

## PROPUESTA METODOLÓGICA DE EVALUACIÓN DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA.

*C. Carrasco Burgos*<sup>1</sup>, *M. Basso Aránguiz*<sup>2</sup> y *M. Bravo Zapata*<sup>3</sup>

### RESUMEN:

La población mundial en la actualidad alcanzó los 8.000 millones de habitantes, número que trae consigo la necesidad de expandir el urbanismo a zonas de carácter montañoso, llanuras fluviales, áreas cercanas a bordes costeros, entre otras. Este escenario trae aparejado mayor susceptibilidad de la población de verse afectado por procesos geológicos desastrosos. En este contexto, en este trabajo se propone una metodología para evaluar riesgos por procesos de remoción en masa (PRM), basado en un análisis teórico partir de recopilación bibliográfica de varios autores. Se proporciona una guía detallada que cuenta con un esquema de recopilación de información base abordando los factores condicionantes de los PRM como; geología, geotecnia, geomorfología, hidrología, sismicidad y el efecto antrópico. La aplicación de la metodología propuesta permitirá una aproximación acertada tanto para la zonificación de un área de estudio, como para la evaluación de riesgos por estos procesos.

**PALABRAS CLAVES:** Procesos de remoción en masa; susceptibilidad, evaluación, factores

### ABSTRACT:

The world's population has now reached 8 billion inhabitants, a number that brings with it the need to expand urbanisation to mountainous areas, river plains, areas near coastal borders, among others. This scenario brings with it an increased susceptibility of the population to be affected by disastrous geological processes. In this context, this paper proposes a methodology to assess risks due to landslide processes, based on a theoretical analysis from a compilation of literature by several authors. A detailed guide is provided with a basic information gathering scheme that addresses the conditioning factors of the DRP such as geology, geotechnics, geomorphology, hydrology, seismicity, and the anthropic effect. The application of the proposed methodology will allow an accurate approach both for the zoning of a study area and for the assessment of risks due to these processes.

**KEYWORDS:** Mass removal processes; susceptibility, evaluation, factors

---

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [ccarrascobu@ing.ucsc.cl](mailto:ccarrascobu@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesora Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [matildebasso@ucsc.cl](mailto:matildebasso@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [matias.bravo@ucsc.cl](mailto:matias.bravo@ucsc.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de remoción en masa (PRM) se definen como procesos de transporte de material, ya sea de roca, suelos o detritos, de desarrollo lento o rápido en diferentes proporciones y desencadenados por una serie de factores (Hauser, 1993). Al momento de estudiar estos fenómenos, es importante considerar que existen factores condicionantes que intervienen directamente y que desempeñan un rol fundamental en la susceptibilidad de producir un PRM (Sepúlveda, 1998).

En este contexto, se hace fundamental, estudiar, analizar y evaluar los factores condicionantes de los PRM. Esta investigación entrega una propuesta metodológica de evaluación de PRM, a partir de la introducción de variables que controlan estos fenómenos, considerado para ello la recopilación y análisis teórico de metodologías descritas en la bibliografía que fueron homologadas en función de los resultados obtenidos por estudio y considerando las limitaciones y recomendaciones de estos para una mejora exhaustiva de la propuesta a continuación. Como referencia de este estudio, se tuvo a la vista información de la península de Hualpén, como, unidades geológicas, características estructurales, parámetros de suelos, rocas existentes, grado de meteorización y antecedentes históricos de PRM, ocurridos en el área.

A continuación, se presenta un marco teórico con los fundamentos de los PRM, factores desencadenantes y metodologías existentes para el levantamiento de información de remociones en masa. En el apartado siguiente se exponen antecedentes referenciales de la península de Hualpén, como caso de estudio, y finalmente se presenta una propuesta metodológica de evaluación de PRM que consiste en un Análisis Jerárquico AHR que considera múltiples y diferentes variables, además de su relación entre ellas lo que muestra un amplio panorama para tomar la decisión correcta.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Fundamento de los procesos de remoción en masa

#### 2.1.1. Definición de Remoción en masa

Se puede definir como movimientos de grandes volúmenes de material superficial que desciende pendiente abajo por acción directa de la fuerza de gravedad y por una serie de factores, hasta encontrar un nuevo punto de reposo (Henríquez, 2019). Varnes (1978 en Navarro, 2012) lo definen como el movimiento de una masa de roca, suelo o derrubios, de una ladera en sentido descendente, que dependen de su velocidad y forma del movimiento. Otras conceptualizaciones indican que se trata de movimientos descendentes ya sea de roca, suelo o ambos en una superficie de ruptura que puede ser curvo o plano. (Highland & Bobrowsky 2008). Según Lario y Bardají (2016), la remoción en masa corresponde al desplazamiento por efecto de la gravedad que no tiene directa intervención del agua, viento o hielo. Destaca tres características principales; procesos que actúan regularmente en masa, procesos asociados a laderas y la gravedad como agente transportador.

En el contexto chileno, la historia tiene registro de innumerables eventos catastróficos relacionados con los procesos de remoción en masa (PRM). Un ejemplo de ellos es lo ocurrido el 18 de junio de 1991, en la ciudad de Antofagasta (II Región): una serie de aluviones a consecuencia de precipitaciones de alta intensidad y baja duración, de la figura 1 que dejaron un total de 91 fallecidos, 19 desaparecidos y alrededor de 20.000 damnificados (Hauser, 1997). Debido a la magnitud del viento, precipitaciones y características del suelo el evento logró expandirse enérgicamente por las cuencas hidrográficas de la Cordillera de la Costa, las cuales llegaron a la ciudad desarrollando abanicos permeables, que al superar su capacidad de infiltración provocaron grandes remociones, causando destrucción de viviendas, tuberías, vehículos y muros (Hauser, 1997).



**Figura 1:** Desastre por aluvión ocurrido el 18 de junio de 1991 en la ciudad de Antofagasta (Hauser, 1997)

Otro ejemplo de PRM, es el ocurrido al interior del Parque Pedro del Río Zañartu en la comuna de Hualpén (Región del Biobío), el 16 de junio del 2019, en el cual se describió un volcamiento de un bloque de roca, desde un talud de 10 m de altura (Figura 2). Este suceso fue originado por múltiples factores que influyen en la estabilidad de laderas como, la fuerte pendiente, presencia de rocas fracturadas que forma los bloques de gran tamaño, el debilitamiento por vegetación y rocas meteorizadas (Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN, 2019).



**Figura 2:** Remoción en masa por volcamiento en Parque Pedro del Río Zañartu, comuna de Hualpén, Región del Biobío. (SERNAGEOMIN, 2019)

### 2.1.2. Clasificación:

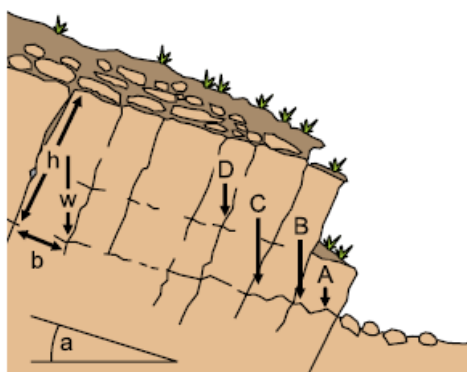
Según González de Vallejo, 2002), las remociones en masa se clasifican en:

- a. *Caída (Fall, rockfalls)*: Masa generalmente de rocas que se desprende de un talud pronunciado en una superficie de corte que se ha producido un mínimo desplazamiento de rotura (Figura 3). Estas ocurren por causas variadas como el ciclo hielo-deshielo, el cual aumenta el volumen de la roca en 9%, lluvias intensas, terremotos y socavación (Gutiérrez, 2008).



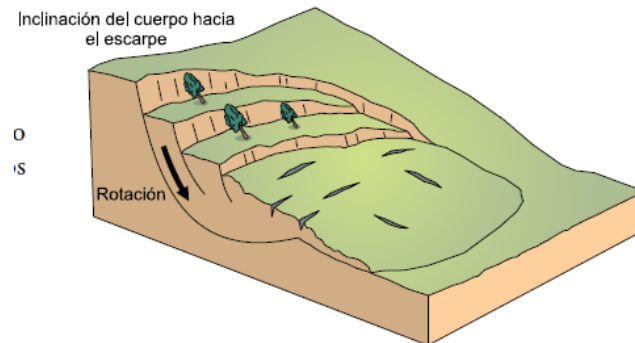
**Figura 3:** Esquema caída de rocas (Proyecto Multinacional Andino, 2007)

- b. *Volcamiento (Toppling)*: Rotación hacia delante de la ladera de una masa de suelo o roca que se desprende en torno a un eje por debajo del centro de gravedad, pueden ser rápidas o lentas (Figura 4). Normalmente son roturas verticales que forman planos de discontinuidad. Las causas por las cuales se generan son, el ciclo de hielo-deshielo, meteorización salina por areniscas y disolución en calizas (Gutiérrez, 2008).



