

EVALUACIÓN DEL PELIGRO ASOCIADO A LAS REMOCIONES EN MASA OCURRIDAS EN JUNIO DE 2024 EN LA COMUNA DE CURANILAHUE, REGIÓN DEL BIOBÍO.

F. González Cisterna¹, C. Arias Tapia², y M. Basso Aránguiz³

Resumen:

El presente estudio analiza el peligro de remociones en masa en la comuna de Curanilahue, región del Biobío, Chile, tras las lluvias intensas de junio de 2024, con el fin de evaluar factores de peligro y proponer medidas de mitigación. Se seleccionaron cuatro taludes críticos como puntos de estudio, representativos de las áreas más afectadas, donde se analizaron factores como geología, pendiente, vegetación, drenaje y actividades humanas mediante un modelo conceptual y análisis jerárquico. Los resultados revelaron que tres taludes presentan un alto nivel de peligro, mientras que el cuarto alcanzó un nivel muy alto debido a la saturación del suelo y la proximidad de la vivienda. Las precipitaciones fueron identificadas como el principal desencadenante, mientras que la baja cohesión de los suelos, las pendientes pronunciadas y la vegetación insuficiente aumentan la susceptibilidad. Como medidas de mitigación, se propusieron sistemas de drenaje, revegetación con especies nativas, restricciones al tránsito pesado y la construcción de estructuras de contención. En el caso más crítico, el punto 4, se recomendó la reubicación de viviendas para proteger a la comunidad y reducir la exposición al riesgo.

Palabras Claves: Remoción en masa; Riesgos naturales; Modelo Conceptual.

ABSTRACT:

The present study analyzes landslide hazard in the commune of Curanilahue, Biobío Region, Chile, following the intense rainfall of June 2024, aiming at evaluate hazard factors and propose mitigation measures. Four critical slopes were selected as study points, representative of the most affected areas, where factors such as geology, slope value, vegetation, drainage, and human activities were analyzed using a conceptual model and a hierarchical analysis (e.g., AHP). The results revealed that three slopes present a high hazard level, while the fourth reached a very high level due to soil saturation and the proximity of housing. Rainfall was identified as the main triggering factor, while low soil cohesion, steep slopes, and insufficient vegetation increase susceptibility. As mitigation measures, drainage systems, revegetation with native species, heavy traffic restrictions, and the construction of retaining walls were proposed. In the most critical case, slope 4, the relocation of housing was recommended to protect the community and reduce risk exposure.

KEYWORDS: Landslides; Natural hazards; Conceptual Model

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fgonzalezc@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, cesararias@ucsc.cl

³ Profesora Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, matildebasso@ucsc.cl

1.INTRODUCCIÓN

El territorio chileno ha sido históricamente afectado por una diversidad de desastres naturales, cuyos orígenes son, en la mayoría de los casos, eventos geológicos e hidrometeorológicos de magnitud significativa; estos fenómenos se ven potenciados por la forma en que se ocupa y utiliza el territorio (Camus et al., 2016). Uno de los eventos más importantes es la remoción en masa, que corresponde al desplazamiento de materiales como roca, suelo o detritos ladera abajo debido a la fuerza de la gravedad. Este tipo de eventos suelen mantenerse en un estado latente hasta que un factor externo, como precipitaciones intensas o actividad sísmica, altera el equilibrio de las fuerzas internas del terreno, desencadenando el movimiento (Varnes, 1978).

La comuna de Curanilahue, ubicada en la provincia de Arauco, región del Biobío, está expuesta a diversas amenazas naturales, incluyendo las remociones en masa. Históricamente, se han registrado varios eventos de este tipo en la zona, principalmente en forma de deslizamientos y flujos de detritos (Sernageomin, 2006). Las intensas lluvias, como las ocurridas en junio de 2024, actuaron como un factor detonante importante, superando los 270 mm en 72 horas en algunas zonas. Estas precipitaciones generaron una situación de emergencia en la comuna, con deslizamientos de tierra que interrumpieron el tránsito en varias rutas rurales y obligaron a desalojar viviendas debido a los deslizamientos (BioBio Chile, 2024).

El área de estudio comprende cuatro puntos ubicados en la comuna de Curanilahue, que representan taludes afectados por remociones en masa debido a las fuertes lluvias ocurridas en la semana del 11 de junio de 2024 (Figura 1; Tabla 1). El punto 1, situado en un asentamiento informal detrás del Estadio Municipal Raúl Erazo, corresponde a un talud que sufrió una remoción que afectó tres viviendas, cubriendo el área con lodo y material rocoso. El punto 2, ubicado en la Alameda, se caracteriza por una ladera de fuerte inclinación, donde el colapso parcial de una vivienda fue provocado por la inestabilidad del terreno. El punto 3, camino hacia La Cascada, es un talud amplio con múltiples grietas, al costado de un camino de ripio por el cual transitan vehículos pesados y livianos, lo que incrementa el peligro de remociones. En el punto 4, en la avenida Diego Portales, un deslizamiento de tierra y lodo, acompañado de la caída de árboles, impactó una vivienda situada en una pendiente acusada. El estudio se centrará en recopilar información sobre las características morfológicas, geológicas, biológicas y antrópicas de estos sectores, verificando en terreno dichas condiciones, describiendo los factores de peligro y riesgo, utilizando un análisis jerárquico para evaluar el nivel de peligro de remociones en masa en cada punto.

Tabla 1: Coordenadas de los puntos de estudio (UTM WGS84, zona 18S).

Puntos	Coordenadas	
	Este	Norte
1	646.069	5.851.605
2	646.704	5.851.245
3	647.959	5.850.567
4	646.821	5.850.132

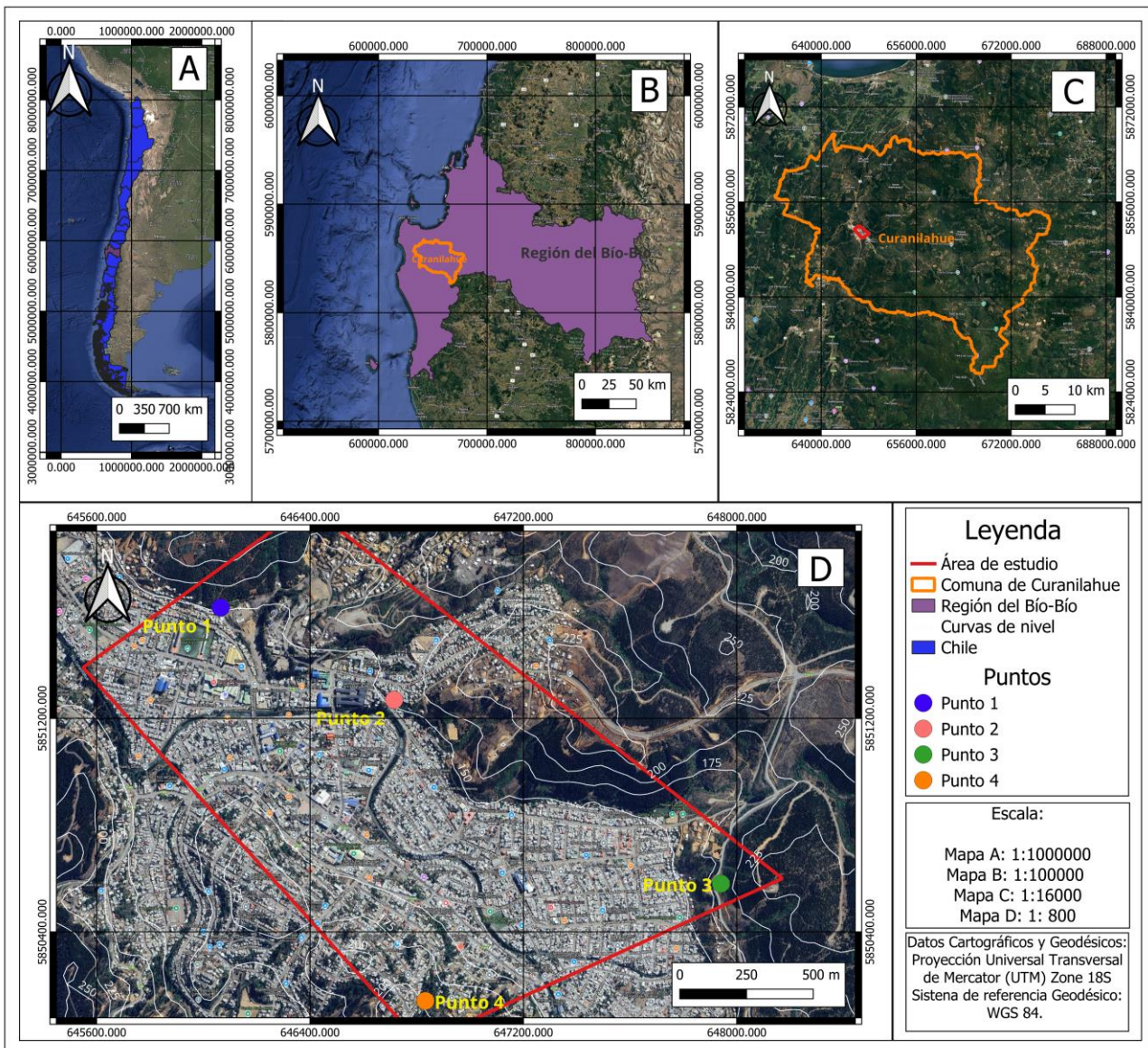


Figura 1: Ubicación del área de estudio. A) Ubicación de la región del Biobío en Chile; B) Comuna de Curanilahue en la región del Biobío; C) Área de estudio dentro de la comuna de Curanilahue; D) Ubicación de los puntos a estudiar de las laderas. Fuente: Elaboración propia.

2. MARCO TEORICO

2.1 Conceptos vinculados al riesgo

Se define por peligro a un evento o fenómeno potencialmente dañino para el ser humano en un sitio dado; se llama peligros naturales a aquellos de origen geológico, meteorológico o hidrológico (Sepúlveda, 1998). La probabilidad de ocurrencia del peligro, expresada en grados cualitativos y relativos, es llamada susceptibilidad; en el caso de los peligros geológicos, esta es resultado de la combinación de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos geológicos, que pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos (Campos, 2014).

La vulnerabilidad se define como el daño potencial que un peligro puede provocar a las personas en una determinada área geográfica, asentamiento o actividad. Este concepto puede medirse de diferentes formas, dependiendo de la zona o el grupo en estudio (Sepúlveda, 1998).

Finalmente, el riesgo se describe como la cantidad de daño esperado en términos de vidas perdidas, personas damnificadas y daños a la propiedad, que resultaría de la ocurrencia de un fenómeno peligroso (Campos, 2014). Comúnmente, se expresa como el producto de la susceptibilidad de ocurrencia de un peligro y la vulnerabilidad de la población o área geográfica afectada (Sepúlveda, 1998).

