



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN



**FACULTAD DE ARQUITECTURA, URBANISMO Y GEOGRAFIA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**

**SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A REMOCIONES EN MASA EN LA
COMUNA DE HUALQUI UTILIZANDO EL MODELO FREQUENCY
RATIO: APORTE A UNA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL
SOSTENIBLE.**

TÉSIS PARA OPTAR AL GRADO DE GEÓGRAFO

Por Felipe Antonio Pino Huerta
Docente Guía: Dra. Edilia Jaque
Castillo
Dr. (c) Francisco Castro V.

Concepción, Chile. Marzo de 2024

ÍNDICE DE CONTENIDO

Índice de Contenido	2
Índice de Figuras.....	4
Índice de Tablas.....	5
Abstract.....	5
Resumen.....	6
1 Introducción.....	7
2 Problemática.....	9
3 Preguntas de investigación.....	10
4 Hipótesis.....	10
5 Objetivos.....	11
5.1 Objetivo General	11
5.2 Objetivos Específicos	11
6 Marco Teórico Conceptual.....	11
6.1 Remociones en Masa	11
6.1.1 Factores Condicionantes de Remociones en Masa	12
6.1.2 Factores Desencadenantes de Remociones en Masa	15
6.1.3 Tipos de Remociones en Masa	16
6.2 Susceptibilidad frente a remociones en masa	21
6.3 Inventario de Remociones en Masa	22
6.4 Carta de Susceptibilidad de Remociones en Masa	23
6.5 Concepto de Ordenamiento/Planificación Territorial	25
7 Metodología.....	28
7.1 Enfoque Metodológico	28
7.2 Área de Estudio: Comuna de Hualqui y Antecedentes Generales	28
7.2.1 Caracterización del Área de Estudio	29
7.3 Metodos y Técnicas	35
7.3.1 Inventario Espacio-Temporal de Remociones en Masa	35
7.3.2 Análisis de Prensa y Redes Sociales	37
7.3.3 Fotointerpretación en Google Earth Pro.....	37
7.3.4 Trabajo de Campo.....	38

7.3.5	Modelo de Susceptibilidad: Frequency ratio.....	39
7.3.6	Validación del método Frequency ratio	44
8	Resultados.....	46
8.1	Inventario de Remociones en Masa	46
8.2	Parámetros para la evaluación de susceptibilidad de PRM	48
8.2.1	Elevaciones.....	48
8.2.2	Pendiente en grados	49
8.2.3	Forma del terreno.....	50
8.2.4	Orientación al Sol.....	51
8.2.5	Distancia a drenajes.....	52
8.2.6	Distancia a caminos	53
8.2.7	Índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI).....	55
8.2.8	Litología.....	57
8.3	Tabla de datos y valores de parámetros del modelo FR	58
8.4	Carta de Susceptibilidad frente a PRM en la comuna de Hualqui	61
8.5	Validación del resultado entregado por el método Frequency ratio	63
8.5.1	Correlación entre puntos de PRM y clases correspondientes al índice de susceptibilidad (enfoque de precisión estadística).....	63
8.5.2	Área bajo la curva ROC para tasa de predicción y exactitud del modelo FR.....	64
8.6	Carta de susceptibilidad frente a PRM y el Instrumento de planificación territorial comunal de Hualqui (Plan Regulador Comunal)	65
9	Conclusiones	68
9.1	Recomendaciones finales	69
10.	Bibliografía.....	71
11	Anexos.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. A la izquierda, ilustración de deslizamiento rotacional de tierra; y a la derecha, registro de deslizamiento rotacional de tierra en la comuna de Hualqui.	18
Figura 2. A la izquierda, ilustración de caída de roca; y a la derecha, registro de caída en la comuna de Hualqui.	19
Figura 3. A la izquierda, ilustración de flujo de barro/lodo; y a la derecha, registro de flujo en la comuna de Hualqui.	20
Figura 4. Ilustración de remoción en masa tipo extensión lateral.	20
Figura 5. Ilustración de remoción en masa tipo volcamiento.	21
Figura 6. Carta de localización del Área de Estudio, comuna de Hualqui.	29
Figura 7. Climograma para la comuna de Hualqui basado en promedio de datos de precipitaciones y temperatura desde el año 1990 hasta 2022	31
Figura 8. Ejemplos de registros de PRM en la comuna de Hualqui mediante el diario local “El Sur”, y también desde la página de Facebook de la Municipalidad de Hualqui.	37
Figura 9. Ejemplo de deslizamiento rotacional de tierra localizado en la comuna de Hualqui identificado en la ruta O-60, cerca del sector Periquillo, mediante fotointerpretación en Google Earth Pro.	38
Figura 10. Ejemplo de deslizamiento rotacional de tierra en sector Paso de Piedra/Maqueuto.	39
Figura 11. Carta de registros de PRM en la comuna de Hualqui (periodo 1990-2023).	46
Figura 12. Gráfico de distribución de registros de PRM en Hualqui según el periodo de estudio.	47
Figura 13. Carta de elevación, comuna de Hualqui.	48
Figura 14. Carta de pendiente en grados, comuna de Hualqui.	50
Figura 15. Carta de forma del terreno, comuna de Hualqui.	51
Figura 16. Carta de orientación al Sol, comuna de Hualqui.	52
Figura 17. Carta de distancia a drenajes, comuna de Hualqui.	53
Figura 18. Ejemplo de deslizamiento de tierra registrado en el sector Maqueuto, ruta O-670 en la comuna de Hualqui.	54
Figura 19. Carta de distancia a caminos, comuna de Hualqui.	55
Figura 20. Carta de índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI), comuna de Hualqui.	57
Figura 21. Carta de unidades litológicas, comuna de Hualqui.	58
Figura 22. Carta de susceptibilidad de la comuna de Hualqui.	62
Figura 23. Gráfico de área bajo la curva ROC para tasa de predicción	64
Figura 24. Gráfico de área bajo la curva ROC para la tasa de exactitud.	65
Figura 25. Carta de susceptibilidad frente a PRM y capa de localidades y sectores de Hualqui.	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de escala de valores para la matriz de Saaty utilizando el método AHP.....	24
Tabla 2. Precipitaciones acumuladas entre los meses de mayo y septiembre para el periodo de estudio (1990-2022).....	32
Tabla 3. Valores y resultados por parámetro para el modelo FR.	58
Tabla 4. Superficie de índice de susceptibilidad según clase.....	62
Tabla 5. Cantidad de PRM por clase en la carta de susceptibilidad.....	64

ABSTRACT

The study of susceptibility to landslides processes (PRM) in Chile is essential to improve disaster risk management through territorial planning based on a methodologically sound assessment. This applied research is proposed for Hualqui, located in the western zone of the Coastal Cordillera in the province of Concepción, BíoBío region, Chile. A multitemporal inventory of landslides in the study area was carried out, spanning from 1990 to 2023, using a variety of sources such as local press records, satellite images, social networks and field work. A total of 83 events were identified throughout the study area using these sources, with a notable concentration in the central-northern zone, especially in sectors such as Maqueuto and near the Biobío riverbank.

This inventory was used to generate a susceptibility chart in a Geographic Information System (GIS), using the frequency ratio model. This was done by means of 8 layers of information on physical-natural parameters that influence PRM triggering. The most influential parameters according to the model used were lithology, with a value or weight of 3.05; landform, with 2.92; and slope with 2.24. To validate the model, the area under the curve ROC was used, obtaining an accuracy of 87%, corresponding to "very good" and a prediction rate of 73%, indicating a "good" quality of the model.

The final susceptibility map revealed sectors of high and very high susceptibility in the study area, such as Agua corta, Agua larga, Las Totoritas, El Carmen, San Onofre, Maqueuto, Periquillo, Placilla, Llepinhue, Las Lagunillas, Las Higueras. It is recommended that these areas be considered as restricted for construction. It is hoped that this study and the tools provided will be considered by the local government, as it previously lacked inventories and DRP susceptibility charts.

The methodology used and the results obtained can be very useful for the development of disaster prevention and mitigation strategies in the study area, as well as to have a basis for further development and expansion over time.

RESUMEN

El estudio de la susceptibilidad a los Procesos de Remoción en Masa (PRM) en Chile es esencial para mejorar la gestión del riesgo de desastres mediante una planificación territorial basada en una evaluación metodológicamente sólida. Esta investigación aplicada se propone para la comuna de Hualqui, ubicada en la zona occidental de la Cordillera de la costa en la provincia de Concepción, región del Bío-Bío, Chile. Se llevó a cabo un inventario multitemporal de PRM en la comuna, abarcando desde 1990 hasta 2023, utilizando una variedad de fuentes como registros de prensa local, imágenes satelitales, redes sociales y trabajo de campo. Se identificaron un total de 83 eventos en toda la comuna mediante dichas fuentes, con una concentración notable en la zona centro-norte, especialmente en sectores como Maqueuto y cercano a la ribera del río Biobío.

Este inventario se utilizó para generar una carta de susceptibilidad en un Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando el modelo frequency ratio. Esto mediante 8 capas de información sobre parámetros físico-naturales que influyen en el desencadenamiento de PRM. Los parámetros más influyentes según el modelo utilizado fueron la litología, con valor o peso de 3.05; la forma del terreno, con 2.92; y la pendiente con 2.24. Para validar el modelo, se empleó el área bajo la curva ROC, obteniendo una exactitud del 87%, correspondiente a “muy bueno” y una tasa de predicción del 73%, indicando una calidad “buena” del modelo.

