



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

CÁLCULO DE POBLACIÓN FLOTANTE Y VÍAS DE EVACUACIÓN PARA EL VOLCÁN VILLARRICA

“Análisis de la criticidad de evacuación peatonal en escenarios volcánicos mediante modelación de grafos y simulación espacial: Caso Pucón–Villarrica, Chile”

POR: ROSARIO VALDERRAMA LABARCA

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad del
Desarrollo para optar al grado académico de Magíster en Data Science

PROFESOR GUÍA:

DR. LEO FERRES

Enero 2026
SANTIAGO

Agradecimiento

Este proyecto es el resultado de casi dos años de aprendizaje intenso, dedicación y profundo crecimiento personal y profesional. Nada de esto habría sido posible sin el apoyo incondicional de quienes me acompañaron en este camino y a quienes quiero agradecer sinceramente.

A Félix, por ser un tremendo partner, por creer en mí siempre y celebrarme todo, desde los grandes hitos hasta los avances más pequeños, y por acompañarme con mucha comprensión, madurez y cariño en este desafío. A mi familia, que estuvo conmigo en cada etapa del proceso.

A mi profesor guía, Leo Ferres, por la autonomía y la confianza que me otorgó desde el inicio. Haber llegado a trabajar con él ha sido una tremenda experiencia; admiro profundamente su trayectoria, que se han convertido en un referente para mi propio camino. Al equipo del Magíster, mis profesores y mis compañeros de trabajos (GL, IS y GA) por cada conversación, consejo y apoyo durante este tiempo.

A Pablo Allard, Oscar Mackenney, Karen Ulriksen y la Dirección de Gestión y Desarrollo de los Académicos de la Universidad, por la confianza depositada en mí y por desafiarme siempre a ser una mejor profesional. Gracias por permitirme la oportunidad de seguir creciendo tanto en mi formación académica como en mi aporte a la institución.

A todos, gracias por acompañarme en este recorrido que marcó profundamente mi desarrollo y abrió nuevas posibilidades en el cruce entre arquitectura, datos e inteligencia territorial.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. TRABAJO RELACIONADO	9
2.1. DATOS MÓVILES PARA EL ANÁLISIS DE POBLACIÓN Y MOVILIDAD HUMANA.	9
2.2. PATRONES DE MOVILIDAD HUMANA A TRAVÉS DE DATOS CON ALTA RESOLUCIÓN TEMPORAL.....	13
2.3. MODELOS ESTADÍSTICOS PARA ANÁLISIS DE EVACUACIÓN	15
2.4. GRAFOS PARA EL ANÁLISIS DE MOVILIDAD Y EVACUACIÓN	16
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	18
3.1. HIPÓTESIS GENERAL	18
3.2. OBJETIVO GENERAL.....	19
3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4. DATOS	22
4.1. DATOS CENSO (INE, 2024).....	24
4.2. DATOS CARTOGRAFÍA PREDIAL (SII–CIREN, 2023).....	33
4.3. DATOS POBLACIÓN FLOTANTE (CONSOLIDACIÓN DATOS CENSO, 2024 Y SII – CIREN, 2023)	36
4.4. DATOS RED VIAL (MOP, 2024)	41
4.5. DATOS RED HIDROGRÁFICA (BCN, 2024).....	44
4.6. DATOS PELIGROS DEL VOLCÁN VILLARRICA (SERNAGEOMIN, 2000)	46
4.7. DATOS CONSTRUIDOS DE POBLACIÓN FLOTANTE (2025).....	51
5. METODOLOGÍA	56
5.1. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN POBLACIONAL.....	58
5.2. ACCESO A LA RED VIAL: CONEXIÓN ORTOGONAL	59
5.3. CONFIGURACIÓN DEL GRAFO VIAL.....	60

5.4. INTEGRACIÓN DE LOS PUNTOS DE ORIGEN Y DESTINO AL GRAFO	62
5.5. CÁLCULO DE RUTAS DE EVACUACIÓN PEATONAL	63
5.6. ESTIMACIÓN DE TIEMPOS DE EVACUACIÓN POBLACIONAL	64
6. RESULTADOS.....	66
6.1. MÉTRICAS GRAFO DE LA RED VIAL.....	66
6.1.1. <i>Degree Centrality: Conectividad de la red</i>	67
6.1.2. <i>Betweenness Centrality: Ejes estructurantes de la red</i>	69
6.1.3. <i>Closeness Centrality: Accesibilidad estructural de la red</i>	72
6.1.4. <i>Articulation points: Vulnerabilidad de la red vial</i>	76
6.2. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE EVACUACIÓN PEATONAL	79
6.2.1. <i>Escenario 1: Población residente</i>	79
6.2.2. <i>Escenario 2: Población máxima crítica</i>	91
7. CONCLUSIONES.....	103
8. LIMITACIONES DEL ESTUDIO	109
9. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO.....	110
BIBLIOGRAFÍA	112

Resumen

Las comunas de Pucón y Villarrica se emplazan en un territorio de alta amenaza volcánica asociada al volcán Villarrica, caracterizado por un crecimiento urbano acelerado, una marcada dispersión predial vinculada a segundas viviendas y parcelaciones, y una alta estacionalidad turística que incrementa significativamente la población presente en determinados periodos del año.

Este estudio aborda la evacuación peatonal como un escenario crítico para evaluar la capacidad territorial de respuesta ante una emergencia volcánica. No obstante, el objetivo no se limita a este modo de desplazamiento específico, sino que se orienta a la construcción de una metodología de análisis de la capacidad de evacuación, extrapolable a otros medios de transporte. Dicha capacidad se define a partir de la relación entre la estructura vial, la localización y cobertura de los Puntos de Encuentro Transitorios (PET), y la distribución espacial de las viviendas y de la población presente en el territorio.

Para ello, se integran diversas fuentes demográficas y territoriales, entre ellas el Censo 2024, la cartografía predial 2023 del Servicio de Impuestos Internos (SII), la red vial, las zonas de peligro del volcán Villarrica y la localización de los PET. Estas fuentes se articulan mediante un enfoque basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y

técnicas de análisis geoespacial y modelación basada en grafos, con el objetivo de estimar los tiempos de evacuación de la población hacia el punto seguro más cercano.

Los resultados permiten identificar patrones espaciales de accesibilidad, brechas territoriales significativas y sectores donde los tiempos de evacuación se extienden considerablemente, volviéndose de baja viabilidad operativa bajo determinados escenarios. Asimismo, se evidencia que la distribución de los predios y su relación con la estructura vial —en particular la elevada concentración de segundas viviendas en las laderas del volcán Villarrica— constituyen factores clave en el desempeño del proceso de evacuación en territorios caracterizados por una alta variabilidad estacional y una significativa presencia de población flotante.

1. Introducción

Los desastres naturales se han intensificado durante las últimas décadas debido a la urbanización acelerada, el crecimiento poblacional y los efectos del cambio climático, aumentando la exposición de comunidades completas a riesgos de alto impacto ([Yabe, Jones, Rao, González, & Ukkusuri 2022](#)). Este escenario es especialmente crítico en territorios cercanos a volcanes activos, donde centros urbanos densos, infraestructura estratégica y flujos turísticos se desarrollan dentro de radios de afectación directa. A nivel global, se estima que aproximadamente el 21 % de la población urbana mundial reside en ciudades ubicadas a menos de 100 km de un volcán activo del Holoceno, concentrando cerca del 50 % de la población total expuesta a este tipo de amenazas. Esta condición sitúa a las ciudades como unidades territoriales altamente vulnerables frente a erupciones volcánicas y sus efectos asociados, tales como flujos piroclásticos, caída de tefra y lahares ([Meredith, Teng, Jenkins, Hayes, Biass, & Handley 2025](#)). La exposición al riesgo volcánico no depende únicamente de la peligrosidad inherente del fenómeno, sino que está fuertemente condicionada por la forma en que la población se distribuye y se moviliza en el territorio. En contextos urbanos, factores como la densidad habitacional, los patrones de movilidad, la accesibilidad vial y la disponibilidad de transporte privado y público inciden de manera directa en la vulnerabilidad y en los tiempos de evacuación ([Wild, Bebbington, Lindsay, & Charlton 2021](#)). Estas variables condicionan tanto el número de personas afectadas como los tiempos de evacuación, que

pueden aumentar considerablemente ante incertidumbre eruptiva, congestión vial o capacidad limitada de transporte.

Adicionalmente, la literatura reciente ha evidenciado que la exposición urbana a peligros volcánicos no puede ser evaluada únicamente a partir de valores agregados o representaciones simplificadas de la ciudad. Estudios globales muestran que el uso de centroides urbanos, que reflejan la ciudad, subestima significativamente la exposición real, al no capturar la expansión territorial ni la distribución interna de la población, particularmente en los bordes urbanos, que suelen encontrarse más próximos a las fuentes de peligro. Asimismo, se ha observado que ciudades con menor población total pueden presentar proporciones significativamente más altas de población expuesta, lo que incrementa su vulnerabilidad operativa y reduce su capacidad de respuesta y recuperación ([Meredith et al., 2025](#)). Estos hallazgos refuerzan la necesidad de enfoques territoriales de mayor resolución que permitan analizar la exposición desde una perspectiva espacial, funcional y dinámica. Además, durante emergencias, la movilidad humana suele ser altamente no lineal: las personas no siempre siguen rutas óptimas, toman decisiones bajo incertidumbre, se desplazan en múltiples etapas y dependen fuertemente del acceso a información en tiempo real. Estas dinámicas han sido observadas en diversos contextos, como erupciones volcánicas, incendios forestales y huracanes ([Mapa, Sun, Kuligowski, Cova, Lovreglio, & Zhao 2025](#); [Verma, Shen, Benedict, Murray-Tuite, Lee, Ge, & Ukkusuri 2022](#); [Lim Jr, Lim, & Camposano 2022](#)). En paralelo, los avances tecnológicos han permitido una nueva forma de comprender la

movilidad durante desastres mediante el uso de datos de teléfonos móviles, tales como GPS de alta resolución, registros de posicionamiento y datos pasivos de aplicaciones. Estas fuentes permiten estimar desplazamientos reales con gran precisión, observar tiempos y direcciones de evacuación, identificar cuellos de botella y evaluar la capacidad de las rutas. La integración de datos móviles en estudios de riesgo representa un cambio paradigmático en la comprensión de la movilidad humana durante desastres. A diferencia de los métodos tradicionales basados en encuestas o conteos manuales, los datos GPS y de aplicaciones permiten capturar trayectorias reales con alta precisión espacial y temporal, incluso en escalas de minutos o metros ([Yabe et al., 2022](#)). Su capacidad para identificar patrones de movimiento, aglomeraciones, rutas preferentes y variaciones horarias ha demostrado ser fundamental para modelar tiempos de evacuación, anticipar congestiones y evaluar la suficiencia de las rutas disponibles. Además, estos datos permiten distinguir entre residentes permanentes, trabajadores temporales y población flotante, un aspecto clave en ciudades turísticas donde la demanda territorial cambia de forma estacional. Pese a su enorme potencial, el uso de datos móviles también presenta desafíos metodológicos relevantes, como sesgos de representatividad (no toda la población utiliza smartphones), variabilidad en la precisión de los dispositivos, dependencia de proveedores tecnológicos y restricciones asociadas a la privacidad y anonimización de la información. Sin embargo, la literatura coincide en que, si se aplican con rigurosidad, los datos móviles constituyen una herramienta de alto valor para la planificación y simulación de evacuaciones, especialmente en contextos donde los patrones de movilidad son dinámicos y difíciles de capturar mediante métodos

convencionales ([Yabe et al., 2022](#)). En el ámbito del turismo, los datos de movilidad también han permitido medir el impacto dinámico de las erupciones en la actividad económica y en los flujos de visitantes, mostrando que estos pueden cambiar abruptamente y mantenerse alterados durante largos períodos después del evento eruptivo ([Boto-García & Leoni, 2023](#)).

Complementariamente, avances recientes en modelación estadística y geoespacial han desarrollado metodologías para predecir umbrales de actividad volcánica mediante teoría de valores extremos, integrar incertidumbre en la localización de futuros centros eruptivos o estimar tiempos de despeje de evacuación bajo escenarios diversos ([Nguyen, Veraart, Taisne, Tan, & Lallemand 2023; Wild et al., 2021](#)). Estos marcos conceptuales han permitido reconocer que la planificación de evacuaciones requiere combinar geografía del riesgo, dinámica poblacional y movilidad territorial, especialmente en ciudades turísticas donde la población real presente fluctúa de forma significativa.

Como se observa en la literatura reciente, una estrategia particularmente adecuada para el análisis del riesgo y la planificación de evacuaciones en ciudades con alta variabilidad poblacional —como Pucón y Villarrica— es la incorporación de datos de movilidad derivados de teléfonos móviles. Estas fuentes permiten capturar dinámicas espaciales y temporales que difícilmente pueden ser representadas mediante datos censales estáticos, especialmente en territorios turísticos donde la población real presente fluctúa de manera significativa a lo largo del año. No obstante, el uso efectivo de estos datos requiere un

conocimiento detallado del territorio, de su estructura urbana, de las redes de conectividad y de las relaciones funcionales entre áreas residenciales, turísticas y de servicios, de modo de interpretar adecuadamente los patrones de movilidad observados y traducirlos en insumos útiles para la planificación territorial y la gestión del riesgo.

En el contexto chileno, uno de los países con mayor concentración de volcanes activos a nivel mundial, la gestión del riesgo volcánico adquiere una relevancia crítica. Con más de 90 volcanes activos distribuidos a lo largo del territorio, muchos de ellos próximos a centros urbanos y polos turísticos, el país ha enfrentado escenarios de evacuación complejos en eventos recientes. Las erupciones del Chaitén (2008), Villarrica (2015) y Calbuco (2015) evidenciaron la necesidad de evacuar poblaciones bajo condiciones de alta incertidumbre eruptiva, presión temporal y variabilidad significativa en la población expuesta, poniendo de manifiesto la importancia de considerar la distribución territorial, la movilidad y la capacidad de las redes de evacuación en la planificación del riesgo volcánico. En zonas lacustres y altamente turísticas como Pucón y Villarrica, la complejidad de la gestión del riesgo volcánico se intensifica debido a la coexistencia de residentes permanentes, población flotante y visitantes temporales, cuya presencia puede incrementarse de manera abrupta durante la temporada estival. Este fenómeno genera variaciones demográficas extremas en períodos acotados de tiempo, modificando sustancialmente la exposición real de la población al riesgo. Por ejemplo, durante la temporada alta de verano 2025, la comuna de Pucón registró una población flotante total estimada en cerca de 1.750.000 personas, consolidándose como uno de los destinos más

visitados del sur de Chile. Esta cifra contrasta fuertemente con su población residente, estimada en aproximadamente 32.321 habitantes ([Municipalidad de Pucón, 2025](#); [INE, 2024](#)). A esta presión demográfica se suma una configuración territorial compleja, caracterizada por la presencia de lagos, pendientes pronunciadas y corredores viales limitados, lo que restringe las alternativas de desplazamiento y dificulta los procesos de evacuación. Estos factores incrementan la carga operativa sobre los sistemas de respuesta y condicionan de manera crítica los tiempos de evacuación ante un escenario eruptivo.

Estos desafíos plantean exigencias relevantes para los organismos responsables de la gestión del riesgo en Chile, como SENAPRED y SERNAGEOMIN, en cuanto al desarrollo de herramientas capaces de capturar dinámicas reales de movilidad y de comprender cómo la población habita y se desplaza en torno al Volcán Villarrica. En este contexto, el presente proyecto propone integrar enfoques territoriales, demográficos y de movilidad con el objetivo de aportar evidencia cuantitativa en un territorio caracterizado por su alta exposición y marcada estacionalidad poblacional, permitiendo estimar con mayor precisión cuántas personas podrían encontrarse en riesgo y requerir evacuación bajo distintos escenarios eruptivos.

2. Trabajo Relacionado

2.1. Datos móviles para el análisis de población y movilidad humana.

El uso de datos móviles se ha consolidado como una herramienta clave para el análisis de la movilidad humana en contextos de desastres naturales. La creciente penetración de teléfonos inteligentes y la disponibilidad de datos de geolocalización han permitido capturar patrones de desplazamiento con una resolución espacial y temporal significativamente mayor que la ofrecida por fuentes tradicionales, como los registros censales o los Call Detail Records (CDR). En particular, los datos derivados de GPS y aplicaciones móviles permiten observar trayectorias individuales, secuencias de movimiento y micro-comportamientos durante eventos críticos, lo que resulta fundamental para comprender procesos de evacuación reales ([Yabe et al., 2022](#)).

Diversos estudios han demostrado el potencial de estos datos para medir desplazamientos masivos, evaluar accesibilidad a servicios críticos y estimar tiempos efectivos de evacuación antes, durante y después de eventos como terremotos, huracanes, incendios forestales y erupciones volcánicas. En emergencias de rápida evolución, los datos móviles han sido utilizados para reconstruir dinámicas de movilidad altamente no lineales, identificar zonas de congestión y evaluar el desempeño operativo de rutas críticas. Por ejemplo, [Naushirvanov, Elejalde, Kalimeri, Omodei, Karsai, & Ferres \(2025\)](#) analizan los patrones de evacuación asociados a los incendios forestales de Valparaíso de febrero de 2024 utilizando registros anonimizados de telefonía móvil (XDR) provenientes de un operador con cobertura aproximada del 27 % del mercado

nacional. A partir de datos agregados nocturnos de alta resolución temporal, los autores reconstruyen desplazamientos poblacionales antes, durante y después del evento, y evalúan cambios en distancias recorridas, permanencia fuera del hogar y redistribución espacial de la población evacuada. El análisis se apoya en enfoques de modelado causal, combinando diseños de regresión discontinua en el tiempo (RDiT) y diferencias en diferencias (DiD), lo que permite aislar el efecto del incendio sobre la movilidad humana y comparar comportamientos entre población afectada y no afectada, así como entre distintos grupos socioeconómicos. En un contexto distinto, pero metodológicamente convergente, [Boto-García y Leoni \(2023\)](#) utilizaron datos de geolocalización de turistas para evaluar el impacto de la erupción del volcán Cumbre Vieja sobre los flujos turísticos, evidenciando cómo los eventos volcánicos alteran abruptamente la movilidad y la ocupación territorial en destinos altamente visitados.

La cuantificación de población y movilidad a partir de datos móviles implica transformar señales digitales en indicadores territoriales interpretables, lo que requiere metodologías robustas de inferencia espacial y temporal. En este ámbito, la literatura ha desarrollado distintos enfoques para identificar hogares, residentes permanentes, turistas, población flotante y personas en desplazamiento activo, a partir de patrones de permanencia, horarios y recurrencia espacial. Un enfoque ampliamente utilizado es la detección de “hogar” mediante ventanas nocturnas y umbrales de permanencia. En términos metodológicos, [Naushirvanov et al. \(2025\)](#) infieren la localización habitual de los individuos a partir de patrones nocturnos de permanencia (00:00–05:00), identificando como residencia la torre de telecomunicaciones más frecuentemente

utilizada durante múltiples noches en períodos de referencia previos al desastre. Este procedimiento permite detectar de forma conservadora cuándo las personas pasan noches fuera de su residencia durante el proceso de evacuación. Sobre esta base, los autores cuantifican el número de personas desplazadas por zona, analizan variaciones en las distancias recorridas noche a noche y estiman la duración de los desplazamientos forzados. Asimismo, al asignar un perfil socioeconómico aproximado según la zona censal asociada a la residencia inferida, el estudio evidencia diferencias sistemáticas en los patrones de evacuación y retorno, mostrando que los grupos socioeconómicos más bajos presentan desplazamientos más prolongados y salidas más tardías en comparación con los grupos de mayor nivel socioeconómico.

En contextos turísticos, otros estudios han desarrollado estrategias específicas para distinguir visitantes temporales de población residente. [Boto-García et al. \(2023\)](#) adoptan reglas oficiales del INE de España basadas en duración de estadía, ausencia de rutina laboral y patrones espaciales de pernoctación, lo que permite capturar la variabilidad estacional de la población en destinos turísticos. De forma complementaria, investigaciones como la de [Beiró, Bravo, Caro, Cattuto, Ferres, & Graells-Garrido \(2018\)](#) demuestran el potencial de los datos de telefonía móvil de tipo XDR para caracterizar patrones de movilidad intraurbana y vincularlos con la estructura socioeconómica del territorio. A partir de registros anonimizados de dispositivos móviles, los autores infieren la localización residencial mediante patrones recurrentes de permanencia nocturna y asignan perfiles socioeconómicos utilizando percentiles del Índice de Desarrollo Humano (IDH) asociados al lugar de residencia.

Metodológicamente, el estudio combina modelos de segregación y mezcla social, modelos de movilidad tipo gravity estimados mediante modelos lineales generalizados con distribución binomial negativa, y técnicas de clustering basadas en co-visitación, permitiendo analizar flujos reales de desplazamiento y preferencias territoriales más allá de la distancia física. En particular, los autores incorporan medidas de diversidad social (entropía) como factor modulador de la distancia efectiva, mostrando que los desplazamientos urbanos están condicionados tanto por atributos espaciales como socioeconómicos.

Si bien el estudio se desarrolla en un contexto no asociado directamente a desastres, sus aportes metodológicos resultan altamente relevantes para el análisis de movilidad en escenarios de riesgo, al evidenciar cómo los datos móviles permiten observar comportamientos efectivos de la población, capturando heterogeneidades espaciales y sociales que suelen quedar fuera de encuestas post-evento o modelos basados en supuestos homogéneos. No obstante, los autores reconocen limitaciones asociadas a sesgos de representatividad, dependencia de operadores y restricciones de privacidad, aspectos que deben ser considerados en aplicaciones orientadas a la planificación territorial y la gestión del riesgo.

2.2. Patrones de movilidad humana a través de datos con alta resolución temporal

Diversos estudios han analizado cómo se comportan las personas ante situaciones de emergencia, demostrando que la movilidad humana es altamente no lineal y está condicionada por factores psicológicos, comunicacionales y territoriales. [Yabe et al. \(2022\)](#) sintetizan que la movilidad durante desastres suele desarrollarse en fases: shock inicial, salida espontánea, desplazamientos escalonados, congestión y eventual retorno. Este patrón se repite en terremotos, huracanes, incendios forestales y erupciones volcánicas.

En el caso de erupciones, [Lim et al. \(2022\)](#) analizaron la evacuación del volcán Taal en Filipinas, mostrando que las decisiones de salida no ocurren inmediatamente tras una alerta, sino que están moduladas por percepción de riesgo, vínculos familiares, acceso a vehículos y calidad de la información recibida. De manera similar, [Verma et al., \(2022\)](#) estudiaron evacuaciones por huracanes, encontrando que las personas toman decisiones dinámicas según información disponible, experiencias previas y disponibilidad de recursos.

En contextos de incendios forestales, [Mapa et al. \(2025\)](#) demuestran que los individuos no siguen necesariamente rutas óptimas desde el punto de vista del tiempo o la distancia, sino que tienden a optar por trayectorias conocidas y previamente utilizadas. Esta preferencia por rutas familiares puede incrementar de forma significativa los tiempos de

evacuación y generar cuellos de botella inesperados en la red vial, especialmente bajo condiciones de estrés e incertidumbre.

Estudios recientes basados en datos de movilidad de alta frecuencia han aportado evidencia empírica relevante para comprender cómo las personas seleccionan rutas y trayectorias a escalas temporales cortas. [Zhao, Zeng y Yeung \(2021\)](#), a partir de registros de localización capturados a nivel de segundos, demuestran que la movilidad humana de corto plazo puede modelarse adecuadamente mediante un proceso de Markov de primer orden, en el cual la decisión del siguiente desplazamiento depende únicamente de la ubicación actual del individuo.

No obstante, el aporte central de este trabajo no reside en la estructura markoviana en sí, sino en la forma en que se construyen las probabilidades de transición. En el modelo denominado Individual Preferential Transition (IPT), la probabilidad de desplazarse desde una ubicación i hacia una ubicación j está ponderada por la frecuencia histórica con la que ese mismo individuo ha utilizado previamente dicho trayecto específico ($i \rightarrow j$). De este modo, aunque el proceso es markoviano, incorpora memoria espacial a través de una matriz de transiciones dependiente del individuo, que se va reforzando con el uso reiterado de ciertas rutas

En contraste con modelos clásicos como el Individual Preferential Return (IPR), que solo consideran la frecuencia de visita a lugares sin atender al origen del desplazamiento, o el Population Preferential Transition (PPT), basado en flujos agregados a nivel poblacional, el modelo IPT logra reproducir con mayor precisión tanto las trayectorias individuales como las distribuciones colectivas de flujos observadas

empíricamente. Los resultados muestran que las personas tienden a reutilizar un conjunto reducido de trayectorias conocidas, en lugar de explorar constantemente nuevas rutas o seguir recorridos globalmente óptimos.

2.3. Modelos estadísticos para análisis de evacuación

La literatura reciente combina datos móviles con técnicas estadísticas y geoespaciales para predecir flujos de movimiento y tiempos de evacuación. En erupciones volcánicas, [Wild et al.,\(2021\)](#) desarrollan un modelo integrado de exposición espacial y tiempos de despeje para la ciudad de Auckland, combinando densidad poblacional, redes viales y simulación de escenarios eruptivos. Este enfoque permite estimar cuántas personas podrían estar en riesgo según la localización del evento y la capacidad real de evacuación.

Complementariamente, [Nguyen et al., \(2023\)](#) utilizan modelos de valores extremos (EVT) para anticipar umbrales de actividad volcánica, introduciendo una perspectiva estadística avanzada para estimar la probabilidad de erupciones en ventanas temporales relevante.

El uso de modelos gravitacionales de movilidad ha sido ampliamente documentado en la literatura para describir flujos espaciales de población. En particular, [Beiró et al. \(2018\)](#) aplican un modelo de tipo gravity para caracterizar los desplazamientos entre zonas residenciales urbanas y centros comerciales, incorporando atributos socioespaciales

asociados a la composición de sus usuarios. El modelo es estimado mediante un modelo lineal generalizado con distribución binomial negativa.

Finalmente, en situaciones de desastre, los estudios basados en eventos (event study) como el de [Boto-García & Leoni \(2023\)](#) permiten medir el impacto temporal de las erupciones sobre la movilidad y el comportamiento humano. Este tipo de enfoque es útil para comprender cómo evoluciona la demanda territorial antes y después de un evento crítico.

2.4. Grafos para el Análisis de Movilidad y Evacuación

El estudio de la movilidad humana y de los procesos de evacuación ha incorporado de manera creciente los modelos basados en grafos, apoyados en los fundamentos de la ciencia de redes. Esta área, sistematizada por autores como [Albert-László Barabási](#), propone que muchos sistemas del mundo real pueden representarse como redes formadas por nodos y aristas que describen relaciones o interacciones. Bajo este paradigma, las redes de transporte, las rutas de evacuación y los patrones de movimiento humano pueden modelarse como sistemas complejos cuya estructura influye directamente en su eficiencia y vulnerabilidad.

En el contexto de la movilidad territorial, un grafo permite representar el espacio navegable como un conjunto de nodos (intersecciones, puntos de acceso o destinos) conectados mediante aristas que simbolizan vías o trayectorias posibles. La topología resultante describe no solo la conectividad, sino también la accesibilidad, la redundancia

y la capacidad de cada elemento de la red para soportar cargas o interrupciones. Estas propiedades son fundamentales al analizar evacuaciones, donde el tiempo disponible, la congestión y la estructura vial determinan el comportamiento global del sistema.

Barabási destaca que muchos sistemas de movilidad exhiben características de redes libres de escala (scale-free networks), donde unos pocos nodos altamente conectados, o hubs, cumplen un rol crítico en la conectividad global. En escenarios de evacuación, esta propiedad implica que ciertos puntos de acceso o rutas concentrarán la mayor parte de los flujos, volviéndose potencialmente vulnerables al colapso o congestión. La identificación de estos hubs mediante métricas como centralidad de grado, betweenness o closeness es esencial para diseñar estrategias más robustas de evacuación y manejo de emergencias.

A nivel metodológico, la ciencia de redes incorpora modelos ponderados, donde las aristas no solo representan conexiones, sino también costos asociados como distancia, tiempo de viaje, capacidad vial o número de personas desplazándose. Este tipo de grafos ponderados resulta especialmente útil en evacuaciones volcánicas, donde los tiempos de desplazamiento y la acumulación de individuos en determinadas rutas pueden significar diferencias críticas en el éxito del desplazamiento.

3. Hipótesis y Objetivos

Las comunas de Pucón y Villarrica se emplazan en un territorio de alta amenaza volcánica, caracterizado por una fuerte dependencia de la red vial para los procesos de evacuación y por una marcada variabilidad estacional en la ocupación del territorio.

Si bien los instrumentos oficiales de planificación del riesgo se basan principalmente en estimaciones de población residente, la presencia de población flotante asociada al turismo, segundas viviendas y actividades estacionales genera incrementos significativos de población en determinados periodos del año. Esta condición tensiona la infraestructura vial disponible, la cobertura de los Puntos de Encuentro Transitorios (PET) y, en consecuencia, la capacidad efectiva de evacuación del territorio.