2.2 Remoción en masa

2.2.1 Definición

Se denomina remoción en masa o movimiento en masa (o por el término en inglés *landslide*), a los procesos de transporte de material lenta o rápida y en el sentido de la gravedad de un determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores (Hauser, 1993). Si bien existen numerosas clasificaciones para los distintos tipos de remoción en masa, se destaca la de Cruden y Varnes (1996). Este autor las denomina binominalmente según el tipo de movimiento y el tipo de material. El tipo de movimiento incluye los desprendimientos o caídas (*fall*), volcamiento (*toppling*), deslizamiento (*slide*), flujo (*flow*) y extensión lateral (*lateral spreading*) (Figura 2). Los tipos de material, por su parte, incluyen roca, detritos, suelo o lodo.

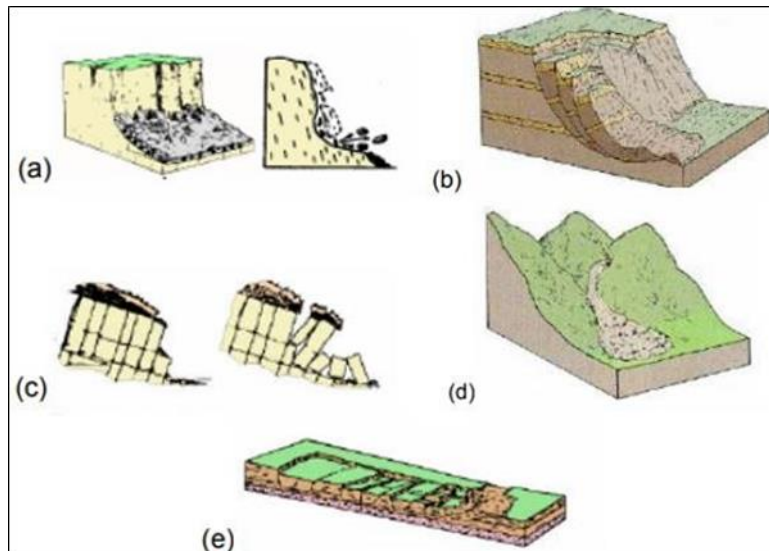


Figura 2. Tipos de remociones en masa. (a) Caídas, (b) Deslizamientos, (c) Volcamientos, (d) Flujos, (e) Extensiones laterales. (Varnes, 1978).

2.3 Modelo conceptual.

El Modelo conceptual se refiere a la descripción, análisis y valoración de las causas y mecanismos que generan un fenómeno determinado. En el escenario de remoción en masa, este tipo de modelo explica cómo se comporta una ladera o un talud de acuerdo con sus características físicas, químicas y ambientales, y cómo actúan los mecanismos que podrían producir o que están provocando su estabilidad y/o inestabilidad. De esta manera, el modelo conceptual sirve como un análisis representativo de los factores condicionantes y desencadenantes que favorecen la ocurrencia de un movimiento en masa, ayudando a entender el comportamiento de la ladera o talud a lo largo del tiempo (Inostroza et al., 2017).

Los factores que controlan los procesos de remoción en masa se dividen en condicionantes y desencadenantes. Los factores condicionantes, relacionados con las características intrínsecas del terreno, incluyen la pendiente, la geología, el tipo de suelo la cobertura vegetal. Pendientes empinadas, suelos arcillosos, rocas fracturadas (Varnes, 1978), y la falta de vegetación (Greenway, 1987) aumentan la susceptibilidad a deslizamientos. Los factores desencadenantes son externos y ocurren en momentos específicos, como precipitaciones intensas

(Wieczorek, 1996), sismos (Keefer, 1984), y actividades humanas como la construcción y deforestación (Schuster & Highland, 2001), que pueden desestabilizar el terreno y provocar deslizamientos.

2.3.1 Meteorología

Durante los periodos de lluvia, la saturación de los suelos en los taludes genera un aumento en el peso del terreno, lo que disminuye su resistencia al esfuerzo cortante y acelera la erosión en la superficie expuesta (Garibay-Pérez et al., 2016). Este fenómeno es considerado como el principal desencadenante de movimientos en masa, siendo fundamental analizar los umbrales de precipitaciones diarias. Factores adicionales, como la exposición al viento, al sol y las variaciones de temperatura, también contribuyen a la meteorización y erosión, debilitando aún más la estabilidad del suelo (Garibay-Pérez et al., 2016). Los suelos saturados, producto de lluvias intensas o prolongadas, pueden provocar deslizamientos (Basso et al., 2015). En Chile, las precipitaciones son el factor más común que desencadena estos procesos (Vargas, 2002), lo cual se confirma en el área de estudio, donde los movimientos en masa han estado asociados históricamente con eventos de alta precipitación.

2.3.2 Factor Geológico y meteorización.

Las condiciones geológicas del área son el principal factor que determina su susceptibilidad a movimientos en masa. Los materiales que conforman las laderas presentan características clave, como la litología, la meteorización y la presencia de suelo residual, así como propiedades del suelo como plasticidad, humedad y permeabilidad (Vergara, 2020). El estudio de la geología se enfoca en las características litológicas y estructurales de las rocas, así como en la composición y origen de los depósitos sedimentarios (Henríquez, 2019).

Las diferencias en la estabilidad relativa de los materiales hacen necesario evaluar cada unidad geológica individualmente. También son importantes los lineamientos y estructuras que pueden actuar como planos de debilidad. Además, el grado de meteorización de las rocas, clasificado según los criterios de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) en seis categorías (Tabla 2), puede influir significativamente en su estabilidad.

Tabla 2: Escala de meteorización según ISRM. Modificado de González de Vallejo, 2002.

Grado de Meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No aparecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura original del macizo rocoso.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

2.3.3. Actividad Antrópica

La actividad humana tiene un impacto significativo en la estabilidad del terreno, ya que puede actuar como un factor desencadenante o mitigador de movimientos en masa. Prácticas como el corte de taludes, el retiro de material, la deforestación, el reemplazo de vegetación nativa por especies exóticas, la sobrecarga de pendientes por edificaciones y la alteración de sistemas hidrológicos son causas comunes de inestabilidad (Hyndman & Hyndman, 2011). Por otro lado, acciones como excavaciones, rellenos, urbanización, acumulación de escombros y extracción de áridos alteran la resistencia del suelo, modifican la escorrentía y cambian la topografía, intensificando los riesgos (Castillo, 2021). Asimismo, factores como incendios forestales, cambios en la cobertura vegetal y vibraciones asociadas a actividades humanas contribuyen adicionalmente a estos procesos (Lara & Sepúlveda, 2008). No obstante, también es posible generar impactos positivos mediante iniciativas como la restauración ambiental, la reforestación de áreas afectadas y la construcción de estructuras de contención diseñadas para estabilizar el terreno y mitigar el peligro (Hyndman & Hyndman, 2011).

2.3.4. Vegetación

La vegetación es fundamental para la estabilidad de las laderas, aunque su influencia depende del clima y la topografía. En zonas lluviosas con escasa vegetación, el riesgo de erosión y deslizamientos aumenta (Prieto, 1985). En cambio, en áreas con abundante vegetación, las raíces absorben agua y estabilizan el suelo, reduciendo la erosión (Selby, 1993). La vegetación más efectiva para estabilizar laderas es un bosque con suelos cubiertos de pasto o hierba que interceptan el agua y mejoran la resistencia del suelo, mientras que la falta de vegetación incrementa la inestabilidad y la erosión hídrica (Jacoby, 2001). En el sur de Chile, especies foráneas como el pino radiata y el eucalipto resultan perjudiciales, ya que sus raíces superficiales y su alta absorción de agua secan los suelos, favoreciendo la erosión; por el contrario, las especies nativas fortalecen la cohesión del suelo y reducen estos riesgos (Hubert & Gifford, 1997).

2.3.5 Características geomorfológicas.

Los factores hidrológicos e hidrogeológicos, como la red de drenaje, las variaciones del nivel freático y los coeficientes de escorrentía e infiltración, son fundamentales en la generación de remociones en masa. La saturación del suelo reduce su resistencia al incrementar las presiones de poros, lo que disminuye la cohesión y la tensión efectiva del terreno (Lambe & Whitman, 1972). Esta saturación varía entre las laderas, siendo superficial en algunos sectores y manifestándose solo como humedad en profundidad en otros.

Entre los factores topográficos más relevantes que influyen en los movimientos en masa se destacan la inclinación del terreno, tanto en términos del ángulo como de sus variaciones abruptas, así como su extensión, altura y orientación (Vergara, 2020). El área de estudio presenta laderas con pendientes pronunciadas, que varían entre 40° y 70°, lo que incrementa la susceptibilidad a remociones en masa en los cuatro sectores analizados.

La orientación de la pendiente es clave, ya que afecta su exposición a agentes como el sol, la lluvia y el viento, lo que influye en la cobertura vegetal y los procesos geomorfológicos. Laderas con mayor exposición solar suelen experimentar mayores oscilaciones térmicas, lo que favorece la acumulación de material detrítico (Arévalo, 2023). El área de estudio presenta laderas orientadas hacia el suroeste, lo que favorece la acumulación de humedad y la saturación del suelo, aumentando la susceptibilidad a remociones en masa.

2.5 Geología del área de estudio

2.5.1 Unidades geológicas

En el área de estudio afloran dos unidades rocosas del Cenozoico, las formaciones Curanilahue y Boca Lebu, además de Depósitos Cuaternarios Antiguos de origen mayormente fluvial (Figura 6).