La carta final de susceptibilidad reveló sectores de alta y muy alta susceptibilidad en la comuna, como Agua corta, Agua larga, Las Totoritas, El Carmen, San Onofre, Maqueuto, Periquillo, Placilla, Llepinhue, Las Lagunillas, Las Higueras. Se recomienda que estas zonas se consideren como restringidas para la construcción. Se espera que este estudio y las herramientas proporcionadas sean consideradas por parte del gobierno local, ya que anteriormente carecía de inventarios y cartas de susceptibilidad de PRM. La metodología empleada y los resultados obtenidos pueden ser de gran utilidad para el desarrollo de estrategias de prevención y mitigación de desastres en la comuna, así como también para tener una base que seguir desarrollando y ampliando mediante el paso del tiempo.

Palabras clave: Remociones en masa, Susceptibilidad, Planificación Territorial, Inventario de Remociones en Masa, Carta de Susceptibilidad de Remociones en masa.

1 INTRODUCCIÓN

En la zona costera de la región del Biobío se ha evidenciado que la susceptibilidad a experimentar procesos de remociones en masa es un problema grave que genera una serie de efectos negativos en muchos aspectos, es decir, daños o pérdidas de infraestructura, y/o en el peor de los casos, pérdidas humanas, es más, Pollock, W., Wartman, J. (2020), nos dice que entre los años 2004 y 2016 se ha registrado una media anual de 4.000 muertes producto de procesos de remociones en masa en todo el mundo. Sean casos de remociones en masa que afecte a la red vial entre comunas, o en casos más severos, que afecte la infraestructura residencial de las comunas que comprenden el denominada Área Metropolitana de Concepción (AMC), que interrelaciona las comunas de: Concepción, Talcahuano, Tomé, Penco, Hualpén, San Pedro de la Paz, Chiguayante, Coronel, Lota, Hualqui y Santa Juana (SEREMI MINVU, 2017), y en el peor de los casos, víctimas fatales (Gajardo, 2022). Teniendo en cuenta también que algunas comunas del AMC presenten condiciones físicas idóneas para el desarrollo de remociones en masa (Mardones, M., & Vidal, C. 2001). Evidentemente, la susceptibilidad de procesos de remociones en masa o PRM expresada en cartas y registros de datos técnicos y multitemporales, resultan ser una herramienta muy útil a la hora de gestionar de forma más efectiva el territorio en constante expansión urbana ligada al AMC.

El desarrollo de procesos de remociones en masa en el AMC se debe mayoritariamente a las lluvias intensas que se manifiestan principalmente en las estaciones de otoño e invierno (Hauser, 2002); en este período, los promedios de precipitaciones anuales para el AMC oscilan entre 1.000 y casi 2.000mm (Biblioteca del Congreso Nacional. S.F.). Las precipitaciones son un factor determinante para el desarrollo de estas, que, según Marín, M., Neira, H., Garrido, N., Báez, F. (2021), las lluvias intensas ocurridas en periodos de tiempo cortos detonan una serie de remociones en masa en zonas de isoterma 0°C por sobre el promedio histórico de diversas zonas a lo largo de Chile.

Por su lado, remoción en masa es un concepto abordado por Ciencias de la Tierra para referirse en general a movimientos de material en la superficie; según Cruden & Varnes (1996), son movimientos de material pendiente abajo y por

acción principal de la fuerza de gravedad. Existen factores que determinan el desarrollo de una remoción en masa, estos factores son los denominados desencadenantes y condicionantes. Los primeros corresponden a: sismos, precipitaciones y erupciones volcánicas; mientras que los segundos corresponden a: geotecnia de suelo, geología, hidrogeología, geomorfología, cubierta vegetal y actividades antrópicas. Cruden & Varnes (1996), también desarrollan en cuanto al estudio de este fenómeno sobre su clasificación, que se sintetizan en cinco grandes clasificaciones: deslizamientos, caídas, flujos, extensiones y volcamientos.

En la zona costera de la región del Biobío correspondiente al AMC, Hauser (2002) identifica que los principales tipos de remociones en masa corresponden a flujos y caídas o desprendimientos; los que en general, devienen en un deterioro del relieve y suelo que ha experimentado un proceso de remoción en masa, y que causa una degradación paisajística y en el peor de los casos, condiciones negativas irreversibles si hablamos de productividad o habitabilidad de suelos.

La comuna de Hualqui tiene una superficie de 221,6Km² y una población al año 2017 de 24.333 personas (INE, 2017) y se encuentra localizada a 18 kilómetros hacia el sureste de Concepción aproximadamente. La planificación territorial de Hualqui comprende principalmente dos instrumentos principales, uno es el Plan Regulador Intercomunal o Metropolitano de Concepción o PRMC, donde se establecen las disposiciones para la gestión del territorio, sobre todo urbano para todas las comunas del AMC. El otro instrumento corresponde al Plan Regulador Comunal o PRC, que dispone la planificación territorial actualizada para sus áreas urbanas. Además, identifica características sociales, económicas y físicas generales para la comuna. Sin embargo, la mención sobre procesos de remociones en masa como factor restrictivo para las posibles expansiones urbanas de la comuna son escasas.

Para realizar un estudio de susceptibilidad a remociones en masa para esta comuna, se necesita confeccionar un inventario de remociones en masa, que en este caso corresponde a un inventario multitemporal con una amplitud de escala temporal de 33 años, desde el año 1990 hasta 2023, antecedentes de prensa local, particularmente el diario el Sur, donde se revisan inventarios ya existentes y reportes presentes en redes sociales, del que se tomarán los datos espaciales para realizar cartas de susceptibilidad y zonificación de áreas propensas a desarrollar procesos de remociones en masa, considerando las características físico-naturales de la comuna y efectos que ya hayan generado sobre la población. Teniendo como resultado una herramienta fundamental para la planificación territorial y evitar posibles desastres.

2 PROBLEMÁTICA

Los procesos de remociones en masa o PRM son fenómenos que se desarrollan comúnmente en la zona centro-sur y sur de Chile, mayoritariamente ligados a los períodos pluviométricos acotados pero intensos como principal desencadenante (Filun, P. A. L. 2015), y menormente ligados a sismos de mediana y fuerte intensidad, como ejemplo, el terremoto del 27 de febrero de 2010 (Mardones, M., & Rojas, J. 2012). En el Área Metropolitana de Concepción o AMC se han evidenciado múltiples casos de remociones en masa, causando graves daños materiales, y en casos más extremos, pérdidas humanas (Naranjo, J., Arenas, M., Ramírez, P. 2006). Este fenómeno ha sido objeto de estudio en los últimos años, con el fin de aportar a los gobiernos locales, información espacial actualizada y con escala temporal para tener antecedentes fundados y ser utilizados para múltiples medidas preventivas, por ejemplo, para la planificación territorial tanto Metropolitana como Local (Gajardo, 2022).

La comuna de Hualqui, considerada dentro del área metropolitana de Concepción o AMC, presenta condiciones geomorfológicas y topográficas que se ajustan a las características físico-naturales propensas a desarrollar procesos de remociones en masa, como elevaciones y áreas con fuerte pendiente, áreas de terrazas fluviales; y dentro del terreno áreas con diversa cubierta vegetal, como arbustos y matorrales, como también bosque nativo y de producción forestal.

Hualqui ha experimentado procesos de remociones en masa, y que han sido reportados en medios de prensa locales mayoritariamente, antecedentes que poseen localización en la ruta O-60, hacia el sector Periquillo, en el sector Maqueuto, y otros cercanos a las áreas urbanas como Quilacoya o Talcamávida. Durante los últimos años ha tomado relevancia este fenómeno en cuanto a registros publicados en redes sociales, como la página de la Municipalidad de Hualqui, que publica registros con fines de advertencia para el tránsito o de precaución debido al retiro de escombros.

La comuna de Hualqui no cuenta con un inventario de procesos de remociones en masa o PRM, dotado de datos técnicos y de información espacial para que sea considerado este fenómeno dentro de futuras actualizaciones de su instrumento de planificación territorial, el Plan Regulador Comunal o PRC. El Plan Regulador Comunal abarca tanto las áreas urbanas como rurales, este sólo abarca las disposiciones urbanas, productivas y residenciales para la comuna, lo que deja en segundo plano el territorio interior de la comuna, referido a las áreas rurales para efectos de planificación territorial.

El Plan Regulador Comunal de Hualqui menciona el concepto de remoción en masa como elemento que restringe el desarrollo urbano de la comuna. El concepto no posee mayor desarrollo, tampoco se aprecian herramientas como

una carta de susceptibilidad de procesos de remociones en masa. Lo único mencionado es que las áreas de cuesta Quilacoya y Periquillo son altamente propensas a desarrollar remociones, sin mayor desarrollo (SEREMI MINVU, 2016).

Hualqui además no cuenta con una carta de susceptibilidad frente a procesos de remociones en masa, lo que se traduce en una incertidumbre en la planificación territorial sobre qué áreas son aptas para la construcción y qué áreas deben ser restringidas debido a la ocurrencia de este fenómeno. La disponibilidad de cartas de susceptibilidad de remociones en masa resulta crucial para la toma de decisiones en múltiples campos, desde la zonificación para usos de suelo hasta la gestión de proyectos residenciales o productivos de la comuna. Además la posesión en sí de un inventario detallado de remociones en masa puede ser útil para múltiples métodos de análisis, lo que permite una flexibilidad clave para diversos fines. Entonces, la existencia de un inventario de remociones en masa podría ser utilizado para generar obras de mitigación o prevención para evitar inconvenientes que impidan el normal desarrollo de actividades en la comuna de Hualqui.

3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

P1: ¿Cuál es la distribución espacial de los eventos de PRM en la comuna de Hualqui durante los últimos 30 años?