En este contexto, la evaluación de la criticidad de evacuación requiere considerar no solo la amenaza volcánica, sino también la estructura territorial, la accesibilidad vial y la variabilidad estacional de la ocupación poblacional.

3.1. Hipótesis General

La hipótesis central de este estudio sostiene que la criticidad de evacuación peatonal en el entorno del Volcán Villarrica está fuertemente condicionada por la estructura territorial, la accesibilidad a la red vial y la distribución espacial de los Puntos de Encuentro Transitorios (PET), generando diferencias significativas en la capacidad de evacuación entre sectores del territorio.

Se plantea que, incluso bajo supuestos operativos favorables y escenarios de alerta temprana, existen áreas donde los tiempos de evacuación resultan temporalmente inviables, especialmente en zonas con menor conectividad vial, mayores distancias a los PET y una alta concentración de viviendas en sectores de mayor exposición volcánica.

Asimismo, se sostiene que los incrementos estacionales de población flotante asociados a segundas viviendas, turismo y ocupación estacional, intensifican la criticidad de evacuación, al aumentar la carga poblacional en áreas con limitaciones estructurales de accesibilidad, profundizando las desigualdades territoriales en la capacidad de respuesta ante una emergencia volcánica.

3.2. Objetivo General

Evaluar la capacidad de evacuación peatonal del territorio en el entorno del Volcán Villarrica, analizando cómo la estructura territorial, la accesibilidad a la red vial y la distribución espacial de la población condicionan la viabilidad temporal del proceso de evacuación, e identificando sectores críticos cuya situación podría verse potencialmente agravada por incrementos estacionales de la carga poblacional.

3.3. Ojetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos, organizados según las principales dimensiones de análisis del estudio:

Caracterizar la distribución territorial de predios y población

Caracterizar la distribución espacial de los predios habitacionales y de la población residente en las comunas de Pucón y Villarrica, incorporando la estratificación etaria de la población, con el fin de identificar patrones de ocupación urbana y rural, niveles de dispersión territorial y diferencias relevantes entre sectores. Esta caracterización permite establecer una base demográfica y espacial para el análisis de la evacuación, considerando que la estructura etaria condiciona las velocidades de desplazamiento peatonal y, por ende, los tiempos efectivos de evacuación, especialmente en territorios con alta complejidad topográfica y accesibilidad vial limitada.

Evaluar el desempeño territorial de la red vial

Evaluar el desempeño de la red vial como estructura fundamental del proceso de evacuación peatonal, analizando su influencia en los tiempos de evacuación e identificando recorridos críticos, tramos con mayor incidencia en la duración del desplazamiento y condiciones estructurales que limitan la accesibilidad, con el fin de distinguir entre criticidad estructural y criticidad local en el territorio.

Definir un procedimiento de estimación de población efectiva en periodos de alta estacionalidad

Definir un procedimiento metodológico para estimar la población efectiva presente en el territorio durante períodos de alta estacionalidad, a partir de la integración de información censal sobre población residente y tipología habitacional, incluyendo la identificación de segundas viviendas desocupadas en el CENSO. Este enfoque permite aproximar un factor de ajuste poblacional que represente el incremento estacional de ocupación territorial y proyectar, de manera agregada, la carga real de evacuación bajo escenarios de máxima demanda.

Modelar un escenario operativo de evacuación peatonal

Modelar un escenario operativo de evacuación peatonal hacia los Puntos de Encuentro Transitorios más cercanos, estimando el tiempo total de evacuación desde cada predio a partir del análisis de la accesibilidad a la red vial y de los recorridos por dicha red, y evaluando la viabilidad temporal del proceso en función de un umbral operativo previamente definido.

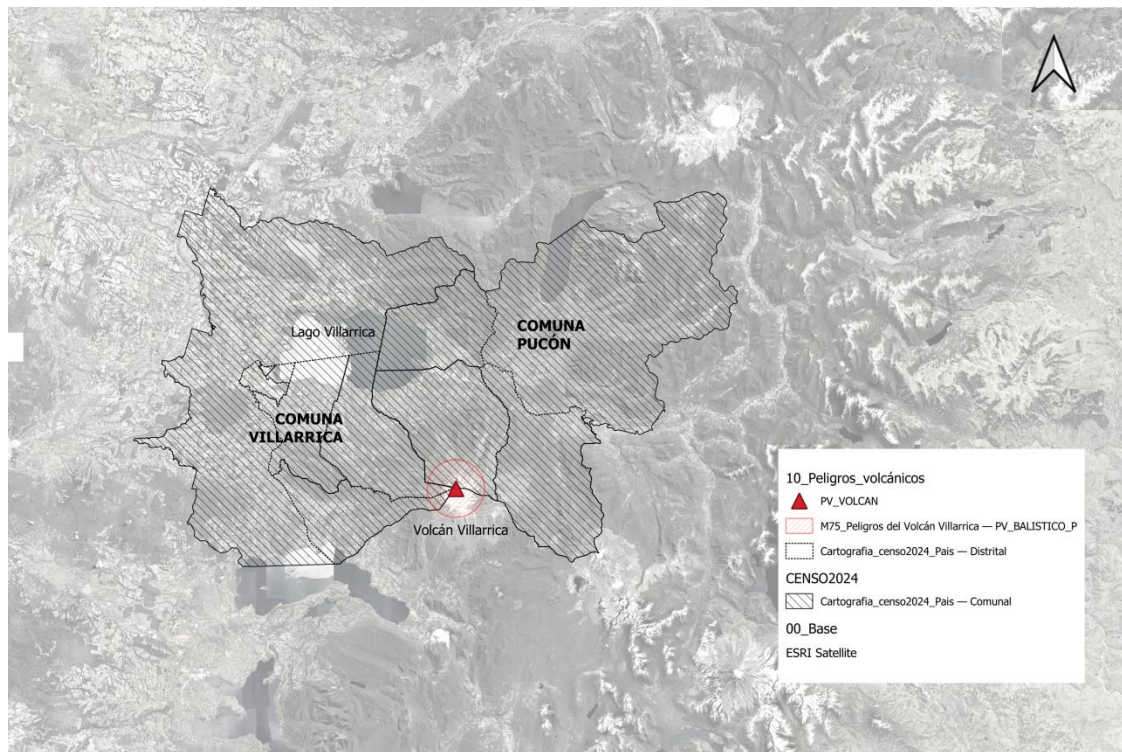
Analizar la relación entre ocupación territorial y zonas de amenaza volcánica

Analizar la localización de los predios y de la población residente en relación con las zonas de amenaza volcánica definidas por los organismos oficiales, evaluando el grado de exposición territorial y permitiendo identificar sectores prioritarios desde el punto de vista del riesgo.

4. Datos

El área de estudio corresponde a las comunas de Pucón y Villarrica, ubicadas en la provincia de Cautín, Región de La Araucanía, Chile, en el entorno inmediato del Volcán Villarrica, uno de los volcanes activos más relevantes del país. Ambas comunas se encuentran expuestas a amenazas volcánicas directas y presentan una configuración territorial compleja, caracterizada por una combinación de áreas urbanas, sectores rurales extensos y asentamientos dispersos, junto a una marcada estacionalidad poblacional asociada al turismo y a la presencia significativa de segundas viviendas.

Figura 1. Delimitación comunal de Pucón y Villarrica.



A escala territorial, gran parte de la población se distribuye en un corredor longitudinal que se desarrolla entre el Lago Villarrica y las laderas del volcán (Figura 1), configurando un patrón de ocupación prácticamente encajonado entre ambos elementos naturales. De manera general, el lago actúa como barrera física hacia el norte, mientras que el volcán y su zona de influencia condicionan la ocupación y los desplazamientos hacia el sur, generando una estructura territorial lineal con corredores viales limitados y una alta dependencia de rutas específicas para la evacuación.

Dadas estas características, resulta fundamental contar con una representación espacial detallada de la ocupación territorial que permita analizar de manera realista la accesibilidad, los tiempos de desplazamiento y la carga potencial de evacuación bajo distintos escenarios. En este contexto, el análisis se estructuró a partir de la construcción de capas de ocupación territorial diferenciadas, orientadas a capturar tanto la población residente permanente como el impacto de la población flotante asociada a la estacionalidad turística.

En una primera etapa, se construyó una capa base de ocupación territorial asociada a la población residente, caracterizada a un alto nivel de detalle espacial. Esta capa integra información sobre la localización de las viviendas, el número de viviendas, la cantidad de hogares y la población residente estratificada por tramos etarios, permitiendo representar de manera precisa la distribución efectiva de personas en el territorio bajo condiciones habituales. Esta base constituye el soporte espacial principal para los

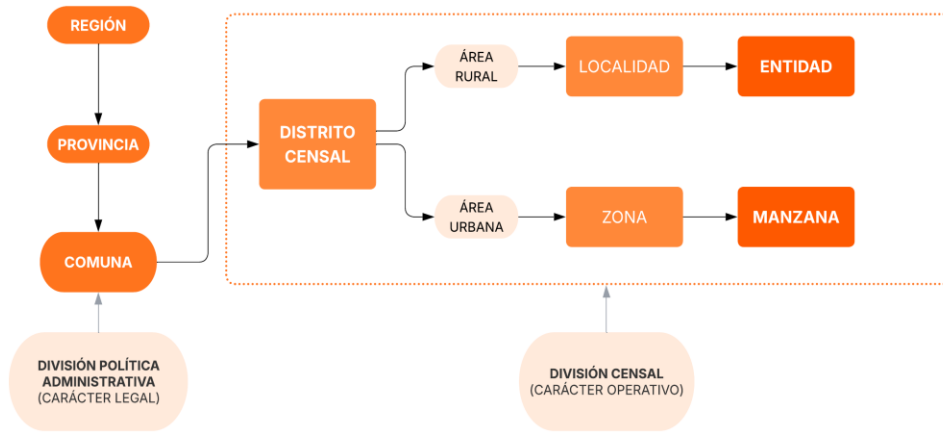
análisis posteriores de accesibilidad a la red vial, estimación de tiempos de evacuación peatonal y evaluación de la criticidad territorial.

4.1. Datos CENSO (INE, 2024)

El Censo de Población y Vivienda 2024 del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) constituye la principal fuente demográfica oficial utilizada para caracterizar la población residente en el área de estudio. Esta información proporciona el marco base para estimar la población potencialmente expuesta ante una eventual erupción del volcán Villarrica y para contextualizar los patrones de ocupación territorial en las comunas de Pucón y Villarrica.

La Figura 2 ilustra la estructura jerárquica de la división político-administrativa y censal utilizada en Chile, diferenciando explícitamente entre unidades de carácter legal-administrativo y unidades de carácter operativo-censal, que constituyen la base para la producción y el análisis de información demográfica. Desde el punto de vista político-administrativo, el territorio nacional se organiza jerárquicamente en regiones, provincias y comunas, las cuales corresponden a unidades de delimitación legal y administrativa. Estas unidades definen competencias institucionales y administrativas, pero no siempre resultan adecuadas para el análisis detallado de la distribución espacial de la población ni para la modelación de procesos territoriales a escala fina.

Figura 2. Esquema de la estructura político-administrativa y censal en Chile.



Con fines estadísticos y operativos, el Censo introduce una división censal, cuya unidad base es el distrito censal, contenido dentro de cada comuna. El distrito censal constituye una unidad intermedia que permite organizar el levantamiento de información y estructurar el territorio según criterios de continuidad espacial. A partir del distrito censal, el territorio se subdivide en áreas urbanas y áreas rurales, las cuales responden a diferencias funcionales y morfológicas del asentamiento humano.

En áreas urbanas, los datos se visualizan a partir de zonas - manzanas. La manzana censal agrupa un conjunto de predios contiguos delimitados por vías y constituye la unidad básica para la asignación detallada de viviendas, hogares y población. En áreas rurales, en cambio, el distrito censal se subdivide en localidades – entidades. Las entidades corresponden a unidades espaciales de mayor extensión que las manzanas, generalmente asociadas a asentamientos dispersos, sectores rurales, áreas de parcelación o agrupaciones de viviendas no continuas. Debido a su mayor tamaño y heterogeneidad

interna, las entidades no permiten representar con la misma precisión la localización efectiva de las viviendas ni la distribución de la población en el territorio.

De acuerdo con los datos del Censo de Población y Vivienda 2024 (Tabla 1), la comuna de Villarrica registra una población de 67.737 habitantes distribuidos en una superficie comunal de 1.291 km², lo que corresponde a una densidad aproximada de 52,5 habitantes por km². Por su parte, la comuna de Pucón cuenta con una población residente de 32.321 habitantes y una superficie total de 1.249 km², alcanzando una densidad aproximada de 25,9 habitantes por km².

Tabla 1. *Indicadores principales CENSO 2024, datos del INE.*

Parámetros	Villarrica	Pucón
Población censada	67.737	32.321
Hombres	32.807	15.767
Mujeres	34.930	16.554
0 a 14 años	13.190	6.183
15 a 64 años	44.700	21.784
65 años o más	9.847	4.354
Viviendas censadas	43.229	28.770
Hogares censados	25.155	12.548
Viviendas particulares ocupadas	28.128	13.477
Viviendas particulares desocupadas	15.085	15.279
Viviendas colectivas	16	14
Promedio de hogares por vivienda particular	1,0	1,0
Promedio de personas por hogar	2,7	2,6
% hogares unipersonales	22,5%	25,2%
% hogares con niños/as	34,5%	32,9%
% hogares de adulto mayor	13,6%	12,4%

La comuna de Villarrica se divide en doce distritos censales y por su parte, la comuna de Pucón se organiza en seis distritos censales (Figura 3 y Tabla 2).

Figura 3. Delimitación distrital de Villarrica y Pucón.

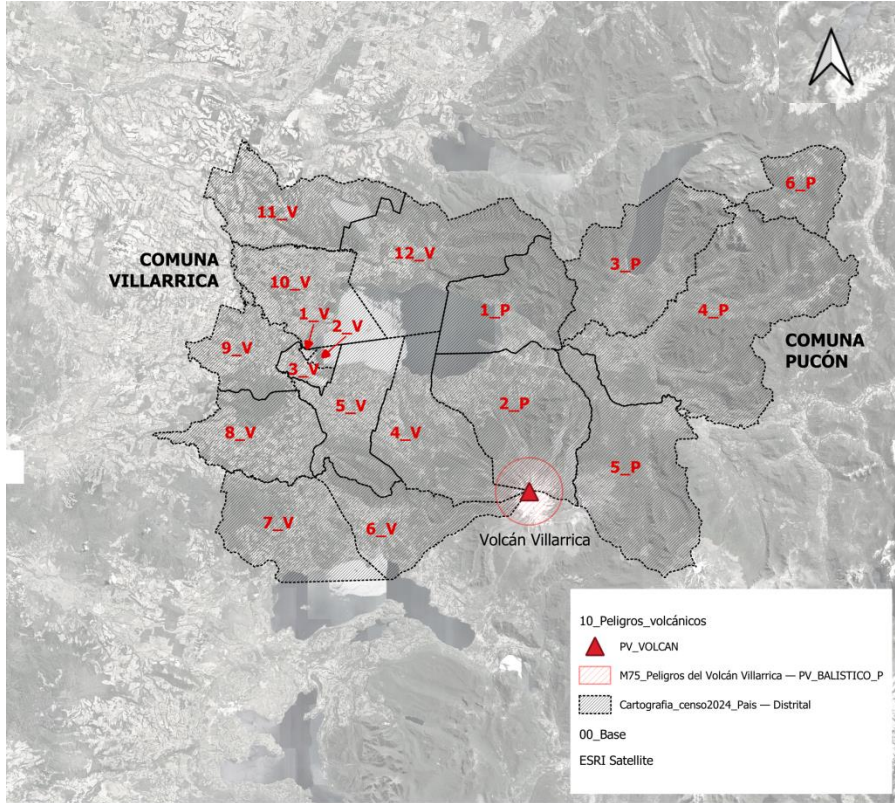


Tabla 2. Distritos Censales comuna Villarrica y Pucón.

	Villarrica	Pucón	
Plaza	1_V	1_P	La Península
Playa Pucará	2_V	2_P	Cementerio
Estación	3_V	3_P	Caburgua
Locotraro	4_V	4_P	Collado
Conquil	5_V	5_P	Palguín
Licán Ray	6_V	6_P	Termas de Río Blanco
Chesque	7_V		
Relún	8_V		
Voipir	9_V		
Pedregoso	10_V		
Huilililún Poniente	11_V		
Huilililún Oriente	12_V		

A partir de esta delimitación, el estudio no considera la totalidad de los distritos de ambas comunas, sino que prioriza aquellos distritos cuya localización presenta una condición de mayor criticidad frente a una eventual erupción del volcán Villarrica (Figura 4 y Figura 5). En particular, se seleccionan los distritos que concentran población asentada en las laderas del volcán y en sectores con exposición directa a las zonas oficiales de peligro volcánico, donde los tiempos de evacuación, la accesibilidad a la red vial y la disponibilidad de rutas de escape resultan más restrictivas.

Figura 4. Delimitación polígono de análisis.

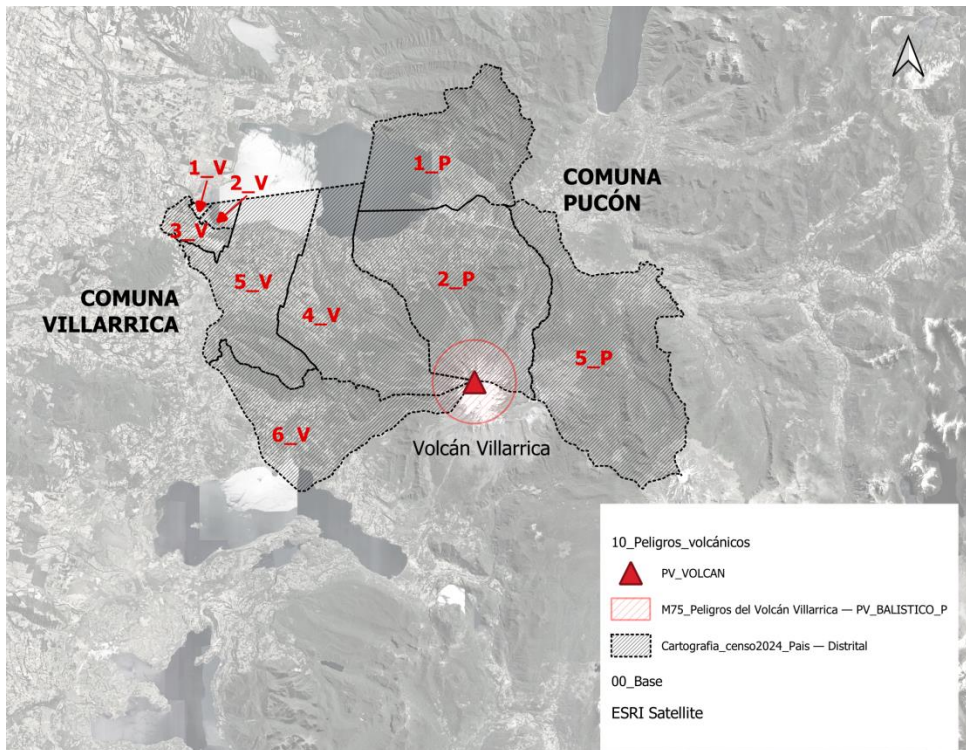
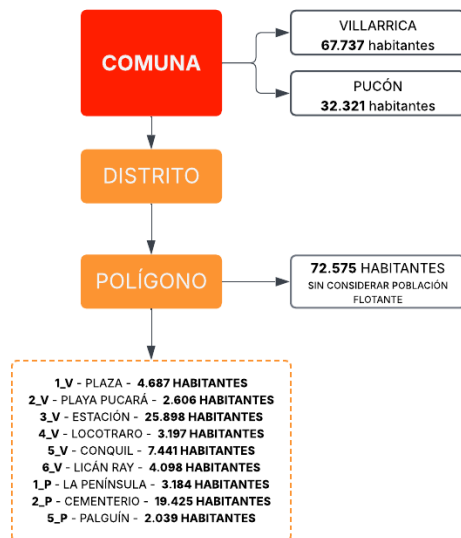


Figura 5. Distribución de población en polígono según distritos.



El conjunto de distritos seleccionados - (1_P) La Península, (2_P) Cementerio, (3_P) Caburgua, (5_P) Palgüín, (1_V) Plaza, (2_V) Playa Pucará, (3_V) Estación, (4_V) Locotroaro, (5_V) Conquil y (6_V) Licán Ray - definen el ámbito espacial efectivo de la investigación. Dentro de estos distritos, la información se organiza en dos niveles espaciales con distinta granularidad (Figura 6), manzanas y entidades censales.

En total, el área de estudio comprende 1.056 manzanas censales, distribuidas principalmente en los sectores urbanos y lacustres de Pucón, Villarrica y Licán Ray. En contraste, las áreas rurales de ambas comunas se encuentran representadas por 195 entidades censales, las cuales abarcan superficies extensas y presentan una estructura interna altamente heterogénea en términos de ocupación y localización de viviendas (Tabla 3).

Figura 6. Distribución espacial de manzanas y entidades, dentro del polígono de análisis.

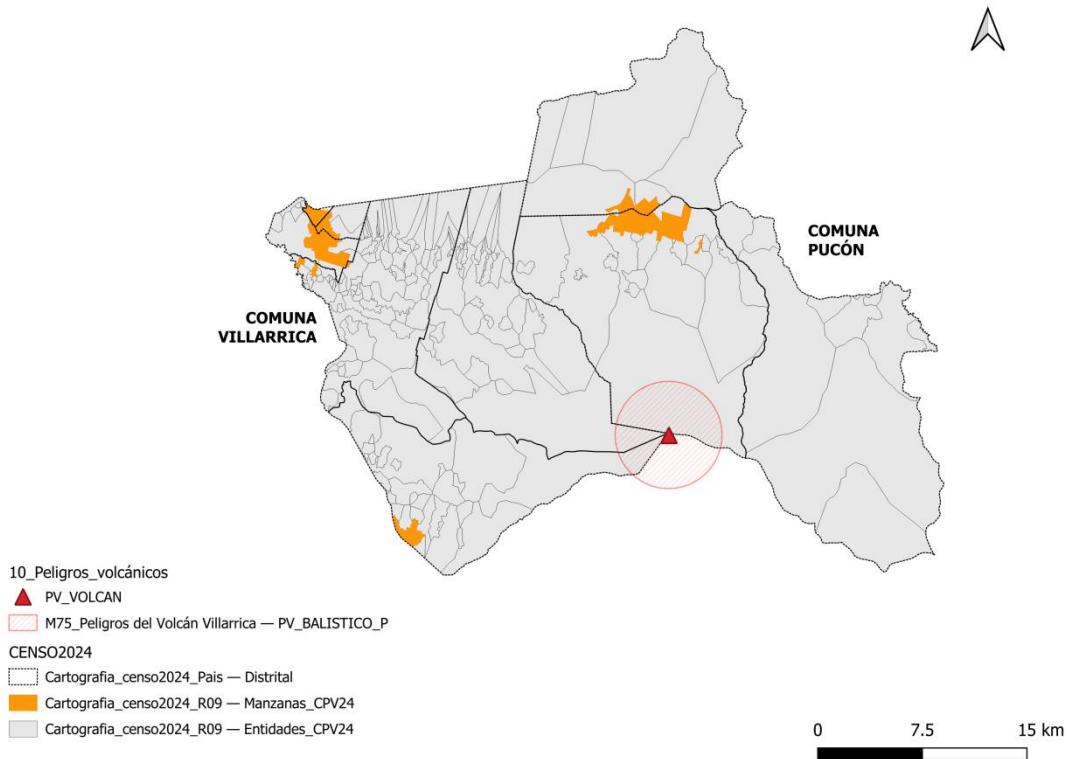


Tabla 3. Centroides y su distribución en el territorio.

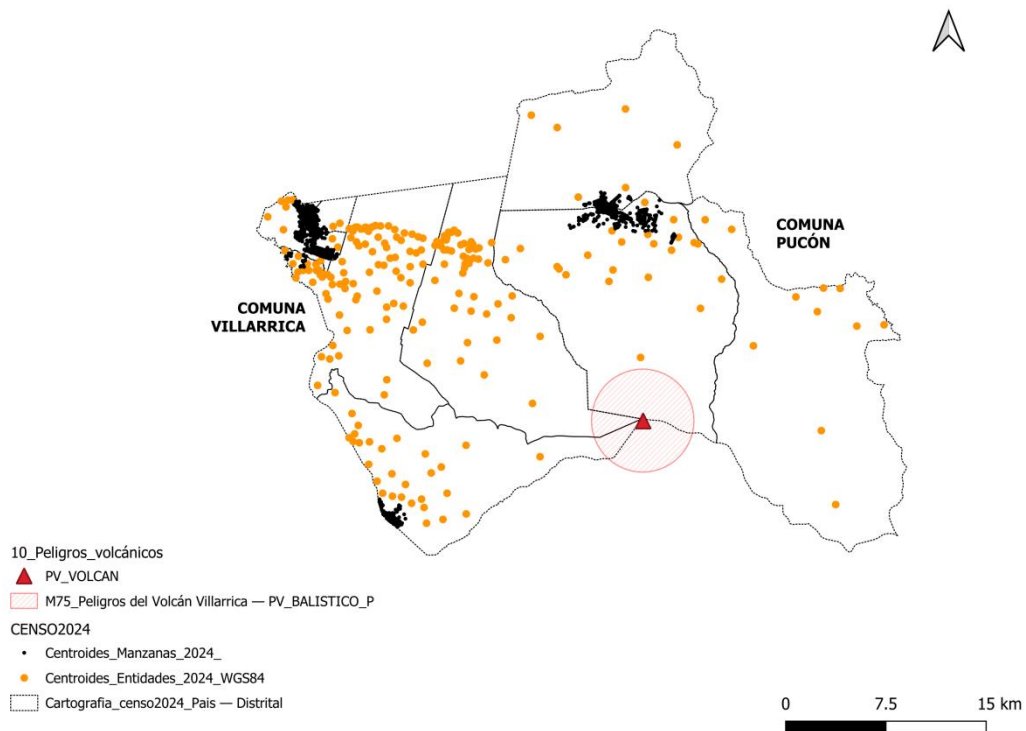
Parámetros Iniciales	Villarrica	Pucón	Total
Centroides - Entidades	159	36	195
Centroides - Manzanas	688	368	1056

Esta diferencia en la escala de representación evidencia una brecha significativa de granularidad espacial entre ambos tipos de unidades. Mientras las manzanas permiten una localización relativamente precisa de la población y de las viviendas en el tejido urbano, las entidades rurales concentran información demográfica agregada sobre áreas amplias, sin reflejar adecuadamente la distribución real y dispersa de las viviendas en el

territorio. Dicha asimetría constituye una limitación relevante para el análisis de evacuación.

Con el fin de habilitar el análisis espacial y el cálculo posterior de distancias y tiempos de evacuación, tanto las manzanas como las entidades censales fueron transformadas en centroides geométricos (Figura 7), los cuales actúan como puntos representativos de cada unidad territorial. Esta conversión permite geolocalizar cada unidad en el territorio, facilitar su integración con la red vial y establecer nodos de origen para la modelación de los desplazamientos peatonales.

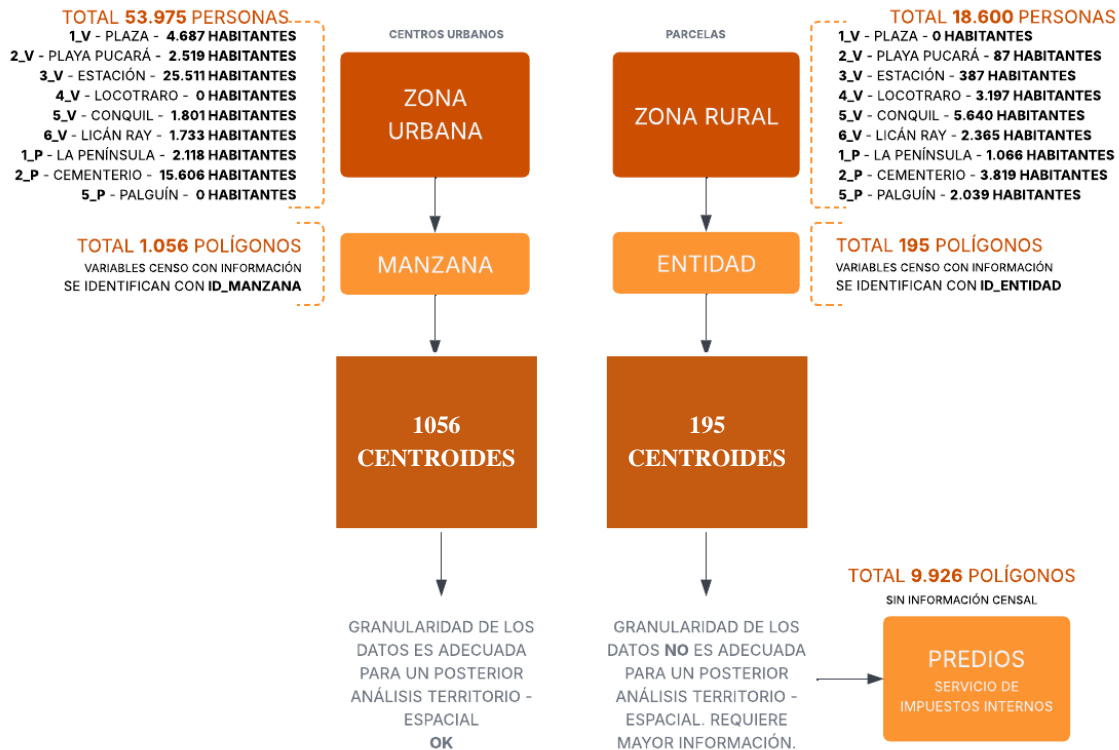
Figura 7. Distribución espacial de centroides - manzanas y entidades, dentro del polígono de análisis.