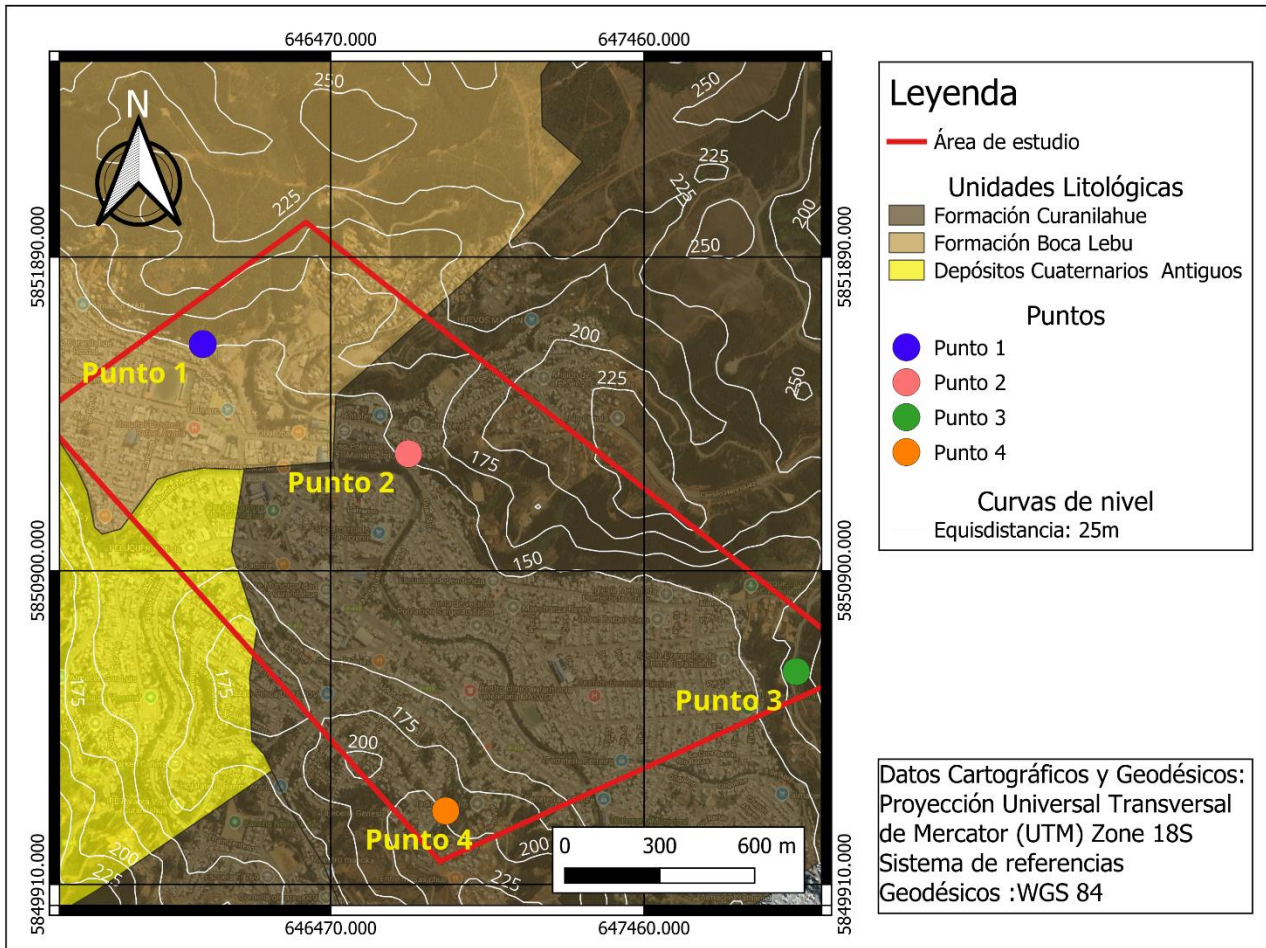


Figura 6: Mapa de unidades litológicas. Elaboración propia basada en (Sepúlveda, 2023).

La Formación Curanilahue (Muñoz-Cristi, 1956; Muñoz-Cristi & Cecioni, 1968) es una secuencia sedimentaria continental del Eoceno Inferior compuesta principalmente por areniscas, algunas de ellas conglomerádicas, y arcillolitas asociadas a mantos carboníferos, con intercalaciones marinas, destacando areniscas verdes fosilíferas, con una potencia de aproximadamente 500 m (Pineda, 1983). Aflora en la parte central y sureste del área de estudio, abarcando casi tres cuartos de esta. Los estratos de carbón presentes en la formación, por ser un material menos resistente que la arenisca, aportan significativamente a la susceptibilidad del terreno a la erosión y los deslizamientos (Goodman, 1989). La formación ocupa casi una cuarta parte del área de estudio, en el extremo noroeste de esta.

La Formación Boca Lebu (Muñoz-Cristi, 1956) del Eoceno Inferior, está compuesta por limolitas y areniscas finas, arcillosas y fosilíferas, que presentan niveles con concreciones calcáreas donde es común hallar restos de crustáceos. Hacia la parte superior de la secuencia, los sedimentos se tornan más gruesos y contienen abundante materia orgánica. Esta formación sobreyace y engrana a la Formación Curanilahue, y tiene una potencia de entre 450 y 600 m (Pineda, 1983).

Los Depósitos Cuaternarios Antiguos, de edad Pleistoceno corresponden a arenas y gravas de depositación fluvial y se distribuyen en el sector urbano de la comuna de Curanilahue y en gran parte de las zonas bajas (Sepúlveda, 2023). Estos depósitos ocupan una pequeña porción hacia el oeste del área de estudio.

2.4 Antecedentes históricos de remoción en masa en la Comuna de Curanilahue.

El 6 de junio de 2006, intensas precipitaciones en Curanilahue provocaron inundaciones y remociones en masa en varios sectores. Las zonas más afectadas fueron Callejón Pilar, entre las calles Gaspar Inostroza y Juan Bautista Bordeau, y el sector de Portales Alto. En el sector de Callejón Pilar, un deslizamiento rotacional generó importantes diferencias de nivel, comprometiendo al menos 12 lotes de terreno y destruyendo 3 viviendas (Figura 3). Las características del suelo, compuesto principalmente por arcillas y limos de alta plasticidad, junto con la pendiente pronunciada, hicieron que este fenómeno fuera de gran magnitud. (Ramírez, 2006)



Figura 3: Se aprecia un desnivel generado por la remoción, con aproximadamente 2 metros de diferencia de cota, lo que evidencia la magnitud del deslizamiento que afectó a varios sitios del sector y destruyó al menos tres viviendas. Inspección de Sernageomin, 09 de junio de 2006, tres días posterior al evento (Ramírez, 2006).

El sismo del 27 de febrero de 2010 también dejó relevantes secuelas en Curanilahue. Se reportaron deslizamientos en varias áreas, entre ellas la calle Alameda, donde un cerro artificial formado por material estéril de minas de carbón se deslizó, destruyendo una escuela y varias viviendas. Otro deslizamiento ocurrió en el sector de Santa Elena, donde anteriormente, en 2006, ya se habían registrado remociones en masa. En general, las laderas inestables y las fundaciones deficientes sobre rellenos fueron factores que aumentaron el riesgo de colapso en varios puntos de la comuna, particularmente durante eventos sísmicos o precipitaciones intensas (Figura 4) (Ramírez & Derch, 2010).



Figura 4: Se produjo un deslizamiento desde un cerro formado por acopio de material estéril, obstruyendo el canal que pasa por detrás de calle Alameda (Ramírez & Derch, 2010).

El año 2023, en la calle Loma Baja, Población Ricardo Lagos, se identificaron tres zonas problemáticas afectadas por deslizamientos y caídas de roca, situación conocida por la Dirección de Obras Municipales. En 2015, la empresa MAHS realizó un estudio geotécnico en la zona, enfocado en evaluar los parámetros necesarios para el diseño de pavimentos y fundaciones, con vistas a un posible proyecto habitacional. Dicho informe detalla un talud de 8 metros de altura y 75° de inclinación, compuesto por areniscas y niveles de carbón, donde se observan deslizamientos locales y bloques de roca en la base. Una vivienda se encuentra a menos de 2 metros del pie del talud (Figura 5) (Sepúlveda, 2023).

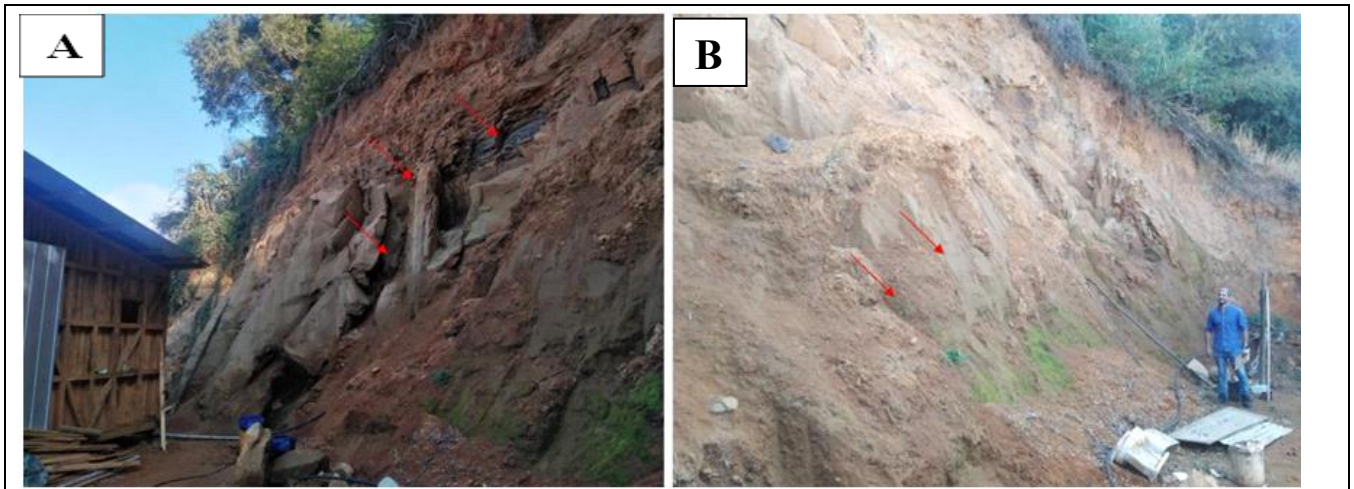


Figura 5: Sector Lomas Baja en la imagen A y B representan la zona de caída de rocas, correspondiente a la Formación Curanilahue, correspondiente a areniscas pardas con niveles de carbón. B: Zona de desprendimientos locales en el talud de materiales no consolidados. Elaborado por Natalia Sepúlveda Díaz (Sepúlveda, 2023).

2.5 Análisis jerárquico

El proceso de análisis jerárquico, desarrollado por Saaty (1980), es un proceso estadístico que permite resolver problemas complejos de criterios múltiples. Consiste en comparar un conjunto de variables, tanto individualmente como en conjunto, para asignarles un peso y ponderación adecuados (Tabla 3). Este análisis organiza, descompone y sintetiza la información frente a un problema, utilizando una matriz de comparación variada que considera criterios como vegetación, geología, precipitaciones y etc.

Tabla 3: Escala de Saaty. Modificada de Saaty (1980).

Escala	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo
3	Importancia moderada	Preferencia leve de un elemento sobre otro
5	Fuertemente importante	Preferencia fuerte de un elemento sobre otro
7	Importancia muy grande	Preferencia muy fuerte de un elemento sobre otro.
9	Importancia extremadamente fuerte	Preferencia clara y absoluta de un elemento sobre el otro.
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios cuando requiere matizar	

Una vez comparados y definidos los valores de los factores, se elabora una matriz cuadrada conocida como matriz de decisión (Tabla 4).

Tabla 4: Matriz de decisión. Modificada de Saaty (1980).