P2: ¿Cómo funcionará el frequency ratio en la evaluación de la susceptibilidad frente a PRM en la comuna de Hualqui?

P3: ¿En qué aportará la confección de una carta de susceptibilidad frente a remociones en masa en la Planificación Territorial de Hualqui?

4 HIPÓTESIS

La falta de un inventario de PRM y también de una carta de susceptibilidad frente a PRM en la comuna de Hualqui contribuye a la falta de una Planificación Territorial adecuada. Por lo que, sugiere que se genere un estudio espacial sobre esta temática, aplicando también un modelo de evaluación de susceptibilidad estadístico para el estudio cuantitativo.

5 OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la susceptibilidad frente a remociones en masa en la comuna de Hualqui, a partir de un inventario multitemporal y el uso del modelo frequency ratio.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Elaborar y actualizar, a partir de fotointerpretación en Google Earth Pro, prensa local, y trabajo de campo, un inventario de remociones en masa para la comuna de Hualqui.
- b) Generar una carta de susceptibilidad, a partir de un modelo estadístico bivariado, denominado "Frequency Ratio".
- c) Analizar el Plan Regulador Comunal (PRC) vigente y comparar sus consideraciones sobre PRM con los resultados obtenidos.

6 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

6.1 REMOCIONES EN MASA

Para comenzar, remoción en masa es el principal concepto que compone esta investigación. Respecto a este, investigadores, autores y académicos poseen ciertas concepciones propias sobre este fenómeno. Pero en general, la definición más aceptada por la comunidad científica relacionada con la temática es la que entrega Cruden & Varnes (1996), que se refiere a las remociones en masa básicamente como un movimiento de material, sea este tierra, lodo, detrito o roca, pendiente abajo. Otro concepto utilizado por la comunidad es "corrimiento de tierras", que suelen aplicarse a gran variedad de remociones e independiente de su extensión (United States Geological Survey, 2008).

Para Mergili, Martin., Carla I. Marchant Santiago y Stella M. Moreiras (2015), la geomorfología de las regiones andinas es sometida a constante modificación debido a procesos de remociones en masa, a las que también se refieren como "movimientos de masas gravitacionales", en donde se asume que la fuerza de

gravedad, junto con sucesos desencadenantes como sismos, vulcanismo o precipitaciones, desplazan gran cantidad de material pendiente abajo.

Las remociones en masa, entonces, son fenómenos geológicos que involucran el movimiento de suelo, rocas o material sedimentario en pendientes leves a fuertes. Estos eventos pueden tener graves consecuencias, ya que representan un riesgo para la vida humana, la infraestructura y el medio ambiente. En Chile, las regiones del centro-sur y sur constituyen un área propensa a desarrollo de remociones en masa en comparación con el resto nacional (Hauser, 2002). Un caso particular es el que presenta la zona andina de Chile central, por sus características físicas como geomorfología, litología, relieve y pendientes resultan ser una conjunción altamente propensa para desarrollar este fenómeno. Sin embargo, en la zona costera de la región del Biobío, pareciera presentarse una excepción, puesto que, si bien ya no se encuentra en las áreas descritas, sí posee relación con algunos de los factores, como la litología, geomorfología y pendientes; además, tenemos que sumar el factor precipitaciones anuales. Este al ser un factor desencadenante, es el principal causante de remociones en masa en la zona, y en vista de que las precipitaciones en la provincia del Biobío oscilan entre 1.000 a 2.000mm (Biblioteca del Congreso Nacional, S.F.), es habitual que ocurran eventos de remociones sobre todo en los periodos con mayor pluviosidad, es decir, en otoño e invierno.

El desarrollo de remociones en masa en la zona costera de la provincia del Biobío, es pues, un fenómeno casi común de observar en las comunas del AMC, y siempre suponen un riesgo y preocupación para la población, sobre todo residente cercano o inserto en las áreas con fuertes pendientes.

6.1.1 Factores Condicionantes de Remociones en Masa

Las remociones en masa se desarrollan debido a múltiples factores involucrados en un área específica; estos han sido clasificados como condicionantes y desencadenantes. Los primeros corresponden a las condiciones físicas del área, tales como geología/geotecnia, geomorfología, vegetación, hidrología/hidrogeología, clima y actividad antrópica (Lara, M., Sepúlveda, S. 2008).

6.1.1.1 Geología y Geotecnia

En esta categoría, los elementos que se estudian para definir y estudiar más detallada y técnicamente una remoción en masa corresponden a: tipo de depósito y el material que lo compone; densidad; plasticidad, humedad y permeabilidad; litología de rocas, su estructura, meteorización y alteración (Gonzalez de Vallejo, 2002).

6.1.1.2 Geomorfología

La geomorfología de un sector determinado donde se desarrolla un evento de remoción en masa posee características que influyen en ella, como pueden ser principalmente la pendiente de laderas, la topografía y la extensión y altura de laderas. Esto principalmente porque determinará, por ejemplo, la velocidad con la que se desplazará el material durante la remoción, ya sean rocas, detritos, lodo o tierra; también puede afectar en el volumen de material desplazado; el desplazamiento de material también modifica la ladera, por lo que puede transformarse de estable a inestable; y puede alterar la morfología y superficie de la red hidrográfica, si es que fuera el caso (Mergili et al, 2015).

6.1.1.3 Vegetación

La vegetación en el caso de remociones en masa tiene que ver principalmente con la cubierta vegetal y su tipo en la superficie del área donde se desarrolla dicho evento. Esto afecta directamente al nivel de erosión que tendrá la superficie del suelo en tiempos pluviométricos, principalmente correspondientes a la estación de invierno, donde generalmente en Chile se desarrollan más frecuentemente estos fenómenos. La vegetación es un factor condicionante que posee diversas implicaciones, y en cuanto al tipo de vegetación, se encuentra ligado principalmente al clima de la zona. Por ejemplo, si poseemos una capa vegetal forestal en una zona de fuerte pendiente y fuertes vientos, los árboles generarán movimientos que pueden provocar desestabilización en el terreno, lo que podría generar una remoción en masa. Por otro lado, en zonas lluviosas y donde la capa vegetal de baja altura sea sotobosque o arbustos, y también estamos en un área de fuerte pendiente, esto podría aportar a la disminución de probabilidad de desarrollo de remociones en masa. Si bien una capa vegetal forestal no densa ayuda a fortalecer los horizontes superficiales del suelo, y también una capa vegetal de baja altura o arbustos y hierbas aporta a disminuir la erosión del suelo, entonces la cubierta vegetal ideal para disminuir la

probabilidad de ocurrencia de remociones en masa es una combinación de ambas capas (Lara, M., Sepúlveda, S. 2008).

6.1.1.4 Hidrología e Hidrogeología

La presencia de agua en un sector donde, junto con los demás factores mencionados, sea probable el desarrollo de una remoción en masa es fundamental, incluso sea cercano o directamente inserto, como lo pueden ser cursos de aguas, nivel freático del suelo, y morfología que condicione el desarrollo de escorrentía o material que condicione permeabilidad del suelo. Incluso la misma escorrentía puede generar un fenómeno de remoción en masa, como pueden ser los flujos de lodo o barro, donde la combinación de material y agua (lodo/barro) generan una masa a desplazarse pendiente abajo, ya que parte de la superficie del suelo se satura. Mientras que en general, el factor agua constituye un elemento desestabilizador en la superficie del suelo cuando se presentan periodos pluviométricos intensos (Gonzalez de Vallejo, 2002).

6.1.1.5 Clima

Las precipitaciones son un factor desencadenante de remociones en masa, que aun no se exponen, pero es parte de lo que condiciona a la hidrología/hidrogeología, y a su vez, las precipitaciones son condicionadas por el clima que pueda tener una zona. En la región del Bío-Bío, se presenta un clima templado-húmedo, con precipitaciones que van desde los 1.000 a 2.000 mm anuales en promedio (Biblioteca del Congreso Nacional, S/F). El factor clima a grandes rasgos, abarca elementos como precipitaciones, vientos, temperatura y radiación solar, que condicionan en sus respectivos niveles a la probabilidad de desarrollo de remociones en masa (Muñoz, 2013).

6.1.1.6 Actividad Antrópica

La actividad antrópica tiene que ver con la intervención humana de un sector donde potencialmente se podría desarrollar un evento de remoción en masa, en el que dicha intervención podría aumentar la probabilidad de ocurrencia. Ejemplo

de esto son rellenos de material en una ladera, construcciones, excavación y trabajo de maquinaria pesada, cambios de uso de suelo, deforestación, entre otros. Antezana (2018), también nos menciona que la presencia de monocultivos extensos en superficie, o también plantaciones agrícolas extensivas deterioran la capacidad resistiva que posee el material edáfico superficial, lo que también estimula a éste a experimentar movimientos en masa. Este suceso se expone como "intervención antrópica vegetal" (Antezana, 2018).

6.1.2 Factores Desencadenantes de Remociones en Masa

Estos factores, como su nombre lo menciona, son los que directamente provocan el desarrollo de una remoción en masa, a modo de agente externo. En este caso, son principalmente tres los factores desencadenantes de remociones en masa, que son: precipitaciones, sismos y, actividad volcánica. Además, Chile se encuentra en un contexto geográfico que somete al territorio nacional a un constante estado de activación sísmica y volcánica, debido a la ubicación al margen de las placas Nazca y Sudamericana, donde los procesos de subducción de la litósfera oceánica del Pacífico ha condicionado la geología, vulcanología, tectónica y sísmica del país (Hauser, 2002).

