



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **DESARROLLO DE MODELOS DE FRAGILIDAD PARA TERRAPLENES DE CAMINOS EXPUESTOS A FLUJOS DE DETRITOS**

**NATALIA AÍDA NIETO BILLIK**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesora supervisora:  
**ALONDRA CHAMORRO GINÉ**

Santiago de Chile, Octubre 2020

© 2020, Natalia Nieto Billik



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# DESARROLLO DE MODELOS DE FRAGILIDAD PARA TERRAPLENES DE CAMINOS EXPUESTOS A FLUJOS DE DETRITOS

**NATALIA AÍDA NIETO BILLIK**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**ALONDRA CHAMORRO**

**ESTEBAN SÁEZ**

**TOMÁS ECHAVEGUREN**

**JOSÉ MANUEL DEL VALLE**

DocuSigned by:

*Jose Manuel Del Valle*

FA590B140B0C491...

Tesis para completar las exigencias del grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Octubre 2020

*A aquellos quienes anhelan dejar el mundo  
mejor de cómo lo encontraron,*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera comenzar agradeciendo a las personas e instituciones que colaboraron a lo largo del desarrollo de esta investigación.

Primero, agradecer la oportunidad que la profesora Alondra Chamorro me otorgó al proponerme el desarrollo de esta investigación en el contexto del proyecto FONDEF ID14I20309 “Investigación y Desarrollo de Modelos para Cuantificar y Mitigar el Riesgo de Eventos Naturales en la Red Vial Nacional”. Para mí fue muy relevante el poder contribuir desde mis conocimientos a un proyecto de aporte público y cuyo fin es mejorar las condiciones de la red vial de Chile. Agradezco el apoyo, las enseñanzas y el rol social que mi profesora guía me inspiró y entregó.

A su vez, quisiera agradecer al profesor Tomás Echaveguren por su constante apoyo científico y conocimientos que fueron claves para poder llevar a cabo los modelos desarrollados. También quisiera agradecer la colaboración y voluntad del profesor Esteban Sáez quien me apoyó significativamente desde su área en las principales inquietudes que tuve a lo largo de la investigación.

Agradezco al Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) por su apoyo a través de sus diversos colaboradores en el conocimiento interdisciplinario que fue necesario en este trabajo. También quisiera agradecer al Ministerio de Obras Públicas, por su participación y colaboración a través de sus distintas Direcciones de Vialidad Regionales, de las que recibí información sustancial sobre la cual se basó esta investigación.

Quisiera también agradecer a mis compañeros del magíster del departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, por hacer más llevaderos estos dos años de investigación. En particular, quisiera agradecer a Nivaldo por su paciencia, sus conocimientos y su amistad; y también a Eduardo Allen, cuya ayuda fue clave en el correcto desarrollo de los modelos, gracias por el tiempo.

Finalmente quisiera agradecer a mi familia, quienes han apoyado incondicionalmente mi formación y me han ayudado a perseverar en mis proyectos. Gracias por ayudarme a creer en mí.

## TABLA DE CONTENIDOS

Pág.

LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes generales .....	1
1.1.1 Gestión del riesgo de desastres .....	1
1.1.2 Riesgo sobre la red vial .....	2
1.1.3 Vulnerabilidad y exposición de la red vial a flujos de detritos .....	3
1.1.4 Modelos de fragilidad y vulnerabilidad existentes.....	7
1.2 Definición del problema .....	8
1.3 Hipótesis .....	9
1.4 Objetivos.....	9
1.5 Alcances de la investigación.....	10
1.6 Metodología de la investigación .....	10
1.7 Estructura del documento .....	12
2. Antecedentes complementarios para el desarrollo de modelos de fragilidad de terraplenes de caminos.....	14
2.1 Modelación de las curvas de fragilidad y vulnerabilidad.....	14
3. Desarrollo de curvas de fragilidad para terraplenes de caminos expuestos perpendicularmente a flujos de detritos .....	18
3.1 Introducción.....	18
3.2. Efectos de los flujos de detritos sobre terraplenes de caminos.....	22
3.2.1 Características de los flujos de detritos .....	22
3.2.2 Exposición de terraplenes de caminos a flujos de detritos.....	22
3.2.3 Efectos físicos y operacionales en terraplenes .....	25
3.3 Modelo conceptual del daño de terraplenes para el desarrollo de curvas de fragilidad .....	26

3.3.1	Función de estado límite .....	26
3.3.2	Modelo de deslizamiento del terraplén producto del impacto de flujos de detritos para la definición de $G_1(\hat{x}_j)$ .....	27
3.3.3	Modelo de erosión aguas abajo del terraplén producto de la caída del flujo al pie del talud para la definición de $G_2(\hat{x}_j)$ .....	31
3.4.	Calibración de curvas de fragilidad mediante simulación .....	33
3.4.1	Simulaciones de Monte Carlo para la calibración.....	33
3.4.2	Definición de variables para la simulación .....	34
3.4.3	Ajuste de distribución Log-Normal a los resultados .....	36
3.4.4	Curvas para terraplenes de caminos expuestos al impacto y erosión de flujo de detritos .....	37
3.5	Discusión de resultados y comparación de las curvas obtenidas con datos históricos .....	39
3.5.1	Discusión de los modelos y las curvas desarrolladas .....	39
3.5.2	Comparación de las curvas con datos históricos .....	41
3.6	Conclusiones.....	44
4.	Desarrollo de curvas de fragilidad para terraplenes de caminos expuestos paralelamente a flujos de detritos .....	47
4.1	Introducción.....	47
4.2.	Exposición de terraplenes de caminos a flujos .....	49
4.2.1	Interacción paralela de los flujos con los terraplenes de caminos... ..	49
4.2.2	Fenómeno de erosión de taludes .....	50
4.3	Modelo conceptual del daño de terraplenes para el desarrollo de curvas de fragilidad .....	51
4.3.1	Enfoque analítico y función de estado límite .....	51
4.3.2	Modelo de erosión paralela del talud e inestabilidad de bloque.....	53
4.4	Calibración de curvas de fragilidad mediante simulación .....	56
4.4.1	Simulaciones de Monte Carlo para la calibración.....	56
4.4.2	Estados de daño considerados en la calibración.....	56
4.4.3	Definición de variables consideradas en la simulación.....	58
4.4.4	Ajuste de distribución Log-Normal a las curvas calibradas.....	59
4.4.5	Curvas para terraplenes de caminos expuestos a la erosión paralela.....	60
4.5	Discusión de resultados y comparación de las curvas obtenidas con datos históricos .....	63

4.5.1	Discusión de los modelos y las curvas desarrolladas .....	63
4.5.2	Comparación de las curvas con datos históricos .....	64
4.6	Conclusiones y recomendaciones .....	65
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	67
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>70</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Consecuencias identificadas en plataformas de caminos impactadas por flujos de detritos.....	7
Tabla 2. Enfoques existentes para la calibración de curvas de fragilidad.....	15
Tabla 3: Fuerzas asociadas a la exposición perpendicular de terraplenes de caminos a flujos de detritos.....	24
Tabla 4: Estados de daño considerados en las curvas de fragilidad del modelo de erosión aguas abajo del terraplén.....	26
Tabla 5: Variables básicas involucradas en las funciones de estado límite.....	34
Tabla 6: Parámetros de la distribución log-normal estimados para las curvas del modelo de deslizamiento del terraplén.....	37
Tabla 7: Parámetros de la distribución log-normal estimados para las curvas del modelo de erosión aguas abajo del terraplén.....	39
Tabla 8: Estados de daño considerados para la calibración de las curvas de fragilidad del modelo 2.....	57
Tabla 9: Variables básicas involucradas en las funciones de estado límite.....	58
Tabla 10: Parámetros de la distribución log-normal ajustada a las curvas.....	62

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología de la investigación.....	11
Figura 2. Ejemplos de (a) curvas de vulnerabilidad midiendo relación de daño promedio y (b) curvas de fragilidad midiendo porcentaje de excedencia (Pitilakis et al., 2014). .....	14
Figura 3: (a) Vista aérea terraplén de camino bidireccional afectado por flujo de detritos en Chile, evento 2015. (b) Fenómenos asociados a la exposición perpendicular de terraplenes a flujos de detritos.....	23
Figura 4: Diagrama de cuerpo libre para el deslizamiento terraplén completo. ....	28
Figura 5: Diagrama de cuerpo libre para la erosión aguas abajo del terraplén. ....	31
Figura 6: Curvas de fragilidad para el deslizamiento en diferentes alturas de terraplén (h_terr).....	37
Figura 7: Curvas de fragilidad para la erosión aguas abajo en camino bidireccional con altura de terraplén 1 - 2.5 m. ....	38
Figura 8: Curvas de fragilidad para la erosión aguas abajo en camino multicarril con altura de terraplén 1 – 2.5 m.....	38
Figura 9: (a) Terraplén de acceso del puente antes del evento de flujo de detritos. (b) Vista aérea del puente después del evento de flujo de detritos ocurrido el año 2017.....	42
Figura 10: Comparación de las curvas de deslizamiento del terraplén con datos históricos para caminos bidireccionales.....	42
Figura 11: Comparación modelo de erosión aguas abajo del terraplén con datos históricos para caminos bidireccionales con estado de daño leve.....	43

Figura 12: Comparación modelo de erosión aguas abajo del terraplén con datos históricos para caminos bidireccionales con estado de daño moderado. ....	43
Figura 13: Terraplenes de caminos bidireccionales expuestos paralelamente a flujos en Chile. ....	50
Figura 14: Diagrama para la erosión aguas abajo del terraplén e inestabilidad del talud. ...	53
Figura 15: Curvas de fragilidad para terraplenes de caminos bidireccionales con altura de terraplén entre 1-2.5 m. ....	61
Figura 16: Curvas de fragilidad para terraplenes de caminos multicarril con altura terraplén entre 1-2.5 m. ....	61
Figura 17: Comparación de curvas de fragilidad con eventos históricos considerando un estado de daño moderado. ....	65

## **RESUMEN**

Los flujos de detritos son fenómenos que afectan frecuentemente a la red vial, especialmente a puentes y terraplenes de caminos que son utilizados para configurar el trazado de las vías a los distintos relieves naturales. Para cuantificar el daño permanente que estos flujos producen sobre diversas infraestructuras se han desarrollado curvas de fragilidad, sin embargo, aún no hay avances para los terraplenes. El objetivo de esta investigación es desarrollar dichas curvas para cuantificar la probabilidad de daño que tienen terraplenes de caminos expuestos a flujos de detritos. Se desarrollan tres modelos de daño, dos asociados a la exposición perpendicular y uno asociado a la exposición paralela que tienen los terraplenes a estos flujos. Las curvas se calibraron a través de simulaciones de Monte Carlo y se ajustaron distribuciones log-normales a cada una de ellas. Se comprobó que terraplenes de caminos más bajos son más vulnerables al impacto y erosión de los flujos de detritos, mientras que un mayor tiempo de interacción aumenta las probabilidades de daño. Se espera contribuir con un dato de entrada para el cálculo del riesgo de la red vial y con modelos de daño que sirvan de base para otros tipos de fenómenos e infraestructuras.

Palabras Claves: flujos de detritos, terraplenes de caminos, curvas de fragilidad.

## **ABSTRACT**

Debris flows are phenomena that frequently affect the road network, especially bridges and road embankments that are used to configure the route of the roads to the different natural reliefs. To quantify the damage that these flows produce on various infrastructures, fragility curves have been developed, however, there is still no progress for embankments. The objective of this research is to develop these curves to quantify the probability of damage to embankments exposed to debris flows. Three damage models are developed, two associated with the perpendicular exposure and one associated with the parallel exposure of the embankments to these flows. The curves were calibrated through Monte Carlo simulations and Log Normal distributions were fitted to each of them. Lower road embankments were found to be more vulnerable to impact and erosion from debris flows, while a longer interaction time increases the probability of damage. It is expected to contribute with a tool for calculating the risk of the road network and with damage models that serve as a basis for other types of phenomena and infrastructures.

Keywords: debris flows, road embankments, fragility curves.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes generales**

#### **1.1.1 Gestión del riesgo de desastres**

El riesgo de desastres naturales se puede concebir como la pérdida potencial de activos dañados o destruidos que podrían ocurrir a un sistema, sociedad o comunidad en un periodo específico de tiempo, determinado en función de la amenaza, la exposición y la capacidad del evento natural (UN-SPIDER, 2019; UNISDR, 2009). De esta manera, la gestión del riesgo de eventos naturales se basa en la organización y administración de estrategias y políticas que busquen disminuir las consecuencias que generan las amenazas naturales a través de acciones de prevención y mitigación (UNISDR, 2009; Yamin et al., 2013). A su vez, la evaluación del riesgo de amenazas naturales es una metodología que apunta a determinar la naturaleza y el alcance del riesgo, mediante el análisis de las condiciones de vulnerabilidad existentes que podrían dañar a personas, infraestructura, servicios, entre otros (UNISDR, 2009).

Desde el punto de vista cuantitativo, riesgo es el producto entre la vulnerabilidad y la probabilidad de ocurrencia de la amenaza natural (Bil et al., 2014). A su vez, también puede considerarse como la combinación de la probabilidad de un evento y sus consecuencias negativas (Schultz et al., 2010; UNISDR, 2009; Yamin et al., 2013). A partir de lo anterior, es claro que, asociado al riesgo, se encuentran también los conceptos de amenaza, exposición y vulnerabilidad.

En términos generales, una amenaza es una fuente de daño potencial a personas, infraestructura o medio ambiente, pudiendo ser una condición de origen natural, la que puede causar daño a la propiedad, generar muerte o afectar la base económica y ecológica de la vida humana (Ranke, 2016; UNISDR, 2009). Para el caso del riesgo de desastres, la amenaza corresponde evento natural en sí, un sismo, una inundación, una remoción en masa, etc. Por otro lado, exposición es la condición que tienen personas, infraestructura, vivienda, capacidades de producción y otros activos humanos tangibles ubicados en áreas propensas a las amenazas (UNISDR, 2009).

Finalmente, el concepto de vulnerabilidad también posee diversas apreciaciones. Desde la perspectiva de las ciencias sociales, la vulnerabilidad se entiende como una predisposición y el potencial de dañar a las comunidades o individuos. Por otro lado, desde el punto de vista de las ciencias naturales, la vulnerabilidad se entiende como el grado esperado de pérdida resultante del impacto de un fenómeno peligroso, siendo una condición preexistente relacionada con las características y propiedades de los elementos de riesgo (Fuchs et al., 2012; Papathoma-Köhle et al., 2011; UNISDR, 2009).

La gestión del riesgo de amenazas naturales es una disciplina que en sus inicios fue desarrollada mayormente para el caso de los sismos, sin embargo, se ha ido poco a poco ampliando a otro tipo de amenazas de carácter hidrológico, geológico y meteorológico como los deslizamientos de tierras, inundaciones, huracanes y otros eventos recurrentes. A nivel internacional se ha estudiado la vulnerabilidad no solo de infraestructura de edificación, sino también de la red de aguas, electricidad y en particular, se han generado importantes esfuerzos por estudiar el riesgo sobre la red vial.

### **1.1.2 Riesgo sobre la red vial**

Una de las primeras metodologías que consideraron modelos probabilísticos para estimar las pérdidas potenciales de las amenazas naturales y la vulnerabilidad de las infraestructuras fue HAZUS, un *software* desarrollado por la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) de los Estados Unidos en el año 1997 (Pitilakis, Crowley, & Kaynia, 2014). Esta cuenta con modelos de fragilidad para terremotos, huracanes, inundaciones y tsunamis para estimar el daño potencial sobre diferentes tipos de infraestructuras entre las que destacan edificios, líneas de tuberías y puentes.

En 2009, la *Swiss Federal Office of Roads* (FEDRO) desarrolló una metodología para la evaluación basada en el riesgo, la prevención y la respuesta a los peligros naturales en las carreteras de Suiza. Esta permitió entre otras cosas, determinar cuantitativamente las consecuencias (daños) resultantes sobre usuarios y operadores de carreteras y establecer prioridades para las medidas de planificación (FEDRO). Por otro lado, en República Checa se propuso un procedimiento para identificar los segmentos de su red de carreteras más vulnerables a amenazas naturales, basándose en el cálculo del riesgo, el

que debe aplicarse en la fase de estrategia y planificación de la red para finalmente reducirlo en dos ámbitos: la vulnerabilidad de la infraestructura y la intensidad del desastre (Bil et al., 2014).

Un esfuerzo en conjunto realizaron Suiza, Francia, Noruega y Países Bajos, entre otros, en el desarrollo de un proyecto transnacional llamado *Risk Management for roads in a Changing Climate RIMAROCC*, el que tenía por objetivo desarrollar un método para el análisis y gestión del riesgo con respecto al cambio climático, para así apoyar la toma de decisiones sobre medidas de adaptación en el sector vial, prestando especial atención en el diseño de nuevas carreteras y las mejoras y mantenimientos en la operación de las redes viales existentes (Bles et al., 2010).

Un camino afectado por fenómenos naturales induce dos niveles de consecuencias: por un lado, se pueden generar efectos directos sobre los usuarios y activos involucrados y, por otro lado, la interrupción del tráfico y disminución de la capacidad de las vías puede tener graves efectos: económicos (transporte de trabajadores, interrupción de la cadena de suministro para fábricas, unidades comerciales y tiendas, etc.), sociales (pérdida de acceso a las escuelas, universidades) o efectos relacionados con la seguridad (pérdida de acceso a los departamentos de rescate, bomberos y policía) (Tacnet et al., 2012).

De esta manera, la importancia de gestionar el riesgo de desastres naturales sobre la red vial puede explicarse en base a la relevancia que tiene esta infraestructura para las comunidades. Los elementos de la red vial son esenciales por razones económicas, sociales, medioambientales y de seguridad y, por lo tanto, pueden considerarse parte de la infraestructura crítica de un país (Tacnet et al., 2012; Winter et al., 2013).

### **1.1.3 Vulnerabilidad y exposición de la red vial a flujos de detritos**

Un flujo de detritos se define como un flujo torrencial de una mezcla de tierra suelta, roca, diversos tipos de escombros y, a veces, materia orgánica (variedad de tamaños de grano, desde rocas hasta arcilla) y cantidades variables de agua para formar una suspensión que fluye cuesta abajo (Highland & Bobrowsky, 2008; Takahashi, 2014). Se suelen clasificar tanto por su apariencia o conformación, como también por su reología. Según Skilodimou y Bathrellos (2016), están los flujos de lodos que son flujos

mezclados de sedimentos y agua, más bien viscosos; la avalancha de detritos que corresponde a la variedad más rápida de flujos de detritos, los que están parcialmente saturados; y los lahares o flujos de lodo volcánicos, que corresponden a flujos de agua mezclada con ceniza volcánica, siendo más bien turbulentos.

Los flujos de detritos se encuentran entre los eventos naturales más frecuentes, especialmente en las regiones montañosas, volcánicas, semiáridas y subpolares (Santi et al., 2010), que poseen un fuerte relieve y al menos lluvias ocasionales (Jakob & Hungr, 2005). Una vez iniciado un flujo de detritos, este puede avanzar libremente interactuando con diversos elementos a su paso. De esta manera, estos fenómenos generan daños directos que incluyen pérdida de vidas humanas, destrucción de casas e instalaciones, daños a carreteras, líneas ferroviarias, interrupción en sistemas de suministro de agua, entre muchas otras pérdidas que son difíciles de cuantificar (Jakob & Hungr, 2005; Tacnet et al., 2012).

Una de las infraestructuras con mayor exposición a los flujos de detritos es la red vial. Dada su extensión, su estructura lineal que conforma una red (Meyer et al., 2015) y la diversidad de lugares en los que se puede encontrar, es que se convierte en una infraestructura susceptible al impacto de este tipo de eventos y especialmente crítica en zonas donde el trazado de las vías se ajusta al relieve natural del lugar a través de puentes y caminos sobre terraplenes. En China por ejemplo, en zonas montañosas las líneas de tráfico inevitablemente pasan por diferentes unidades geográficas naturales, por lo que los flujos de detritos extensos representan un gran desafío para la planificación, ingeniería y construcción de líneas de tráfico y pueden causar una gran cantidad de daños en carreteras ya terminadas (Zou et al., 2018).

En el año 2004 intensas lluvias en Escocia generaron flujos de detritos, los que interrumpieron y disminuyeron la capacidad de caminos que transportaban entre 5000 y 13500 vehículos por día durante 1 y 2 días respectivamente, afectando no solo a pueblos y ciudades, sino también a comunidades más pequeñas y remotas (Winter et al., 2013). Asimismo, en los Alpes Franceses los flujos de detritos son también una gran amenaza: sólo en un evento ocurrido el año 2012 se estimaron pérdidas de US\$30.000, en donde el

flujo de detritos generó depósitos de 94 m a lo largo de la carretera y la bloqueó durante de 8 horas (Utasse et al., 2016).

En Noruega, Meyer et al. (2015) destacan un evento ocurrido el año 2006, en donde la topografía empinada y los fenómenos meteorológicos extremos gatillaron una inundación repentina que arrasó con 30 m de la autopista que conecta Suecia y Noruega, la que mantenía un tráfico diario de 1000-2000 vehículos; la reapertura demoró 12 días y los costos se estimaron en 1,2 millones de euros (Jenelius, 2010). De igual forma, el camino *Al-Raith* en Arabia Saudita periódicamente es afectado por este tipo de flujos, los que en un evento del año 2013 provocaron grandes cantidades de escombros cubriendo y dañando tanto puentes como terraplenes de la carretera y provocando su cierre en ambas direcciones durante unos días (Youssef et al., 2016). En China, se han investigado 1036 barrancos potenciales de flujo de detritos a lo largo de la conocida carretera de Sichuan a Tíbet, con casi 400 eventos de flujos y casi US\$30.000.000 en pérdidas económicas registradas (como se cita en Qiu et al., 2018). Finalmente, según un estudio desarrollado por el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile SERNAGEOMIN (2017), sólo considerando los flujos de detritos del año 2015 ocurridos en dicho país, se tuvieron interrupciones y daños de caminos avaluados en US\$1.500.000.000.

Una vez gatillado un flujo de detritos, la consecuencia más visible que este genera es el depósito de material, afectando a túneles, alcantarillas, puentes y caminos (Zou et al., 2018), sin embargo, este fenómeno no genera mayores daños físicos sobre la infraestructura, sino que más bien sólo una interrupción de las vías, la que en la mayoría de los casos se soluciona con el despeje y remoción del material. Por otro lado, existen otro tipo de consecuencias asociadas a las capacidades destructivas que tienen los flujos, las que se asocian principalmente a tres fuerzas: (1) hidrodinámica, asociada a la presión dinámica que el flujo ejerce sobre cualquier elemento a su paso, (2) de colisión, asociada al choque de los escombros que el flujo transporta, (3) hidrostática, relacionada al peso del flujo sobre una infraestructura (Zanchettat al., 2004). Sumado a lo anterior, Zou et al. (2018) destacan una gran capacidad erosiva de los flujos de detritos, principalmente en la ingeniería de la subrasante. A partir de lo anterior se observan consecuencias tales

como el deslizamiento de tableros y erosión de las cepas en los puentes (Dagá et al., 2018), erosión y socavones en las carreteras adyacentes a cauces (Youssef et al., 2011), entre otros.