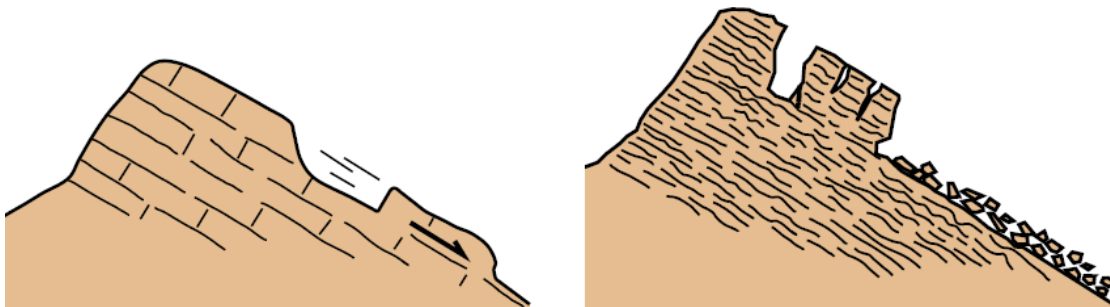
**Figura 4:** Esquema volcamiento (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

- c. *Deslizamiento Rotacionales (Slumps)*: Deslizamiento de tierra alrededor de un eje que es paralelo al contorno de la ladera, lo que genera un desplazamiento de cizalla en una superficie cóncava (Figura 5). Los mecanismos que gatillan este tipo de movimiento son, laderas con bloques muy fracturados, laderas con potentes depósitos, laderas sin vegetación y laderas de margas y arcillas (Gutiérrez, 2008).



**Figura 5:** Esquema deslizamiento rotacional (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

- d. *Deslizamientos Traslacionales:* El movimiento de la masa de traslación ilustrado en la figura 6 se desplaza hacia afuera o hacia abajo y hacia afuera a lo largo de una superficie plana o ligeramente ondulada y su componente rotacional es mínimo. Es un deslizamiento lento en rocas y en suelos toma velocidad con las precipitaciones (Gutiérrez, 2008).

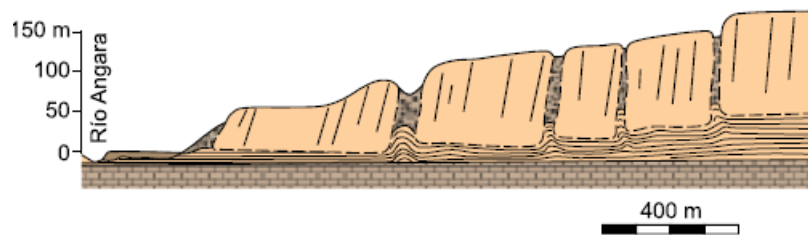


**Figura 6:** Esquema deslizamientos traslacionales (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

Existen diversos tipos de deslizamientos traslacionales, definidos por Gutiérrez, 2008 los cuales son:

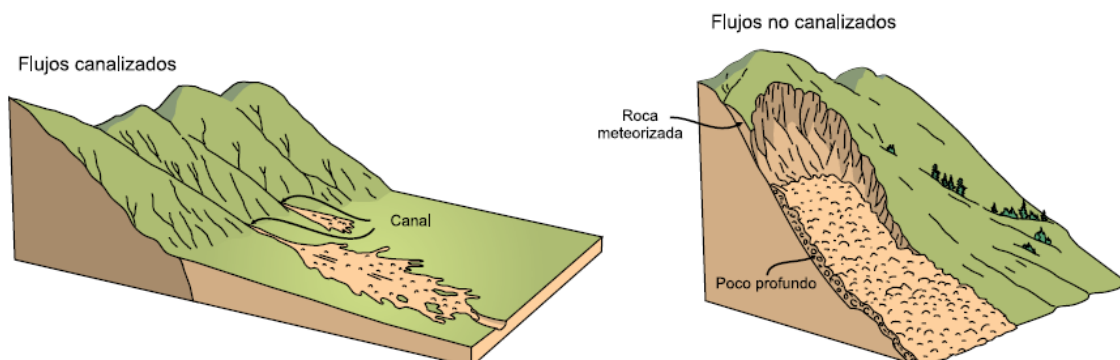
- Deslizamientos de rocas (Rock slides): Originado en sustratos donde el ángulo de los planos de discontinuidad es parecido al de la ladera.
  - Deslizamiento de bloques (Block slides): Originado por cambios bruscos de roca.
  - Deslizamientos de suelos y detritos (Slab slides): Originado en suelos meteorizados.
  - Deslizamientos de detrito (Debris slides): Roturas en material no consolidado, fracturándose en pequeñas partes.
  - Coladas de barro (Mudflow): Movilización de detritos que pueden ser o no tan finos, con un movimiento relativamente lento.
  - Deslizamiento con colada de barro (Slump-earthflow): Originado por lluvias intensas.
- e. *Extensiones laterales (Lateral Spreading):* este proceso ocurre en pendientes muy suaves o planos de una roca o masa de suelo más fuerte y se mueve sobre un material más blando (Figura 7). Ocurren donde hay suelos licuables y comúnmente en zonas sísmicas. Pueden ser lentas y a veces rápidas después de un evento sísmico. La extensión se favorece por factores que desestabilizan la capa débil

como, la licuación de la capa inferior por un efecto sísmico, la sobrecarga ya sea antrópica o natural de la tierra sobre una ladera sin estabilidad, la deformación plástica del suelo inestable, la licuación de la arcilla marina desencadenada de una alteración por erosión en una ribera de un río o pendiente y la saturación de la masa por precipitación, cambios de las aguas subterráneas y/o por fusión de la nieve (Gutiérrez, 2008).



**Figura 7:** Esquema extensiones laterales (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

- f. *Flujo (Flow)*: Tipo de movimiento de masa fluidificada por efecto del agua o aire, factor desencadenante por la pérdida de resistencia que genera, a diferencia del deslizamiento este involucra mayor deformación interna (Figura 8) (Gutiérrez, 2008).



**Figura 8:** Esquema de flujo canalizado (izquierda) y no canalizado (derecha) (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

Existen diferentes tipos de flujo como:

- Flujo de detritos (Debris flows): La viscosidad determina la erosión. Se genera en laderas abruptas por precipitación o fusión de hielo, los generados por agua fluyen y al encontrarse con suelo suelto, se mezclan y producen el flujo. El suelo pierde la resistencia al corte, debido a que aumenta la presión de poros en casi un 100%, esto quiere decir que la cantidad de agua debe sobrepasar la capacidad de infiltración del suelo (Sepúlveda, 2000). Flujos de tierra (Soil flows): Misma similitud con debris flows, pero con partículas de tamaños superior como arena y gravillas.
- Flujos de roca (Rock flows): Asociados a deformaciones gravitacionales profundas.
- Mudflow: Se denomina mudflow si el material movilizado contiene más del 50% de partículas finas.

g. *Movimientos de masa complejos*: Caracterizado por cumplir más de un tipo de movimiento

- Avalanchas de rocas: Movimiento descrito por la fluidificación por aire y a grandes velocidades logra movilizar desprendidas rocas por efecto de la gravedad.

- Flujos deslizantes (Flow slides): Flujo deslizante que pierde cohesión, genera colapsos estructurales y alcanzan grandes velocidades a desplazamientos extensos.
- Grandes deslizamientos gravitacionales: deslizamientos rocas de rocas antiguos sobre planos de estratificación (Gutiérrez, 2008).

## 2.2. Factores que influyen en los procesos de emoción en masa (PRM)

Según la literatura los principales factores que influyen en la generación de los PRM son:

### 2.2.1. Geología y Geotecnia

Existen tópicos que representan características fundamentales del material como, suelos poco consolidados, rocas fracturadas o foliadas, rocas alteradas que componen la ladera; la humedad, plasticidad, densidad, litología, mineralogía, permeabilidad, alteración y grado de meteorización, que permiten la determinación de susceptibilidad de PRM (Campos, 2014).

La meteorización conduce a la desintegración del material que contiene planos de debilidad que reducen la resistencia de cizalla y la cohesión del suelo que esta por sobre el material sin alterar (Gutiérrez, 2008). Otro punto para tener en cuenta es la historia geológica de la ladera a estudiar, puesto que se logra interpretar datos influyentes en las remociones activas (Gutiérrez, 2008).

En primera instancia se menciona como factor importante el tipo de suelo al que nos enfrentaremos en el terreno y uno de ellos son los suelos residuales que según Blight (1997) se define como un suelo derivado de la meteorización y disgregación de la roca in situ, ya sea ígnea, metamórfica o sedimentaria, la cual no ha sido transportada de su localización original. El comportamiento ingenieril de estos suelos es diferente al de los suelos transportados y depositados y sus propiedades son la combinación de los ambientes encontrados.

Brand (1985) menciona 3 características de los suelos residuales: en

- Son heterogéneos y difíciles de ensayar
- El suelo se forma en climas tropicales o climas templados a húmedos
- Por lo general existen zonas de alta permeabilidad, que quiere decir, que son muy susceptibles a cambios rápidos de humedad y saturación.

Por otra parte, Flandes (2017) define la meteorización mecánica como el proceso que produce la fractura de la roca en pequeños fragmentos sin cambiar su composición. Mientras que la meteorización química descompone la roca y estructuras de los minerales, produciendo otros nuevos desarrollados por disolución, carbonatación, oxidación e hidrólisis.

### 2.2.2. Geomorfología

Las causas morfológicas desencadenantes están constituidas por la geometría, energía del relieve y exposición de la ladera (Campos, 2014). Cualquier variación de esta particularidad, puede convertir una ladera estable en una inestable. Por ejemplo, en laderas de baja inclinación no es habitual ver deslizamientos, aunque esto va a depender de cada región del mundo, lo que si se asegura es que la relación de una alta inclinación y fuertes precipitaciones generan numerosos deslizamientos, como también en los cauces se reciben amenazas de aluviones y flujos (Gutiérrez, 2008). Un factor condicionante podría ser la orientación de la ladera, ya que el tiempo de exposición al sol influye en el grado de humedad, la vegetación y meteorización de esta (Campos, 2014).

### 2.2.3. Clima y Vegetación

Del clima se obtienen condiciones que se relacionan con la meteorización y erosión del ambiente de forma directa, vinculados a los fenómenos extremos como sequías e inundaciones (Campos, 2014).