6.1.2.1 Precipitaciones

Para Hauser (2002), el agua es en la práctica, el desencadenante principal de la gran mayoría de procesos de remociones en masa en Chile. Las precipitaciones que sobre todo tienen gran intensidad en un área determinada provocan alteraciones en los horizontes superficiales del suelo, lo que deviene en su desestabilización que se manifiesta, tanto durante el período de lluvias como en los días y/o semanas posterior a este, en procesos de remoción en masa de diverso tipo. Por ejemplo, en un periodo de tiempo corto, pero en el que se haya desarrollado un evento pluviométrico intenso, es muy probable que esto genere remociones superficiales en el momento, que podrían ser generalmente flujos o deslizamientos; por otro lado, si poseemos un periodo más prolongado de tiempo, y en el que se haya concentrado una alta cantidad de lluvia, también generarán en el mediano plazo procesos de remociones en masa, esto debido tanto a las condiciones edáficas diferenciadas y los esfuerzos resistivos del material, como también a la pérdida, finalmente, de la cohesión del suelo debido al incremento de la permeabilidad (Arenas, M., Naranjo, J., Ramírez, P. 2006).

6.1.2.2 Sismos

Los sismos son movimientos bruscos que se manifiestan tanto dentro de la corteza terrestre como también en la superficie, y que es causado por la liberación de energía contenida en un periodo de tiempo determinado (SERNAGEOMIN, S/F.). Dicho esto, los sismos provocan desestabilización en el terreno, y en un área donde se puedan desarrollar remociones en masa, generan una disconformidad entre los esfuerzos resistivos del material del suelo, es decir, la resistencia del material que lo compone; contra los esfuerzos de corte de este, es decir, esfuerzos que generan inestabilidad y que pueden provocar una remoción.

Un factor a tomar en cuenta dentro de los sismos y su capacidad desencadenante de remociones en masa es la magnitud que debe tener este movimiento para provocar una remoción. Keefer, D.K. (1984), estableció una magnitud general para el desarrollo de remociones en masa, estimada en 5.3 de magnitud local o MI, también conocida como la escala de Richter, y que su epicentro debía estar hasta los 50 kilómetros para tener capacidad de desarrollar una remoción en masa, sean estas caídas de rocas y deslizamientos menores. En cuanto a deslizamientos mayores y flujos de detritos, la magnitud MI debía ser igual o superior a 5.5 y a una distancia de 10 kilómetros.

Una investigación que involucra precisamente al terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile, y que se relaciona al desencadenamiento de procesos de remociones en masa o PRM, arrojó resultados de 22 casos estudiados de PRM cosísmicos en la costa de la Región del Biobío, donde se encontró que el 68,18% de ellos correspondieron a caídas de rocas, el 13,63% a deslizamientos de tierra y menos del 10% a procesos de flujos de barro/lodo (Mardones, M., & Rojas, J. 2012).

6.1.3 Tipos de Remociones en Masa

La clasificación de remociones en masa es fundamental para estudiar más detalladamente este fenómeno, puesto que evidentemente difieren en forma, volumen, origen, alcance, material desplazado y otros elementos clave para resultar en un diagnóstico representativo de cada caso. Es por esto que se necesita una clasificación base. En este contexto, la clasificación de remociones

en masa de Cruden & Varnes (1996) se adecúa a múltiples PRM y se adapta a diversos casos, por lo que, es comúnmente usada en este tipo de estudios. Hauser (2000), también realiza una clasificación de subtipos de remoción en masa, que también se adecúan a diversos PRM, que incluso son estudiados en Chile.

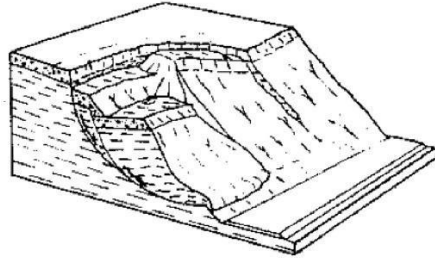
6.1.3.1 Deslizamientos

Un deslizamiento es un movimiento descendente de parte del suelo que se produce principalmente en superficies de ruptura o en zonas de corte. El movimiento no se produce inicialmente de forma simultánea en toda la superficie de ruptura, sino que el volumen de material desplazado se amplía a partir de una zona de fallo local. La masa desplazada puede deslizarse más allá de la punta de la superficie de ruptura cubriendo la superficie original del talud, que se convierte entonces en una separación superficial, dejando una serie de escarpes y grietas en la extensión del deslizamiento (Cruden & Varnes, 1996).

Para los subtipos de deslizamientos, Hauser (2000) los subtipos de deslizamientos son los siguientes:

- Deslizamientos laminares traslacionales
- Deslizamientos rotacionales
- Deslizamientos multirrotacionales
- Deslizamientos de bloques rocosos
- Deslizamientos de detritos

Figura 1. A la izquierda, ilustración de deslizamiento rotacional de tierra; y a la derecha, registro de deslizamiento rotacional de tierra en la comuna de Hualqui.

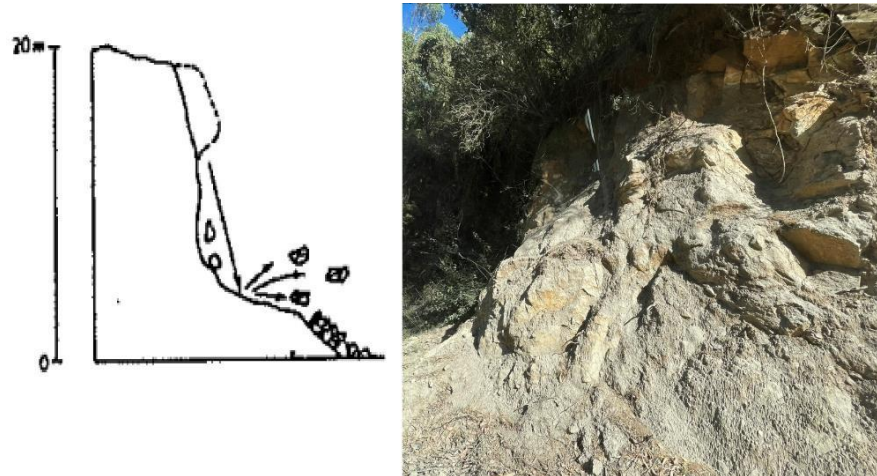


Fuente: elaboración propia en base a Cruden Cruden & Varnes (1996), y trabajo de campo el día 2 de julio de 2023.

6.1.3.2 Caídas

Una caída, o también llamado desprendimiento, es el desplazamiento de material desde una pendiente pronunciada a lo largo de una superficie en la que se produce poco o ningún desplazamiento por cizalladura. A continuación, el material desciende principalmente por el aire en caída libre, rebotando o rodando. El movimiento es muy rápido, excepto cuando la masa desplazada ha sido socavada, la caída irá precedida de pequeños movimientos de deslizamiento o derribo que separan el material a desplazarse de la masa no alterada. La socavación suele producirse en suelos cohesivos, o también puede ser el caso de rocas presentes en la punta de un acantilado costero, donde la pendiente es extremadamente fuerte y la erosión marina provoca la caída libre de material que va desde partículas a bloques (Cruden & Varnes, 1996).

Figura 2. A la izquierda, ilustración de caída de roca; y a la derecha, registro de caída en la comuna de Hualqui.



Fuente: elaboración propia en base a Cruden Cruden & Varnes (1996), y trabajo de campo el día 2 de febrero de 2023.

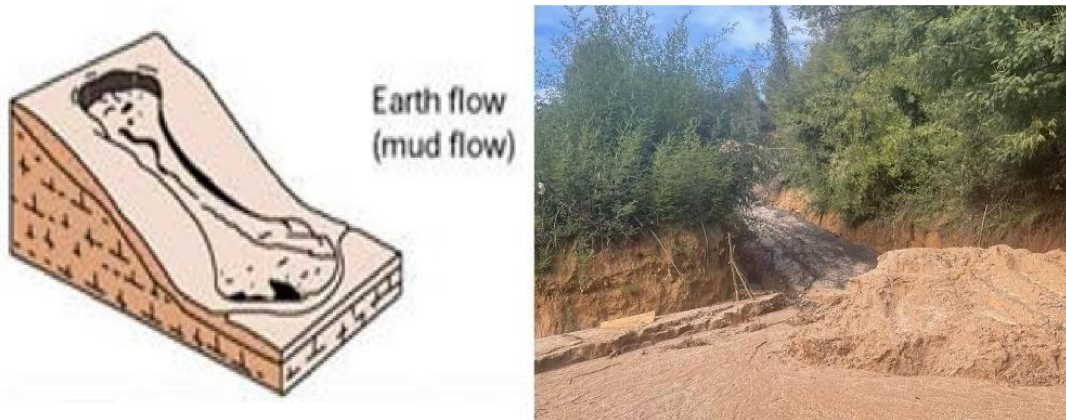
6.1.3.3 Flujos

Un flujo es un movimiento de masa de material generalmente viscosa. El límite inferior de la masa desplazada puede ser una superficie a lo largo de la que se ha producido un movimiento diferencial apreciable o una zona gruesa de cizalladura distribuida. Así pues, existe una transición de deslizamientos a flujos en función del contenido de agua, la movilidad y la evolución del movimiento, es decir, los deslizamientos de tierra o detritos pueden convertirse en flujos o avalanchas de detritos extremadamente rápidos a medida que el material desplazado pierde cohesión, gana agua o se encuentra con pendientes más pronunciadas (Cruden & Varnes, 1996).