De esta manera, se clasifican los efectos que tienen los flujos de detritos en la red vial según el daño generado. Por un lado, se tienen aquellas consecuencias que no generan un daño físico permanente sobre la infraestructura y que, por ende, generan una interrupción parcial de las vías en un corto plazo, mientras que, por otro lado, se tienen aquellas consecuencias que si generan un daño físico permanente, el que se asocia a reparaciones en un mediano y largo plazo, generando una interrupción mayor. Si bien puentes y caminos sobre terraplenes son las infraestructuras con mayor vulnerabilidad y, por ende, con una mayor cantidad de daños físicos permanentes producto de su alta exposición a flujos de detritos, las consecuencias sobre estos últimos no se han estudiado mayormente en la literatura, por lo que serán el objeto de este estudio.

A partir de la revisión de imágenes facilitadas por diversas direcciones regionales de vialidad del Ministerio de Obras Públicas y la revisión de imágenes de eventos internacionales, se pudo determinar que las consecuencias que presentan los terraplenes de caminos se pueden clasificar según el tipo de exposición que estos presentan. En zonas de montaña los flujos tienden a iniciarse y movilizarse por quebradas, las que en condiciones normales cruzarían por la estructura lineal de los caminos. De esta manera, el tipo de exposición sería perpendicular, pues el flujo choca con la infraestructura. Por otro lado, existen casos en donde el flujo de detritos escurre por el cauce de un río y este a su vez es colindado por el terraplén de un camino, configurándose la exposición de manera paralela al movimiento del flujo. Es importante mencionar que casos intermedios, es decir, interacciones con ángulos distintos a  $90^\circ$  o  $180^\circ$  pueden ocurrir, sin embargo, la definición de los casos bases mencionados servirían de base para dichos análisis híbridos en particular. En la Tabla 1 se muestran algunas de las consecuencias identificadas para cada tipo de exposición:

**Tabla 1. Consecuencias identificadas en plataformas de caminos impactadas por flujos de detritos**

Tipo exposición	Consecuencias en el terraplén
Perpendicular	-Deslizamiento del terraplén completo -Pérdida porción del terraplén por erosión
Paralelo	-Erosión del talud y pérdida de porción del terraplén

#### 1.1.4 Modelos de fragilidad y vulnerabilidad existentes

La exposición y vulnerabilidad de la red vial ante flujos de detritos es una problemática recurrente. Sin embargo, aún en muchos países se suelen tener políticas reactivas más que proactivas, con una investigación a veces limitada sobre la prevención, predicción y gestión del riesgo (Sepúlveda et al., 2006). Por otro lado, no siempre se considera esta amenaza adecuadamente en el diseño y operación de la infraestructura vial, convirtiéndose en un peligro latente para aquellos elementos de la red que se encuentran en zonas susceptibles a la ocurrencia de flujos de detritos.

Para suplir la falencia anterior, existen en la literatura diversos modelos probabilísticos que permiten cuantificar el riesgo que poseen las infraestructuras expuestas a ciertas amenazas naturales. Dentro de ellos se encuentran las curvas de fragilidad, que corresponden a un modelo que expresa la probabilidad de exceder diferentes estados de daño límites en función de alguna medida de excitación ambiental o intensidad de la amenaza (Pitilakis et al., 2014; Porter, 2016; Schultz et al., 2010). Por otra parte, las curvas de vulnerabilidad se describen como aquellas que muestran la probabilidad de alcanzar pérdidas (sociales o económicas), dado un nivel de intensidad de la amenaza (Pitilakis et al., 2014). En ambos casos el desarrollo de las curvas requiere la elección de una intensidad de amenaza que caracterice la potencia del fenómeno natural y lo relacione con la respuesta o consecuencia sobre la infraestructura analizada (Pitilakis et al., 2014). Asimismo, debe escogerse en términos de alguna medida práctica de cuantificar para facilitar las mediciones ya sean en terreno o experimentales y asegurar la utilidad de las curvas elaboradas.

Se han desarrollado en la literatura curvas de fragilidad para la amenaza de flujos de detritos sobre construcciones residenciales, considerando al flujo de momento ( $hv^2$ ) como intensidad (Prieto et al., 2018) y curvas de vulnerabilidad asociadas a la altura del flujo como medida de intensidad (Quan Luna et al., 2011; Totschnig et al., 2011). Para el caso de la infraestructura de transporte, el estudio de la vulnerabilidad que tienen los activos expuestos a flujos de detritos es relativamente tardío y comparativamente menor a lo desarrollado para viviendas (Liang & Xiong, 2019). Tsubaki et al. (2016) desarrollaron curvas de fragilidad para evaluar el riesgo que tenían los terraplenes de ferrocarril expuestos a flujos, las que se calibraron a partir de registros de campo y estimaciones de altura de flujo. Winter et al. (2013) desarrollaron curvas de fragilidad para caminos asociados al depósito de material de flujos de detritos sobre la calzada, a través de una encuesta a expertos y considerando el volumen de material como intensidad de amenaza. Por otra parte, Dagá et al. (2018) desarrollaron curvas de falla para el volcamiento y deslizamiento del tablero de puentes expuestos a flujos laháricos con la altura de estos últimos como medida de intensidad. Mientras que, Liang y Xiong (2019) cuantificaron la vulnerabilidad de la subestructura de puentes expuesta al impacto de los flujos de detritos, obteniendo curvas de fragilidad a través de la definición de un índice de daño y considerando como intensidad de amenaza medida al flujo de momento ( $hv^2$ ). Pese a lo anterior, aún no existen modelos que cuantifiquen el daño que terraplenes de caminos sufren producto de la exposición a flujos de detritos, ni tampoco avances en el desarrollo de curvas de fragilidad para este tipo de infraestructuras.

## **1.2 Definición del problema**

A partir de los antecedentes descritos anteriormente acerca de la exposición de los elementos de la red vial a flujos de detritos, es posible notar que estos producen efectos de manera recurrente sobre los activos de la red, siendo los puentes y terraplenes de caminos aquellos elementos con importantes consecuencias físicas permanentes. A su vez, estas consecuencias generan altos costos directos por la reparación y reconstrucción de los elementos afectados y también costos indirectos asociados a los usuarios de las vías, producto de la interrupción y disminución de la capacidad de estas. Para predecir y

evaluar el riesgo que lo anterior involucra y, además, elaborar estrategias de planificación, diseño y mitigación, se han generado modelos de vulnerabilidad y fragilidad en el marco de la gestión del riesgo de flujos de detritos. Existen modelos para cuantificar el daño para el caso de los puentes, sin embargo, a la fecha aún no hay modelos de daño objetivos que permitan cuantificar la probabilidad de daño que los terraplenes de caminos tienen producto de los diversos tipos de exposición a los flujos de detritos.

De esta forma, este estudio se centrará en dos oportunidades de investigación: (1) la carencia de modelos que describan los mecanismos de daño que tienen terraplenes de caminos expuestos perpendicular y paralelamente a flujos de detritos; y (2) la falta de modelos de fragilidad que permitan cuantificar la vulnerabilidad que tienen los terraplenes de caminos expuestos a flujos de detritos. Lo anterior permitiría aportar a la literatura con una herramienta para la gestión del riesgo de flujos de detritos sobre la red vial.

### **1.3 Hipótesis**

A partir de la evidencia de la literatura y el problema definido se plantea la siguiente hipótesis:

La probabilidad de daño en terraplenes de caminos expuestos a flujos de detritos distribuye log-normal con un 99.5% de confianza y es función del tiempo de interacción, propiedades y altura, tanto del flujo como del terraplén.

### **1.4 Objetivos**

El objetivo general de esta tesis consiste en desarrollar modelos de fragilidad para evaluar la probabilidad de daño que tienen los terraplenes de caminos expuestos a flujos de detritos. Los objetivos específicos de la tesis son los siguientes:

(1) Definir modelos conceptuales asociados a cada tipo de daño identificado en los terraplenes de caminos expuestos perpendicular y paralelamente a flujos de detritos,

(2) Caracterizar la amenaza de flujos de detritos y a los procesos involucrados en los modelos conceptuales definidos,

(3) Calibrar modelos que permitan estimar la probabilidad de daño de terraplenes de caminos expuestos perpendicularmente a flujos de detritos y comparar con antecedentes históricos de eventos y

(4) Calibrar modelos que permitan estimar la probabilidad de daño de terraplenes de caminos expuestos paralelamente a flujos de detritos y comparar con antecedentes históricos de eventos.

### **1.5 Alcances de la investigación**

Se describen a continuación los alcances que tendrá esta investigación de manera de poder acotar el estudio y asegurar la viabilidad de este.

1. Se estudiará la exposición perpendicular y paralela que los terraplenes de caminos tienen a los flujos de detritos, las cuales representan los principales casos de daño.
2. Los modelos de daño identificados se consideran independientes entre sí.
3. Se considerará como amenaza a los flujos de detritos, considerando para esto un peso específico asociado a flujos menos densos, con una baja concentración de sedimentos y bajo transporte de escombros, así como también a aquellos flujos más densos, con una alta concentración de sedimentos y un alto transporte de escombros.
4. Para fines de los modelos desarrollados se considerarán todo tipo de flujos de detritos, independientes de su causa de origen o factor detonante.
5. Los terraplenes de caminos se considerarán como una de las infraestructuras viales más vulnerables a flujos de detritos.
6. Se considerarán los modelos desarrollados en dos tipos de vías según su capacidad: caminos bidireccionales sobre terraplenes y vías multicarriles sobre terraplenes.

### **1.6 Metodología de la investigación**

En el siguiente diagrama se muestra la metodología a utilizar en esta investigación:



**Figura 1.** Metodología de la investigación

A partir de la Figura 1 es posible identificar tres etapas en la investigación asociadas a los distintos objetivos específicos.

Etapa I – Proceso y elemento crítico: asociada al objetivo 1, en donde a través de la revisión de imágenes a nivel internacional y nacional. Reuniones con instituciones afines como vialidad y revisión de bases de datos de eventos de flujos de detritos acontecidos en Chile, se espera poder identificar los mecanismos de falla de los terraplenes expuestos a flujos de detritos y precisar los modelos conceptuales asociados a cada uno de los tipos de exposición.

Etapa II – Caracterizar la amenaza y los procesos involucrados: asociada al objetivo 2, en donde a través de la revisión de los tipos de flujos de detritos y sus características, revisión de los modelos existentes y el análisis de los fenómenos físicos involucrados en el daño de los terraplenes expuestos a flujos de detritos, se espera obtener como resultado la definición de las funciones de estado límite involucradas en cada uno de los modelos conceptuales.

Etapa III – Calibrar los modelos y comparar con antecedentes históricos: asociada a los objetivos 3 y 4 a la vez, en esta última etapa primero se recopilan las variables involucradas en las funciones de estado límite, se definen los estados de daños a considerar, para luego, a través de simulaciones de Monte Carlo, obtener los puntos de las curvas de fragilidad. Luego, a través del método de máxima verosimilitud se ajustan

distribuciones Log-Normales a las curvas obtenidas de la simulación y se utiliza el criterio de bondad de ajuste para evaluar la parametrización. Finalmente, se recopilan registros de eventos y se sostienen entrevistas con expertos para que a través del contraste estadístico se comparen las curvas desarrolladas con antecedentes históricos. Esta etapa tiene como principal resultado el desarrollo de dos artículos, cada uno asociado al tipo de exposición perpendicular y paralela.

### **1.7 Estructura del documento**

El presente documento de tesis responde al tipo de formato de artículo o *paper*. Para esto se divide en 5 capítulos principales. El primero corresponde a una introducción amplia que contiene una revisión de antecedentes generales para comprender el problema en estudio. En este se explican los conceptos fundamentales de la gestión del riesgo de desastres naturales, su importancia y las principales utilidades que posee. A su vez, se deja en evidencia la vulnerabilidad de la red vial a distintas amenazas naturales y su rol como infraestructura crítica de un país. Luego, se define la amenaza a considerar en este estudio que corresponde a los flujos de detritos y su interacción con los distintos elementos de la red vial, identificando a los terraplenes de caminos como uno de los elementos más vulnerables y de los que aún no se tiene mayor estudio. Finalmente, se revisan los modelos probabilísticos para flujos de detritos existentes a la fecha y se da cuenta del vacío de investigación vigente.

Luego, el capítulo 2 corresponde a una revisión de literatura complementaria, en el que se estudian en profundidad los métodos existentes para la calibración de curvas de fragilidad, en particular el método analítico que es el utilizado en esta investigación.

Posteriormente, el capítulo 3 corresponde al artículo científico que desarrolla las curvas de fragilidad para terraplenes de caminos expuestos perpendicularmente, lo que responde al objetivo 3 de esta investigación. Por otro lado, el capítulo 4 corresponde al artículo científico que desarrolla las curvas de fragilidad para terraplenes de caminos expuestos de manera paralela, lo que responde al objetivo 4 de la investigación. El capítulo 3 corresponde a un artículo científico enviado a revista de categoría WoS,

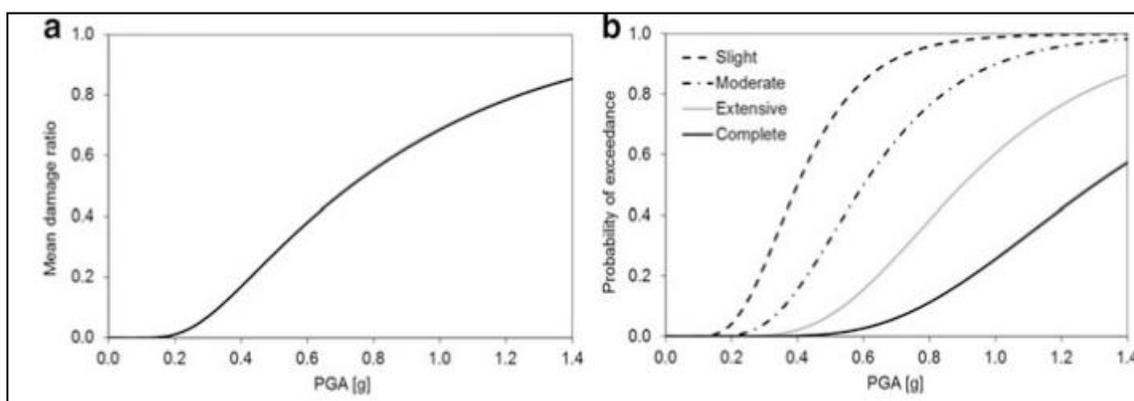
mientras que el capítulo 4 también corresponde a un artículo científico que se encuentra en proceso de envío a revista.

Finalmente, en el capítulo 5 se encuentran las principales conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron a partir del estudio realizado, poniendo especial énfasis en la necesidad de continuar investigando acerca de las amenazas naturales y cómo están afectan a las distintas infraestructuras de un país.

## 2. ANTECEDENTES COMPLEMENTARIOS PARA EL DESARROLLO DE MODELOS DE FRAGILIDAD DE TERRAPLENES DE CAMINOS

### 2.1 Modelación de las curvas de fragilidad y vulnerabilidad

En el capítulo 1.1.4 ya se definió lo que se considera como curvas de fragilidad y vulnerabilidad. Un ejemplo de ambas curvas para la amenaza natural de sismo medida en PGA (*peak ground acceleration*) se muestra en la Figura 2:



**Figura 2.** Ejemplos de (a) curvas de vulnerabilidad midiendo relación de daño promedio y (b) curvas de fragilidad midiendo porcentaje de excedencia (Pitilakis et al., 2014).

Es posible entender que el enfoque desde donde se exhibe el daño en las curvas de vulnerabilidad y fragilidad es distinto, sin embargo, en la práctica, pasar de un tipo de curva a otra es una tarea simple (Pitilakis et al., 2014). De esta forma queda claro que la vulnerabilidad no es la fragilidad. En consecuencia, la vulnerabilidad mide la pérdida, la fragilidad mide la probabilidad. Las funciones de vulnerabilidad se refieren a muchas formas: funciones de daño, funciones de pérdida, curvas de vulnerabilidad y probablemente otras (Porter, 2016). Para el caso de este estudio, se elaborarán curvas de fragilidad como tales y también curvas llevadas a la falla, esto significa que solo se considera el estado de daño completo, es decir, cuando la infraestructura falló de manera irreversible (curva de más a la derecha en el caso de la Figura 2-b).

Para la elaboración de las curvas de fragilidad o falla existen 4 enfoques o métodos de desarrollo/calibración: (1) empírico, (2) en base a opinión de expertos, (3) analítico e (4)

híbrido. Los cuatro métodos con sus datos de entrada correspondientes se muestran en la siguiente Tabla 2:

**Tabla 2.** Enfoques existentes para la calibración de curvas de fragilidad

<b>Enfoque</b>	<b>Empírico</b>	<b>Opinión de expertos</b>	<b>Analítico</b>	<b>Híbrido</b>
<b>Datos de entrada</b>	Datos de daño	Opinión expertos	Modelos físicos	Combinaciones anteriores

Modificada de (Pitilakis et al., 2014).

Las funciones desarrolladas a través del enfoque empírico son elaboradas a partir de datos reales de daño de infraestructura expuesta a cierta amenaza natural, tienen un alto grado de credibilidad y son las más deseables desde el punto de vista de la evaluación y gestión de riesgos porque se derivan totalmente de las observaciones del desempeño real de los activos (Pitilakis et al., 2014; Porter, 2016; Schultz et al., 2010; World Bank, 2011). Sin embargo, la disponibilidad de datos reales de daño, la mayoría de las veces es baja o nula, siendo esta la principal desventaja de este método de calibración. Por otro lado, los datos empíricos están asociados a una zona en particular, por lo que es difícil poder extrapolar dichas curvas a zonas que no presenten características similares a la de los datos utilizados.

El segundo enfoque es el analítico, el que utiliza como dato de entrada un modelo físico para encontrar posibles puntos en las curvas caracterizando el estado límite de rendimiento de las estructuras. De esta manera simula el desempeño de la infraestructura sometida a cierta sollicitación por parte de la amenaza natural y hace predicciones confiables de resultados y relaciona el daño y la pérdida con la intensidad de la amenaza (Pitilakis et al., 2014; Porter, 2016; Schultz et al., 2010; World Bank, 2011). En este caso, las principales desventajas son que necesita un mayor tiempo de implementación y que puede basarse en simplificaciones y supuestos.

Las curvas elaboradas a partir de la opinión de expertos consideran el juicio de especialistas reconocidos en la materia, quienes a través de su experiencia proporcionan una estimación del daño o pérdida dada una intensidad de la amenaza natural (Pitilakis

et al., 2014; Porter, 2016; Schultz et al., 2010; World Bank, 2011). Cuando faltan datos empíricos o el método analítico es demasiado costoso, una buena opción es considerar la opinión de expertos (Porter, 2016). Sin embargo, al ser datos basados en una opinión, la principal desventaja es la existencia de un sesgo en los datos proporcionados.

Finalmente, está la metodología o enfoque híbrido, en donde se utiliza dos o más de los métodos mencionados anteriormente para calibrar las curvas de fragilidad (Schultz et al., 2010). Esto quiere decir que, por ejemplo, si elaboro las curvas a partir de un enfoque analítico, pero las valido con datos empíricos, estoy utilizando el método híbrido para la confección final de la curva.

Para el caso de esta investigación se utiliza el método analítico para la calibración, el cual se basa en la construcción de una función de estado límite ( $G(\hat{x}_j)$ ), cuyo vector  $\hat{x}_j$  está definido por todas las variables básicas involucradas en el modelo. Para esto es necesario definir un modelo conceptual del mecanismo de falla a analizar, el cual involucre las sollicitaciones provocadas por el flujo de detritos, las que se definen en este caso como fuerzas demandantes  $S(\hat{x}_j)$  y por otro lado, aquella capacidad de resistir esfuerzos relacionada con las propiedades del terraplén, las que corresponderán a las fuerzas resistentes  $R(\hat{x}_j)$ . Si la función de estado límite ( $G(\hat{x}_j)$ ) toma un valor mayor a 0, significa que aún hay capacidad o resistencia residual, mientras que, si la función es menor a 0, el sistema se encuentra en un estado de falla (Schultz et al., 2010). Valores iguales a 0 notan la condición de estado límite.

$$G(\hat{x}_j) = R(\hat{x}_j) - S(\hat{x}_j) \quad (1)$$

Las variables ( $\hat{x}_j$ ) que determinan las fuerzas demandantes y resistentes pueden ser de tipo determinístico y otras de tipo probabilístico introduciendo el carácter estocástico a la función de estado límite. De esta manera, la probabilidad de falla del sistema estará dada por la probabilidad de que las fuerzas resistentes sean superadas por las fuerzas demandantes (ver Ec. (2)). Las curvas de fragilidad se caracterizan por la definición de diferentes estados de daño de la infraestructura, siendo en general definidos como daño leve, moderado, extensivo y completo, asociados a la interrupción del servicio que presta

la infraestructura. Cuando se habla de curvas de falla, se está considerando solo el estado de daño completo que representa la falla total de la infraestructura.

$$P_F = P(R(\hat{x}_j) \leq S(\hat{x}_j)) = P(R(\hat{x}_j) - S(\hat{x}_j) \leq 0) \quad (2)$$

### **3. DESARROLLO DE CURVAS DE FRAGILIDAD PARA TERRAPLENES DE CAMINOS EXPUESTOS PERPENDICULARMENTE A FLUJOS DE DETRITOS**

#### **Resumen**

La red vial está expuesta a diversas amenazas naturales, siendo los flujos de detritos uno de los fenómenos que generan daños permanentes e interrupciones recurrentes en ella, representando una parte significativa de las pérdidas económicas globales. Terraplenes de caminos son parte de los activos viales que se exponen frecuentemente a estos flujos al configurarse en zonas con diferentes relieves naturales, pudiendo exponerse de manera perpendicular y paralela a ellos. Para cuantificar el daño e interrupción y contribuir a la evaluación del riesgo de flujos de detritos se han desarrollado modelos probabilísticos llamados curvas de fragilidad, sin embargo, aún no hay avances para terraplenes de caminos. El objetivo de esta investigación es desarrollar curvas de fragilidad mediante el enfoque analítico para describir el impacto y efecto erosivo de flujos de detritos que escurren perpendicularmente a terraplenes y el consecuente efecto en la capacidad operacional del camino. Se calibraron curvas para caminos bidireccionales y multicarril a través de simulaciones de Monte Carlo, se ajustaron distribuciones log-normales con un nivel de significancia de 0.5% y se compararon con datos históricos recopilados. Se comprobó que terraplenes de caminos más bajos son más frágiles al impacto y erosión de los flujos de detritos, mientras que un mayor tiempo de interacción aumenta las probabilidades de daño por erosión. Se espera contribuir con una componente para la evaluación del riesgo de la red de caminos, así como también con modelos de daño que sirvan de base para otros tipos de interacciones e infraestructuras.