Las precipitaciones intensas y prolongadas son el principal factor condicionante y desencadenante que contribuye a la desestabilización de laderas producto del aumento de poros del suelo o rocas, la saturación reduce la resistencia del material ya sea, por peso de la lluvia, nieve o hidratación de arcillas (Gutiérrez, 2008). Mardones F, Echeverría C., F., y Jara B., C(2004) señalan que precipitaciones por sobre los 100 mm en 24 hrs, son insuficientes para provocar eventos de remoción en masa, inundaciones y anegamientos, con efectos graves considerando una intensidad de 150mm/24 hrs.

Mencionado anteriormente la humedad nos otorga mayor vegetación y además de reducir la erosión origina una barrera natural de contención para la mitigación de cualquier PRM (Campos, 2014).

#### 2.2.4. Sismos y Terremotos

Los sismos y terremotos son factores desencadenantes de deslizamientos y están activamente presentes en Chile. Las aceleraciones provocan esfuerzos normales y de corte generando una ladera inestable (Campos, 2014).

La ubicación geográfica de Chile se encuentra en una zona de convergencia activa por la placa de Nazca y Sudamericana (Madariaga, 1998). La tectónica generada y otros factores que actúan periódicamente durante toda su evolución geológica causan el desarrollo de estructuras frágiles y complejas que a su vez originan morfologías empinadas, zonas de falla y/o fracturas geomecánicamente inestables, además de erupciones y terremotos (Hauser, 2000).

Mardones y Rojas (2012) usan el término de peligros de remoción en masa cósmicos para aquellos eventos originados por terremotos, donde las laderas colapsan por la aceleración gravitacional y Antinao y Gosse (2009) relacionan los sismos de mayor profundidad con la generación de remociones pequeñas y superficiales. Las remociones en masa inducida por movimientos telúricos que involucran suelos de baja compacidad, sin cohesión, saturados y de bajas pendientes generalmente traen como resultados una licuación del suelo, ya que incrementa la presión de poro y disminuyen los esfuerzos efectivos actuantes (Lara, 2007). En terrenos con arcillas y limos la saturación logra que estos tipos de suelos se comporten como un fluido y produzcan el fenómeno de licuación (Gutiérrez, 2008).

#### 2.2.5. Actividad Antrópica

Actividades como excavaciones, obras civiles, represamiento de cauces, acumulación de escombros o extracción de áridos generan la desestabilización de laderas, contribuyendo a la debilitación artificial del material y a la facultad para ser movilizado en un próximo evento (Lara, 2007). En factores desencadenantes se encuentra la deforestación, las faenas mineras y embalses que desestabilizan por vibraciones inducidas, ocasionando una pérdida gradual del macizo rocoso (Lara, 2007).

Por último, el cambio climático ha afectado en las variaciones de temperatura, intensidad de precipitaciones y frecuencia de fenómenos climáticos extremos, lo que otorga una mayor probabilidad en la ocurrencia de estos PRM (Gutiérrez, 2008).

### 2.3. Metodologías existentes para el levantamiento de información de remoción en masa

Se han elaborado una serie de metodologías, que permiten evaluar los PRM (Tabla 1), las cuales consideran parámetros geológicos, geotécnicos, morfológicos, etc. A continuación, se presenta una compilación de dichas metodologías. La metodología propuesta por Lara (2007) está basada en el cálculo de índice de susceptibilidad (IS) mediante la sumatoria de valores de ponderación para cada factor condicionante de PRM como: pendiente de laderas, características geológicas y geotécnicas de los materiales, geomorfología y clima y vegetación (Muñoz, 2013), y, considera la evaluación del peligro separada en dos fases, la primera utilizar la ponderación de factores condicionantes y la segunda analizar de manera cuali-cuantitativa la estabilidad de laderas y el alcance de la remoción en masa (Lara, 2007).

De forma similar, y coincidente con Lara (2007), Muñoz (2013) desarrolla una forma de evaluación de susceptibilidad de PRM, obteniendo un IS por ponderaciones de factores anteriormente mencionados. La diferencia entre ambas metodologías radica en la escala a emplear, ya que Lara (2007) recomienda trabajar a

nivel de hoya hidrográfica o escalas similares, en cambio Muñoz (2013) genera la evaluación de áreas urbanas a escalas de 1:5.000 y 1.10:000 o menor para obtener mayor detalle de las denominadas áreas sensibles.

Por otra parte, Mardones y Vidal (2001) adecuan el método de la ONU (Ayala-Carcedo, 1993 en Mardones & Vidal 2001) estudiando tres factores de riesgo, los cuales se describen a continuación:

**Peligrosidad:** Consiste en el analizar por fotointerpretación el levantamiento del terreno, información de pozos y sondajes en la zona a estudiar para la elaboración de perfiles estratigráficos, la identificación del nivel freático, granulometría, composición mineralógica y factores detonantes como intensidad de las precipitaciones. El modelo se aplica en una matriz y una agregación cartográfica por medio de SIG SPANS 5.2. destacando factores de riesgos como topografía, tectónica, morfometría de pendientes, sedimentología, hidrología, clima y el factor antrópico en una carta de escala 1:10.000 (Mardones & Vidal 2001).

**Vulnerabilidad:** Se requiere el análisis de estructuras y materiales de los antecedentes de eventos catastróficos se ponderan factores como antigüedad, morfología, orientación, material de construcción y conservación de esta para luego promediar este factor por manzana para cada peligro (Mardones & Vidal 2001).

**Exposición:** Se realiza un catastro de la cantidad de habitantes por manzana la cual es ordenada para ser cartografiada y catalogada en alta y baja exposición (Mardones & Vidal 2001).

En otra perspectiva, Ramírez y Vivallos (2009) presentan resultados obtenidos de una investigación geológica y geofísica: umapa geológico del suelo de Concepción que incorpora la geología, geofísica y antecedentes geotécnicos. Estos autores utilizan la metodología de Nakamura (1989) la cual se aplica a estudios de microzonificación sísmica basada en el cociente espectral de componentes horizontal y vertical en una misma zona, considerando diversas suposiciones en ondas Rayleigh la cual intenta eliminar su efecto para describir la función de transferencia. Finalmente, con el modelo de Nakamura (1989) se obtienen mapas preliminares de zonificación sísmica y de suelos.

López (2017) evalúa la susceptibilidad de PRM por medio de métodos estadísticos multivariados, con la elaboración de un inventario de estos procesos, donde se identifica estructura litológica y tipo de movimiento. La susceptibilidad se determinó por un modelo Lineal generalizado (GLM) y modelo aditivo generalizado (GAM).

De igual forma, Uchida, T., Yokotama, O., Suzuki, R., Tamura, K., y Ishizura, T. (2011). utilizan un método para evaluar la susceptibilidad de ocurrencia dedeslizamientos de tierra, de magnitud catastróficos profundos bajo tres criterios, presencia de antiguas y profundas cicatrices de deslizamientos de tierra, reconocimiento de fallas o accidentes geográficos provocados por movimientos de masas, y existencia de pendientes empinadas., mediante los índices de acierto normalizado e índice de cobertura, obteniendo un mapa de inventario de deslizamientos mediante el examen estereoscópico de fotografías aéreas y mapas geológicos con las fallas activas e inactivas que pueden controlar estos movimientos.

Por su parte, Bunn, M., Leshchinsky, B. y Olsen, M. (2020) realizan un mapeo que utiliza modelos digitales de elevación (DEM) de alta resolución , con un inventario de extensiones de deslizamientos de tierra mapeados, en primera instancia los deslizamientos dentro de cada inventario se clasificaron en dos grupos; (1) deslizamientos rotacionales o (2) deslizamientos compuestos, asignados según la morfología del escarpe principal y la extensión del depósito, en segundo lugar se ejecuta la optimización del "hybrid-spline method" y en tercera instancia proyectan una superficie de ruptura dimensional y previa topografía. Finalmente se logra calcular los volúmenes de deslizamientos de tierra y mapear superficies de ruptura.

López, (2015) realiza un análisis histórico de los umbrales de precipitación en 24 horas, que generaron PRM en los años 1990-1999 y 2000-2013, en la ciudad de Talcahuano, Chile, específicamente en laderas urbanizadas de la costa. Este autor consideró, la relación intensidad-duración (I-D), estimación de la probabilidad de excedencia con el cálculo del periodo de retorno, dada la función de distribución de la probabilidad Gumbel comprobada por la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. El estudio recomienda complementar con datos geomorfológicos y en mayor detalle en el registro de información de precipitaciones.

Finalmente, Saaty, (1980) pondera las variables en cuestión descritas por el ejecutor, ante la toma de cualquier decisión, en función de las relaciones de importancia que tienen entre ellas. Para ello, se implementa el Proceso Analítico Jerárquico (AHR, por sus siglas en inglés) o también conocido como Método de Saaty, en donde define criterios numéricos de comparación. De esta forma, se construye la matriz de clasificación para las

variables geología, geotecnia, precipitación, geomorfología, vegetación, sismicidad y factor antrópico. Los valores de preferencia entre las variables fueron determinados en función de su rol en un PRM (desencadenante, tipo de material, estabilidad, etc.) y la periodicidad de estos. Una vez efectuada la matriz, se procede a calcular los pesos relativos ( $P_i$ ) y auto vectores o vectores de preferencia ( $W_i$ ) a este últimos se evalúa si es consistente, ya que AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia entre las opciones pareadas del tomador de decisiones, para finalmente ponderar la peligrosidad de riesgo para cada variable Saaty, (1980).

La Tabla 1 presenta un resumen de las metodologías de evaluación de susceptibilidad de PRM, descritas en este texto a partir del análisis bibliográfico.