Para Hauser (2000), los subtipos de flujos se clasifican con el nombre de:

- Flujos de barro
- Flujos detríticos
- Flujos laháricos
- Creep, reptación lenta o solifluxión
- Flujos de colapso de depósitos provenientes de residuos mineros

Figura 3. A la izquierda, ilustración de flujo de barro/lodo; y a la derecha, registro de flujo en la comuna de Hualqui.

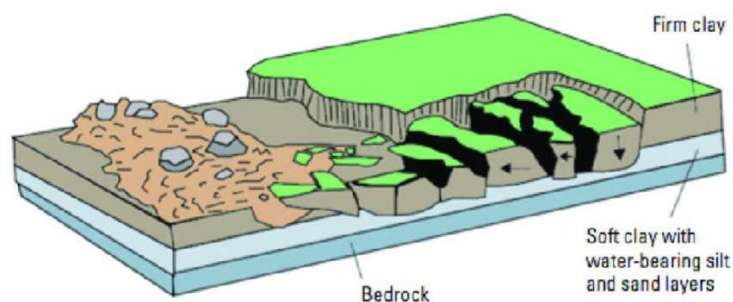


Fuente: elaboración propia en base a Cruden Cruden & Varnes (1996), y trabajo de campo el día 2 de julio de 2023.

6.1.3.4 Extensiones

Las extensiones se definen como la extensión de una masa cohesiva de suelo o roca combinada con un hundimiento general de la masa fracturada de material cohesivo hacia un material subyacente más blando. La superficie de ruptura no es una superficie de corte intensa. Las extensiones pueden ser el resultado de la licuefacción o el flujo del material más blando, condicionadas principalmente por pendientes de laderas que van desde leves a moderadas (Cruden & Varnes, 1996).

Figura 4. Ilustración de remoción en masa tipo extensión lateral.



Fuente: United States Geological Survey (2004).

6.1.3.5 Volcamientos

Un vuelco es la rotación hacia delante fuera de la pendiente de una masa de tierra o roca alrededor de un punto o eje situado por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada. En ocasiones, el vuelco se debe a la gravedad ejercida por el material que se encuentra ladera arriba de la masa desplazada y, en otras, al agua o al hielo que se encuentran en las grietas de la masa. Los vuelcos pueden provocar caídas o deslizamientos de la masa desplazada, dependiendo de la geometría de la masa en movimiento, la geometría de la superficie de separación y la orientación y extensión de las discontinuidades activas. La velocidad del vuelco puede variar desde lento a rápido y depende del volumen o tipo de material a desprenderse de su original posición (Cruden & Varnes, 1996).

Figura 5. Ilustración de remoción en masa tipo volcamiento.



Fuente: United States Geological Survey (2004).

6.2 SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A REMOCIONES EN MASA

La predicción o probabilidad espacial de las remociones en masa se denomina susceptibilidad de remoción, que se relaciona directamente con los factores internos del área de estudio relacionados (Kanungo, D. & Arora, Manoj & Sarkar, Shantanu & R.P.Gupta. 2009). Estos factores se desarrollaron anteriormente, pero para dar una síntesis de estos en general, son los siguientes:

- Geología: la composición y estructura geológica del terreno pueden influir en la estabilidad de una pendiente y del material superficial.
- Geomorfología: el relieve y las pendientes del terreno tienen implicancia directa con la susceptibilidad de PRM, sobre todo en pendientes fuertes.

- Precipitaciones: las lluvias son el factor desencadenante principal en el desarrollo de PRM en Chile según Hauser (2000), lo que debilita el material superficial.
- Vegetación: la cubierta vegetal resulta ser un factor estabilizador en la superficie, puesto que añade un elemento cohesivo de material edáfico superficial.
- Actividad antrópica: construcción de infraestructura urbana, plantaciones agrícolas o forestales extensivas, deforestación, minería y otras actividades, modifican negativamente el suelo, aumentando en muchos casos la susceptibilidad de remociones.

El objetivo es identificar los lugares de ocurrencia de deslizamientos de tierra en una región sobre la base de un conjunto de factores causales internos, en base a eventos ya ocurridos, puesto que es muy probable que en el mismo lugar donde ya se desarrolló un PRM, probablemente vuelva a ocurrir (Corominas et al., 2014). La susceptibilidad también depende de la mayor o menor exposición que tenga un territorio para ser afectada por un evento, que en lo que respecta con las remociones en masa, también intervienen los contextos territoriales como la localización en relación con las condiciones físicas que rodean a un asentamiento (Pérez, A. 2012).

La susceptibilidad de remociones en masa, como concepto, se puede abordar y utilizar como herramienta teniendo en cuenta de que se puede desarrollar desde perspectivas tanto cualitativas como cuantitativas (Muñoz, 2013).

Para el caso específico de remociones en masa, los enfoques cualitativos y cuantitativos tienen que ver con los factores condicionantes y desencadenantes (Becerra, 2006). Esto ligado a su vez, con el registro temporal y espacial de un evento de remoción en masa, nos brinda la capacidad de determinar una predisposición aproximada de un espacio concreto, que evidentemente podemos zonificar.

6.3 INVENTARIO DE REMOCIONES EN MASA

El concepto de inventario de remociones en masa es relativamente reciente, puesto que los estudios y registros de remociones en una database con atributos técnicos se comienzan a desarrollar a mediados de la década de 1990. El primer inventario de remociones en masa se desarrolló en el año 1996 en todo el Estado de Oregón, Estados Unidos; en base a eventos ocurridos después de una gran tormenta ocurrida en el mismo año, y que fue publicado por el Departamento de Geología e Industrias Mineras de Oregon, por sus siglas en inglés DOGAMI (William J. Burns and Ian P. Madin. 2009). El inventario de remociones en masa

consiste en un registro de distribución a escala espacio-temporal de PRM, y con elementos y aspectos técnicos que componen a dichos eventos. En Chile, los inventarios de remociones en masa también han sido recientes (Campos, F. 2014; Muñoz, E. 2013; Becerra, F. 2022), y han dado el paso hacia estudios de susceptibilidad frente a remociones en masa en múltiples zonas del país. En cuanto a la zona costera de la región del Biobío, los estudios de susceptibilidad de remociones en masa, sobre todo en comunas que componen el AMC, se llevan a cabo mediante un inventario de remociones en masa, también a escala espacio-temporal. Tal como en las comunas de Talcahuano (López, 2013), este en base a reportes presentes en el diario local El Sur. Y en Coronel, Lota y San Pedro de la Paz (Salas, 2022). Donde la metodología de recopilación de registros de remociones también fue principalmente la revisión del diario local El Sur.

6.4 CARTA DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA

Una carta de susceptibilidad frente a remociones en masa identifica áreas que son propensas a experimentar este fenómeno, sea cual sea su tipo si hablamos de la clasificación expuesta anteriormente. Y se clasifica en una escala que va desde baja hasta alta susceptibilidad visualmente en la carta; tiene en cuenta la ubicación de los PRM, además de tener en cuenta los diversos parámetros utilizados para determinar el nivel de susceptibilidad (Ireland Geological Survey, S.F.). Para evaluar la susceptibilidad frente a remociones en masa tenemos múltiples metodologías. Uno de ellos es el método de Lara y Sepúlveda (2010), que genera un índice de susceptibilidad en base a factores condicionantes considerados influyentes en un caso de estudio, también basado en trabajo de campo y literatura. A cada factor se le asigna cualitativamente un valor en base a dicha recopilación de información para finalmente resultar en el índice de susceptibilidad que va desde 0% a 100%, donde sobre 50% son las áreas susceptibles para desarrollar PRM.

Otro método de evaluación de susceptibilidad para generar cartas es el usado por Shahabi, H., Hashim, M (2015), en el que se consideran variados métodos. El primero es el denominado Proceso de Jerarquía Analítica (analytical hierarchy process o AHP), que fue desarrollado por Saaty para la toma de decisiones multicriterio y multiobjetivo, con el fin de ordenar los factores relacionados con el desarrollo de PRM de manera jerárquica y asignar valores bajo una evaluación subjetiva de importancia de cada factor. Luego, se realiza una matriz comparativa recíproca por pares para utilizar el método AHP, donde cada capa de factor se basa en una escala de valores de 9 puntos, que es la entrada para la matriz de Saaty. La tabla 1 expone la escala y la explicación de cada punto.

Tabla 1. Tabla de escala de valores para la matriz de Saaty utilizando el método AHP.

Valor	Definición	Explicación
1	Misma importancia	La contribución al objetivo es igual
3	Moderada importancia	Un atributo se ve ligeramente favorecido sobre otro
5	Fuerte importancia	Un atributo se ve fuertemente favorecido sobre otro
7	Muy fuerte importancia	Un atributo se ve muy fuertemente favorecido sobre otro
9	Extrema importancia	Las pruebas que favorecen a un atributo son del mayor orden de afirmación posible
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Cuando se necesita comprometerlos

Fuente: elaboración propia a partir de Shahabi, H., Hashim, M (2015).

Luego, se utiliza el método de Combinación Lineal Ponderada (weighted linear combination o WLC), que según Shahabi, H., Hashim, M (2015), lo define como un método híbrido entre técnicas cualitativas y cuantitativas. Utiliza el enfoque cualitativo de combinación de capas (análisis heurístico), que proporciona flexibilidad a la hora de interpretar los factores que intervienen en los PRM. Requiere la normalización de clases de cada factor en un rango común y simplificado, y en cuanto a los valores de cada factor, este se determina según las observaciones realizadas en terreno y bibliografía relacionada.

