

Sistema integrado para la gestión de riesgos de redes viales expuestas a eventos naturales extremos en Chile.

Integrated system for managing risks to road networks exposed to extreme natural events in Chile

Alondra Chamorro^{1,3,4}, Tomás Echaveguren^{2,3}, Manuel Contreras-Jara^{1,3}, Carlos Pattillo³, Marta Contreras³, Natalia Nieto³, Eduardo Allen^{3,5}, Gustavo Jiménez-Ramos², Hernán de Solminihac^{1,4}

¹ Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. achamorro@ing.puc.cl (A.C.), mfcontreras3@uc.cl (M.C.-J.), hsolmini@ing.puc.cl (H.d.S.)

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. techaveg@udec.cl (T.E.), gustavjimenez@udec.cl (G.J.-R.)

³ Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), ANID/FONDAP/1522A0005 Santiago, Chile. Carlos.pattillo@gmail.com (C.P.), mcontreras3@uc.cl (M.C.), naniето@uc.cl (N.N.)

⁴ Centro Latinoamericano de Políticas Económicas y Sociales (CLAPES-UC), Santiago, Chile.

⁵ Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Auckland, Auckland, Nueva Zelanda. eall093@aucklanduni.ac.nz (E.A.)

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido
23-06-2024
Aceptado
12-12-2025
Publicado
30-12-2025

Palabras Clave:

Sistema de gestión de riesgos
Resiliencia
Eventos naturales
Red vial

Article history:

Received
23-06-2024
Accepted
12-12-2025
Available
30-12-2025

Keywords:

Risk management
system Resilience
Natural events
Road network

Resumen

Dada la importancia que tiene la red vial para el desarrollo de un país y su carácter crítico en términos de conectividad, se ha hecho cada vez más relevante incorporar el tratamiento de los riesgos a los sistemas de gestión de redes viales tradicionales. Los Sistemas de Gestión de Riesgos son una herramienta valiosa para estimar las pérdidas potenciales de los fenómenos naturales, evaluar las estrategias de reducción de riesgos y aumentar la resiliencia de las infraestructuras críticas. El artículo analiza el desarrollo de SIGER-RV, una herramienta para la Gestión de Riesgos de redes de carreteras expuestas a amenazas múltiples desarrollada en Chile. La herramienta se implementó en una plataforma web basada en un Sistema de Información Geográfica. Es capaz de mostrar mapas de amenazas sísmicas, hidrometeorológicas y volcánicas, estimar los daños en los principales activos de la red vial mediante curvas de fragilidad, cuantificar niveles de riesgo en función de los aumentos en tiempos de viaje, priorizar estrategias de mitigación en función de tiempos de restauración y costos, estimar pérdidas directas e indirectas y la vulnerabilidad social de comunidades expuestas a amenazas naturales. El artículo incluye una aplicación de SIGER-RV en una red de carreteras expuesta a los flujos de lahar del volcán Villarrica, en el sur de Chile. Se obtiene que el tiempo de viaje entre Villarrica y Pucón se incrementa 20 veces, debido a la falla de puentes producido por una erupción Hawaiana-estromboliana.

Abstract

Given the importance of the road network for a country's development and its critical nature in terms of connectivity, it has become increasingly relevant to incorporate risk management into traditional road network management systems. Risk Management Systems are a valuable tool for estimating potential losses from natural phenomena, evaluating risk reduction strategies, and increasing the resilience of critical infrastructure. The article analyzes the development of SIGER-RV, a tool for risk management of road networks exposed to multiple hazards developed in Chile. The tool was implemented on a web platform based on a Geographic Information System. It is capable of displaying maps of seismic, hydrometeorological, and volcanic hazards, estimating damage to key road network assets using fragility curves, quantifying risk levels based on increases in travel times, prioritizing mitigation strategies based on restoration times and costs, and estimating direct and indirect losses and the social vulnerability of communities exposed to natural hazards. The article includes an application of SIGER-RV on a road network exposed to lahar flows from the Villarrica volcano in southern Chile. It shows that travel time between Villarrica and Pucón increases 20-fold due to bridge failure caused by a Hawaiian-Strombolian eruption.

* Corresponding author at: E-mail address;

RIOCI

journal homepage: <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioci/index>

Vol. 13, no. 03, pp. 70–79, Diciembre 2025

1. Introducción

1.1 Red vial chilena y el riesgo de amenazas naturales.

Las redes viales de manera tradicional son gestionadas bajo el supuesto de esfuerzos y tensiones predominantes que afectan la infraestructura durante su vida útil y el contexto natural donde se encuentran. Al mismo tiempo, los modelos de transporte asignan tráfico a la red de caminos considerando que todos los arcos están conectados. Sin embargo, la evidencia empírica ha demostrado que las amenazas naturales o antrópicas pueden interrumpir temporal o permanentemente la conectividad entre dichos arcos. Estas interrupciones se traducen en desvíos de tráfico y demoras en los viajes, lo que aumenta los costos de operación vehicular (COV) e induce a pérdidas económicas directas e indirectas. Algunas de las amenazas naturales que habitualmente afectan la conectividad de la red vial son terremotos, deslizamientos de tierra, inundaciones, lluvias intensas, tsunamis y lahares volcánicos, entre otras.