Tabla 1. Metodologías existentes de evaluación de susceptibilidad.

| Autor                     | Metodología   |
|---------------------------|---|
| Lara (2007)               | Cálculo de índice de susceptibilidad (IS) por ponderación de factores. cómo, pendiente, geología, geotecnia, clima y vegetación. Metodología recomendada a nivel de cuenca hidrográfica.  |
| Muñoz (2013)              | Cálculo de índice de susceptibilidad (IS) por ponderación de factores como, pendiente, geología, geotecnia, clima y vegetación. Metodología recomendada en áreas urbanas a escalas 1:5000 y 1:10.000  |
| Mardones & Vidal (2001)   | Adaptación del método propuesto por la ONU (Ayala-Carcedo, 1993), con la agregación cartográfica de tres factores de riesgo: peligrosidad, vulnerabilidad y exposición. La jerarquía de cada factor genérico asociado se evalúa en una matriz con ponderaciones de bajo, medio y alto riesgo.   |
| Ramírez y Vivallos (2009) | Analiza los períodos dominantes del suelo calculando la relación entre los espectros de Fourier de las componentes horizontal y vertical de registros de microtrepidaciones.  |
| López (2015)              | Realiza un análisis histórico de los umbrales de las laderas de la costa de Talcahuano a partir de la relación intensidad-duración, estimando su probabilidad de excedencia comprobada por la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.   |
| López (2017)              | Evaluación de susceptibilidad de PRM, identificando estructura litológica y tipo de movimiento. Determinado por un modelo Lineal generalizado (GLM) y modelo aditivo generalizado (GAM).  |
| Uchida et al. (2011)      | Evalúa la susceptibilidad de deslizamientos bajo tres criterios, presencia de antiguas cicatrices de deslizamientos catastróficos, presencia de fallas provocados por movimientos en masa, presencia de pendientes empinadas por medio de índices de acierto normalizado e índice de cobertura. |
| Bunn et al. (2020)        | Mediante modelos digitales de elevación DEM e inventarios de deslizamientos mapeados, propone una relación entre el área del deslizamiento de tierra con el espesor máximo de este.   |
| Saaty (1980)              | Ponderación de variables en función de su importancia definida por el ejecutor por medio del Proceso Analítico Jerárquico (AHR). Define criterios numéricos de comparación para construir una matriz y ponderar la peligrosidad del riesgo por variable.  |

Elaboración propia, 2022.

### 3. ANTECEDENTES REFERENCIALES DE CASO DE ESTUDIO

#### 3.1. Geología

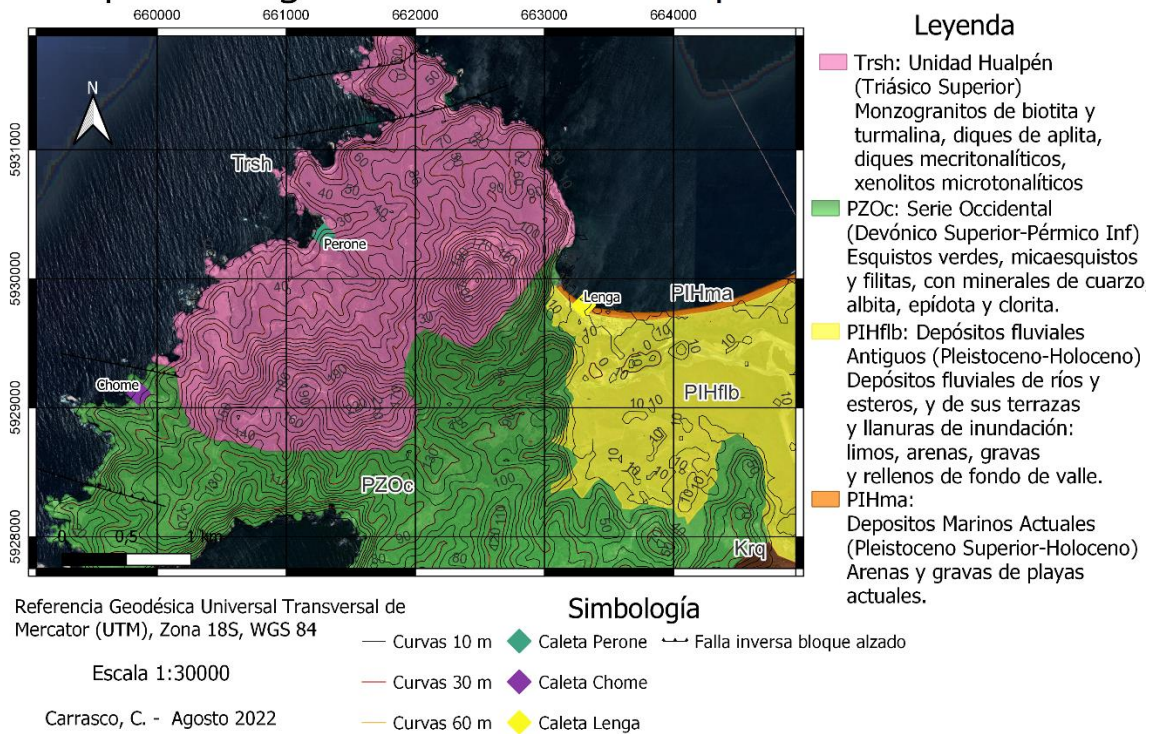
En la península de Hualpén aflora el Basamento Metamórfico Costero (PZOc) del Paleozoico Superior (Hervé 1977) (Figura 9), compuesto de metapelitas, pizarras, filitas y esquistos producto de metamorfismo regional de bajo grado y, localmente, por metamorfismo de contacto (Burón, P., Ardiles, M., Echtler, H., Figueroa, O.

y Glodny, J. 2003). Estas rocas presentan abundantes bandas de cuarzo y el afloramiento en general exhibe planos de estratificación conservados.

Adicionalmente se reconocen rocas pertenecientes a la unidad Monzogranitos Hualpén (Trsh), que instruye al Basamento Metamórfico, y que está constituido principalmente de monzogranitos de biotita (Geología de Campo II, 2009; Hervé, F. et al 2017)

Los depósitos no consolidados que cubren mayor área son los Depósitos fluviales del río Biobío (PIHflb), caracterizados por arenas negras, y los Depósitos Marinos Modernos (PIHma) compuestos de arena y gravas dispuestos en capas horizontales (Geología de Campo II, 2009; Ramírez, P. & Vivallos, J. 2009; SERNAGEOMIN) (Figura 9).

## Mapa Geológico Península de Hualpén



**Figura 9:** Mapa geológico Península de Hualpén. (Modificado de Geología Campos II, 2009).

Desde un punto de vista geotécnico, para la unidad metamórfica (PZOc) el ángulo de fricción varía entre los 30° y 40°, según la clasificación realizada por Hoek y Bray (1981). Mientras que las rocas intrusivas (Trsh), presentan un ángulo de fricción entre los 35° y 45° (Hoek & Bray, 1981).

Destaca en la zona, la presencia de un intenso diaclasamiento en el macizo rocoso (Figura 10) asociado a esfuerzos tectónicos producto de la convergencia de placas y de la intrusión del Batolito Costero, cuya variación de esfuerzos compresivos cambia a medida que transcurre el tiempo geológico (Hervé, 1977).



**Figura 10:** Familias de diaclasas metamórficas en la costa de Caleta Chome. Registro de agosto 2021.

Tanto la caracterización de los diferentes tipos litológicos como la presencia de estructuras y discontinuidades son consideradas para el análisis de riesgo, de acuerdo con lo postulado por Mardones y Vidal (2001) (Tabla 2). Se consideran los valores de peso y tipificación de riesgo según bibliografía.

Tabla 2. Matriz de evaluación de riesgos.

| Evaluación/Peso relativo   | 1 (bajo)   | 2 (medio)   | 3 (alto)  |
|--|--|---|---|
| Litología  | Roca sana, sedimentos homogéneos/coherentes  | Sedimentos finos, coherentes, roca semialterada           | Arcillas, limos, sedimentos heterogéneos/incoherentes, roca alterada                            |
| Estructuras (cercanía a falla, espaciamiento, abertura, estratificación) | >200 m de zona de falla<br><20mm-60mm<br>6-20mm – Cero<br>En contra del plano de estratificación | 100-200 m de zona de falla<br>60mm-600mm<br>6-20mm – Cero | <100 m de zona de falla<br>600mm-2m<<br>>6m<br>>200mm –<br>A favor del plano de estratificación |
| Estado de fracturas  | Discontinuidades muy débiles   | Discontinuidades débiles                                  | Discontinuidades generalmente fuertes   |

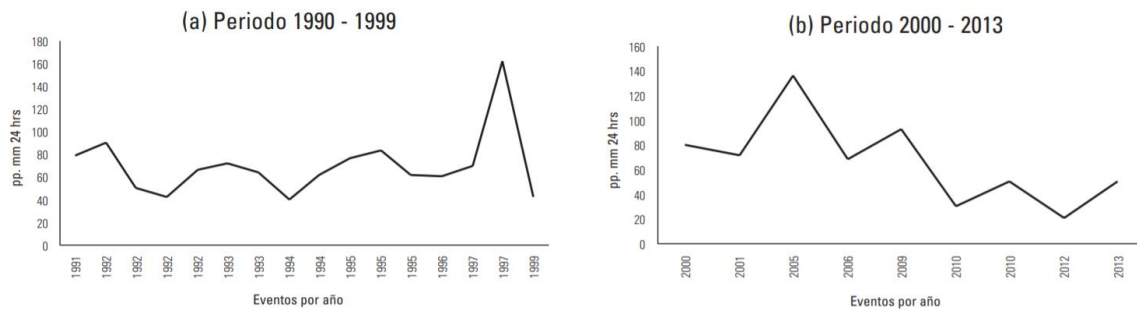
Modificado de Mardones y Vidal, 2001.