En resumen, la Figura 8 muestra el proceso de desagregación de la información censal desde polígonos urbanos (1.056 manzanas) y rurales (195 entidades) hacia centroides, permitiendo representar espacialmente a 1.251 unidades habitacionales con información demográfica asociada. Este procedimiento genera 1.056 centroides urbanos que representan a 53.975 personas y 195 centroides rurales que concentran a 18.600 personas.

En el caso de las entidades rurales, la incorporación posterior de 9.926 predios sin información censal —provenientes del Servicio de Impuestos Internos— se aborda en el capítulo siguiente, con el objetivo de completar la representación territorial de las viviendas y mejorar la estimación de la población expuesta.

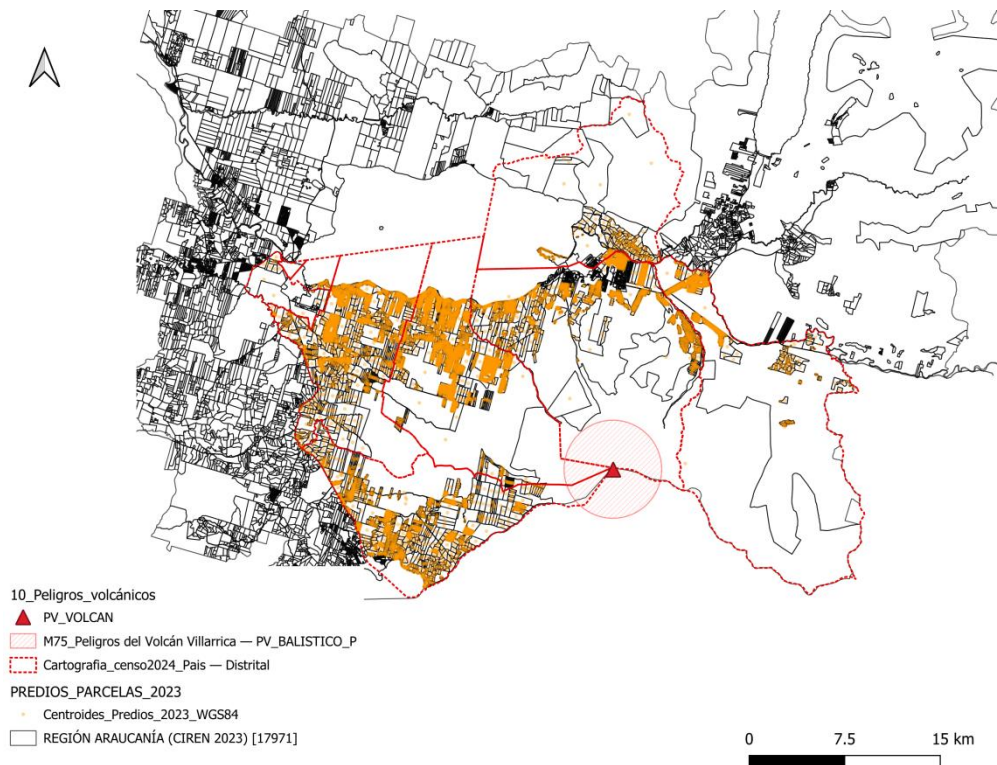
Figura 8. Esquema de desagregación territorial y generación de centroides censales.



4.2. Datos cartografía predial (SII–CIREN, 2023)

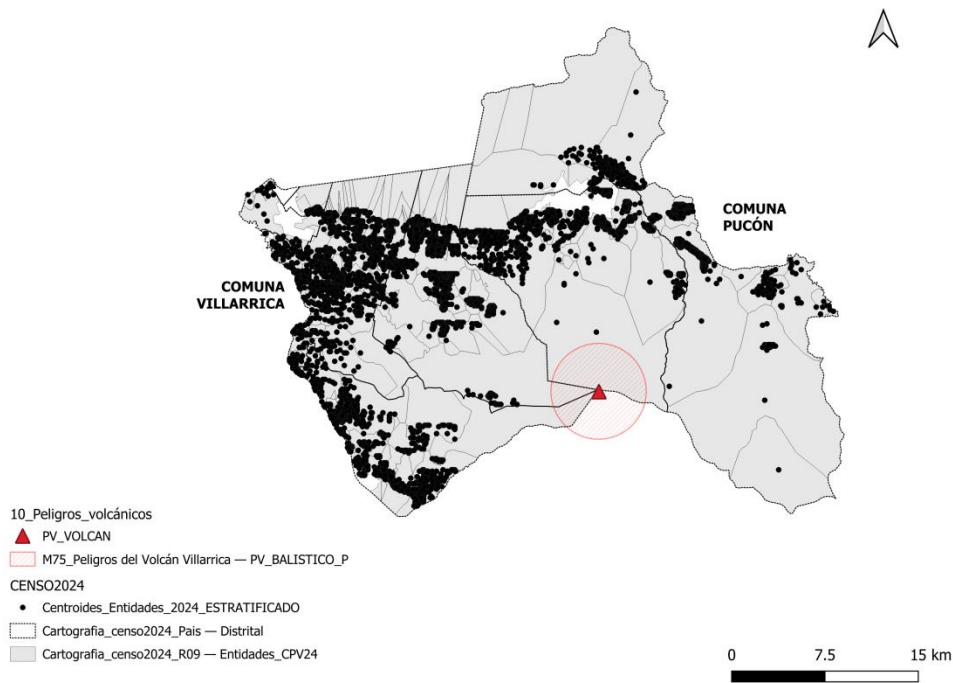
Dado que las entidades censales rurales constituyen unidades territoriales extensas y de baja granularidad espacial, su uso directo limita la capacidad de representar adecuadamente la localización efectiva de las viviendas. Para superar esta limitación, se incorporó información de cartografía predial proveniente del Servicio de Impuestos Internos (SII), procesada por CIREN (2023), la cual entrega la localización georreferenciada de los predios a escala parcelaria (Figura 9).

Figura 9. Cartografía predial SII – CIREN 2023.



La capa permite identificar cada predio individual mediante su rol único, geometría y ubicación geoespacial precisa. Al superponer esta cartografía con los polígonos de entidades (Figura 10), fue posible cuantificar el número total de predios por entidad, reconocer patrones de ocupación dispersa y caracterizar sectores donde la urbanización adopta formas que no son capturadas adecuadamente por el Censo, tales como condominios rurales, loteos de baja densidad, parcelas de agrado y segundas viviendas asociadas a la actividad turística.

Figura 10. Superposición de predios por cada entidad.

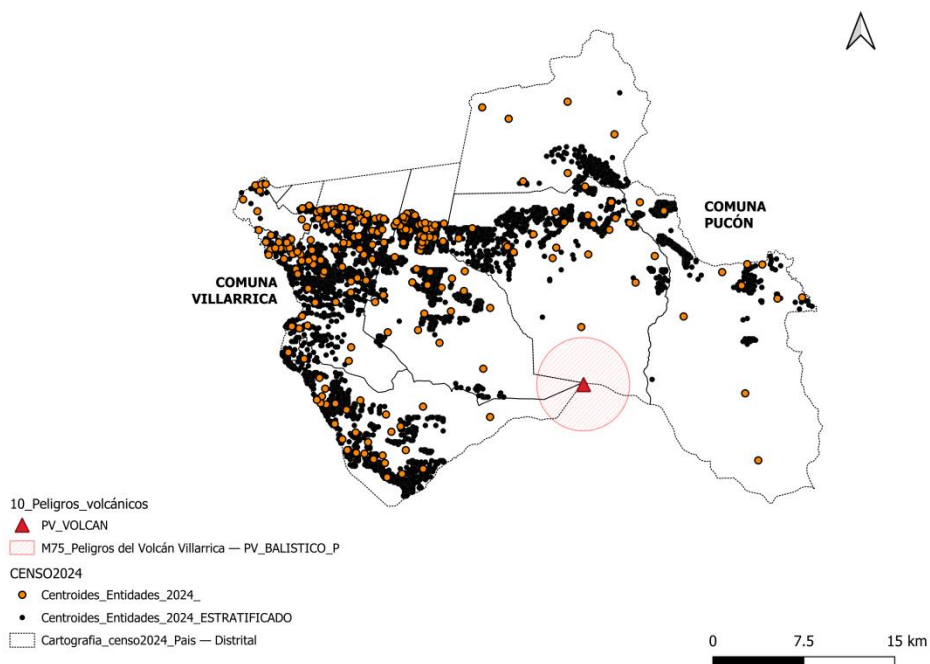


Cabe destacar que la información predial del SII no distingue el uso efectivo de cada vivienda ni la presencia permanente de población. Por esta razón, los predios no son utilizados para asignar población residente de forma directa, sino que actúan como

soporte espacial para la redistribución de la información censal y, posteriormente, para la incorporación de estimaciones de población flotante en escenarios de alta estacionalidad.

Esta capa predial fue utilizada como soporte espacial para redistribuir la información censal originalmente asociada a cada entidad, permitiendo desagregar los datos agregados del CENSO hacia unidades territoriales más precisas (Figura 11). En particular, la totalidad de la información censal disponible a nivel de entidad — incluyendo número de viviendas, hogares y personas, así como su composición por rangos etarios— fue redistribuida y geometrizada a centroides entre los predios contenidos dentro de cada entidad censal correspondiente. *Ver Anexo 1, 2 y 3 para revisión del código de redistribución espacial.*

Figura 11. Definición de predios por cada entidad y su redistribución espacial.



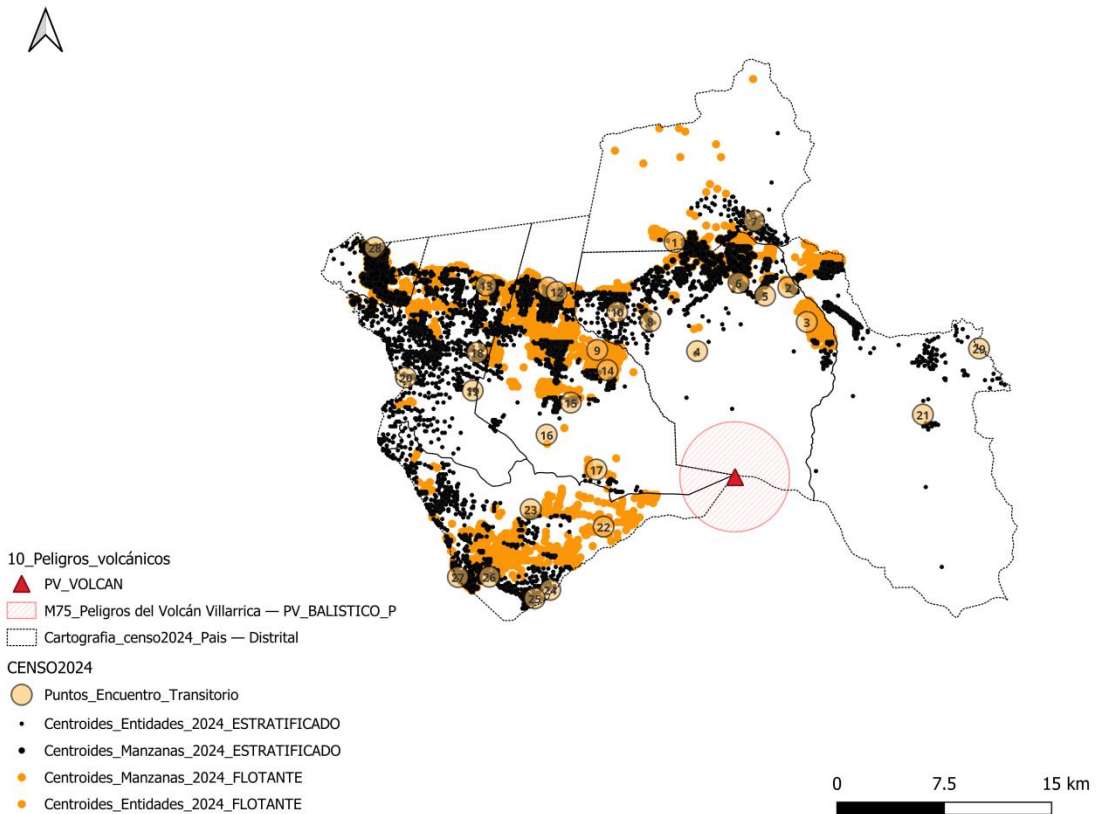
4.3. Datos población flotante (Consolidación datos CENSO, 2024 y SII – CIREN, 2023)

La base de datos territorial integrada (Figura 12) dio origen a dos capas principales de información, ambas expresadas mediante centroides georreferenciados, que constituyen la base para la posterior modelación de la evacuación peatonal: (1) Población Residente y (2) Población Flotante.

La primera capa incorpora manzanas y entidades, y contiene información detallada sobre la localización de las viviendas particulares ocupadas, en la cual cada registro representa una vivienda individual con atributos asociados a su origen, localización geográfica, número de hogares, personas y composición etaria identificando explícitamente la presencia de niños (0–14 años) y hogares de adultos mayores (65 años o más).

La segunda capa corresponde a la ocupación potencial asociada a segundas viviendas, identificadas a partir de la información censal de viviendas no ocupadas, segundas residencias y viviendas no particulares. En esta capa, los centroides representan exclusivamente la localización espacial de las viviendas, sin incorporar inicialmente información de hogares ni personas. Esta capa actúa como soporte territorial para la posterior incorporación de estimaciones de población flotante en escenarios de alta estacionalidad.

Figura 12. Distribución de población en el polígono, diferenciando residentes vs flotante.



La consolidación de ambas bases de datos, incluye las variables que se detallan en la Tabla 4, lo que posteriormente se utilizará para modelación y cuantificación de la población ante una eventual evacuación.

Se desarrolló un procedimiento de redistribución que permitió replicar cada unidad territorial (ID_MANZANA y ID_ENTIDAD) tantas veces como viviendas ocupadas registraba, generando así un conjunto de centroides equivalentes a las viviendas individuales.

Tabla 4. Descripción de variables utilizadas en dataset población residente y flotante.

Descripción de variables	
fid	Corresponde al número que representa cada figura geométrica (centroide)
TERRITORIO	Corresponde al distrito censal, la letra indica si corresponde a Villarrica o Pucón
COD_DISTRI	Corresponde al distrito censal, el número
ID	Corresponde a la identificación de la manzana o entidad, no es único ya que se duplican
N_PER	Corresponde al total de personas por cada distrito
N_HOG_TOTA	Corresponde al total de hogares por cada distrito
N_HOG	Corresponde al total de hogares por cada distrito, que puede tener un niño menor de 15 años o más de 1 adulto entre 15 y 64 años
N_HOG_UNIP	Corresponde al total de hogares por cada distrito, que se compone solo de 1 persona adulta entre 15 y 64 años
N_HOG_60	Corresponde al total de hogares por cada distrito, que se compone solo de adultos mayores sobre 65 años
N_HOG_MENO	Corresponde al total de N_HOG que tienen al menos un niño menor de 15 años
N_VP	Corresponde al total de viviendas particulares
N_VP_OCUPA	Corresponde al total de viviendas particulares ocupadas
N_VP_DESOC	Corresponde al total de viviendas particulares desocupadas
LATITUD	Corresponde a la coordenada geográfica
LONGITUD	Corresponde a la coordenada geográfica
ORIGEN	Corresponde al origen del centroide en relación al CENSO: manzana o entidad
EVAC_VEL	Corresponde a la velocidad con la que caminan las personas que corresponden a ese centroide

Sobre cada una de estas réplicas se distribuyeron los hogares, las personas y las tipologías de hogar, asegurando que los totales finales por manzana y entidad coincidieran exactamente con los valores originales del Censo (Tabla 5 y Tabla 6).

Este procedimiento se documenta en detalle en el Anexo 4 y 5, donde se describen las reglas de replicación y asignación utilizadas.

Tabla 5. Resumen distribución espacial (1) población residente existente.

POBLACIÓN RESIDENTE											
TERRITORI O	CENTR OIDES	PERS	N_HOG _TOTA	N_HO G	N_HOG _UNIP	N_HOG_ 60	N_HOG _MENO	N_VP	EVAC _1.88	EVAC _2.88	EVAC_ 4.68
1_P	1341	3184	1885	1293	353	239	400	1341	239	377	725
1_V	1872	4687	2725	1796	500	429	451	1872	429	422	1021
2_P	7912	19425	10548	7498	1888	1162	2533	7912	1162	2393	4357
2_V	1283	2606	1828	1144	373	311	257	1283	311	235	737
3_V	10767	25898	12832	9414	2171	1247	3682	10767	1247	3601	5919
4_V	1415	3197	1885	1256	300	329	377	1415	329	124	962
5_P	862	2039	1012	732	142	138	275	862	138	237	487
5_V	3026	7441	3703	2684	511	508	1009	3026	508	824	1694
6_V	1737	4098	2341	1576	392	373	453	1737	373	319	1045
	30215	72575	38759	27393	6630	4736	9437	30215	4736	8532	16947

Tabla 6. Resumen distribución espacial de una posible (2) población flotante.

TERRITORI O	CENTR OIDES	N_VP
1_P	2382	2382
1_V	481	481
2_P	8577	8577
2_V	1096	1096
3_V	1591	1591
4_V	2578	2578
5_P	716	716
5_V	2062	2062
6_V	3528	3528
	23011	23011

Sobre esta base se definió la velocidad de evacuación peatonal asignada a cada vivienda (Figura 13 y 14), bajo el supuesto de peor caso operativo: si en una vivienda existe al menos un niño o corresponde a vivienda de adulto mayor, se asume que todos sus ocupantes evacúan a la velocidad correspondiente al grupo más lento presente en el hogar. En particular, se utilizaron tres tramos de velocidad de desplazamiento peatonal (i) 1,8 km/h para viviendas correspondientes a adulto mayor (65 años o más), (ii) 2,88 km/h para viviendas con presencia de niños (0–14 años) y sin adultos mayores, y (iii) 4,68 km/h para viviendas compuestas exclusivamente por población adulta (entre 15 y 64 años).

Figura 13. Estratificación en tramos etarios para centroides - manzanas.

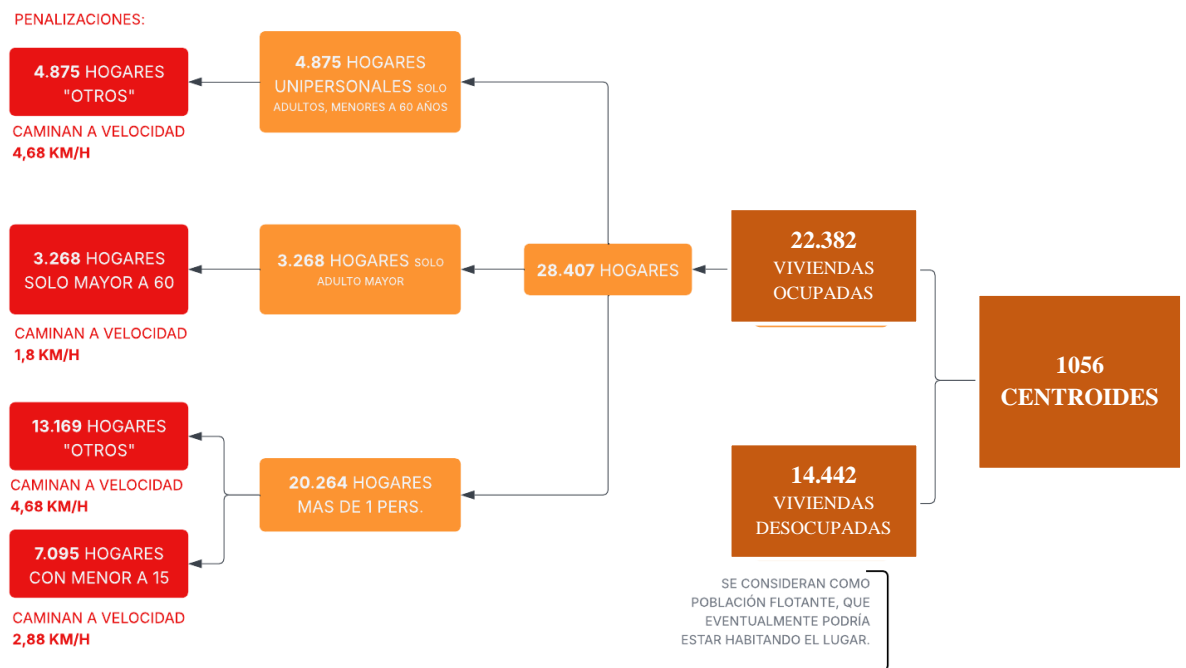
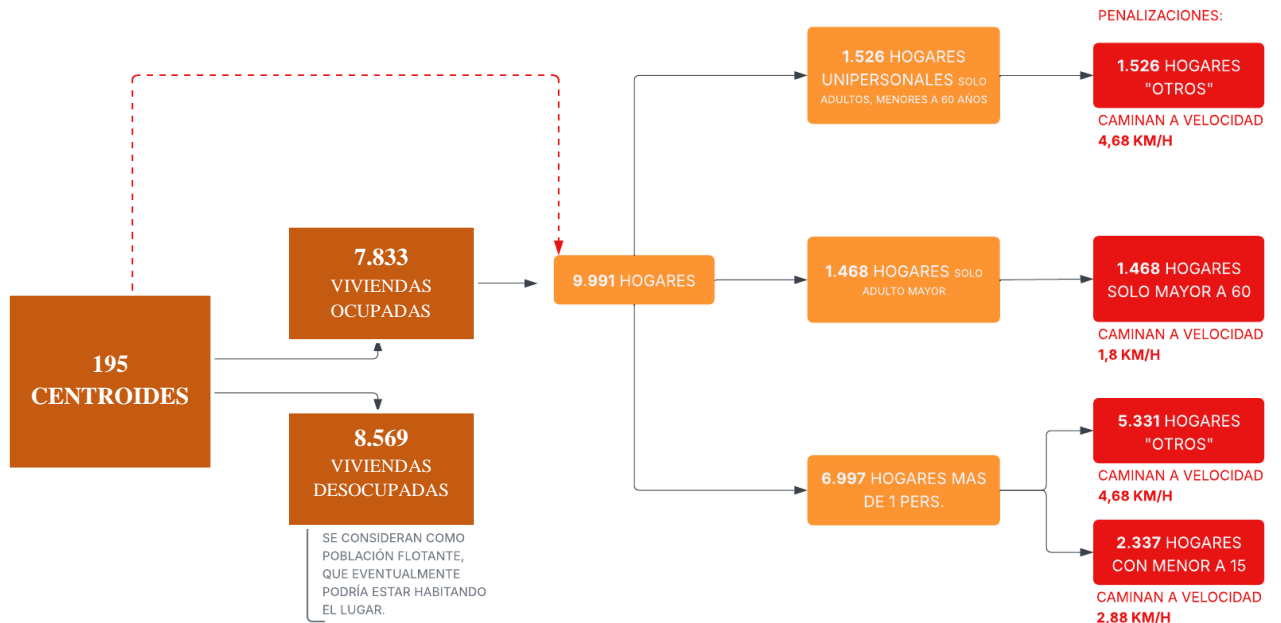


Figura 14. Estratificación en tramos etarios para centroides – entidades + redistribución predios.



Esta estratificación permitió incorporar explícitamente las diferencias de movilidad asociadas a la composición etaria de los hogares, condición crítica para la estimación realista de tiempos de evacuación.

4.4. Datos red vial (MOP, 2024)

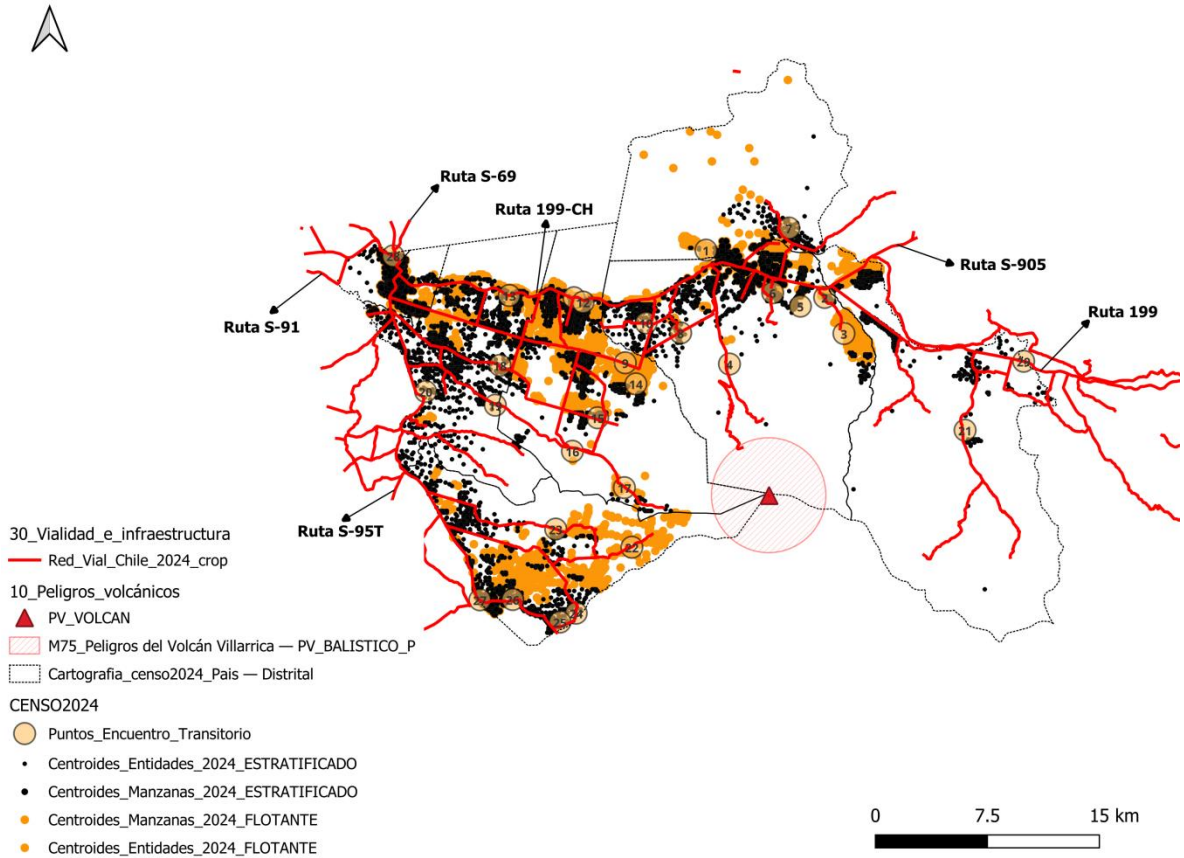
Para caracterizar la estructura de movilidad del área de estudio, se incorporó la Red Vial Nacional publicada por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), disponible a través del Geoportal IDE Chile. Esta cartografía incluye rutas regionales, caminos intercomunales,

accesos urbanos y caminos rurales, permitiendo representar de manera integral la infraestructura vial que articula las comunas de Pucón y Villarrica (Figura 15).

La red vial presenta una organización jerárquica compuesta por rutas troncales, vías secundarias y caminos locales (Tabla 7), conformando el soporte estructural de la movilidad cotidiana y del proceso de evacuación peatonal analizado en este estudio. Destaca la Ruta 199-CH como eje troncal que conecta Freire, Villarrica y Pucón con los pasos cordilleranos hacia Argentina, constituyendo la principal columna vertebral de integración regional. A esta se suman rutas como la S-69, S-91 y S-95T, que vinculan los centros urbanos con sectores rurales y localidades del entorno lacustre, además de una red de caminos interiores —como S-887/S-889 en Villarrica y S-905 en Pucón— que permiten el acceso a áreas de ocupación dispersa.

Dentro de las áreas urbanas, una serie de ejes internos canaliza los desplazamientos locales y conecta los barrios residenciales con las rutas principales, reforzando la continuidad funcional del sistema vial. En contraste, los sectores rurales y periurbanos dependen mayoritariamente de caminos de menor jerarquía, los cuales actúan como enlaces secundarios hacia la red estructurante y convergen principalmente en dos corredores intercomunales clave: por una parte, la Ruta 199-CH, que articula el borde lacustre y concentra los flujos longitudinales entre Villarrica y Pucón; y por otra, la Ruta S-839, que establece una conexión alternativa por las faldas del volcán, uniendo ambas comunas a través de sectores rurales y de ocupación dispersa.

Figura 15. Red vial y conectividad territorial Villarrica - Pucón.