Los Sistemas de Gestión de Riesgo (RMS, *Risk Management System*) se han desarrollado para evaluar los niveles de riesgo de infraestructura crítica y edificios expuestos a amenazas naturales. Estos sistemas tienen como objetivo estimar los efectos probables de los eventos naturales en los activos existentes, a fin de reducir sus consecuencias a largo plazo mediante el diseño de estrategias adecuadas de preparación y mitigación. Generalmente los RMS se implementan principalmente en plataformas computacionales, en las cuales se integran modelos complejos dentro de un marco conceptual adecuado. Algunos de estos modelos pueden ser la simulación de amenazas, fragilidad de activos, estimación de riesgos, evaluación de estrategias de mitigación o costos de recuperación (Free et al, 2006). El núcleo de un *Road RMS* es la evaluación del riesgo de la red vial dada su exposición, vulnerabilidad y robustez, y la evaluación de los efectos físicos, económicos y sociales de las amenazas naturales que potencialmente afectan a componentes específicos de esta (por ejemplo, puentes, terraplenes, túneles, plataformas), con el fin de estimar las necesidades de mitigación o mejora para lograr una red resiliente y rentable.

La mayoría de los sistemas disponibles incluyen múltiples amenazas y sus efectos sobre las comunidades, redes e infraestructuras críticas como marco estándar. Algunos ejemplos de estos sistemas incluyen Hazus - MH (*Hazards United States - Multi Hazards*) y REDARS (*Risk from Earthquake Damage to Roadway Systems*), ambos desarrollados en Estados Unidos, GEM (*Global Earthquake Model*) desarrollado en Europa, y *RiskScape* desarrollado en New Zelanda (Schneider y Schauer,

2006; Schmidt et al, 2011). A excepción de REDARS, la mayoría de los sistemas de gestión de riesgos consideran modelos de riesgo físico para estructuras específicas, pero no para sistemas distribuidos espacialmente, como es el caso de la red vial.

Dado que las redes de caminos son sistemas complejos distribuidos espacialmente y expuestos a múltiples amenazas, que proporcionan servicio a la sociedad al proveerla de accesibilidad y movilidad, es fundamental que el análisis de riesgo de la infraestructura vial integre tanto la vulnerabilidad física de la infraestructura en sí, como la vulnerabilidad social de la población atendida. La razón para considerar ambas dimensiones es la tendencia actual hacia RMS integrados. Estos incluyen aspectos sociales que buscan un mejor análisis de la viabilidad de las estrategias de reducción de riesgo, tal y como proponen Koks et al. (2015) y Cutter et al. (2013). Además, dadas las interdependencias entre los arcos de la red y la variabilidad de los tipos de infraestructura vial, es esencial escalar el problema del análisis de riesgo a nivel de red en lugar de un análisis basado en el elemento, considerando las principales amenazas naturales que afectan la conectividad de la red.

Chile es uno de los países más propensos del mundo a presentar eventos naturales debido a su clima, características geológicas y ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico. A pesar del desarrollo de múltiples herramientas y software basados en SIG en diferentes partes del mundo, aún existe el desafío de aplicar estos sistemas a otros territorios que no tengan las mismas características que los lugares para los que fueron desarrollados. Por ejemplo, los modelos de riesgo y las curvas de fragilidad incluidos en los sistemas existentes pueden requerir calibraciones únicas en territorios como Chile. Por lo tanto, es relevante la necesidad de contar con un RMS para redes viales expuestas a múltiples amenazas naturales desarrollado explícitamente para el territorio chileno.

El propósito de este trabajo es presentar el desarrollo de un Sistema de Gestión de Riesgos en la red vial ante eventos naturales llamado SIGeR-RV, que permite estimar el riesgo de la red vial y asignar recursos eficientemente con el fin de asegurar transitabilidad ante la presencia de eventos naturales extremos que la afecten. El primero capítulo presenta una introduce los conceptos claves en la formulación de un sistema de gestión; el segundo capítulo describe el marco conceptual de SIGeR-RV; el tercer capítulo presenta la funcionalidad del sistema mediante un caso de estudio; y finalmente en el cuarto capítulo se dan las conclusiones del artículo.

2. Metodología

2.1 Marco conceptual del Sistema de Gestión de Riesgos – SIGeR-RV.

SIGeR-RV es un software basado en web-GIS desarrollado para el Ministerio de Obras Públicas de Chile para estimar el riesgo de las redes viales expuestas a amenazas naturales y proponer acciones rentables para la reducción de riesgos. El marco conceptual del SIGeR-RV, descrito en la Figura 1, está organizado en tres módulos: datos de entrada, modelos y resultados, como se presenta en la. La parte central del marco incluye el proceso primario programado en el software. Además, SIGeR-RV permite evaluar escenarios probabilísticos considerando la incertidumbre de la amenaza y su impacto en la infraestructura y la población expuestas.

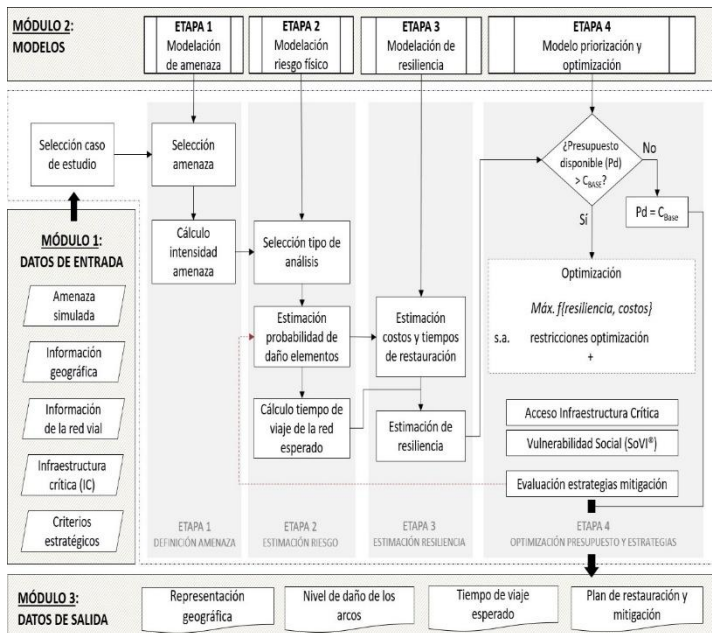


Figura 1. Marco del sistema integrado de gestión de riesgos de redes viales expuestas a diferentes amenazas naturales. Fuente: Chamorro et al., 2023.