#### **3.1 Introducción**

Los flujos de detritos son una mezcla de agua y sedimento conducido por la gravedad y que transporte escombros de diversos tamaños (Jakob & Hungr, 2005; Takahashi, 2014). Estos fenómenos se consideran como la tercera amenaza natural más letal y destructiva,

después de terremotos e inundaciones (Thouret et al., 2020). Prieto et al. (2018) destacan que estos fenómenos representan una parte significativa de las pérdidas económicas globales que generan las amenazas hidrológicas, afectando a menudo a los asentamientos humanos y a la infraestructura que se localiza en los fondos de los valles. Entre las consecuencias que generan los flujos de detritos se incluyen pérdida de vidas humanas, destrucción de casas e instalaciones, daños a líneas ferroviarias y caminos, entre muchas otras consecuencias indirectas que son difíciles de cuantificar tales como la pérdida de productividad e impacto social (Jakob & Hungr, 2005; Tacnet et al., 2012). Una de las infraestructuras más expuestas a estos fenómenos son las redes de caminos, ya que se adaptan a las geografías de los territorios en donde se emplazan, teniendo una alta vulnerabilidad a las amenazas naturales inherentes a dichas zonas. En Escocia el año 2004 una serie de flujos de detritos afectaron partes importantes de la red de carreteras con costos directos de limpieza, reparación y reemplazo de infraestructura dañada o pérdida de US\$2.5 millones (Winter et al., 2016). En un evento ocurrido el año 2006 en la autopista que conecta Suecia y Noruega se tuvieron pérdidas estimadas de 1.2 millones de euros por daños e interrupciones de las vías (Jenelius, 2010). En la zona norte de Chile, solo en los eventos de flujos de detritos ocurridos el año 2015 se reportaron daños a viviendas y caminos valuados en US\$ 1,5 billones (SERNAGEOMIN, 2017).

Dentro de los elementos de la red vial más expuestos a flujos de detritos se encuentran los puentes y terraplenes. Los efectos de los flujos dependerán si el escurrimiento se mueve paralelo o perpendicular al activo vial expuesto, entendiéndose que en la mayoría de los casos la aproximación no es perfectamente paralela o perpendicular. Los puentes presentan una alta exposición a flujos de detritos puesto que se emplazan, por lo general, de manera perpendicular al escurrimiento de ríos. Los principales efectos de estos flujos en puentes se deben a la socavación producida en las fundaciones de cepas y estribos, como también, al empuje sobre tableros y vigas dependiendo de la intensidad del evento (Argyroudis et al., 2019; Dagá et al., 2018; Kim et al., 2017; Zou et al., 2018). Los terraplenes en tanto se ven expuestos a flujos perpendiculares cuando atraviesan escurrimientos de aguas menores, en donde por lo general existen alcantarillas u obras

de arte, así como también cuando proveen acceso a puentes. Este impacto puede dañar parcial o totalmente a terraplenes producto de la fuerza de empuje y también debido a la erosión de la subestructura (Argyroudis et al., 2019; Zou et al., 2018). Asimismo, cuando los caminos se emplazan paralelos al escurrimiento de ríos o cercanos a estos, los terraplenes pueden verse afectados a la capacidad erosiva del flujo, en especial en presencia de detritos. Además de las consecuencias físicas producidas por el daño de terraplenes, los flujos afectan los niveles de servicio y transitabilidad normal de los caminos, disminuyendo la capacidad operacional de estos (Argyroudis et al., 2019; Suweda, 2016).

El estudio de la fragilidad de terraplenes expuestos a amenazas naturales es fundamental para evaluar el riesgo y resiliencia de redes viales, en especial los terraplenes, entendidos como uno de los activos viales con mayor extensión dentro de la red. Utasse et al. (2016) desarrollaron dos enfoques independientes para la evaluación de la vulnerabilidad y la evaluación teórica del riesgo se contrastó con la gestión real de los tomadores de decisiones en una red de carreteras en los Alpes franceses. También Winter et al. (2020) proponen una metodología para la evaluación cuantitativa de riesgos del impacto de los flujos de escombros en un entorno vial, aplicándola a dos sitios en Escocia. La naturaleza estocástica, tanto de la amenaza natural como de la susceptibilidad que tiene la infraestructura vial a presentar un estado de daño, requiere del desarrollo de modelos probabilísticos de fragilidad de cada activo que forma parte de la red (Liang & Xiong 2019). Para esto, las curvas de fragilidad estiman la probabilidad de exceder diferentes estados de daño límites en función de alguna medida de excitación ambiental (Pitilakis et al. 2014; Porter 2016; Schultz et al. 2010; Shinozuka et al. 2000). Martinović et al. (2018) proponen una metodología para el desarrollo de curvas de fragilidad deslizamientos de tierra inducidos por lluvia en redes de transporte y su aplicación a un caso típico en la red ferroviaria irlandesa. A través de un análisis de confiabilidad y elementos finitos Kim et al. (2017) desarrollaron curvas de fragilidad representando múltiples tipos de falla en puentes debido a inundaciones. Tsubaki et al. (2016) desarrollaron curvas de fragilidad para evaluar el riesgo que tienen terraplenes de ferrocarril expuestos a la superación de flujos, siendo calibradas a partir de registros

empíricos en terreno y estimaciones de altura de flujo. Winter et al. (2013;2014) desarrollaron curvas de fragilidad para caminos asociadas a la interrupción del tráfico producto del depósito de material de flujos de detritos sobre la plataforma. Por su parte, Dagá et al. (2018) desarrollaron curvas de falla de puentes expuestos a flujos laháricos de volcanes modelando analíticamente el volcamiento de cepas y estribos, como también el deslizamiento del tablero. Liang y Xiong (2019), en tanto, cuantificaron la vulnerabilidad que tiene la subestructura de puentes expuesta al impacto de flujos de detritos, obteniendo curvas de fragilidad a través de la simulación con elementos finitos y la definición de un índice de daño.

A pesar de los avances existentes para estimar el daño que generan los flujos de detritos en elementos de la red vial descritos en la revisión anterior, aún falta un desarrollo cuantitativo en el caso de terraplenes de caminos expuestos a flujos de escombros y sus consecuencias en la capacidad operativa del camino. El principal objetivo del estudio es desarrollar curvas de fragilidad mediante el enfoque analítico para describir el impacto y efecto erosivo de flujos de detritos que escurren perpendicularmente a terraplenes y el consecuente efecto en la capacidad operacional del camino. La metodología considera el desarrollo de dos modelos conceptuales que describen las fuerzas de impacto sobre terraplenes y la erosión que se genera aguas abajo del terraplén producto de la caída del flujo sobre el pie del talud. Mediante simulación de Monte Carlo se emulan escenarios probables de amenaza y se modela el consecuente daño en la estructura del terraplén. Dicho daño se relaciona con la consecuencia operacional en caminos bidireccionales y multicarril en términos de la pérdida de capacidad de las vías. Finalmente, las curvas se ajustan a distribuciones de probabilidad log-normales y se comparan con datos históricos recopilados. El alcance de esta investigación incluye los efectos de flujos de detritos sobre terraplenes expuestos perpendicularmente puesto que este tipo de interacción involucra dos consecuencias físicas, tanto el impacto como la erosión aguas abajo, por lo que revierte una mayor complejidad, siendo un futuro desafío modelar la erosión de terraplenes producto de flujos de detritos que fluyen de manera paralela a estos.

## **3.2. Efectos de los flujos de detritos sobre terraplenes de caminos**

### **3.2.1 Características de los flujos de detritos**

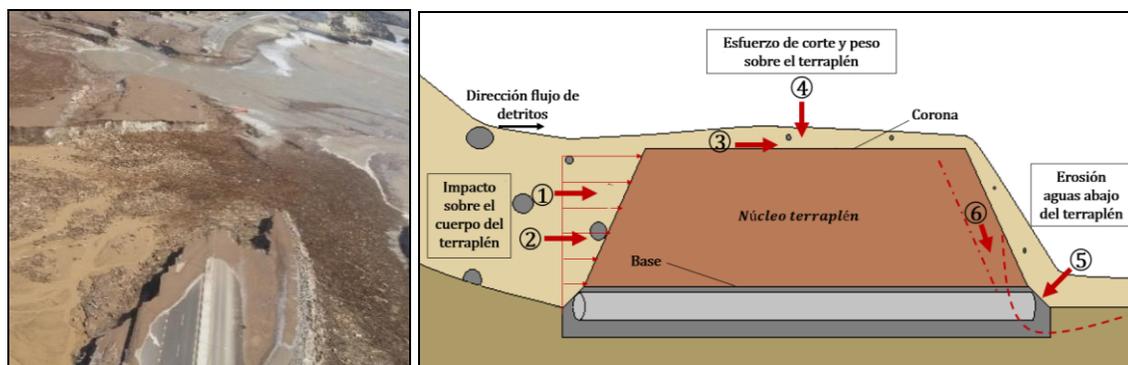
Los flujos de detritos son una mezcla de tierra suelta, roca y diversos tipos de escombros con cantidades variables de agua que forman un flujo torrencial que fluye a través de una pendiente (Highland & Bobrowsky, 2008; Takahashi, 2014). Se pueden gatillar por precipitaciones intensas, nevazones, sismos, erupciones volcánicas (Nettleton et al., 2005). A su vez, pueden existir condiciones que favorezcan su ocurrencia, como la disponibilidad de sedimentos y escombros, saturación de los suelos superficiales, ausencia de cobertura de vegetación, pendientes pronunciadas, entre otros (Skilodimou & Bathrellos, 2016). Están compuestos por dos fases sólido-líquido, en donde las partículas finas y el agua forman una lechada relativamente uniforme, mientras que las partículas más gruesas forman la fase sólida del flujo (He, Liu, & Li, 2016). Debido principalmente a su densidad, se ha evidenciado que los flujos de detritos son capaces de transportar rocas, árboles, hasta elementos más contundentes como autos o partes de construcciones (Contreras et al., 2015). Existen algunos tipos de flujos de detritos más comunes, entre los que destacan los flujos de lodos, que contienen sedimentos de menor tamaño mezclados con agua, son viscosos y escurren con gran velocidad. Los flujos pedregosos, similares a una avalancha de detritos con bajo contenido de agua, pero alto contenido en piedras de diversos tamaños y finalmente, definen un caso particular de flujo turbulento, asociado comúnmente a la mezcla de agua con ceniza volcánica definido como lahar (Skilodimou & Bathrellos, 2016; Takahashi, 2014). La intensidad en la que se puede medir la capacidad destructiva de estos flujos tiene relación con las características hidráulicas que los definen, las que en general dependen de la velocidad, tasa de descarga y la altura del flujo (Thouret et al., 2020).

### **3.2.2 Exposición de terraplenes de caminos a flujos de detritos**

Un terraplén es un volumen de tierra que se coloca y compacta elevando el nivel de una carretera, vía férrea y aeropuertos por encima del nivel de superficie del suelo existente y así dar continuidad al trazado de las vías. Consta de tres partes que lo constituyen, desde abajo hacia arriba primero está la base del terraplén, luego el núcleo que

corresponde al cuerpo central y finalmente la corona o superficie. Se suele utilizar un cuerpo de terraplén de material homogéneo y de mediana altura a lo largo de riberas de ríos y en la construcción de carreteras (Wu, Berhe, & Ashour, 2012).

Los efectos de flujos de detritos sobre terraplenes de caminos dependen del tipo de exposición que estos tienen al flujo. El efecto en la exposición paralela se define en términos de la erosión que el flujo ejerce sobre el talud del terraplén que colinda al cauce, mientras que, para la exposición perpendicular, el terraplén actúa como un cuerpo que obstruye el paso del fluido (ver Figura 3(a)), lo que desencadena tres fenómenos sobre el terraplén: el impacto del flujo sobre el cuerpo del terraplén, el esfuerzo de corte y peso del flujo sobre la corona del terraplén y la erosión aguas abajo producto de la caída del flujo al pie del talud. En este artículo se considera el estudio de la exposición perpendicular ya que revierte una mayor complejidad al incluir los fenómenos mencionados en la Tabla 3, de los cuales se desprenden los dos modelos de daño desarrollados más adelante.



**Figura 3:** (a) Vista aérea terraplén de camino bidireccional afectado por flujo de detritos en Chile, evento 2015. (b) Fenómenos asociados a la exposición perpendicular de terraplenes a flujos de detritos.

**Tabla 3:** Fuerzas asociadas a la exposición perpendicular de terraplenes de caminos a flujos de detritos.

Fuerzas	Descripción
<b>Impacto sobre el cuerpo del terraplén</b>	Este se divide en el impacto de la fase líquida del flujo que contiene los sedimentos diluidos en ella, asociada a una fuerza hidrodinámica ①, y, por otro lado, en el impacto de los escombros que el flujo puede llegar a transportar, asociado a una fuerza de colisión ② (Liang & Xiong, 2019; Zanchetta et al., 2004).
<b>Esfuerzo de corte y peso sobre el terraplén</b>	Cuando la altura del flujo de detritos supera la altura del terraplén, el flujo pasa sobre la corona de este ejerciendo un esfuerzo de corte ③ y agregando una fuerza hidrostática ④ producida por el peso del fluido sobre la infraestructura (Zanchetta et al., 2004).
<b>Erosión aguas abajo del terraplén</b>	Cuando el flujo pasa sobre la corona, cae aguas abajo del terraplén desencadenándose un fenómeno conocido como erosión de corte de cabeza. Este es una caída de la elevación que se produce en ríos, vertederos de tierra y terraplenes, donde se produce una intensa erosión local al pie del talud ⑤, la que provoca la ruptura de este ⑥ por la pérdida de suelo y peso del mismo (Hanson, Robinson, & Cook, 2001; Zhu, Visser, & Vrijling, 2006; Zhu, Visser, & Vrijling, 2008)

La erosión y en general todos los procesos que afectan los terraplenes son problemas tridimensionales que dependen de la geometría y las propiedades del suelo (Robinson & Hanson, 1994), sin embargo, y para efectos de mantener el desarrollo simple, todos los análisis presentados a continuación serán bidimensionales en deformaciones planas tal como lo consideran diversos autores en sus estudios tomando un ancho unitario del flujo de detritos  $L_{flujo}$  (m) (Hanson et al., 2001; Robinson & Hanson, 1994; Zhao et al., 2015). Se considera que el terraplén está compuesto homogéneamente por un suelo granular no cohesivo y se incluye en el análisis sólo el deslizamiento del bloque (fenómeno ⑥ de la Figura 3(b)) y no el volcamiento, pues este último se asocia a terraplenes compuestos por suelos cohesivos (Zhao et al., 2015).

### 3.2.3 Efectos físicos y operacionales en terraplenes

Se definen dos modelos físicos, independientes el uno del otro y se asocian al daño o consecuencia que generan los flujos de detritos sobre terraplenes. El primero está asociado al empuje que el flujo ejerce sobre el cuerpo del terraplén lo que puede provocar el deslizamiento completo de este último, principalmente cuando se tienen flujos densos. Los terraplenes cuentan a menudo con alcantarillas u obras de drenaje, las que usualmente se encuentran de manera transversal al camino para el escurrimiento de aguas colindantes (Figura 4). El segundo modelo corresponde a la erosión aguas abajo del terraplén producida por la caída del flujo al pie del talud, asociado a todo tipo de flujos (Figura 5). El modelo físico que finalmente se gatille en un terraplén va a depender de las características de este y del flujo que lo afecta.

Asimismo, existen consecuencias asociadas a la interrupción del tráfico y operación de los caminos. La capacidad de las vías se define como el flujo máximo por hora al que se espera que transiten vehículos por un punto o una sección del camino durante un periodo de tiempo dado (Transportation Research Board, 2016). Se consideran para este caso caminos bidireccionales, es decir, aquellos que tienen un solo carril para el tráfico en cada dirección y caminos multicarriles con dos pistas en cada dirección, dejando fuera del análisis a autopistas, vías de alta velocidad, que usualmente tienen más de 3 carriles por sentido (Transportation Research Board, 2016), pues la localización de estas generalmente no presenta mayor exposición a flujos de detritos. El caso bidireccional incluye el sobre ancho de plataforma  $b_{SAP}$  (SAP), el ancho de berma exterior  $b_{berma_{ext}}$  y el ancho de pista  $b_{pista}$ , mientras que, para el caso multicarril además de los parámetros anteriores, se agregan el ancho de berma interior  $b_{berma_{int}}$  y el ancho de mediana  $b_{mediana}$ . En el modelo de impacto asociado al deslizamiento del terraplén se considera que cualquier desplazamiento provocará la falla de este, perdiéndose la capacidad completa de la vía. Para el modelo de erosión aguas abajo se consideran tres estados de daño, definidos en función de la reducción de la capacidad con la que queda el camino luego del evento definidos en la Tabla 4. Esta guarda relación con el ancho del terraplén  $b_{AB}$  que se afecta y el ancho de plataforma  $b_{plataforma}$  característica del tipo de vía y su cantidad de pistas. El estado de daño leve involucra una baja a nula disminución de la

capacidad, el estado de daño moderado considera una disminución menor al 50% de esta y finalmente el daño extensivo es aquel que supera el 50% de reducción de la capacidad. El ancho complementario incluye el ancho del talud del terraplén, el sobre ancho de plataforma (SAP) y el ancho de la berma.

**Tabla 4:** Estados de daño considerados en las curvas de fragilidad del modelo de erosión aguas abajo del terraplén.

Estado de daño	Camino bidireccional	Camino multicarril
Leve Baja a nula probabilidad de reducción de la capacidad de la vía	Erosión causa daño en los anchos complementarios: ancho talud, ancho SAP, ancho berma externa	Erosión causa daño en los anchos complementarios: ancho talud, ancho SAP, ancho berma externa
Moderado Probabilidad de reducir hasta un 50% la capacidad de la vía	Erosión causa daños en la primera pista aguas abajo resultando en la reducción parcial o completa de una dirección del tráfico	Erosión causa daños en una o ambas pistas aguas abajo resultando en la reducción parcial o completa de una dirección del tráfico
Extensivo Probabilidad de reducir sobre un 50% la capacidad de la vía	Erosión causa daños en ambas vías resultando en la reducción parcial o completa de ambas direcciones del tráfico	Erosión causa daños en más de dos pistas resultando en la reducción parcial o completa de ambas direcciones del tráfico

### 3.3 Modelo conceptual del daño de terraplenes para el desarrollo de curvas de fragilidad

#### 3.3.1 Función de estado límite

En esta investigación se utiliza el enfoque analítico para la construcción de las curvas de fragilidad, el que utiliza un modelo físico para encontrar posibles puntos de las curvas (Pitilakis, Crowley & Kaynia, 2014; Porter, 2016). La base de este método es la construcción de una función de estado límite  $G(\hat{x}_j)$ , la que depende de un vector  $\hat{x}_j$

definido por todas las variables básicas involucradas en el modelo (Schultz et al., 2010). La función  $S(\hat{x}_j)$  está asociada a las fuerzas demandantes del flujo de detritos y la función  $R(\hat{x}_j)$  a las fuerzas resistentes del terraplén, definiéndose la función de estado límite en la Ec. (3).

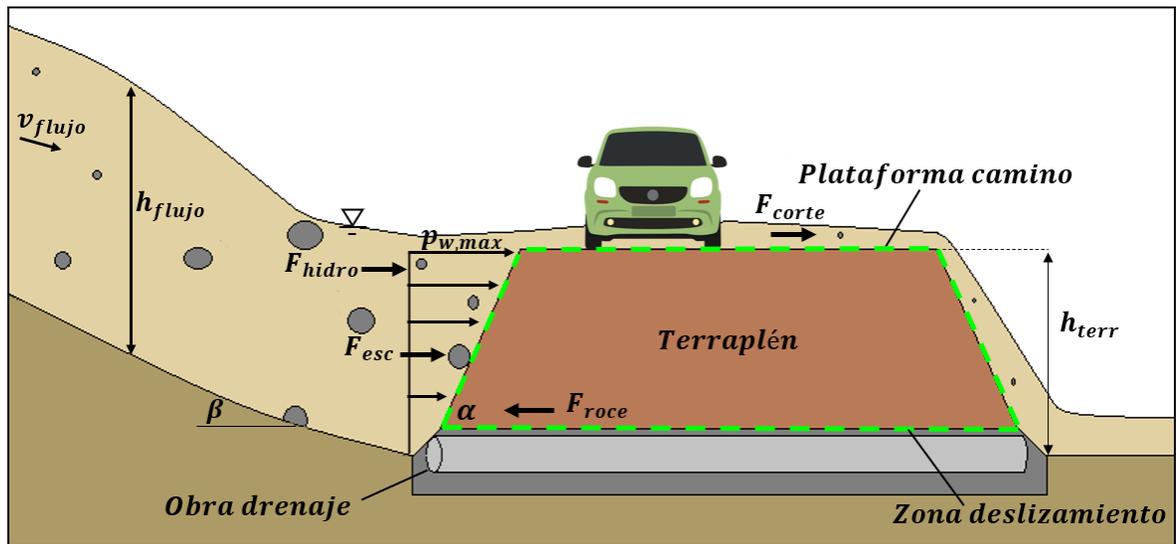
$$G(\hat{x}_j) = R(\hat{x}_j) - S(\hat{x}_j) \quad (3)$$

Si  $G(\hat{x}_j)$  toma un valor mayor a 0 significa que aún hay resistencia residual, mientras que, si la función es menor a 0, el sistema se encuentra en estado de falla (Schultz et al., 2010). Las variables  $\hat{x}_j$  que determinan las fuerzas demandantes y resistentes pueden ser de tipo determinístico y otras de tipo probabilístico introduciendo el carácter aleatorio al análisis. Cada valor que toma la función de estado límite está asociado a cierta intensidad de amenaza, la que se asocia a las características y severidad del fenómeno natural relativo a la consecuencia sobre la infraestructura analizada (Pitilakis et al., 2014). En la literatura que ha estudiado curvas de fragilidad asociadas a flujos de detritos, se ha considerado como intensidad de amenaza al flujo de momento (altura por la velocidad al cuadrado) (Jakob et al., 2012a; Liang & Xiong, 2019; Prieto et al., 2018), al volumen (Winter et al., 2014) y a la altura del flujo (Dagá et al., 2018; Quan Luna et al., 2011; Totschnig et al., 2011). Los tres fenómenos definidos en la Tabla 4 dependen de la altura del flujo, por lo que se considera adecuado seleccionar a esta última como la medida de intensidad de la amenaza. Se describen a continuación los dos modelos de daño más comunes para flujos perpendiculares y su función de estado límite  $G_i(\hat{x}_j)$ .

### 3.3.2 Modelo de deslizamiento del terraplén producto del impacto de flujos de detritos para la definición de $G_1(\hat{x}_j)$

La falla por deslizamiento del terraplén ocurre cuando las fuerzas del flujo de detritos superan la fuerza de roce existente entre el material de la obra de drenaje y el suelo de la base del terraplén. Las fuerzas demandantes  $S(\hat{x}_j)$  son la fuerza hidrodinámica  $F_{hidro}(N)$  y la fuerza de escombros  $F_{esc}(N)$  del flujo, mientras que la fuerza resistente  $R(\hat{x}_j)$  es la fuerza de roce  $F_{roce_1}(N)$  entre la base del terraplén y la superficie de contacto con la obra de drenaje. Cuando la altura del flujo  $h_{flujo}(m)$  supera la altura del terraplén  $h_{terr}(m)$ , se agrega el peso del flujo a la fuerza de roce, definiéndose como  $F_{roce_2}(N)$  y se adiciona la

fuerza asociada al esfuerzo de corte  $F_{corte}(N)$  sobre la corona del terraplén. En caso de no haber drenaje el fenómeno se traduce en evaluar la fricción generada entre el suelo del terraplén y el suelo del terreno natural, lo que en la práctica es un análisis similar a lo considerado para la fricción entre base del terraplén y drenaje.



