocidad lahar (m/s)	Ancho lahar (m)	Altura lahar (m)	Velocidad lahar (m/s)	Ancho lahar (m)	Altura lahar (m)	Velocidad lahar (m/s)	Ancho lahar (m)
1	Carmelito	3,0	2,5	22,0	2,5	1,3	20,0	5,0	3,0	30,0
2	Zanjón Seco	2,8	3,0	28,0	2,3	1,5	22,0	6,0	3,0	30,0
3	Seco	3,0	2,0	18,0	3,0	1,5	15,0	6,5	4,0	40,0
4	Correntoso	3,5	1,0	90,0	2,3	0,5	50,0	5,5	2,0	120,0
5	Molco	3,0	0,5	55,0	0,5	0,3	30,0	4,0	0,5	200,0
6	Huichatio	1,5	0,5	40,0	0,0	0,0	0,0	2,5	1,0	35,0
7	Conquil	1,8	0,5	20,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,5	50,0

Resultados de la Aplicación del Modelo

Contando con toda la información de los lahares generados en cada uno de los escenarios junto con los atributos de los puentes alcanzados por estos flujos resulta posible aplicar el modelo desarrollado. Para esto simplemente se ingresan los atributos del puente como el gálibo, el largo, el número de cepas, el material, etc. Además, también se deben ingresar las características del lahar en el punto del puente, específicamente su profundidad, su velocidad y su ancho. Ingresados estos datos se realizan 1.000 simulaciones para cada puente, lo que permite estimar la probabilidad de falla de cada puente en cada escenario:

Tabla 6.6. Probabilidad de falla de cada puente alcanzado en cada escenario

Nº	Puente	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
		Altura lahar (m)	Prob. Falla	Altura lahar (m)	Prob. Falla	Altura lahar (m)	Prob. Falla
1	Carmelito	3,0	0%	2,5	0%	5,0	100%
2	Zanjón Seco	2,8	0%	2,3	0%	6,0	100%
3	Seco	3,0	100%	3,0	100%	6,5	100%
4	Correntoso	3,5	0%	2,3	0%	5,5	48%
5	Molco	3,0	0%	0,5	0%	4,0	0%
6	Huichatio	1,5	0%	0,0	0%	2,5	0%
7	Conquil	1,8	100%	0,0	0%	1,8	100%

Es importante destacar que la mayoría de los casos presenta una distribución casi binaria, es decir, de 0% o 100%. Esto se debe a que como se está ingresando mucha información determinística al modelo, como el gálibo del puente, el largo del puente, la velocidad del lahar, el ancho del lahar, los resultados del modelo presentan menor incertidumbre. De esta forma, mientras más información determinística del caso propio de evaluación se ingrese como input al modelo, el output expresado como probabilidad de falla tenderá a ser binaria. Este caso extremo puede ser visto como un análisis de escenario determinístico.

Por otro lado, junto con esto también se puede estimar el valor esperado para el momento neto de la infraestructura y la fuerza neta del tablero. Cabe destacar que si el momento neto es negativo ocurre volcamiento en la infraestructura, mientras que si la fuerza neta del tablero es negativa ocurre deslizamiento de este.

Tabla 6.7. Valores esperados de momento neto sobre infraestructura y fuerza neta sobre tablero para cada escenario

Nº	Puente	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
		Mn Estribo (N-m)	Mn Cepa (N-m)	Fn Tablero (N)	Mn Estribo (N-m)	Mn Cepa (N-m)	Fn Tablero (N)	Mn Estribo (N-m)	Mn Cepa (N-m)	Fn Tablero (N)
1	Carmelito	2.848.234	-	441.891	4.175.141	-	441.891	-1.584.693	-	-26.248
2	Zanjón Seco	692.806	-	198.123	2.313.666	-	198.123	-3.029.718	-	-326.571
3	Seco	-3.753.997	-3.972.066	128.197	-3.367.372	-3.506.889	128.197	-10.018.387	-8.915.244	-275.963
4	Correntoso	5.417.420	4.573.132	1.760.282	6.465.028	5.393.813	1.760.282	2.198.882	1.899.406	1.760.282
5	Molco	4.211.076	3.611.826	776.952	5.841.624	4.714.363	776.952	3.537.167	3.178.789	776.952
6	Huichatio	4.149.249	3.586.201	740.532	68.098.171	56.498.947	1.396.913	3.406.522	2.983.886	740.532
7	Conquil	-2.133.536	-	148.592	4.995.040	-	148.592	-2.169.042	-	148.592

Analizando los valores esperados obtenidos con las simulaciones del modelo de riesgo desarrollado se puede destacar el hecho de que el Puente Seco y el Puente Conquil son los puentes más vulnerables de la sub-red evaluada ante los lahares. Esto se debe principalmente al material de estos puentes. Al tratarse de puente con infraestructura y superestructura de madera, estos puentes tienen un peso muy bajo respecto a los de hormigón armado. Esto implica que se tenga un menor momento resistente para el caso del volcamiento de la infraestructura y una menor fuerza de roce para el caso del deslizamiento del tablero. De esta forma, estos puentes tienen una menor oferta ante esta amenaza.

Asimismo, esto se ve aumentado por el hecho de que estos puentes cuentan con una sola pista de tránsito. Esto implica que estos puentes tengan un menor ancho (4,2 metros), y por ende un menor volumen. Esto se traduce lógicamente también en un menor peso, lo que aumenta la vulnerabilidad del puente ante el flujo de lahares por las razones recientemente nombradas.

La alta velocidad de los lahares, que presentan alta densidad, genera que los estribos y las cepas del Puente Seco se vuelquen en los tres escenarios evaluados. Además, el tablero se vería deslizado en el Escenario 3, ya que en los escenarios anteriores el lahar no alcanza el gálibo del puente. En el caso del Puente Conquil, sus estribos se verían volcados en los

Escenarios 1 y 3, mientras que su tablero no sufriría daño alguno. En el caso de los puentes Carmelito y Zanjón Seco, fallarían los estribos y el tablero en el Escenario 3. En los demás escenarios no fallaría nada. Finalmente, los demás puentes no se verían afectados bajo ninguno de los tres escenarios estudiados.

6.3 MODELO DE RIESGO HIDROMETEREOLÓGICO

Los ríos de la zona centro sur del país están sujetos a regímenes pluvio-nivales con crecidas concentradas en los meses del periodo invernal. La variabilidad existente en los caudales permite modelar la socavación en puentes. Para esto se escogió el puente Trabuncura, sobre el río Perquilauquén, ubicado en el límite de las comunas de Parral y San Fabián, entre las regiones del Maule y del Biobío.

El puente Trabuncura (Figura 5.17) es una estructura de hormigón armado. Tiene 116 metros de extensión, 4 metros de ancho y una capacidad de carga máxima de 13 toneladas. El ancho efectivo del cauce es de 35 metros y posee estribos fundados sobre roca y otro con pilotes de hormigón.



Figura 6.17. Imagen del puente Trabuncura

Utilizando el software HEC-RAS se modelaron distintos escenarios para una sección transversal, considerando variaciones en el caudal y pendientes de medias ponderadas del cauce del 1 y 5%, con el fin de parametrizar las curvas de fragilidad considerando condiciones de topografía variable.

Modelación de la altura de agua usando HEC-RAS

Según el modelo general, el primer paso es la generación de los datos de entrada necesarios por cada variable, ya sea de demanda u oferta.

La modelación se realizó en HEC-RAS 5.0.3, software desarrollado por la U.S Army Corps of Engineers. Este proceso consta de 3 pasos principales:

1. Ingreso de la geometría del cauce: sección longitudinal, sección transversal, pendiente, rugosidad.
2. Ingreso de caudales: Se ingresan los caudales de demanda, iguales a la crecida hipotética simulada y los caudales para obtener los datos de diseño del puente, iguales al caudal de un periodo de retorno 100 años y los caudales de aguas normales o medios anuales del cauce.
3. Corrida del programa: se simularon los caudales bajo un régimen permanente, es decir caudal constante sin depender del tiempo.

El ingreso de la geometría considera el ingreso de la sección longitudinal del cauce, y secciones transversales cada una cierta longitud, por ejemplo, de 500 m. Luego se ingresa la sección transversal del cauce, en este caso se considera constante y que mantiene las mismas condiciones de rugosidad a lo largo de la sección longitudinal.

Para el caso de estudio se asumió un largo de cauce igual a 500 m, con una sección transversal dada por la Tabla 6.8 y graficada en la Figura 6.18. Con una rugosidad de Manning de 0.03 y una pendiente media ponderada de 1% y 5%, con el fin de parametrizar distintas curvas de fragilidad.

Tabla 6.8. Sección transversal río Perquilauquen

Estación (m)	Elevación (m)
-30	110
-15	102
-12	100
12	100
15	102
45	102
70	110

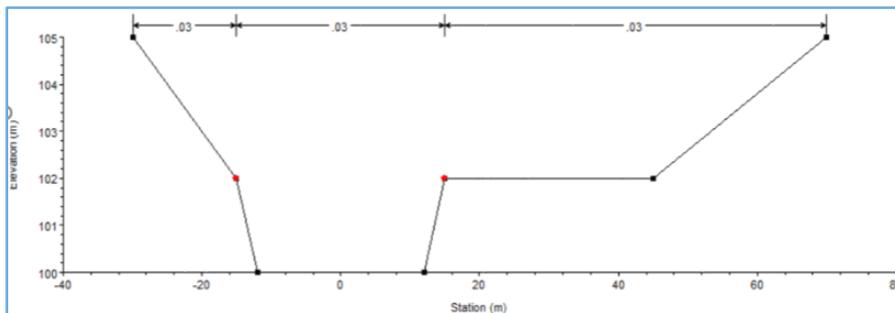


Figura 6.18. Sección transversal del río Perquilauquen

Los caudales ingresados se diferencian para el caso de la función de demanda y la de oferta. Para la primera, se generó un hidrograma hipotético el cual considera caudales, desde los 60 m³/s hasta los 300 m³/s, considerando régimen constante. Por lo que se obtuvo una altura en cada sección por cada caudal.