2.2 Módulo 1: Datos de entrada.

El módulo de datos de entrada contiene la información necesaria para ejecutar el software, incluidos cinco grupos de datos. El primer grupo de datos son las amenazas simuladas. La primera versión del SIGeR-RV permite la simulación de la amenaza sísmica a lo largo de todo el país. Los eventos hidrometeorológicos y volcánicos se cargan como mapas de amenaza específicos, considerando que estas deben modelarse caso por caso.

El segundo grupo de datos concentra la información geográfica del territorio. Incluye conjuntos de datos geo codificados de

líneas costeras, fronteras y la configuración administrativa del país, que se pueden ver en una interfaz GIS. Estos datos de entrada son necesarios para el modelado de amenazas (paso uno del marco conceptual) y la priorización y optimización de las estrategias de mitigación (paso cuatro del marco conceptual). Además, se incluye como dato de entrada para este conjunto el mapa de vulnerabilidad social de todo el país.

El tercer grupo de datos es la red vial chilena y sus atributos. Incluye topología de red, jerarquía de caminos, identificación de caminos, tipo de activos (plataforma, puentes y túneles y sus propiedades generales) y longitudes de cada arco vial. Este conjunto de datos es necesario para la modelación del riesgo (paso dos del marco conceptual).

El cuarto grupo de datos son los datos de infraestructura crítica (IC). Rinaldi et al. (2001) definen la IC como una red de sistemas y procesos artificiales que trabajan en colaboración para producir y distribuir bienes y servicios esenciales. La información de IC incluye la ubicación geográfica de los centros educativos públicos, el sistema de salud, las subestaciones eléctricas, los sistemas de agua potable rural y los servicios de emergencia y seguridad. Esta información es necesaria para evaluar el acceso provisto por la red vial a las diferentes IC, que se desarrolla en el paso "Priorización y optimización" (paso cuatro del marco conceptual). Finalmente, el último grupo de datos son los criterios estratégicos, compuestos por dos conceptos: (a) presupuesto disponible, que establece el usuario del software en cada caso de aplicación, y (b) el desempeño esperado de la red vial en estudio.

2.3 Modulo 2: Modelos.

Este módulo incluye cuatro etapas: (1) modelación de la amenaza, (2) modelación del riesgo, (3) estimación de la resiliencia y (4) priorización y optimización.

2.3.1 Etapa 1: Modelación de las amenazas.

Esta etapa incluye la simulación de amenazas naturales en el área de estudio seleccionada. Actualmente, el sistema tiene capacidades para modelar eventos sísmicos utilizando un simulador de terremoto estocástico calibrado para Chile por Poulos et al. (2019). Este simulador estima el desplazamiento máximo del suelo (PGD) para diferentes períodos de recurrencia con diferentes distancias hipocentrales, siendo esta la medida de intensidad de la amenaza sísmica.

El riesgo de flujo de lahar se agrega al software como un archivo de forma de polígono GIS. El software puede ejecutar múltiples escenarios dependiendo de los escenarios existentes cargados. Cada archivo debe contener contiene la ruta, la velocidad del flujo y la altura de los lahares. La distribución espacial de los lahares se utiliza para identificar los activos expuestos y la

probabilidad del estado de daño de carreteras y puentes. Actualmente, SIGER-RV ha cargado los flujos lahares del Volcán Villarrica, obtenidos a partir de modelos realizados por (INH, 2013) utilizando el software LAHARZ.

La amenaza hidrometeorológica se agrega al software como una capa GIS. Los mapas deben contener profundidad de flujo, velocidad y áreas inundadas para diferentes períodos de retorno. SIGER-RV incluye mapas de inundación de las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo, Mataquito y Biobío. Dichos mapas se obtuvieron mediante un modelo hidrológico-hidráulico utilizando un modelo lluvia-escorrentía calibrado en Chile por Verni y King (1977) y el software 2D-HEC-RAS.

2.3.2 Etapa 2: Modelación de Riesgo físico.

Tabla 1. Modelos de Fragilidad y Probabilidad implementados en el sistema SIGER-RV.