**Figura 4:** Diagrama de cuerpo libre para el deslizamiento terraplén completo.

La función de estado límite  $G_1(\hat{x}_j)$  se define en términos de si el flujo supera o no supera la altura del terraplén.

$$G_1(\hat{x}_j) = \begin{cases} F_{roce1} - F_{hidro} - F_{esc}, & h_{flujo} \leq h_{terr} \\ F_{roce2} - F_{hidro} - F_{esc} - F_{corte}, & h_{flujo} > h_{terr} \end{cases} \quad (4)$$

Para las fuerzas  $F_{hidro}$ ,  $F_{esc}$ ,  $F_{roce1}$ ,  $F_{roce2}$  y  $F_{corte}$  se definen parámetros físicos y geométricos del flujo de detritos. Para el cálculo de la velocidad promedio del flujo se considera la ecuación de Manning usando una variación en el término de la rugosidad llamada “pseudo Manning”, la que considera las diferencias reológicas entre el agua y los flujos de detritos (Jin & Fread, 1999). Siendo  $n'(-)$  la “pseudo” rugosidad de Manning,  $h_{flujo}(m)$  la altura del flujo e  $i(-)$  la pendiente del canal.

$$V_{flujo} = \frac{1}{n} \left( \frac{h_{flujo} * L_{flujo}}{2 * h_{flujo} + L_{flujo}} \right)^{\frac{2}{3}} \sqrt{i} \quad (5)$$

Se usó el modelo propuesto por la AASHTO (2012) para la presión hidrodinámica, la que depende de la velocidad del flujo  $v_{flujo} \left(\frac{m}{s}\right)$ , la aceleración de gravedad  $g \left(\frac{m}{s^2}\right)$ , el peso específico  $\gamma_{flujo} \left(\frac{kN}{m^3}\right)$  del flujo y un coeficiente de arrastre  $C_d(-)$  igual a 1.4 (AASHTO 2012; Dagá et al. 2018). Además, considera una distribución de presiones triangular invertida. Esta es la presión perpendicular sobre cualquier cuerpo, sin embargo, terraplenes de caminos poseen un talud inclinado, por lo que la presión máxima resultante se debe expresar en términos del ángulo  $\alpha(^{\circ})$  del talud del terraplén. La fuerza resultante se calcula como la presión máxima aplicada sobre la superficie del talud del terraplén, donde  $\beta(^{\circ})$  es el ángulo de inclinación correspondiente a la pendiente  $i(-)$  de la superficie por la que escurre el flujo, quedando la fuerza hidrodinámica del flujo  $F_{hidro} (N)$  definida en la Ec. (6). Se consideró una densidad de flujo que osciló desde los 1300 a los 2500  $\frac{Kg}{m^3}$  abarcando desde flujos diluidos a hiperconcentrados (Takahashi, 2014).

$$F_{hidro} = \frac{C_d \gamma_{flujo} v_{flujo}^2 h_{flujo} L_{flujo} \cos(90^{\circ} - \alpha) \cos(\beta)}{2 g \sin \alpha} \quad (6)$$

Para la fuerza de escombros se utiliza la ecuación de Haechnel y Daly (2004) adaptada por Stolle et al. (2018) (Ec. (7)), la que involucra la velocidad del flujo  $v_{flujo}$ , el diámetro  $D_{grav}(m)$  promedio de los escombros, un factor de corrección igual a 0.52 y el peso específico de los bloques de grava  $\gamma_{grav} \left(\frac{kN}{m^3}\right)$  igual a 25.97 (Wang et al. 2018) La rigidez del objeto  $k \left(\frac{MN}{m}\right)$  se considera igual a 14 (AASHTO 2012; Dagá et al. 2018; Haechnel & Daly 2004).

$$F_{esc} = v_{flujo} \sqrt{0.52 k \left(\frac{4}{3} \pi (0.5 D_{grav})^3 \gamma_{grav}\right)} \quad (7)$$

La fuerza  $F_{corte}$  (Ec. (8).) aplicada sobre la superficie de la corona del terraplén se define en función de un esfuerzo de corte asociado a la fase líquida del flujo  $\tau_{flujo}$  y un esfuerzo de corte asociado a los granos gruesos  $\tau_{granos}$ , ya que estos interactúan con la superficie a través de contactos duraderos como deslizamiento por fricción y rodadura (Jakob & Hungr, 2005). El área de la superficie sobre la que se aplican los esfuerzos depende del ancho unitario del flujo  $L_{flujo}$  y del ancho de la plataforma del camino  $b_{plataforma}$ .

$$F_{corte} = (\tau_{flujo} + \tau_{granos}) L_{flujo} b_{plataforma} \quad (8)$$

El esfuerzo  $\tau_{flujo}$  se asocia al corte basal que los flujos ejercen sobre los lechos de ríos (Ec. (9))(Haas & Woerkom, 2016; Julien & Paris, 2010; Takahashi, 2014), el que depende de la altura  $h_1(m)$ , el peso específico del mismo  $\gamma_{flujo} \left(\frac{kN}{m^3}\right)$  y de la inclinación  $s(-)$  de la superficie por la que se está aplicando el esfuerzo. Para la altura  $h_1(m)$  del flujo se considera que el terraplén funciona de manera similar a un vertedero hidráulico de pared gruesa, calculándose según lo definido por Durán (2004) en la Ec. (10).

$$\tau_{flujo} = \gamma_{flujo} h_1 s \quad (9)$$

$$h_1 = \frac{2}{3} * (h_{flujo} - h_{terr}) \quad (10)$$

Para el esfuerzo de corte asociado a los granos sólidos en suspensión  $\tau_{granos}$ , se utiliza lo definido por Jakob y Hungr (2005) en la Ec. (11), con  $\varphi(^{\circ})$  el ángulo de fricción de la fracción gruesa del material granular.

$$\tau_{granos} = \gamma_{flujo} h_1 \tan(\varphi) \quad (11)$$

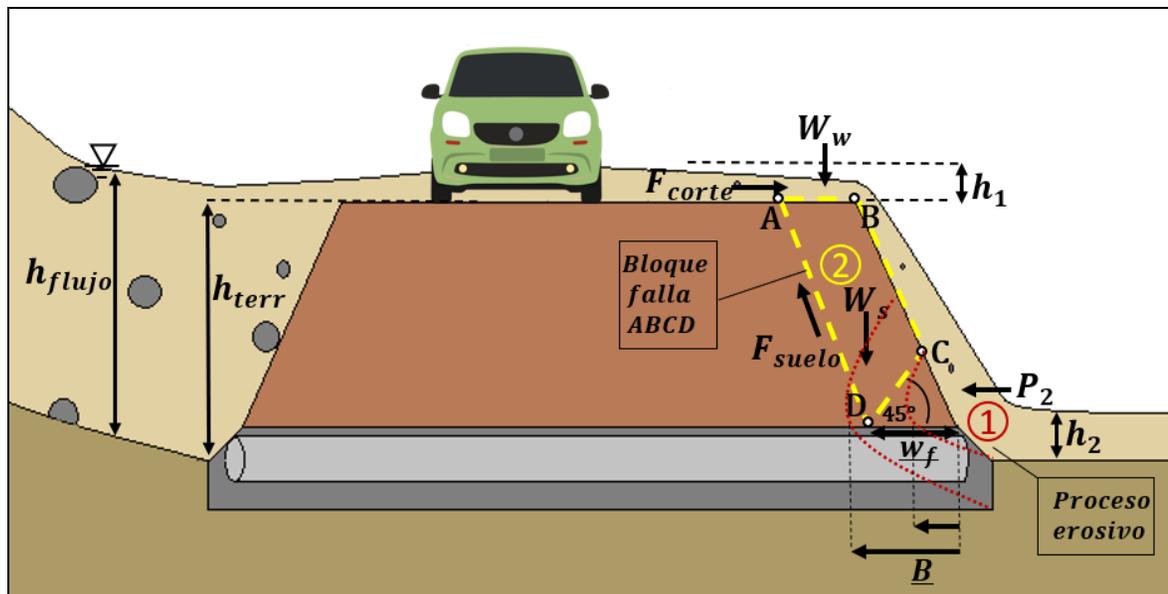
Cuando el flujo supera la altura del terraplén la fuerza de roce aumenta, ya que se agrega el peso del flujo sobre la superficie de este (Ec. (13)).  $V_e(m^3)$  es el volumen del terraplén,  $\gamma_e \left(\frac{kN}{m^3}\right)$  es el peso específico del suelo que compone el terraplén,  $L_{flujo}(m)$  el ancho de la porción perpendicular al flujo y  $\mu_e(-)$  el coeficiente de roce estático.

$$F_{roce_1} = \mu_e \gamma_e V_e, \text{ si } h_{flujo} \leq h_{terr} \quad (12)$$

$$F_{roce_2} = \mu_e (\gamma_e V_e + h_1 L_{flujo} b_{plataforma} \gamma_{flujo}), \text{ si } h_{flujo} > h_{terr} \quad (13)$$

### 3.3.3 Modelo de erosión aguas abajo del terraplén producto de la caída del flujo al pie del talud para la definición de $G_2(\hat{x}_j)$

Se identifican dos procesos. El primero está asociado a la erosión que se genera producto de la caída del flujo aguas abajo del terraplén, debilitando el pie del talud por la pérdida de material (① en la Figura 5), mientras que el segundo proceso está asociado a la formación de una superficie de falla paralela al talud del terraplén (② en la Figura 5).



**Figura 5:** Diagrama de cuerpo libre para la erosión aguas abajo del terraplén.

La función de estado límite  $G_2(\hat{x}_j)$  se define en la Ec. (14) en términos del deslizamiento del bloque ABCD, pero considerando el ancho  $b_{AB}$  en las fuerzas involucradas, el que corresponde a la longitud del terraplén que se pierde y depende del proceso erosivo y del análisis de deslizamiento del bloque ABCD que se explican a continuación.

$$G_2(\hat{x}_j) = (F_{suelo} + \cos(\alpha) P_2) - (F_{corte} \cos(\alpha) + W_w \sin(\alpha) + W_s \sin(\alpha)) \quad (14)$$

Para la erosión se utiliza la Ec. (15) propuesta por Partheniades (1965), quien definió un modelo de tasa de erosión  $\varepsilon$  (m/s) en suelos cohesivos, pero que se ha extendido a suelos granulares (Midgley et al., 2012).

$$\underline{B} = \varepsilon \Delta t = k_d (\tau_o - \tau_c) \Delta t \quad (15)$$

En la Ec. (15),  $\underline{B}$  (m) es la distancia erosionada en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  (s),  $k_d$  es el coeficiente de erodabilidad ( $m^3 N^{-1} s^{-1}$ ) considerado a partir del estudio de Hanson et al. (2001) como  $k_d = 2 \times 10^{-7} \tau_c^{-0.5}$ ,  $\tau_o$  (Pa) es el promedio del esfuerzo de corte que ejerce el fluido y  $\tau_c$  (Pa) es el esfuerzo de corte crítico del suelo que se está erosionando, definido por Briaud et al. (2019) como  $\tau_c = D_{50}$ , en función del diámetro medio de la partícula considerado como 2 mm en este caso (MOP, 2019b).

Independiente de la erosión  $\underline{B}$  (m) de la base, el corte de cabeza comienza a ser inestable cuando el debilitamiento se desarrolla en cierto grado crítico, sin embargo, por simplicidad se ha tomado al ángulo entre  $\overline{DC}$  y la superficie como  $45^\circ$  según lo expuesto por Zhu et al. (2008). Sobre el bloque ABCD actúan  $F_{corte}$  (N) asociada al esfuerzo de corte generado por el paso del flujo sobre el tramo  $\overline{AB}$ , el peso  $W_w$  (N) asociado al material del flujo que está sobre el tramo  $\overline{AB}$ , el peso  $W_s$  (N) asociada al bloque ABCD,  $F_{suelo}$  (N) asociada al esfuerzo de corte que se genera en la superficie de falla  $\overline{AD}$  y finalmente, la fuerza  $P_2$  (N) asociada a la presión ejercida por el flujo aguas abajo del terraplén, donde Hanson et al. (2001) define a  $h_2$  como  $\frac{1}{3} h_{terr}$ .

$$F_{corte} = \gamma_{flujo} h_1 s + \gamma_{flujo} h_1 \tan(\varphi) \quad (16)$$

$$W_w = \gamma_{flujo} h_1 L_{flujo} W_f \quad (17)$$

$$W_s = \gamma_{suelo} vol_{ABCD} \quad (18)$$

$$vol_{ABCD} = h_{terr} W_f - \frac{w_f^2 \tan(\alpha)}{2+2 \tan(\alpha)} \quad (19)$$

$$F_{suelo} = \gamma_{suelo} h_{terr} \cos(\alpha) \tan(\theta) \frac{h_{terr}}{\sin(\alpha)} L_{flujo} \quad (20)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \gamma_{flujo} \frac{h_2^2}{\sin(45^\circ)} \quad (21)$$

Independiente del ancho  $B$  (m) que realmente se erosiona, se busca encontrar el ancho tal que genere el desprendimiento del bloque de falla ABCD. Si se considera el equilibrio del bloque como condición límite y se utiliza lo planteado por Robinson y Hanson (1994) se puede encontrar el ancho  $w_f$  mínimo necesario para que el bloque pierda su condición de equilibrio, lo que se obtiene al resolver la Ec. (22).

$$a_1 w_f^2 + b_1 w_f + c_1 = 0 \quad (22)$$

$$a_1 = -\frac{\gamma_{suelo} \tan(\alpha)}{2 \tan(\alpha) + 2} \quad (23)$$

$$b_1 = \gamma_{flujos} h_1 + \gamma_{suelo} h_{terr} - \tan(\alpha) \tau_{flujos} \quad (24)$$

$$c_1 = \frac{\tan(\alpha) \gamma_{flujos} h_1^2}{2} \quad (25)$$

Se comparan el ancho  $w_f$  para el deslizamiento y el ancho  $B$  que se erosiona y se selecciona el mayor como  $b_{AB}$ . Si  $B < w_f$ , lo que se erosionó es menor de lo que realmente se desprendería producto del desequilibrio del bloque ABCD, por lo que el ancho total que se pierde es  $b_{AB} = w_f$ . Por otro lado, si  $B > w_f$ , se erosionó más de lo que se desprendería por el desequilibrio del bloque ABCD y entonces el ancho que se pierde es  $b_{AB} = B$ .

### 3.4. Calibración de curvas de fragilidad mediante simulación

#### 3.4.1 Simulaciones de Monte Carlo para la calibración

A partir de los modelos conceptuales desarrollados se plantea la simulación de distintos escenarios de amenaza y sus consecuencias en los terraplenes para incorporar la variabilidad e incertidumbre de los modelos mediante simulaciones de Monte Carlo (SMC). Las SMC muestrean cada variable  $\hat{x}_j$  de la función de estado límite  $G_i(\hat{x}_j)$  y evalúan si es superada o no. El experimento se repite  $N$  veces con un vector  $\hat{x}_j$  generado aleatoriamente según las distribuciones de probabilidad que se le asignen a cada variable. La probabilidad de excedencia del estado de daño Melchers & Beck (2018) lo definen como la Ec. (26).

$$p_f \approx P(G_i(\hat{x}_j) \leq 0 | H = h_{flujo}) = \frac{n(G_i(\hat{x}_j) \leq 0)}{N} \quad (26)$$

Donde  $n(G_i(\hat{x}_j) \leq 0)$  es la cantidad de veces del total  $N$  que la función tomó un valor  $\leq 0$ . Se consideró un  $N$  igual a 100.000 simulaciones para cada altura de flujo de detritos  $h_{flujo}$ , la que fue aumentando en rangos iguales a 0.25 m hasta alcanzar los 12 m, pues la mayoría de los modelos se estabilizaban en dicho punto y una altura mayor es poco probable en la realidad. Para asegurar la convergencia de las probabilidades obtenidas se calculó el Coeficiente de Variación (CV) para alturas de flujos pequeñas (las que tendrían también valores de probabilidad bajos), obteniéndose coeficientes de variación menores al 5%.

### 3.4.2 Definición de variables para la simulación

En la Tabla 5 se muestran todas las variables  $\hat{x}_j$  de las cuales dependen las funciones de estado límite  $G_1(\hat{x}_j)$  y  $G_2(\hat{x}_j)$  consideradas en el análisis y su valor determinístico o distribución probabilística ajustada según los valores encontrados en la literatura. Para la presentación de resultados se decidió considerar un intervalo de tiempo  $\Delta t$  de 5 horas necesario en la Ec. (15), ya que permite visualizar el desempeño de los modelos en el rango de altura de flujo considerado.

**Tabla 5:** Variables básicas involucradas en las funciones de estado límite.

Variable	Nombre	Unidad	Distribución probabilística*	Referencia
$n'$	Pseudo rugosidad Manning	-	Uniforme (0.03,0.16)	Molinas et al. (2001) Fazarinc et al. (2006)
$i$	Pendiente lecho	-	Lognormal (0.17, 2.43)	Sepúlveda et al. (2014) Sepúlveda et al. (2006)
$\alpha$	Ángulo talud terraplén	°	Uniforme (33,56)	MOP (2019a)
$\gamma_{flujo}$	Peso específico	$\frac{kN}{m^3}$	Lognormal (19.32,	Takahashi (2014)

	flujo detritos		1.15)	Valdés-Pineda (2017)
$D_{grav}$	Diámetro escombros	$m$	Lognormal (1.52, 2.17)	Sepúlveda et al. (2006)
$h_{terr}$	Altura terraplén	$m$	Uniforme (1,2.5) Uniforme (2.5,4) Uniforme (4,6)	Supuesto según análisis
$s$	Pendiente calzada	-	Uniforme (0.025,0.04)	MOP (2019a)
$\varphi$	Ángulo fricción granos sólidos flujo detritos	°	Uniforme (40,45)	Briaud (2013)
$b_{pista}$	Ancho pista bidireccional	$m$	Uniforme (2, 3.5)	MOP (2019a)
	Ancho pista multicarril		3.5	MOP (2019a)
$b_{berma_{ext}}$	Ancho berma externa bidireccional	$m$	Uniforme (0,1)	MOP (2019a)
	Ancho berma externa multicarril		Uniforme (1,2.5)	MOP (2019a)
$b_{berma_{int}}$	Ancho berma interna multicarril	$m$	Uniforme (0.6,1)	MOP (2019a)
$b_{SAP}$	Sobreecho plataforma	$m$	Uniforme (0.5,1)	MOP (2019a)
$b_{med}$	Ancho mediana	$m$	Uniforme (0,2)	MOP (2019a)
$\mu_e$	Coefficiente rugosidad	-	Uniforme (0.2,0.8)	Jara et al. (2009)

	estático			
$\gamma_e$	Peso específico suelo	$\frac{kN}{m^3}$	Lognormal (16.45, 1.19)	Terzaghi et al. (1996)
$\theta$	Ángulo fricción suelo terraplén	$rad$	Lognormal (0.59, 1.18)	Terzaghi et al. (1996)

\* Dos tipos de distribuciones son consideradas: Log-normal ( $\mu, \sigma$ ), con  $\mu$  la media y  $\sigma$  la desviación estándar de los datos; y Uniforme ( $a, b$ ) con  $a$  el valor extremo mínimo y  $b$  el valor extremo máximo.

### 3.4.3 Ajuste de distribución Log-Normal a los resultados

El último paso de la modelación es expresar las curvas que se obtienen en términos de una distribución de probabilidad que permita obtener la probabilidad de daño para cualquier altura de flujos de detritos. Se utilizó el Estimador de Máxima Verosimilitud (EMV) para el ajuste de las curvas obtenidas, definiendo la función de máxima verosimilitud  $L$  para la función de probabilidad log-normal, donde  $F(\cdot)$  representa la curva de fragilidad para cada estado de daño y  $x_i$  toma el valor de 1 o 0 dependiendo de si este se supera (Shinozuka et al., 2000). El método busca los parámetros  $\hat{\mu}, \hat{\sigma}$  que maximizan la función  $L$  a través de la derivación de esta, llegando a la Ec. (30) que obtiene los parámetros de la distribución Log Normal que mejor ajustan a los datos.

$$L = \prod_{i=1} [F(h_{flujo_i})]^{x_i} [1 - F(h_{flujo_i})]^{1-x_i} \quad (27)$$

$$F(h_{flujo_i}) = \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{h_{flujo_i}}{\hat{\mu}} \right)}{\hat{\sigma}} \right] \quad (28)$$

$$\frac{d \ln L}{d \hat{\mu}} = \frac{d \ln L}{d \hat{\sigma}} = 0 \quad (29)$$

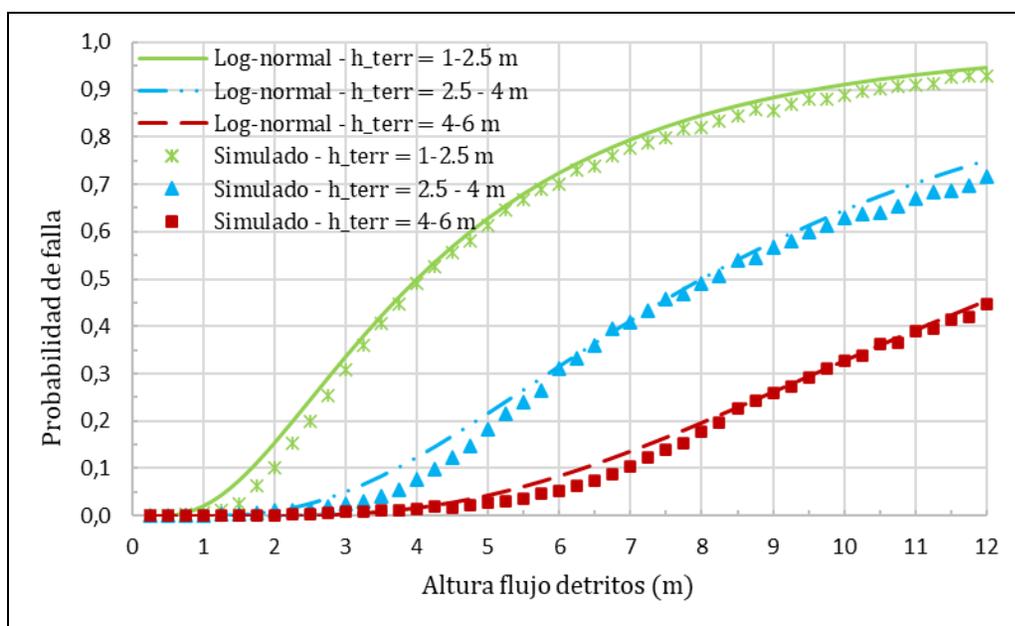
$$\{ \hat{\mu}, \hat{\sigma} \} = \text{argmáx} \left( \sum_{i=1} \left( n_i \ln \left( \Phi \left( \frac{\ln(h_{flujo_i}) - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \right) \right) \right) + (N_i - n_i) \ln \left( 1 - \Phi \left( \frac{\ln(h_{flujo_i}) - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \right) \right) \right) \quad (30)$$

A través de una prueba de bondad de ajuste  $\chi^2$  se chequearon las distribuciones obtenidas con un nivel de confianza de 99.5%. Se utilizaron 48 datos y con dos parámetros estimados se obtuvo un número de grados de libertad igual a 45. Para todos los ajustes realizados se obtuvo un valor de  $\chi^2$  menor al estadístico correspondiente, con

0.34 el valor obtenido más alto, por lo que se concluye que las distribuciones log-normales obtenidas se ajustan a los datos calibrados.