Esta organización vial se refleja en el patrón de ocupación territorial, ya que las áreas de mayor densidad habitacional se desarrollan en estrecha continuidad con las rutas principales, mientras que los sectores rurales y las áreas con presencia de parcelas de agrado y segundas viviendas se estructuran en torno a caminos interiores de menor continuidad y capacidad, configurando condiciones de accesibilidad diferenciadas respecto de la red vial principal.

Tabla 7. Rutas Principales Villarrica - Pucón.

Ruta / Nombre	Orientación	Tramo que conecta (origen – destino)
Ruta 199-CH (Camino Internacional)	O ↔ E	Freire – Villarrica – Pucón – Curarrehue → Paso Mamuil Malal (Argentina)
S-69 (Villarrica – Pitrufquén)	N ↔ S	Villarrica – Pitrufquén – Ruta 5 Sur
S-91 (Villarrica – Loncoche)	O ↔ NO	Villarrica – Ñancul – Loncoche – Ruta 5 Sur
S-95T (Villarrica – Lican Ray)	N ↔ S	Villarrica – Lican Ray
S-839 (Villarrica – Zona lacustre sur)	NO ↔ S	Villarrica – sectores rurales al sur del Lago Villarrica
S-887 / S-889 (rutas interiores Villarrica)	Varias	Villarrica – sectores dispersos rurales
S-905 (Pucón – Caburgua)	SO ↔ NE	Pucón – Caburgua – Huife
199 (Ruta interior Pucón – Palguín – Curarrehue)	S ↔ E	Pucón – Palguín – zonas interiores cordilleranas
S-947 / S-941 (ramales rurales)	Varias	Sectores cordilleranos → conexión a Ruta 199-CH
Ejes urbanos Villarrica (Colo Colo, Saturnino Epulef, Pedro de Valdivia)	Internos	Barrios residenciales – salidas hacia S-91 / 199-CH / S-95T
Eje urbano Pucón (Av. Bernardo O’Higgins)	O ↔ E	Centro de Pucón – conexión directa con Ruta 199-CH

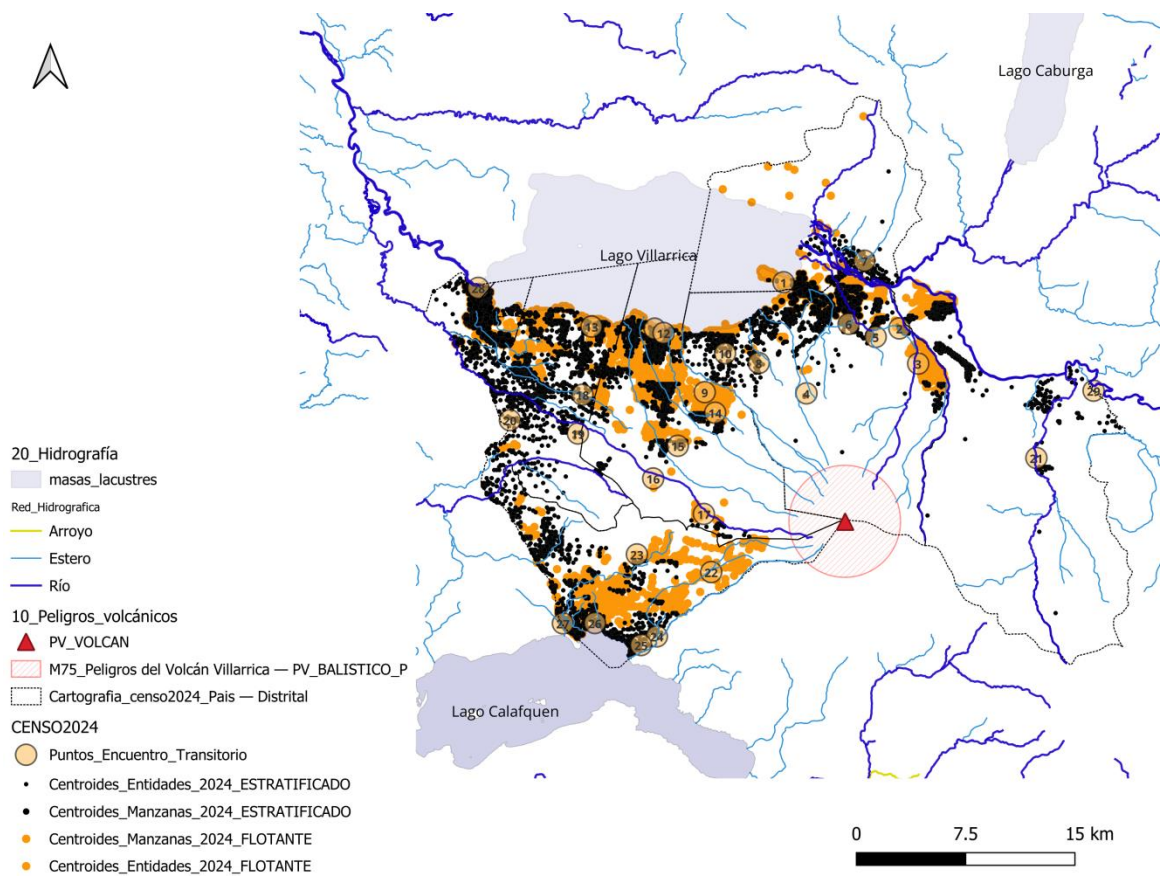
Las representaciones cartográficas incorporadas en esta sección permiten visualizar la superposición entre la red vial y la distribución de predios, evidenciando tanto los corredores de mayor continuidad como las zonas donde la accesibilidad depende de conexiones indirectas o de menor jerarquía.

4.5. Datos red hidrográfica (BCN, 2024)

La Red Hidrográfica Nacional incorporada en este estudio (Figura 16), descargada desde la Biblioteca del Congreso Nacional (BCN), permite representar de manera detallada los cursos de agua y drenajes que estructuran el territorio en torno al volcán Villarrica. Esta

cartografía incluye atributos relevantes como el tipo de drenaje (arroyos, ríos y canales), su longitud, denominación oficial y la comuna y región de pertenencia, lo que facilita una caracterización precisa de la red hídrica que modela las laderas volcánicas y los valles asociados.

Figura 16. Red hidrográfica Villarrica - Pucón.



Más allá de su función hidrológica, esta red cumple un rol determinante en escenarios eruptivos, ya que las quebradas y cauces actúan como corredores naturales para la

canalización de lahares, flujos piroclásticos secundarios y, en ciertos casos, flujos de lava.

4.6. Datos peligros del Volcán Villarrica (SERNAGEOMIN, 2000)

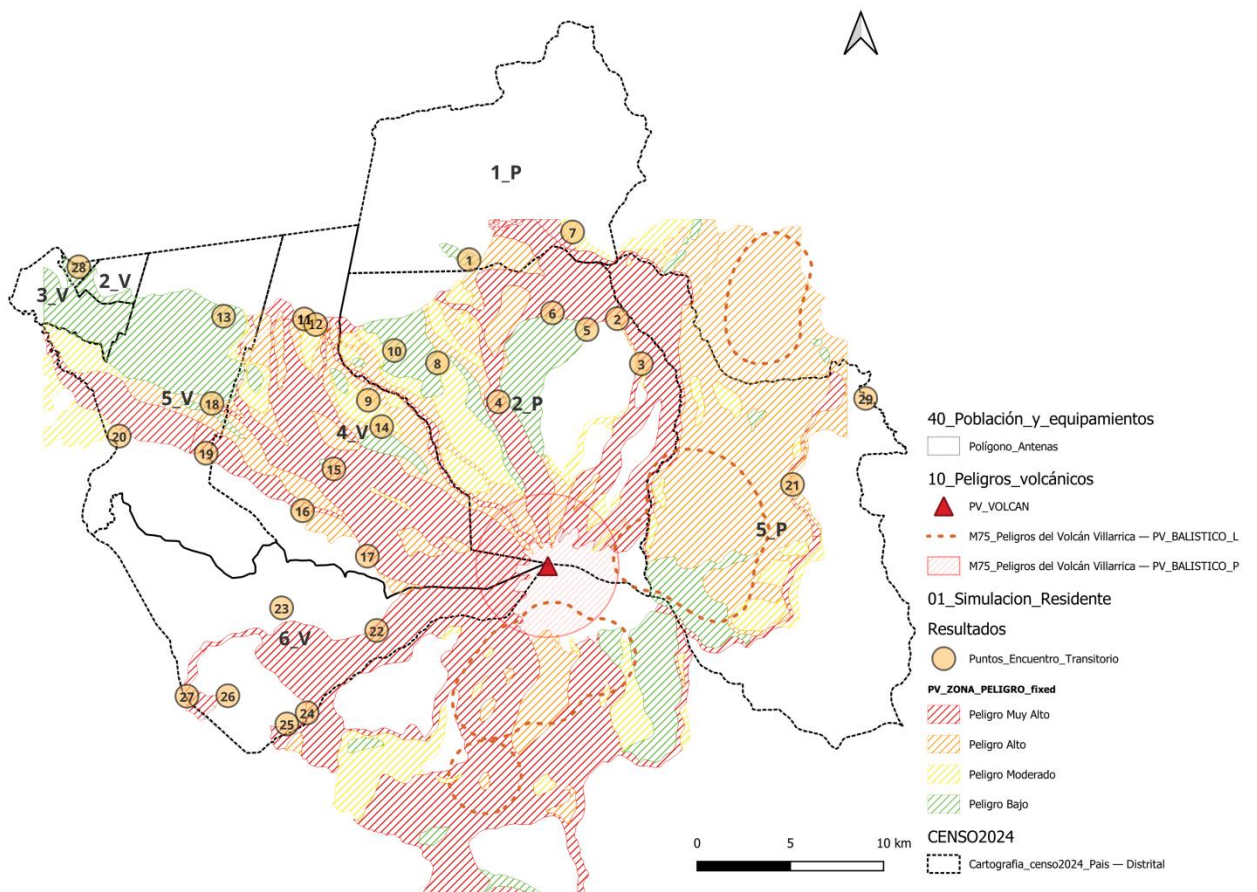
Se incorporó la cartografía oficial de peligros volcánicos, elaborada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), organismo encargado de generar y actualizar los Mapas de Peligros del volcán Villarrica a partir de estudios geológicos y vulcanológicos especializados. Esta cartografía (Figura 17) identifica las áreas potencialmente afectadas por distintos procesos eruptivos: flujos de lava, lahares, proyecciones balísticas y caída de piroclastos, y también combina tres dimensiones: recurrencia del proceso, magnitud esperada y severidad del impacto. Esta estructura permite entender cómo distintos sectores del territorio podrían verse afectados durante una erupción, diferenciando áreas de afectación inmediata de zonas más distales donde los impactos serían moderados. La clasificación del mapa distingue tres grandes grupos de amenaza:

Zonas de riesgo alto y muy alto (AL1, AL2, AL3, ALI1, ALI2):

Estas zonas están asociadas principalmente a procesos de alta o muy alta recurrencia, como lahares y flujos de lava canalizados por valles, así como sectores expuestos a proyectiles balísticos. Aunque en varios de estos sectores la severidad esperada es baja, la recurrencia es elevada, lo que los convierte en áreas críticas para la planificación de

evacuaciones. Estos sectores incluyen principalmente cauces, quebradas y zonas rurales periurbanas que históricamente han canalizado flujos volcánicos.

Figura 17. Mapa de Peligros del Volcán Villarrica.



Zonas de peligro moderado (ML, MLI):

Representan áreas donde los procesos tienen una recurrencia moderada y pueden generar impactos de severidad media o baja, dependiendo de la magnitud del evento.

Zonas de peligro bajo (BLI):

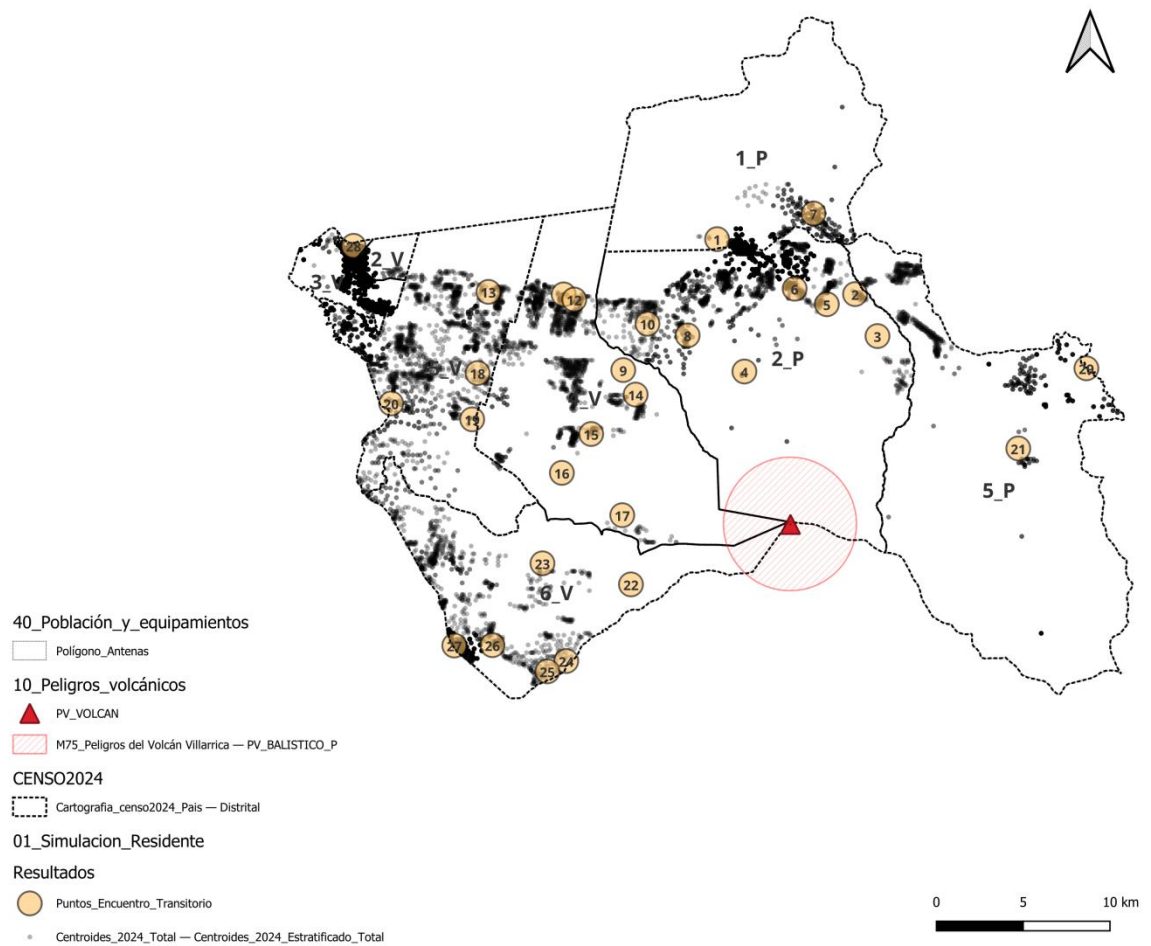
Corresponden a sectores distales donde la recurrencia de los procesos es baja o muy baja, pero la severidad del impacto puede ser alta en escenarios eruptivos de mayor magnitud. Aunque estas áreas están consideradas como zonas de resguardo relativo, no están exentas de afectación en eventos de mayor escala.

La SENAPRED (Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres) utiliza estos mapas para la planificación operativa de emergencias, incluyendo la elaboración de planes comunales de evacuación, la definición de Puntos de Encuentro Transitorio PET (Figura 18), rutas de evacuación y zonas de protección.

Los Puntos de Encuentro Transitorio (PET) corresponden a lugares designados para la reunión temporal de la población durante un proceso de evacuación, en situaciones en las que no es posible alcanzar de manera inmediata un Punto de Encuentro Final o un Área de Seguridad. Estos puntos cumplen un rol estratégico al ofrecer un espacio de resguardo inicial y facilitar la organización de la respuesta institucional durante una emergencia volcánica. Del total de PET existentes en ambas comunas, se seleccionaron aquellos ubicados dentro de los distritos definidos como polígono de estudio, resultando en un conjunto de 29 puntos distribuidos entre Pucón y Villarrica, abarcando sectores urbanos, periurbanos y rurales. En el caso de Pucón, los PET se emplazan principalmente en los distritos 1P, 2P y 5P, mientras que en Villarrica se concentran en los distritos 1V, 4V, 5V y 6V, reflejando la estructura territorial y el patrón de

asentamiento característico de cada comuna. Cada PET se identifica mediante su nombre, lo que facilita su reconocimiento y referencia en los planes comunales de emergencia.

Figura 18. Distribución de PET en polígono.



En la Tabla 8 se presenta el listado completo de los Puntos de Encuentro Transitorio considerados, indicando su identificación, nombre, distrito y comuna. Esta sistematización constituye la base territorial que será utilizada en las etapas posteriores

del estudio para la modelación de la evacuación peatonal y la estimación de tiempos de desplazamiento desde los predios hacia el PET más cercano.

Tabla 8. Principales PTT, sector polígono Villarrica - Pucón

ID PeT	Nombre PeT	Distrito	Comuna	ID PeT	Nombre PeT	Distrito	Comuna
1	Península	1P	Pucón	16	Voipir Seco Predio Kolping	4V	Villarrica
2	Cerdúo 2	2P	Pucón	17	Voipir Seco Predio Hugo Vera	4V	Villarrica
3	Cerdúo 1	2P	Pucón	18	Conquil Predio Julio Bustos	5V	Villarrica
4	Mirador Camino al Volcán	2P	Pucón	19	Huincacara Sur Predio Juana Montecinos	5V	Villarrica
5	Club de Huasos	2P	Pucón	20	Huincacara Sur Iglesia Pentecostal Calfutúe	5V	Villarrica
6	Los Calabozos	2P	Pucón	21	Palguín	5P	Pucón
7	Escuela Quelhue Alto	1P	Pucón	22	Pino Huacho Predio Pedro Vásquez	6V	Villarrica
8	Candelaria	2P	Pucón	23	Escuela Estadio Cudico	6V	Villarrica
9	Loncocontraro Alto Country Pucón	4V	Villarrica	24	Escuela Alihuén	6V	Villarrica
10	Los Riscos	2P	Pucón	25	Challupen Bajo Sede Ambrosio Punoñef	6V	Villarrica
11	Loncocontraro – Helipuerto Hotel Park Lake	4V	Villarrica	26	Ensenada Cabañas Norma Punoñef	6V	Villarrica
12	Loncocontraro	4V	Villarrica	27	Putabla Predio Renato Vallejos	6V	Villarrica
13	Piedra Amarilla	5V	Villarrica	28	Salida Villarrica	1V	Villarrica
14	Estrella Blanca Predio Carmen San Martín	4V	Villarrica	29	Salida Pucón	5P	Pucón
15	Huincara Norte Cerro El Pirao	4V	Villarrica				

4.7. Datos contruidos de población flotante (2025)

Con el fin de incorporar explícitamente la población flotante y capturar la variabilidad estacional de la ocupación territorial, el estudio adopta un enfoque que se apoya en un dato ancla de carácter institucional, publicado por la Municipalidad de Pucón. Según esta fuente, “durante la temporada alta de verano 2025, la comuna de Pucón registró una población flotante total estimada en cerca de 1.750.000 personas, consolidándose como uno de los destinos más visitados del sur de Chile”. Este valor se adopta como referencia principal para representar el flujo agregado de visitantes durante el período estival.

Es importante destacar que esta cifra corresponde a un volumen acumulado de personas a lo largo de la temporada, y no a una población simultáneamente presente en un momento determinado. En consecuencia, el desafío metodológico central consiste en transformar este flujo estacional en una estimación de población presente diaria, adecuada para el análisis y simulación de procesos de evacuación y evaluación de exposición territorial.

Para abordar esta conversión, se adopta un modelo de balance temporal de población, en el cual la población presente se estima a partir del flujo total de visitantes y su tiempo de permanencia en el territorio, en relación con la duración de la temporada analizada. Este enfoque corresponde a una formulación de tipo flujo–stock, utilizada en estudios de

turismo y planificación territorial para transformar volúmenes acumulados de visitantes en poblaciones efectivamente expuestas de manera simultánea. Ver Anexo 6 para revisión del código del modelo de balance temporal de la población.

En lugar de asumir una estadía promedio única, el modelo incorpora explícitamente la heterogeneidad de los patrones turísticos mediante la definición de una estadía promedio efectiva (Tabla 9). Esta se construye a partir de una mezcla probabilística de tipologías de visita representativas del caso de estudio, incluyendo visitas de fin de semana, estadías semanales y estadías prolongadas asociadas a segundas residencias.

$$Población\ Presente = \frac{V \cdot \bar{s}}{L} \quad (1)$$

Donde V equivale a los visitantes de temporada (1.750.000 personas), \bar{s} corresponde a la estadía promedio en días del visitante (weekend, semana o quincena) y L corresponde a la duración de la temporada alta completa (90,85 o 75 días).

Tabla 9. Definición de escenarios para definición de estadía promedio efectiva. Se definen tres escenarios (bajo, base y crítico), considerando para cada uno la duración total de la temporada estival (90, 85 y 75 días, respectivamente) y una combinación de estadías tipo weekend (2,5 días), semana (7 días) y quincena (15 días). Para cada escenario se establece una mezcla representativa de ocupación promedio y una mezcla alternativa asociada a condiciones de mayor ocupación estructural, caracterizada por una mayor proporción de estadías prolongadas.

TIPOS DE ESCENARIOS TEMPORADA				
TIPO	DÍAS	ESTADÍA	DISTRIBUCIÓN PROMEDIO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMO
bajo	90.0	weekend	0.78	0.7
bajo	90.0	semana	0.21	0.25
bajo	90.0	quincena	0.01	0.05
base	85.0	weekend	0.75	0.65
base	85.0	semana	0.23	0.27
base	85.0	quincena	0.02	0.08
crítico	75.0	weekend	0.8	0.6
crítico	75.0	semana	0.19	0.25
crítico	75.0	quincena	0.01	0.15

En particular, se consideran tres tipos de estadía: visitas de fin de semana, estadías semanales y estadías prolongadas asociadas a quincenas, cada una con duraciones y probabilidades relativas diferenciadas según escenario. La combinación ponderada de estas tipologías permite capturar la coexistencia de distintos perfiles de visitantes dentro de un mismo período, reflejando de mejor manera la dinámica real de ocupación estacional observada en la comuna (Tabla 10).

Tabla 10. *Resultados de población flotante presente diaria por escenario estacional (condición promedio y de mayor ocupación).*

RESULTADOS DE ESCENARIOS		
TIPO	PROMEDIO	MÁXIMO *
bajo	69.222	81.667
base	77.515	95.426
crítico	80.967	124.833

** El valor máximo corresponde a una condición de mayor ocupación estructural asociada a estadías más prolongadas, y no a un supuesto de simultaneidad total de visitantes.*

A partir de estas definiciones, se estima para cada escenario la población flotante presente diaria bajo dos condiciones: una condición promedio y una condición de mayor ocupación estructural. La coherencia de los escenarios definidos se evalúa a partir de los valores obtenidos de población presente diaria y de carga promedio por vivienda, lo que permite verificar órdenes de magnitud plausibles antes de proceder a la asignación espacial de la población flotante y al cálculo de velocidades de evacuación. En base a estos resultados, el escenario crítico en condición de mayor ocupación se adopta como referencia para la modelación de evacuación que considera la población flotante.

Una vez estimada la población flotante presente diaria para cada escenario, esta se distribuye espacialmente sobre el conjunto de viviendas identificadas como no ocupadas (Tabla 11), representadas mediante centroides en la capa de población flotante. La distribución se realiza de forma homogénea, asignando cantidades enteras de personas por vivienda, de modo de conservar exactamente los totales estimados y evitar la introducción de sesgos espaciales adicionales no respaldados por información empírica.

Tabla 11. Distribución total de la población flotante asignada a cada centroide.

TERRIT ORIO	CENTR OIDES	PERS	POBLACIÓN FLOTANTE								
			N_HOG _TOTA	N_HO G	N_HO G_UNI P	N_HOG _60	N_HO G_ME NO	N_V P	EVAC _1.88	EVA C_2.8 8	EVA C_4.6 8
1_P	2382	12230	7404	3078	3756	570	884	2382	523	670	1189
1_V	481	2405	1505	602	782	121	173	481	113	132	236
2_P	8577	45384	27652	11459	14098	2095	3491	8577	1900	2675	4002
2_V	1096	5955	3633	1483	1872	278	425	1096	247	323	526
3_V	1591	7978	4843	2020	2472	351	599	1591	316	482	793
4_V	2578	15239	9163	3899	4595	669	1138	2578	607	832	1139
5_P	716	4296	2563	1103	1259	201	330	716	184	243	289
5_V	2062	11930	7147	3086	3521	540	928	2062	489	682	891
6_V	3528	19416	11738	5036	5910	792	1497	3528	734	1147	1647
	23011	124833	75648	31766	38265	5617	9465	23011	5113	7186	10712

Con esta etapa se consolida la tabla de población máxima crítica estimada, la cual integra de manera consistente la estimación de población presente diaria en condición de mayor ocupación, su desagregación a nivel de vivienda (centroide) y la caracterización demográfica necesaria para la asignación de velocidades de evacuación. Este resultado (Tabla 12) constituye la base operativa para la configuración de escenarios de evacuación que incorporan explícitamente la población flotante.

A partir de esta consolidación, el modelo posteriormente permite definir dos situaciones contrastantes de análisis: un escenario base, asociado a condiciones de ocupación territorial con población residente, y un escenario de ocupación máxima, representativo de un período crítico de alta demanda espacial. La comparación entre ambos escenarios posibilita evaluar, desde un enfoque metodológico, cómo varían los tiempos, rutas y niveles de exposición durante un proceso de evacuación frente a una eventual erupción volcánica, identificando brechas operativas y sectores particularmente sensibles a la presión estacional de población.

Tabla 12. *Distribución total de población crítica (máxima).*

POBLACIÓN CRÍTICA (MÁXIMA)											
TERRI TORIO	CENTR OIDES	PERS	N_HOG _TOTA	N_HOG	N_HOG _UNIP	N_HOG _60	N_HOG _MENO	N_VP	EVAC _1.88	EVAC _2.88	EVAC_ 4.68
1_P	3723	15414	9289	4371	4109	809	1284	3723	762	1047	1914
1_V	2353	7092	4230	2398	1282	550	624	2353	542	554	1257
2_P	16489	64809	38200	18957	15986	3257	6024	16489	3062	5068	8359
2_V	2379	8561	5461	2627	2245	589	682	2379	558	558	1263
3_V	12358	33876	17675	11434	4643	1598	4281	12358	1563	4083	6712
4_V	3993	18436	11048	5155	4895	998	1515	3993	936	956	2101
5_P	1578	6335	3575	1835	1401	339	605	1578	322	480	776
5_V	5088	19371	10850	5770	4032	1048	1937	5088	997	1506	2585
6_V	5265	23514	14079	6612	6302	1165	1950	5265	1107	1466	2692
	53226	197408	114407	59159	44895	10353	18902	53226	9849	15718	27659

5. Metodología

El estudio implementa un modelo de simulación espacial de evacuación peatonal basado en grafos, enmarcado en los principios de Network Science, con el objetivo de estimar los tiempos de desplazamiento de la población desde sus viviendas hacia los Puntos de Encuentro Transitorios (PET) ante un escenario eruptivo, bajo distintos escenarios de ocupación territorial. En este enfoque, la infraestructura vial se representa como una red compuesta por nodos y aristas, permitiendo analizar la conectividad, accesibilidad y eficiencia de las trayectorias de evacuación en función de la topología del sistema vial.

La modelación integra información censal, datos territoriales y estructura vial, incorporando además criterios diferenciados de movilidad peatonal según la composición etaria de los hogares. De este modo, cada vivienda se representa como un punto de origen dentro de la red, caracterizado por una velocidad de desplazamiento específica, mientras que los PET actúan como nodos de destino.

El proceso de simulación se estructura en dos fases principales. En una primera fase (Figura 19a), se modela el acceso de la población desde las viviendas hacia la red vial mediante conexiones ortogonales, estableciendo nodos de entrada al sistema. En una segunda fase (Figura 19b), se simula el desplazamiento por la red vial hasta los PET, utilizando algoritmos de caminos mínimos sobre el grafo.

Por otro lado, se desarrolla en dos escenarios poblacionales contrastantes: (i) una condición de población residente y (ii) una condición de ocupación máxima crítica que

incorpora población flotante. En ambos casos, se evalúan trayectorias peatonales, distancias y tiempos de evacuación considerando restricciones de movilidad asociadas a la composición etaria de los hogares.

Figura 19a. Esquema Grafo y simulación de movilidad. Fase 1.