Amenaza Natural	Sub-amenaza	Intensidad	Activo vial afectado	Daños/ Consecuencias	Autor(es) del modelo
Volcánica	Lahar	Altura del flujo de lahar	Puentes	Falla/ no falla	Dagá et al., 2018
Hidro-meteorológica	Anegamiento	Altura de anegamiento	Plataforma	Interrupción de tráfico	Contreras-Jara et al., 2018
	Socavación	Altura de flujo	Puentes	Falla/ no falla	Contreras-Jara et al., 2021
	Flujos de agua hiperconcentrados y claros	Altura de flujo	Terraplén de camino	Falla / no falla y estados de daño	Nieto et al., 2021
Sísmica	Movimiento sísmico	Aceleración espectral (S_a) y Aceleración máxima del suelo (<i>Peak Ground Acceleration</i> , PGA)	Puentes	Estados de daño	Basöz & Mander, 1999
		Deformación máxima del suelo (<i>Peak Ground Deformation</i> , PGD)	Plataforma	Estados de daño	NIBS, 2004
		Aceleración máxima del suelo (PGA)	Túneles	Estados de daño	G&E, 1994

A partir de El siguiente paso es resolver el problema de asignación de tráfico para calcular el incremento de los tiempos de viaje en cada arco vial. El software utiliza el BRP de Beckmann et al. (1956) y ampliado por Nie et al. (2004). La asignación de tráfico se obtiene minimizando el tiempo de viaje $t(u)$ de la red (Ecuación 1), sujeto a las restricciones mostradas en la Ecuación 2 (flujos totales de vehículos igual a la demanda de cada origen-destino), Ecuación 3 (tráfico en el arco es la suma de los flujos de todas las rutas que utilizan ese arco), Ecuación 4 (no negatividad del tráfico en la ruta "p") y Ecuación 5 (no negatividad del tráfico en el arco "a").

$$\min \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} t(u) du$$

$$\sum_{p \in P_w} h_p = T_w, \quad w \in W \quad (1)$$

$$\quad (2)$$

$$f_a = \sum_{p \in P} \delta_{ap} h_p, \quad a \in A \quad (3)$$

$$h_p \geq 0, \quad p \in P \quad (4)$$

$$f_a \geq 0, \quad a \in A \quad (5)$$

El tiempo de viaje “ta” se estima con la Ecuación 6, en la cual “ta” es el tiempo de viaje del arco “a” considerando la capacidad de la vía y el caudal asignado, “tao” es el tiempo de viaje a flujo libre del arco “a”, “fa” es el flujo de tráfico asignado al arco “a”, “ca” es la capacidad de la vía y α y β son constantes (TRB, 2016).

$$t_a = t_a^o \left[1 + \alpha \left(\frac{f_a}{c_a} \right)^\beta \right] \quad (6)$$

2.3.1 Etapa 3: Estimación de resiliencia.

La resiliencia de la red vial se define como su capacidad para mantener su funcionalidad cuando se ve afectada por un evento disruptivo, como las amenazas naturales, con un costo mínimo de reparación y reconstrucción (Rose & Kraustmann, 2013). La métrica utilizada en este software se cuantifica según la Ecuación 7 (Luo et al. 2018). El rendimiento $R(t)$ se estima como el tiempo de viaje esperado entre dos nodos. En este modelo, R_o corresponde al desempeño de la red en condiciones prístinas; t_θ es el momento en que ocurre el evento disruptivo y t_{pir} es el tiempo de recuperación del sistema.

$$Resiliencia = 1 / \left(\int_{t_\theta}^{t_{pir}} (R_o - R(t)) dt \right) \quad (7)$$

2.3.2 Etapa 4: Priorización y optimización de medidas mitigación.

Se definieron una serie de estrategias de mitigación para cada amenaza natural incluido en el sistema. El modelo de priorización y optimización asigna estrategias de mitigación para reducir el efecto de los eventos naturales en la red vial. En el análisis se consideraron tres tipos de estrategias de intervención: (a) estrategias de mitigación, que son intervenciones previas al desastre; (b) estrategias de recuperación de tráfico, que se enfocan en la respuesta rápida y la recuperación de la conectividad de la red; y (c) estrategias de recuperación total, que se enfocan en la recuperación de la red a las condiciones previas al desastre. Estos dos últimos están asociados a la restauración de activos. La función de optimización considera la maximización de la resiliencia esperada y la relación de costos esperados de un conjunto de estrategias de mitigación como se presenta en la Ecuación 8.

$$\text{Max } f = \frac{E_\xi \left[\frac{1}{\int_{t_\theta}^{t_{pir}} (R_o - R(t)) dt} \right]}{\sum_{a \in A} X_a C_a} \quad (8)$$

Donde X_a es la variable de decisión del problema de

optimización. Su valor es 1 si se selecciona el activo “a” para la mitigación y 0 en caso contrario. C_a es el costo monetario de mitigar el activo “a”; y $E\{X\}$ es el valor esperado de X considerando todos los escenarios de amenaza. La limitación presupuestaria requiere que el costo total de mitigación no exceda el presupuesto disponible. La Ecuación 9 presenta la restricción presupuestaria, donde M es el presupuesto disponible para la mitigación.

$$\sum_{a \in A} X_a C_a \leq M, \quad X_a \in \{0,1\} \quad (9)$$

El algoritmo utilizado para resolver el problema de optimización es el procedimiento de búsqueda adaptativa aleatoria codiciosa (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, GRASP) de (Feo & Resende, 1989).

2.3.3 Enfoque de análisis de red.

Se propone una variación del modelo para considerar otras dimensiones y toda la red sin un par origen- destino específico. Para considerar esto, se han agregado nuevas dimensiones: vulnerabilidad social, centralidad topológica y acceso a otras infraestructuras críticas. El factor topológico es considerado como centralidad de intermediación, presentado en la Ecuación 10.

$$IT_a = \sum_{s \neq t} \frac{\Delta_{s,t}(a)}{\Delta_{s,t}} \quad (10)$$

Donde $\Delta_{(s,t)}(a)$ es el número total de rutas mínimas entre todos los pares de nodos que pasan por el activo y $\Delta_{(s,t)}$ es el número total de rutas mínimas entre los nodos “s” y “t”. Esta medida evalúa la relevancia topológica de cada enlace/nodo dentro de una red en términos del número de caminos más cortos que pasan a través de ese elemento.