### 3.2. Clima e Hidrología

La cuenca hidrográfica del río Bío-Bío, abarca a las provincias de Ñuble, Concepción, Bío-Bío, Arauco, Malleco y Cautín, ubicadas en los paralelos 36°42' -38°49' Latitud Sur y los meridianos 71°-73°20' Longitud Oeste con un área de 24.029 km<sup>2</sup>. El río Biobío nace en la laguna Galletué y desemboca en la Península de Hualpén (Borsdorf, A.; C. Marchant; A. Rovira y R. Sánchez. 2020).

Desde un punto de vista climático, la península de Hualpén presenta un clima que varía desde un clima mediterráneo a templado frío (Erices, 2018). Registra una temperatura media anual de 13°C y la mayor

precipitación va desde mayo a agosto (7°C) con 1.050 mm de lluvia (Erices, 2018). La figura 11 muestra gráficamente las precipitaciones (pp) máximas registradas en 24 horas en dos periodos. En el año 1997 se observa una fuerte alza de precipitaciones con 162 mm en 24 horas asociada al fenómeno del niño. Por otro lado, en el periodo 2000-2013 destaca el año 2005, en el cual en 20 horas se registraron 144,78 mm (López, 2015).



**Figura 11:** Precipitaciones máximas registradas en 24 hrs para el periodo 1990-1999 y 2000-2013. (López 2015).

Estudios indican que el período de retorno de los registros de lluvia de 24 horas correspondientes a los años 1990-1999, muestra que existe un 75% de probabilidad de que en un período de 4 años la precipitación total diaria sea menor o igual a 85,1 mm, mientras que entre 2000-2013 es superable con una cantidad menor o igual a 84,8 mm precipitaciones y se concluye que bajo estas condiciones climáticas pueden desencadenar PRM (López, 2015). De esta forma, los valores de P24 para los distintos periodos de retorno arrojan como resultado que la probabilidad aumenta, mientras aumenta el periodo de retorno.

Pradenas (2014), define umbrales de precipitación máxima y mínima a corto (100 mm) y largo plazo (50 mm a 30 días). A partir de esto, y en conjunto con los datos de precipitaciones máximas en 24 horas registrados por la DGA, se presentan los valores de peso y tipificación del riesgo, según los rangos de precipitación complementados (Tabla 3).

Tabla 3. Matriz de evaluación de riesgo.

| Precipitación | Peso relativo | Tipo de peligro |
|---------------|---------------|-----------------|
| <50 mm        | 1             | Bajo            |
| 50 – 100 mm   | 2             | Medio           |
| >100 mm       | 3             | Alto            |

Modificado de Pradenas (2014).

### 3.3. Geomorfología

Desde un punto de vista geomorfológico, destacan en la península de Hualpén terrazas marinas labradas predominantemente, en rocas ígneas y metamórficas (caletas Chome y Peroné), mientras que en el sector de caleta Lengua, se observan tres unidades geomorfológicas características correspondientes a la Cordillera de la Costa, la llanura de inundación del río Lengua, y playa y dunas de depositación marina (Erices, 2018).

Hualpén presenta cimas peniplanizadas, con elevados topográficos que varían entre los 9 m s.n.m. hasta los 188 m s.n.m. Gran parte de las pendientes de la zona varían entre los 15° y 40° de inclinación, con acantilados que sobrepasan los 40° por ende, son objetos de estudio por ser un elemento de riesgo (Erices, 2018).

Según el mapa de peligro de remociones en masa del Servicio Nacional de Geología y Minería (2010) la península presenta un grado de peligro medio y bajo. Para el análisis de riesgo, en la Tabla 4, se presentan los valores de peso y tipificación del riesgo, según los grados de pendiente.

Tabla 4. Matriz de evaluación de riesgos.

| Pendiente (°) | Peso relativo | Peligrosidad |
|---------------|---------------|--------------|
| < 10°         | 1             | Baja         |
| 10° - 20°     | 2             | Media        |
| > 20°         | 3             | Alta         |

Modificado de Mardones y Vidal (2001).

### 3.4. Vegetación

La península de Hualpén muestra una extensa variedad de especies, como bosque nativo, matorrales y pastizales. Destaca la existencia de diversas especies originarias como por ejemplo boldo, litre, olivillo, laurel, peumo y presencia de flora endémica como Queule y Pitao (Martínez 2021). Este factor es importante, ya que la presencia o ausencia de vegetación puede influir en la estabilidad o la desestabilización de un talud, y por lo tanto, participar indirectamente de la ocurrencia de los PRM (Basso, M., Martínez, X., Rodríguez, R., Oróstegui, P., García, A. (2015). Por otra parte, el estudio de la inclinación o deformación de los troncos de los árboles a favor de la pendiente puede dar indicios de remociones en masa como reptación (Basso et al., 2015).

En general, la península de Hualpén presenta una vegetación abundante, lo cual indica estabilidad en laderas y protección de la erosión del talud. Por otra parte, los sectores con ausencia o escasa vegetación se presenta un suelo meteorizado con una alta susceptibilidad de ocurrencia de PRM.

Para el análisis de riesgo, en la Tabla 5, se presentan los valores de peso y tipificación del riesgo, según el porcentaje de cobertura vegetal (modificado de Mardones y Vidal 2001).

Tabla 5. Matriz de evaluación de riesgos.

| Cobertura (%) | Peso relativo | Peligrosidad |
|---------------|---------------|--------------|
| >75%          | 1             | Baja         |
| 50% - 75%     | 2             | Media        |
| <50%          | 3             | Alta         |

Modificado de Mardones y Vidal (2001).

### 3.5. Geotecnia y Geomecánica

Tienen relación directa con las características intrínsecas del terreno, factores externos (ambientales o antrópicos) que generan condiciones favorables para que se desarrollen PRM, pero no constituyen el evento desencadenante del movimiento, tales como: la existencia de materiales de distinta características y permeabilidad tanto en suelo como roca; presencia de materiales expansivos a la hidratación como en el caso de arcillas también presentes e suelos residuales ; presencia de grietas y fracturas en las cuales se produce infiltración de agua y procesos de gelifracción.

En la península de Hualpén, específicamente en el camino a caleta Peroné, es posible observar inestabilidad en laderas. La Figura 12 muestra la situación de un talud en los meses de mayo (izquierda) y agosto (derecha) del 2022. Como es posible observar en agosto, del presente

año, el talud presenta desprendimientos de roca y suelo, probablemente asociados a la abundancia de precipitaciones en dicho período. Adicionalmente, el grado de meteorización del macizo rocoso se constituye en un factor detonante que incide directamente en la ocurrencia de PRM (Figura 13)



**Figura 12:** Desprendimiento de roca suelo ruta O-478 Ramuncho Hualpén. (Gentileza de Miguel Abarzúa, Sebastián Antinao & Gonzalo Peña, 2022).



**Figura 13:** Grado de meteorización. Presencia de maicillo de (Gentileza de Miguel Abarzúa, Sebastián Antinao & Gonzalo Peña, 2022)

Dada la importancia de la meteorización in situ de los macizos rocosos y la generación de suelos residuales de baja resistencia, a continuación, se presenta una descripción cualitativa del grado de meteorización y el factor de riesgo asociado.

a. Medición del grado de meteorización

El grado de meteorización controla la disposición mineral de arcillas en los suelos residuales y se puede caracterizar de manera cualitativa (Tabla 6) (Ferrer, 1999).

Tabla 6. Descripción cualitativa del grado de meteorización.

| Tipo | Término                   | Descripción   |
|------|---------------------------|---|
| I    | Fresco                    | No existen meteorización, sólo una baja decoloración en las grandes superficies de discontinuidad.  |
| II   | Ligeramente meteorizado   | Todo el afloramiento rocoso está decolorado por meteorización. La decoloración indica alteración del material y de las superficies de discontinuidad.   |
| III  | Moderadamente meteorizado | Menos de la mitad del macizo aparece descompuesto o transformado en suelo. La roca.   |
| IV   | Altamente meteorizado     | Más de la mitad del macizo aparece descompuesto o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece de forma continua o como núcleos aislados. |
| V    | Completamente meteorizado | Todo el macizo aparece descompuesto o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.                                      |

Modificado de Ferrer y Gonzales de Vallejo, 1999.

Para efectos de estudio simplificaremos esta tabla en los estándares universales de niveles de peligro (Tabla 7).

Tabla 7. Factor de riesgo del grado de meteorización.

| Evaluación/Peso relativo | 1 (bajo)                            | 2 (medio)                                  | 3 (alto)   |
|--------------------------|-------------------------------------|--|--|
| Grado de meteorización   | Muy decolorado a Decoloración tenue | Decoloración tenue a localmente decolorado | Localmente decolorado a penetrantemente decolorado |

Modificado de Ferrer y Gonzales de Vallejo, 1999.

### 3.6. Efectos Antrópicos

La pérdida de resistencia del material se debe a factores naturales o artificiales, este último referido a la realización de obras como excavaciones, fallas de presa, etc. Según los antecedentes, la zona de la península de Hualpén se ha visto afectada por numerosas intervenciones por la expansión inmobiliaria, turística y forestal. Este último factor puede acelerar procesos de erosión que implica la pérdida de la resistencia del terreno (Ilustre Municipalidad de Hualpén, 2018).

En el año 2010 durante el terremoto del 27 de febrero se desencadenaron remociones en masa, producto de la operación de una cantera de áridos en la unidad intrusiva del monzogranito, (Galdames et al., 2018).