También Shahabi, H., Hashim, M (2015), utiliza la Evaluación Espacial Multicriterio (spatial multi-criteria evaluation o SMCE). En la SMCE, las alternativas son ubicaciones en forma de puntos, líneas, áreas y celdas de cuadrícula, por lo que, los criterios pueden presentarse en forma de capas espaciales. Los valores de las diversas capas tienen interpretaciones diferentes y existe la probabilidad de que muestren valores en unidades de medida distintas, como porcentajes, metros, distancia en metros, clases de uso de suelo. Entonces, se estandarizan los valores utilizando un conjunto de ecuaciones, tales que los valores sean expuestos en rangos de 0 a 1. Luego se determinan los indicadores para los objetivos intermedios o generales, y finalmente, se ponderan los factores condicionantes de remociones en masa mediante comparación directa, por pares, y por orden de clasificación. De este modo, resulta la carta de índice compuesto.

Otro modelo ampliamente utilizado en los últimos años para analizar la susceptibilidad de remociones en masa a modo de cartas resultantes es el modelo Frequency ratio, debido a su simplicidad y fiabilidad de resultados, algunos ejemplos del uso de este modelo son Acharya, T.D; Lee, D.H. (2018); Hawas Khan; Muhammad Shafique; Muhammad A. Khan; Mian A. Bacha; Safeer U. Shah; Chiara Calligaris. (2019); Kumar, A., Kumar, R. S., & Kumar, V. B. (2019).

El modelo frequency ratio o FR, se refiere a la proporción de superficie en el que se produjeron PRM en relación con la superficie total del área de estudio. Esto en relación con la utilización en SIG de un inventario de remociones en masa y los factores condicionantes de estos mismos que se deseen analizar como relevantes al caso. Por ejemplo: litología, pendiente, orientación al sol, alturas, índice de vegetación, red hidrográfica, entre otros. En un SIG, el resultado es un ráster que expone la proporción de superficie que experimentó PRM anteriormente mencionada, y que puede ser llevado a una carta más explícita para su entendimiento por parte del público. En sí es un modelo similar al expuesto anteriormente, en comparación, en el caso del modelo FR los valores de cada valor de factor condicionante utilizado se calcula mediante ecuaciones en relación con la cantidad de remociones en masa que se encuentran dentro de cada clase de cada parámetro utilizado, ya que, si volvemos al modelo anterior, los valores se asignan de modo cualitativo en base a trabajo en terreno y literatura relacionada. Entonces, el modelo FR es un método para evaluar la susceptibilidad frente a remociones en masa netamente cuantitativo.

6.5 CONCEPTO DE ORDENAMIENTO/PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

El ordenamiento del territorio es fundamental para el buen funcionamiento de un área poblada, puesto que, según las necesidades de la comunidad, funciones de esta, necesidades en cuanto a recursos de múltiples ámbitos y una relación entre sistemas, se puede realizar de determinadas formas una zonificación de áreas del territorio a utilizar. En este sentido, entra también en el marco el concepto de planificación, que, para este caso, el acto de planificar consiste en “organizar de acuerdo con un plan” (Ortúzar, 2010). Para que el ordenamiento del territorio sea adecuado para cada caso, se debe tener principal consideración en la integración equilibrada de los sistemas físicos, sociales, económicos y medioambientales. El Estado debe ser un actor principal en la acción de ordenar el territorio, mediante la misma acción político-administrativa que ello conlleva,

esto supone que los actores dentro del territorio deben tener una relación constante y que vele por el buen desarrollo de este, entendiendo que es un espacio que se encuentra en constante conflicto (Márquez y Veloso, 2020). Los conflictos derivan principalmente de los intereses particulares de grupos humanos que habitan el territorio, y se pueden desglosar en diversas temáticas, siendo las más recurrentes la política y economía.

En Chile, existe una serie de instrumentos de planificación territorial y ordenados según su jerarquía para casos densamente poblados y otros menos poblados. En este sentido, el orden de instrumentos, de mayor a menor jerarquía son: Plan Regional de Desarrollo Urbano, Plan Regulador Intercomunal o Metropolitano, Plan Regulador Comunal, Plan Seccional y, finalmente, el Límite Urbano (Cordero, E. 2007). El caso del Plan Regulador Intercomunal o Metropolitano aplica cuando territorios delimitados, sean urbanos o rurales en una cierta zona, operan interrelacionados y poseen conexión de funciones; lo que finalmente conforma una unidad urbana. En estricto rigor, en la subdisciplina urbana, existen conceptos para definir áreas urbanas según su número de población, en este sentido, Metrópoli es un área urbana que concentra entre uno a diez millones de habitantes, si un área supera la última cifra, pasa a llamarse Megalópolis (Gobierno de México, 2018). Para este caso, la zona costera de la región del Biobío concentra nueve comunas que poseen interrelación entre sí: Concepción, Talcahuano, Penco, San Pedro de la Paz, Coronel, Lota, Chiguayante, Hualqui y Hualpén; entre estas nueve comunas se posee una población al año 2017 de 1.080.000 personas (Indicadores CEDEUS, S/F). Es por esto que esta zona se considera como área metropolitana, aunque, si bien el concepto de Metrópoli se aplica desde el millón de habitantes en una zona urbana, el Plan Regulador Intercomunal o Metropolitano se utiliza cuando una unidad urbana supera las 500.000 mil personas (Cordero, E. 2007). Dado que la comuna de Hualqui se encuentra dentro de esta área, le corresponde también como parte de sus principales instrumentos de planificación territorial el Plan Regulador Intercomunal o Metropolitano de Concepción (PRMC).

Por su lado, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo del Gobierno de Chile, posee un cuerpo jurídico que regula aspectos aplicados a la planificación territorial. Durante la dictadura del general Augusto Pinochet, se llevó a cabo un proceso para el desarrollo de una nueva constitución para el país, entre muchas materias se encontraba abarcado precisamente el aspecto urbano; de este proceso aparece en el Decreto N 458, la Nueva Ley General de Urbanismo y Construcciones, publicada el 13 de abril del año 1976 (Biblioteca del Congreso Nacional, 2023). Esta ley ha sufrido un gran número de modificaciones, la última de ellas con fecha el 27 de mayo del año 2022; una de las modificaciones a esta ley a destacar aquí es la que concierne a los riesgos para la población tanto urbana como rural, y es el artículo 2.1.17. Esta es una disposición complementaria que se debe abarcar en el Plan Regulador Comunal, expuesta

en el título 2 de la planificación, en la ley. El artículo expone en precisión las zonas que se deberán tener en cuenta como restringidas para edificar en la planificación de un territorio, por constituir una zona potencialmente peligrosa para el habitar humano, las que serán denominadas en la planificación como zonas no edificables, o también como áreas de riesgo. Las primeras son zonas en las que, por ciertas condiciones físicas, tanto propias, como también del entorno en el que se localizan, poseen inestabilidad para que se desarrollen obras de infraestructura urbana. Por otro lado, las áreas de riesgo, en comparación a las primeras, sí poseen ciertas propiedades para edificar sobre ella, sin embargo, estas son limitadas; además, antes de desarrollar cualquier proyecto de infraestructura, se necesitará un estudio fundado que aborde todas las variables posibles para determinar qué área específica es edificable, y también si se presenta alguna amenaza de fenómeno natural o similar que pueda afectar potencialmente la infraestructura, se deberá considerar obras de ingeniería o técnicas similares para mitigar los posibles efectos negativos sobre esta (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2023).

7 METODOLOGIA

7.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

La metodología planteada para esta investigación es mixta, puesto que se combinan técnicas tanto cualitativas, como es el caso de recopilación y análisis de registros de procesos de remociones en masa en la comuna de Hualqui, dentro de los últimos treinta años, y también identificación en terreno de los PRM más recientes, con el fin de tomar registros en primera persona. En cuanto a las técnicas cuantitativas, se utilizan herramientas SIG, principalmente ArcMap 10.4.1, con la que se trabajarán los puntos del inventario de remociones resultante, como también las capas ráster a utilizar como parámetros para finalmente generar la carta de susceptibilidad y zonificación. Los registros para el inventario de remociones en masa serán tanto provenientes de las ediciones del diario local “El Sur”, como también provenientes de catastros e inventarios ya disponibles, como de SERNAGEOMIN (2021), fotointerpretación en Google Earth Pro, registros presentes en redes sociales locales, y registros obtenidos en terreno. También se analizará la consideración de los procesos de remociones en masa en el principal instrumento de planificación territorial de Hualqui, que es su Plan Regulador Comunal o PRC, con su última actualización que data del año 2017. Se pretende comparar lo dispuesto en este instrumento referente a los PRC, tanto análisis como cartas u otras herramientas disponibles en él, con los resultados de esta investigación.