Para cuantificar la dimensión social, SIGER-RV ha integrado el Índice de Vulnerabilidad Compuesto (IVC), que tiene dos módulos: un módulo social y un módulo de infraestructura crítica. El CVI se estima a partir de un Índice de Vulnerabilidad Social (SVI) y un índice de acceso a infraestructura crítica, Índice de Importancia I_{imp} (Ecuación 11). Un valor diferente de CVI está asociado con cada arco en la red vial

$$CVI = SVI \cdot I_{imp} = SVI + \left(1 + \sum_j^m \frac{L_i AADT_i}{L_{TIC} AADT_{TIC}} \right) \quad (11)$$

Donde SVI es el Índice de Vulnerabilidad Social, I_{imp} es el Índice de Importancia. En cuanto a los subíndices, “i” es el arco

analizado; “j” es la infraestructura crítica a la que accede el arco “i”; “m” es el total de infraestructuras a las que accede “i”; “TIC” se refiere al número total de arcos que dan acceso a la infraestructura “j”. “L” es la longitud del arco (en km) y AADT es la Circulación Media Anual Diaria del arco “i”.

Finalmente, el acceso a las infraestructuras críticas se evalúa a través del Índice de Importancia (I_{imp}). Delimita una zona de influencia de 2 km de radio alrededor de cada una de las infraestructuras para identificar sus arcos de acceso. Una vez identificados, se valoran por su longitud (L) y tránsito (Tráfico Diario Medio Anual, TMDA).

Para la asignación de estrategias de mitigación se propone un índice de priorización para cada eslabón en torno a cuatro factores: índice topológico con la Ecuación 10 (centralidad de intermediación), CVI (Índice de Vulnerabilidad Compuesto de Contreras (2021) explicado en la Ecuación 11, tráfico diario promedio anual (TMDA) normalizado (η_a) y el área de resiliencia esperada (considerando un conjunto de amenazas naturales) como se explica en la ecuación 9.

El índice de priorización se presenta en la Ecuación 12.

$$\text{Índice de priorización} = E_{\xi}[\text{Resiliencia}](1 + CVI_a + IT_a \eta_a) \quad (12)$$

2.4 Módulo 3: Datos de salida

SIGER-RV proporciona las siguientes salidas: (a) representación GIS gráfica de la amenaza simulada en la red vial estudiada; (b) tabla con los activos afectados en la red vial analizada; (c) Representación GIS de los activos viales dañados; (d) tiempo de viaje esperado para los diferentes escenarios de la amenaza considerada; (e) un conjunto de acciones de recuperación y mitigación priorizadas en base al presupuesto límite; (f) mapas con el índice de vulnerabilidad social de las diferentes unidades geográficas; y (g) una clasificación topológica de la red y los arcos de la red de carreteras más relevantes para el acceso a IC.

3. Análisis de resultados

A continuación, se presentan una serie de aplicaciones del sistema a diferentes territorios y amenazas, así como las potencialidades que el software ofrece en sus aplicaciones a escala real. Todos los casos presentados se han llevado a cabo bajo un periodo de análisis de 5 años, comprendidos entre 2020 y 2025. También presentan una tasa de descuento común fijada en el 6%.

En la Figura 2, se presenta la ventana de “Datos de entrada” en

la cual se especifica el periodo y nombre del análisis. Se seleccionan las capas de información integradas en el programa para la división política administrativa, las cuencas hidrográficas, la red vial, el tránsito, el módulo social y la infraestructura crítica que conforman la información base para proceder al análisis.

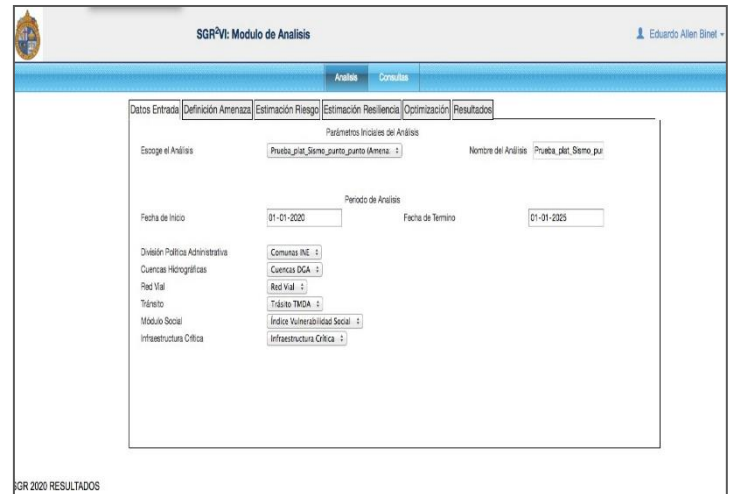


Figura 2. Ventana de “Datos de entrada” asociada al caso de aplicación de amenaza sísmica.

Una vez definido el caso de aplicación, se pasa a la pestaña de definición de la amenaza, donde se selecciona la zona de estudio en función de la amenaza escogida. La Figura 3 muestra el visor de amenazas SIGER-RV. A la izquierda está el visor de capas y a la derecha el visor de mapas. La amenaza sísmica se muestra en la Figura 3a, representada mediante un mapa con los diferentes niveles de PGD (en cm) simulados en la zona central de Chile, cada color representa el desplazamiento máximo del suelo alcanzado en cada sitio. La Figura 3b muestra en rojo las áreas afectadas por el volumen potencial de lahares para una erupción volcánica con períodos de retorno de 800 años. La Figura 3c muestra la inundación simulada en la escala de color azul. Los colores más intensos muestran que las áreas de inundación presentan alturas de agua más altas.