Para la función de oferta es necesario obtener:

1. La altura de diseño hidráulico del puente, la cual es igual a la altura que se logra con un periodo de retorno de 100 años. Este dato es necesario para ambos submodelos de riesgo, cepas y estribos.

2. Las alturas normales del cauce. La cual se obtiene de la simulación de los caudales medios anuales registrados en el cauce. Este dato es solamente necesario para la modelación de riesgo en estribos.

El caudal necesario para la altura de diseño hidráulico, se obtuvo del análisis de los caudales máximos anuales de los últimos 40 años, en el periodo 1970- 2009 (Tabla 6.9), disponibles en la estación del río Perquilauquen en San Manuel (DGA, 2016). A ellos se les realizó un análisis probabilístico para la determinación del caudal con un período de retorno de 100 años. Usando el test de hipótesis Chi-Cuadrado, con un 95% de confianza, se obtuvo una distribución Gumbel era la que mejor representaba los datos, (Ver Tabla 6.10), la cual presenta los caudales para distintos periodos de retorno.

Tabla 6.9. Caudales máximos anuales en el periodo 1970- 2009 en la estación San Manuel del río Perquilauquen (DGA, 2016)

Año	Qmax,anual (m3/s)	Año	Qmax,anual (m3/s)	Año	Qmax,anual (m3/s)	Año	Qmax,anual (m3/s)
1970	154.41	1980	122.09	1990	73.4	2000	154.41
1971	203.76	1981	152.71	1991	138.32	2001	203.76
1972	90.87	1982	122.18	1992	151.97	2002	90.87
1973	96.17	1983	73.93	1993	280.01	2003	96.17
1974	66.20	1984	121.49	1994	71.50	2004	66.20
1975	113.25	1985	83.16	1995	103.4	2005	113.25
1976	143.36	1986	127.02	1996	45.91	2006	143.36
1977	56.42	1987	113.73	1997	163.03	2007	56.42
1978	96.66	1988	81.29	1998	15.74	2008	96.66
1979	69.9	1989	54.7	1999	81.29	2009	69.9

Tabla 6.10. Caudales por periodo de retorno a partir de una distribución Gumbel

Período de retorno (años)	Caudal (m ³ /s)
2	101
5	151
10	184
25	225
50	256
1001	287
200	317

Los caudales medios anuales se obtuvieron del registro de caudales medios mensuales para un total de 40 años de datos, en el mismo periodo que el análisis del caudal de retorno (1970-2009), y en la misma estación fluviométrica (San Manuel en Perquilarquen). Este análisis se realizó calculando el caudal medio de cada año, es decir la media de los 12 meses registrados en la estación. Luego se procede a la simulación de los 40 caudales medios anuales (disponibles en la Tabla 6.11), considerando un régimen constante, con el fin de obtener las alturas de agua para cada. Finalmente se realiza un análisis de distribución de probabilidades con estas alturas y se obtiene la altura normal de agua en el cauce, según la distribución que mejor se ajuste a los datos.

¹ $Q_{T=100 \text{ años}} = 287 \text{ (m}^3\text{/s)}$, caudal para diseño hidráulico de puentes en Chile según el Manual de Carreteras de Chile, 3.702.2 (MOP, 2016)

Tabla 6.11. Caudales medios anuales en el periodo 1970- 2009 en la estación San Manuel del río Perquilauquen (Dirección General de Aguas)

Año	Qmedio,Anual (m3/s)						
1970	22.975	1980	22.2	1990	18.865	2000	22.975
1971	14.59	1981	16.495	1991	21.35	2001	14.59
1972	37.135	1982	39.965	1992	25.46	2002	37.135
1973	13.65	1983	15.915	1993	18.89	2003	13.65
1974	21.965	1984	33.96	1994	1.995	2004	21.965
1975	23.705	1985	27.145	1995	16.115	2005	23.705
1976	30.03	1986	25.34	1996	6.785	2006	30.03
1977	11.58	1987	17.46	1997	42.18	2007	11.58
1978	10.59	1988	14.13	1998	5.99	2008	10.59
1979	30.53	1989	10.275	1999	12.605	2009	30.53

La función de estado límite G, que se ingresa al software Vap (IBK, 1995) se muestra de forma esquematizada en la Figura 6.19.

- Función de estado límite:
 - Oferta
 - Demanda
 - Variables y sus distribuciones

Figura 6.19. Esquema de uso Vap

La función de estado límite se ingresa en el recuadro superior de la ventana, donde se indica con un óvalo de color verde la función de oferta (G_1), y con un óvalo de color rojo la función de demanda (G_2), con la que se forma la función $g(X) = G_1 - G_2 = f_1(X) - f_2(X)$.

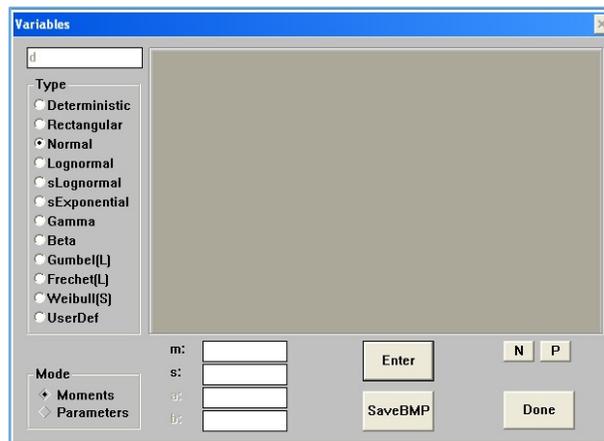


Figura 6.20. Ventana de ingreso de variables en Vap

Las distribuciones asociadas a las variables de la función $g(X)$ y sus parámetros se ingresan en la ventana de la Figura 6.20, y se muestran en el esquema de uso de Vap en la circunferencia indicada como variables y sus distribuciones. Los datos de entrada, para la función de estado límite en el caso de la socavación en cepas se muestran en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12. Datos de entrada para el modelo de socavación en cepas

Demanda			
Variable	Distribución	Media	Desviación estándar
Altura de agua	Normal	Variable*	0.2
Numero de Froude	Gumbel	0.695	0.105
Ancho de cepa	Determinística	1	-
Factores de corrección	Determinística	2.246	-
Oferta			
Variable	Distribución	Media	Desviación
Altura de agua	Determinística	2.5	-
Numero de Froude	Normal	0.8	0.006
Ancho de cepa	Determinística	1	-
Factores de corrección	Determinística	2.042	-

Las variables que influyen en la función de estado límite se ingresan como una distribución de probabilidades al software, que permite escoger entre 11 distintas. La distribución de los datos obtenidos desde HEC-RAS se obtiene por medio del software EasyFit 5.5 (Mathwave,2010). Como Vap no tiene todas las distribuciones que trabaja EasyFit, se escoge la que entregué mejores indicadores y además esté permitida por Vap. Para el caso de las variables que son determinísticas, éstas son consideradas como una función palo.

En la Tabla 6.12 la variable altura de agua aparece con una media variable. Esto es debido a que para cada media calculada en la función de estado límite, el software entrega un punto de la curva de fragilidad. Para el caso de la socavación en cepas la altura de agua varía cada 0.1 metros, desde 0.5 a 7 metros para una pendiente media ponderada de 5%, y cada 0.2 metros, desde 0.5 a 7.5 metros para la pendiente de 1 %. Para el caso de socavación en

estribos el procedimiento es análogo al de cepas. Los datos de entrada se muestran en la Tabla 6.13

Tabla 6.13. Datos de entrada para el modelo de socavación en estribos

Demanda			
Variable	Distribución	Media	Desviación estándar
Altura de agua	Normal	Variable*	0.2
Altura de aguas normales	Normal	0.53	0.155
Caudal específico	Beta	5.3246	3.0004
Caudal en contracción	Rectangular	3.6879	2.032
Oferta			
Variable	Distribución	Media	Desviación estándar
Altura de agua	Determinística	2.5	-
Factores de corrección	Determinística	1.105	-

6.4 CASOS DE ESTUDIO MODELO DE MITIGACIÓN

Para lograr validar el modelo de mitigación, es necesario probar diferentes escenarios de análisis, relacionados con los modelos de evaluación de riesgo que este proyecto propone. De ese modo será posible en la etapa 2 del proyecto FONDEF acoplar los modelos de evaluación de riesgo con los modelos de mitigación. La Figura 6.21 resume los escenarios posibles a considerar en la validación a pequeña escala. Por otro lado, los escenarios de modelación corresponden a casos reales presentes en la red vial de Chile, de modo de analizar en condiciones reales los modelos que se proponen.