### 3.4.4 Curvas para terraplenes de caminos expuestos al impacto y erosión de flujo de detritos

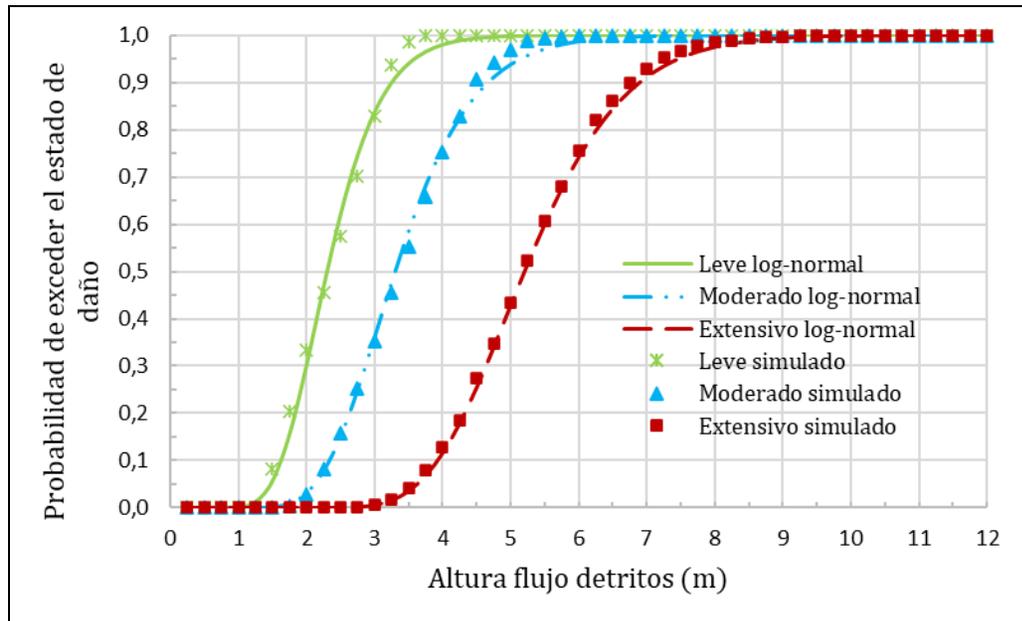
Se muestran a continuación las curvas de falla y fragilidad obtenidas mediante SMC y la curva log-normal ajustada. En las Tablas 6 y 7 se muestran los parámetros de la distribución de probabilidad ajustada a las curvas de cada modelo.



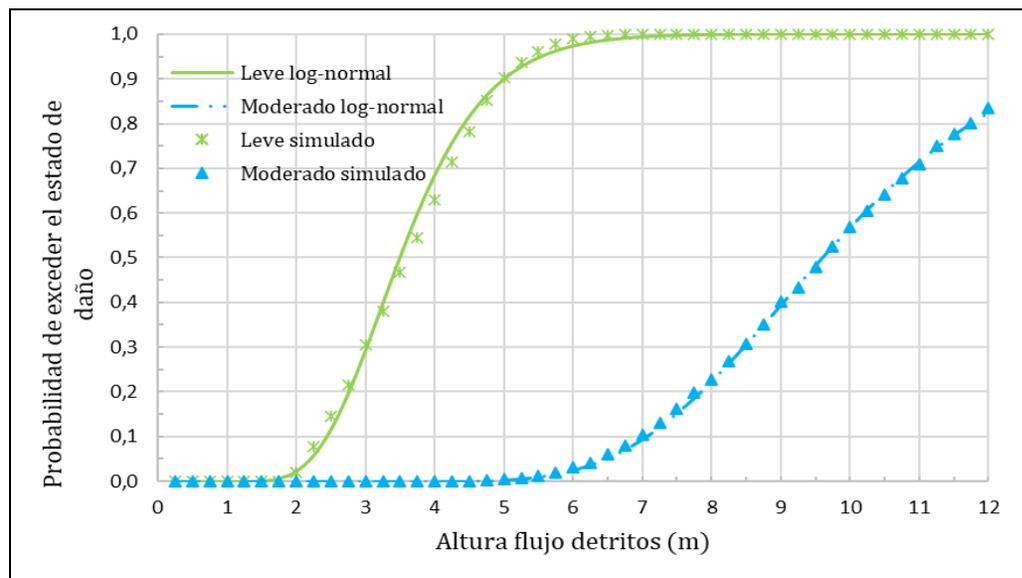
**Figura 6:** Curvas de fragilidad para el deslizamiento en diferentes alturas de terraplén ( $h_{terr}$ ).

**Tabla 6:** Parámetros de la distribución log-normal estimados para las curvas del modelo de deslizamiento del terraplén.

Tipo vía	Rango $h_{terr}$ [m]	$\mu$	$\sigma$
Bidireccional y	1 - 2.5	1.39	0.68
	2.5 - 4	2.08	0.60
Multicarril	4 - 6	2.55	0.55



**Figura 7:** Curvas de fragilidad para la erosión aguas abajo en camino bidireccional con altura de terraplén 1 - 2.5 m.



**Figura 8:** Curvas de fragilidad para la erosión aguas abajo en camino multicarril con altura de terraplén 1 - 2.5 m.

Para el modelo de erosión aguas abajo solo se presentan curvas para el primer rango de altura de terraplén ya que este es el que presenta una mayor fragilidad frente a los flujos,

sin embargo, se realizaron simulaciones y ajustes de distribuciones de probabilidad log-normales para tres rangos, los que se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7:** Parámetros de la distribución log-normal estimados para las curvas del modelo de erosión aguas abajo del terraplén.

Tipo vía	Rango $h_{terr}$ [m]	Estado de daño	$\mu$	$\sigma$
Bidireccional	1 - 2.5	Leve	0.83	0.27
		Moderado	1.19	0.27
		Extensivo	1.65	0.22
	2.5 – 4	Leve	1.46	0.15
		Moderado	1.76	0.16
		Extensivo	2.04	0.16
	4 -6	Leve	1.89	0.13
		Moderado	2.16	0.15
		Extensivo	2.35	0.15
Multicarril	1 – 2.5	Leve	1.25	0.28
		Moderado	2.26	0.24
	2.5 – 4	Leve	1.89	0.18
		Moderado	2.67	0.20
	4 – 6	Leve	2.32	0.17

### 3.5 Discusión de resultados y comparación de las curvas obtenidas con datos históricos

#### 3.5.1 Discusión de los modelos y las curvas desarrolladas

En los modelos se consideró la incertidumbre de tipo aleatorio de los flujos de detritos y la respuesta estructural del terraplén mediante la asignación de distribuciones probabilísticas a la mayoría de las variables, comprobando el ajuste de estas a los datos de la literatura mediante una prueba de bondad. Las variables determinísticas están relacionadas con cantidades que en la práctica no presentan mayor variación y no

generaron grandes diferencias en el análisis y resultados. Si bien la definición de estados de daño constituye una fuente importante de incertidumbre en el desarrollo de las curvas de fragilidad, en este caso la definición de sus límites se realizó según 3 niveles de disminución en la capacidad de la vía considerando la dirección y transitabilidad de los carriles que se pierden por daños generados por los flujos, similar a lo considerado por Winter et al. (2013;2014), quienes consideran 3 estados de daño en términos de la invasión del borde de la calzada, un carril o toda la calzada. En dicho caso la probabilidad de los estados de daño dependía del volumen del flujo en la carretera, por lo que no es posible una comparación directa con las curvas desarrolladas aquí.

Para el modelo de deslizamiento se obtuvo solo una curva por altura de terraplén para los dos tipos de vías (Figura 6), ya que una vez que el flujo supera la altura del terraplén, el esfuerzo de corte y su fuerza solicitante asociada sobre la plataforma, predomina por sobre el peso del terraplén y su fuerza resistente asociada, no generando variaciones en anchos de plataforma  $b_{plataforma}$  pequeños o grandes (bidireccional o multicarril). Si se comparan las curvas de deslizamiento del terraplén se desprende que la fragilidad de terraplenes de caminos es inversamente proporcional a su altura, por lo que terraplenes más altos son más robustos y menos frágiles al impacto de flujos de detritos. Para una misma intensidad de 4 m, un camino bidireccional tiene una probabilidad de 0.2 de quedar con un daño leve, un 0.7 de daño moderado y un 0.1 de daño extensivo, mientras que, un camino multicarril tiene una probabilidad de 0.7 de quedar con daño leve y nula probabilidad de tener un daño moderado o extensivo. Lo anterior indica que la interrupción y disminución de la capacidad en caminos multicarril afectados por flujos de detritos es un fenómeno poco probable, mientras que, para caminos bidireccionales se espera con mayor certeza una disminución de al menos el 50% de la capacidad.

Si se consideran las consecuencias generadas por ambos modelos a largo plazo, en el modelo de deslizamiento del terraplén, cualquier desplazamiento afectará la seguridad y por ende reducirá completamente la capacidad de la vía. Mientras que, para el modelo de erosión aguas abajo del terraplén, a largo plazo el escenario cambia principalmente porque si se considera la plataforma libre de material, el daño físico con el que queda la infraestructura permitirá según sea el nivel de daño, el posible paso de vehículos con las

medidas de precaución pertinentes. Si se comparan ambos modelos con la misma altura de flujo de 4 m, se tiene una probabilidad de falla por deslizamiento de un 50% y una probabilidad de daño leve producto de la erosión aguas abajo de aproximadamente un 100%, dando cuenta que es más esperable que se inicie antes el daño por el segundo modelo que por el primero. En el modelo de deslizamiento del terraplén se verifica una falla de impacto, la que es independiente del tiempo que dure la interacción entre el flujo y el terraplén. Esta característica es clave pues constituye un modo de falla exclusivo de los flujos de detritos, dado que poseen un mayor peso específico que el agua y tienen la capacidad de transportar variados tipos de escombros, asociándose a una fuerza de impacto mayor. Por otro lado, el modelo de erosión aguas abajo del terraplén se define en términos del proceso erosivo al pie del talud, fenómeno que no es exclusivo de los flujos de detritos, sino que más bien es un proceso que puede ser desencadenado por cualquier tipo de fluido. En este sentido, el análisis desarrollado para este modelo pudiese ser extensible a flujos de aguas claras o crecidas. Finalmente, al comparar gráficamente las curvas simuladas y ajustadas se evidencia gran similitud, comprobándose con un nivel de significancia de 0.5% que las distribuciones de probabilidad log-normales calculadas se ajustan a los datos simulados, corroborando la utilidad de este tipo de distribución en curvas de fragilidad.

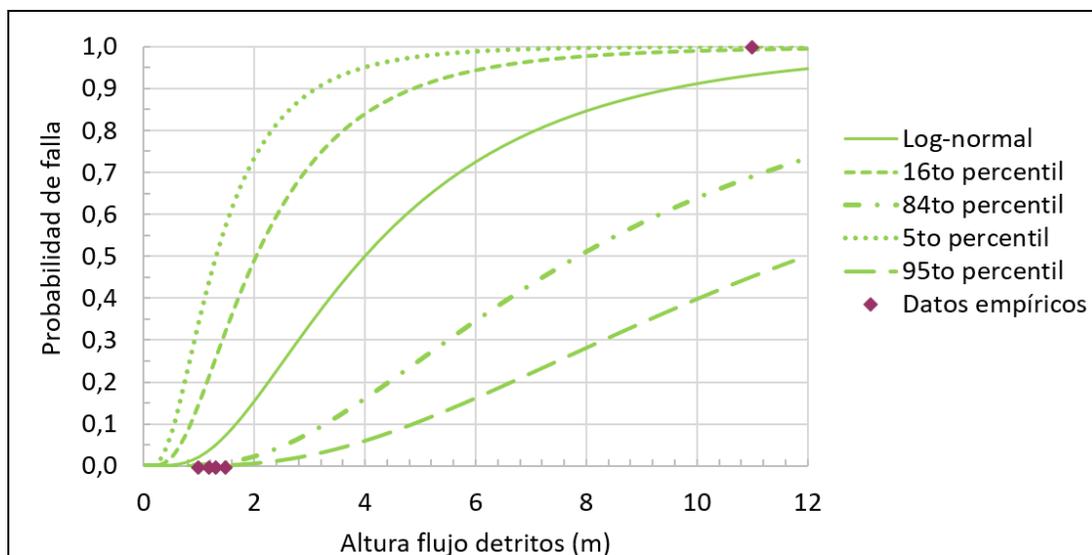
### **3.5.2 Comparación de las curvas con datos históricos**

A partir de reuniones con personal de terreno de distintas direcciones de vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile, se recopilaron datos asociados a daños en terraplenes mediante el llenado de una hoja de cálculo en Excel, la que incluía la altura del flujo y del terraplén, tiempo de interacción, estado de daño o falla, entre otros. Sin embargo, la cantidad de datos obtenidos fue muy limitada, por lo que se realizó una comparación binaria. Esto da como resultado trazar puntos deterministas como 0 o 1, dependiendo de si se alcanzó el estado de daño o falla. A partir del  $\mu$  y  $\sigma$  obtenidos mediante el ajuste de la distribución log-normal a las curvas simuladas, se calcularon los percentiles 16 y 84 (Figuras 10 y 11) y los percentiles 5 y 95 (Figura 12) para la comparación de datos. Para el modelo de deslizamiento, se agregaron datos empíricos de

una falla ocurrida en un terraplén de acceso a un puente (Figura 9), considerando una altura de flujo de 11 m con base en la marca que dejó la onda de flujo en el puente ferroviario ubicado metros aguas arriba del terraplén fallado (Marín et al., 2017; Muñoz et al., 2018).



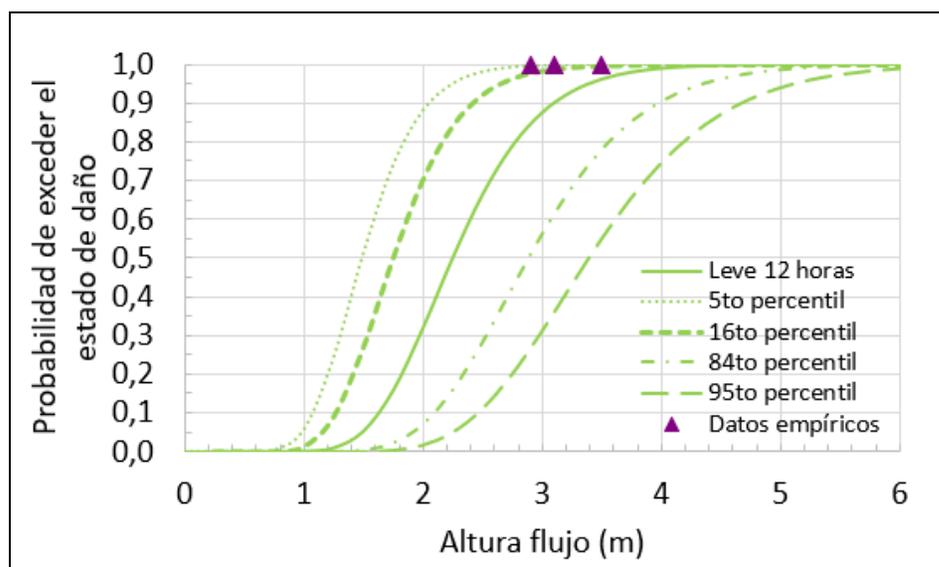
**Figura 9:** (a) Terraplén de acceso del puente antes del evento de flujo de detritos. (b) Vista aérea del puente después del evento de flujo de detritos ocurrido el año 2017.



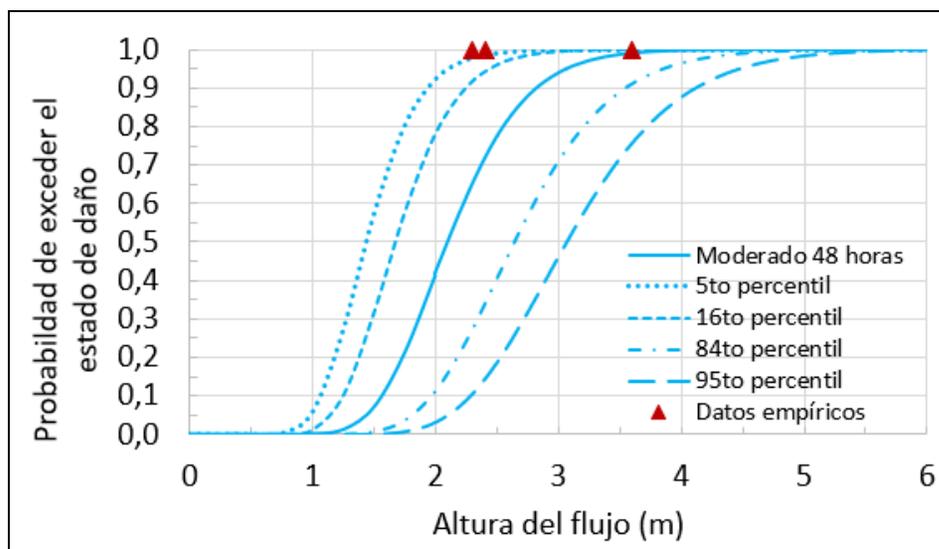
**Figura 10:** Comparación de las curvas de deslizamiento del terraplén con datos históricos para caminos bidireccionales.

Se confirmó que la erosión aguas abajo del terraplén también es provocada por flujos de aguas claras. En este caso, los datos obtenidos se asociaron únicamente a este tipo de evento, lo que significó en el análisis obtener curvas cambiando el peso específico del flujo  $\gamma_{flujo}$  y eliminando el esfuerzo cortante  $\tau_{granos}$  ejercido sobre la sección  $\overline{AB}$ . Este mismo modelo de daño depende del tiempo de interacción, por lo que se obtuvieron

curvas ajustadas a los tiempos de los datos recolectados para un daño leve con 12 horas de interacción (agrupando 3 datos asociados con 10, 12 y 14 horas) y un daño moderado con 48 horas de interacción (agrupando 3 datos de 48, 52 y 72 horas). Para este último caso, se verificó que para duraciones mayores a 48 horas las curvas se vuelven escalonadas y no presentan mayor diferencia entre ellas.



**Figura 11:** Comparación modelo de erosión aguas abajo del terraplén con datos históricos para caminos bidireccionales con estado de daño leve.



**Figura 12:** Comparación modelo de erosión aguas abajo del terraplén con datos históricos para caminos bidireccionales con estado de daño moderado.

Para el deslizamiento del terraplén (Figura 10) y daño leve en el modelo de erosión aguas abajo (Figura 11), los datos empíricos están dentro de los percentiles 16 y 84, con un error cuadrático de 0.003 y 0.012, respectivamente. Para el caso de daño moderado en el modelo de erosión aguas abajo (Figura 12), los datos se encuentran dentro del percentil 5, con un error cuadrático de 0.066.

### **3.6 Conclusiones**

Esta investigación permitió el desarrollo de curvas de fragilidad asociadas a la probabilidad de falla y daño de terraplenes de caminos expuestos perpendicularmente a flujos de detritos, cumpliendo este objetivo a través de la definición de un modelo conceptual asociado al deslizamiento del terraplén producto del impacto del flujo y otro modelo asociado a la erosión aguas abajo del terraplén producto de la caída del flujo al pie del talud. Las curvas se obtuvieron mediante simulaciones de Monte Carlo y se ajustaron distribuciones log-normales chequeando su bondad de ajuste con un nivel de confianza de 99.5%, para luego realizar una comparación con datos empíricos. El desarrollo anterior condujo a tener las siguientes recomendaciones y conclusiones:

1. Existen importantes avances en el desarrollo de modelos de fragilidad para elementos de la red vial expuestos a flujos de detritos, sin embargo, en el caso de terraplenes de caminos aún no hay una investigación en profundidad. Además, faltan medidas o marcos que regulen la recopilación de datos de terreno sobre los daños causados por estos flujos en los caminos.
2. Se consideró la incertidumbre aleatoria asociada a las curvas de fragilidad desde el ajuste de distribuciones a gran parte de las variables que determinan la demanda de flujo y la resistencia del terraplén. La definición de los estados de daño se constituye como fuente de error en el desarrollo de estos modelos, sin embargo, en este caso coincide con lo desarrollado hasta la fecha para carreteras expuestas a flujos de detritos.
3. El modelo de deslizamiento se gatilla producto del impacto del flujo sobre el terraplén, asociándose a una falla completa, mientras que el modelo de erosión aguas abajo se produce por la caída del flujo al pie del talud, generando estados de daños

intermedios a la falla. Dada la magnitud del esfuerzo necesario para generar el deslizamiento del terraplén, el primer modelo se asocia exclusivamente a flujos de detritos, mientras que el uso del segundo modelo se propone su aplicación a flujos de aguas claras o crecidas.

4. El modelo de deslizamiento producto del impacto del flujo contra el terraplén se comporta de manera similar en caminos bidireccionales y multicarril, lo que se explica por la compensación entre el esfuerzo de corte sobre la superficie de la plataforma y el peso del terraplén.

5. En el modelo de erosión aguas abajo, caminos multicarril presentan una baja probabilidad con respecto a caminos bidireccionales, los que, al tener un ancho de plataforma menor, ven su capacidad reducida hasta en un 50% para una altura de flujo de 4 m.

6. La fragilidad de terraplenes de caminos depende de su altura, principalmente porque hay fenómenos que se activan sólo cuando el flujo de detritos supera la altura del terraplén. A menor altura de terraplén, mayor será la probabilidad de exceder algún estado de daño de cualquiera de los dos modelos considerados.

7. Para una misma altura de flujo el modelo de deslizamiento tiene una probabilidad de daño menor que el modelo de erosión aguas abajo, por lo que predominaría el segundo modelo sobre el primero. Los análisis presentados consideran que ambos modelos de daño son independientes, sin embargo, podría darse el caso de que el modelo de erosión aguas abajo ocurra y debilite el terraplén, para luego hacer que este falle por el modelo de deslizamiento. Para lo anterior se requeriría un análisis del comportamiento del terraplén en el tiempo para identificar si existe un acoplamiento entre los dos mecanismos de daño considerados.

8. A mayor tiempo de interacción, mayor será la probabilidad de daño del terraplén. A su vez, la dependencia que tiene el modelo de erosión aguas abajo con el tiempo de interacción es una dificultad en la práctica, puesto que se necesitarían curvas para cada  $\Delta t$  posible. Para intervalos de tiempo altos, tales como 48 horas, se observó que las curvas ya no presentaban mayor variabilidad, por lo que se podrían usar para cualquier tiempo mayor. Sin embargo, hay que prestar especial cuidado con los intervalos de

tiempo bajo las 12 horas, ya que en estos casos los efectos que tiene la erosión en los estados de daño definidos tienen gran variabilidad, por lo que conviene obtener curvas para cada tiempo específico, dicho análisis dependiente del tiempo se sugiere como una futura línea de investigación.