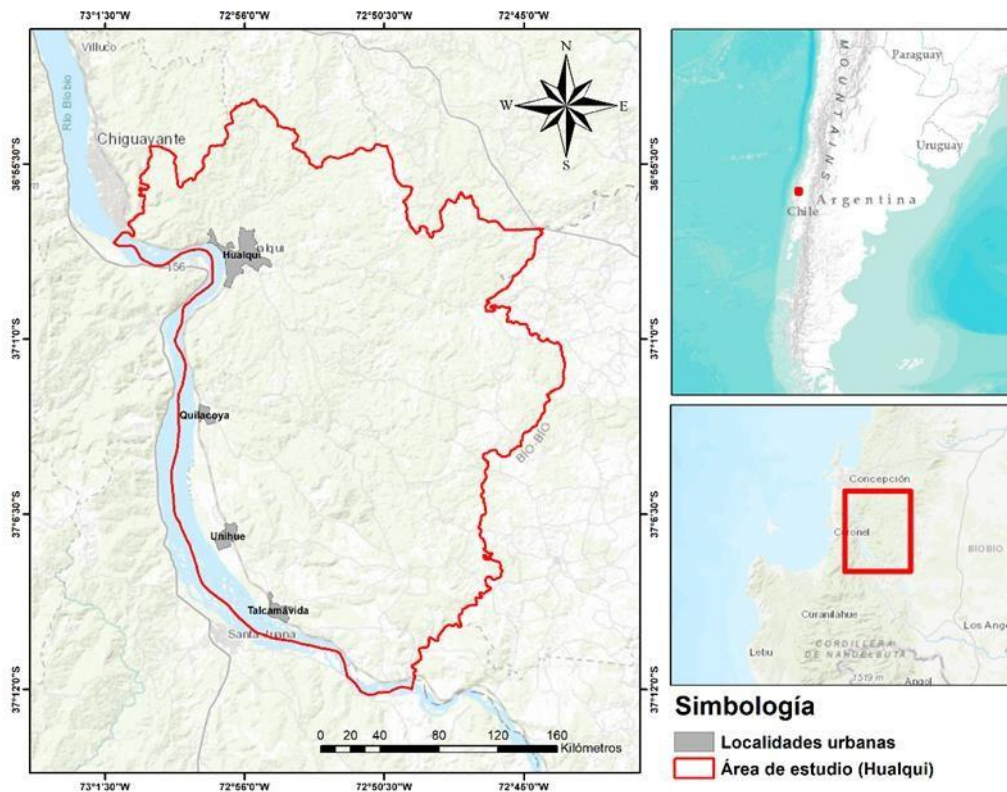
7.2 ÁREA DE ESTUDIO: COMUNA DE HUALQUI Y ANTECEDENTES GENERALES

Hualqui es una comuna que se encuentra ubicada en la Provincia de Concepción, en la Región del Biobío, en el centro-sur de Chile. Esta comuna se encuentra aproximadamente a unos 25 kilómetros al sureste de la ciudad de Concepción, la capital de la Región del Biobío. Hualqui posee zonas de abundante vegetación, gran parte de esta para destino de producción forestal. El río Biobío recorre gran parte del territorio de Hualqui en extensión sur-norte respectivamente y ubicado hacia el sector oeste de la comuna. Este es el principal cauce que encontramos en la comuna, pero también encontramos esteros y quebradas menores en toda su extensión.

Además, Hualqui cuenta con diversos elementos naturales. Los bosques de especies nativas como roble, coigüe, arrayán y canelo forman parte del entorno

natural de la comuna. Asimismo, la biodiversidad de flora y fauna es notable, especialmente en áreas protegidas como la Reserva Nacional Nonguén, que comprende su extensión entre las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui, donde se pueden observar diversas especies de aves, mamíferos y plantas nativas.

Figura 6. Carta de localización del Área de Estudio, comuna de Hualqui.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1 Caracterización del Área de Estudio

La comuna de Hualqui se ubica en la octava región del Biobío, perteneciente a la provincia de Concepción, Chile. Y forma parte del Área Metropolitana de Concepción o AMC. Se encuentra a aproximadamente 24 kilómetros al sureste de la ciudad de Concepción. El río Biobío es el principal cauce que recorre la comuna, además de ser un atractivo turístico para esta zona. Aunque también la población y sus costumbres también ofrecen un atractivo para quienes visitan esta zona costera de la octava región. Pero a pesar de que se ofrecen múltiples actividades en la comuna, como por ejemplo la denominada “fiesta del choclo”

desarrollada en plena época estival (entre enero y febrero de cada año), la principal actividad económica desarrollada es la silvoagropecuaria (PLADECO Hualqui, 2016). Hualqui además cuenta con una superficie variada en cuanto a geomorfología, desde zonas llanas hasta series de elevaciones (cerros), y también la presencia de la cordillera de la costa hacia el este de la comuna. Esto provoca que Hualqui sea una comuna mayoritariamente rural.

7.2.1.1 Población y Actividades Económicas

Tomando en consideración el período temporal de la presente investigación, los censos oficiales realizados entre los años 1990 y 2023 fueron los siguientes: 1992, 2002, 2012 y 2017. En este sentido, la comuna de Hualqui en el primer censo del período (1992) presentó una población total de 16.277 personas; en el censo de 2002 presentó una población total de 18.887 personas; el de 2012 un total de 23.033 personas; y el último censo, de 2017, presentó una población total de 24.333 personas. En términos de variación, entre el censo de los años 1992 y 2002 presentó un 16%; en el segundo período que comprende los años 2002 y 2012, presentó un 21,9%; y en el último período que comprende los años 2012 y 2017, presentó un 5,64%. Lo que inmediatamente podemos deducir es que Hualqui posee un crecimiento escaso de población

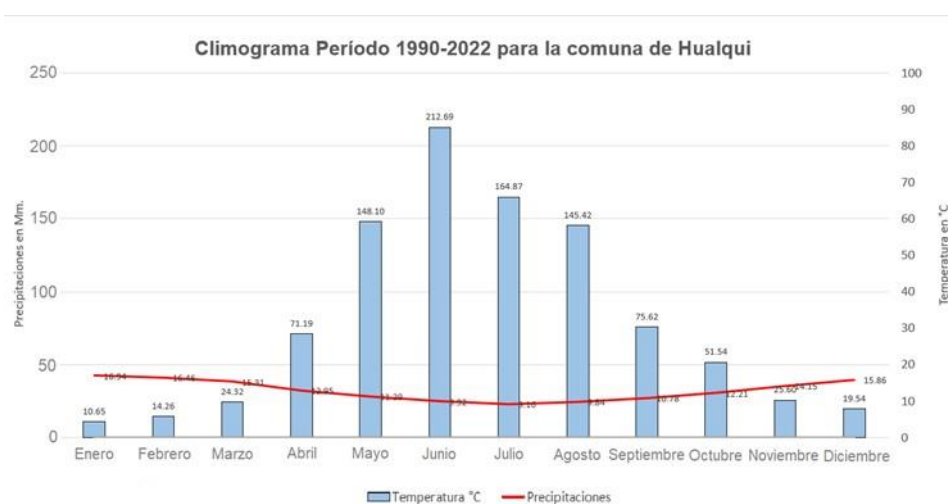
El desarrollo económico de Hualqui se ha enfocado mayoritariamente en la producción forestal, principalmente de *Eucalyptus globulus* (Eucalipto) y *Pinus radiata* (Pino). Siendo las empresas principales que poseen superficies de plantaciones: Arauco, Colcura, Mininco, Cholguán, Forestal Chile, Forestal Biobío y Forestal Millalemu (PLADECO Hualqui, 2016). Además, la comuna de Hualqui posee actividades turísticas ligadas al sector gastronómico y cultural. Muestra de esto es la denominada “fiesta del choclo”, que se desarrolla a mediados del período estival. En esta fiesta costumbrista se comercializa gastronomía ligada a este producto (choclo), junto con exposición y venta de artesanías locales, siendo una de las principales actividades recreativas que ofrece Hualqui.

7.2.1.2 Clima

El clima de la comuna de Hualqui se adhiere a las características climáticas típicas de la zona costera de la región del Biobío, es decir, posee un clima

templado la gran parte del año, pero seco y cálido en período estival, que según la clasificación climática de Köppen-Geiger es de tipo Csb (PLADECO Hualqui, 2016). En la siguiente figura (figura 7), se expone un climograma para el área de estudio, que muestra la variabilidad de la temperatura media y las precipitaciones acumuladas mensuales para el periodo de estudio (1990-2022). Como se puede observar, el mes de junio presentó la mayor cantidad de precipitaciones acumuladas promedio para el área de estudio, con 212,69mm; luego sigue el mes de julio, con 164,87mm; los meses de mayo y agosto son los siguientes con gran cantidad de precipitaciones acumuladas promedio, con 148,10mm y 145,42mm respectivamente.

Figura 7. Climograma para la comuna de Hualqui basado en promedio de datos de precipitaciones y temperatura desde el año 1990 hasta 2022.



Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos de la estación Carriel sur en Talcahuano.

La temperatura media anual de Hualqui es de 18°C, y las precipitaciones, al igual que en todo el AMC, van desde los 1.000 a 1.500mm anuales. Sin embargo, la última década, es decir, desde el año 2010 hasta 2022, las precipitaciones bordean los 1.000 anuales, tal como lo expone la figura 8, que muestra las precipitaciones en un período que va desde el mes de mayo hasta septiembre, que son los meses más lluviosos anualmente en el AMC, por lo que, también es un caso aplicable a la comuna de Hualqui. Los datos fueron obtenidos de la base de datos recopilados por la estación Carriel sur (Dirección Meteorológica de Chile DGAC, S.F.).

Tabla 2. Precipitaciones acumuladas entre los meses de mayo y septiembre para el periodo de estudio (1990-2022).