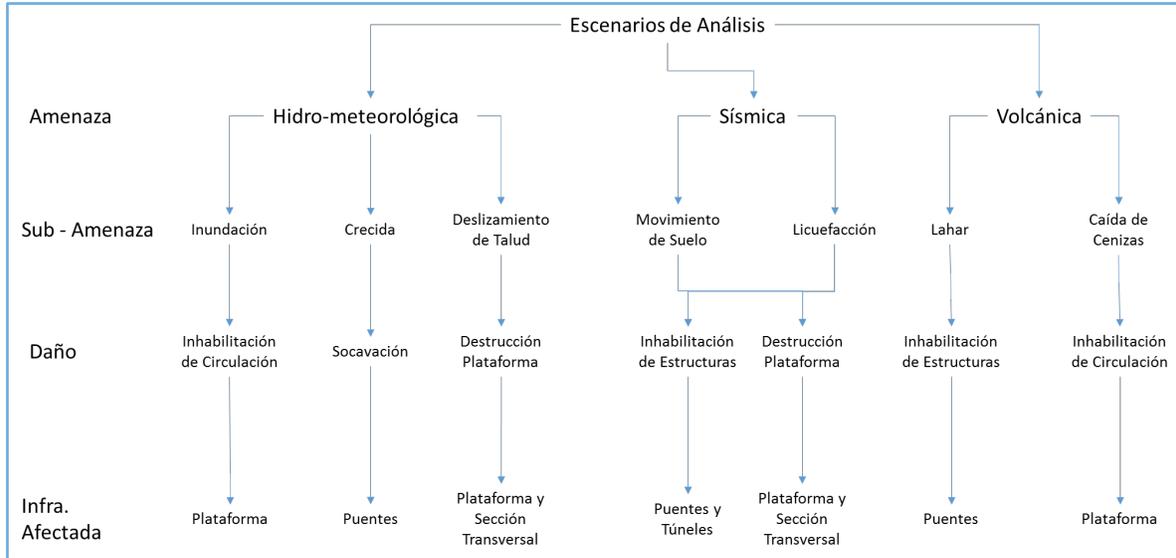


Figura 6.21. Escenarios de aplicación a pequeña escala

De la Figura 6.21, se han seleccionado los siguientes casos de estudio:

- Caso de estudio 1: Amenaza hidrometeorológica – inundación – inhabilitación de plataforma – plataforma y deslizamiento de talud – destrucción de plataforma
- Caso de estudio 2: Amenaza hidrometeorológica – crecida – socavación – efecto sobre puentes
- Caso de estudio 3: Amenaza Sísmica – licuefacción – destrucción de plataforma – plataforma
- Caso de estudio 4: Amenaza Volcánica – lahar – inhabilitación de estructuras – puentes

6.4.1 Mitigación de Riesgos por Inundación y Deslizamiento de Taludes

6.4.1.1 Descripción General del Caso de Estudio

La región del Biobío está constantemente afectada por eventos naturales. Se aplica el modelo a un tramo de la ruta 156 de la Provincia de Concepción, el cual conecta las comunas de San Pedro de la Paz y Santa Juana, posee la característica especial de bordear

el río Biobío, la alta presencia de taludes de cortes adyacentes a la calzada y la existencia de solo una ruta alternativa cercana.

La ruta de la Madera (Ruta 156), posee una longitud de 108,5 km, cuyo eje vial principal conecta a las comunas de San Pedro de la Paz y Concepción, con las comunas de Santa Juana, Nacimiento y Negrete, al sur oriente de la capital penquista.



Figura 6.22. Segmento del tramo Concepción-Santa Juana de la ruta de la Madera

El camino es de pavimento asfáltico con una pista por sentido de 3,5 m de ancho, bermas de doble tratamiento de ancho medio de 1 m y sobre ancho medio de 0,5 m. La velocidad de diseño es de 70 km/h y la velocidad máxima legal permitida es de 100 km/h.

En un tramo que une las comunas de San Pedro de la Paz y Santa Juana (línea de color amarillo en la Figura 6.23) se presenta un evento recurrente de origen hidrometeorológico que interrumpe el tránsito, manifestándose en promedio una vez cada 3 años.

A 24,5 km de San Pedro de la Paz, mostrado con una X de color rojo en la Figura 6.23, se ve interrumpido el tránsito en un segmento de 800 m de carretera. El evento produce dos consecuencias sobre la calzada, las cuales se describen en la Tabla 6.14.

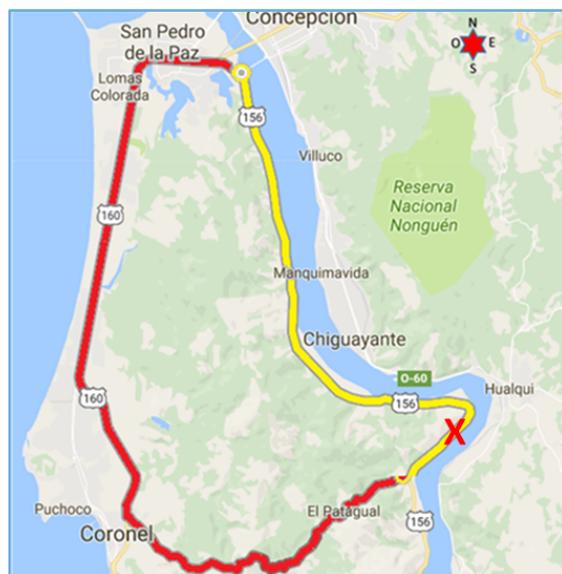


Figura 6.23. Tramo de la ruta 156 afectado por eventos HM

Tabla 6.14. Consecuencias del evento natural sobre la ruta 156

Consecuencias del evento	Efectos sobre la infraestructura	Efectos sobre la operación	Tiempo de duración
Crecida	Inundaciones de 300 m de toda la calzada por puntos bajos del trazado	Corte total del tránsito, necesidad de re ruteo por ruta O-852 y 160	6 horas
Deslizamientos	Derrumbes de 1250 m³ de material en 500 m de longitud	Inhabilitación de una pista, regulación de paso con bandereros	Dependiente de la duración de remoción de derrumbes

Debido a que las consecuencias sobre la infraestructura producto del evento ocurren de forma simultánea, las condiciones de operación que imperan son las producidas por las inundaciones y una vez que el agua abandona la calzada es posible la utilización de la pista sobrante.

El tramo de la ruta 156 posee una extensión de 26,8 km y va desde San Pedro de la Paz hasta El Patagual. La ruta alternativa posee una longitud de 43,4 km, utilizando 17,9 km de la ruta O-852 y 25,5 km de la ruta 160.

Del censo de vialidad del año 2014, actualizado al 2016, se obtuvo un Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) de 11.775 vehículos/día-año, con una distribución direccional de un 75% para la dirección Concepción-Santa Juana y un 25% para la dirección Santa Juana-Concepción. La tasa de crecimiento del tráfico es de un 8% anual y el porcentaje de vehículos pesados es del 15,6%. La ruta O-852 y la 160, necesarias para realizar el re ruteo poseen un TMDA de 1.460 y 43.909 vehículos/día-año, respectivamente.

6.4.1.2 Análisis de Resultados

El mayor impacto sobre la velocidad promedio de viaje en la ruta 156 lo producen las inundaciones al imposibilitar el tránsito, luego la operación con regulación de paso con una reducción promedio de un 57% respecto de la operación normal, mientras que la reducción de ancho de un 23%.

El mayor porcentaje de demoras corresponde a las incurridas por operación con regulación de paso, puesto que induce las peores condiciones operacionales, tal como lo muestra la Tabla 6.15 para cada año. Es importante notar que el tiempo de regulación de paso es un orden de magnitud menor que el de reducción de velocidad.

Tabla 6.15. Distribución porcentual de las demoras incurridas por operación deficiente para cada estrategia

	Distribución porcentual de las demoras para cada estrategia de intervención (%)											
	EB			E1			E2			E3		
Condición Operacional	2016	2018	2020	2016	2018	2020	2016	2018	2020	2016	2018	2020
Regulación de paso	62	70	83	76	100	100	37	-	-	70	-	-
Reducción de velocidad		-	-	24	-	-	29	-	-	30	-	-
Re ruteo	38	30	17	-	-	-	34	100	100	-	-	-

La operación y sus partidas que generan el mayor costo para la agencia vial son los por construcción de rejas de contención, luego los de construcción de defensas fluviales, luego los de limpieza de drenaje y por último de remoción de derrumbes, tal como lo muestra la Tabla 6.16.

Tabla 6.16. Distribución porcentual del CAV por las operaciones y partidas que forman cada estrategia

	Distribución porcentual del CAV para cada estrategia de intervención (%)											
	EB			E1			E2			E3		
	2016	2018	2020	2016	2018	2020	2016	2018	2020	2016	2018	2020
Operación												
Remoción de derrumbes	36	36	36	17	36	36	-	-	-	-	-	-
Limpieza de drenaje	64	64	64	29	64	64	20	100	100	10	100	100
Defensas fluviales de riberas	-	-	-	54	-	-	-	-	-	29	-	-
Rejas de contención de derrumbes	-	-	-	-	-	-	80	-	-	61	-	-

Las tres alternativas son socialmente rentables, cuya razón es que el impacto en las mejoras operacionales producto de la aplicación de actividades preventivas es mayor al gasto incurrido por la agencia vial.

La aplicación de la estrategia E1 produce un aumento de la resiliencia de un 20% con respecto a la base; la E2 de un 400%; y la E3 un aumento de resiliencia total, es decir que los eventos naturales no afectan a la infraestructura. Esto se debe a que la E1 solo mitiga las 6 horas de inundaciones, la E2 las 52 de derrumbes y la E3 una mitigación total, es decir el efecto de las inundaciones y los derrumbes.