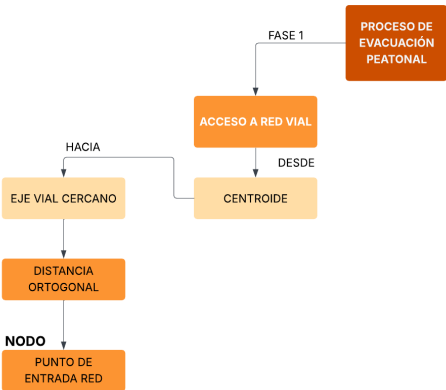
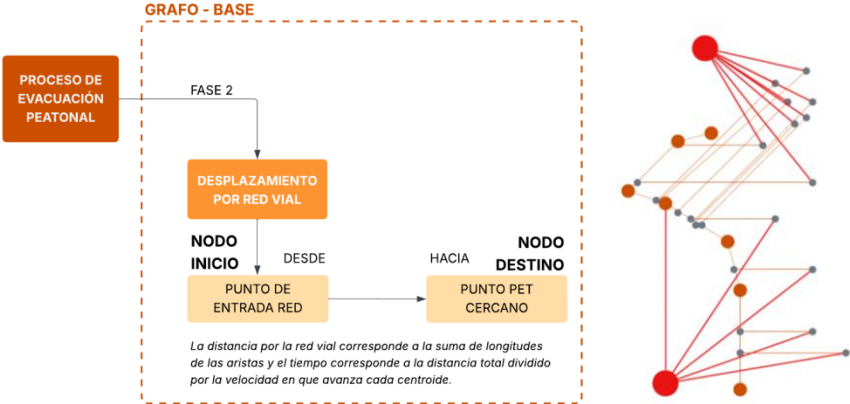


Figura 19b. Esquema Grafo y simulación de movilidad. Fase 2.



5.1. Escenarios de simulación poblacional

El modelo de evacuación se aplica a dos escenarios poblacionales diferenciados, contruidos a partir de los datos censales y territoriales descritos en el capítulo de datos.

El Escenario 1 corresponde a la población residente, distribuida en unidades urbanas (manzanas) y rurales (entidades). En este caso, cada vivienda, representada mediante un centroide georreferenciado, está caracterizada por su número de personas, estructura de hogar y una velocidad de desplazamiento peatonal asociada al caso más desfavorable según su composición etaria (presencia de adultos mayores y/o niños).

El Escenario 2 representa una condición de ocupación máxima crítica, que incorpora la población flotante estimada para la temporada alta dentro del territorio. Esta población se distribuye espacialmente sobre las viviendas identificadas como segundas residencias o viviendas no ocupadas, manteniendo la misma estructura espacial y tipología de hogares, pero con una mayor carga poblacional por vivienda.

En ambos escenarios, cada vivienda cuenta con información sobre número de personas, tipo de hogar y velocidad de desplazamiento peatonal, lo que permite representar no solo la distribución espacial de la población, sino también sus capacidades diferenciadas de movilidad durante el proceso de evacuación.

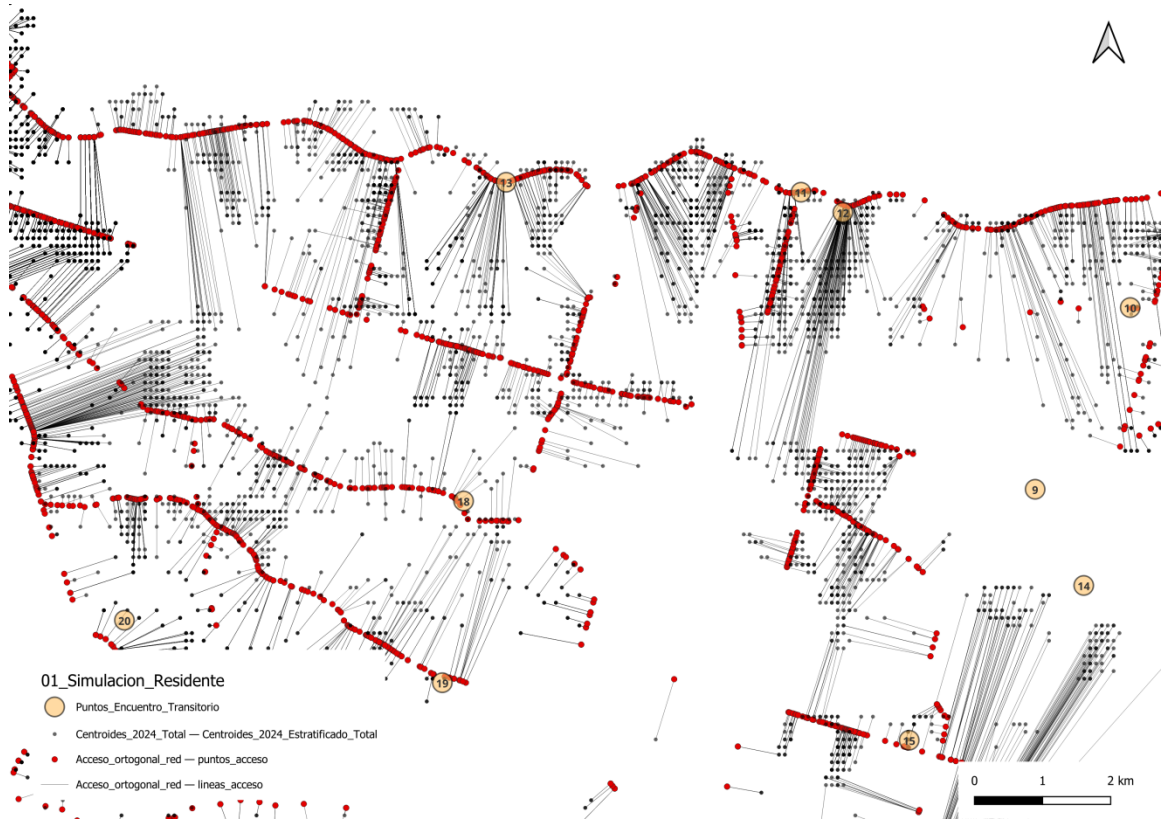
Ambos escenarios utilizan la misma red vial y configuración espacial, lo que permite comparar directamente los tiempos de evacuación bajo diferentes niveles de presión demográfica.

5.2. Acceso a la red vial: conexión ortogonal

Para modelar el desplazamiento inicial de la población desde las viviendas hacia la infraestructura de evacuación, se calcula la distancia ortogonal mínima entre cada centroide-vivienda y el tramo de red vial más cercano. Esta distancia representa el recorrido peatonal que debe realizar cada persona desde su vivienda hasta incorporarse a la red de circulación.

La conexión ortogonal permite vincular espacialmente los puntos de origen, ubicados fuera de la red vial, con el sistema de transporte peatonal representado por las vías existentes (Figura 20). En el punto de intersección entre la línea ortogonal y la red vial se genera un nodo de acceso, el cual funciona como el punto de entrada de cada vivienda al sistema de evacuación. La longitud de este tramo inicial se transforma posteriormente en tiempo de desplazamiento utilizando la velocidad peatonal asignada a cada vivienda según su composición etaria. De este modo, el modelo incorpora tanto la accesibilidad espacial como las restricciones de movilidad asociadas a los distintos tipos de hogar.

Figura 20. *Conexión ortogonal centroide – vivienda y red vial.*



5.3. Configuración del grafo vial

La red vial del área de estudio se transforma en un grafo espacial, con el objetivo de representar la infraestructura de circulación como una estructura de red compuesta por nodos y aristas. En esta representación, los nodos corresponden a las intersecciones y a los cambios de dirección de las vías, mientras que las aristas representan los tramos viales que conectan dichos nodos (Figura 21).

Cada arista del grafo incorpora como atributo su longitud métrica, expresada en metros, la cual actúa como peso de la red y permite cuantificar los costos de desplazamiento.

La configuración del grafo conserva la geometría, conectividad y jerarquía funcional de la red vial real, permitiendo modelar el sistema de movilidad como una estructura topológica continua. De este modo, la infraestructura urbana se representa como una red navegable, apta para el cálculo de rutas óptimas y para la evaluación de la accesibilidad territorial ante escenarios de emergencia.

Esta representación es fundamental para simular el desplazamiento de la población hacia los Puntos de Encuentro Transitorios (PET), ya que define el espacio de circulación disponible y las posibles trayectorias dentro del sistema vial.

Figura 21. Grafo Red Vial.



5.4. Integración de los puntos de origen y destino al grafo

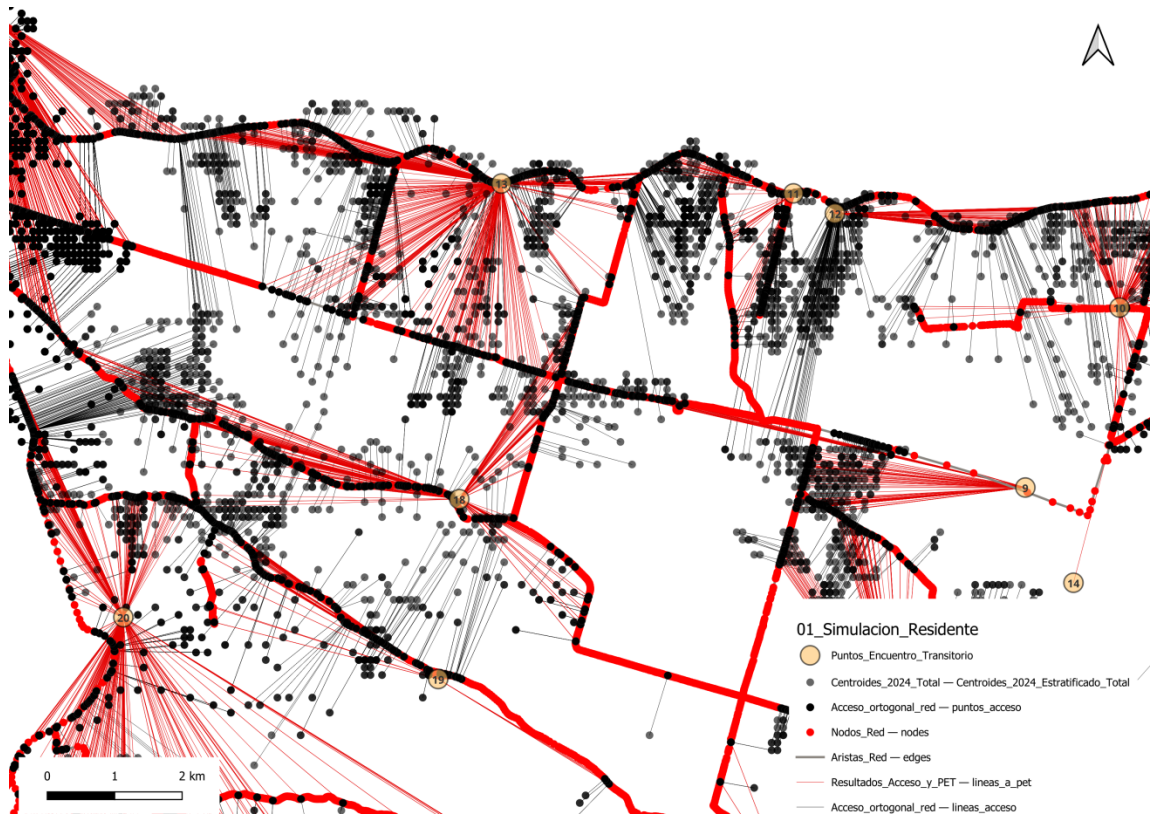
Una vez configurada la red vial como grafo, se procede a integrar los puntos de origen (viviendas) y los puntos de destino (Puntos de Encuentro Transitorios - PET) dentro de esta estructura, con el fin de representar el sistema completo de evacuación peatonal (Figura 22).

En el caso de las viviendas, cada centroide-vivienda se conecta a la red mediante el nodo de acceso definido a partir de la distancia ortogonal mínima hacia el tramo vial más cercano. Este nodo representa el punto de incorporación de cada vivienda al sistema de circulación, permitiendo vincular el espacio residencial con la red vial modelada como grafo.

Por su parte, los PET que se encuentran cercanos a la red vial, se integran al grafo mediante un proceso de snapping al nodo más cercano de la red. Este procedimiento asocia cada punto de encuentro a un nodo existente del grafo, sin generar nuevas aristas fuera de la infraestructura vial. De este modo, los PET quedan incorporados como nodos de destino dentro de la estructura topológica de la red.

Este enfoque garantiza que todos los elementos relevantes del sistema de evacuación — viviendas, red vial y PET— queden representados dentro de una misma estructura de red, permitiendo modelar trayectorias completas de evacuación peatonal sobre la infraestructura vial existente.

Figura 22. Grafo que modela la integración de los puntos de origen, destino y la movilidad.



5.5. Cálculo de rutas de evacuación peatonal

Con la red vial completamente configurada como grafo e integrados los puntos de origen (viviendas) y destino (PET), se procede al cálculo de las rutas de evacuación peatonal. Para cada centroide-vivienda se determina el camino más corto hacia el PET más cercano, considerando la totalidad del recorrido desde la vivienda hasta el punto seguro.

El trayecto de evacuación incluye tres componentes: (i) el tramo ortogonal desde la vivienda hasta la red vial, (ii) el desplazamiento a lo largo de la red vial modelada como

grafo y (iii) la conexión final hacia el PET correspondiente. El cálculo de estas trayectorias se realiza mediante algoritmos de caminos mínimos aplicados al grafo, utilizando como métrica principal la distancia acumulada de las aristas. Este procedimiento permite identificar las trayectorias óptimas dentro de la topología vial, minimizando el costo de desplazamiento y reflejando las restricciones impuestas por la estructura espacial de la red.

Posteriormente, la distancia total de cada ruta se transforma en tiempo de evacuación a partir de la velocidad peatonal asignada a cada vivienda según la composición etaria del hogar. De este modo, el modelo incorpora diferencias funcionales en la capacidad de desplazamiento de la población, permitiendo representar de manera realista el comportamiento de los distintos grupos etarios durante el proceso de evacuación. Como resultado, se obtiene para cada vivienda un PET de destino, una distancia total de evacuación y un tiempo estimado de desplazamiento peatonal.

5.6. Estimación de tiempos de evacuación poblacional

A partir de los tiempos individuales de evacuación calculados para cada vivienda, se realiza una agregación territorial de los resultados con el fin de caracterizar el desempeño global del sistema de evacuación peatonal.

Los tiempos estimados permiten analizar la distribución espacial de la accesibilidad hacia los Puntos de Encuentro Transitorios (PET), identificando sectores con mayores demoras, zonas con recorridos más extensos y áreas donde la población enfrenta mayores restricciones de movilidad. Asimismo, la incorporación de velocidades diferenciadas según la composición etaria de los hogares permite evaluar cómo las características demográficas influyen en la eficiencia del proceso de evacuación.

El análisis agregado posibilita la obtención de indicadores tales como tiempos promedio de evacuación, rangos de tiempo predominantes y patrones de concentración de flujos hacia determinados PET. Estos resultados permiten detectar potenciales cuellos de botella en la red vial y evaluar la capacidad del sistema para absorber la demanda en distintos escenarios poblacionales.

La aplicación del modelo a escenarios contrastantes de población residente y ocupación máxima crítica permite, además, comparar el impacto del aumento estacional de la población sobre los tiempos de evacuación y la presión ejercida sobre la infraestructura vial y los puntos de encuentro. De este modo, la simulación proporciona una base cuantitativa para evaluar la robustez del sistema de evacuación ante distintos niveles de carga demográfica y apoyar la planificación territorial en contextos de riesgo volcánico.

6. Resultados

Este capítulo presenta los principales resultados obtenidos a partir de la simulación de evacuación peatonal basada en grafos, aplicada a los escenarios de población residente y ocupación máxima crítica.

Los resultados permiten analizar (i) la estructura de la red vial utilizada como soporte del proceso de evacuación, (ii) las distancias y tiempos de desplazamiento hacia los Puntos de Encuentro Transitorios (PET) y (iii) el comportamiento espacial del sistema bajo distintos niveles de presión demográfica.

Asimismo, se identifican patrones de concentración de flujos, sectores con mayores tiempos de evacuación y elementos críticos de la infraestructura vial, lo que permite evaluar la robustez estructural del sistema de evacuación ante un escenario eruptivo.

6.1. Métricas grafo de la red vial

A partir del grafo vial construido, se realizó un análisis estructural de la red con el fin de identificar sus principales patrones de conectividad, accesibilidad y robustez. Este análisis se basa exclusivamente en la topología del sistema vial y en las distancias métricas de los tramos, sin incorporar aún la distribución poblacional ni la intensidad de la demanda de evacuación.

Las métricas calculadas permiten caracterizar el comportamiento potencial de la infraestructura vial ante un proceso de evacuación, identificando los elementos más relevantes para la circulación peatonal y los sectores donde la estructura de la red podría generar concentraciones de flujo o vulnerabilidades operativas.

6.1.1. Degree Centrality: Conectividad de la red

En la red vial estructurante analizada (Tabla 13), el 98,99 % de los nodos presenta un grado igual a 2, lo que indica que la red está compuesta mayoritariamente por tramos lineales y continuos, donde cada nodo conecta únicamente dos segmentos viales. Esta configuración corresponde a una estructura con muy baja ramificación, caracterizada por recorridos longitudinales con escasas intersecciones complejas. Los nodos terminales (grado 1) representan solo el 0,37 % del total, mientras que las intersecciones con mayor nivel de conectividad (grado 3, 4 y 5) no superan el 0,65 %. Esto evidencia que la red posee pocos puntos de bifurcación, y que la mayor parte del territorio depende de ejes viales lineales con opciones limitadas de desvío (Figura 23a).

Tabla 13. *Distribución de degree centrality de los nodos.*

DEGREE	NODOS	
1	76	0.37%
2	20296	98.99%
3	92	0.45%
4	38	0.19%
5	2	0.01%
	20504	100%

Figura 23a. Grado de centralidad que muestra la cantidad de conexiones por cada nodo de la red vial estructural.



Desde una perspectiva funcional, esta estructura implica que los desplazamientos peatonales se canalizan principalmente a través de corredores continuos, con escasas rutas alternativas. En un contexto de evacuación, esta baja redundancia estructural puede aumentar la vulnerabilidad del sistema, ya que la interrupción de un tramo relevante podría afectar significativamente la conectividad de sectores completos.

6.1.2. Betweenness Centrality: Ejes estructurantes de la red

La centralidad de intermediación (betweenness) mide la frecuencia con que un nodo aparece en los caminos más cortos entre pares de nodos dentro de la red, permitiendo identificar aquellos puntos que concentran el tránsito potencial.

La distribución de esta métrica presenta una asimetría marcada, con una fuerte concentración de valores bajos y una cola larga hacia valores elevados (Figuras 23b y 24). La mediana alcanza un valor de 0,0179, mientras que la media es de 0,0405, lo que evidencia la presencia de pocos nodos con valores excepcionalmente altos. El 75 % de los nodos presenta valores inferiores a 0,039, mientras que el valor máximo alcanza 0,4429.

Figura 23. Distribución de betweenness centrality de los nodos de la red vial estructurante.

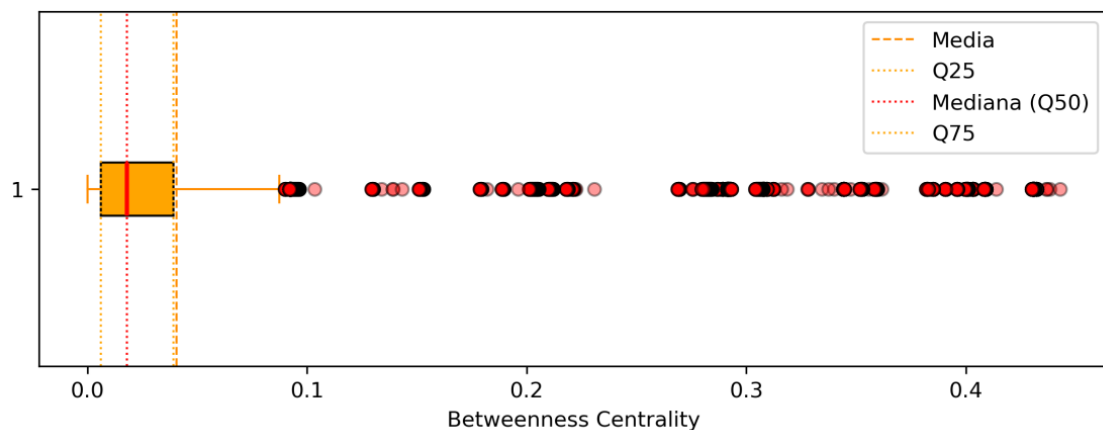
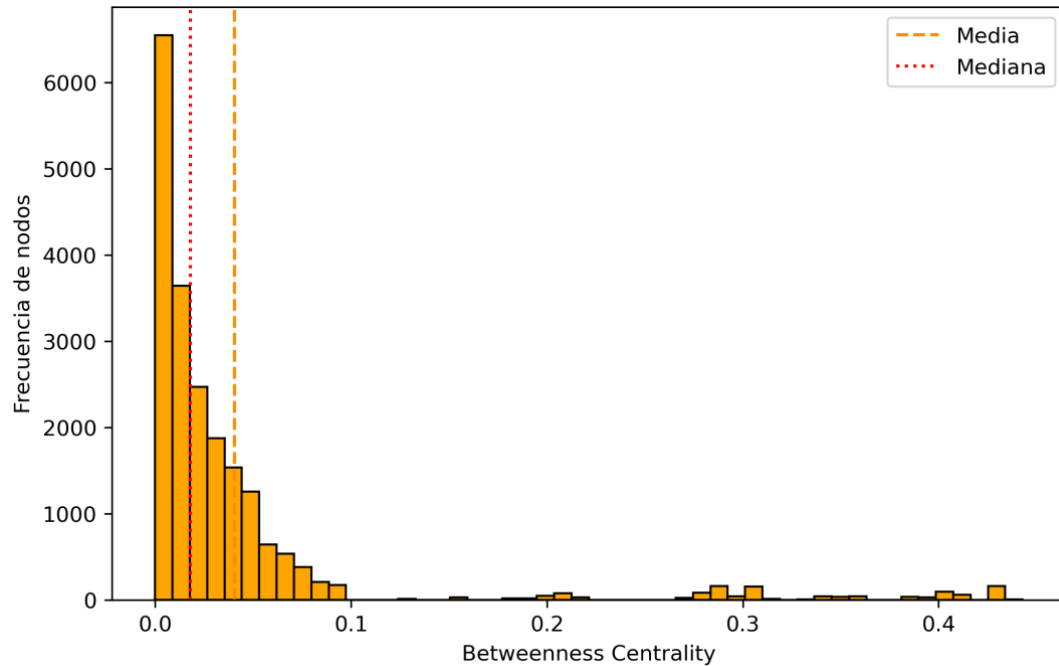


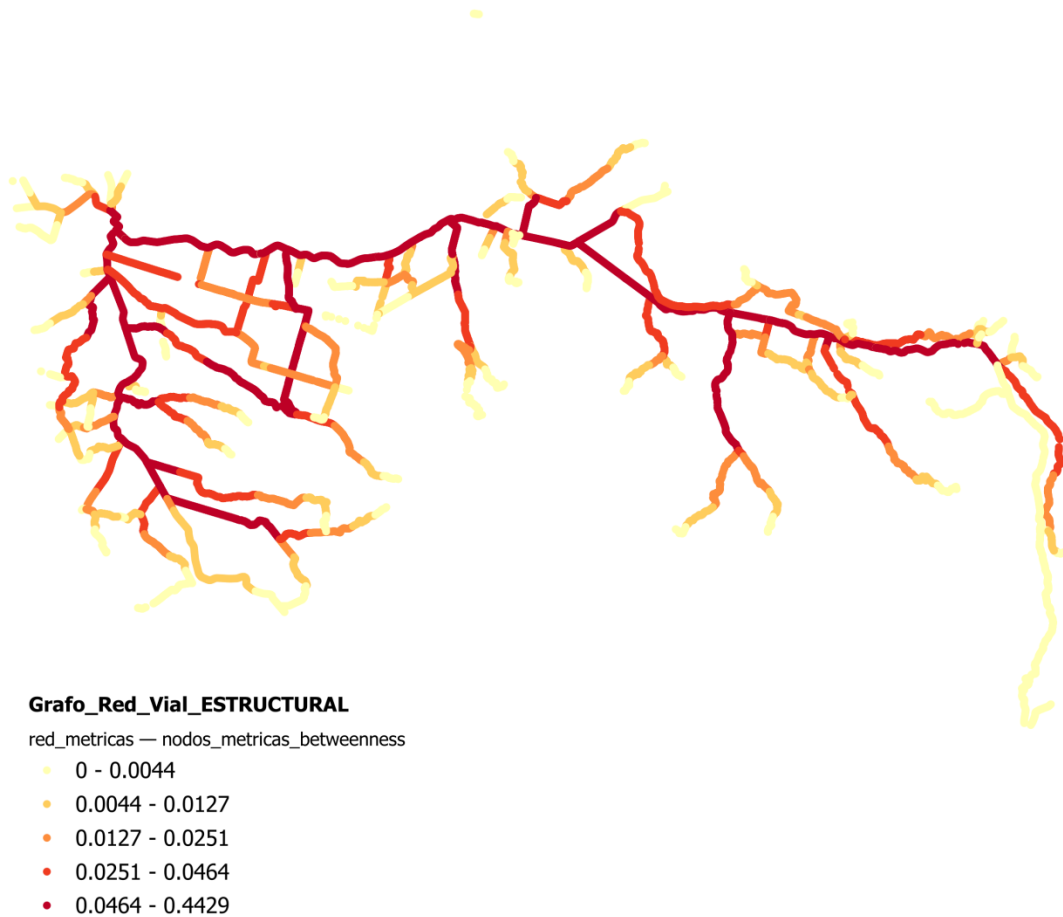
Figura 24. Histograma de distribución de *betweenness centrality* de los nodos.



Este patrón indica que la mayoría de los nodos cumple un rol secundario en la conectividad global, participando en pocos caminos óptimos, mientras que un conjunto reducido de intersecciones concentra una proporción significativa de las trayectorias dentro del sistema.

La representación espacial de la centralidad de intermediación (Figura 25) muestra que los nodos con valores más altos se organizan principalmente a lo largo de ejes longitudinales continuos, que estructuran el sistema vial del territorio. Estos corredores concentran la mayor parte de las rutas más cortas entre sectores residenciales y los Puntos de Encuentro Transitorios (PET), funcionando como corredores estructurantes de la evacuación. En contraste, los tramos secundarios presentan valores bajos de *betweenness*, evidenciando su rol periférico dentro del sistema.

Figura 25. Centralidad de intermediación que mide la frecuencia con que un nodo aparece en los caminos más cortos.



En conjunto, los resultados evidencian una alta concentración funcional en un número reducido de corredores principales, coherente con la estructura predominantemente lineal de la red, caracterizada por una baja ramificación y escasa redundancia de rutas alternativas.

En un escenario de evacuación, esta configuración sugiere una mayor probabilidad de concentración de flujos en ejes específicos, lo que incrementa la vulnerabilidad del sistema frente a congestiones o interrupciones físicas.

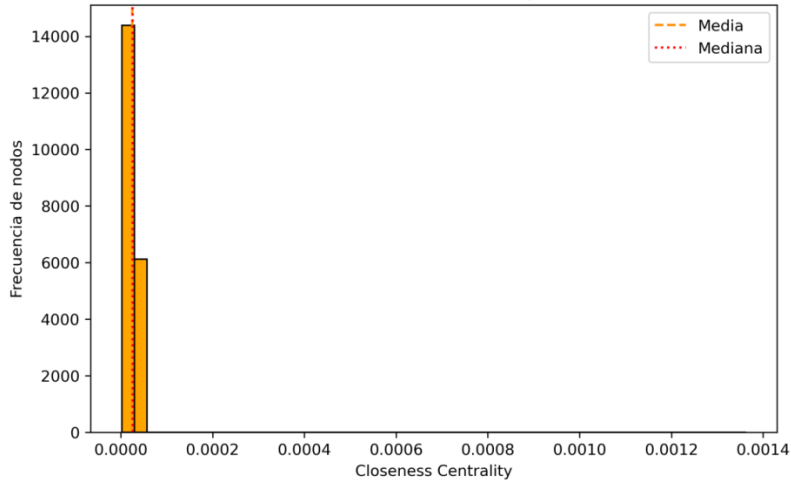
6.1.3. Closeness Centrality: Accesibilidad estructural de la red

La centralidad de cercanía (closeness centrality) mide qué tan cerca se encuentra un nodo del resto de la red, considerando la distancia promedio a todos los demás nodos. Esta métrica permite evaluar el nivel de accesibilidad estructural dentro del sistema vial.

La distribución de closeness en la red vial estructurante presenta valores muy bajos y altamente concentrados (Figura 26). La media alcanza 0,000025 y la mediana 0,000026, con una desviación estándar reducida (0,000015). El 75 % de los nodos presenta valores inferiores a 0,000030, mientras que el valor máximo alcanza 0,001362.