Otro tipo de amenaza es la propagación de incendios forestales por fogatas en zona de camping. En los últimos 30 años se han registrados 34 siniestros destruyendo flora, fauna, alterando suelos y afectando a la estabilidad de taludes (Torres, 2018).

### 3.7. Sismicidad

La península se encuentra en el borde costero de la VIII Región, afecto al proceso de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana, responsable de la frecuente actividad sísmica que afecta al litoral (Ruiz & Madariaga, 2018).

Los sismos en conjunto a parámetros intrínsecos del suelo son causantes del fenómeno de licuación, ocurrido por la pérdida de fuerza y rigidez en suelos saturados y sin cohesión. Los ingredientes característicos de estos eventos son los suelos jóvenes, saturados, por lo tanto, existe una tendencia de que se producen en áreas bajas cercanas a cuerpos de agua como; lagos, bahías, océanos, puertos, entre otros (Falcón, MF; Arenas, M; Ramírez, P; Marín, M; Creixell, C; Huerte, S. 2012 ).

Dada la configuración geológica de la península de Hualpén (Figura 9), se puede señalar que en Caleta Chome y Peroné existe nula capacidad de licuefacción, ya que ambos lugares están emplazados en roca ígneas y metamórficas, mientras que Caleta Lengua es altamente susceptible a este evento por presentar suelos saturados, sedimentos no consolidados y de baja compactación, propensos a ser licuados (Falcón, MF 2012).

Para el análisis de riesgo se presentan los valores de peso y tipificación del riesgo, según la caracterización susceptible a generar eventos de licuación modificado de Falcón et al (2012) (Tabla 8).

Tabla 8. Matriz de evaluación de riesgos.

| Peso Relativo | Peligrosidad | Caracterización   |
|---------------|--------------|---|
| 1             | Baja         | Terrenos compuestos por roca con nula capacidad de licuación  |
| 2             | Medio        | Terrenos con susceptibilidad media de experimentar licuación con un nivel freático entre 5 a 10 m de profundidad                        |
| 3             | Alto         | Suelos altamente susceptibles a experimentar licuación. Suelos formados por sedimentos no consolidados de baja compactación y saturados |

Modificado de Falcón et al (2012).

## 4. PROPUESTA METODOLÓGICA

Los resultados obtenidos fueron establecidos gracias a la inspiración de la península de Hualpén, a través de la etapa bibliográfica y experimental, se buscaba validar la propuesta metodológica generalizando y amplificando su utilidad para todo el territorio nacional.

A continuación, se presenta una metodología para evaluar PRM (Tabla 9) aplicable a distintos contextos geológicos. En ese sentido, en el primer apartado de geología, los subapartados no se les ha asignado valor, de modo de ampliar el uso de esta metodología a diferentes zonas de estudio. Se sugiere en este apartado, que a criterio de cada evaluador y en base a la recopilación de información, asigne valores de 1 a 3, siendo 1 el riesgo más bajo y 3 el más alto (Ejemplo en Tabla 2).

En el ítem de litología debe determinar si nos encontramos en presencia de roca o suelo, en caso de ser roca considerar el RMR del macizo rocoso con un estadillo para la toma de datos geomecánicos en campo, desde donde se pueda obtener de manera confiable si estamos ante un afloramiento de roca ígnea, sedimentaria o metamórfica y su estado de meteorización (revisar tabla 6). En el caso de ser suelo debemos identificar en contexto y con sus respectivos parámetros geotécnicos, ya sea con ensayos in situ o de laboratorio.

En el apartado de estructuras es importante evaluar las discontinuidades presentes en la roca, ya que afectan en la permeabilidad y resistencia. Se debe identificar la naturaleza, geometría y espaciamiento, debido a que esta información es de gran influencia en el comportamiento del macizo.

El tópico de clima e hidrología nos limita a trabajar a nivel de hoya hidrográfica y nos invita a caracterizar el tipo de cuenca. En cuanto a las precipitaciones (pp) define pp máximas en 24 horas con su nivel de riesgo establecido por Pradenas, 2014.

Respecto de la orientación de las laderas, fue complicado designar un nivel de riesgo, ya que no existen antecedentes notorios de PRM, por lo tanto, este se llevó a cabo de manera paralela con la exposición de la ladera a las horas de sol. En cuanto a las pendientes más afectadas por fenómenos gravitacionales corresponden a inclinaciones moderadas sobre los 20°.

La vegetación es de bajo riesgo cuando cubre el 75% del área y es de alto riesgo cuando es escasa a nivel general de toda la zona, recordando que la presencia de esta causa un efecto estabilizador en la ladera.

En lo referente a la geotecnia va a depender del tópico de geología, pues ya se tiene claridad de a que nos estamos enfrentando, ya sea suelo o roca y que procedimiento llevar a cabo. En este factor sólo se solicita la humedad y saturación cuando la ladera sea identificada como suelo, en el caso de ser roca se evalúa en la clasificación RMR con el fin de no sobreestimarlos.

Si queremos lograr una tabla óptima se deben considerar las propiedades intrínsecas del suelo, se deben definir los parámetros de entrada a las distintas clasificaciones geomecánicas, tener la mayor cantidad de información posible para encontrar el límite suelo-roca.

En caso de que no sea posible encontrar el límite, se clasifica como suelo, en caso de ser circular se debe tratar como suelo, aunque sea roca débil, debido a sus mitigaciones a dicho mecanismo. Los suelos residuales que presentaron la información base de este estudio se deben trabajar como suelos sedimentarios, al igual que el maicillo, siempre considerando la influencia de las estructuras heredadas con el grado de meteorización.

Los otros factores presentados en la propuesta metodológica se pueden trabajar tal cual están estipulados en la tabla, estos arrojarán un valor 1, 2 o 3 dependiendo de la zona de estudio y nivel de riesgo.

Finalmente, la sismicidad tiene en cuenta las remociones en masa por movimientos telúricos y por licuación. Además de la magnitud del evento, el primero se asocia principalmente a las pendientes de la ladera y el segundo al tipo de suelo, uniformidad de las partículas y altura del nivel freático. Se considera 7.5 Mw como valor desencadenante a dichos procesos, aunque este depende de los factores anteriormente mencionados.

Tabla 9. Matriz de evaluación de riesgos.

| <b>Geología</b>                         |                  |  |   |   |
|---|------------------|--|---|---|
| <b>Litología</b>                        | <b>Material</b>  | <b>Formación</b>                               | <b>Características</b>  |   |
|   | Roca             | Ígnea<br>Metamórfica                           | Formadas por cristales de minerales.                                    | Considerar RMR del macizo rocoso.       |
|   |                  | Sedimentaria                                   | Formadas por granos cementados.   |   |
|   | Roca meteorizada | Ígnea<br>Metamórfica<br>Sedimentaria           | Existe roca aparente, pero se encuentra descompuesta.                   |   |
|   | Suelo            | Residual                                       | Roca meteorizada, no se distinguen las características físicas de esta. | Clasificar según grado de meteorización |
| Aluvial<br>Coluvial<br>Glacial<br>Loess |                  | Grupo de partículas o bloques de suelo o roca. | Considerar parámetros geotécnicos                                       |   |

|                                    |   |   |  |                                   |
|------------------------------------|---|---|--|-----------------------------------|
|                                    | Materiales heterogéneos   | Roca, roca meteorizada, suelo.                            | Mezcla de diversos materiales en un mismo perfil.  | Considerar parámetros geotécnicos |
| <b>Estructuras</b>                 | <b>Espaciamiento de discontinuidades</b>                                  | <b>Características del Espaciamiento</b>                  |  | <b>Espaciamiento</b>              |
|                                    |   | Extremadamente ancho                                      |  | >6m                               |
|                                    |   | Muy ancho   |  | 2m-6m                             |
|                                    |   | Ancho   |  | 600mm-2m                          |
|                                    |   | Medio   |  | 200mm-600mm                       |
|                                    |   | Cercano   |  | 60mm-200mm                        |
|                                    |   | Muy cercano   |  | 20mm-60mm                         |
|                                    | Extremadamente cercano  |   | <20mm  |                                   |
|                                    | <b>Tamaño de Abertura</b>   | <b>Características</b>                                    |  | <b>Distancia</b>                  |
|                                    |   | Ancha   |  | >200mm                            |
|                                    |   | Moderadamente ancha                                       |  | 60-200mm                          |
|                                    |   | Moderadamente angosta                                     |  | 20-60mm                           |
|                                    |   | Angosta   |  | 6-20mm                            |
|                                    |   | Muy Angosta   |  | 2-6mm                             |
| Extremadamente Angosta             |   | >0-2mm  |  |                                   |
| <b>Foliación y Estratificación</b> | <b>Características</b>  |   | <b>Riesgo</b>  |                                   |
|                                    | A favor del plano   |   | Potencial  |                                   |
|                                    | En contra del plano   |   | Mínimo   |                                   |
| <b>Estado de fracturas</b>         | Analizar cada familia de discontinuidades según criterio de falla.        | Falla toppling  | Calcular factor de seguridad y revisar si existe probabilidad de falla para cada tipo de rotura. (FS=2 seguro) |                                   |
|                                    |   | Falla planar  |  |                                   |
|                                    |   | Falla cuña  |  |                                   |
| <b>Clima e Hidrología</b>          |   |   |  |                                   |
| <b>Cuencas</b>                     | <b>Tipos de cuencas</b>   |   |  |                                   |
|                                    | Exorreicas o Abiertas   | Endorreicas o Cerradas                                    | Arreicas   |                                   |
| <b>Precipitaciones</b>             | Definir precipitaciones máximas en 24 horas (Intensidad de precipitación) |   |  |                                   |
|                                    | Bajo  | Medio   | Alto   |                                   |
|                                    | <50mm   | 50-100mm  | >100mm   |                                   |
| <b>Geomorfología</b>               |   |   |  |                                   |
| <b>Orientación</b>                 | Bajo  | Medio   | Alto   |                                   |
|                                    | S, NE   | N, NE   | NW, W y SW   |                                   |
| <b>Pendiente</b>                   | Bajo  | Medio   | Alto   |                                   |
|                                    | <10°  | 10°-20°   | >20°   |                                   |
| <b>Vegetación</b>                  |   |   |  |                                   |
| <b>Cobertura</b>                   | Bajo  | Medio   | Alto   |                                   |
|                                    | >75%  | 50% -75%  | <50%   |                                   |
| <b>Geotecnia</b>                   |   |   |  |                                   |
| Humedad y saturación del suelo     | Bajo  | Medio   | Alto   |                                   |
|                                    | Nivel freático a nivel del terreno  | Presencia del nivel freático en medio del perfil de suelo | Sin presencia del nivel freático   |                                   |