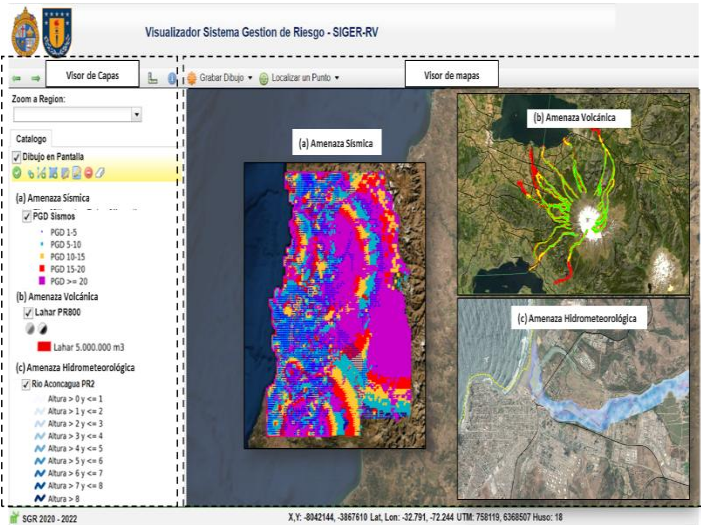


Figura 3. Diferentes amenazas de SIGER-RV a) amenaza sísmica (zona central de Chile), b) amenaza volcánica (volcán Villarrica), c) amenaza hidrometeorológica (cuenca del Aconcagua).

Cómo ejemplo de aplicación se ha seleccionado la zona de estudio del Volcán Villarrica, considerando una amenaza de flujos laháricos. Los escombros volcánicos transportados por los lahares hacen de estos flujos el proceso más destructivo para la infraestructura vial, especialmente para los puentes (Wilson et al., 2014). La vertiente norte del volcán contiene cuatro fuentes principales y corredores de lahares, correspondientes a cuatro cauces fluviales (ríos Huichatío, Molco, Correntoso y Zanjón Seco) (Vallance, 2000). Los escenarios volcánicos modelados corresponden a erupciones hawaianas-estrombolianas, subplinianas y plinianas. Estos tres escenarios, a su vez, consideran tanto las condiciones de invierno como las de verano (INH, 2013; Dagá et al., 2018).

En cuanto a la estimación del riesgo, para este caso se opta por análisis Origen-Destino entre las ciudades de Villarrica y Pucón, con el objetivo de analizar las rutas críticas en esta conexión. La Figura 4a muestra la ruta óptima entre las ciudades de Villarrica y Pucón una vez simulados los diferentes escenarios volcánicos. Mientras que en la figura 4b aparecen las rutas alternativas para el escenario 1 de la erupción Hawaiana-estromboliana (invierno). Muchos de ellos se superponen, pero destaca una alternativa que implica rodear la parte norte del lago Villarrica (ruta en rojo Figura 4b). Esta ruta alternativa, a pesar de ser una opción de redundancia válida, implica un aumento considerable en el tiempo de viaje de los usuarios en comparación con la ruta óptima. Esta alternativa presenta una ruta de 645 minutos versus la ruta del escenario 1 con 32 minutos (ruta en verde Figura 4a). Además, en ambos casos se puede observar el área ocupada por los lahares para cada erupción, la leyenda específica los m³ del caudal correspondiente en cada caso.

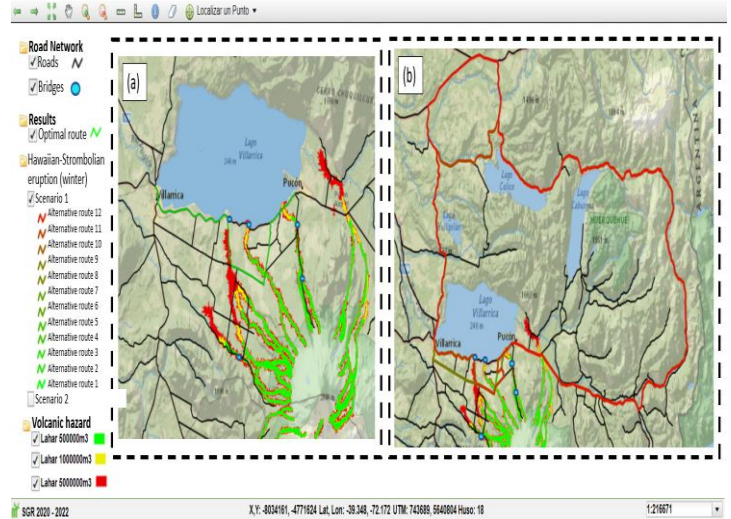


Figura 4. Intersección de la ruta óptima con amenaza de lahares en el volcán Villarrica.