9. Esta investigación provee un dato de entrada para la evaluación del riesgo de la red vial ante la amenaza de flujos de detritos, lo que permitiría a las autoridades tomar acciones de prevención y mitigación de las consecuencias que se generan en la red. No obstante, un futuro desafío es complementar los modelos de falla definidos en esta investigación con aquellos involucrados en la interacción paralela.

#### **4. DESARROLLO DE CURVAS DE FRAGILIDAD PARA TERRAPLENES DE CAMINOS EXPUESTOS PARALELAMENTE A FLUJOS DE DETRITOS**

##### **Resumen**

Los flujos de detritos son uno de los eventos naturales más destructivos, afectando a gran parte de las líneas ferroviarias y carreteras expuestas a ellos. Estos flujos son capaces de erosionar en gran medida a los taludes de terraplenes de caminos que se configuran de manera paralela a sus cauces, generando daños e interrupciones en las vías, lo que se traduce en pérdidas económicas y sociales para los países. Una herramienta para el cálculo del riesgo que tienen las infraestructuras expuestas a estos fenómenos son las curvas de fragilidad, pero a la fecha solo se han desarrollado modelos para puentes e interrupción de caminos asociada al depósito de material. Se desarrollan en este artículo curvas de fragilidad para terraplenes de caminos expuestos paralelamente a flujos, considerando la erosión y posterior inestabilidad del talud del terraplén en la modelación. Las curvas se calibraron a partir de simulaciones de Monte Carlo para luego ajustar distribuciones Log Normales a través de la estimación de sus parámetros con el método de Máxima Verosimilitud. Se demuestra que los terraplenes de caminos más bajos, del orden de 1 – 2.5 metros de altura son más vulnerables a presentar daños extensivos que aquellos más altos. Los modelos desarrollados son un aporte para la evaluación del riesgo que tienen los terraplenes de caminos expuestos a flujos de detritos y son extensibles a flujos de aguas claras. Se espera considerar en futuras investigaciones el fenómeno erosivo producido en curvas o meandros.

##### **4.1 Introducción**

En zonas con diversos relieves naturales, la interrupción del tráfico debido a peligros naturales tales como algún tipo de deslizamiento de tierra o flujo presenta una gran amenaza para la vida humana y puede generar retrasos significativos, reducción de la accesibilidad y altos costos económicos (Meyer et al., 2015; Scott et al., 2006). Las

estadísticas sugieren que alrededor de 45.000 km de carreteras y líneas ferroviarias se han expuesto a deslizamientos de tierras o fenómenos similares en todo el mundo para el año 2005 (Dilley et al., 2005; Meyer et al., 2015). En zonas montañosas los pisos de los valles recolectan la mayor parte del flujo natural de agua y sedimentos. De esta forma las redes de caminos ubicadas en tales valles a menudo se ven afectadas por movimientos masivos rápidos que dañan las carreteras e interrumpen el flujo del tráfico (Meyer et al., 2015; Winter et al., 2008). En 1988, una inundación de un lago glaciar en la quebrada de Midui China se convirtió en flujo de detritos y todas las construcciones y carreteras ubicadas en las riberas de los ríos quedaron completamente destruidos (Zou et al., 2018). En tal caso el flujo se mueve de manera adyacente y paralela a los caminos, actuando los terraplenes de estos como riberas de ríos, sometidos a las acciones erosivas de los fluidos. Este fenómeno en particular se ha repetido a lo largo de los años, en donde se ha demostrado que en zonas de alta vulnerabilidad los flujos de detritos son capaces de destruir fácilmente carreteras si estas se encuentran cercanas a ríos o canales y poseen bajas elevaciones (Zou et al., 2018). Dada la utilidad e importancia que tienen las redes de carreteras al conectar áreas geográficas y permitir el transporte de personas y mercancías en buenas condiciones de duración y seguridad, es determinante minimizar el daño y posibles fallas que ésta presente debido a los flujos de detritos, pues esto afecta a usuarios, a distintos tipos de infraestructuras de transporte y también a la funcionalidad de estas (conectividad, accesibilidad) (Tacnet et al., 2012).

El análisis formal del riesgo es el método racional para evaluar el peligro que las infraestructuras tienen debido a los flujos de detritos. La evaluación del riesgo de flujos de detritos brinda información que permite entender de manera fácil y hacer comparaciones con otros tipos de riesgos (Calvo & Savi, 2009) para, de esta manera, tomar acciones de prevención o respuesta. Con esto autoridades pueden destinar óptimamente fondos y así mitigar el riesgo calculado (Dowling & Santi, 2014; Santi et al., 2010). La evaluación del riesgo tiene diversas dimensiones y una de ellas considera el desarrollo de modelos probabilísticos tales como curvas de fragilidad para estimar el posible daño de las infraestructuras. Winter et al. (2013) desarrollaron curvas de fragilidad para caminos expuestos a flujos de detritos, sin embargo, en el análisis

consideran solo el cubrimiento de la calzada y no daños físicos que esta pueda presentar producto del paso de los flujos. Por otro lado, Dagá et al. (2018) consideró el análisis y desarrollo de curvas de falla para el deslizamiento del tablero y volcamiento de puentes sometidos al impacto de flujos laháricos, mientras que Liang y Xiong (2019) desarrollaron curvas de fragilidad para el deslizamiento del tablero de puentes sometidos a flujos de detritos, sin embargo, para el caso de los terraplenes de caminos no existen modelos a la fecha.

Ante la ausencia de modelos que permitan estimar la probabilidad de daño físico que presentan terraplenes de caminos expuestos a flujos de detritos, el objetivo de esta investigación es desarrollar curvas de fragilidad para terraplenes expuestos paralelamente a flujos y evaluar su daño en términos de la capacidad operacional del camino. Se plantea un modelo de daño asociado a la erosión que el flujo genera a lo largo del talud y posterior falla plana del bloque en voladizo que queda producto del exceso de esfuerzo de corte del suelo, considerando una porción unitaria de camino. Para esto, se define una función de estado límite, se consideran las variables aleatorias incluidas en ella y se realizan simulaciones para la calibración de las curvas considerando tres estados de daño. Finalmente se ajustan distribuciones log-normales a las curvas obtenidas y se realiza una comparación con datos de eventos ocurridos en caminos de Chile. El alcance incluye la erosión producida por flujos de detritos y también flujos de aguas claras, principalmente por la similitud de los procesos y la recurrencia de casos en terraplenes de caminos. El presente desarrollo proporciona una dimensión del análisis que se realiza para el cálculo del riesgo que tiene la red vial ante la ocurrencia de flujos de detritos, así como también aporta un modelo conceptual de daño asociado a la exposición paralela a estos flujos.

## **4.2. Exposición de terraplenes de caminos a flujos**

### **4.2.1 Interacción paralela de los flujos con los terraplenes de caminos**

Las redes de caminos pasan inevitablemente por diversos tipos de relieves geográficos naturales (Zou et al., 2018). En muchos de estos casos los caminos emplazados sobre terraplenes se ubican de manera adyacente a cauces (ver Figura 11), teniendo que actuar

como riberas o bancos de ríos. Dichos cauces pueden estar activos y llevar flujos de aguas claras en condiciones normales, mientras que por otro lado, pueden ser lechos secos que con las condiciones de activación necesarias, tales como lluvias extremas o tormentas de lluvias intensas (Nettleton et al., 2005), pueden volver a activarse en flujos de aguas claras, así como también en flujos de detritos si es que existen sedimentos y escombros disponibles en los lechos para ser arrastrados por el fluido (Skilodimou & Bathrellos, 2016).



**Figura 13:** Terraplenes de caminos bidireccionales expuestos paralelamente a flujos en Chile.

Los terraplenes de caminos a menudo no poseen protección fluvial, por lo que gran parte del cuerpo del terraplén queda totalmente expuesto a las fuerzas erosivas que el flujo ejerce sobre el talud (Zou et al., 2018). Tras la erosión, el terraplén pierde una parte lateral e inferior, quedando una porción superior de este en voladizo, la que finalmente cae por peso propio. Debido a lo anterior, se va perdiendo parte de la calzada del camino lo que genera también consecuencias operacionales debido a la disminución de la capacidad de la vía, pues se reduce el flujo máximo de vehículos que transitan por el camino (Transportation Research Board, 2016).

#### 4.2.2 Fenómeno de erosión de taludes

La erosión que afecta a los taludes de terraplenes puede compararse con aquella que se genera en las riberas de ríos. Uno de los modelos de estabilidad de riberas más común y avanzado es el *Bank Stability and Toe Erosion Model* (BSTEM) (Midgley et al., 2012). Este modelo desarrollado por el Laboratorio de Sedimentación en Oxford (Simon et al.,

2000) posee dos módulos de análisis: (1) la erosión del talud producto del esfuerzo de corte que el flujo ejerce sobre este a lo largo de toda la altura del fluido; (2) un módulo de análisis de estabilidad del talud que queda, producto de la pérdida del material calculado en el primer paso. De esta manera, el programa permite calcular el factor de seguridad de la ribera de río que se está analizando dadas las características del flujo y del banco, utilizando tres métodos de equilibrio límite diferentes (Midgley et al., 2012). El BSTEM divide el perfil del banco en 23 nodos separados. Para cada uno de estos nodos calcula el esfuerzo de corte que es aplicado por el flujo, dependiendo del segmento del flujo que afecta cada nodo. Este método crea una distribución de los esfuerzos cortantes límites y no solo un esfuerzo cortante promedio aplicado en todo el banco (Midgley et al., 2012). Sin embargo, el modelo está determinado y configurado para flujos de aguas claras, por lo que se recomienda su uso para dicho tipo de flujo, excluyendo a los flujos de detritos. Asimismo, las cargas de sedimentos en la columna de agua pueden ser tan altas como para reducir el potencial de erosión, por lo que se sugiere en estos casos usar el modelo con precaución como un indicador aproximado o relativo de la estabilidad del talud (Simon et al., 2016). En general, la erosión incrementa con el agua y la fracción de grava, mientras que decrece con la fracción de finos (arcilla) que puede movilizar el flujo (Haas & Woerkom, 2016). Para el caso de terraplenes de caminos interesa tener una aproximación de la longitud del terraplén que se perdería producto de la erosión del flujo. En esta pérdida se suele utilizar como falla predominante la del esfuerzo de corte en voladizo considerando la falla plana, la que genera el colapso de un bloque sobresaliente sobre el canal. Esto a menudo ocurre después de que los bancos son socavados, siendo comunes en riberas compuestas por granos gruesos y algunos finos activados por flujos (Watson & Basher, 2006).

### **4.3 Modelo conceptual del daño de terraplenes para el desarrollo de curvas de fragilidad**

#### **4.3.1 Enfoque analítico y función de estado límite**

Una parte importante de la evaluación del riesgo de amenazas naturales son las curvas de fragilidad. Se considera en este estudio el desarrollo de las curvas a través del método

analítico, principalmente por la ausencia de datos históricos necesarios para una calibración del tipo empírica. El método analítico considera la estimación de las distribuciones de daño de una infraestructura a través de la simulación de la respuesta estructural del elemento sometido a la acción de una amenaza natural (Pitilakis et al., 2014). Un concepto central en este tipo de evaluación es la definición de una ecuación de estado límite, la que vincula el rendimiento o falla de una infraestructura a los procesos que conducen al incumplimiento de dicho rendimiento (Allsop et al., 2007), la función de estado límite se define en la Ec. (31).

$$z(\hat{X}) = R(\hat{X}) - S(\hat{X}) \quad (31)$$

$S(\hat{X})$  expresa la carga o solicitaciones que la amenaza natural ejerce sobre la infraestructura, mientras que  $R(\hat{X})$  representa la resistencia o esfuerzos resistentes asociados a las propiedades de la infraestructura. Cuando las expresiones asociadas a las solicitaciones superan a las expresiones consideradas como resistentes, entonces la función de estado límite toma un valor menor o igual a cero y esto significa que el sistema está incumpliendo su rendimiento o fallando. El vector  $\hat{X}$  contiene todas las variables básicas que determinan a  $R(\hat{X})$  y  $S(\hat{X})$ , las cuales pueden tener una naturaleza determinística o probabilística induciendo el carácter estocástico a la función, asociándose finalmente a la probabilidad de falla definida en la Ec. (32).

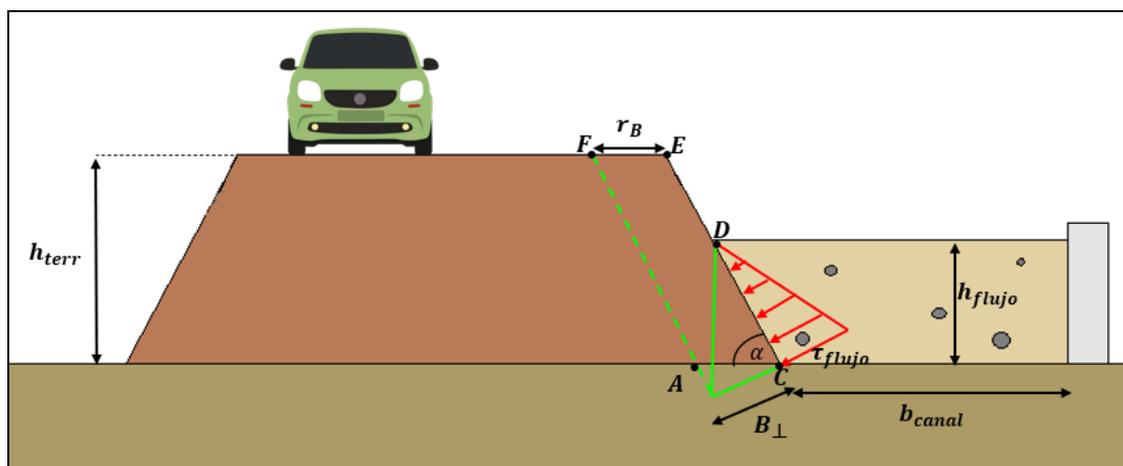
$$P_F = P(R(\hat{X}) \leq S(\hat{X})) = P(R(\hat{X}) - S(\hat{X}) \leq 0) \quad (32)$$

La Ec. (32) permite obtener la probabilidad de falla del sistema, sin embargo, dicha probabilidad debe estar asociada a alguna intensidad de la amenaza natural. Para el caso de la amenaza de flujos de detritos se han considerado en la literatura curvas de fragilidad asociadas a la altura del flujo (Dagá et al., 2018; Quan Luna et al., 2011; Totschnig et al., 2011), al volumen del fluido (Winter et al., 2014) y también al flujo de momento ( $hv^2$ ) (Jakob et al., 2012; Liang & Xiong, 2019; Prieto et al., 2018). Para esta investigación se considerará como intensidad de amenaza a la altura del flujo de detritos,

principalmente por su simplicidad a la hora de medir en terreno y su relación e implicancia con el modelo de falla presentado en la sección 4.3.2.

#### 4.3.2 Modelo de erosión paralela del talud e inestabilidad de bloque

Se considera que el talud del terraplén no cuenta con ningún tipo de protección fluvial tal como gaviones, enrocados o alguna otra técnica, por lo que el suelo del cuerpo del terraplén está expuesto al flujo que circule por el cauce adyacente. Tras la erosión de parte del talud del terraplén, se genera un bloque de inestabilidad desde la proyección de  $r_B$  en el punto A hasta la superficie del terraplén en el punto F (Figura 12). La falla del bloque ADEF se calcula asumiendo que se mantiene un ángulo de inclinación constante y que la pérdida del material de la inclinación equivale a la erosión basal, supuesto estrictamente válido sólo para bancos uniformes no cohesivos con falla plana como se consideró en el estudio de Lai (2017). Para el escenario específico de este estudio, el análisis de estabilidad envuelve el cálculo de un factor de seguridad identificado como el cociente entre las fuerzas demandantes aplicadas a la zona de falla y las resistentes asociadas a las propiedades del terraplén (Ec. 33). De esta forma, la función de estado límite se configura considerando dicha razón, por lo que el sistema estará fallando si  $F.S. \leq 1$ .



**Figura 14:** Diagrama para la erosión aguas abajo del terraplén e inestabilidad del talud.

$$Z(X) = F.S. = \frac{S_R(X)}{S_S(X)} \quad (33)$$

$$S_R(X) = \sigma_{suelo} \tan(\varphi) \left( \frac{h_{terr}}{\sin(\alpha)} \right) L_{porción} \quad (34)$$

Si  $h_{flujo} \leq h_{terr}$ :

$$S_S(X) = \gamma_{terr} V_{ADEF} \quad (35)$$

$$V_{ADEF} = h_{terr} r_B L_{porción} - 0.5 h_{flujo} r_B L_{porción} \quad (36)$$

Si  $h_{flujo} > h_{terr}$ :

$$S_S(X) = \gamma_{terr} V_{ADEF} + \gamma_{flujo} (h_{flujo} - h_{terr}) r_B \quad (37)$$

$$V_{ADEF} = h_{terr} r_B L_{porción} - 0.5 h_{terr} r_B L_{porción} \quad (38)$$

Se hace una distinción para el caso de las fuerzas solicitantes relacionadas a la altura del flujo  $h_{flujo} (m)$ , ya que para los casos en que la altura del flujo es menor o igual a la altura del terraplén  $h_{terr}(m)$ , se considera como componente solicitante solo al peso del suelo del terraplén. Sin embargo, en caso de que la altura del flujo supere la altura del terraplén se espera que parte de ese flujo esté sobre el bloque ADEF, incorporando una componente asociada al peso del flujo a las fuerzas solicitantes. Para este caso se asume que la altura de flujo sobre la porción  $r_B$  es la diferencia entre la altura del flujo y la altura del terraplén.

Junto con la determinación de la función de estado límite interesa calcular el ancho  $r_B(m)$  que se pierde producto de la erosión y caída del bloque de falla ADEF. Para el cálculo de la erosión se considera lo planteado por Partheniades (1965), quién definió una tasa de erosión  $\varepsilon$  (m/s) en términos de un exceso de esfuerzo cortante, cuyo uso es recurrente en el estudio de taludes en riberas de ríos y es lo que se considera en el módulo de erosión del BSTEM (Simon et al., 2000). En la Ec. (39),  $B_{\perp}$  (m) es la distancia normal que se erosiona al pie del talud del terraplén en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  (s),  $k_d$  es el coeficiente de erodabilidad ( $m^3 N^{-1} s^{-1}$ ),  $\tau_o$  (Pa) es el promedio del esfuerzo de corte del fluido y  $\tau_c$  (Pa) es el esfuerzo de corte crítico del suelo que se está erosionando. Se considera  $k_d = 2 * 10^{-7} * \tau_c^{-0.5}$  (Midgley et al., 2012) y  $\tau_c = D_{50}$  (Briaud et al., 2019), con

$D_{50}$  el diámetro medio de la partícula expresado en mm, el que se considera como el esfuerzo de corte crítico medido en (Pa).

$$B_{\perp} = \varepsilon * \Delta t = k_d * (\tau_o - \tau_c) * \Delta t \quad (39)$$

Para la distribución del esfuerzo de corte  $\tau_o$  se asume lo definido por Lai (2017), quien adopta el supuesto de que el esfuerzo cortante disminuye linealmente desde la punta del banco hasta la superficie del agua que está en contacto con el talud. Este supuesto es razonable en los casos en que se busca la cantidad total de material erosionado y no el perfil exacto de erosión con el que queda el banco. El esfuerzo de corte máximo  $\tau_o$  (Pa) ejercido por el fluido en el lecho se considera en términos de su peso específico  $\gamma_{flujos} \left(\frac{kN}{m^3}\right)$ , la pendiente  $s(-)$  del lecho del canal y el radio hidráulico  $R_h$  del canal (Choo et al., 2020; Haas & Woerkom, 2016; Iverson, 2003; Molinas et al., 2001; Simon et al., 2016), el que en este caso se considera con un lado trapezoidal y otro lado rectangular como se ve en la Figura 12.

$$\tau_o = \gamma_{flujos} R_h s \quad (40)$$

$$R_h = \frac{h_{flujos} b_{cauce} + \frac{h_{flujos}^2}{2 \tan(\alpha)}}{b_{cauce} + h_{flujos} + \frac{h_{flujos}}{\sin(\alpha)}} \quad (41)$$

La Ec. (40) corresponde al esfuerzo de corte máximo al pie del talud del terraplén y es válida para canales infinitamente rectos y largos. Esto permite calcular el  $B_{\perp}$ , sin embargo, para efectos de evaluar cuál es el ancho del terraplén involucrado  $r_B$  se utiliza el análisis geométrico por semejanza de triángulos propuesto por Lai (2017), usando la Ec. (42) para el cálculo del ancho de calzada afectado y erosionado.

$$r_B = 0.5 \frac{(h_{flujos} + B_{\perp} \cos(\alpha)) \left( B_{\perp} \sin(\alpha) + \frac{B_{\perp} \cos(\alpha)}{\tan(\alpha)} \right)}{h_{terraplen} + B_{\perp} \cos(\alpha)} \quad (42)$$

#### 4.4 Calibración de curvas de fragilidad mediante simulación

##### 4.4.1 Simulaciones de Monte Carlo para la calibración

Con la función de estado límite y las correspondientes expresiones definidas, se considera en el análisis la utilización del método de Monte Carlo para la calibración de las curvas. Este método muestrea cada variable aleatoria  $\hat{X}$ , ahora  $\hat{x}_j$  de las cuales depende la función de estado límite según el valor determinístico o probabilístico que adopte cada variable. Cuando la función  $z(\hat{x}) \leq 1$ , entonces el terraplén falla perdiendo parte de su estructura igual al ancho  $r_B$ . Este procedimiento se repite muchas veces para finalmente contabilizar la cantidad de veces que la infraestructura falló sobre el total de ensayos N que se realizaron, de tal manera que la probabilidad de falla está dada aproximadamente por (Melchers & Beck, 2018):

$$p_f \approx P(Z_i(\hat{X}_j) \leq 0 | H = h_{flujo}) = \frac{n(Z_i(\hat{x}_j) \leq 0)}{N} \quad (43)$$

Se consideró en este caso un N igual a 100.000 simulaciones realizadas para cada altura de flujo considerado, la que fue aumentando en rangos iguales a 0.25 m hasta llegar a los 12 metros de altura, pues dicha medida permitió evaluar el desempeño completo de los estados de daños en las curvas. Para cada valor de  $h_{flujo}$  se obtuvo la probabilidad  $p_f$  de que fallara el sistema.