Variable	X1	X2	...	Xn
X1	1	I1/I2	...	I1/In
X2	I2/I1	1	...	I1/In
...	1	...
Xn	In/I1	In/I2	...	1

La matriz de decisión tiene como objetivo calcular un valor propio (W_n) para cada factor, permitiendo así determinar su ponderación como un porcentaje que refleja su importancia en la generación de un potencial movimiento en masa. Para ello, se utiliza la Ecuación 1, que calcula la relación entre los valores propios, donde "In" representa los factores de la matriz y "n" el número de factores. Luego, estos valores se ajustan según la escala de preferencia definida en la matriz.

$$W_n = \left(\frac{I_n}{I_1} * \frac{I_n}{I_2} * \dots * 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

Luego, se calcula el valor propio normalizado (C_n) mediante la Ecuación 2, que nos proporciona la ponderación final de cada factor. Aquí, "W" representa el valor propio de cada factor y " $\sum W_n$ " es la sumatoria de todos los valores propios.

$$C_n = \left(\frac{W_1}{\sum W_n} + \frac{W_2}{\sum W_n} + \dots + \frac{W_n}{\sum W_n} \right) \quad (2)$$

Para evaluar la consistencia de los factores, es esencial primero calcular los pesos parciales (P_n). Estos se determinan utilizando la Ecuación (3), la cual es clave para llevar a cabo el análisis de consistencia adecuado.

$$P_n = 1 + \frac{I_1}{I_n} + \frac{I_2}{I_n} + \dots + 1 \quad (3)$$

Con este valor, se procede a calcular la valoración relativa (λ_n) para cada uno de los resultados, utilizando las Ecuaciones correspondiente.

$$\lambda_n = C_n * P_n \quad (4)$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \sum \lambda_n \quad (5)$$

Una vez determinado el valor de $\lambda_{m\acute{a}x}$, es posible calcular la razón de consistencia de la matriz (CR). Este cálculo se realiza comparando el índice de consistencia (C_i) con el índice de consistencia aleatorio (R_{ci}), los cuales se obtienen mediante las Ecuaciones (4) y (5), respectivamente. La razón de consistencia es fundamental para evaluar la fiabilidad de las comparaciones realizadas, asegurando que el análisis jerárquico no esté afectado por inconsistencias significativas. La relación entre C_i y R_{ci} proporciona un indicador cuantitativo de cuán coherente es la matriz de juicio en la evaluación de los distintos criterios.

$$C_i = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$R_{ci} = \frac{1,98 * (n - 1)}{n} \quad (7)$$

$$CR = \frac{C_i}{R_{ci}} \quad (8)$$

Finalmente, una vez obtenidos los resultados y verificando que la matriz es consistente, se procede a calcular el valor de la peligrosidad (Y) de los movimientos en masa utilizando la Ecuación (9). Este cálculo integra todos los factores evaluados para ofrecer una estimación precisa del nivel de peligrosidad en la zona estudiada.

$$Y = C_1 * X_1 + C_2 * X_2 + \dots + C_n * X_n \quad (9)$$

3. METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos planteados en este estudio, se implementó una metodología compuesta por tres fases: investigación bibliográfica, exploración en terreno y procesamiento de información. La fase de investigación incluye la revisión de literatura relevante. La fase de exploración en terreno consiste en estudios y recopilación de datos *in situ*. Finalmente, la fase de procesamiento de información implica el análisis y procesamiento de los datos recolectados mediante herramientas tecnológicas especializadas.

3.1 Investigación bibliográfica.

En la primera etapa de la investigación, se procede a reunir y analizar información clave sobre la zona de estudio, abarcando aspectos como la geología local, vegetación, pendiente, precipitaciones, sismicidad y red de drenaje. El propósito de esta fase es identificar tanto los factores condicionantes como los que podrían desencadenar procesos de remoción en masa. Las fuentes consultadas incluyen tanto artículos académicos como informes de entidades públicas. Con base en este análisis, se identifican las áreas con mayor susceptibilidad, definiendo los puntos de interés prioritario para el enfoque del estudio.

3.2 Trabajo en terreno

Se lleva a cabo una visita a terreno el día 9 octubre de 2024, a casi cuatro meses del evento de precipitación que causó las mayores remociones (semana del 11 de junio) con el objetivo de reconocer y evaluar las zonas de estudio que fueron afectadas por dichos eventos. En las zonas de interés se obtiene información sobre los tipos de suelos y rocas que se puedan apreciar en la superficie, estado de meteorización de las rocas, presencia de discontinuidades, pendientes, orientaciones, cobertura vegetal, así como evidencias de remociones en masa pasados. Esta información complementa a los datos previamente obtenidos sobre la geología de la zona.

3.3 Trabajo en software y método de análisis jerárquico

El proceso de análisis para la remoción en masa comienza con la creación de un mapa de la zona de estudio mediante QGIS 3.30.0, proporcionando así una vista general de la topografía local. Para evaluar las pendientes de los taludes, se recurre a *Google Earth*, que permite obtener mediciones precisas. Paralelamente, los datos sobre precipitaciones, tanto mensuales como diarias, se procesan y analizan en Excel.

Posteriormente, en Excel, se elabora una matriz de decisión utilizando el método de Saaty, donde se asigna un peso específico a cada uno de los factores considerados. A partir de esta matriz y siguiendo un enfoque de análisis jerárquico multivariado, se calcula el valor de peligrosidad asociado a los movimientos en masa, conforme a la ecuación correspondiente.

Finalmente, la información obtenida de la investigación tanto bibliográfica como de campo se integra con los valores de peligrosidad obtenidos en el análisis jerárquico. A partir de estos datos, se utiliza nuevamente a QGIS 3.30.0 para generar un mapa que localiza los sectores estudiados sobre la comuna de Curanilahue. Este mapa permite fundamentalmente ubicar geográficamente los puntos de peligro y enfocar las acciones de mitigación.

4. RESULTADOS

Para desarrollar el análisis jerárquico se consideraron ocho factores: Indicios de remoción en masa en la zona de estudio, factor geológico y meteorización, pendientes, cobertura vegetal, drenaje y humedad, factor antrópico, factor meteorológico. A partir de la descripción de cada factor, se asignan valores con sus respectivos pesos relativos, los cuales cuantifican el nivel de peligro que cada factor aporta en la generación de movimientos en masa (Tabla 5).

Tabla 5: Nivel de peligro según peso relativo.
Elaboración propia.

Peso relativo	Nivel de peligro
0	Nulo
1	Bajo
2	Medio
3	Alto

4.1.1 Indicios de remoción en masa en la zona de estudio.

De acuerdo con la Tabla 6, la clasificación de los registros históricos de movimientos en masa se ha realizado considerando el intervalo temporal transcurrido desde la ocurrencia de del evento. Elaboración propia.

Tabla 6: Grado de susceptibilidad a remoción en masa. Elaboración propia.

Tipo	Descripción	Peso relativo
Sin registros	Las laderas no presentan registros significativos de remoción en masa	1
Registros menores en la zona de estudio	Las laderas registran remociones con afectaciones leves a moderadas y hace más de 5 años o movimientos con resultado desastroso hace más de 20 años.	2
Registros significativos en la zona de estudio	La ladera registra movimientos con afectación leve a moderada en los últimos 5 años o movimientos con resultado desastroso en los últimos 20 años.	3

En la zona de investigación se detectaron algunos indicios de remoción en masa debido a las fuertes lluvias en la semana del 11 de junio del 2024 en los diversos taludes estudiados que son el punto 1, punto 2, punto 3 y punto 4.

En el punto 1, las intensas lluvias de esta semana provocaron un flujo de barro con material arcilloso que descendió desde la ladera, afectando a tres casas. Además, la caída del talud obstruyó una zanja, lo que ocasionó la inundación de las viviendas debido a la gran cantidad de agua acumulada.

En el punto 2, ubicado al inicio de la avenida Alameda, se produjo un deslizamiento de tierra y lodo que ocasionó el colapso parcial de una vivienda. Como medida preventiva, fue necesario demoler una parte de la casa, ya que existía el riesgo de que el deslizamiento provocara el colapso total de la estructura. El talud tiene una altura considerable, aproximadamente 10 metros.

El punto 3 sufrió un deslizamiento de tierra como consecuencia de las lluvias del 11 de junio. Esta zona presenta un alto tránsito vehicular, y, además, se encuentra una toma en el sector y el constante paso de camiones forestales. Por estas razones, resulta fundamental realizar un estudio adecuado de su estabilidad, priorizando que el camino se mantenga habilitado para asegurar la continuidad del flujo vehicular.

En el talud se observa una grieta (Figura 7) significativa que lo atraviesa en toda su extensión, con una longitud aproximada de 25,3 metros. La profundidad de esta grieta varía, alcanzando hasta 40 cm en las zonas más profundas y disminuyendo a 30 cm y 20 cm en otras áreas. Su ancho también presenta variaciones importantes, oscilando entre 6 cm y 60 cm, con medidas específicas en diferentes puntos, tales como 6 cm, 10 cm, 11 cm, 20 cm, 21 cm, 30 cm, 36 cm, 42 cm y 60 cm. Estas características sugieren la latencia de más remociones en masa en este talud.

Además, se ha identificado otra grieta en el mismo talud, cercana a la corona, con una longitud aproximada de 14 metros. Esta segunda grieta no es tan profunda como la primera, presentando profundidades que varían entre 15 cm y 50 cm, siendo 50 cm la medida más profunda. El ancho de esta grieta fluctúa entre 4 cm y 17 cm, con los valores más estrechos (4 cm y 6 cm) hacia el inicio de la grieta, cerca de la corona del talud.

El talud, que se encuentra a una altura de 12 metros, está orientado hacia S 73° 20' 53" W. En la base, el talud mide aproximadamente 69,4 metros, mientras que en la corona tiene una medida de unos 28 metros.