El costo marginal de la agencia vial en aumentar en 1% la resiliencia es de 2,3 millones de pesos por millón invertido para la E1; 0,2 para la E2 y sin costo para la E3. Estos costos se

hacen relevantes al momento de verse enfrentado, por ejemplo, a la reasignación de recursos.

El beneficio marginal social que produce la agencia vial por inversión en estrategias que mejoren la resiliencia es de 0,78 millones de pesos por millón invertido para la E1, 1,58 para la E2 y 1,6 para la E3. Esto muestra que realizar mitigación total dobla el beneficio marginal con respecto a la E1 y en un 1,5% con la E2.

La razón beneficio-costos muestra la relación del beneficio social que se obtiene por el costo social en el que se incurre por conceptos de inversión y costos operacionales. Por cada millón de pesos la E1 obtiene un beneficio de 0,097 millones, la E2 0,48 y la E3 0,92.

La E3 obtiene un producto VidRj máximo, debido a que se alcanza la resiliencia máxima o mitigación total; la E1 de 0,12 debido a que tiene bajo VSAN, alto CAE y un aumento de solo un 20% en la resiliencia; y la E2 de 2,43 debido a que tiene un mayor VSAN, un menor CAE y un aumento del 400% de la resiliencia con respecto a la alternativa uno.

6.4.2 Mitigación de Riesgos de Socavación en Puentes

6.4.2.1 Descripción General del Caso de Estudio

La región de Arica y Parinacota está afectada por el invierno altiplánico, cuya duración es entre los meses de diciembre y marzo. Se aplica el modelo a un tramo de la ruta internacional 11-CH, la cual une Bolivia con Chile, conectándose con la Ruta 5 en la Ciudad de Arica.

La ruta 11-CH posee una longitud de 192,2 km. El camino es de pavimento asfáltico con una pista por sentido de 3,5 m de ancho, bermas de ancho medio de 1,5 m y sobre ancho medio de 0,5 m. La velocidad de diseño es de 90 km/h y la velocidad máxima legal permitida es de 100 km/h.



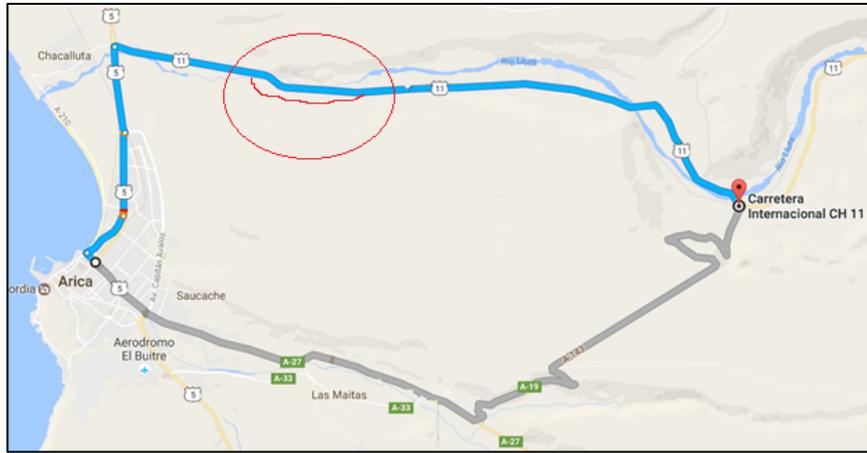
Figura 6.24. Puente Santa Lucía de la ruta 11-CH (Fuente: google maps)

En febrero del 2001 el puente Santa Lucía (Ver Figura 6.24), ubicado a 6 km de la conexión de la ruta 11-CH con la ruta 5 (al norte de Arica), de una extensión de 23 m, con cepas de hormigón, vigas de acero y carpeta de hormigón, sufrió el colapso total debido a la socavación producida por la crecida del río Lluta.

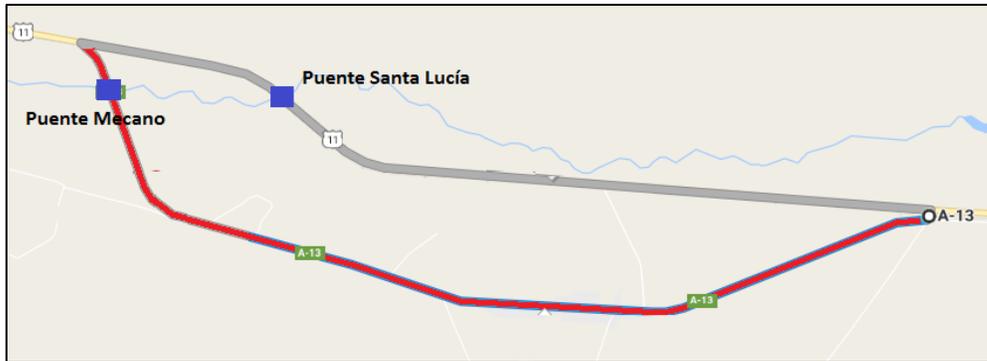
La medida adoptada por la Dirección de Vialidad fue la reconstrucción total del puente, sin aumento de robustez por un monto aproximado de 290 millones de pesos, con la colocación de un puente ecano.

En color celeste, en la Figura 6.25a, se muestra el tramo afectado por el colapso del puente Santa Lucía al verse interrumpido totalmente el tránsito, de una extensión de 35,6 km, que incluye la ruta 11-CH (este a oeste) y la ruta 5 (norte a sur). En color gris, se muestra una vía alternativa, de extensión 37,6 km, que incluye la ruta A-143, A-191 y A-27.

En la Figura 6.25b, se muestra un acercamiento al círculo de color rojo de la Figura 6.25a, donde se muestra en color azul la ubicación del puente Santa Lucía y del puente mecano instalado, en color gris el tramo afectado de la ruta 11-CH, de extensión 4,1 km, y en color rojo una vía alternativa (A-13) local, de bajo estándar, con carpeta de tierra y una extensión de 4,7 km.



(a) Tramo de la ruta 11-CH afectada



(b) Ubicación del puente Santa Lucía en la ruta 11-CH y mecano en ruta alternativa

Figura 6.25. Emplazamiento de la interrupción de tráfico y de la alternativa

Con los antecedentes, se supone para el caso de estudio, que ocurre un evento de similares características, con iguales consecuencias sobre la infraestructura que el año 2001, las cuales se muestran en la Tabla 6.17.

Tabla 6.17. Consecuencias del evento natural sobre la ruta 11-CH

Tipo de evento	Efectos sobre la infraestructura	Efectos sobre la operación	Tiempo de duración
Crecida	Colapso total del puente Santa Lucía (23 m)	Corte total del tránsito, necesidad de instalación de puente mecano y/o re ruteo por ruta alternativa.	Dependiente de la instalación del puente mecano y de la reconstrucción del puente.

Del plan nacional de censos de vialidad del año 2015, actualizado al 2016, se obtuvo un Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) de 4.097 vehículos/día-año, con una distribución direccional de un 50% por sentido. La tasa de crecimiento es de un 1% anual y el porcentaje de vehículos pesados es del 45,71%. La ruta A-141/A-191 y la A-27, necesarias para realizar el re ruteo poseen un TMDA de 4.099 y 11.015 vehículos/día-año, respectivamente. La ruta A-13 no posee datos de tránsito, ya que es bajo, utilizada solamente por residentes del lugar.

La formulación de las estrategias de intervención pasa por integrar el fenómeno físico al proceso decisional. Si bien, el invierno altiánico se presenta todos los años, las consecuencias sobre la infraestructura y, particularmente sobre el puente Santa Lucía, no se manifiestan desde el año 2001. Por lo tanto, la experiencia muestra que, para un horizonte de 5 años, el evento se presenta a lo más una vez.

Las estrategias a evaluar se formulan bajo la lógica de qué pasaría si se mitiga antes de que ocurra el evento, a fin disminuir las consecuencias sobre el único evento en el horizonte de evaluación.

6.4.2.2 Análisis de Resultados

El evento natural y las estrategias a aplicar solo involucran el re ruteo sobre el tramo de la ruta 11-CH, por lo que las velocidades de operación son dependientes de las rutas alternativas disponibles. El mayor impacto sobre la velocidad promedio de viaje lo experimenta la ruta A-13 no pavimentada con 48,6 km/h y luego la ruta A-27 por tratarse de una zona poblada con alta densidad de accesos.

El mayor porcentaje incurrido por demoras al tener que utilizar rutas alternativas corresponde al re ruteo A-143, A-191 y A-27, tal como lo muestra la Tabla 6.18

Tabla 6.18. Distribución porcentual de las demoras incurridas por re ruteo para cada estrategia

	Distribución de las demoras para cada estrategia de intervención (%)		
	EB	E1	E2
Condición Operacional	2016	1016	2016
Re-ruteo A-13	46	19	100
Re-ruteo A-143, A-191, A-27	54	81	0

El mayor porcentaje del CAV lo tiene la reconstrucción del puente Santa Lucía para la EB, pero la pavimentación con doble tratamiento supera la reconstrucción del puente si se demanda esta operación, tal como lo muestra la Tabla 6.19.

Tabla 6.19. Distribución porcentual del CAV por las operaciones y partidas que forman cada estrategia

	Distribución porcentual del CAV para cada estrategia de intervención (%)		
	EB	E1	E2
Operación	2016	2016	2016
Doble tratamiento superficial A-13	-	59	86
Colocación puente mecano	1	1	-
Reconstrucción puente Santa Lucía	99	40	-
Construcción de vado	-	-	1
Sábanas de gaviones	-	-	13

Solo la E2 es socialmente rentable, debido a que la inversión en la construcción de sábanas de gaviones es inferior a la reconstrucción. Además, la mejora en la ruta A-13 permite disminuir los costos de operación al momento de reponer los gaviones dañados. Por lo tanto, el análisis de los beneficios se realiza sólo para la E2.