##### 4.4.2 Estados de daño considerados en la calibración

Para el análisis se consideraron 2 tipos de vías, incluyendo caminos bidireccionales que tienen una pista por sentido y caminos multicarril con dos pistas por sentido. Se calibraron curvas de fragilidad para cada tipo de vía, ya que este último punto determina el ancho de la plataforma  $b_{plataforma}$ . Para el caso bidireccional se considera el sobre ancho de plataforma  $b_{SAP}$  (SAP), el ancho de berma exterior  $b_{berma_{ext}}$  y el ancho de pista  $b_{pista}$ , mientras que, para el caso multicarril además de los parámetros anteriores, se agregan el ancho de berma interior  $b_{berma_{int}}$  y el ancho de mediana  $b_{mediana}$ . Se definen estados de daños asociados a la disminución de la capacidad de la vía con respecto a su

operación en estado normal. Para esta modelación se consideran tres estados de daño según el ancho de la falla involucrada  $r_B$  y se clasifica según la longitud de dicho ancho en los estados leve, moderado y grave, los que se definen en la Tabla 8. El estado de daño leve no involucra una disminución de la capacidad de la vía, mientras que el moderado considera una disminución de la capacidad de la vía menor al 50% y el extensivo una disminución mayor al 50%.

**Tabla 8:** Estados de daño considerados para la calibración de las curvas de fragilidad del modelo 2.

Estado de daño	Camino bidireccional	Camino multicarril
Leve Baja a nula probabilidad de reducción de la capacidad de la vía	Erosión causa daño en los anchos complementarios: ancho talud, ancho SAP, ancho berma externa	Erosión causa daño en los anchos complementarios: ancho talud, ancho SAP, ancho berma externa
Moderado Probabilidad de reducir hasta un 50% la capacidad de la vía	Erosión causa daños en la primera pista aguas abajo resultando en la reducción parcial o completa de una dirección del tráfico	Erosión causa daños en una o ambas pistas aguas abajo resultando en la reducción parcial o completa de una dirección del tráfico
Extensivo Probabilidad de reducir sobre un 50% la capacidad de la vía	Erosión causa daños en ambas vías resultando en la reducción parcial o completa de ambas direcciones del tráfico	Erosión causa daños en más de dos pistas resultando en la reducción parcial o completa de ambas direcciones del tráfico

El cálculo del ancho erosionado  $r_B$  depende de la tasa de erosión y un intervalo de tiempo de interacción entre el flujo y el terraplén (como se muestra en la Ec. (39)). Para mostrar los resultados de este trabajo, se considera un intervalo de tiempo igual a 5 horas. Un tiempo menor no permitía en todos los casos ver los efectos de los tres estados de daño, mientras que un tiempo mayor iba poco a poco haciendo que las curvas se volvieran “escalonadas”, con probabilidades más cercanas a 0 o 1.

#### 4.4.3 Definición de variables consideradas en la simulación

Se definen a continuación las variables involucradas en las expresiones del modelo desarrollado, indicando su valor en caso de ser determinística o definiendo los parámetros de la distribución de probabilidad ajustada en base a los datos obtenidos de las referencias en caso de tener una naturaleza estocástica.

**Tabla 9:** Variables básicas involucradas en las funciones de estado límite

Variable	Nombre	Unidad	Valor determinístico o distribución probabilística*	Referencia
$L_{porción}$	Ancho porción análisis	$m$	1	Supuesto
$s$	Pendiente lecho	-	Log-normal (0.17, 2.43)	Sepúlveda et al. (2006) Sepúlveda et al. (2014)
$\alpha$	Ángulo talud terraplén	$^{\circ}$	Uniforme (33,56)	MOP (2019a)
$\gamma_{flujo}$	Peso específico flujo detritos	$\frac{kN}{m^3}$	Log-normal (19.32, 1.15)	Takahashi (2014) Valdés-Pineda et al. (2017)
$h_{terr}$	Altura terraplén	$m$	Uniforme (1,2.5) Uniforme (2.5,4) Uniforme (4,6)	Supuesto según análisis
$b_{cauce}$	Ancho cauce	$m$	Uniforme (3,15)	Supuesto según análisis
$b_{pista}$	Ancho pista bidireccional	$m$	Uniforme (2, 3.5)	MOP (2019a)
	Ancho pista multicarril	$m$	3.5	MOP (2019a)
$b_{berma_{ext}}$	Ancho berma	$m$	Uniforme (0,1)	MOP (2019a)

	externa bidireccional			
	Ancho berma externa multicarril	$m$	Uniforme (1,2.5)	MOP (2019a)
$b_{berma_{int}}$	Ancho berma interna multicarril	$m$	Uniforme (0.6,1)	MOP (2019a)
$b_{SAP}$	Sobreancho plataforma	$m$	Uniforme (0.5,1)	MOP (2019a)
$b_{med}$	Ancho mediana	$m$	Uniforme (0,2)	MOP (2019a)
$\gamma_{terr}$	Peso específico suelo	$\frac{kN}{m^3}$	Log-normal (16.45, 1.19)	Terzaghi et al. (1996)
$D_{50}$	Diámetro medio suelo	$mm$	2	MOP (2019b)
$\varphi$	Ángulo fricción suelo terraplén	$rad$	Log-normal (0.59, 1.18)	Terzaghi et al. (1996)

\*Se consideran dos tipos de distribución probabilística: : Log-normal ( $\mu, \sigma$ ), con  $\mu$  la media y  $\sigma$  la desviación estándar de los datos; y Uniforme ( $a, b$ ) con  $a$  el valor extremo mínimo y  $b$  el valor extremo máximo.

#### 4.4.4 Ajuste de distribución Log-Normal a las curvas calibradas

A pesar de que las curvas de fragilidad son un método gráfico de análisis, para facilitar su uso es conveniente conocer alguna distribución o función que permita parametrizarlas y así poder calcular la probabilidad de exceder un estado de daño para cualquier altura de flujos. Se ha utilizado ampliamente en la literatura la distribución Log Normal acumulada como una función que la mayoría de las veces se ajusta de buena manera a las curvas obtenidas (Porter, 2016) y que facilita su identificación puesto que solo depende de dos parámetros  $\mu$  y  $\sigma$ . Para el ajuste de las curvas a una distribución Log Normal acumulada se utiliza el método de estimación de Máxima Verosimilitud (EMV).

Este considera el cálculo de una función L en términos de las curvas de fragilidad específicas para cada estado de daño y su derivación en términos de cada uno de los parámetros estadísticos de la distribución, buscando encontrar aquel parámetro  $\hat{\mu}$  y  $\hat{\sigma}$  que maximicen dicha función L.

$$L = \prod_{i=1} [F(h_{flujo_i})]^{x_i} [1 - F(h_{flujo_i})]^{1-x_i} \quad (44)$$

$$F(h_{flujo_i}) = \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{h_{flujo_i}}{\hat{\mu}} \right)}{\hat{\sigma}} \right] \quad (45)$$

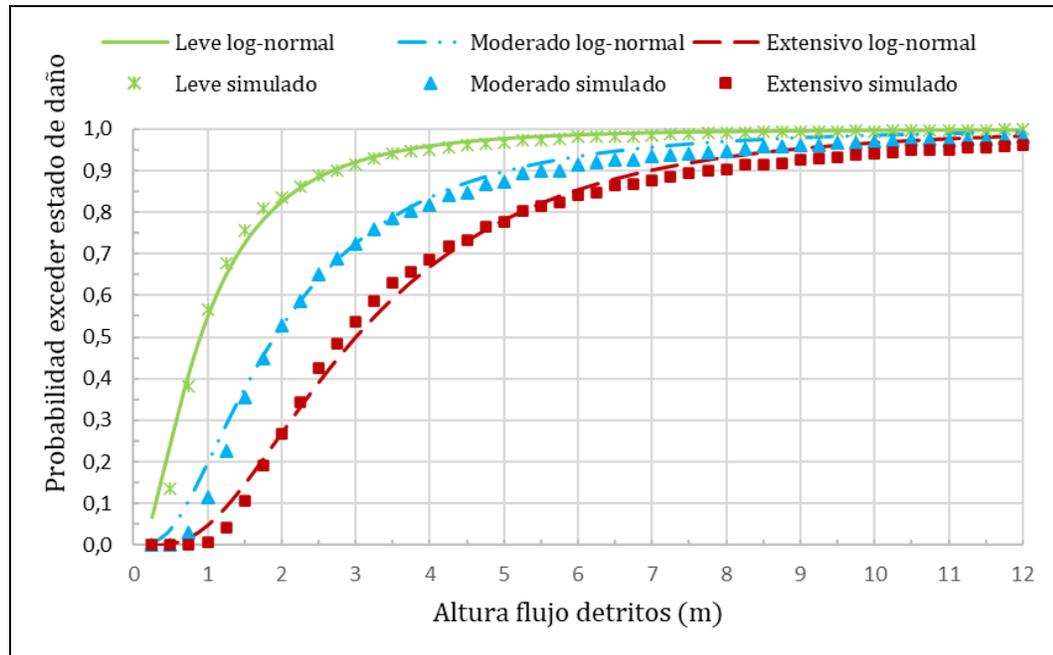
$$\frac{d \ln L}{d \hat{\mu}} = \frac{d \ln L}{d \hat{\sigma}} = 0 \quad (46)$$

$$\{\hat{\mu}, \hat{\sigma}\} = \text{argmáx} \left( \sum_{i=1} \left( n_i \ln \left( \Phi \left( \frac{\ln(h_{flujo_i}) - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \right) \right) \right) + (N_i - n_i) \ln \left( 1 - \Phi \left( \frac{\ln(h_{flujo_i}) - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \right) \right) \right) \quad (47)$$

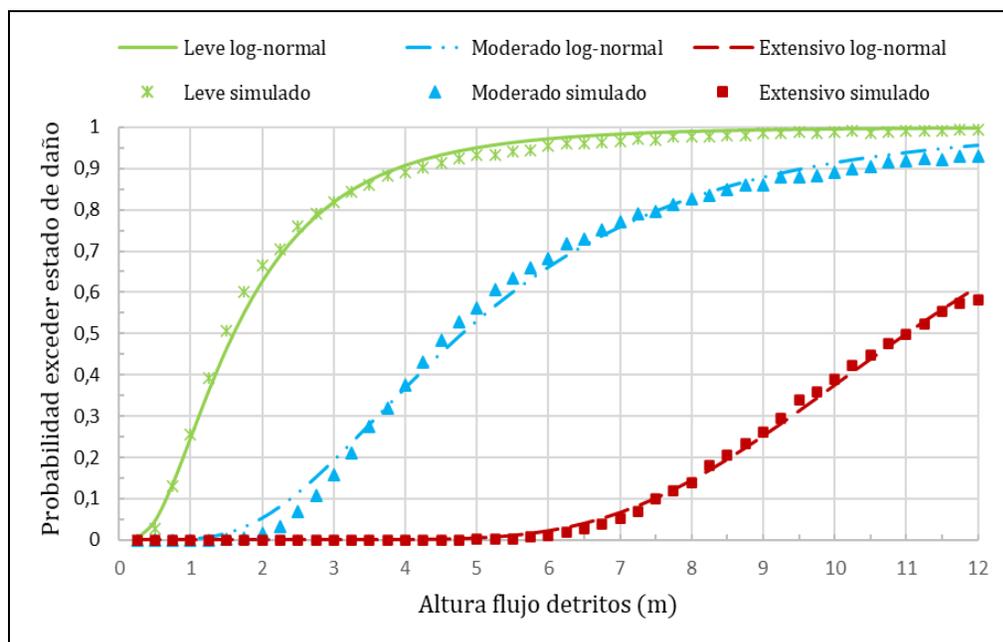
Este procedimiento se realiza con frecuencia en estudios que desarrollan curvas de fragilidad, independiente del tipo de amenaza que se esté considerando en el análisis (Shinozuka et al., 2000; Tsubaki et al., 2016). Para comprobar que las distribuciones calculadas se ajusten con cierto nivel de confianza a los datos de las curvas obtenidas a través de la calibración, se realiza una prueba de bondad de ajuste  $\chi^2$  para cada una, en la que se consideró un nivel de significancia igual al 0.5%. Para cada curva se tuvieron 48 datos y considerando los 2 grados de libertad, se utilizó entonces un estadístico de  $\chi^2$  con 45 grados de libertad. Para todas las distribuciones calculadas, el resultado de la prueba arrojó valores menores a 0.22, significando que los datos se ajustan de buena manera a una distribución Log Normal con los parámetros  $\hat{\mu}$  y  $\hat{\sigma}$  calculados.

#### 4.4.5 Curvas para terraplenes de caminos expuestos a la erosión paralela

Se muestran a continuación las curvas obtenidas para terraplenes de caminos bidireccionales y caminos multicarril obtenidas a partir de las simulaciones de Monte Carlo y la curva log-normal ajustada.



**Figura 15:**Curvas de fragilidad para terraplenes de caminos bidireccionales con altura de terraplén entre 1-2.5 m.



**Figura 16:**Curvas de fragilidad para terraplenes de caminos multicarril con altura de terraplén entre 1-2.5 m.

Las curvas presentadas corresponden a terraplenes de caminos con altura entre 1 y 2.5 m, sin embargo, se realizaron simulaciones y ajustes de distribuciones log-normales para tres rangos de altura. Los parámetros de la distribución log-normal de las curvas presentadas y aquellas sólo simuladas se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10:** Parámetros de la distribución log-normal ajustada a las curvas

Tipo vía	Rango $h_{terr}$ [m]	Estado de daño	$\mu$	$\sigma$
Bidireccional	1 - 2.5	Leve	0.11	0.85
		Moderado	0.64	0.76
		Extensivo	1.10	0.66
	2.5 - 4	Leve	0.68	0.71
		Moderado	1.36	0.68
		Extensivo	1.63	0.62
	4 - 6	Leve	1.22	0.65
		Moderado	1.84	0.60
		Extensivo	2.01	0.58
Multicarril	1 - 2.5	Leve	0.47	0.69
		Moderado	1.57	0.54
		Extensivo	2.40	0.30
	2.5 - 4	Leve	1.19	0.58
		Moderado	2.05	0.44
		Extensivo	2.60	0.25
	4 - 6	Leve	1.48	0.57
		Moderado	2.36	0.38

## **4.5 Discusión de resultados y comparación de las curvas obtenidas con datos históricos**

### **4.5.1 Discusión de los modelos y las curvas desarrolladas**

Se considera que los eventos de flujos de detritos o crecidas ya han menguado una vez que se evalúa el daño con que quedaron los caminos, principalmente porque se asume en la modelación que el intervalo de tiempo considerado es equivalente al tiempo total de interacción una vez finalizado el evento y no mientras está ocurriendo. El intervalo de 5 horas considerado en el análisis permite tener una aproximación de lo que ocurre con el modelo, sin embargo, es posible ajustar la modelación a cualquier intervalo de tiempo necesario. Para intervalos mayores se espera que las curvas se desplacen a la izquierda, volviéndose más determinísticas al considerar la falla o no falla del terraplén, más que los estados de daños intermedios. Según los parámetros obtenidos para alturas de terraplenes mayores, para un mismo tipo de camino bidireccional y una misma altura de flujo de 6 m se tiene una probabilidad de alcanzar un estado de daño extensivo de 0.85 para terraplenes de altura entre 1 y 2.5 m, mientras que, para terraplenes de 2.5 a 4 m se tiene una probabilidad de 0.6 de tener un daño extensivo, lo que indica que terraplenes más bajos son más frágiles que aquellos de mayor altura.

Si se fija la altura de flujo en 6 m, en caminos bidireccionales se tiene una probabilidad mayor a 0.8 de tener un daño extensivo en el terraplén, mientras que para caminos multicarril se tiene una probabilidad cercana a 0. Esto da cuenta que caminos bidireccionales son más frágiles que caminos multicarril para las mismas condiciones de altura y tiempo de erosión. Asimismo, en caminos bidireccionales para una altura de 4 m se tiene una probabilidad de 0.1 de generarse una reducción de capacidad de la vía menor al 50% y una probabilidad de 0.7 de tener una reducción de capacidad mayor al 50%, mientras que, en caminos multicarriles para la misma altura de 4 m la probabilidad de tener una reducción de la capacidad de la vía en menos de un 50% es de 0.4, mientras que una reducción de capacidad mayor al 50% tiene una probabilidad nula.

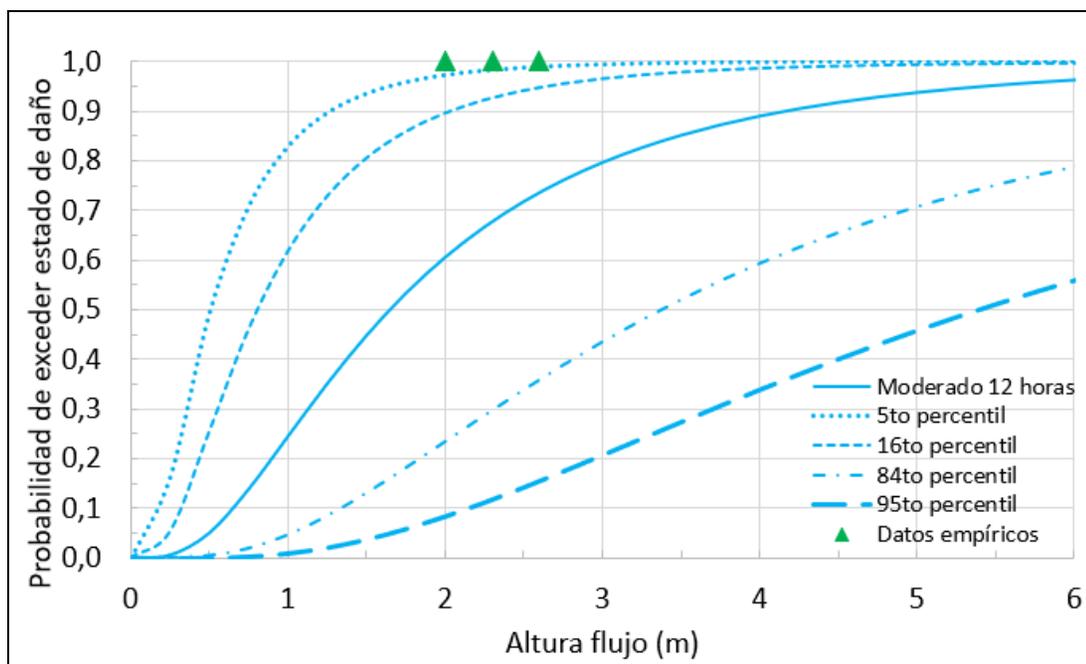
Las curvas obtenidas se ajustaron razonablemente a distribuciones log-normales acumuladas, corroborándose la utilidad de esta distribución en el uso de curvas de fragilidad. Por otro lado, se considera en la modelación una expresión de esfuerzo de

corte válida para canales infinitamente largos y rectos, por lo que su uso es exclusivo para ese tipo de interacciones. La extensión de estos modelos a lugares en donde existan curvas o meandros requiere un análisis más complejo de las condiciones y comportamiento del flujo en el tiempo dado que las curvas inducen variaciones en la corriente transversal, pudiendo aumentar la velocidad del flujo y con esto el esfuerzo de corte que se ejerce sobre el talud del terraplén.

#### 4.5.2 Comparación de las curvas con datos históricos

A partir de entrevistas con direcciones de vialidad regionales de Chile se recopiló información acerca de eventos de flujos de detritos que hayan afectado a terraplenes de caminos expuestos de manera paralela. Se corroboró que el modelo desarrollado para flujos de detritos paralelos es un mecanismo de daño que también ocurre en el caso de flujos de aguas claras o crecidas, por lo que se extendió la recopilación de los datos a este tipo de flujos. Entre la información solicitada se incluyó altura del flujo  $h_{flujo}$ , altura del terraplén  $h_{terr}$ , intervalo de tiempo de exposición  $\Delta t$ , el tipo de vía, el tipo de flujo (de detritos o aguas claras) y el estado de daño con el que quedó el terraplén: leve, moderado o extensivo.

La cantidad de datos recopilados fue limitada y se recibieron solo antecedentes de casos asociados a crecidas o flujos de aguas claras. Por lo anterior, se calibraron curvas de fragilidad asociadas a flujos de aguas claras cambiando el peso específico contemplado en el análisis. Como se obtuvo un solo dato por intensidad de amenaza, la comparación no permite obtener probabilidades de daño, sino que solo casos binarios de 0 o 1 en asociados al daño o no daño del terraplén. Por otro lado, las curvas se calcularon para el intervalo de tiempo en específico del evento, los que fueron de 12 horas.



**Figura 17:** Comparación de curvas de fragilidad con eventos históricos considerando un estado de daño moderado.

Comparar probabilidades de daño con datos históricos binarios de 0 o 1 tiene una gran limitación, sin embargo, permite una primera aproximación del comportamiento de los modelos planteados en la realidad. Se calculó el error cuadrático medio para cada una de las curvas y los datos presentados (Figura 15), obteniéndose un valor de 0.087 para el caso de 12 horas. Además, a partir de los parámetros de la curva log-normal ajustada, se calcularon los percentiles 5 y 95, confirmando que dos de los tres datos obtenidos se encuentran dentro del primero.

#### 4.6 Conclusiones y recomendaciones

El presente estudio permitió cumplir el objetivo de desarrollar curvas de fragilidad para terraplenes de caminos expuestos a flujos paralelos a partir de un modelo que incluye la erosión del talud del terraplén y la inestabilidad del mismo producto de la pérdida de material. Se obtuvieron curvas a partir de simulaciones de Monte Carlo y se ajustaron distribuciones log-normales con un nivel de significancia de 0.5%. Se realizó una comparación de las curvas con datos históricos para eventos de flujos de aguas claras,

obteniéndose un máximo de error cuadrático medio de 0.144. Se pudo deducir las siguientes conclusiones:

1. La duración de la interacción que los flujos tienen con terraplenes de caminos incide directamente en la probabilidad de obtener un estado de daño, corroborándose que, a mayor duración, mayor será la probabilidad de que terraplenes presenten daño. Asimismo, terraplenes de caminos más bajos son más frágiles a la exposición de flujos paralelos que terraplenes de alturas mayores.
2. La capacidad de las vías se ve directamente afectada por la exposición de terraplenes a flujos paralelos. Caminos bidireccionales tienen una probabilidad mayor de verse afectados con una reducción de su capacidad mayor al 50%, que caminos multicarril, siendo esto últimos mucho más robustos y menos frágiles ante la exposición paralela a flujos.
3. A partir de la prueba de bondad de ajuste chi cuadrado se corroboró que las distribuciones log-normales calculadas se ajustan con un 0.5% de significancia a las curvas obtenidas a partir de la simulación, lo que corrobora la utilidad de este tipo de distribución probabilística en el uso de curvas de fragilidad. Por otro lado, a partir de la comparación con datos empíricos se chequeó el desempeño del modelo de erosión paralela desarrollado y a su vez, su posible aplicabilidad para el caso de flujos de aguas claras.
4. El modelo presentado y las curvas desarrolladas permiten tener una herramienta para el cálculo del riesgo que los flujos de detritos tienen sobre la red de caminos. Para el uso de estos modelos se recomienda revisar las consideraciones geométricas y de diseño consideradas y realizar los ajustes necesarios para su aplicación en zonas particulares. Se espera tener como futuros desarrollos un análisis de la erosión y estabilidad de taludes de terraplenes de caminos en zonas de meandros o curvas en los cauces.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación permitió cumplir el objetivo general orientado al desarrollo de modelos de fragilidad para terraplenes de caminos expuestos a flujos de detritos. Este objetivo se cumplió a partir del desarrollo de los cuatro objetivos específicos planteados, siendo el tercer y cuarto objetivo, el desarrollo y validación de modelos para la interacción perpendicular y paralela de los terraplenes, respectivamente. Los modelos desarrollados permitieron corroborar la hipótesis planteada, ya que para ambos tipos de exposición se chequeó con un 99.5% de confianza que la probabilidad de daño de terraplenes de caminos expuestos a flujos de detritos distribuye log-normal y es función del tiempo de interacción, propiedades y altura, tanto del flujo como del terraplén.