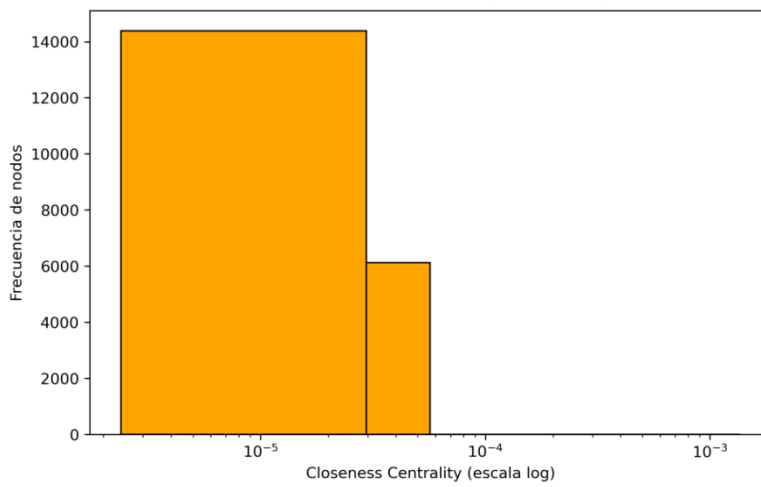
Esta fuerte concentración de valores indica que la mayoría de los nodos presenta una accesibilidad estructural similar y limitada, lo que refleja que las distancias promedio dentro de la red son elevadas y relativamente homogéneas. En términos funcionales, esto sugiere que el territorio se organiza a través de recorridos largos y continuos, sin múltiples atajos o rutas alternativas que reduzcan significativamente las distancias internas.

Figura 26. Histograma de la distribución de closeness centrality de los nodos.



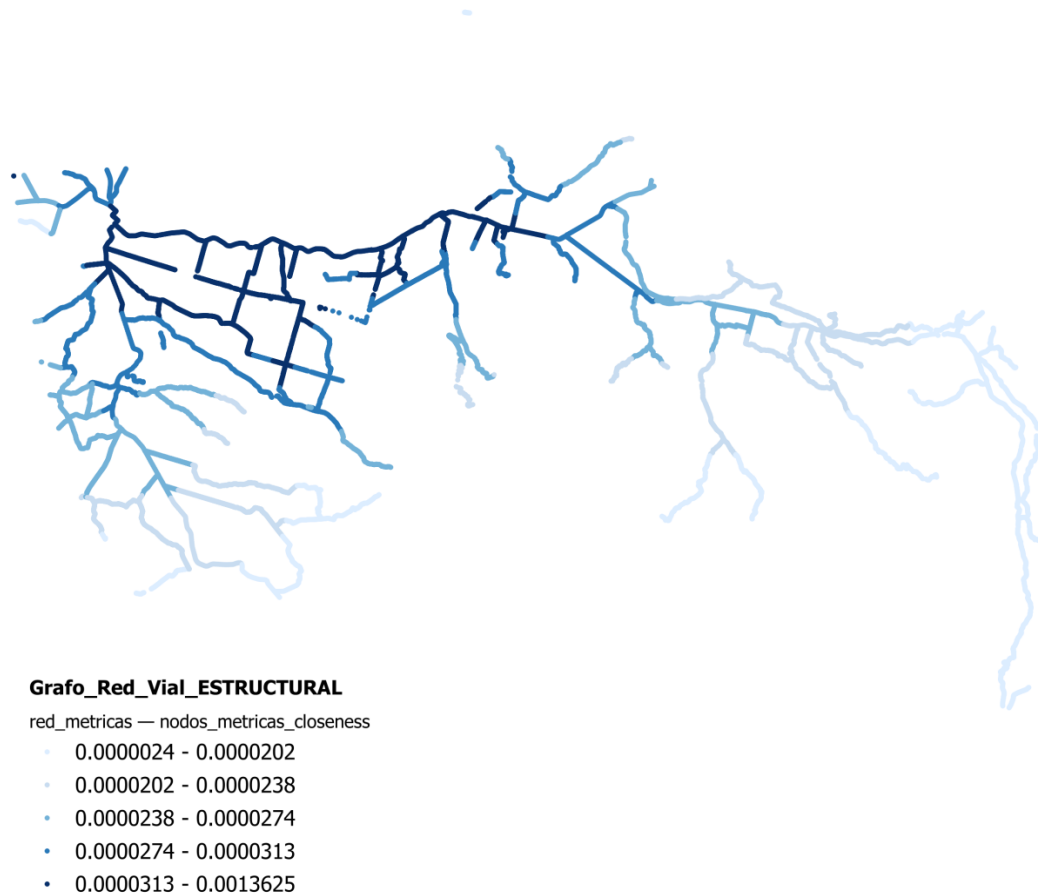
La visualización en escala logarítmica (Figura 27) permite apreciar con mayor claridad la presencia de un pequeño grupo de nodos con valores de closeness más altos, aunque estos siguen siendo marginales respecto al conjunto de la red.

Figura 27. Distribución de closeness centrality en escala logarítmica.



Desde una perspectiva espacial, los nodos con mayor cercanía no se distribuyen de forma homogénea, sino que se concentran en sectores específicos del sistema vial, asociados a puntos estratégicos de conexión entre tramos longitudinales (Figura 28).

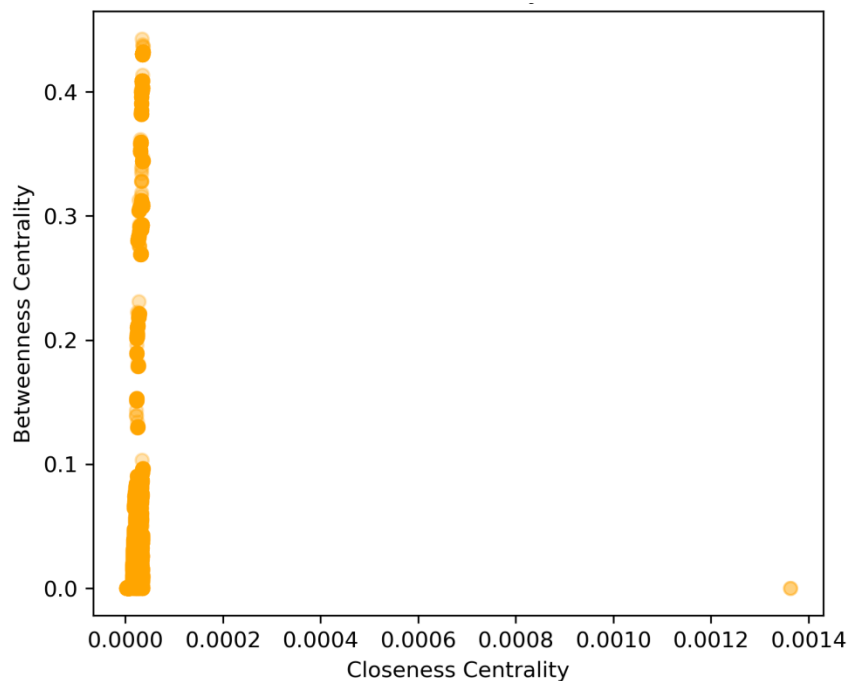
Figura 28. *Distribución espacial de closeness centrality en la red vial estructurante.*



En contraste, los sectores periféricos y los extremos longitudinales del territorio presentan valores significativamente más bajos de cercanía, evidenciando una accesibilidad estructural limitada y una mayor dependencia de recorridos largos para alcanzar otros puntos del sistema.

La relación entre closeness y betweenness (Figura 29) muestra que los nodos con alta intermediación no necesariamente presentan altos valores de cercanía. Esto indica que los corredores estructurantes de la red, si bien concentran los flujos potenciales, no siempre corresponden a los puntos más accesibles desde el conjunto del territorio.

Figura 29. *Relación entre closeness y betweenness centrality.*



Adicionalmente, el análisis comparativo entre nodos de articulación y nodos no críticos muestra que los nodos de articulación presentan, en promedio, valores de closeness ligeramente menores (0,000022) que los nodos no articulados (0,000028). Esto refuerza la idea de que los puntos estructuralmente críticos no son necesariamente los más accesibles, sino aquellos cuya posición topológica resulta clave para mantener la conectividad del sistema.

En conjunto, estos resultados evidencian que la red vial estructurante presenta una accesibilidad global limitada, coherente con su configuración predominantemente lineal y con la baja ramificación observada previamente. La estructura del sistema depende de recorridos largos y continuos, lo que puede traducirse en mayores distancias y tiempos de desplazamiento durante un proceso de evacuación peatonal, especialmente para los sectores más periféricos del territorio.

6.1.4. Articulation points: Vulnerabilidad de la red vial

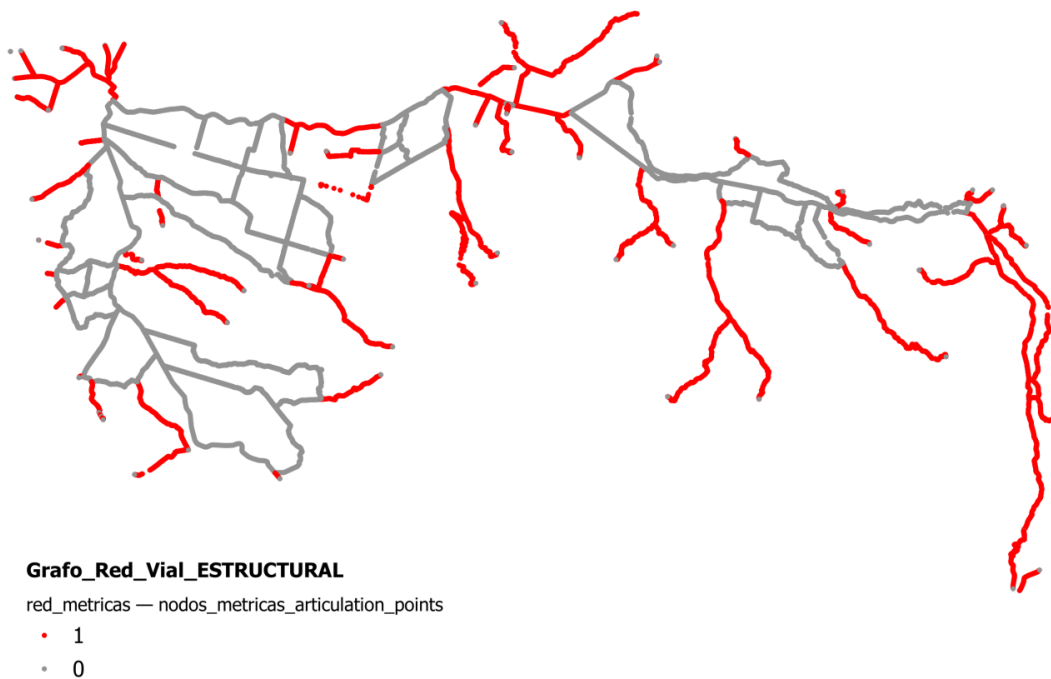
Los nodos de articulación (articulation points) corresponden a aquellos puntos de la red cuya eliminación provoca la fragmentación del grafo en componentes desconectados. Estos nodos representan elementos críticos para la continuidad funcional del sistema vial, ya que concentran un rol estructural clave en la conectividad del territorio.

La distribución espacial de los nodos de articulación (Figura 30) muestra que estos se concentran principalmente en tramos estratégicos que conectan los corredores longitudinales del sistema vial, así como en accesos hacia sectores periféricos. En contraste, las áreas con mayor densidad de intersecciones locales presentan una menor proporción de nodos críticos, evidenciando una mayor redundancia estructural en esos sectores.

Desde una perspectiva cuantitativa, aproximadamente el 50,37 % de los nodos de la red corresponden a nodos de articulación, lo que indica que una parte significativa del sistema depende de puntos cuya falla podría comprometer la conectividad global.

El análisis comparativo entre nodos de articulación y nodos no críticos muestra diferencias relevantes en sus características topológicas. En términos de accesibilidad, los nodos de articulación presentan valores promedio de closeness ligeramente menores (0,000022) que los nodos no articulados (0,000028), lo que indica que estos puntos no corresponden necesariamente a los sectores más accesibles del territorio, sino a aquellos cuya posición es estructuralmente estratégica para mantener la continuidad de la red.

Figura 30. *Distribución espacial de los nodos de articulación en la red vial estructurante.*



En cuanto a la conectividad local, los nodos de articulación presentan un grado promedio ligeramente mayor (2,0079) que los nodos no críticos (2,0016). Esto sugiere que estos puntos tienden a funcionar como intersecciones de enlace entre tramos lineales, articulando distintos segmentos del sistema sin necesariamente conformar nodos altamente ramificados.

La alta proporción de nodos de articulación es coherente con la configuración predominantemente lineal de la red vial, caracterizada por una baja ramificación y una fuerte dependencia de corredores continuos. En este tipo de estructuras, la interrupción de un número reducido de puntos puede generar efectos desproporcionados sobre la conectividad global.

Desde una perspectiva funcional, esta condición implica que el sistema de evacuación peatonal presenta una vulnerabilidad estructural elevada, ya que la pérdida de conectividad en nodos críticos podría aislar sectores completos del territorio, limitando el acceso a los Puntos de Encuentro Transitorios (PET).

En conjunto, los resultados evidencian que, si bien la red vial estructurante permite la conexión longitudinal del territorio, su baja redundancia y la alta presencia de nodos de articulación generan una dependencia significativa de puntos críticos, lo que constituye un factor de riesgo relevante en escenarios de evacuación por amenaza volcánica.

6.2. Simulación de escenarios de evacuación peatonal

Este apartado presenta los resultados de la simulación de evacuación peatonal bajo dos escenarios poblacionales contrastantes: (i) un escenario de población residente y (ii) un escenario de ocupación máxima crítica, que incorpora población flotante.

Ambos escenarios permiten evaluar cómo varían las distancias, los tiempos de evacuación y la presión sobre la infraestructura vial en función del volumen y la distribución espacial de la población.

6.2.1. Escenario 1: Población residente

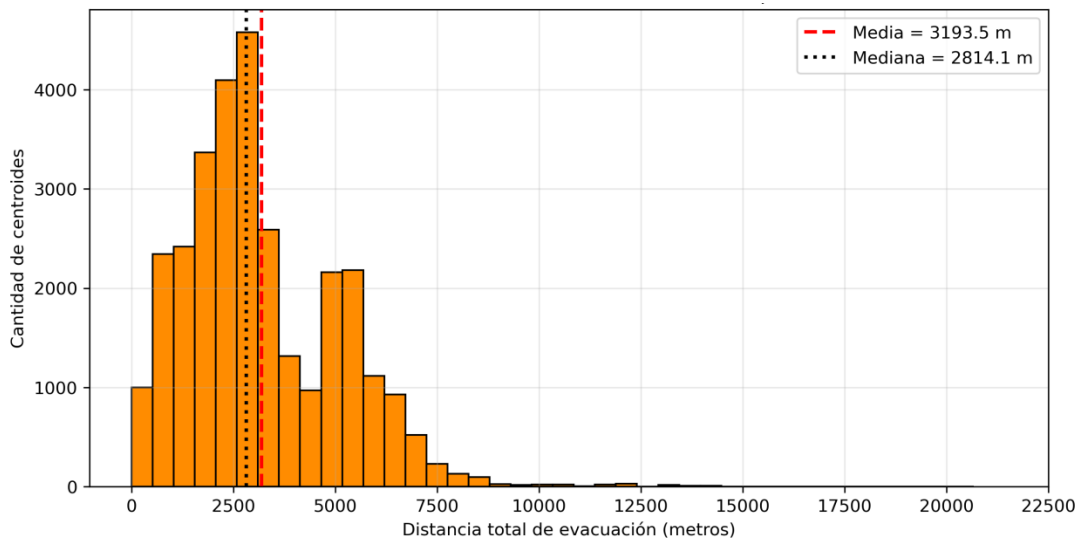
El Escenario 1 considera exclusivamente la población residente, distribuida a partir de los datos censales y territoriales. Cada vivienda se modela como un punto de origen dentro de la red vial, y las velocidades de desplazamiento peatonal se asignan según la composición etaria de los hogares, incorporando restricciones de movilidad para niños y adultos mayores. La simulación permitió estimar las distancias de evacuación hacia los Puntos de Encuentro Transitorios (PET) y los tiempos totales de desplazamiento para un total de 30.215 centroides residenciales, que representan aproximadamente 72.575 personas.

Los resultados muestran una distribución amplia y heterogénea tanto de las distancias como de los tiempos de evacuación.

La distancia total media recorrida por la población residente alcanza 3.193 m, con una mediana de 2.814 m. El 75 % de los centroides presenta distancias inferiores a 4.631 m, mientras que el 95 % se encuentra bajo los 6.456 m. Sin embargo, existen casos extremos que superan los 20 km, lo que evidencia situaciones de aislamiento territorial. La distribución de las distancias presenta una asimetría positiva, con una concentración mayoritaria en rangos medios y una cola larga asociada a sectores periféricos o con baja conectividad vial (Figura 31).

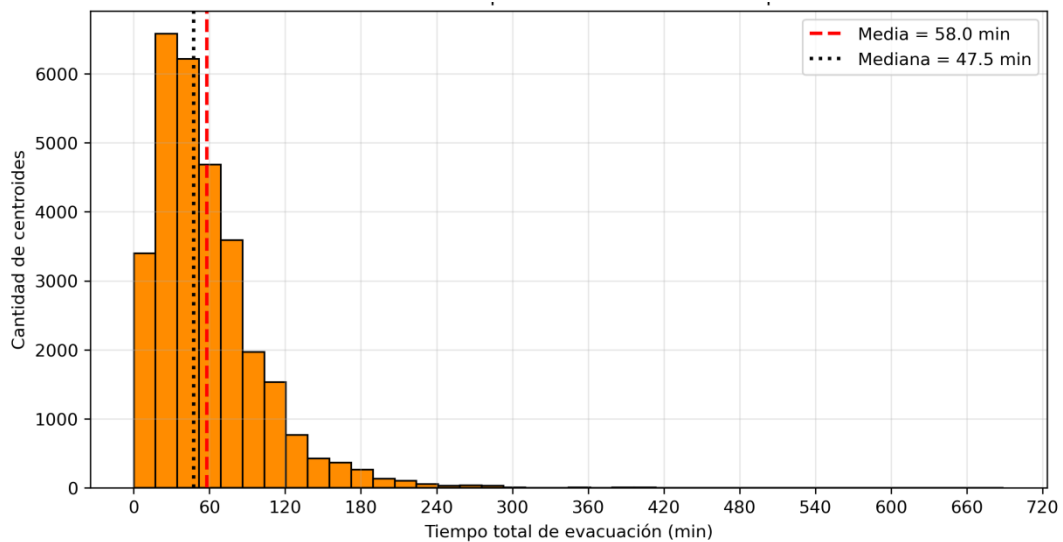
En términos temporales, el tiempo total medio de evacuación es de 58 minutos, con una mediana de 47,5 minutos. El 75 % de la población puede evacuar en menos de 74,4 minutos, mientras que el 90 % lo hace en menos de 111,6 minutos. No obstante, un 5 % de los casos supera los 137 minutos, y el valor máximo alcanza 689 minutos.

Figura 31. Distribución de las distancias totales de evacuación peatonal para la población residente.



La distribución de los tiempos presenta una marcada asimetría positiva, con una fuerte concentración de valores bajos y una cola larga hacia tiempos elevados, lo que indica una alta heterogeneidad territorial en las condiciones de evacuación (Figura 32).

Figura 32. Distribución de los tiempos totales de evacuación peatonal para la población residente.

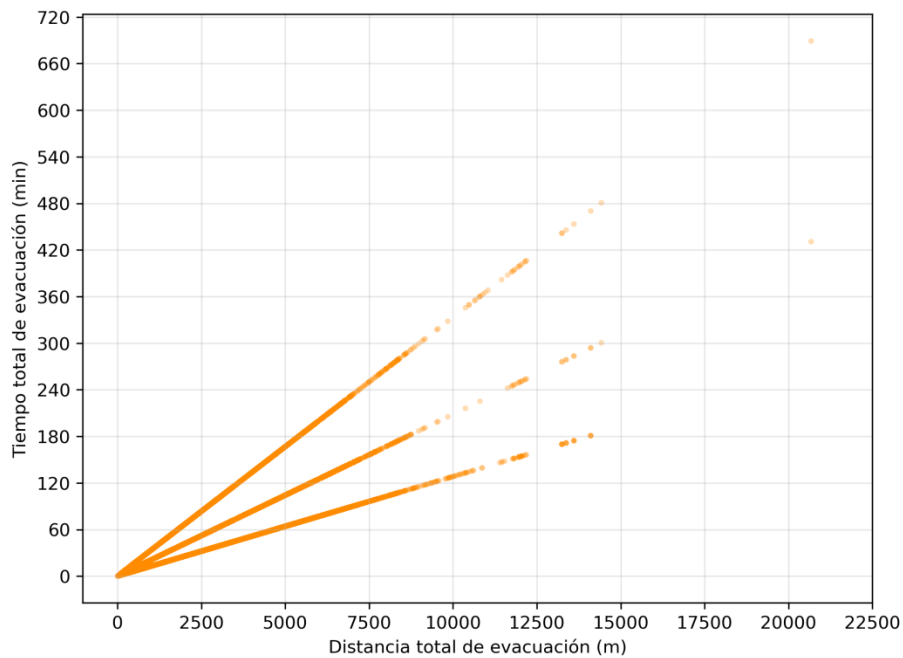


El análisis de la relación entre distancia total recorrida y tiempo de evacuación evidencia tres patrones lineales diferenciados, asociados a las distintas velocidades de desplazamiento definidas según la composición etaria de los hogares (Figura 33).

Estos patrones reflejan la relación funcional entre distancia y tiempo, donde la pendiente de cada trayectoria está determinada por la velocidad asignada a cada tipo de hogar. Para una misma distancia, los hogares con presencia de adultos mayores o niños presentan

tiempos significativamente mayores, lo que revela una vulnerabilidad diferenciada no solo territorial, sino también demográfica.

Figura 33. *Relación entre distancia y tiempo de evacuación peatonal según velocidades diferenciadas por composición etaria.*

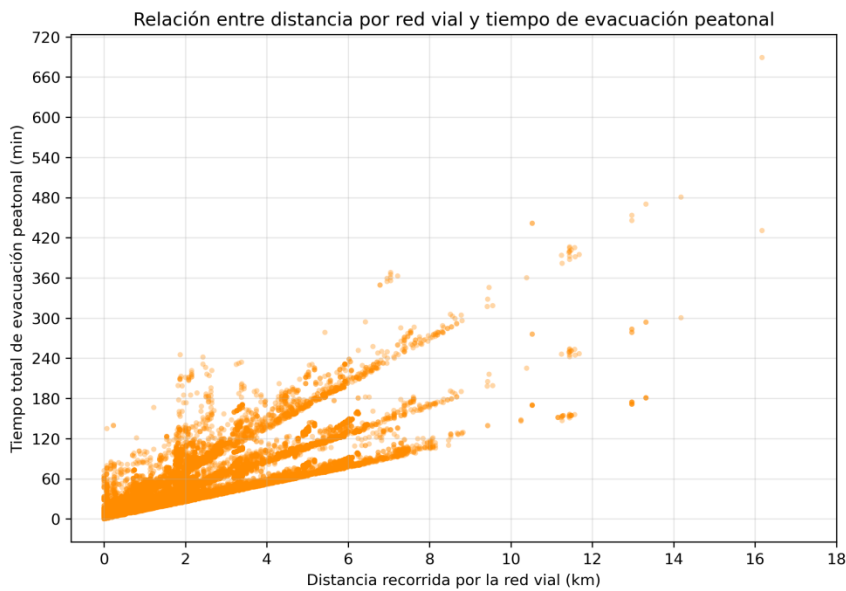


Al considerar específicamente la distancia recorrida por la red vial, se observa una correlación positiva clara con el tiempo total de evacuación peatonal para el conjunto de los centroides (Figura 34).

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido ($r = 0,794$) confirma una asociación fuerte entre ambas variables, aunque con una dispersión significativa atribuible a

diferencias en velocidad de desplazamiento, accesibilidad a la red y condiciones territoriales.

Figura 34. *Correlación entre la distancia recorrida por la red vial y el tiempo total de evacuación peatonal.*



El análisis comparativo entre comunas muestra diferencias relevantes en la forma de las distribuciones de tiempos y distancias de evacuación (Figuras 35 y 36).

En el caso de Pucón, la mayoría de los centroides presenta tiempos de evacuación más concentrados en rangos bajos, aunque con una cola larga asociada a sectores periféricos o de menor conectividad. En Villarrica, en cambio, se observa una mayor dispersión de los tiempos, con una proporción más alta de centroides en rangos intermedios y altos.

Un patrón similar se observa en la distribución de las distancias de evacuación. Pucón presenta una concentración mayor en distancias medias, mientras que Villarrica exhibe una mayor dispersión espacial, con recorridos más largos en sectores alejados de los PET.

Figura 35. Forma de la distribución de los tiempos de evacuación en distritos de Pucón y Villarrica.

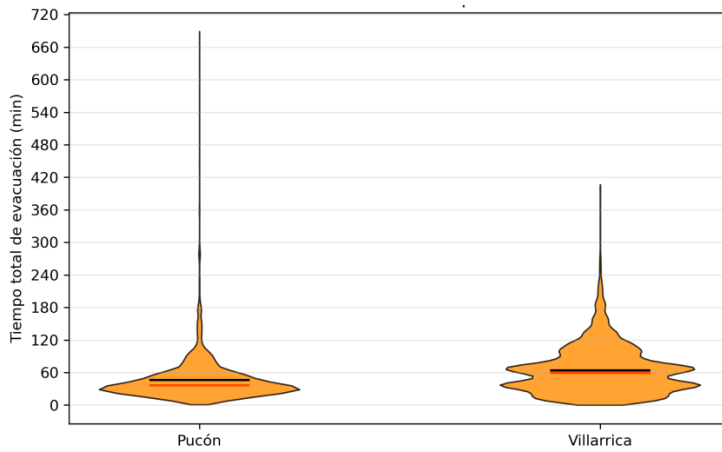
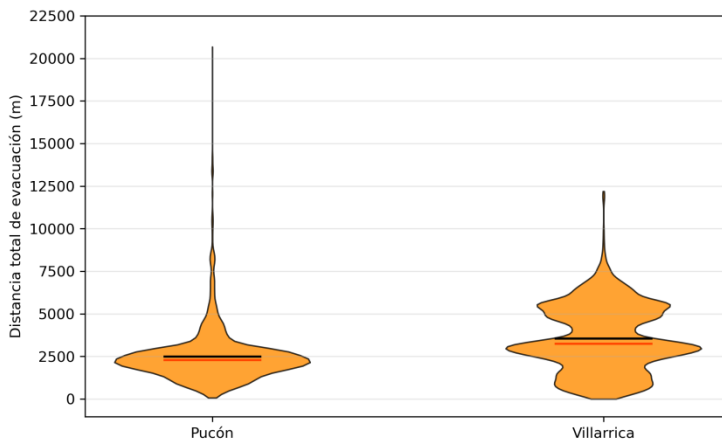
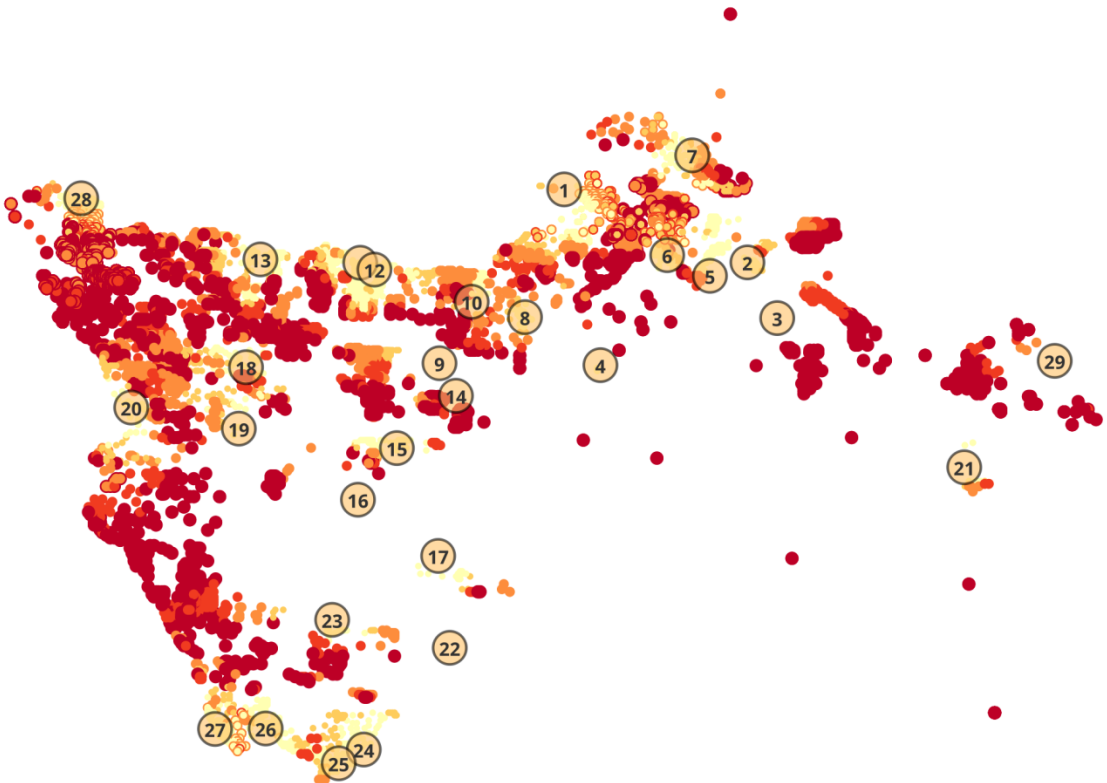


Figura 36. Forma de la distribución de las distancias de evacuación en distritos de Pucón y Villarrica.