Por otro lado, la Figura 5 muestra los resultados en formato de tabla, presentando el aumento en el tiempo de viaje para cada escenario. La Figura 5a presenta información detallada sobre la probabilidad de falla de los activos afectados para 10.000 iteraciones y los tiempos de viaje para cada una de estas iteraciones (Columna 4). Por ejemplo, para el escenario de la Figura 5, fallan 4 activos, con una probabilidad de fallo comprendida entre el 8,7% y el 17,8%. Produciendo un aumento de los tiempos de viaje de hasta 645 minutos. En la Figura 5b, la información se dedica a los activos, en este caso se informa para cada escenario, el ID de los puentes que se han visto afectados. Cabe señalar que para el riesgo volcánico se desarrollaron curvas de probabilidad de falla, es decir, solo la opción de colapso o no colapso.

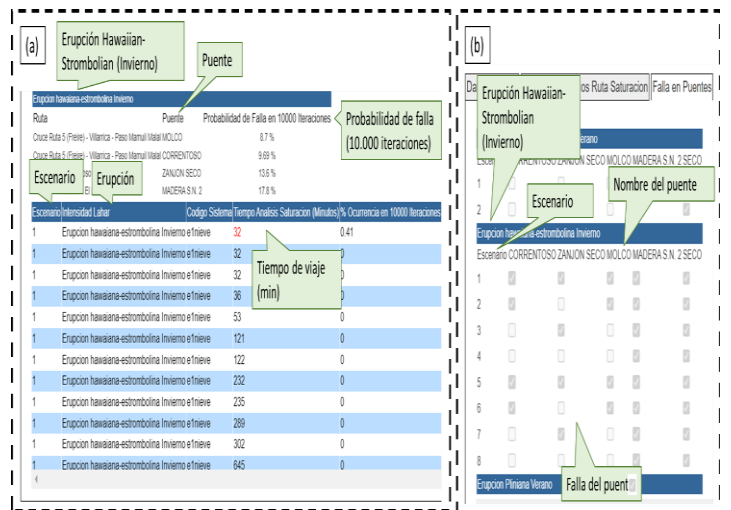


Figura 5. Tiempo de viaje de los escenarios laháricos simulados para el volcán Villarrica.

Los resultados obtenidos por SIGER-RV, permiten al usuario identificar las rutas y activos viales más afectados, así como conocer las posibles rutas alternativas que brinden mayor redundancia al origen-destino considerado en el análisis. Al conocer los activos más vulnerables a los flujos laháricos, es posible enfocar los recursos en la implementación de acciones de mitigación adecuadas a la amenaza y daño esperado.

4. Conclusiones

Este artículo presenta una herramienta de gestión integral de riesgos aplicable a diferentes amenazas naturales que afectan las redes viales, los territorios y las comunidades. Fue desarrollada en una plataforma web basada en SIG (SIGER-RV) que incluye consecuencias ambientales, económicas y sociales. De este estudio se pueden derivar las siguientes conclusiones y recomendaciones.

A pesar del importante y extenso desarrollo de RMS y herramientas computacionales para infraestructuras expuestas a amenazas naturales, su aplicación en territorios con diferentes características y realidades sigue siendo difícil. Estos requieren un desarrollo científico significativo y calibraciones adicionales.

El uso de plataformas GIS-WEB es crucial para el desarrollo de herramientas que buscan evaluar sistemas espacialmente distribuidos como las redes viales. SIGER-RV es una herramienta vital para que los tomadores de decisiones en Chile gestionen de manera integral el riesgo de sus redes viales expuestas a amenazas naturales. Además, desarrolla un análisis de riesgo que incluye la vulnerabilidad física y social. También es simple de usar y puede estar dirigido a diferentes usuarios.

Es importante señalar que, en cualquier sistema o herramienta de gestión de riesgos, cada proceso del sistema se basa en la calidad de los datos de entrada. Por ejemplo, el paso 2 (modelado de riesgo) requiere el uso de curvas de fragilidad que deben haber sido calibradas para el área de estudio. En el caso del caso presentado, las curvas fueron calibradas por diferentes autores de diferentes países. Por lo tanto, una variación en las curvas de fragilidad produce una variación en los resultados de la evaluación de riesgos.

Los resultados obtenidos para el programa del plan de mitigación están directamente relacionados con el tipo de análisis. El sistema puede realizar un análisis origen-destino, como los casos de aplicación mostrados, o una investigación integrada a nivel de red, que incorpora otras variables como la vulnerabilidad social y la centralidad topológica, las cuales fueron brevemente explicadas en este documento.

Por último, hay que destacar la necesidad de actualizar la

información base que conforma el software para obtener en la medida de lo posible resultados sobre la realidad analizada. Aspectos como el tráfico, la ubicación de nuevas infraestructuras críticas, las modificaciones en la red vial o la actualización de las variables sociales son variables cambiantes en el corto y mediano plazo. Esta tarea es responsabilidad del usuario administrador.

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) por el financiamiento del Proyecto FONDEF "Investigación y Desarrollo de Modelos para Cuantificar y Mitigar el Riesgo de Amenazas Naturales en la Red Vial Nacional" (subvención no. ID14I20309/FONDEF/ANID), el Proyecto FONDEF "Desarrollo y aplicación de un modelo de interrupción de tránsito por falla de taludes de carreteras causada por eventos climáticos extremos" (Subvención no. ID22I10037/FONDEF/ANID), el Proyecto FONDECYT (subvención no. 1181754/FONDECYT/ANID), y el Centro de Investigación para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) (subvención no. ANID/FONDAP/1522A0005).

Además, los autores expresan su gratitud a las instituciones que participaron y contribuyeron a estos proyectos de investigación, la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile, el Servicio Nacional de Geología y Minería del Ministerio de Minería de Chile, el Servicio Nacional de Prevención y Atención de Desastres del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (SENAPRED) y la Asociación Chilena de Asociaciones Público-Privadas (COPSA).