La aplicación de la E1 iguala la resiliencia de la base y la E2 la mejora en un 429%. Esto se debe a que la E1 demanda el mismo tiempo de recuperación para la reconstrucción del puente y la E2 solo 521 horas.

El costo marginal de la agencia vial en aumentar en 1% la resiliencia es de 0,52 millones de pesos por millón invertido para la E2. Estos costos se hacen relevantes al momento de verse enfrentado, por ejemplo, a la reasignación de recursos.

El beneficio marginal social que produce la agencia vial por inversión en estrategias que mejoren la resiliencia es de 1,81 millones de pesos por millón invertido para la E2.

La razón beneficio-costos muestra la relación del beneficio social que se obtiene por el costo social en el que se incurre por conceptos de inversión y costos operacionales. Por cada millón de pesos la E2 obtiene un beneficio de 0,71 millones.

La E2 obtiene un producto VidRj de 3,76, debido a que se mejora la resiliencia en un 429% y se obtiene una razón beneficio costo de 0,71.

6.4.3 Mitigación de Riesgos por Sismos en la Plataforma

6.4.3.1 Descripción General del Caso Estudio

Chile está afectado constantemente a eventos sísmicos de magnitudes diferentes. Se aplica el modelo a un tramo de la ruta 5 Sur, en la Región de los Lagos, a la altura del lago Tarahuín (km 1217). La ruta 5 Sur posee una longitud de más de 1000 km, uniéndose desde la región Metropolitana a la región de Los Lagos. El camino, en el sector afectado, es de pavimento de hormigón, de una pista por sentido de 3,5 m de ancho, bermas de ancho medio de 1 m y sobre ancho medio de 0,5m. La velocidad de diseño es de 70 km/h y la velocidad máxima legal permitida es de 100 km/h.



Figura 6.26. Ruta 5 Sur, altura Lago Tarahuín (Fuente: google maps)

El 26 de diciembre del año 2016, un terremoto de magnitud 7,6 Richter azotó el sur del país. Como consecuencia, un terraplén, de aproximadamente 100 m de longitud, de la ruta 5 Sur colapsó, cortando el tránsito. La causa principal de este deterioro fue que el terraplén está ubicado sobre una zona pantanosa, correspondiente al Lago Tarahuín (ver Figura 6.27a).

La medida adoptada por la Dirección de Vialidad fue la rehabilitación del tránsito con maquinaria, dejando un camino de tierra sin restricción de peso, pero con restricción de velocidad (ver Figura 6.27b). Posteriormente se realizó el asfaltado del tramo afectado.



Figura 6.27. (a) Izquierda. Consecuencias del terremoto sobre el terraplén de la ruta 5 Sur. (b) Derecha. Rehabilitación del tránsito en el terraplén de la ruta 5 sur

En la Figura 6.28 se muestra: con una cruz roja la ubicación de la caída del terraplén, en celeste el tramo de la ruta 5 sur afectada y, en rojo y amarillo las rutas disponibles para realizar el re ruteo.

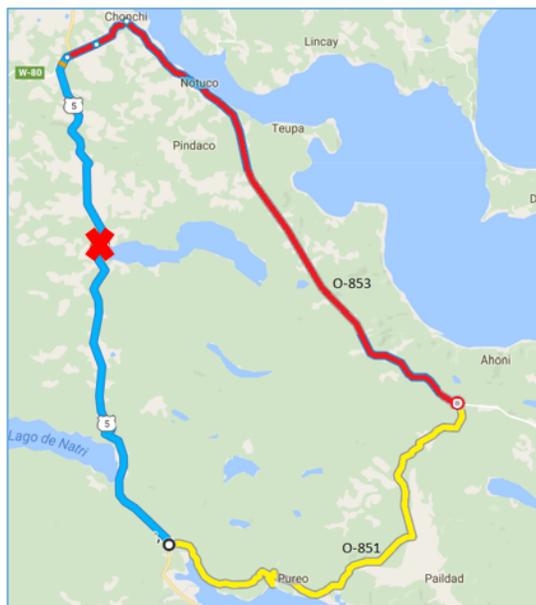


Figura 6.28. Ruta 5 Sur, tramo Castro-Quellón (Fuente: google maps)

Con los antecedentes, se supone para el caso de estudio, que ocurre un evento de similares características, con iguales consecuencias sobre la infraestructura que el año 2016, las cuales se muestran en la Tabla 6.20.

Tabla 6.20. Consecuencias del evento natural sobre la ruta 11-CH

Tipo de evento	Efectos sobre la infraestructura	Efectos sobre la operación	Tiempo de duración
Sismo	Colapso total de terraplén	Corte total del tránsito, necesidad de reconstrucción total del pavimento	Dependiente de la duración de la reconstrucción

Del censo de vialidad del año 2015, actualizado al 2016, se obtuvo un Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) de 1999 vehículos/día-año, con una distribución direccional de un 50% por

sentido. La tasa de crecimiento es de un 2% anual y el porcentaje de vehículos pesados es del 25,71%.

La formulación de las estrategias de intervención pasa por integrar el fenómeno físico al proceso decisional. La ocurrencia de terremotos no se puede predecir, pero la experiencia muestra que la recurrencia, para un mismo lugar, es mayor a 5 años.

Las estrategias a evaluar se formulan bajo la lógica de qué pasaría si se mitiga antes de que ocurra el evento, a fin disminuir las consecuencias sobre el único evento en el horizonte de evaluación.

6.4.3.2 Análisis de Resultados

El evento natural y las estrategias a aplicar involucran re ruteo y regulación de paso para la EB, y reducción de velocidad para las alternativas. El mayor impacto sobre la velocidad promedio de viaje lo experimenta regulación de paso con 23,8 km/h y luego la reducción de velocidad con 40 km/h. El mayor porcentaje incurrido por demoras corresponde a la regulación de paso y solo se requiere reducción de velocidad en las alternativas, tal como lo muestra la Tabla 6.21.

Tabla 6.21. Distribución porcentual de las demoras incurridas condición operacional para cada estrategia

	Distribución porcentual de las demoras para cada estrategia de intervención (%)		
	EB	E1	E2
Condición Operacional	2016	1016	2016
Re- ruteo	44	-	-
Regulación de paso	56	-	-
Reducción de velocidad	-	100	100

El mayor porcentaje del CAV lo tiene la reconstrucción del pavimento para la EB y E2, sin embargo, el costo mayor es por la construcción del puente en reemplazo del terraplén, tal como lo muestra la Tabla 6.22.

Tabla 6.22. Distribución porcentual del CAV por las operaciones y partidas que forman cada estrategia

	Distribución porcentual del CAV para cada estrategia de intervención (%)		
	EB	E1	E2
Operación	2016	2016	2016
Remoción de derrumbes	0,49	-	-
Reconstrucción de la plataforma	0,72	-	-
Reconstrucción del pavimento	98,78	-	95,43
Colocación de puente mecano	-	0,24	-
Construcción de puente	-	99,76	-
Construcción de vado	-	-	0,27
Mejora de terraplén	-	-	4,29

Solo la E2 es socialmente rentable, debido a que la inversión en mejoramiento del terraplén es menor a la construcción de un puente. Por lo tanto, el análisis de los beneficios se realiza solo para la E2. Ambas estrategias, E1 y E2, alcanzan la mitigación total, es decir la resiliencia máxima. El costo marginal de la agencia vial en aumentar en 1% la resiliencia es 0 por millón invertido para la E2.

El beneficio marginal social que produce la agencia vial por inversión en estrategias que mejoren la resiliencia es de 31,24 millones de pesos por millón invertido para la E2.

La razón beneficio-costo muestra la relación del beneficio social que se obtiene por el costo social en el que se incurre por conceptos de inversión y costos operacionales. Por cada millón de pesos la E2 obtiene un beneficio de 1,11 millones.

La E2 obtiene un producto VidRj de máximo, debido a que se alcanza la mitigación total con el mejoramiento del terraplén.

6.4.4 Mitigación de Riesgos Volcánico de Lahares en Puentes

6.4.4.1 Descripción General del Caso de Estudio

Chile está afectado recurrentemente a erupciones volcánicas. Los lahares son flujos de escombros originados en los volcanes y que fluyen hacia las tierras bajas adyacentes, generando consecuencias de pérdida de infraestructura principalmente en puentes. Se aplica el modelo a un tramo de la ruta 225-CH, en la región de Los Lagos, a la altura del puente Río Blanco.

La ruta 225-CH es una ruta internacional que va desde Puerto Varas al Paso Fronterizo Pérez Rosales. El camino es de pavimento asfáltico, de una pista por sentido de 3,5 m de ancho, bermas de ancho medio de 0,5 m y sobre ancho medio de 0,5 m. La velocidad de diseño es de 70 km/h y la velocidad máxima legal permitida es de 100 km/h.



Tabla 6.29. Ruta 225 CH, camino a Ensenada (Fuente: google maps)

Entre el 20 y 30 de abril del año 2015, el volcán Calbuco hizo erupción a través de tres pulsos eruptivos. Se generaron diversos daños sobre la infraestructura vial, la ganadería y la agricultura. El caso de estudio consiste en analizar la destrucción total del puente Río Blanco, ubicado en el kilómetro 26,6. Corresponde a un puente de 1 pista por sentido, con fundaciones, vigas y carpeta de hormigón, y 27,9 m de largo (ver Figura 6.30).