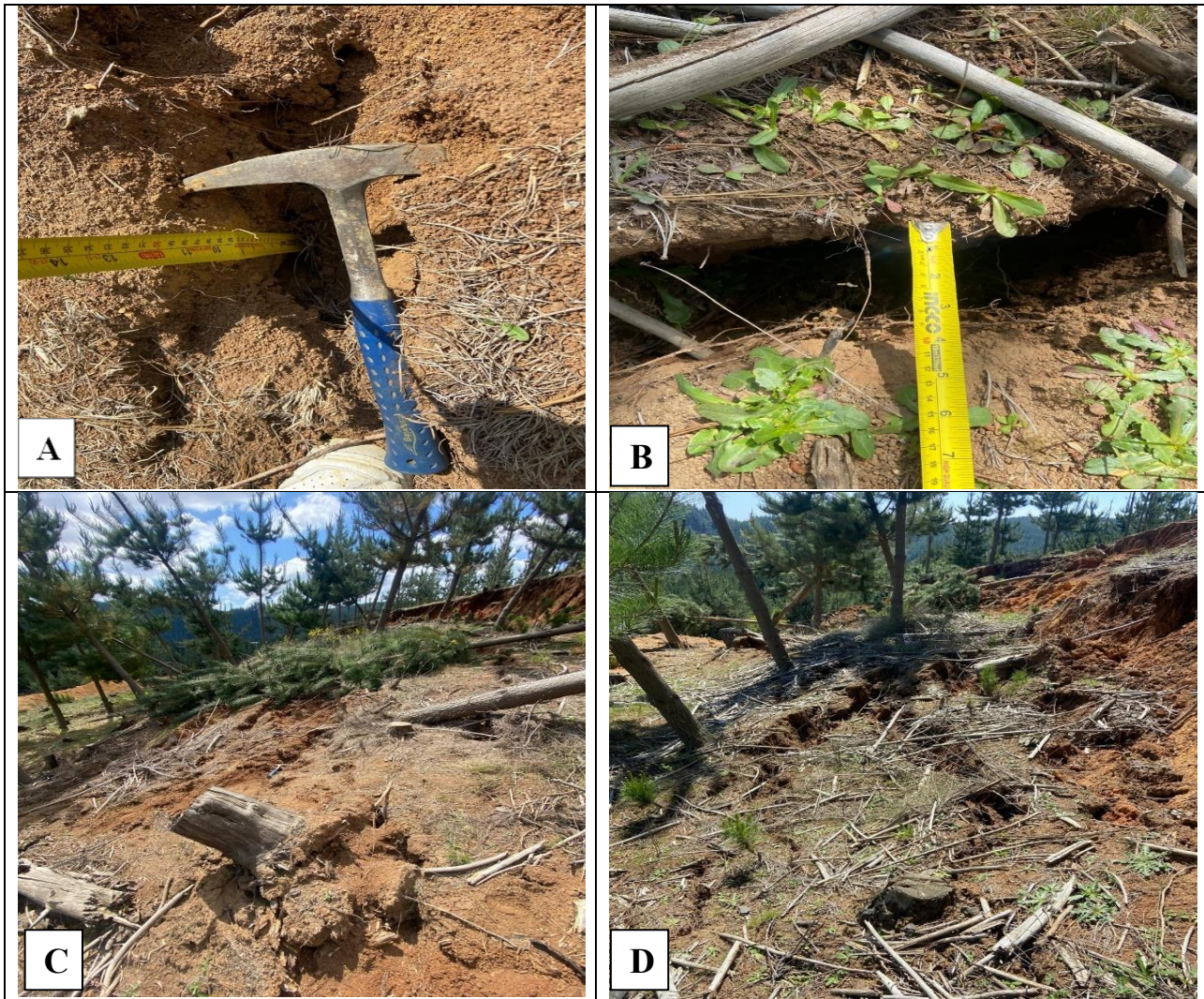


Figura 7: En el punto 3, la imagen A muestra la profundidad de la grieta, mientras que la imagen B presenta su anchura. Por su parte, las imágenes C y D ilustran el largo de las grietas del talud. Fuente: elaboración propia.

En la avenida Diego Portales, ocurrió un deslizamiento en el punto 4, compuesto de tierra, lodo y la caída de árboles, afectando el costado de una casa situada en una pendiente pronunciada. Este deslizamiento ha impactado de manera constante la vivienda, representando una grave amenaza para la familia que la habita, debido al peligro de un colapso (Figura 8).

En todos puntos se le asignó un peso relativo 3, ya que el registro de este movimiento es hace menos de 5 años y es muy peligroso para la comunidad.



Figura 8: Zonas afectadas por las lluvias ocurridas entre el 10 y el 16 de junio de 2024. La Imagen A corresponde al punto 1, la Imagen B al punto 2, la Imagen C al punto 3 y la Imagen D al punto 4. Elaboración propia.

4.1.2 Factor meteorológico

Para evaluar el nivel de riesgo asociado a las lluvias, se consideró la cantidad máxima de precipitación que ocurre entre los meses de abril y octubre, medida en un periodo de 48 horas y con un periodo de retorno de seis años (P48). A partir de estos datos, se asignaron los diferentes niveles de peligro, los cuales se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7: Clasificación del factor meteorológico con sus respectivos pesos relativo. Elaboración propia

Tipo	Descripción	Peso relativo
Favorable	P48 anual < 75 mm	1
Moderadamente desfavorable	P48 anual 75-200mm	2
Desfavorable	P48 anual < 200 mm	3

Para evaluar el nivel de peligro asociado a las precipitaciones, se analizaron los datos diarios de la estación meteorológica Río Curanilahue, activa entre 2019 y 2024 (Figura 9). Dado que los puntos de estudio se

encuentran en la misma comuna, se asumió que las precipitaciones en estas áreas son comparables. Aunque una precipitación acumulada superior a 330 mm en los 7 días previos predispone a la inestabilidad de laderas, la ocurrencia de remociones en masa se incrementa significativamente cuando se registran precipitaciones intensas superiores a 200 mm en 48 horas. Estos umbrales fueron determinados a partir de mi análisis de la tabla acumulada de precipitaciones y su relación con los eventos históricos de remociones en masa. En 2019, los valores se aproximaron al umbral de 200 mm sin superarlo, mientras que en 2024 se observaron precipitaciones que excedieron dicho límite, asociándose con eventos de remoción en masa en la zona (Figura 9). Con base en esta correlación, se asignó un peso relativo de 3.

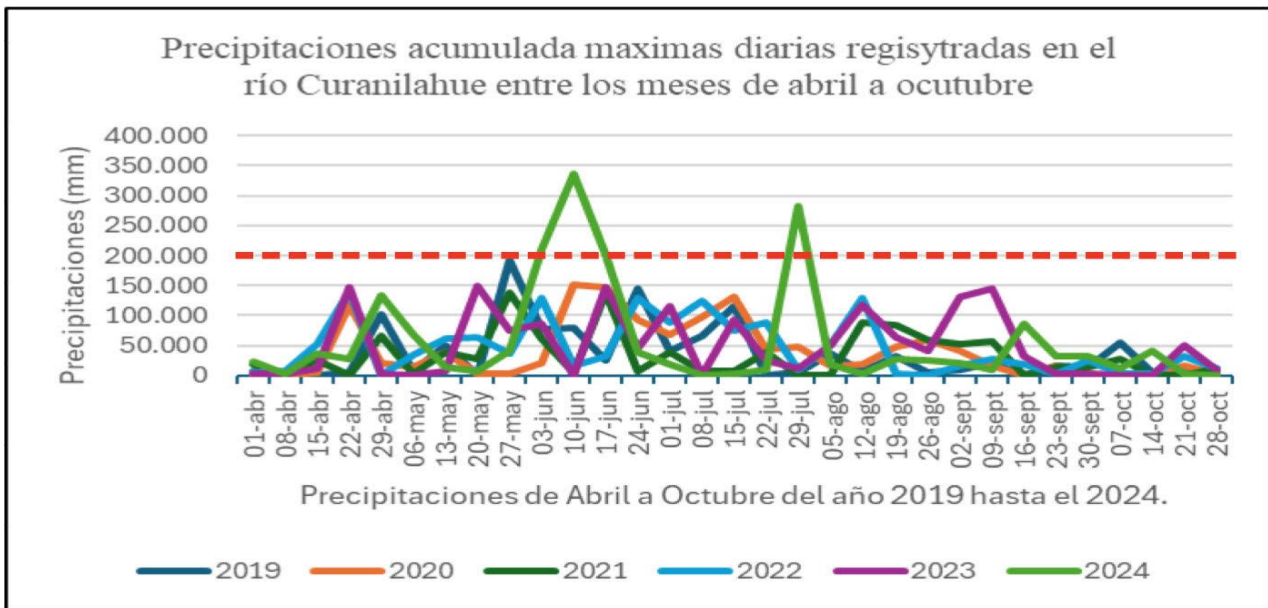


Figura 9: Precipitaciones diarias medidas desde abril a octubre del año 2019 al 2024, estación río Curanilahue, Comuna de Curanilahue, Provincia de Arauco. Elaboración propia a partir de información de la Dirección General de Aguas (DGA, 2024). En Rojizo se marca línea segmentada horizontal que indica el umbral de 200 mm de agua caída en 48 horas para que se genera una remoción en masa.

4.1.3 Factor antrópico

Para la clasificación del factor antrópico, se evaluó si la ladera presentaba intervenciones positivas, negativas o nulas, considerando si estas eran menores o mayores, y asignando los correspondientes niveles de peligro, según se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8: Clasificación del factor antrópico en las laderas con sus pesos relativos. Elaboración propia.

Tipo	Descripción	Peso relativo
Natural	Ladera en su estado natural o con una leve restauración que no compromete su estabilidad.	1
Intervención Leve a moderada.	Ladera con deforestación parcial, reemplazo del bosque por plantaciones forestales, cortes controlados, retiros leves de material y la incorporación de pequeñas estructuras de contención.	2
Intervención significativa.	Ladera con deforestación total o casi total, cortes abruptos en los taludes, retiro masivo de material y edificaciones en su escarpe superior o por encima de la ladera, sin medidas de contención.	3

Al punto 1 se le asignó un peso relativo de 2, ya que, como se observa en la Figura 10, el talud natural fue cortado para la construcción de una casa. Además, en la corona del talud hay árboles de aromos (especie introducida), lo que incrementa el peso del talud y contribuye a su inestabilidad. En el punto 2 se le asignó un

peso relativo de 3, debido a la presencia de edificaciones en la parte superior del talud, lo que incrementa la carga y contribuye al riesgo de remoción. Además, se agrega una cantidad significativa de vibraciones por el constante tránsito de colectivos y otros vehículos en la avenida Alameda, lo que también aumenta la probabilidad de una remoción. En el punto 3 se le asignó un peso relativo de 2, debido a que en la corona del talud se encuentra una plantación de pinos (otra especie introducida), lo que incrementa los esfuerzos internos en el terreno. Además, la zona es transitada por camiones de alto tonelaje (principalmente del sector forestal), lo que genera vibraciones en el talud. También circulan furgones escolares y otros vehículos, ya que se trata de una zona de tomas de terreno. En el punto 4 se le asignó un peso relativo de 3 debido a la presencia de edificaciones en la parte superior, sumado al corte en la corona del talud para la construcción de una casa, lo que incrementa la carga y contribuye al riesgo de remoción. Además, se observó la instalación de neumáticos como medida de contención, los cuales resultan inestables y añaden más peso al talud. También se ha realizado la tala de árboles para la construcción de la vivienda, lo que agrava aún más la inestabilidad del terreno.