| <b>Sismicidad</b>  |  |  |  |
|--|--|--|--|
| Periodicidad   | Bajo                                       | Medio  | Alto   |
|  | Sismos $M_w > 7,5$ en los últimos 2 años   | Sismos $M_w > 7,5$ en los últimos 5 años                   | Sismos $M_w > 7,5$ en los últimos 10 años        |
| Infraestructura  | Bajo                                       | Medio  | Alto   |
|  | No existe infraestructura cercana al talud | Zona con infraestructura intermedia cercana al talud       | Zona con infraestructura mayor cercana al talud  |
| Tipo de suelo  | Bajo                                       | Medio  | Alto   |
|  | Suelos Finos                               | Arenas uniformes<br>$\% \text{ finos} \geq 35\%$           | Arenas uniformes<br>$\% \text{ finos} \leq 35\%$ |
| <b>Antrópico</b>   |  |  |  |
| Movimiento de tierra                                     | Bajo                                       | Medio  | Alto   |
|  | No presenta                                | Presenta algunos puntos                                    | Presenta en varios puntos                        |
| Incendios forestales                                     | Bajo                                       | Medio  | Alto   |
|  | No existen antecedentes                    | Existen pocos antecedentes                                 | Registros periódicos                             |
| <b>Eventos de Remoción en masa en la zona de estudio</b> | Bajo                                       | Medio  | Alto   |
|  | No existen antecedentes                    | Existen antecedentes aislados o se desconocen antecedentes | Existen antecedentes periódicos                  |

Elaboración propia a partir diferentes metodologías citadas en este documento (2022).

#### 4.1. Análisis Jerárquico Ponderado

Existen decisiones sencillas y otras complejas que dependen de múltiples criterios, es por eso que es necesario ponderar las variables en cuestión (descritas en el apartado anterior), en función de las relaciones de importancia que tienen entre ellas. Para ello, se implementa el Proceso Analítico Jerárquico (AHR, por sus siglas en inglés) o también conocido como Escala de Saaty, en donde define criterios numéricos de comparación (Tabla 10) con su respectiva definición:

Tabla 10: Criterios numéricos de comparación.

| Valor | Definición             | Comentario  |
|-------|------------------------|---|
| 1     | Igual importancia      | Criterio A igual de importante que criterio B                             |
| 3     | Importancia moderada   | La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B |
| 5     | Importancia grande     | La experiencia y el juicio favorecen fuertemente al criterio A sobre el B |
| 7     | Importancia muy grande | El criterio A es mucho más importante que el B                            |
| 9     | Importancia extrema    | La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda    |

|                |   |
|----------------|---|
| <b>2,4,6,8</b> | Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar |
|----------------|---|

Modificado de Saaty (1980) en Yepes (2018).

De esta forma, el método de Saaty compara las combinaciones de criterio para determinar el peso que cada característica tiene en la decisión o el producto, a través de una escala numérica de 1 a 9, donde 1 es que ambos criterios son igual de importantes y 9 que la diferencia de importancia es notoria.

Se construye la matriz de clasificación para las variables, (Tabla 11) con siete factores, los cuales se comparan uno a uno. La diagonal de la matriz debe tener el valor uno, ya que estamos bajo un mismo criterio. Si comparamos el criterio A por sobre B obtendremos un valor de la tabla, mientras que en el caso contrario B por sobre criterio A utilizamos el inverso multiplicativo.

Tabla 11. Matriz de preferencia de las variables del análisis para la macrozona sur.

| Variable      | Geología | Geotecnia | Precipitación | Geomorfología | Vegetación | Sismicidad | Antrópico |
|---------------|----------|-----------|---------------|---------------|------------|------------|-----------|
| Geología      | 1        | 1         | 1             | 2             | 6          | 9          | 7         |
| Geotecnia     | 1        | 1         | 1             | 3             | 5          | 6          | 5         |
| Precipitación | 1        | 1         | 1             | 7             | 3          | 5          | 4         |
| Geomorfología | 0,50     | 0,33      | 0,14          | 1             | 6          | 3          | 4         |
| Vegetación    | 0,17     | 0,20      | 0,33          | 0,17          | 1          | 2          | 2         |
| Sismicidad    | 0,11     | 0,17      | 0,20          | 0,33          | 0,50       | 1          | 1         |
| Antrópico     | 0,14     | 0,20      | 0,25          | 0,25          | 0,50       | 1          | 1         |

Elaboración propia a partir del Método de Saaty, 2022.

Los valores prioritarios entre variables se determinan por los antecedentes, expuestos anteriormente, en función de su rol en un PRM, y en algunos casos teniendo en cuenta su periodicidad. Dentro de los factores con mayor ponderación se encuentra la precipitación, debido su ocurrencia cíclica según las estaciones del año, donde los meses invierno son los períodos más lluviosos.

Otro evento con periodicidad, son los sismos que tienden a generar eventos de remoción en masa cuando son de  $M_w > 7$  y que pueden amplificarse con una falla cercana al lugar estudiado. Sin embargo, en la zona de estudio referencial, no hay registros de PRM efectuados por movimientos telúricos a la fecha.

Una vez realizada la matriz sin inconsistencias, se procede a calcular los pesos relativos ( $P_i$ ) que se calcula como la suma de los valores de cada columna y vectores de preferencia ( $W_i$ ) que es el promedio de los valores de fila expuestos en la Tabla 12.

Tabla 12. Pesos relativos y vectores de preferencia

|       |       |
|-------|-------|
| $P_i$ | $W_i$ |
| 3,92  | 1,05  |

|       |      |
|-------|------|
| 3,90  | 0,97 |
| 3,93  | 0,97 |
| 13,75 | 1,54 |
| 22,00 | 1,13 |
| 27,00 | 0,98 |
| 24,00 | 0,91 |

Elaboración propia a partir del Método de Saaty, 2022.

Para no fallar en los principios de transitividad y proporcionalidad Saaty definió la relación de consistencia como  $CR=CI/RCI$

CI: índice de consistencia es:

$$CI = \frac{n_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (1)$$

n: Dimensión de la matriz

$n_{m\acute{a}x}$ :

$$A\bar{w} = n_{m\acute{a}x}\bar{w} \quad (2)$$

Dado que,

$$\sum_{i=1}^n \bar{w}_i = 1 \quad (2.1)$$

$$\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n a_{ij}\bar{w}_j) = n_{m\acute{a}x} \sum_{i=1}^n \bar{w}_i = n_{m\acute{a}x} \quad (2.2)$$

Por (2.2) el valor de  $n_{m\acute{a}x}$  es igual a la suma de elementos del vector  $A\bar{w}$ , donde  $A$  es la matriz y  $\bar{w}$  es la media de los valores ponderados de una fila con respecto a su cantidad de datos.

RCI: índice de consistencia aleatorio es

$$RCI = \frac{1,98(n-2)}{n} \quad (3)$$

Luego obtener valores de (1), (2) y (3) como se indica en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de Índice de consistencia e Índice Aleatorio.

| CI      | RI    | CR     |
|---------|-------|--------|
| 0,10974 | 1,414 | 0,0776 |

Elaboración propia, a partir del Método de Saaty. 2022.

Finalmente, la ponderación para la peligrosidad de riesgo, para cada una de las variables es la presentada en la Tabla 14.

Tabla 14. Ponderaciones de cada una de las variables.

| Variable |           |               |               |            |            |               |
|----------|-----------|---------------|---------------|------------|------------|---------------|
| Geología | Geotecnia | Precipitación | Geomorfología | Vegetación | Sismicidad | Antropológico |
| 27%      | 25%       | 25%           | 11%           | 5%         | 4%         | 4%            |

Elaboración propia a partir del Método de Saaty, 2022.

## 5. RECOMENDACIONES Y LINEAMIENTOS

La metodología anteriormente presentada es un método facilitador que permite evaluar los factores condicionantes que van a determinar la ocurrencia de los PRM. En este método lo fundamental es realizar un trabajo exhaustivo ya que, al ser con un enfoque geológico-geotécnico, esta primera etapa es primordial y clave en el proceso.

La península de Hualpén, Región del Bío-Bío fue el lugar pionero de trabajo para compilar esta propuesta, pero aun así la metodología puede ser aplicada en cualquier zona de Chile. Es fundamental que la propuesta metodológica de este trabajo se realice a nivel cuenca, para que nos encontremos con características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas similares y no se sobreestimen variables que nos pueden perjudicar al momento de calcular su susceptibilidad o alterar el fin que el usuario le quiera dar.