A partir de la modelación de los dos casos de interacción se pudo concluir lo siguiente:

- A partir de la revisión de la literatura se verifica que existen importantes avances en el desarrollo de modelos de fragilidad para los elementos de la red vial, así como también su consecuente evaluación del riesgo. Sin embargo, para el caso de terraplenes de caminos no existen avances en profundidad aún. Por otro lado, es clave que los tomadores de decisión y las distintas entidades públicas avancen en el desarrollo de medidas o planes de recopilación de datos de daño de los elementos viales post eventos naturales, pues son una herramienta relevante para la evaluación de medidas, así como también para la validación de modelos de carácter científico.
- Tanto la amenaza de flujos de detritos y la respuesta que tienen los terraplenes de caminos son de carácter aleatorio, considerando su incertidumbre en este caso a través de la definición de distribuciones probabilísticas a la mayor parte de las variables que determinan su demanda y resistencia, respectivamente.
- La definición de los estados de daño se considera una de las fuentes de error posibles en el desarrollo de curvas de fragilidad, sin embargo, para este caso se consideraron en base a la disminución de la capacidad de la vía coincidiendo con

lo desarrollado a la fecha en los modelos de fragilidad de carreteras expuestas a flujos de detritos.

- Tanto para la interacción paralela como también para la perpendicular se comprobó que la altura del terraplén condiciona la fragilidad, esto quiere decir que, a menor altura, mayor será su probabilidad de presentar algún tipo de daño producto de su interacción con flujos de detritos.
- El modelo de erosión aguas abajo del terraplén y el modelo de erosión del talud paralelo al flujo son dependientes del tiempo de interacción. Se corrobora que, a mayor duración de la interacción, mayor es el posible daño que tendrá el terraplén.
- Se comprobó que para el modelo de deslizamiento del terraplén caminos bidireccionales y multicarriles se comportan de manera similar, lo que se explica por la compensación entre el esfuerzo de corte sobre la plataforma y el peso del terraplén. Asimismo, en los modelos de erosión aguas abajo del terraplén y erosión paralela se corroboró que caminos bidireccionales tienen una mayor probabilidad de daño y, por ende, son más propensos a presentar una disminución de su capacidad.
- Para la ocurrencia del modelo de deslizamiento se requiere un esfuerzo de impacto de magnitud considerable, por lo que se asocia exclusivamente a flujos de detritos, los que son más densos y tienen la capacidad de transportar escombros de tamaño considerable. Sin embargo, para el caso de los modelos de erosión, el fenómeno puede ser gatillado por flujos de aguas claras o crecidas, condición que se consideró en la comparación de las curvas con datos históricos.
- Las curvas log-normales ajustadas se comprobaron con un nivel de confianza de 99,5% a los datos simulados en los tres modelos de daño, considerándose una buena aproximación.
- El desarrollo de estos modelos probabilísticos permite tener una herramienta de entrada para la evaluación y cálculo del riesgo de este tipo de amenazas sobre la red vial, aportando a agencias y tomadores de decisión para la óptima distribución de recursos y toma de decisiones.

A partir de lo desarrollado, se recomienda el uso de estos modelos corroborando que los supuestos y variables consideradas sean aplicables al caso de estudio en particular, considerando que tanto el diseño como la geometría de los terraplenes de caminos considerados se basaron en lo considerado por los distintos volúmenes del manual de carreteras de Chile.

El desarrollo de esta investigación y los modelos definidos permiten proponer las siguientes líneas de investigación futuras:

- Avanzar en el desarrollo de modelos que permitan cuantificar la falla de terraplenes expuestos paralelamente a flujos localizados en curvas o meandros, considerando la evolución y comportamiento del flujo en el tiempo.
- Analizar con mayor detalle la extensión de los modelos de erosión aquí presentados para el caso de crecidas o flujos de aguas claras y de esta manera verificar que las características y propiedades consideradas no influyan en su desempeño y aplicabilidad a dichos casos.
- Los modelos desarrollados se consideraron independientes unos de otros, sin embargo, es un desafío futuro el estudio de la interacción que pudiese ocurrir al combinarse los fenómenos de impacto y erosión en terraplenes.
- Se propone utilizar los modelos desarrollados para el cálculo del riesgo sobre la red vial, considerando otras dimensiones de la vulnerabilidad como el ámbito social.
- A partir de los modelos desarrollados es posible estudiar y proponer obras de mitigación y mejora de terraplenes de caminos para disminuir su riesgo y así disminuir las consecuencias que el daño de esta infraestructura crítica tiene para las comunidades y sus países.

## BIBLIOGRAFÍA

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials. (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. In *LRFD Bridge Design Specifications*. Washington DC, USA.

Allsop, W., Kortenhaus, a, & Morris, M. (2007). Failure Mechanisms for Flood Defence Structures. *FLOODsite Publications*, (T04-05-01), 693–702. Retrieved from <http://hikm.ihe.nl/floodsite/data/Task4/pdf/failmechs.pdf>

Argyroudis, S. A., Mitoulis, S., Winter, M. G., & Kaynia, A. M. (2019). Fragility of transport assets exposed to multiple hazards: State-of-the-art review toward infrastructural resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106567>

Bil, M., Sedonik, J., Kubecek, J., Vodak, R., & Bilova, M. (2014). Road Network Segments At Risk – Vulnerability Analysis and Natural Hazards Assessment. *The Science for Population Protection*, 1–18. Retrieved from <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/20/87.pdf>

Bles, T., Ennesser, Y., Fadeuilhe, J.-J., Falemo, S., Lind, B., Mens, M., ... Sandersen, F. (2010). *Risk Management for Roads in a Changing Climate: A Guidebook to the RIMAROCC Method*. 81.

Briaud, J.-L. (2013). *Geotechnical Engineering Unsaturated and Saturated Soils*. New Jersey, Estados Unidos.

Briaud, J.-L., Shafii, I., Chen, H.-C., & Medina-Cetina, Z. (2019). Relationship Between Erodibility and Properties of Soils. In *Relationship Between Erodibility and Properties of Soils*. <https://doi.org/10.17226/25470>

Calvo, B., & Savi, F. (2009). A real-world application of Monte Carlo procedure for debris flow risk assessment. *Computers and Geosciences*, 35(5), 967–977. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.04.002>

Choo, H., Zhao, Q., Burns, S. E., Sturm, T. W., & Hong, S. H. (2020). Laboratory and theoretical evaluation of impact of packing density, particle shape, and uniformity coefficient on erodibility of coarse-grained soil particles. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.4825>

Contreras, J. P., Ramírez, C., Garrido, N., & Nuñez, G. (2015). *Caracterización hídrica y geológica de los aluviones del 25 y 26 de marzo de 2015 en la cuenca del Río El Salado, Región de Atacama, Chile*. Retrieved from <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/congresogeo/50.pdf>

- Dagá, J., Chamorro, A., Solminihac, H. De, & Echaveguren, T. (2018). Development of fragility curves for road bridges exposed to volcanic lahars. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2111–2125. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2111-2018>
- Dilley, M., Chen, R. S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A., Arnold, M., Agwe, J., ... Yetman, G. (2005). Natural disaster hotspots: A global risk analysis. In *World Bank Disaster Risk Management Series*.
- Dowling, C. A., & Santi, P. M. (2014). Debris flows and their toll on human life: A global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011. *Natural Hazards*, 71(1), 203–227. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0907-4>
- Durán, J. Z. (2004). *Estudio Teórico Experimental de algunos tipos de estructuras de control* (Universidad Politécnica de Cartagena). Retrieved from <https://repositorio.upct.es/handle/10317/39>
- Fazarinc, R., Majes, B., & Mikoš, M. (2006). Using results of mathematical modeling of debris flows for optimization of a river channel form to convey debris flows and floods. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics - River Flow 2006*, 2(August 2006), 2137–2146. <https://doi.org/10.1201/9781439833865.ch234>
- FEDRO. (2009). *Natural Hazards on National Roads: Risk Concept*. 108. Retrieved from [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch)
- Fuchs, S., Birkmann, J., & Glade, T. (2012). Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: Current approaches and future challenges. *Natural Hazards*, 64(3), 1969–1975. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0352-9>
- Haas, T. de, & Woerkom, T. van. (2016). Bed scour by debris flows: experimental investigation of effects of debris-flow composition. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(13), 1951–1966. <https://doi.org/10.1002/esp.3963>
- Haechnel, R., & Daly, S. (2004). Maximum impact force of woody debris on floodplain structures. *Database*, 130(October), 1013–1024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130)
- Hanson, G. J., Robinson, K. M., & Cook, K. R. (2001). Prediction of headcut migration using a deterministic approach. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 44(3), 525–531.
- He, S., Liu, W., & Li, X. (2016). Prediction of impact force of debris flows based on distribution and size of particles. *Environmental Earth Sciences*, 75(4), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5180-2>
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide Handbook - A guide to*

understanding landslides. In *US Geological Survey Circular*.  
<https://doi.org/10.3133/cir1325>

Iverson, R. M. (2003). The debris-flow rheology myth. *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings, 1*, 303–314.

Jakob, M., Stein, D., & Ulmi, M. (2012). Vulnerability of buildings to debris flow impact. *Natural Hazards*, *60*(2), 241–261. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0007-2>

Jakob, M., & Hungr, O. (2005). *Debris-flow hazards and related phenomena*.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Jara, G., & Fort-López, L. (2009). Evaluación de la fricción superficial entre suelos y materiales compuestos. *Revista de La Construcción*, *8*(1), 103–113.

Jenelius, E. (2010). Large-Scale Road Network Vulnerability Analysis. KTH Royal Institute of Technology.

Jin, M., & Fread, D. (1999). 1D Modelling of mud/debris unsteady flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, *125*(August), 25–32.

Julien, P. Y., & Paris, A. (2010). Mean Velocity of Mudflows and Debris Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, *136*(9), 676–679.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000224](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000224)

Kim, H., Sim, S. H., Lee, J., Lee, Y. J., & Kim, J. M. (2017). Flood fragility analysis for bridges with multiple failure modes. *Advances in Mechanical Engineering*, *9*(3), 1–11.  
<https://doi.org/10.1177/1687814017696415>

Lai, Y. G. (2017). Modeling stream bank erosion: Practical stream results and future needs. *Water (Switzerland)*, *9*(12). <https://doi.org/10.3390/w9120950>

Liang, Y., & Xiong, F. (2019). Quantification of debris flow vulnerability of typical bridge substructure based on impact force simulation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *10*(1), 1839–1862. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1641564>

Marín, M., Contreras, J., & Olea, P. (2017). *Efectos geológicos del sistema frontal en la zona central del país, el 25 t 26 de febrero de 2017. Región Metropolitana, comuna de San José de Maipo*. Retrieved from [https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes\\_PDF\\_Nac/RM-2017-23.pdf](https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2017-23.pdf)

Martinović, K., Reale, C., & Gavin, K. (2018). Fragility curves for rainfall-induced shallow landslides on transport networks. *Canadian Geotechnical Journal*, *55*(6), 852–861. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0565>

- Melchers, R., & Beck, A. (2018). Integration and Simulation Methods 3.1 Introduction. In *Structural Reliability: Analysis and Prediction* (pp. 63–93). <https://doi.org/10.1002/9781119266105>
- Meyer, N. K., Schwanghart, W., Korup, O., & Nadim, F. (2015). Roads at risk: Traffic detours from debris flows in southern Norway. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(5), 985–995. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-985-2015>
- Midgley, T. L., Fox, G. A., & Heeren, D. M. (2012). Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks. *Geomorphology*, 145–146, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.044>
- Molinas, A., Wu, B., & Koester, R. D. (2001). Debris flow simulation for highway cross culverts. *Transportation Research Record*, (1770), 220–226. <https://doi.org/10.3141/1770-28>
- MOP. (2019a). *Manual de Carreteras - Volumen 3 - Instrucciones y Criterios de Diseño*. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.
- MOP. (2019b). *Manual de Carreteras - Volumen 8 - Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control*. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.
- Muñoz, A. (2018). *Metodología Para Evaluar La Amenaza De Flujos De Detritos Utilizando Un Análisis Jerárquico De Procesos Y El Software Ramms, Con Aplicación En La Cuenca Del Estero San Alfonso, Región Metropolitana* (Universidad de Chile). Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152982>
- Nettleton, I. M., Martin, S., Hencher, S., & Moore, R. (2005). Debris flow types and mechanisms. In *Scottish Road Network Landslides Study*. Retrieved from <http://www.scotland.gov.uk/Publications/2005/07/08131738/17395>
- Papathoma-Köhle, M., Kappes, M., Keiler, M., & Glade, T. (2011). Physical vulnerability assessment for alpine hazards: State of the art and future needs. *Natural Hazards*, 58(2), 645–680. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9632-4>
- Partheniades, E. (1965). Erosion and Deposition of Cohesive Soils. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(1), 105–139.
- Pitilakis, K., Crowley, H., & Kaynia, A. M. (2014). SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk: Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities. In *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering* (Vol. 27). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7872-6>
- Porter, K. (2016). *A Beginner 's Guide to Fragility , Vulnerability , and Risk*. University of Colorado Boulder. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-93837-0>

- Prieto, J. A., Journeay, M., Acevedo, A. B., Arbelaez, J. D., & Ulmi, M. (2018). Development of structural debris flow fragility curves (debris flow buildings resistance) using momentum flux rate as a hazard parameter. *Engineering Geology*, 239(November 2017), 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.014>
- Qiu, F., Huang, J., Li, Y., Han, Z., Wang, W., Chen, G., ... Su, B. (2018). Protecting highway bridges against debris flows using lateral berms: A case study of the 2008 and 2011 Cheyang debris flow events, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 196–210. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1414718>
- Quan Luna, B., Blahut, J., Van Westen, C. J., Sterlacchini, S., Van Asch, T. W. J., & Akbas, S. O. (2011). The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(7), 2047–2060. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2047-2011>
- Ranke, U. (2016). Natural disaster risk management: Geosciences and social responsibility. In *Natural Disaster Risk Management: Geosciences and Social Responsibility*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20675-2>
- Robinson, K. M., & Hanson, G. J. (1994). A deterministic headcut advance model. *Transactions - American Society of Agricultural Engineers*, 37(5), 1437–1443. <https://doi.org/10.13031/2013.28225>
- Santi, P. M., Hewitt, K., VanDine, D. F., & Cruz, E. B. (2010). Debris-flow impact, vulnerability, and response. *Natural Hazards*, 56(1), 371–402. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9576-8>
- Schultz, M. T., Gouldby, B. P., Simm, J. D., & Wibowo, J. L. (2010). *Beyond the Factor of Safety: Developing Fragility Curves to Characterize System Reliability-US Army Corps of Engineers*. (July), 51.
- Scott, D. M., Novak, D. C., Aultman-Hall, L., & Guo, F. (2006). Network Robustness Index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography*, 14(3), 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2005.10.003>
- Sepúlveda, S. A., Rebolledo, S., McPhee, J., Lara, M., Cartes, M., Rubio, E., ... Vásquez, J. P. (2014). Catastrophic, rainfall-induced debris flows in Andean villages of Tarapacá, Atacama Desert, northern Chile. *Landslides*, 11(3), 481–491. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0480-2>
- Sepúlveda, S. A., Rebolledo, S., & Vargas, G. (2006). Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. *Quaternary International*, 158(1), 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.031>

- SERNAGEOMIN. (2017). *Primer Catastro Nacional de Desastres Naturales*. Retrieved from <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-Nacional-Desastres-Naturales.pdf>
- Shinozuka, M., Feng, M., Lee, J., & Naganuma, T. (2000). Statistical Analysis of Fragility Curves. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(December), 1224–1231. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:12\(1224\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:12(1224))
- Simon, A., Curini, A., Darby, S. E., & Langendoen, E. J. (2000). Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*, 35(3–4), 193–217. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00036-2)
- Simon, A., Thomas, R., & Bankhead, N. (2016). *Bank Stability and Toe Erosion Model*. USDA National Sedimentation Laboratory. Oxford, Estados Unidos.
- Skilodimou, H. D., & Bathrellos, G. D. (2016). *Debris flow: Categories, Characteristics, Hazard assessment, Mitigation measures*. Retrieved from [https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/GEOL312/Landslides/McAgenda\\_Text\\_debris\\_flow\\_final.pdf](https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/GEOL312/Landslides/McAgenda_Text_debris_flow_final.pdf)
- Stolle, J., Derschum, C., Goseberg, N., Nistor, I., & Petriu, E. (2018). Debris impact under extreme hydrodynamic conditions part 2: Impact force responses for non-rigid debris collisions. *Coastal Engineering*, 141(September), 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.09.004>
- Suweda, I. W. (2016). Time Headway Analysis To Determine the Road Capacity. *Jurnal Spektran*, 4(2), 71–80. <https://doi.org/10.24843/spektran.2016.v04.i02.p09>
- Tacnet, J.-M., Mermet, E., & Maneerat, S. (2012). Analysis of importance of road networks exposed to natural hazards. *Proceedings of the AGILE 2012 International Conference on Geographic Information Science*, (February 2017), 24–27.
- Takahashi, T. (2014). Debris flow. In *Annual review of fluid mechanics, volume 13* (Segunda). <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.13.010181.000421>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soils mechanics in engineering practice*.
- Thouret, J. C., Antoine, S., Magill, C., & Ollier, C. (2020). Lahars and debris flows: Characteristics and impacts. *Earth-Science Reviews*, 201(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103003>
- Totschnig, R., Sedlacek, W., & Fuchs, S. (2011). A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. *Natural Hazards*, 58(2), 681–703. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9623-5>

Transportation Research Board. (2016). Chapter 12/Basic Freeway and Multilane Highway Segments. In *Highway Capacity Manual: A Guide for Multimodal Mobility Analysis* (6ta ed.).

Tsubaki, R., David Bricker, J., Ichii, K., & Kawahara, Y. (2016). Development of fragility curves for railway embankment and ballast scour due to overtopping flood flow. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12), 2455–2472. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2455-2016>

UN-SPIDER. (2019). Disaster Risk Management | UN-SPIDER Knowledge Portal. Retrieved March 11, 2020, from <http://www.un-spider.org/risks-and-disasters/disaster-risk-management>

UNISDR. (2009). *Terminology Disaster Risk Reduction* (Vol. 64). <https://doi.org/10.4324/9781351138444-36>

Utasse, M., Jomelli, V., Grancher, D., Leone, F., Brunstein, D., & Virmoux, C. (2016). Territorial Accessibility and Decision-Making Structure Related to Debris Flow Impacts on Roads in the French Alps. *International Journal of Disaster Risk Science*, 7(2), 186–197. <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0088-3>

Valdés-Pineda, R., Valdés, J. B., & García-Chevesich, P. (2017). Modelación de Crecidas Aluvionales en la Cuenca del Río Copiapó, Chile. *Ingeniería Del Agua*, 21(2), 135. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.7366>

Wang, B., Li, Y., Liu, D., & Liu, J. (2018). Debris flow density determined by grain composition. *Landslides*, 15(6), 1205–1213. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0912-x>

Watson, A. J., & Basher, L. R. (2006). Stream bank erosion: a review of processes of bank failure, measurement and assessment techniques, and modeling approaches. *Landcare Research, Hamilton, New Zealand*, (June).

Winter, M. ., Macgregor, F., & Shackman, L. (2008). *Scottish road network landslides study : implementation*.

Winter, M. G., Smith, J. T., Fotopoulou, S., Pitolakis, K., Mavrouli, O., Corominas, J., & Argyroudis, S. (2014). An expert judgement approach to determining the physical vulnerability of roads to debris flow. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 291–305. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0570-3>

Winter, M. G., & Wong, J. C. F. (2020). The assessment of quantitative risk to road users from debris flow. *Geoenvironmental Disasters*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0140-x>

Winter, M., Harrison, M., Macgregor, F., & Shackman, L. (2013). Landslide hazard and

- risk assessment on the Scottish road network. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 166(6), 522–539. <https://doi.org/10.1680/geng.12.00063>
- Winter, M., Smith, J., Fotopoulou, S., Pitolakis, K., Mavrouli, O., Corominas, J., & Agyroudis, S. (2013). The physical vulnerability of roads to debris flow. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013*, 3, 2281–2284.
- Winter, Mike, Shearer, B., Palmer, D., Peeling, D., Harmer, C., & Sharpe, J. (2016). The Economic Impact of Landslides and Floods on the Road Network. *Transportation Geotechnics*, 143, 1425–1434. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.168>
- World Bank. (2011). Urban Risk Assessments, An Approach for Understanding Disaster and Climate Risk in Cities. *Assessment*, 196. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8962-1>
- Wu, W., Berhe, T. G., & Ashour, T. (2012). Embankments and dams. In *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications* (pp. 538–558). <https://doi.org/10.1533/9780857096166.4.538>
- Yamin, L., Ghesquiere, F., Darío, O., Mario, C., & Ordaz, G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre. El caso de Bogotá, Colombia*.
- Youssef, A. M., Al-Kathery, M., Pradhan, B., & El-Sahly, T. (2016). Debris flow impact assessment along the Al-Raith Road, Kingdom of Saudi Arabia, using remote sensing data and field investigations. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 620–638. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.933130>
- Youssef, A. M., Pradhan, B., & Hassan, A. M. (2011). Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environmental Earth Sciences*, 62(3), 611–623. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0551-1>
- Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M. T., Leoni, F. M., & Santacroce, R. (2004). Characteristics of May 5-6, 1998 volcanoclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): Relationships to structural damage and hazard zonation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133(1–4), 377–393. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00409-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00409-8)
- Zhao, G., Visser, P. J., Peeters, P., & Vrijling, J. K. (2015). Hydrodynamic erosion in cohesive embankment breach. *Scour and Erosion - Proceedings of the 7th International Conference on Scour and Erosion, ICSE 2014*, 441–448.
- Zhu, Y. H., Visser, P. J., & Vrijling, J. K. (2006). A model for headcut erosion during embankment breaching. *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2005 -*

*Proceedings of the 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, 2(August), 1183–1190.  
<https://doi.org/10.1201/9781439833896.ch128>

Zhu, Y., Visser, P. J., & Vrijling, J. K. (2008). Chapter 10 Soil headcut erosion: process and mathematical modeling. *Proceedings in Marine Science*, 9(December), 125–136.  
[https://doi.org/10.1016/S1568-2692\(08\)80012-5](https://doi.org/10.1016/S1568-2692(08)80012-5)

Zou, Q., Cui, P., Zhou, G. G. D., Li, S., Tang, J., & Li, S. (2018). A new approach to assessing vulnerability of mountain highways subject to debris flows in China. *Progress in Physical Geography*, 42(3), 305–329. <https://doi.org/10.1177/0309133318770985>