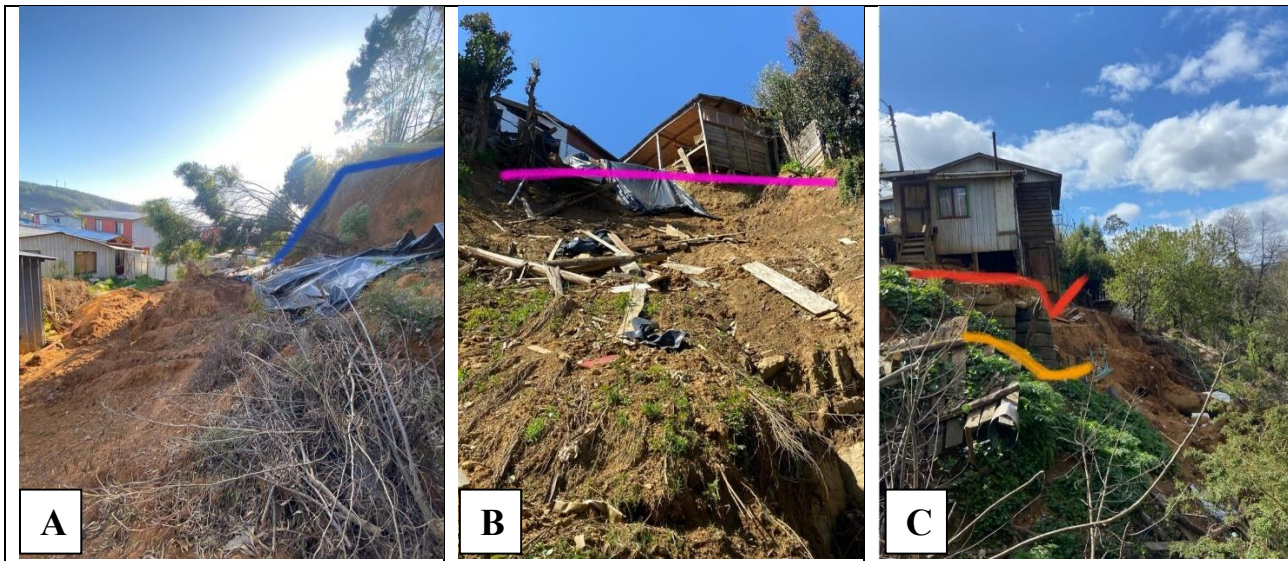


Figura 10: En la imagen A, del punto 1, se muestra un talud cortado cuya corona está cubierta por árboles de aromos (señalado con línea azul), lo que aumenta el peso sobre la estructura. En la imagen B, del punto 2, se destacan edificaciones ubicadas en la parte superior del talud (señalado con línea rosada), lo que incrementa significativamente la carga. Finalmente, en la imagen C, del punto 4, se observan edificaciones en la parte superior y un corte en la corona del talud para construir una vivienda (señalado con línea roja) y neumáticos (señalado con línea naranja) empleados como medida de contención, los cuales resultan inestables y añaden más peso al talud. Elaboración propia.

4.1.4 Factor Geológico y meteorización.

El punto 1 corresponde a la Formación Boca Lebu y los punto 2, 3 y 4, correspondientes a la Formación Curanilahue. En todos ellos se identifican principalmente areniscas que presentan variaciones en su grado de meteorización y composición. En el punto 1, la arenisca muestra un mayor grado de meteorización y presencia de materia orgánica, mientras que las zonas más claras corresponden a arenisca menos alterada. En el punto 2, la roca se caracteriza por una arenisca con escasa meteorización química, numerosas diaclasas y restos de carbón, además de arcilla, en la que se encontró un fragmento de carbón. En el punto 3 se observaron lutitas, areniscas y limolitas, todas propias de la Formación Curanilahue, con un alto contenido de arcilla, lo que explica la tonalidad blanquecina observada en una de las muestras. En el punto 4, se distingue una arenisca con presencia de limonita y arcilla.

Para la evaluación del factor geológico y meteorización, se consideró el estado de las rocas, diferenciando entre roca sana, levemente meteorizada o fuertemente meteorizada, así como la presencia de discontinuidades. A cada una de estas condiciones se le asignaron niveles de peligrosidad, según lo establecido en la Tabla 9, poniendo énfasis en las características que afectan directamente la estabilidad del terreno.

Tabla 9: Clasificación de la meteorización de la roca con sus respectivos pesos relativo. Elaboración propia.

Tipo	Descripción	Peso relativo
Roca sana	La roca está en su estado original, sin mostrar signos de alteración por meteorización.	1
Roca medianamente meteorizada	La roca presenta discontinuidades, pero conserva la mayor parte de su estructura original. Exhibe cambios de color y menos de la mitad de su masa ha sido convertida en suelo.	2
Roca muy meteorizada/Suelo residual/relleno	La roca está completamente fracturada, transformada en suelo residual. Muestra discontinuidades significativas y se desintegra fácilmente al tocarla.	3

En los puntos 1, 3 y 4 se les asignó un peso relativo de 3, como se evidencia en la Figura 11, debido al alto grado de meteorización de las rocas, evidenciado por sus tonalidades rojizas causadas por la oxidación de minerales. Esta meteorización reduce la resistencia mecánica y aumenta la susceptibilidad a deslizamientos, además de favorecer la infiltración de agua y la erosión, lo que fue determinante para su clasificación de peligrosidad. En el punto 2 se asignó un peso relativo de 2, considerando que, como se muestra en la Figura 12, la roca presenta diaclasas, pero conserva su resistencia mecánica, a pesar de encontrarse meteorizada

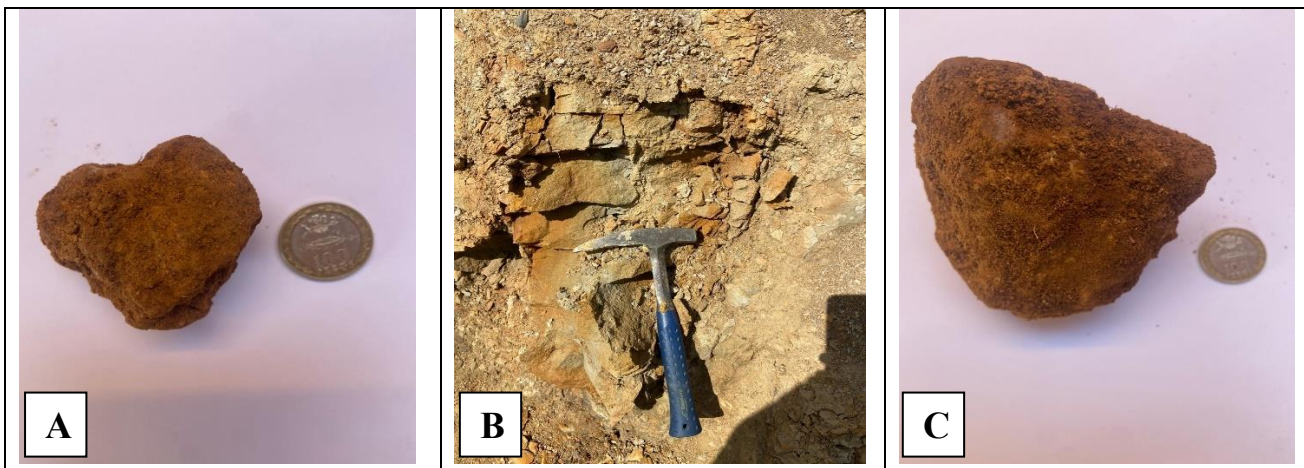


Figura 11: La Imagen A corresponde al punto 1, compuesto por arenisca con un alto grado de meteorización. La Imagen B muestra el punto 3, donde se observan lutitas y areniscas características de la Formación Curanilahue. Finalmente, la Imagen C corresponde al punto 4, compuesto por arenisca con presencia de limolita, ambas con un alto grado de meteorización. Elaboración propia.

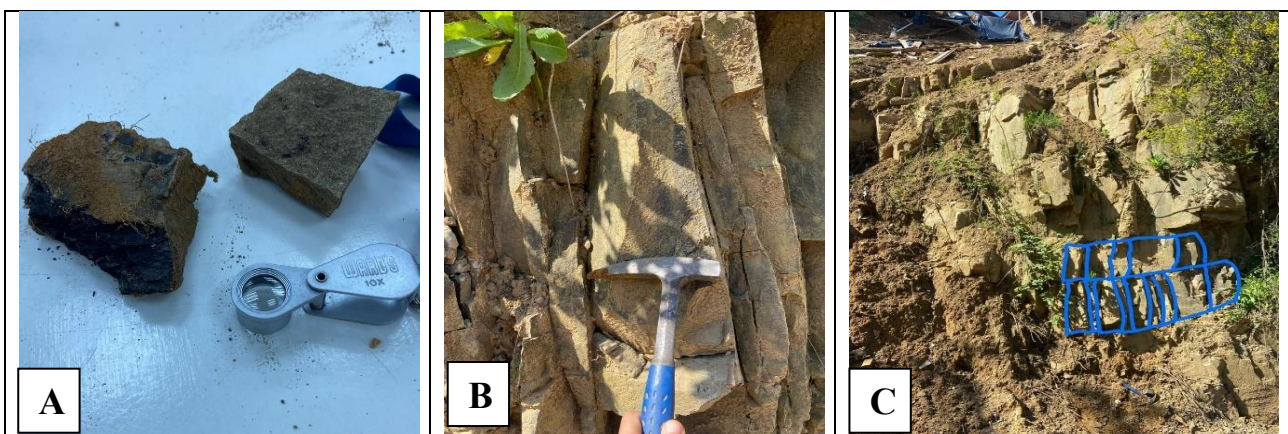


Figura 12. Muestras recolectadas del talud 2. Se observa un fragmento de carbón extraído del terreno (A), junto con las diaclasas presentes en el talud (B) y una vista detallada de estas estructuras, señaladas con líneas azules (C). Elaboración propia.

4.1.5 Orientación

Para calificar el peso relativo según la orientación de las laderas, se evaluaron factores como el viento, la exposición solar y las lluvias, clasificándolos en favorables, medianamente favorables o desfavorables, tal como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10: Clasificación de la orientación con sus respectivos pesos relativo. Fuente: Elaboración propia

Tipo	Descripción	Peso relativo
Favorable	La ladera está orientada entre el noreste y sur	1
Medianamente desfavorable	La ladera está orientada de norte-noreste y de sur-suroeste.	2
Desfavorable	La ladera está orientada entre suroeste y el norte.	3

Las laderas de las zonas estudiadas, correspondientes al punto 1, 2, 3 y 4; están orientadas hacia el suroeste, lo que implica una exposición directa a las condiciones climáticas de la región. Esta orientación favorece la acumulación de humedad debido a la incidencia directa de las precipitaciones y vientos predominantes, lo que aumenta la saturación del suelo y facilita la erosión superficial. Dado el impacto de estos factores, se asigna un peso relativo de 3 a cada uno de los cuatro taludes en el análisis de peligros.

4.1.6 Vegetación

Para evaluar este aspecto, se consideró la densidad de la vegetación, definiendo si es favorable, moderadamente favorable o desfavorable, Dependiendo de su potencial efecto adverso en la meteorización mecánica de la ladera, se le asignaron los valores establecidos en la Tabla 11.

Tabla 11: Clasificación de la vegetación con sus respectivos pesos relativo. Elaboración propia.

Tipo	Descripción	Peso relativo
Favorable	Una ladera con vegetación densa que contribuye a mantener su estabilidad.	1
Ligeramente desfavorable	La ladera tiene vegetación escasa o dispersa, o árboles en crecimiento que podrían favorecer procesos de remociones.	2
Desfavorable	La ladera tiene poca vegetación, lo que deja la superficie vulnerable a los procesos de meteorización.	3

En el punto 1, La vegetación es arbórea, compuesta mayoritariamente de aromos en crecimiento, lo que en el futuro podría incrementar su cobertura en la ladera, se le asigna un peso relativo de 3.