Debemos tener claridad que la propuesta utilizada es solo una recopilación de información clave para la toma de decisiones, es el profesional a cargo quien debe decidir su método de cuantificar su evaluación final, considerando todos los factores y la información expuesta, en este caso la propuesta utilizada fue Saaty.

La metodología consta en tres etapas: etapa de recopilación bibliográfica, etapa de terreno y posterior trabajo de gabinete (considera ensayos de laboratorio pertinentes). Esta es de carácter cuali-cuantitativo, al realizar ensayos de suelos y la utilización de softwares y métodos como K-S, por esto es posible lograr resultados fiables de lo observado in situ y de los antecedentes de la zona de estudio. Esta propuesta debería ser aplicada por geocientistas y estudiantes del área ya que son quienes están capacitados para utilizar el método de manera correcta y mayor manejo de las características que se presentan.

La península de Hualpén es una zona característica por sus intensas precipitaciones, factor que es desencadenante en PRM. También debemos considerar que Chile es un país altamente sísmico, por ende, el peligro en el área de estudio está sujeto a mecanismos de carácter superficial y local.

Es importante saber que no se recomienda aplicar la metodología en zonas urbanas, ya que pueden arrojar una mayor susceptibilidad de remociones en masa, para este tipo de ubicaciones se deben buscar otros métodos de estudio.

Según todo lo ya mencionado y los resultados obtenidos esta propuesta ayudará a definir niveles de riesgo de PRM y también a orientar a los profesionales del área para implementar medidas de mitigación cuando estas sean necesarias.

## 6. Referencias

Antinao, L. & Gosse, J. (2009). Large rockslides in the Southern Central Andes of Chile (32–34.5°S): Tectonic Control and Significance for Quaternary Landscape Evolution, 104, 117-133. doi:10.1016/j.geomorph.2008.08.008.

- 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.
- Blight G.E. (1997) "Mechanics of residual soils". Balkema/Rotterdam, 237 p.
- Borsdorf, A.; C. Marchant; A. Rovira y R. Sánchez (coordinadores). Chile cambiando. Revisitando la Geografía regional de Wolfgang Weischet. Santiago de Chile: Serie GEOLibros N°36, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile / Instituto de Ciencias Ambientales y Evolutivas, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, 2020.
- Brand, E.W. (1985). "Predicting the performance of residual soil slopes". In Proc., 11th international conference on soil mechanics and foundation engineering, San Francisco, A.A. Balkema, Rotterdam. Netherlands, Vol. 5, pp. 2541-2578.
- Bunn, M., Leshchinsky, B. & Olsen, M. (2020). Estimates of three-dimensional rupture surface geometry of deep-seated landslides using landslide inventories and high-resolution topographic data, *Geomorphology*, (367). doi:10.1016/j.geomorph.2020.107332
- Burón, P., Ardiles, M., Echtler, H., Figueroa, O. y Glodny, J. (2003). Análisis Estructural y Petrográfico del Contacto entre las Series Oriental y Occidental del Basamento Paleozoico, Zona de Falla Gastre a los 38°15'S, Cordillera de Nahuelbuta, Chile. Actas X Congreso Geológico Chileno, Universidad de Concepción, Dpto. Ciencias de la Tierra, Concepción.
- Cabrera, T. (2007). Características Geotécnicas de los Suelos Residuales del Batolito de la cordillera de la Costa (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago.
- 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, Santiago.
- Erices, J. (2018). Estratigrafía e Icnología de los estratos de la formación Quiriquina que afloran en el área costera de la Provincia de Concepción, Región del BioBío, Chile evolución ecosedimentaria del sustrato. (Tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción

- Falcón, MF; Arenas, M; Ramírez, P; Marín, M; Creixell, C; Huerte, S. 2012. Peligro de licuefacción: área Concepción-Talcahuano-Hualpén-Chiguayente, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 14, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- Ferrer, M.; González de Vallejo, L. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en alforamientos. IGME, Madrid, 107 p.
- Flandes N. (2017). Estudio de la relación entre meteorización y características geomecánicas de la roca granítica de Concepción. Tesis de Ingeniería Civil Geológica y Magíster en Ingeniería Geotécnica, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Galdames, P. Montenegro, J., St-Onge, R. (2018). “Integración de métodos convencionales y tecnología láser en el análisis de estabilidad de taludes en roca graníticas fracturadas del sector Caleta Lengua, región del Biobío, Chile”. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile. Inédito
- Geología de Campo II (2009). Mapa Geológico del Sector Costero Provincia de Concepción [Mapa]. 1:50.000. Concepción. Universidad de Concepción.
- González de Vallejo, L. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid, España: Pearson Educación.
- Gutiérrez, M. (2008). Ladera y movimiento de masas. En Geomorfología (pp. 229-274.). Madrid España: Pearson educación, S.A.
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45: p. 7-29.
- Hauser, A. (1997). Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: Un análisis Crítico, a 5 Años del Desastre. Servicio Nacional de Geología y Minería, 49-47.
- Hauser, A. (2000). Remociones en Masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, 59-89.
- 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, Chile.
- Hervé, F. 1977. Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, SouthCentralChile. En: Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt inJapan and Chile.

- Hervé, F. 1997. Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, South Central Chile. En: Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile
- Hervé, F.; Fuentes, F.; Calderón, M.; Fanning, M.; Quezada, P.; Pankhurst, R.; Rapela, C. 2017. Ultramafic Rocks in the North Patagonian Andes: Is their Emplacement Associated with the Neogene Tectonics of the Liquiñe-Ofqui Fault Zone? *Andean Geology* 44 (1): 1-16. doi: <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV44n1-a01>
- Highland, L.M., & Bobrowsky, Peter, 2008, Manual de derrumbes. Guía para entender todo sobre los derrumbes: Reston, virginia, Circular 1325 del Sistema Geológico de los EUA, 129.
- Hoek, E. & Bray, J.D. (1981). Ingeniería de taludes rocosos. Prensa CRC.
- Ilustre Municipalidad de Hualpén. (2018). Plan regulador comunal de Hualpén. Estudios de riesgos y de protección ambiental. Chile
- Lara, M. (2007). Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en quebradas San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana (Tesis de magister). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Lario, J. & Bardají, T. (2016). Introducción a los Riesgos Geológicos. Madrid: Uned.
- López, P. (2015). Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa, en laderas urbanizadas de la costa de Chile centro-sur. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 24 (2), 93-112. Recuperado de 10.15446/rcdg.v24n2.50212
- López, P. (2017). Evaluación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa en la costa Este de la península de Tumbes Chile. (Tesis de magister) Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*, (10), 221.
- Mardones F., M., Echeverría C., F., & Jara B., C. (2004). Una Contribución al Estudio de los Desastres Naturales en Chile Centro Sur: Efectos Ambientales de las Precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el Área Metropolitana de Concepción. *Investigaciones Geográficas*, (38), 1-24. Recuperado de 10.5354/0719-5370.2013.27748

- Mardones, M. & Rojas, J. (2012). Procesos de Remoción en Masa Inducidos por el Terremoto del 27F de 2010 en la Franja Costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (53), 57-74.
- Mardones, M. & Vidal, C. (2001). La Zonificación y Evaluación de los Riesgos Naturales de Tipo Geomorfológico: Un instrumento para la Planificación Urbana en la Ciudad de Concepción. *EURE*, (81), 97-22. Recuperado de <https://repositorio.uc.cl/xmlui/bitstream/handle/11534/3934/000335266.pdf>.
- Martínez, N. (2021). Evolución de las islas de calor urbanas en el periodo 2002-2020 y su relación con las zonas climáticas locales de las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén, Región del Biobío, Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180787>
- Muñoz, E. 2013. Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del mar, V región. (Tesis de magister). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Nakamura, Y. (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface, *QR of RTRI* 30, 1, 25-33.
- Navarro, J. (2012). Susceptibilidad y Amenaza de Movimientos de Ladera mediante SIG en el Municipio de Berlín, El Salvador. (Tesis de maestría). Universidad Complutense de Madrid.
- Pradenas, M. 2014. Proyecto de Título: “Umbral empírico para deslizamiento por precipitación, para la Provincia de Concepción”. Universidad del Bío-Bío.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, *Publicación Geológica Multinacional*, No. 4, 432 p., 1 CD-ROM.
- Ramírez, P. & Vivallos, J. (2009). Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción - Chile. 1(1), 3-6.
- Ramírez, P. & Vivallos, J. (2009). Mapa Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción, SERNAGEOMIN.

- Ramírez, P. (2019). Evaluación de Remoción en Masa en Parque Pedro del Río Zañartu, Comuna de Hualpén, Región del Biobío. Informe Inédito, Servicio Nacional de Geología y Minería, 11.
- Ruiz, S., Tectonophysics (2018), <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.06.007>.
- Sepúlveda, S. (1998). Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Sepúlveda, S. (2000). Metodología de Evaluación del Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos. Comunicaciones, 51, 3-28.
- Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, McGraw-Hill.
- Torres, C. (2018). “Elementos para el diseño de un plan de Gestión Ambiental en el Santuario de la Naturaleza Península de Hualpén”. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Ambientales.
- Uchida, T., Yokotama, O., Suzuki, R., Tamura, K., & Ishizura, T. (2011). A New Method for Assessing Deep Catastrophic Landslide Susceptibility. International Journal of Erosion Control Engineering, (4), 32-42. Doi: [jstage.jst.go.jp/article/ijece/4/2/4\\_2\\_32/\\_pdf/-char/ja](https://doi.org/10.1016/j.ijece.2011.04.002)
- Yepes, V. (2018, 27 noviembre). Saaty –El blog de Víctor Yepes. Universidad Politécnica de Valencia.