La representación espacial de los tiempos totales de evacuación (Figura 37) muestra un patrón claramente estructurado por la configuración de la red vial, evidenciando la estrecha relación entre accesibilidad territorial y desempeño del proceso de evacuación.

Figura 37. Distribución espacial de los tiempos totales de evacuación en el Escenario 1.



01_Simulacion_Residente

Resultados

● Puntos_Encuentro_Transitorio

Resultados_Evacuación— tiempos_total_minutos

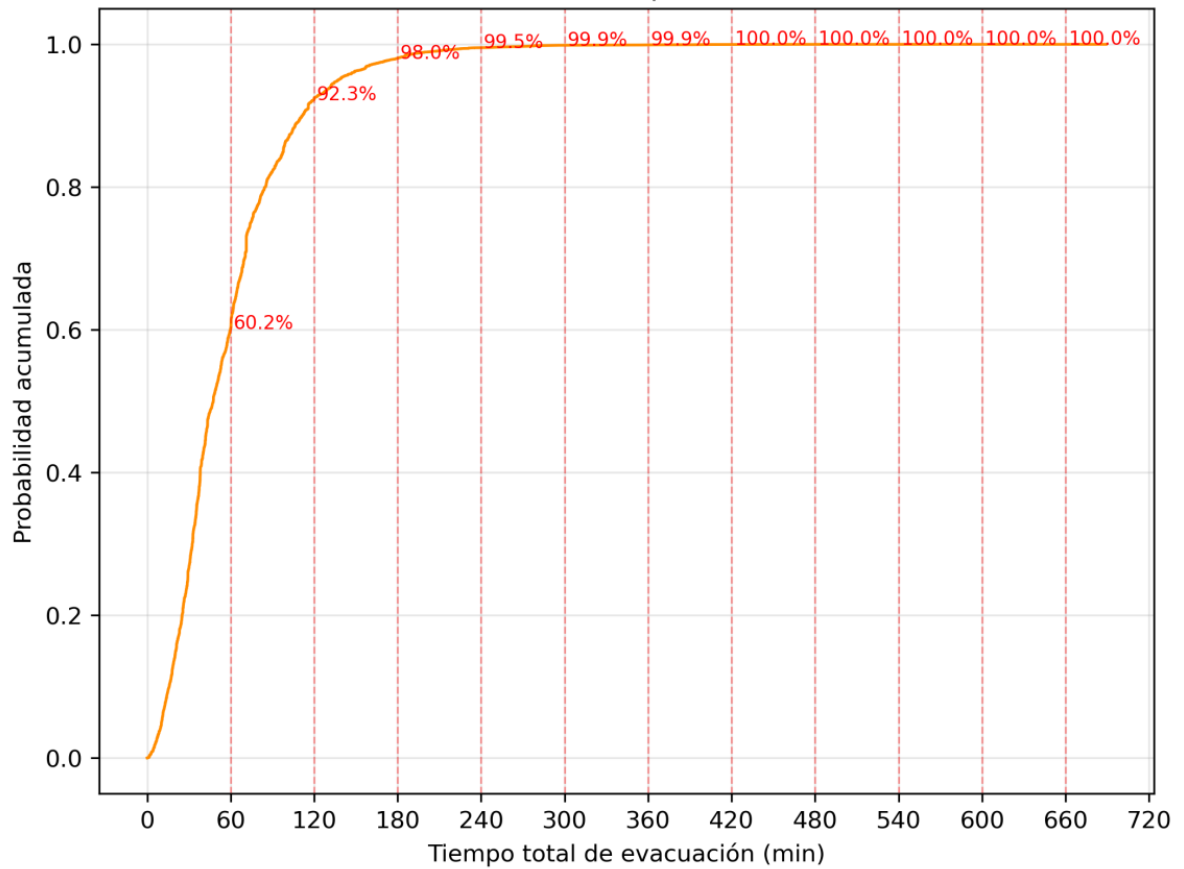
- 0 - 25
- 25 - 38
- 38 - 60
- 60 - 85
- 85 - 689

Los menores tiempos (0–25 minutos) se concentran en sectores cercanos a los ejes estructurantes de la red y a los PET, donde la conectividad es mayor y las distancias a recorrer son más cortas. Los tiempos intermedios (25–60 minutos) se distribuyen principalmente en zonas residenciales bien conectadas a los corredores principales. Los tiempos elevados (60–85 minutos y superiores) se concentran en sectores periféricos, áreas con menor densidad vial y mayor dependencia de recorridos largos y continuos. Los tiempos más extremos (85–689 minutos) se localizan principalmente en sectores aislados, con baja conectividad estructural y alta dependencia de nodos de articulación, reforzando la vulnerabilidad identificada en el análisis topológico de la red.

De forma complementaria, la curva de probabilidad acumulada de los tiempos de evacuación (Figura 38) permite evaluar el desempeño global del sistema en función de distintos umbrales temporales.

Se observa que aproximadamente que un 60 % de la población logra evacuar en menos de 60 minutos, un 80 % lo hace antes de 85 minutos, y más del 92 % evacúa antes de 120 minutos. Sin embargo, una fracción relevante de la población presenta tiempos superiores a estos valores, lo que pone de manifiesto la existencia de sectores donde la evacuación peatonal puede volverse lenta y operacionalmente compleja.

Figura 38. Probabilidad acumulada de los tiempos totales de evacuación peatonal para la población residente.



La distribución por rangos de distancia y tiempo muestra una proporción relativamente homogénea de centroides y personas en cada intervalo (Tabla 14).

No obstante, esta homogeneidad numérica no implica condiciones de evacuación equivalentes en todo el territorio (Figura 39 y 40). Más del 40 % de la población se ubica en rangos de distancia superiores a 3.139 m, y cerca del 20 % supera los 4.996 m, debiendo recorrer trayectorias largas para alcanzar los PET. Desde la perspectiva

temporal, los rangos de 38–60 minutos y 85–689 minutos concentran en conjunto más del 44 % de la población, y el 22,8 % presenta tiempos superiores a 85 minutos, lo que indica la presencia de procesos de evacuación prolongados y potencialmente críticos.

Tabla 14. *Distribución de centroides y personas según rangos de distancia y tiempo de evacuación en el Escenario 1.*

DISTRIBUCIÓN DISTANCIAS DE EVACUACIÓN			
RANGO	CENTROIDES	PERSONAS	
1–1583 m	6039	14188	19.5%
1583–2467 m	6071	14367	19.8%
2467–3139 m	5922	14198	19.6%
3139–4996 m	6145	15442	21.3%
4996–20675 m	6038	14380	19.8%
	30215	72575	

DISTRIBUCIÓN TIEMPOS DE EVACUACIÓN			
RANGO	CENTROIDES	PERSONAS	
0–25 min	5701	12720	17.5%
25–38 min	5799	12858	17.7%
38–60 min	6571	15810	21.8%
60–85 min	6089	14675	20.2%
85–689 min	6055	16512	22.8%
	30215	72575	

Finalmente, la distribución de personas evacuadas hacia los PET (Figura 41) evidencia una fuerte concentración funcional en un número reducido de destinos. En particular, el PET Salida Villarrica concentra aproximadamente 14.958 personas, seguido por Península (5.082 personas) y Los Calabozos (2.146 personas). En contraste, otros PET presentan una utilización mínima. Esta concentración desigual refuerza la vulnerabilidad estructural del sistema, ya que los corredores principales y ciertos puntos de encuentro se ven potencialmente sobrecargados, mientras que otros permanecen subutilizados.

Figura 39. Distribución global de los tiempos totales de evacuación peatonal.

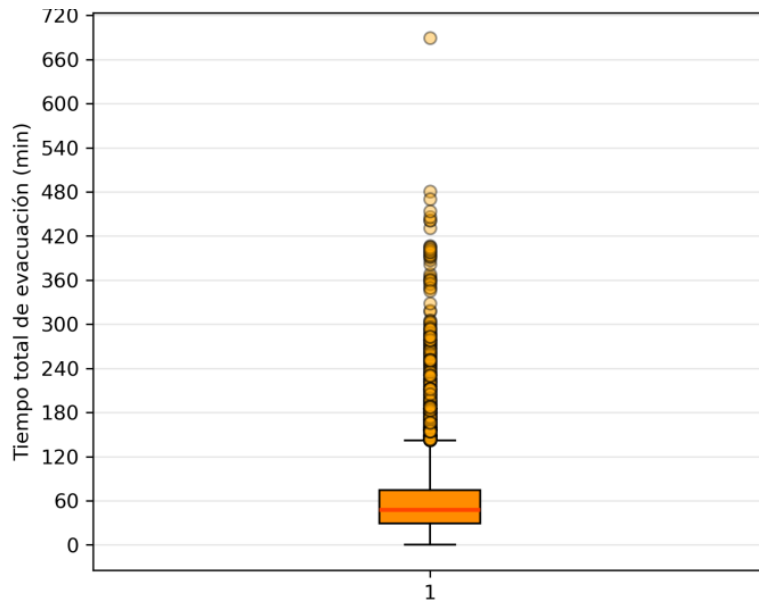


Figura 40. Distribución global de las distancias totales de evacuación peatonal.

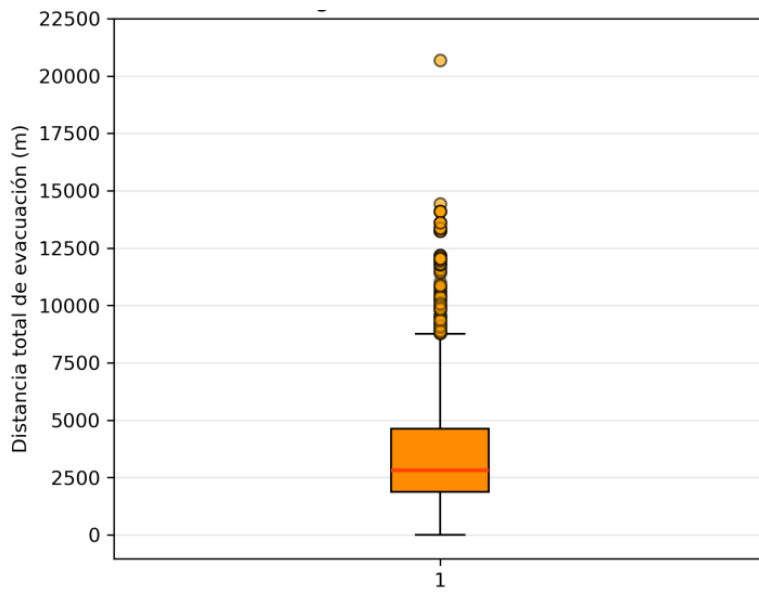
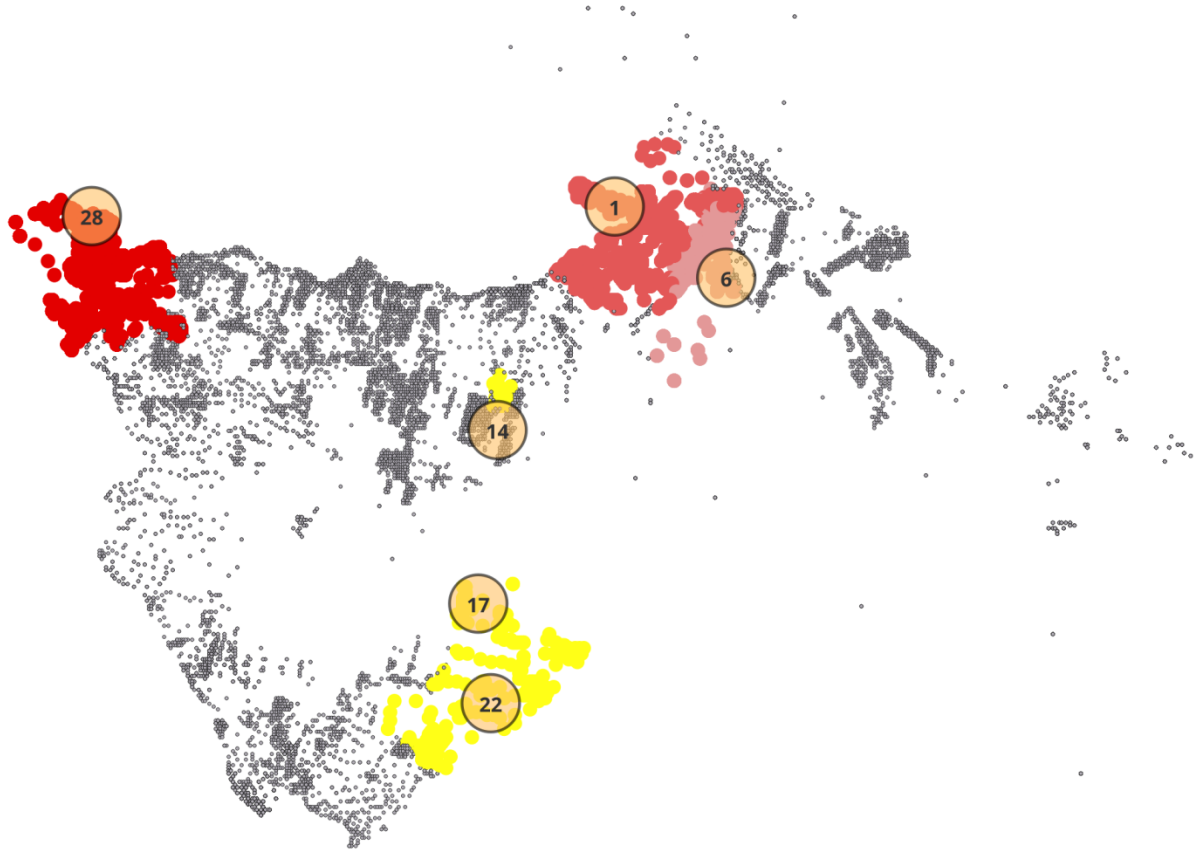


Figura 41. Distribución de personas evacuadas hacia top 3 de PET con más evacuación y menos.



01_Simulacion_Residente

Resultados

 Puntos_Encuentro_Transitorio

Resultados_Evacuación— evacuacion_PET

- (28) Salida_Villarrica / 14958 personas
- (1) Península / 5.082 personas
- (6) Los Calabozos / 2.146 personas
- (14) Estrella Blanca Predio Carmen San Martín / 1 persona
- (22) Pino Huacho Predio Pedro Vásquez / 3 personas
- (17) Voipir Seco Predio Hugo Vera / 34 personas
- Otros PET / 7991 personas

6.2.2. Escenario 2: Población máxima crítica

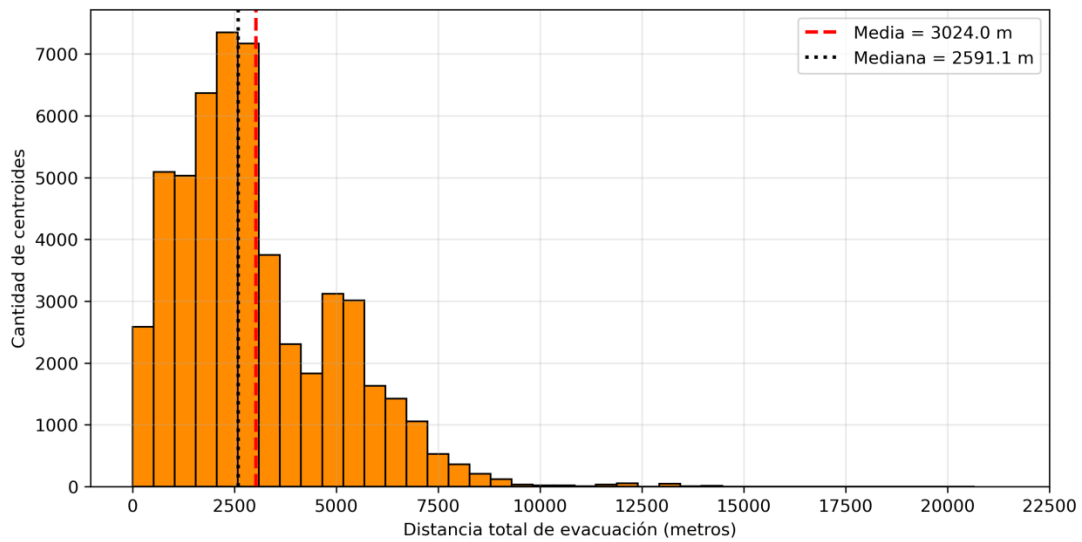
El Escenario 2 representa una condición de ocupación máxima crítica del territorio, incorporando, además de la población residente, la población flotante asociada directamente a lo que fue la temporada estival 2025, cuando la zona alcanza sus mayores niveles de afluencia turística y uso de segundas viviendas. La distribución de esta población flotante se realizó según los patrones espaciales descritos en el capítulo datos.

Este escenario no modifica la estructura de la red vial ni los parámetros de movilidad peatonal, sino que incrementa la presión demográfica sobre el sistema, intensificando la demanda de evacuación en los mismos corredores estructurantes y Puntos de Encuentro Transitorios (PET). La simulación permite evaluar cómo esta sobrecarga poblacional, afecta las distancias, los tiempos de evacuación y la distribución de flujos hacia los PET bajo una condición de máxima exigencia operativa. Se considera un total de 53.226 centroides de viviendas que albergan una población de 197.408 personas.

La Figura 42 muestra la distribución de las distancias totales de evacuación peatonal bajo el escenario de población máxima crítica. La distancia media recorrida alcanza los 3.024 m, con una mediana de 2.591 m, valores ligeramente inferiores a los observados en el Escenario 1. El 75 % de los centroides presenta distancias menores a 4.201 m, mientras que el 95 % se mantiene bajo los 6.691 m. No obstante, persisten casos extremos con recorridos que superan los 20 km. La distribución mantiene una asimetría

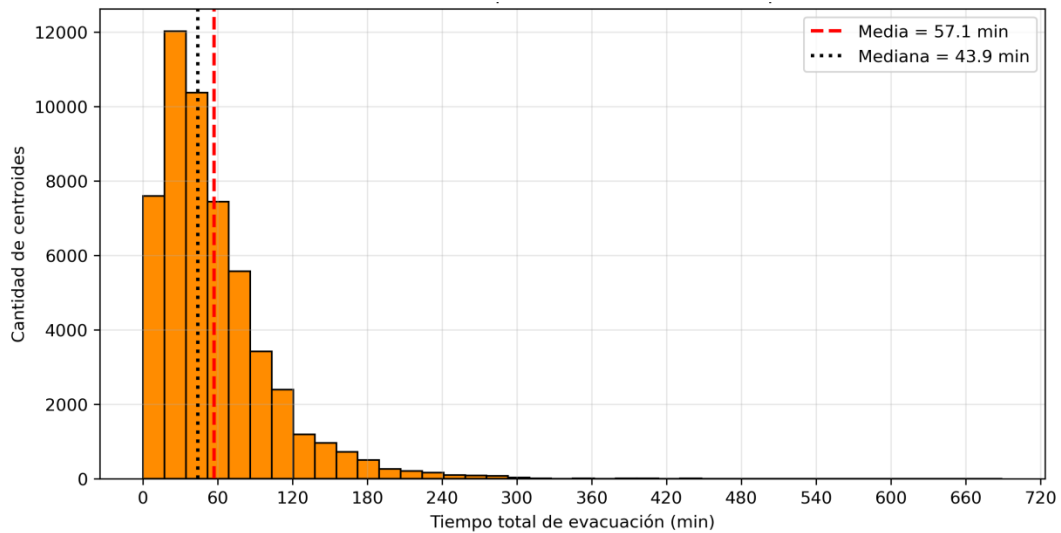
positiva, con una fuerte concentración en rangos intermedios y una cola larga asociada a áreas periféricas o con baja conectividad vial.

Figura 42. Distribución de las distancias totales de evacuación peatonal para la población máxima crítica.



En términos temporales, el tiempo total medio de evacuación es de 57,1 minutos, con una mediana de 43,9 minutos. El 75 % de la población puede evacuar en menos de 74 minutos, mientras que un 10% presenta tiempos superiores a 114 minutos, alcanzando valores máximos cercanos a los 689 minutos (Figura 43). La distribución de los tiempos también presenta una marcada asimetría positiva, con una fuerte concentración en rangos bajos y una cola larga hacia valores elevados.

Figura 43. Distribución de los tiempos totales de evacuación peatonal para la población máxima crítica.

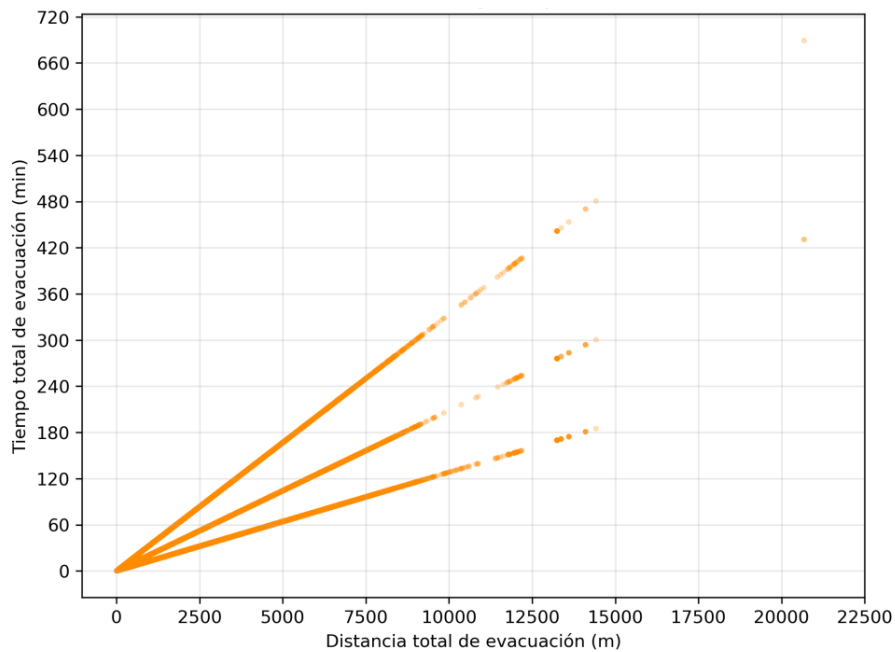


El análisis conjunto entre la distancia total recorrida y el tiempo de evacuación evidencia tres patrones lineales diferenciados, asociados a las distintas velocidades de desplazamiento asignadas según la composición etaria de los hogares (Figura 44), lo que confirma una relación funcional directa entre la distancia recorrida y el tiempo total de evacuación. Para una misma distancia, los grupos con presencia de adultos mayores o niños presentan tiempos mayores, evidenciando una vulnerabilidad diferenciada tanto territorial como demográfica.

La relación entre distancia y tiempo de evacuación presenta una asociación positiva fuerte ($r = 0,809$, Figura 45), lo que confirma que el recorrido por la red vial es el principal determinante del tiempo total.

La dispersión observada refleja diferencias en velocidad de caminata asociadas a la composición etaria de los hogares, así como variaciones en accesibilidad territorial.

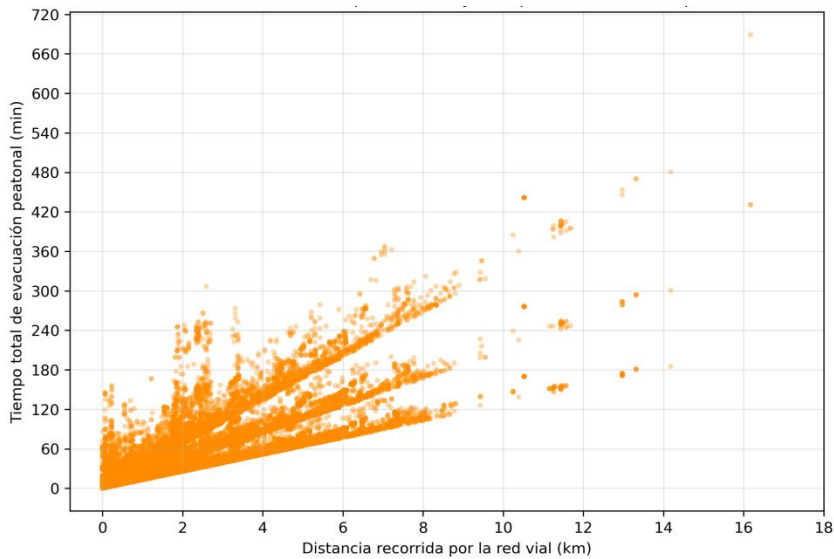
Figura 44. *Relación entre distancia y tiempo de evacuación peatonal según velocidades diferenciadas por composición etaria.*



El análisis comparativo entre Pucón y Villarrica en el Escenario 2 muestra que los patrones observados en el escenario residente se mantienen bajo condiciones de ocupación máxima (Figuras 46 y 47).

En Pucón, los tiempos y distancias de evacuación continúan concentrándose en rangos bajos, mientras que Villarrica presenta una mayor dispersión, con una proporción más elevada de centroides en rangos intermedios y altos.

Figura 45. *Correlación entre la distancia recorrida por la red vial y el tiempo total de evacuación peatonal.*



La representación espacial de los tiempos totales de evacuación (Figura 48) muestra un patrón claramente estructurado por la configuración de la red vial. Los menores tiempos (0–25 minutos) se concentran en sectores próximos a los ejes estructurantes y a los PET, donde la conectividad es mayor. Los tiempos intermedios (25–60 minutos) se distribuyen en áreas residenciales bien conectadas, mientras que los tiempos elevados (60–85 minutos y superiores) predominan en sectores periféricos, con menor densidad vial y alta dependencia de recorridos largos y continuos.

Los tiempos más extremos (85–689 minutos) se localizan principalmente en áreas aisladas, caracterizadas por baja conectividad estructural y alta dependencia de nodos de

articulación, reforzando la vulnerabilidad territorial identificada en el análisis topológico de la red.

Figura 46. Forma de la distribución de los tiempos de evacuación en distritos de Pucón y Villarrica.

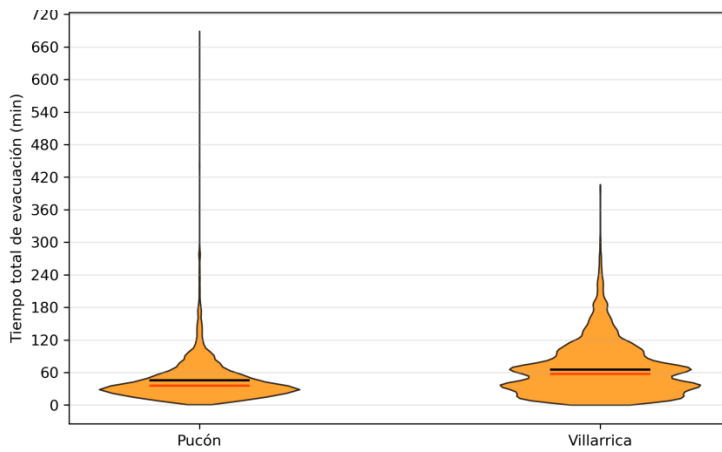


Figura 47. Forma de la distribución de las distancias de evacuación en distritos de Pucón y Villarrica.

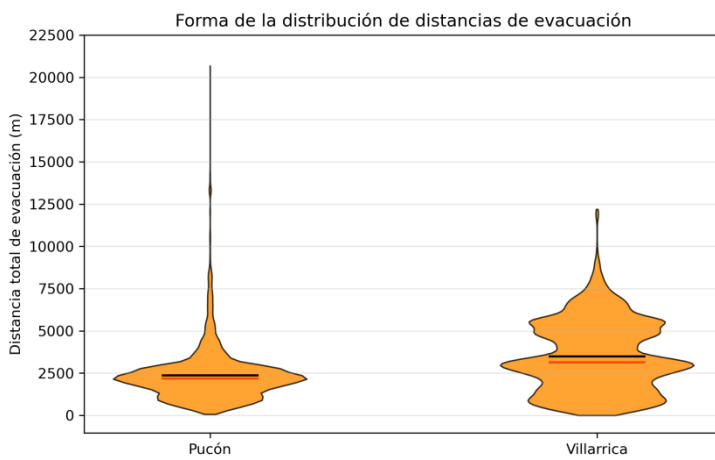


Figura 48. Distribución espacial de los tiempos totales de evacuación en el Escenario 2.