En el punto 2, la vegetación tiene una cobertura intermedia, con presencia de arbustos de retamillos en la ladera. Esta vegetación promueve a la estabilización del suelo gracias a su densa red de raíces, mitigando el riesgo de erosión y deslizamientos. Por ello, se le otorga un peso relativo de 2.

En el punto 3, se observa una notable presencia de vegetación arbórea introducida, predominantemente de pino, lo que contribuye significativamente al peso de la ladera, asignándole un peso relativo de 2.

Asimismo, se evidencia que los árboles de pinos presentan curvaturas en la parte baja de sus troncos (Figura 13). Estas deformaciones son reacciones naturales de los árboles a las perturbaciones en el suelo durante su crecimiento, que se pueden atribuir a movimientos en masa. Las curvaturas más pronunciadas y angulosas indican que estos árboles fueron afectados por un desplazamiento rápido del suelo en sus primeras etapas de crecimiento. En contraste, las curvaturas más abiertas y suaves sugieren un proceso de deformación más gradual. Dado que el fenómeno no se observa de manera generalizada ni homogénea, se puede asumir que no

se trata de un solo gran movimiento, sino que evidencia que la ladera sufre habitualmente remociones de menor calibre.



Figura 13: Los árboles de pino en el punto 3 presentan signos de basculamiento, lo cual es una indicación típica de remoción en masa. En las imágenes A y B, se observa que este fenómeno ocurrió a una velocidad considerable, probablemente cuando los árboles eran más jóvenes. En contraste, la imagen C sugiere un movimiento más lento. Elaboración propia

En el punto 4 la vegetación es insuficiente, por lo tanto, expone al talud a un significativo riesgo de remoción, la tala de un árbol ha incrementado esta vulnerabilidad, las intensas precipitaciones y vientos de la semana del 10 de junio provocó que un árbol se cayera, lo que hizo más inestable el talud y, por lo tanto, tiene un peso relativo 3.

4.1.7 Pendiente

Para evaluar el peso relativo de las pendientes, se tomó en cuenta si la ladera presenta una pendiente baja, media o alta, asignando a cada una los valores correspondientes que se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12: Clasificación de la pendiente con sus respectivos pesos relativos. Elaboración propia.

Tipo	Descripción	Peso relativo
Baja	Ladera/talud con pendiente menores a 7°	1
Media	Ladera/talud con pendientes que van de los 7° a los 20°.	2
Alta	Ladera/talud con pendientes mayores a 20°.	3

Debido a la morfología irregular y la caída de la ladera, se realizaron cinco mediciones de pendientes en zonas representativas utilizando una brújula tipo Brunton (Figura 14). Para el punto 1, se obtuvieron valores de 57°, 75°, 73°, 61° y 68°; para el punto 2, los valores fueron 40°, 37°, 32°, 45° y 35°; en el punto 3, se registraron 68°, 63°, 40°, 38° y 59°; y para el punto 4, los valores fueron 53°, 55°, 48°, 45° y 57°. Para determinar el peso relativo, se calculó la media aritmética de estos valores, resultando en 67° para el punto 1, 38° para el punto 2, 54° para el punto 3 y 50° para el punto 4, lo que corresponde a un peso relativo de 3 en los cuatro puntos.

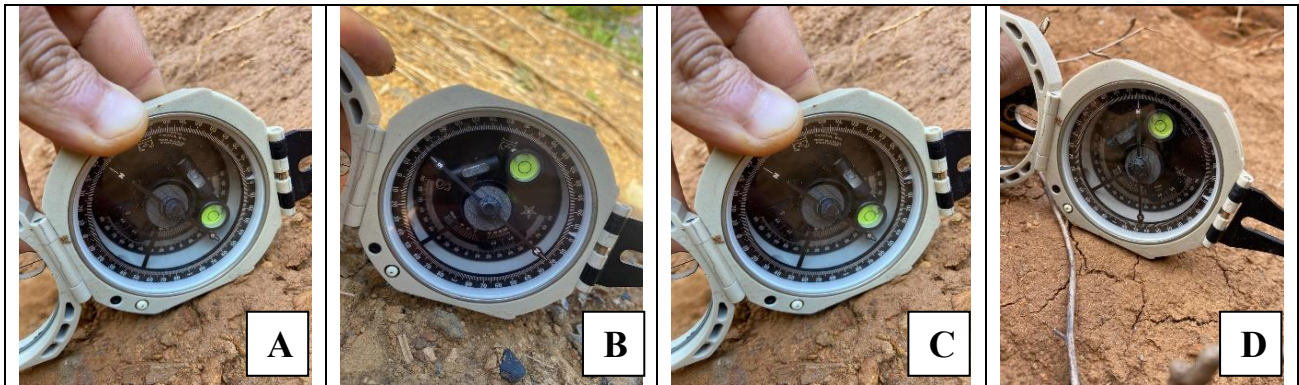


Figura 14: Pendiente del talud. **A)** Imagen de pendiente del punto 1. **B)** Imagen de pendiente del punto 2. **C)** Imagen de pendiente del punto 3. **D)** Imagen de pendiente del punto 4. Elaboración propia.

4.1.8 Drenaje y humedad

Para evaluar el peso relativo del drenaje del terreno, se toma en cuenta si la ladera se encuentra con presencia de humedad, alta, media o baja, asignando a cada una los valores correspondientes que se detallan en la Tabla 13.

Tabla 13: Clasificación de red de drenaje con sus respectivos pesos relativos. Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Descripción	Peso relativo
Baja	La ladera/talud no presenta evidencia de humedad.	1
Media	La ladera/talud muestra signos de humedad en la roca o el suelo.	2
Alta	La ladera/talud muestra signos visibles de sobresaturación del suelo o la roca.	3

La evaluación de este factor se realiza durante la visita del 9 de octubre de 2024, tras dos semanas de precipitaciones menores (<50 mm diarios) (Figura 9). En el punto 1 se detecta una alta presencia de nivel freático expuesto en superficie, lo que indica un estado de saturación significativo, asignándose un peso relativo de 3. El punto 2 presenta un nivel de humedad visible, lo que sugiere una saturación moderada y justifica un peso relativo de 2. En el punto 3 se observa una acumulación considerable de agua superficial, evidenciando una alta saturación del suelo, por lo que se le otorga un peso relativo de 3. Finalmente, el punto 4 muestra signos claros de humedad, reflejando una saturación moderada y recibiendo un peso relativo de 2. Todos estos indicadores se ilustran en la Figura 15.



Figura 15: En las dos primeras imágenes (A y B) se observa la zona de estudio del punto 1, la cual muestra una sobresaturación visible en la superficie. En la tercera imagen (C), el punto 3 también se encuentra sobresaturada en el pie del talud, ya que, tras la remoción, las áreas de drenaje han quedado bloqueadas. Elaboración propia.

4.2 Análisis jerárquico

4.2.1 Matriz de decisión

Para establecer y contrastar la influencia de los factores analizados, se utiliza una matriz de decisión (Tabla 14), a partir de la cual se determinan los pesos porcentuales asignados a cada factor para la ponderación de la susceptibilidad (Tabla 15). Los valores empleados en la matriz se asignan según un grado de relevancia establecido en la escala presentada en la Tabla 15, y su aplicación responde al criterio profesional fundamentado en las observaciones realizadas durante este estudio.

Tabla 14: Matriz de decisión. Elaboración propia.

Variables	F. meteorológico	F. antrópico	F. Geológico y meteorización	Orientación	Vegetación	Pendiente
F. meteorológico	1	2	4	2	5	7
F. antrópico	0,5	1	3	2	5	7
F. Geológico y meteorización	0,25	0,33	1	3	4	3
Orientación	0,5	0,5	0,33	1	2	3
Vegetación	0,2	0,2	0,25	0,5	1	2
Pendiente	0,14	0,14	0,33	0,33	0,50	1

Tabla 15: Valor propio y peso ponderado. Elaboración propia

Variables	Valores propios	Valor propio normalizado	Peso Ponderado (%)
F. meteorológico	2,871	0,363	36,3
F. antrópico	2,172	0,274	27,4
F. Geológico y meteorización	1,199	0,151	15,1
Orientación	0,889	0,112	11,2
Vegetación	0,464	0,059	5,9
Pendiente	0,323	0,041	4,1

4.2.2 Nivel de susceptibilidad

La clasificación de peligro se divide en 6 categorías: Muy bajo, Bajo, Medio bajo, Medio alto, Alto y Muy alto. Donde cada categoría es clasificada según un rango específico (Tabla 16)

Tabla 16: Rangos de nivel de peligro. Elaboración propia.

Clasificación	Nivel de peligro
Muy bajo	< 1,0
Bajo	1 - 1,49
Medio bajo	1,5 – 1,89
Medio alto	1,9 – 2,39
Alto	2,4 – 2,79
Muy alto	2,8 - 3

Con los pesos relativos asignados y luego considerando la ponderación de cada factor, se obtiene el valor de peligrosidad (Y) de remoción en masa para cada punto en estudio (Tabla 17).

Tabla 17: Ponderación de peligro obtenida para cada punto. Elaboración propia.

Punto	Peligrosidad (Y)	Nivel de peligro
1	2,60	ALTO
2	2,67	ALTO
3	2,54	ALTO
4	2,88	MUY ALTO

Los resultados obtenidos revelan que los punto 1, 2 y 3 presentan una alta susceptibilidad a remociones en masa, mientras que el punto 4 se caracteriza por un nivel de peligro muy alto. La distribución espacial de estos niveles de susceptibilidad dentro del área de estudio se ilustra en la Figura 16.