La medida adoptada por la dirección de vialidad fue la construcción de un vado para habilitar el tránsito con restricción de velocidad y la reconstrucción del puente por un monto de 464 millones de pesos.



Tabla 6.30. Efecto del Lahar del volcán Calbuco sobre el Puente Río Blanco



Tabla 6.31. Obras de reconstrucción del puente Río Blanco (Fuente: www.eha.cl)

En la Figura 6.32, En gris se muestra la ruta 225-CH en el tramo que une Puerto Varas y Ensenada, con un cuadrado de color celeste, se muestra la ubicación del puente Río Blanco. No existen rutas alternativas cercanas al lugar.

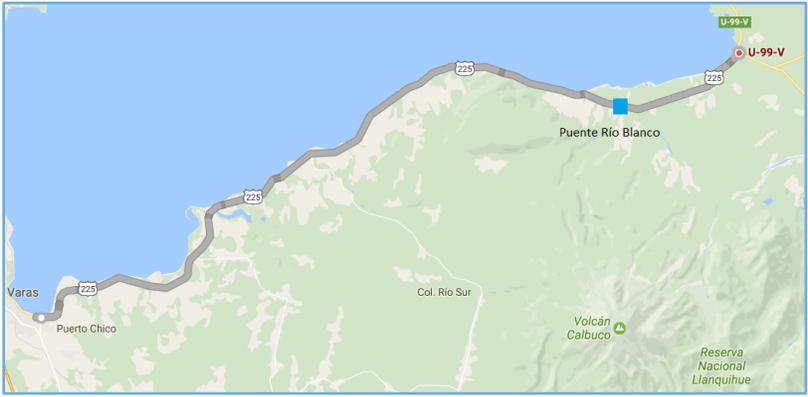


Tabla 6.32. Tramo ruta 225-CH Puerto Varas – Ensenada (Fuente: google maps)

Con los antecedentes, se supone para el caso de estudio, que ocurre un único evento de similares características, con iguales consecuencias sobre la infraestructura que el año 2015, las cuales se muestran en la Tabla 6.23.

Tabla 6.23. Consecuencias del evento natural sobre el puente Río Blanco

Tipo de evento	Efectos sobre la infraestructura	Efectos sobre la operación	Tiempo de duración
Erupción	Colapso total del puente Río Blanco	Corte total del tránsito, necesidad de reconstrucción del puente	Dependiente de la duración de la reconstrucción

Del censo de Vialidad del año 2014, actualizado al 2016, se obtuvo un Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) de 1689 vehículos/día-año, con una distribución direccional de un 55% en dirección a Puerto Varas. La tasa de crecimiento es de un 5% anual y el porcentaje de vehículos pesados es del 21,55%.

La formulación de las estrategias de intervención pasa por integrar el fenómeno físico al proceso decisional. La erupción de tipo Hawaiano posee una recurrencia que va de los 5 a 10 años, siendo la erupción con el periodo de retorno más pequeño (DOH, 2013).

Las estrategias a evaluar se formulan bajo la lógica de qué pasaría si se mitiga antes de que ocurra el evento, a fin disminuir las consecuencias sobre el único evento en el horizonte de evaluación. Además, se incluye un segundo criterio: el periodo en el que ocurre el evento y, por ende, en el que se aplican las estrategias. La erupción del año 2015 fue en abril. Los datos del censo de vialidad muestran que el flujo vehicular es 5 veces inferior al de verano (diciembre-marzo, 8.927 veh/día). Por lo tanto, se analizará qué hubiese ocurrido con la rentabilidad de las estrategias preventivas si se hubiesen aplicado en periodos de flujo bajo y el evento ocurrido en verano.

6.4.4.2 Análisis de Resultados

El evento natural y las estrategias a aplicar involucran la no realización del viaje y regulación de paso por construcción de vado, y reducción de velocidad por operación en vado mientras duran los trabajos de construcción del puente Río Blanco. El mayor impacto lo produce la no realización del viaje, seguido de la regulación de paso con 22,9 km/h para los trabajos en otoño y 18,5 km/h en verano, luego la reducción de velocidad con 35 y 30 km/h, respectivamente. El mayor porcentaje de las demoras lo lleva la no realización del viaje, aunque solo demande 21 horas en relación a las 1333 de reconstrucción del puente, tal como lo muestra la Tabla 6.24

Tabla 6.24. Distribución porcentual de las demoras incurridas por condición operacional para la E1

	Distribución porcentual de las demoras para cada estrategia de intervención (%)			
	EB Otoño	E1 Otoño	EB Verano	E1 Verano
Condición Operacional	2016	1016	2016	2016
Sin viaje	94	-	95	-
Regulación de paso	2	-	3	-
Reducción de velocidad	4	100	2	100

El mayor porcentaje del CAV lo tiene la reconstrucción del puente Río Blanco y la inversión es independiente de la fecha en que se efectúen los trabajos, tal como lo muestra la Tabla 6.25.

Tabla 6.25. Distribución porcentual del CAV por las operaciones y partidas que forman cada estrategia

Operación	Distribución porcentual del CAV para cada estrategia de intervención (%)	
	EB	E1
	2016	2016
Construcción de vado	0,23	0,13
Reconstrucción del puente	99,77	-
Reconstrucción robustecida del puente	-	99,87

La E1 es socialmente rentable cuando el evento ocurre en verano y la mitigación se realiza en los meses de bajo flujo. El monto de la inversión es independiente de la fecha en que se apliquen las obras, sin embargo, los costos de operación difieren en 519 millones de pesos, dependiendo del escenario.

La aplicación de la E1 alcanza la mitigación total, es decir, el evento no produce consecuencias sobre la infraestructura del puente.

El costo marginal de la agencia vial en aumentar en 1% la resiliencia es de 0 millones de pesos por millón invertido para la E1, si el evento ocurra en verano y los trabajos de mitigación se realicen en periodo de bajo flujo.

El beneficio marginal social que produce la agencia vial por inversión en estrategias que mejoren la resiliencia es de 0,84 millones de pesos por millón invertido para la E1, si el evento ocurra en verano y los trabajos de mitigación se realicen en periodo de bajo flujo.

La razón beneficio-costos muestra la relación del beneficio social que se obtiene por el costo social en el que se incurre por conceptos de inversión y costos operacionales. Por cada millón de pesos la E1 obtiene un beneficio de 0,37 millones, si el evento ocurra en verano y los trabajos de mitigación se realicen en periodo de bajo flujo.

La E1 obtiene un producto VidRj máximo, debido a que se alcanza la mitigación total.

7

CONCLUSIONES



PROYECTO FONDEF ID14I10309

“Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional”

7. CONCLUSIONES

7.1 CONCLUSIONES PRIMERA ETAPA

La primera etapa del proyecto FONDEF – IdeA en dos Etapas ID14I10309, denominado “Investigación y Desarrollo de Modelos para Cuantificar y Mitigar el Riesgo de Eventos Naturales en la Red Vial Nacional” consistió en la proposición de modelos de riesgos asociados a la amenaza de eventos naturales para posteriormente proponer un modelo de mitigación que permite determinar dentro de un conjunto de estrategias factibles aquella que produce el mayor beneficio social.

El objetivo general de este proyecto consistió en desarrollar y validar modelos que permitan cuantificar el riesgo al que está afectada la red vial nacional producto de la amenaza de eventos naturales y asignar estrategias de mitigación que permitan disminuir dicho riesgo considerando criterios de optimización. Esto fue logrado con el desarrollo de modelos analíticos, en el caso de la amenaza volcánica y empírica o semi empírica para los modelos de riesgo hidrometeorológico y sísmico.

Para el desarrollo de los modelos de riesgo se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

Se identificaron los eventos naturales que afectan con mayor recurrencia y significancia a la red vial nacional. Se puede apreciar la incidencia principal de eventos de carácter hidrometeorológico, aun cuando en los últimos años la incidencia de eventos sísmicos y actividad volcánica ha aumentado considerablemente.

Realizada la caracterización de los elementos de la infraestructura vial y los usuarios más vulnerables a los eventos naturales recurrentes, es posible afirmar que existe diferencia temporal y geográfica entre los agentes afectados por las distintas amenazas, por ejemplo, si bien las amenazas hidrometeorológicas son el evento más recurrente, su efecto resulta acotado en comparación a un sismo. En general, es posible concluir que los agentes

afectados son los mismos, pero con diferentes intensidades desde el punto de vista de la temporalidad y de los impactos sobre ellos en relación al sistema del cual participan.

Se desarrollaron modelos que permiten cuantificar el riesgo asociado a las principales amenazas de eventos naturales, considerando la vulnerabilidad física de la infraestructura, el nivel de exposición de los agentes de la red vial y la recurrencia de estos eventos.

Estos modelos de cuantificación de riesgo se aplicaron y validaron a pequeña escala mediante casos de estudio en sectores específicos de la red vial, para cada uno de los modelos de riesgo desarrollados.

Los modelos desarrollados pueden ser modificados para ser aplicados en cualquier lugar, considerando la metodología de calibración de las curvas de fragilidad y las distintas variables utilizadas para su desarrollo. Además, el desarrollo de estos modelos considera su aplicación en modelos de riesgo existentes, como el software HAZUS-MH.

Como área de investigación futura, se propone integrar la gestión y cuantificación del riesgo a nivel de red, considerando las rutas alternativas, las líneas vitales de la infraestructura nacional, la importancia estratégica de los elementos afectados y los costos asociados a los cortes de ruta y redirección de tráfico.