02_Simulacion_Critica

Resultados

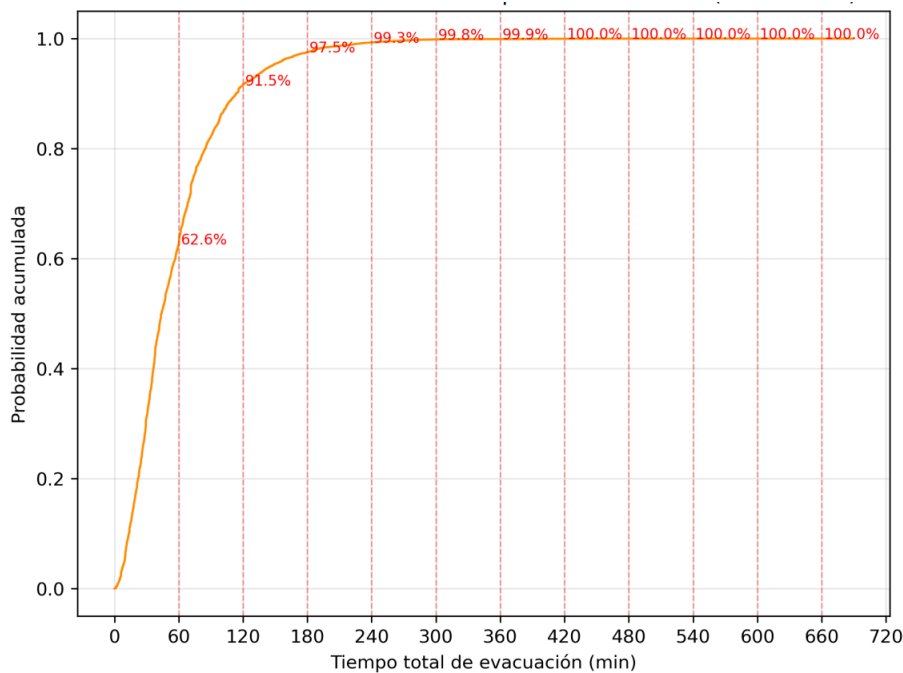
● Puntos_Encuentro_Transitorio 2

Resultados_Evacuación— tiempos_total_minutos

- 0 - 25
- 25 - 38
- 38 - 60
- 60 - 85
- 85 - 689

La curva de probabilidad acumulada (Figura 49) muestra que el 62.6 % de la población evacúa en menos de 60 minutos, el 80 % antes de 85 minutos y el 91.5 % antes de 120 minutos. No obstante, una fracción relevante supera estos umbrales, lo que pone en evidencia que, bajo condiciones de máxima ocupación, existen sectores donde la evacuación peatonal puede volverse lenta y operacionalmente compleja.

Figura 49. Probabilidad acumulada de los tiempos totales de evacuación peatonal para escenario crítico máximo.



A diferencia del Escenario 1, la distribución por rangos de distancia y tiempo en el Escenario 2 ya no presenta un patrón marcadamente homogéneo entre los distintos intervalos (Tabla 15). La incorporación de la población flotante genera una

concentración desigual de personas en determinados rangos, evidenciando una mayor presión territorial sobre sectores específicos del sistema de evacuación.

En términos de distancia, se observa que los rangos más cercanos a los PET concentran una proporción considerablemente mayor de población: el intervalo de 1–1.583 m agrupa al 26 % de las personas, mientras que este porcentaje desciende progresivamente en los rangos más lejanos. No obstante, una fracción relevante de la población continúa ubicada en distancias superiores a 3.139 m (18.1 %) y a 4.996 m (17.8 %), lo que implica recorridos largos para alcanzar los Puntos de Encuentro Transitorios.

Tabla 15. *Distribución de centroides y personas según rangos de distancia y tiempo de evacuación en el Escenario 2.*

DISTRIBUCIÓN DISTANCIAS DE EVACUACIÓN			
RANGO	CENTROIDES	PERSONAS	
1–1583 m	13041	50799	25.7%
1583–2467 m	11815	44813	22.7%
2467–3139 m	9017	30683	15.5%
3139–4996 m	9660	35731	18.1%
4996–20675 m	9665	35214	17.8%
s/i	28	168	0.1%
	53226	197408	
DISTRIBUCIÓN TIEMPOS DE EVACUACIÓN			
RANGO	CENTROIDES	PERSONAS	
0–25 min	12497	47448	24.0%
25–38 min	10170	36067	18.3%
38–60 min	10644	38503	19.5%
60–85 min	9272	32528	16.5%
85–689 min	10615	42694	21.6%
s/i	28	168	0.1%
	53226	197408	

Desde la perspectiva temporal, la distribución también evidencia una mayor desigualdad. Mientras que el 24,0 % de la población evacúa en menos de 25 minutos, los rangos de mayor duración siguen concentrando una proporción significativa: el 21,6 % presenta tiempos superiores a 85 minutos, y el 38.1 % supera los 60 minutos. Esto indica que, bajo condiciones de máxima ocupación, una parte sustantiva de la población enfrenta procesos de evacuación prolongados.

Las Figuras 50 y 51 sintetizan la distribución global de los tiempos y distancias de evacuación en el Escenario 2. Ambas variables presentan una asimetría positiva marcada, con una alta concentración de valores en rangos bajos y una cola larga de casos extremos, especialmente en los tiempos de evacuación.

Esta configuración confirma que, si bien una parte importante de la población evacúa en tiempos relativamente acotados, existen centroides que enfrentan recorridos y tiempos significativamente mayores, asociados a condiciones territoriales de menor accesibilidad y mayor aislamiento estructural.

Finalmente, la distribución de personas evacuadas hacia los PET (Figura 52) evidencia una fuerte concentración funcional en un número reducido de destinos. En particular, el PET Salida Villarrica concentra 35.737 personas, seguido por Península (17.481 personas) y Los Calabozos (7.314 personas). En contraste, otros PET presentan una utilización mínima.

Figura 50. *Distribución global de los tiempos totales de evacuación peatonal.*

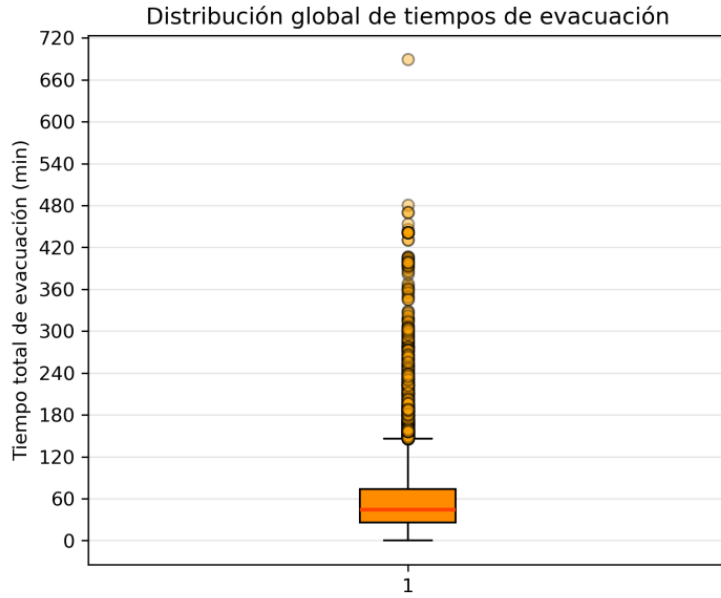


Figura 51. *Distribución global de las distancias totales de evacuación peatonal.*

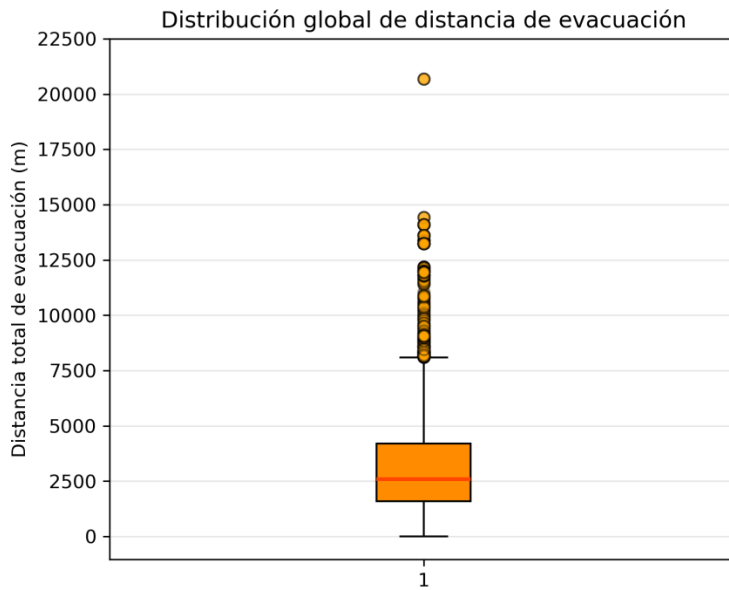
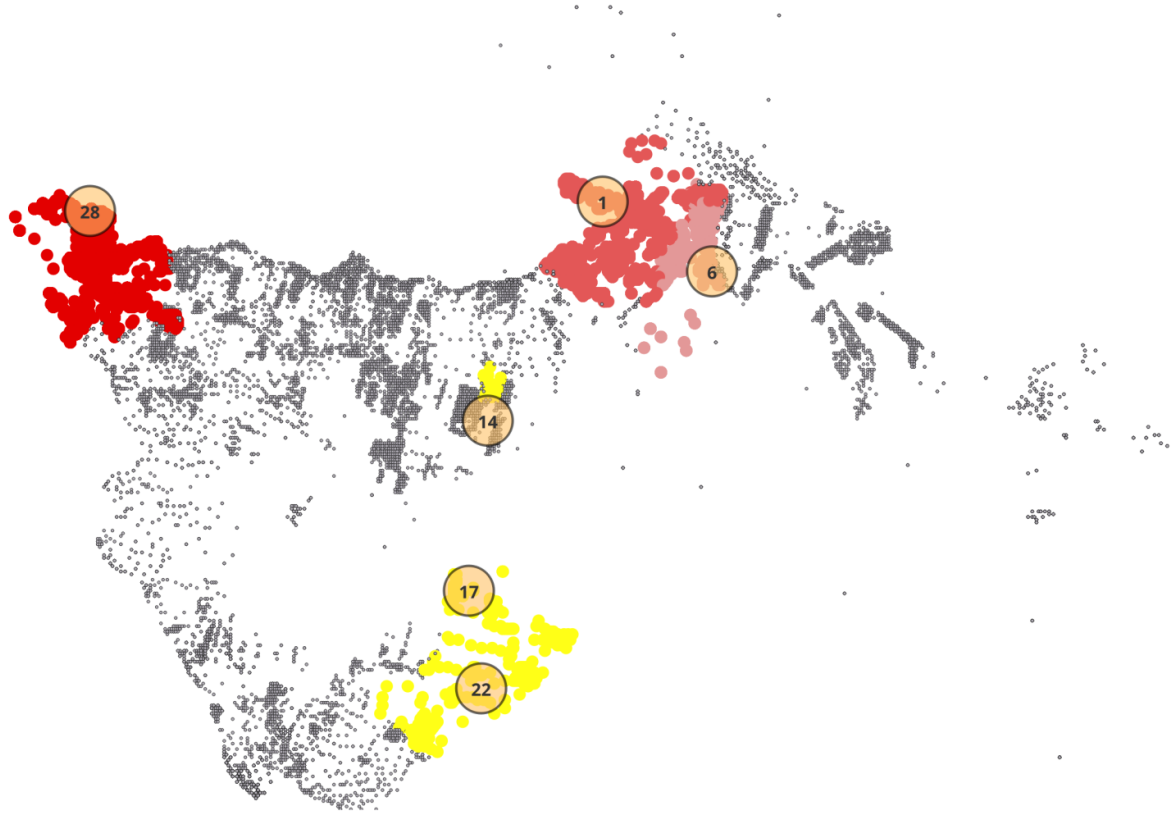


Figura 52. Distribución de personas evacuadas hacia top 3 de PET con más evacuación y menos.










02_Simulacion_Critica

Resultados

 Puntos_Encuentro_Transitorio 2

Resultados_Evacuación— evacuacion_PET

-  (28) Salida_Villarrica / 35737 personas
-  (1) Península / 17481 personas
-  (6) Los Calabozos / 7314 personas
-  (14) Estrella Blanca Predio Carmen San Martín / 4 personas
-  (22) Pino Huacho Predio Pedro Vásquez / 9 personas
-  (17) Voipir Seco Predio Hugo Vera / 77 personas
-  Otros PET / 31627 personas

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten confirmar la hipótesis central de este estudio: la capacidad de evacuación peatonal en el entorno del Volcán Villarrica está fuertemente condicionada por la estructura territorial, la accesibilidad a la red vial y la localización de la población respecto a los Puntos de Encuentro Transitorios (PET). Aun bajo supuestos operativos favorables y escenarios de alerta temprana, existen sectores donde la evacuación resulta temporalmente compleja o potencialmente inviable, especialmente en áreas de alta exposición volcánica y baja conectividad vial (Tabla 16 y Tabla 17).

Tabla 16. *Síntesis integrada de exposición al peligro volcánico y tiempos de evacuación peatonal por viviendas y población.*

GRADO PELIGRO	VIVIENDAS	PERSONAS	VIVIENDAS	PERSONAS
Muy Alto	17816	71392	33.5%	36.2%
Alto	8268	33678	15.5%	17.1%
Moderado	2811	11272	5.3%	5.7%
Bajo	20060	62130	37.7%	31.5%
Sin Peligro	4271	18936	8.0%	9.6%
	53226	197408		

DISTRITO	VIVIENDAS	PERSONAS	VIVIENDAS	PERSONAS
	53226	197408		
1_P	3723	15414	7.0%	7.8%
1_V	2353	7092	4.4%	3.6%
2_P	16489	64809	31.0%	32.8%
2_V	2379	8561	4.5%	4.3%
3_V	12358	33876	23.2%	17.2%
4_V	3993	18436	7.5%	9.3%
5_P	1578	6335	3.0%	3.2%
5_V	5088	19371	9.6%	9.8%
6_V	5265	23514	9.9%	11.9%

Tabla 17. Resultados consolidados de riesgo volcánico y desempeño de evacuación peatonal.

GRADO	VIV.	PERS.	GRADO	VIV.	PERS.	GRADO	VIV.	PERS.	GRADO	VIV.	PERS.	GRADO	VIV.	PERS.
Muy Alto	17816	71392	Alto	8268	33678	Moderado	2811	11272	Bajo	20060	62130	Sin Riesgo	4243	18768
0–25 min	6375	25381	0–25 min	1654	6887	0–25 min	649	2800	0–25 min	2976	9051	0–25 min	843	3329
1_P	144	557	1_P	682	2996	1_P	88	316	1_P	19	87	1_P	11	38
1_V			1_V			1_V			1_V	1904	5732	1_V	26	49
2_P	4051	15838	2_P	615	2353	2_P	187	835	2_P	225	832	2_P	6	26
2_V			2_V			2_V			2_V	390	917	2_V		
3_V			3_V			3_V			3_V	138	302	3_V	4	12
4_V	474	2209	4_V	287	1227	4_V	361	1575	4_V	6	24	4_V	38	209
5_P	21	72	5_P	54	238	5_P			5_P			5_P	11	43
5_V	99	439	5_V	16	73	5_V	13	74	5_V	294	1157	5_V	81	272
6_V	1586	6266	6_V			6_V			6_V			6_V	666	2680
25–38 min	4195	15682	25–38 min	2328	9028	25–38 min	279	1138	25–38 min	2924	8347	25–38 min	444	1872
1_P	53	218	1_P	1145	4610	1_P	58	222	1_P	10	53	1_P	43	138
1_V			1_V			1_V			1_V	275	871	1_V	7	14
2_P	3340	11944	2_P	843	3043	2_P	162	658	2_P	197	976	2_P	1	6
2_V			2_V			2_V			2_V	701	2023	2_V		
3_V			3_V			3_V			3_V	1496	3515	3_V	5	12
4_V	299	1431	4_V	216	838	4_V	53	223	4_V	8	42	4_V	6	33
5_P	48	180	5_P	37	178	5_P			5_P			5_P	17	79
5_V	98	353	5_V	87	359	5_V	6	35	5_V	237	867	5_V	62	237
6_V	357	1556	6_V			6_V			6_V			6_V	303	1353
38–60 min	3695	14599	38–60 min	2061	8179	38–60 min	278	1133	38–60 min	4004	12044	38–60 min	606	2548
1_P	63	189	1_P	687	2828	1_P	37	157	1_P	9	51	1_P	65	272
1_V			1_V			1_V			1_V	141	426	1_V		
2_P	2420	9301	2_P	966	3555	2_P	202	785	2_P	301	1385	2_P	2	12
2_V			2_V			2_V			2_V	372	1409	2_V	110	483
3_V			3_V			3_V			3_V	2852	7401	3_V	74	185
4_V	438	1940	4_V	199	994	4_V	27	147	4_V	26	109	4_V	10	34
5_P	137	610	5_P	102	359	5_P			5_P			5_P	44	153
5_V	396	1436	5_V	107	443	5_V	12	44	5_V	303	1263	5_V	65	230
6_V	241	1123	6_V			6_V			6_V			6_V	236	1179
60–85 min	1844	7847	60–85 min	1121	4769	60–85 min	709	2343	60–85 min	4965	14707	60–85 min	633	2862
1_P	15	52	1_P	424	1842	1_P	19	74	1_P	2	12	1_P	19	76
1_V			1_V			1_V			1_V			1_V		
2_P	1084	4523	2_P	323	1415	2_P	85	397	2_P	139	750	2_P	2	12
2_V			2_V			2_V			2_V	406	1701	2_V	45	197
3_V			3_V			3_V	1	3	3_V	3914	10393	3_V	50	124
4_V	312	1465	4_V	151	690	4_V	49	214	4_V	25	86	4_V	7	37
5_P	169	631	5_P	149	490	5_P	3	14	5_P			5_P	41	149
5_V	152	632	5_V	74	332	5_V	552	1641	5_V	479	1765	5_V	82	306
6_V	112	544	6_V			6_V			6_V			6_V	387	1961
85–689 min	1707	7883	85–689 min	1104	4815	85–689 min	896	3858	85–689 min	5191	17981	85–689 min	1717	8157
1_P	28	105	1_P	19	70	1_P	5	15	1_P	2	12	1_P	48	256
1_V			1_V			1_V			1_V			1_V		
2_P	734	3415	2_P	392	1670	2_P	56	263	2_P	153	807	2_P	3	8
2_V			2_V			2_V			2_V	298	1562	2_V	57	269
3_V			3_V			3_V	4	16	3_V	3796	11835	3_V	24	78
4_V	296	1415	4_V	267	1336	4_V	269	1579	4_V	108	335	4_V	61	244
5_P	247	1094	5_P	370	1509	5_P	16	64	5_P			5_P	112	472
5_V	279	1246	5_V	56	230	5_V	546	1921	5_V	834	3430	5_V	158	586
6_V	123	608	6_V			6_V			6_V			6_V	1254	6244

En términos de exposición al peligro, el 33,5 % de las viviendas y 36.2% de las personas se emplaza en zonas de Muy Alto Riesgo, y al incorporar las zonas de Alto Riesgo, la cifra asciende al 49 % de las viviendas, concentrando el 53,2 % de la población del área de estudio. En contraste, solo un 8 % de las viviendas se localiza en zonas clasificadas como fuera de peligro. Estos resultados evidencian que cerca de la mitad del parque habitacional y más de la mitad de la población residen en áreas de elevada amenaza volcánica.

Desde la perspectiva de la capacidad de evacuación, los resultados muestran un desempeño relativamente positivo del sistema en términos generales: del total de viviendas emplazadas en zonas de Alto y Muy Alto Riesgo, el 80,1 % logra evacuar hacia un PET en menos de 60 minutos, mientras que solo un 9,6 % presenta tiempos superiores a 85 minutos. Esto sugiere que la planificación actual de los PET, en relación con la estructura urbana y los ejes viales principales, permite una evacuación eficiente para una parte mayoritaria de la población expuesta.

Sin embargo, el análisis también identifica un subconjunto crítico de viviendas y personas, que corresponden al 10.85% y 12.82% del total respectivamente, que combinan dos condiciones de alta vulnerabilidad: localización en zonas de Alto o Muy Alto Riesgo y tiempos de evacuación prolongados (superiores a 60 minutos, e incluso mayores a 85 minutos). Este grupo representa una fracción importante de la población y concentra los escenarios más complejos de evacuación, donde la duración del

desplazamiento y la dependencia de rutas únicas aumentan la probabilidad de fallas operativas.

La configuración de la red vial explica en gran medida estos patrones. La red presenta un carácter predominantemente lineal, con un grado de centralidad promedio bajo ($\text{degree centrality} = 2$), lo que implica una fuerte dependencia de ejes estructurantes únicos. Las viviendas con mayores tiempos de evacuación se localizan, en su mayoría, en sectores alejados de las vías con mayor conectividad, donde existen rutas únicas de salida, lo que incrementa la vulnerabilidad frente a interrupciones, congestión o bloqueos.

Asimismo, muchas de estas viviendas se sitúan en áreas con valores elevados de $\text{betweenness centrality}$, es decir, en tramos por donde necesariamente deben pasar múltiples flujos de evacuación. Esto indica un alto riesgo de cuellos de botella y potencial colapso del sistema ante un aumento de la demanda o fallas en la infraestructura. Aunque algunos de estos sectores presentan altos valores de $\text{closeness centrality}$ —lo que sugiere una posición relativamente integrada en la red—, la estructura lineal del sistema limita la existencia de rutas alternativas, manteniendo la complejidad del proceso de evacuación.

Desde una perspectiva territorial, el análisis por distritos muestra concentraciones relevantes de población en sectores de alta exposición. El distrito 2P, que abarca gran

parte del centro urbano de Pucón y el sector de “camino al volcán”, concentra el 27,7 % de las viviendas en zonas de Alto y Muy Alto Riesgo, lo que equivale al 28,9 % de la población. Este patrón refleja el crecimiento inmobiliario de la última, pero también de mayor vulnerabilidad volcánica.

En términos de distribución residencial, el 31 % de las viviendas se localiza en el distrito 2P (32,8 % de la población), seguido por el distrito 3V, que alberga el 23,2 % de las viviendas y el 17,2 % de la población, ambos asociados a los principales centros urbanos de Villarrica y Pucón. No obstante, los distritos con mayores tiempos de evacuación corresponden principalmente al 3V (36 % de las viviendas) y al 5V (17,6 %), evidenciando que una parte importante de la población con mayores dificultades de evacuación no se encuentra necesariamente en los centros urbanos más consolidados, sino en sectores con menor accesibilidad vial.

En conjunto, los resultados confirman que la evacuación peatonal en el área de estudio no es territorialmente homogénea ni equitativa. Si bien el sistema funciona adecuadamente para una parte mayoritaria de la población expuesta, existe un subconjunto crítico de viviendas que combina alta exposición volcánica, baja conectividad vial y tiempos de evacuación prolongados. Estas condiciones se ven agravadas durante los periodos de máxima ocupación estacional, cuando la población flotante incrementa la presión sobre una red vial estructuralmente limitada.

Este estudio demuestra que los instrumentos tradicionales de planificación del riesgo, basados principalmente en población residente, subestiman la complejidad real de la evacuación en territorios turísticos de alta amenaza volcánica. La integración de escenarios dinámicos de población, análisis topológicos de la red vial y métricas de accesibilidad permite una evaluación más precisa de la vulnerabilidad territorial, aportando evidencia clave para fortalecer la planificación de emergencias, optimizar la localización de PET y avanzar hacia políticas de reducción del riesgo volcánico con enfoque territorial, estacional y funcional.

8. Limitaciones del estudio

Este estudio presenta una serie de limitaciones metodológicas y de disponibilidad de datos que deben ser consideradas al interpretar los resultados obtenidos.

En primer lugar, la estimación de la población flotante se basó en supuestos derivados de datos censales, catastros territoriales y registros de ocupación estacional, sin contar con información directa de movilidad real en tiempo casi real. Si bien esta aproximación permite construir un escenario de máxima ocupación crítica, no captura con precisión la variabilidad diaria, horaria o semanal de la presencia turística y estacional en el territorio.

En segundo lugar, el modelo de evacuación se restringe a un escenario de desplazamiento peatonal, sin incorporar otros modos de transporte como vehículos particulares, transporte público o evacuación asistida. Esto implica que los tiempos estimados representan una condición conservadora, pero no reflejan la complejidad multimodal que podría darse en una evacuación real.

Asimismo, el análisis se basa en una representación simplificada de la red vial, que no considera posibles interrupciones por colapso de infraestructura, congestión vehicular, caída de material volcánico, condiciones climáticas adversas u otros factores que podrían alterar significativamente la capacidad operativa del sistema durante una emergencia real.

Otra limitación relevante es que el estudio no incorpora dinámicas de comportamiento humano, tales como la toma de decisiones, la percepción del riesgo, la reacción ante

alertas tempranas o la presencia de población con movilidad reducida más allá de las categorías etarias consideradas. Estos factores pueden modificar sustancialmente los patrones reales de evacuación.

Finalmente, la clasificación de las zonas de peligro volcánico se utilizó como una capa estática de referencia, sin modelar escenarios eruptivos específicos ni la evolución temporal de los fenómenos volcánicos (lahares, flujos piroclásticos, caída de ceniza), lo que limita el análisis a una evaluación espacial de exposición y no a una simulación dinámica del riesgo.

9. Líneas de trabajo futuro

Los resultados de este estudio abren diversas oportunidades para profundizar y ampliar el análisis de la evacuación en territorios expuestos a amenaza volcánica.

Una línea prioritaria de trabajo futuro es la incorporación de datos de telefonía móvil, que permitan cuantificar de forma más precisa la población flotante, su localización espacial y sus patrones temporales de desplazamiento. Esto permitiría construir escenarios dinámicos de ocupación territorial, diferenciando entre días laborales, fines de semana, temporadas altas y eventos específicos.

Asimismo, sería relevante integrar modelos de evacuación multimodal, incorporando el uso de vehículos particulares, transporte público, evacuación asistida y restricciones de

capacidad vial. Esto permitiría evaluar la interacción entre flujos peatonales y vehiculares, así como los efectos de la congestión en corredores críticos.

Otra línea de desarrollo consiste en simular escenarios eruptivos específicos, incorporando modelos de propagación de lahares, flujos piroclásticos y caída de ceniza, para evaluar cómo la evolución temporal del peligro afecta la viabilidad de las rutas de evacuación y la accesibilidad a los PET.

Finalmente, el enfoque metodológico desarrollado en este estudio puede ser replicado y adaptado a otros territorios volcánicos de Chile y del mundo, contribuyendo a la construcción de herramientas de planificación territorial basadas en datos, accesibilidad y análisis de redes para la gestión del riesgo de desastres.

Bibliografía

- [1] Yabe, T., Jones, N. K. W., Rao, P. S. C., González, M. C., & Ukkusuri, S. V. (2022). *Mobile phone location data for disasters: A review from natural hazards and epidemics*. *Computers, Environment and Urban Systems*, 94, 101777. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101777>
- [2] Meredith, E. S., Teng, R. X. N., Jenkins, S. F., Hayes, J. L., Biass, S., & Handley, H. (2025). *Cities near volcanoes: Which cities are most exposed to volcanic hazards?* *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25, 2731–2749. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-2731-2025>
- [3] Wild, A. J., Bebbington, M. S., Lindsay, J. M., & Charlton, D. H. (2021). *Modelling spatial population exposure and evacuation clearance time for the Auckland Volcanic Field, New Zealand*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 416, 107282. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107282>
- [4] Mapa, M., Sun, Y., Kuligowski, E. D., Cova, T. J., Lovreglio, R., & Zhao, X. (2025). *Analyzing evacuation route choices during the 2021 Marshall Fire*. *Safety Science*, 194, 107046. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.107046>
- [5] Verma, R., Shen, J., Benedict, B. C., Murray-Tuite, P., Lee, S., Ge, Y., & Ukkusuri, S.V. (2022). *Progression of hurricane evacuation-related dynamic decision-making with information processing*. *Transportation Research Part D*, 108, 103323. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103323>
- [6] Lim, H. R., Lim, M. B. B., & Camposano, R. L. E. (2022). *Modeling evacuation behavior of households affected by the eruption of Taal volcano*. *Transportation Research Part D*, 109, 103393. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103393>
- [7] Boto-García, D., & Leoni, V. (2023). *Estimating the dynamic effects of volcano eruptions on domestic tourism: Evidence based on mobile-phone geo-positioning records*. *Scienze Regionali*. <https://doi.org/10.14650/108356>
- [8] Nguyen, M., Veraart, A. E. D., Taisne, B., Tan, C. T., & Lallemand, D. (2023). *A dynamic extreme value model with application to volcanic eruption forecasting*. *Mathematical Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s11004-023-10109-2>
- [9] Municipalidad de Pucón. (2025). *Boletín municipal verano 2025: Población flotante y dinámica turística*. Municipalidad de Pucón. <https://municipalidadpucon.cl/?p=54396>

- [10] Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2017). *Censo de Población y Vivienda 2017: Resultados comunales Pucón*. Biblioteca del Congreso Nacional (BCN). https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2025&idcom=9115
- [11] Naushirvanov, T., Elejalde, E., Kalimeri, K., Omodei, E., Karsai, M., & Ferres, L. (2025). *Evacuation patterns and socioeconomic stratification in the context of wildfires*. *Natural Hazards*, 1–27. <https://link.springer.com/article/10.1140/epjds/s13688-025-00540-2>
- [12] Beiró, M. G., Bravo, L., Caro, D., Cattuto, C., Ferres, L., & Graells-Garrido, E. (2018). *Shopping mall attraction and social mixing at a city scale*. *EPJ Data Science*. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-018-0157-5>
- [13] Barabási, A.-L. (2016). *Network Science*. Cambridge University Press.
- [14] Newman, M. (2018). *Networks* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Chen Zhao, An Zeng, & Chi Ho Yeung (2021). *Characteristics of human mobility patterns revealed by high-frequency cell-phone position data*. *EPJ Data Science*. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-021-00261-2>.