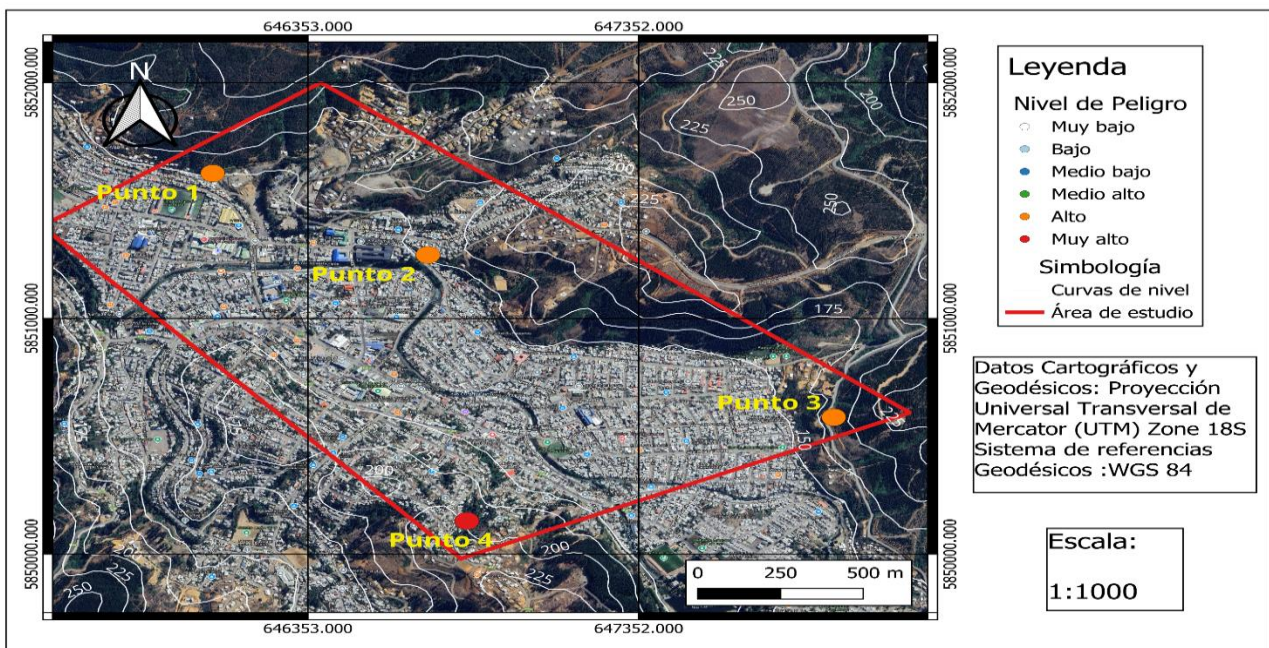


Figura 16: Mapa de susceptibilidad al peligro de movimientos en masa en el área de estudio. Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

5.1 Factores relevantes

De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio, los factores condicionantes más relevantes para la ocurrencia de remociones en masa en la comuna de Curanilahue son las precipitaciones y las características geológicas del terreno. Las lluvias, frecuentes y de alta intensidad durante los meses invernales, saturan los suelos, aumentando su peso y reduciendo su resistencia al esfuerzo cortante. En paralelo, la litología de la zona, compuesta mayoritariamente por rocas meteorizadas como areniscas y lutitas de la Formación Curanilahue, presenta una alta susceptibilidad debido a su bajo nivel de cohesión y resistencia mecánica.

Otros factores condicionantes destacados incluyen las pendientes pronunciadas, que favorecen la inestabilidad, y la vegetación, cuya ausencia o insuficiencia incrementa la exposición de los suelos a procesos erosivos e hídricos. El factor antrópico también juega un papel significativo, ya que las intervenciones humanas, como construcciones, tala de árboles y tránsito vehicular pesado, han alterado la estabilidad natural de las laderas, incrementando el peligro de remociones.

En cuanto a los factores desencadenantes, las precipitaciones intensas en cortos periodos, como las registradas en junio de 2024, se identifican como el principal detonante. A esto se suman las actividades humanas, particularmente la sobrecarga generada por edificaciones en zonas de riesgo y las vibraciones producidas por el tránsito pesado, las cuales han contribuido al colapso de los taludes en los puntos estudiados.

5.2 Recomendaciones de mitigación

Para el punto 1, se recomienda instalar sistemas de drenaje superficial y subterráneo para reducir la saturación del suelo, junto con la construcción de muros de contención en la base para estabilizar la ladera y proteger las viviendas cercanas. Además, es fundamental revegetar la zona con especies de raíces profundas y limitar las construcciones en la corona del talud, reforzando las edificaciones existentes.

En el punto 2, es esencial mejorar el drenaje para controlar la humedad y construir muros estabilizadores con drenaje interno. Se debe limitar el tránsito de vehículos pesados, utilizando pavimentos amortiguadores, y reforzar el suelo mediante revegetación con arbustos.

Para el punto 3, se recomienda restringir el tránsito de camiones pesados mediante rutas alternativas y sellar las grietas con materiales impermeables para evitar infiltraciones. Es importante reemplazar los pinos por especies nativas con raíces profundas y establecer un sistema de monitoreo con sensores de desplazamiento para controlar la estabilidad.

En el punto 4, es necesario evaluar la viabilidad de reubicar la vivienda afectada. Tanto el análisis jerárquico como las observaciones en terreno han indicado niveles de peligro muy altos, lo que sugiere la necesidad de considerar medidas preventivas, como la reubicación, para evitar posibles daños.

Por último, siempre es importante destacar la necesidad de acciones de mitigación no estructural, como la señalización, información y educación ciudadana. Es una parte infaltable de la gestión del riesgo preparar a habitantes de los sectores bajo peligro para prevenir acciones irresponsables que puedan detonar remociones, así como mantener el estado de alerta cuando se den las condiciones para generarlas. En un evento desastroso, estas medidas pueden contribuir a salvar vidas.

6. REFERENCIA

Arévalo, D. (2023). Desarrollo de un inventario de procesos de remoción en masa para la ciudad de Penco. Aportes para construir mapas de susceptibilidad frente a fenómenos geodinámicos [Memoria de título]. Universidad de Concepción.

- Basso, M., Martínez, X., Rodríguez, R., Oróstegui, P., García, A.** (2015). Una mirada interdisciplinaria: proceso de remoción en masa en el cerro La Virgen, Concepción, Chile. *XIV Congreso Geológico Chileno*, 346-348.
- Biobío Chile.** (2024, 12 de junio). Más de cinco mil personas y dos mil viviendas afectadas deja el desborde de río en Curanilahue. *BioBioChile*. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2024/06/12/mas-de-cinco-mil-personas-y-dos-mil-viviendas-afectadas-deja-el-desborde-de-rio-en-curanilahue.shtml>
- Camus, P., Arenas, F., Lagos, M., Romero, A.** (2016). Visión histórica de la respuesta a las amenazas naturales en Chile y oportunidades de gestión del riesgo de desastre. *Revista de Geografía Norte Grande*, 64, 9-20.
- Campos, F.** (2014). Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en la Quebrada de los Chanchos, región Metropolitana, Chile [Tesis de pregrado]. Universidad de Chile.
- Castillo, M.** (2021). Análisis de susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa para la localidad de Cocholgüe, Región del Biobío, Chile. [Tesis de pregrado.] Universidad de Concepción.
- Cruden, D., & Varnes, D.** (1996). Landslide types and processes. En Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247*. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D.C.
- Dirección General de Aguas (DGA)** (2024). Precipitaciones máximas anuales en 24 horas años 2019 a 2024 [Data set]. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. https://snia.mop.gob.cl/dgasat/pages/dgasat_param/dgasat_param.jsp?param=1
- Garibay-Pérez, R., Córdova-Ceballos, A., Ibáñez-Vargas, R., García, G., González, A., Salan, A., & Jiménez-Ramírez, J.** (2016). Análisis de estabilidad de ladera en el Cerro del Mesón de Poza Rica. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 3, 67-68.
- Greenway, D. R.** (1987). Vegetation and slope stability. En M. G. Anderson & K. S. Richards (Eds.), *Slope Stability* (pp. 187-230). John Wiley & Sons Ltd.
- González de Vallejo, L.,** (2002). *Ingeniería Geológica*. Editorial Prentice Hall. 715 p.
- Goodman, R. E.** (1989). *Introduction to rock mechanics*. John Wiley & Sons.
- Hauser, A.** (1993). Remociones en masa en Chile. *Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería*, 45, 7-29.
- Henríquez, E.** (2019). Análisis de susceptibilidad a remociones en masa en la comuna de Corral, al norte de los 39°54'S, Región de los Ríos, Chile [Tesis de pregrado]. Universidad de Concepción.
- Hyndman, D., & Hyndman, D.** (2011). *Natural hazards and disasters. Third Edition*. Cengage Learning.
- Hubert, J., & Gifford, G. F.** (1997). *Hydrological impacts of eucalypt plantations in Western Australia*. Journal of Hydrology, 193(1-4), 1-19.
- Inostroza, D., King, R., Montenegro, J.** (2017). Aplicación del modelo conceptual para procesos de remoción en masa a un talud de la Ruta CH-160, Lota, región del Biobío [Proyecto de título]. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Jacoby, D.** (2001). Vulnerabilidad del sector urbano de La Reina frente a desbordes de la Quebrada de Ramón [Memoria de título]. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

- Keefer, D. K.** (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95(4), 406-421.
- Lara, M. & Sepúlveda, S.** (2008). "Remociones en masa. Apuntes del curso año 2008". Departamento de Geología. Universidad de Chile. Recuperado de: <https://www.coursehero.com/file/24568322/APUNTE-DESLIZAMIENTOS-2008-GL62C-1pdf/>
- Lambe, W. & Whitman, R.** (1972). *Mecánica de suelos*. Instituto Tecnológico de Massachusetts, Editorial Limusa-Wiley S.A.
- Muñoz-Cristi, J.** (1956). Handbook of South American Geology. Chile. *Geological Society of America Memoirs*, 65, 187-214.
- Muñoz-Cristi, J. & Cecioni, G.** (1968). Contribución al conocimiento geológico de la región situada al sur de Arauco y participación de material volcánico en los sedimentos eocenos. *El Terciario de Chile, Sociedad Geológica de Chile. Editorial Andrés Bello*. 63-94. Santiago.
- Pineda, V.** (1983). Evolución paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico superior-Terciario. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile.
- Prieto, C.** (1985). Inestabilidades y erosión de laderas asociadas a riadas. En *Geología y prevención de riesgos por inundaciones*. Instituto Geológico y Minero de España. p. 117-192.
- Ramírez, P.** (2006). *Informe sobre remociones en masa en algunos sectores de la localidad de Curanilahue*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Inédito. 5 pp.
- Ramírez, P. & Derch, F.** (2010). *Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: Observaciones de daños en Curanilahue, Región del Biobío*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe inédito.
- Saaty, T. L.** (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. New York; London: McGraw-Hill International Book Co.
- Schuster, R. L., Highland, L. M.** (2001). Socioeconomic and environmental impacts of landslides in the Western Hemisphere. *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 01-0276.
- Selby, M. J.** (1993). *Hillslope materials and processes. Second Edition*. Oxford University Press, 451 p.
- Sepúlveda, N.** (2023). *Visita técnica por remociones en masa, Pasaje Loma Baja, sector Ricardo Lagos de la comuna de Curanilahue, región del Biobío*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe Técnico Inédito. 8 p. Santiago.
- Sepúlveda, S.** (1998). Metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, región Metropolitana [Tesis de pregrado]. Universidad de Chile, Santiago.
- Varnes, D. J.** (1978). Slope movement types and processes. En R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and Control*. National Academy of Sciences.
- Vargas, G.** (2002). *Estabilidad de taludes*. Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Vergara, E.** (2020). Análisis de susceptibilidad de remociones en masa en el área del Embalse Ralco, Comuna de Alto Biobío, Región del Biobío, Chile [Tesis de pregrado]. Universidad de Concepción.
- Wieczorek, G. F.** (1996). Landslides triggered by earthquakes. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 10, 76-89.