Considerando el modelo de mitigación, es posible afirmar que,

El método de cálculo del modelo es sencillo de aplicar e incluso de implementar en una herramienta computacional, pero la calidad de los resultados pasa por precisar los daños producto del evento, escoger de manera apropiada las operaciones y partidas que conformarán las estrategias incluyendo sus rendimientos y costos unitarios, estimar la pérdida de NS producto del evento y las inducidas por las operaciones y, precisar el tiempo de recuperación de cada estrategia mediante la optimización de la aplicación secuencial de operaciones y partidas.

CONCLUSIONES

La elaboración de las curvas de restauración pasa por estimar las pérdidas de NS y los tiempos de recuperación de la aplicación de una estrategia para un evento determinado. Por lo tanto, la curva de restauración es única para un evento y una configuración de estrategia.

Si bien existen múltiples curvas de restauración, es posible, pensando en la implementación computacional, estandarizar la caída del NS a través de las formas de operación deficiente que se generan y el tiempo de recuperación a través de los rendimientos de las operaciones y partidas, pudiendo activarlas o no según los requerimientos de las estrategias.

Las variables que incluye la evaluación socio-económica son dos. Primero, el costo anual de la agencia vial (CAV), que depende de la magnitud de obra requerida y los costos unitarios de cada operación y partida. Segundo, los costos de operación (COP), que dependen de los tiempos de recuperación de cada operación y partida, y la duración de las condiciones operacionales deficientes que generan. Se observó que el mayor aporte al costo anual equivalente (CAE) lo produce el asociado a la operación deficiente.

De los casos de estudio analizado, se desprende que intervenir la infraestructura con estrategias que mejoran la resiliencia conlleva a un mayor beneficio social. La maximización de la resiliencia pasa por atacar aquellas consecuencias del evento que provoca los mayores tiempos de recuperación y, la mayor rentabilidad socio-económica, atacando las que inducen las condiciones más desfavorables de operación.

Si se quieren optimizar las estrategias de intervención, se concluye que la variable más relevante es el tiempo de recuperación asociado a cada operación, por dos razones: primero, determina el tiempo que se opera con condiciones deficientes, siendo las que aportan más al CAE. Segundo, es la variable de entrada modificable para el cálculo de la resiliencia, ya que la pérdida de NS va amarrada a las consecuencias del evento sobre la infraestructura. Existen dos formas identificadas para la optimización: primero, la elección de aquellas operaciones y partidas que minimicen el uso de las condiciones operacionales

más desfavorables o segundo, aumentar los rendimientos mediante la utilización de una mayor fuerza de trabajo que permita reducir los tiempos de recuperación.

Para la agencia vial, la evaluación genera los costos y beneficios de aplicar una estrategia u otra. Esto les permite, ante la eventual reasignación de recursos, invertir en aquellas estrategias que maximicen la resiliencia al menor costo y, por tanto, eleven el desempeño operacional de la ruta y el socio-económico.

El modelo que se propuso tiene simplificaciones para facilitar la aplicación. Se podrían incluir ciertas variables no consideradas para aumentar la precisión de los resultados. Por ejemplo: considerar el cambio en la matriz origen-destino de viajes producto de la ocurrencia de un evento, ya que eventualmente los usuarios pueden declinar su intención de realizar el viaje, cambiar el destino, cambiar la vía o bien el momento de realizarlo, considerar el costo social (CS) en la evaluación socio-económica, entendido como aquellos incurridos por la pérdida de producción, considerar el impacto del re ruteo en los tiempos y costos de operación de las rutas alternativas, ya que para rutas con alto volumen de tráfico, demoras pequeñas implican costos altos.

El modelo propuesto se aplica a nivel de segmento de la red vial y su impacto en un tramo acotado del trazado. Por lo tanto, para líneas de investigación futura se podría, a partir de un segmento, ver el impacto en toda la red de la aplicación de una estrategia u otra, para decidir con una visión global si intervenirlo o no.

La forma de implementar el modelo de mitigación es a través de un sistema de información geográfico (SIG) donde, se superpongan las condiciones físicas de la infraestructura con la ocurrencia de los eventos naturales, se acoplen los modelos de costos en base a cantidad de obra, costos de las operaciones y partidas, tiempos de recuperación asociado a los rendimientos de las partidas y demoras incurridas y, por último, se realice la elaboración estandarizada de las curvas de restauración que permitan calcular la resiliencia obtenida.

La calidad científico-técnica del modelo pasa por estimar con mayor exactitud las variables probabilísticas asociadas al evento natural. Por eso, incluir modelos que mejoren la

predicción de ocurrencia, magnitud y consecuencia de los eventos sobre la infraestructura mejorarán el desempeño general del modelo.

7.2 FUTUROS DESARROLLOS

La primera etapa del proyecto está concluyendo con modelos de riesgo y mitigación validados y aplicados a pequeña escala para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales de elementos que componen la red vial nacional. Cabe destacar que en esta etapa se requirió precisar el análisis de riesgo físico y mitigación de los elementos de la infraestructura vial, sin realizar el análisis de cuantificación a nivel de la red vial, como tampoco el análisis del riesgo social.

En la segunda etapa del proyecto, se plantea como objetivo desarrollar y validar un Sistema de Gestión de Riesgos para la Mejora de la Resiliencia de Redes Viales ante Eventos Naturales, en base a los modelos de riesgo y mitigación desarrollados en la primera etapa de Ciencia Aplicada, considerando las dimensiones física y social para la cuantificación del riesgo, con un enfoque a nivel de red, y la optimización y priorización de las actividades de mitigación en base a un análisis multicriterio.

Para lograr este objetivo, es necesario el desarrollo y aplicación de las siguientes herramientas que faciliten la integración de los modelos de riesgo y mitigación obtenidos en la primera etapa:

1. Metodología de cuantificación de la vulnerabilidad social de las redes viales para integrarlas con los modelos de cuantificación de vulnerabilidad física de los elementos de la red y así obtener una cuantificación integral del riesgo.
2. Marco conceptual de Sistema de Información Geográfica que facilite el análisis y aplicación espacial de los modelos desarrollados, proyectando la cuantificación del riesgo de un elemento a un camino y a la red vial.
3. Metodología de optimización de las actividades de mitigación, que permita la toma de decisiones de selección de la combinación óptima de actividades que

resulte en una mayor reducción del riesgo general de la red vial en el plazo analizado.

4. Plataforma computacional que integre los modelos desarrollados en la primera etapa a través de las metodologías mencionadas, que facilitará la aplicación productiva de los mismos en las entidades que lo utilicen.

De esta manera, el país contará con modelos y una herramienta de gestión que, una vez implementada, permitirá contar con una red vial más resiliente ante la amenaza de eventos naturales a un menor costo total respecto a la situación actual.

8

REFERENCIAS



PROYECTO FONDEF ID14110309

“Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional”

8. REFERENCIAS

1. Abrahamson, N., Gregor, N. & Addo, K. (2016): BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32, 1.
2. Aguirre, P., Vásquez, J., Llera, J. C. De, González, G., & González, J. (2017). Earthquake Damage Assessment For Iquique: Case Study For Implementation Of Hazus-MH In Chile. In 16th World Conference on Earthquake Engineering. 1–13.
3. Aven, T. (2011). A risk concept applicable for both probabilistic and non-probabilistic perspectives. *Safety Science*, 49, 1080 – 1086.
4. Barrientos, S. (2010). Terremoto (M=8.8) del 27 de Febrero de 2010 en Chile. *Revista de la Asociación Geológica Argentina Vol 67*. 412-420.
5. Basoz, N. y A.S. Kiremidjian (1996) Risk Assessment for Highway Systems, Technical Report 118, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University. Estados Unidos.
6. Beckmann, H. & Simpson, D.M. (2006) 'Risk assessment and GIS in natural hazards: issues in the application of HAZUS', *Int. J. Risk Assessment and Management*, Vol. 6, Nos. 4/5/6, pp.408– 422.
7. Bell, M.G.H., Kanturska, U. Schmöcker, J-D. y Fonzone, A. (2010). Attacker-defender models and road network vulnerability. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 366, 1893 – 1906.
8. Berdica, K. (2002). An introduction to road vulnerability: what has done is done and should be done. *Transport Policy*, 9, 117 – 127.
9. Buckle, I.G. y S.D. Werner (2003) Quantifying the Seismic Resilience of Highway Networks Using a Loss-estimation Tool. 29th US - Japan Bridge Engineering Workshop. Japón, Noviembre.

REFERENCIAS

10. Cardona, O. D. (2003). Manejo Ambiental y Prevención de Desastres: dos temas asociados. En Maskrey, A. (Ed.) Los Desastres no son naturales. pp 66 – 81. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Panamá.
11. Clymer, J.R. (2009). Simulation-based engineering of complex systems. 1st ed. Wiley.
12. Dirección General de Aguas (2016). Información oficial hidrometeorológica y de calidad de aguas en línea. Chile.
13. Echaveguren, T., O. Cifuentes y E. Echaveguren (2000) Costos directos de los usuarios en sistema de gestión de puentes MAPRA. Actas del 6to Congreso PROVIAL. La Serena. Noviembre.
14. Echaveguren, T., Azocar, G., Féliz, J. y Sanhueza, R. (2011). Including natural risk concepts in road maintenance planning. 8th International Conference on Managing Pavement Assets. (CD-ROM). Chile.
15. Echaveguren, T.,G. Azocar, R. Sanhueza y J. Féliz (2012) Evaluación social de proyectos de reducción de vulnerabilidad de la red vial ante eventos naturales. Actas de 10mo Congreso Provia. Santiago, Octubre.
16. EULA (2012). Análisis de riesgos de desastres y zonificación costera región del Bío Bío. Informa Etapa 2. Centro EULA, Universidad de Concepción, Chile.
17. FEMA (2003) 'HAZUS-MH.' Online at http://www.fema.gov/hazus/hz_meth.shtm Last accessed September 18, 2004.
18. FEMA (2011) Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model. Technical Manual. Estados Unidos.
19. Free, M. Anderson, S. Milloy, Ch y Mian, J. (2006). Geohazard risk management for infrastructure projects. Proceedings of ICE – Civil Engineering, 159, 28 – 34.
20. GEOESTUDIOS (2013). Estudio Geológico y Vulcanológico para caracterizar los lahares del volcán Villarrica. Proyecto construcción mitigación riesgos volcánicos y

geológicos asociados, comunas de Villarrica, Pucón y Curarehue, Región de la Araucanía. Etapa de Prefactibilidad.