6. Referencias

- Basöz, N., & Mander, J. (1999). Enhancement of the highway transportation lifeline module in HAZUS (Technical report). National Institute of Building Sciences, Washington, D.C.
- Beckmann, H. & Simpson, D.M. (2006). 'Risk assessment and GIS in natural hazards: issues in the application of HAZUS', *Int. J. Risk Assessment and Management*, Vol. 6, Nos. 4/5/6, pp.408– 422.
- Chamorro, A., Echaveguren, T., Pattillo, C., Contreras-Jara, M., Contreras, M., Allen, E., Nieto, N., & de Solminihaç, H. (2023). SIGER-RV: A Web-Geographic Information System-Based System for Risk Management of Road Networks Exposed to Natural Hazards. *Transportation Research Record*, 0(0). <https://doi.org/10.1177/03611981231169532>
- Contreras, M. (2021). Metodología para integrar a la gestión de riesgo de infraestructura vial la vulnerabilidad social y la dependencia a infraestructura crítica ante

- eventos naturales. Aplicación práctica al volcán Villarrica (Chile) (Trabajo de Fin de Máster). Universitat Politècnica de València, Valencia, España.
- Contreras-Jara, M., Echaveguren, T., Chamorro, A., & Vargas-Baecheler, J. (2021). Estimation of exceedance probability of scour on bridges using reliability principles. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(8), 04021029. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002109](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002109)
 - Contreras-Jara, M., Echaveguren, T., Vargas Baecheler, J., Chamorro Giné, A., & de Solminihac Tampier, H. (2018). Reliability-Based Estimation of Traffic Interruption Probability due to Road Waterlogging. *Journal of Advanced Transportation*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2850546>
 - Cutter, S. L., Emrich, C. T., Morath, D. P., y Dunning, C. M. (2013). Integrating social vulnerability into federal flood risk management planning. *Journal of Flood Risk Management*, 6, 332–344. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12018>.
 - 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>
 - Feo, T.A. and Resende, M.G.C. (1989). A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters* 8: 67–71.
 - Free, M., Anderson, S., Milloy, C. & Mian, J. (2006). Geohazards risk management for infrastructure projects. *Proceedings of the ICE – Civil Engineering*, 159, 28 – 34.
 - G&E. (1994). NIBS earthquake estimation methods technical manual (Technical report), G&E Engineering System.
 - Instituto Nacional de Hidráulica, INH (2013). Construcción Mitigación Riesgos Volcánicos y Geológicos Asociados, Comunas de Villarrica, Pucón y Curarrehue, Región de la Araucanía. http://www.inh.cl/home/documents/proyectos/001-09-2014%20Ficha%20Estudio%20Riesgos%20volcanicos,%20regi%C3%B3n%20Araucan%C3%ADa_Estudio.pdf
 - Koks, E. E., Jongman, B., Husby, T. G., & Botzen, W. J. W. (2015). Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. *Environmental Science & Policy*, 47, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.10.013>
 - Luo, D., Xia, Y., Zeng, Y., Li, C., Zhou, B., Yu, H., & Wu, Q. (2018). Evaluation method of distribution network resilience focusing on critical loads. *IEEE Access*, 6, 61633–61639
 - National Institute of Building Sciences [NIBS] (2004). HAZUS-MH: User's manual and technical manuals (Technical report). National Institute of Building Sciences, Washington, DC.
 - Nie, Y., Zhang, H. M., & Lee, D. H. (2004). Models and algorithms for the traffic assignment problem with link capacity constraints. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(4), 285–312. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(03\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(03)00010-9)
 - Nieto, N., Chamorro, A., Echaveguren, T., Sáez, E., & González, A. (2021). Development of fragility curves for road embankments exposed to perpendicular debris flows. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 1560–1583. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1935330>
 - Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N. & de la Llera, J. C (2019). An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statistical Validation of Its Poisson Nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*; 109 (1): 66-74. Doi: <https://doi.org/10.1785/0120170160>
 - Rinaldi, S.M., Peerenboom, J.P., Kelly, T.K., (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control. Syst.* 21 (6), 11–25.
 - Rose, A., Kraustmann, E. (2013). An economic framework for the development of a resilience index for business recovery. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 5, 73-83.
 - Schmidt, J., Matchan, I., Reese, S., King, A., Bell, R., Henderson, R., Smart, G., Cousins, J., Smith, W. and Heron, D. (2011). Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modeling. *Natural Hazards*. 58:1169-1192.
 - Schneider, P. J., & Schauer, B. A. (2006). HAZUS—Its Development and Its Future. *Natural Hazards Review*, 7(2), 40–44. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1527-6988\(2006\)7:2\(40\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1527-6988(2006)7:2(40))
 - Vallance, J. (2000) Lahars. *Encyclopedia of Volcanoes*; Sigurdsson, H., Ed.; Academic Press: San Diego, CA, USA, pp. 601–616.
 - Verni, F. and H. King, H. (1977). Flood estimation in uncontrolled basins. Estimación de crecidas en cuencas no controladas. *Chilean Society of Hydraulic Engineering*. (In Spanish). 3rd National Colloquium of Hydraulic Engineering. 29th November – 1st December. Santiago, Chile. <http://www.sochid.cl/publicaciones-sochid/congresos-chilenos/iii-coloquio/>
 - Wilson, G., Wilson, T., Deligne, N., y Cole, J. (2014). Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 286, 148–182. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030>