21. Greiving, S. (2004). Risk Assessment and Management as an Important Tool for the EU Strategic Environmental Assessment, *DISP*, 157(2), 11 – 17.
22. Haimes, J. (2009). On the complex definition of risk: a system-based approach. *Risk Analysis*, 29(12), 1647 – 1654.
23. Hasenberg, C.S. & Rad, F.N. (1999) 'Lessons learned in a level-two analysis for buildings and lifelines in the Portland, Oregon, metropolitan region', in W.M. Elliot and P. McDonough, (Eds.) *Optimizing Post-Earthquake Lifeline System Reliability: Proceedings of the fifth U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering*, August 12–14, 1999, Seattle, WA.
24. Institute of Structural Engineering IBK (1995). VaP v. 1.5. Switzerland.
25. Instituto Nacional de Hidráulica (2013). *Construcción Mitigación Riesgos Volcánicos y Geológicos Asociados, Comunas de Villarrica, Pucón y Curarrehue, Región de la Araucanía.*
26. Iowa Highway Research Board (IHRB)(2006), *An illustrated guide for monitoring and protecting bridge waterways against scour*, The University of Iowa.
27. Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N. et al. (2006): A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 3.
28. Karakostas, C., Makarios, T., Lekidis, V., & Kappos, A. (2006). Evaluation of vulnerability curves for bridges—A case study. In *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland.
29. Kattell, J., y M. Eriksson. (1998). *Bridge scour evaluation: Screening, analysis, & countermeasures* (No. 9877 1207--SDTDC,).

REFERENCIAS

30. Landers, M. N. (1992). Bridge scour data management. USGS Staff--Published Research, 141.
31. Lleras-Echeverri, G. y Sánchez-Silva, M. (2001). Vulnerability analysis of highway networks, methodology and case study. Proceedings of the ICE – Transport, 147(4), 223 – 230.
32. Luping, Y. y Dalin, Q. (2012). Vulnerability Analysis of Road Networks. Transpn Sys Eng & IT, 12(1), 105-110.
33. Mackie, K., & Stojadinovic, B. (2004, August). Fragility curves for reinforced concrete highway overpass bridges. In 13th World Conference on Earthquake Engineering (pp. 1-6).
34. Madariaga, R (1998). Sismicidad de Chile. Física de la Tierra, 10, 221 – 258.
35. Maddison, B. (2012). Scour failure of bridges. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Forensic Engineering, 165(1), 39-52.
36. MathWave Technologies (2010). EasyFit Professional v. 5.5. Ucrania.
37. MOP (2003) Informe de situaciones de riesgo por amenaza de aluviones, inundaciones y movimientos sísmicos. Tomo I y II. Dirección de Vialidad, Ministerio de obras Públicas. Santiago. Chile.
38. MOP (2005) Informe de situaciones de riesgo por aluviones e inundaciones. Tomo I. Dirección de Vialidad, Ministerio de obras Públicas. Santiago. Chile.
39. MOP (2009) Resumen de emergencias MOP. Dirección de Vialidad, Ministerio de obras Públicas. Santiago. Chile.
40. MOP (2015). Instrucciones y criterios de diseño. Manual de Carreteras Volumen 3, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
41. MOP (2016) Mantenimiento Vial, Volumen N° 7, Manual de Carreteras. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile. Santiago de Chile.

42. Mora, B. (2016) Análisis Técnico Económico de Medidas de Mitigación para Emergencias Viales. Memoria de Título Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción.
43. Moreno, H. (2015). El Volcán Villarrica y su actividad. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Ministerio de Minería, Chile.*
44. Murray, A. Matisziw, T. y Grubestic, T. (2008). A methodological overview of network vulnerability analysis. *Growth and Change*, 39(4), 573 – 592.
45. Nastev, M & Todorov, N (2013) Hazus: A standardized methodology for flood risk assessment in Canada, *Canadian Water Resources Journal*, 38(3), 223 - 231.
46. National Institute of Building Sciences (1999) Enhancement of the Highway Transportation Lifeline Module in Hazus. Prepared by Nesrin Basoz and John Mander
47. Nazari, Y. R., Y Bargi, K. (2012). Practical Approach to Fragility Analysis of Bridges. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(23), 5177-5182.
48. NCHRP (2010), Estimation of scour depth at bridge abutments, NCHRP Project 24-20, Draft Final Report, National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board, National Academy of Science, Washington, Estados Unidos.
49. Peterson, S y Church, R (2008). A framework for modeling rail transport vulnerability. *Growth and Change*, 39(4), 617 – 641.
50. Rocco, C y Ramirez-Marquez, J E (2011). Vulnerability metrics and analysis for communities in complex networks. *Reliability Engineering and System Safety*, 96, 1360 – 1366.

REFERENCIAS

51. Sakakibara H, Kajitani, Y y Okada, N (2004). Road Network robustness for avoiding functional isolation in disasters. *Journal of Transportation Engineering*, 130(5); 560 – 567.
52. Schneider, P. & Schauer, B. (2006). HAZUS—Its Development and Its Future. *Natural Hazard Review*, 7(2), 40 – 44.
53. Soto, G. J. y Sjöbohm L. (2005). Sobre mapeo de los peligros volcánicos del Arenal (Costa Rica) como una herramienta para la planificación del uso del suelo y la mitigación de desastres.
54. Taylor, M Sekhar, S y D’Este, G.M (2006). Application of accessibility based method for vulnerability analysis of strategic road networks, *Network Spatial Economics*, 6, 267 – 291.
55. Taylor, M y Susilawati (2012). Remoteness and accessibility in the vulnerability analysis of regional road networks. *Transportation Research Part A* 46, 761–771
56. Toro, F., Rubilar, F., Hube, M., Santa-Maria, H., & Cabrera, T. (2013) Statistical Analysis of Underpasses Damaged During 2010 Chile Earthquake. *Seventh National Seismic Conference on Bridge & Highways*. (pp. 1-12)
57. Tran, T. Y., E. Hoare, A. Jones, S. Thomson, A. Tomar, y S. Paszkowicz. (2011). U.S. Patent Application No. 13/994,586.
58. TRB (2000) *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board. Estados Unidos.
59. TRB (2010) *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board. Estados Unidos.
60. Valenzuela, S de Solminihac, H y Echaveguren, T (2010). Proposal of an Integrated Index for Prioritization of Bridge Maintenance. *Journal of Bridge Engineering*, 15(3), 337 – 343.

61. Vallance, J. y Iverson, R. (2015). Lahars and their deposits. The Encyclopedia of Volcanoes. 649-664.
62. Ven Te Chow (1994), Hidráulica de canales abiertos, California, Estados Unidos, McGraw-Hill.
63. World Bank. (2011): Urban Risk Assessment. An approach for understanding disaster & climate risk in cities. Working Draft, Urban Development & Local Government Unit Finance, Economics and Urban Department.

Equipo de Trabajo

DIRECTORA

Alondra Chamorro, PhD.

Profesora Escuela de Ingeniería UC, Investigadora Asociada CIGIDEN.

DIRECTOR ALTERNO

Hernán de Solminihac, PhD.

Profesor Escuela de Ingeniería UC

INVESTIGADOR PRINCIPAL UdeC

Tomás Echaveguren, PhD.

Profesor Escuela de Ingeniería UdeC, Investigador CIGIDEN.

ASESORA INTERNACIONAL

Susan Tighe, PhD.

Profesor, University of Waterloo, Ontario, Canada.

COORDINADORA

Carolina Videla

INVESTIGADORES:

Alelí Osorio, PhD (Investigadora UC)

Joaquín Dagá (Estudiante MSc. UC)

Felipe Baratta (Estudiante MSc. UC)

Gustavo Jimenez (Investigador UdeC-UC)

Pablo Cartes (Investigador UC/Estudiante UdeC)

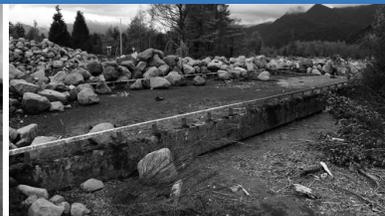
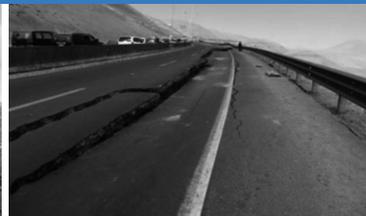
Manuel Contreras (Estudiante MSc. UdeC)

Braulio Mora (Estudiante UdeC)

Derechos Reservados

Pontificia Universidad Católica de Chile y Universidad de Concepción

Inscripción N° 276.444



SHARPO