Precipitaciones en mm.						Total	
	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Mayo	Septiembre
1990	97.3	104.5	98.1	134.6	114.8		549.3
1991	267.3	142.8	234.2	87.7	62.4		794.4
1992	449.7	293.5	100.5	166	122.9	1.132,6	
1993	283.1	309	210.1	99.5	21		922.7
1994	71.9	202.6	177.1	21.9	139		612.5
1995	57	219.1	252.9	197.3	9.9		736.2
1996	66.2	151.5	77.9	173.2	6.7		475.5
1997	218.7	360.4	231.6	127.5	82.7	1.020,9	
1998	149.6	141.9	78	94.7	57.6		521.8
1999	198.8	273	148.6	213.9	155.8		990.1
2000	58.8	565.7	81.1	218.5	257.5	1.181,6	
2001	293.7	235.8	375.5	195.4	49.6	1.150,1	
2002	180.9	114.4	158.2	300.7	116.5		870.7
2003	73.1	309.5	109.8	64.4	129.6		686.4
2004	64	255	205.9	145.6	73.6		744.1
2005	357.5	431.9	165.8	177.7	74.4	1.207,3	
2006	107.4	309.6	312.3	235.8	41.3	1.006,4	
2007	73	89.2	175.9	118.8	58.4		515.3
2008	323	95.6	290.4	237.8	80	1.026,8	
2009	133.2	280.3	118.2	215.4	51.4		798.5
2010	37.2	186	248.2	133.2	21.2		625.8
2011	31.6	143.8	124	190.2	71.4		561
2012	131.6	206.8	51	130.6	15		535
2013	195.8	102	79.8	103.4	45.4		526.4
2014	114.2	266.4	223.8	108.4	98.4		811.2
2015	56.4	107	165	177	115.2		620.6
2016	117.6	3.4	189.4	54	49.8		414.2
2017	96.2	156.8	90.2	277.4	72		692.6
2018	146.8	87.1	106.2	55.6	129.4		525.1
2019	135.4	251.2	105.4	65	79.4		636.4
2020	58	344.8	157	79.4	29.6		668.8
2021	159.4	71.6	78	93.6	42.8		445.4
2022	82.8	206.6	220.5	104.5	20.8		635.2

Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos de la estación Carriel sur en Talcahuano.

7.2.1.3 Vegetación

Según SIMEF (2018), la presencia de bosque nativo ocupa una gran cantidad de superficie, de aproximadamente 13.104,27 hectáreas, representando un 24,53% del total comunal. El bosque nativo se compone de: Roble, Raulí, Coihue, bosque esclerófilo, bosque siempreverde, y Araucaria. Por otro lado, otra cubierta vegetal que se identifica como vegetación junto a la cubierta de

bosque nativo es el tipo matorral, que posee una superficie aproximada de 930,3 hectáreas, representando un 1,74% del total comunal.

7.2.1.4 Hidrografía

Hualqui posee su límite hacia el oeste mayoritariamente con el río Biobío, pero también la comuna cuenta con una red hidrográfica variada en su superficie comunal, que va desde ríos a quebradas. Parte de esta red hidrográfica proporciona recurso hídrico para el desarrollo de actividades productivas y otras fundamentales para el desarrollo de la comuna (SIT Rural, 2021). En Síntesis, la red hídrica presente en la comuna de Hualqui se compone de:

- Esteros: Araucana, Agua Larga, Bella Flor, Caunán, Chanco, Coligual, Conihueco, El Hueco, Hualqui, La Leonera, Lircay, Maquento, Menguante, Millahue, Nininco, Peralillo, Pichaco, Queule, Quilacoya, Recreo, San Onofre, San Pablo, Tranaquepe, Treuquén, Vegas de Diuca.
- Ríos: Biobío y Gomero.
- Quebradas y Redes de canales.

7.2.1.5 Geomorfología

La comuna de Hualqui se ubica en los límites de la cordillera de la costa, en su zona oeste en el área occidental (Ulloa, 2022). Gran parte de la geomorfología de la zona costera de la comuna, donde sus bordes conectan con el río Biobío, se encuentra moldeada por el cauce de este. La terraza inferior, en donde se encuentra la ciudad de Hualqui expone cómo el río se ha adaptado a las condiciones de relieve del área.

Al límite con la comuna de Chiguayante, alrededor de la ruta O-60, se reconoce una terraza superior con una altitud de 24 metros, la que está en contacto con laderas graníticas y metamórficas (PLADECO Hualqui, 2016).

La zona fuera de las unidades geomorfológicas del área urbana de Hualqui ha quedado desprovista de información espacial, sin embargo, se ha utilizado un raster de pendientes con cinco clases y con una paleta de escalas de rojo, esto para mostrar de mejor forma los cordones graníticos que son parte de la cordillera de la costa, y que cubren la gran mayoría de la superficie de Hualqui,

mientras que las áreas con un rojo claro o con menor intensidad, muestra zonas llanas, correspondientes a llanuras fluviales al interior de la comuna.

7.2.1.6 Geología

En la comuna de Hualqui encontramos múltiples formaciones geológicas, identificadas y expuestas en la siguiente carta realizada en base a cartas geológicas de la zona por el curso “Geología de Campo ii”, de la carrera de Geología de la Universidad de Concepción. que corresponden a:

- Unidad Intrusiva Nahuelbuta:
 - a) PzGH: o subunidad graitoides Hualqui; su formación data del período Pensilvaniano, compuesta por granitos, granodioritas, tonalitas y sienitas subordinadas.
 - b) PzSO: o serie oriental; su formación data del período Pensilvaniano Inferior – Pérmico Inferior, compuesta por secuencias metasedimentarias pelíticas-areníticas.
- Pz4b: corresponde a una unidad con rocas filitas, pizarras y metaareniscas, formadas en edades del Silúrico-Carbonífero. Se encuentran en un ambiente metamórfico que en Hualqui comparten límites con la comuna de Chiguayante hacia el nor-oeste.
- Unidades estatigráficas:
 - a) Qta: o depósitos cuaternarios; su formación data del período Holoceno – Reciente, compuesta por arenas negras y rubias semiconsolidadas y no consolidadas.
 - b) TrV: o secuencia volcánica; su formación data del período Noriano Superior – Retiano Inferior, corresponde a los estratos Santa Juana y se compone de andesitas porfídicas y afaníticas, tobas y lapillitas.
 - c) TrM: o secuencias marinas; su formación data del período Cárniaco Superior – Noriano Inferior, corresponde a los estratos Santa Juana y se compone de intercalaciones de areniscas y lutitas con fósiles marinos y continentales.
 - d) TrC: o secuencia continental; su formación data del período Cárniaco – Retiano, corresponde a los estratos Santa Juana y se compone de facies de lutitas y areniscas con fósiles continentales y lentes de carbón.

- e) TrB: o secuencia basal; su formación data del período Ladiniano – Cárniaco, corresponde a los estratos Santa Juana y se compone de conglomerados matrizsoportado y areniscas gruesas mal seleccionadas.

7.2.1.7 Uso de Suelo

La comuna de Hualqui posee una extensión aproximada de 53.696,8 hectáreas, y presenta una gran variedad de usos de suelo. La actividad agrícola ocupa aproximadamente 6.687,36 Ha, mientras que la superficie de bosque nativo ocupa aproximadamente 13.104,27 Ha, y las plantaciones exóticas que corresponden principalmente a *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* ocupan aproximadamente 13.987,98 Ha. Lo que se traduce en una vasta superficie productiva y natural, sin presencia de infraestructura urbana, es decir, una comuna mayoritariamente rural.

Entonces, el fuerte productivo en este sentido de Hualqui es la actividad silvoagropecuaria. En cuanto a áreas de humedales y matorrales poseen una superficie de 3.851,1 Ha y 930,3 Ha respectivamente, junto con la presencia de red hídrica en cuanto a ríos y esteros, que cubren alrededor de 1.505,52 Ha. Esto último juega un rol clave para la obtención de recurso hídrico para las producciones forestales y agrícolas de la comuna.

Las áreas con suelos desnudos corresponden a tipos arenosos (1.184,58 Ha) y de tierras (5.381,82 Ha), además, en la información especial utilizada se observa una pequeña extensión de terreno (13,77 Ha) que no ha sido clasificada con ningún tipo de uso (no data). En cuanto al uso de suelo urbano, este abarca alrededor de 1.548,27 Ha. También se destaca un uso de suelo correspondiente a superficie afectada por incendios forestales, con una extensión de 5.760 Ha.

7.3 METODOS Y TÉCNICAS

7.3.1 Inventario Espacio-Temporal de Remociones en Masa

Responde a una recopilación de registros de remociones en masa en la comuna de Hualqui, basado en técnicas multi-metodológicas teniendo en cuenta una escala espacio-temporal de los últimos treinta años. Se utilizarán fuentes de registros como: fotointerpretación en Google Earth Pro; Prensa local, como el Diario El Sur, principalmente entre los años 1990 y 2000, aunque también se esperan de años posteriores; y registros en Redes Sociales; y finalmente, registros obtenidos en terrenos. El principal objetivo de la búsqueda multi-metodológica de registros de PRM es cubrir todos los años que compone el período de este estudio, es decir, desde 1990 hasta 2023. Para los registros que puedan obtenerse de cada año sobre los PRM, se utilizará idealmente el periodo de mayo a septiembre, puesto que según Hauser (2000), la mayor parte de PRM en Chile responden al desencadenante precipitaciones. Entonces, la mayor parte de las precipitaciones anuales para el AMC de Concepción, y por tanto, para la comuna de Hualqui, se concentran entre los meses de mayo y septiembre. Caso que puede ser observado en la siguiente tabla (figura x). Se utiliza la estación meteorológica de Carriel Sur, en Talcahuano, de donde se obtiene el registro de precipitaciones caídas entre los meses de mayo y septiembre, y desde el año 1990 hasta 2022.

En cuanto al inventario y sus atributos, se compone de los siguientes items:

- ID de identificación de registro en el Inventario, con iniciales de comuna (ejemplo: HUA00001)
- Fecha (24hrs. Antes de registro)
- Año
- Subtipo de remoción
- Coordenada Norte
- Coordenada Este
- Sector
- Factor desencadenante
- Fuente de registro (Google Earth Pro, RRSS, Diario “El Sur”, Terrenos).

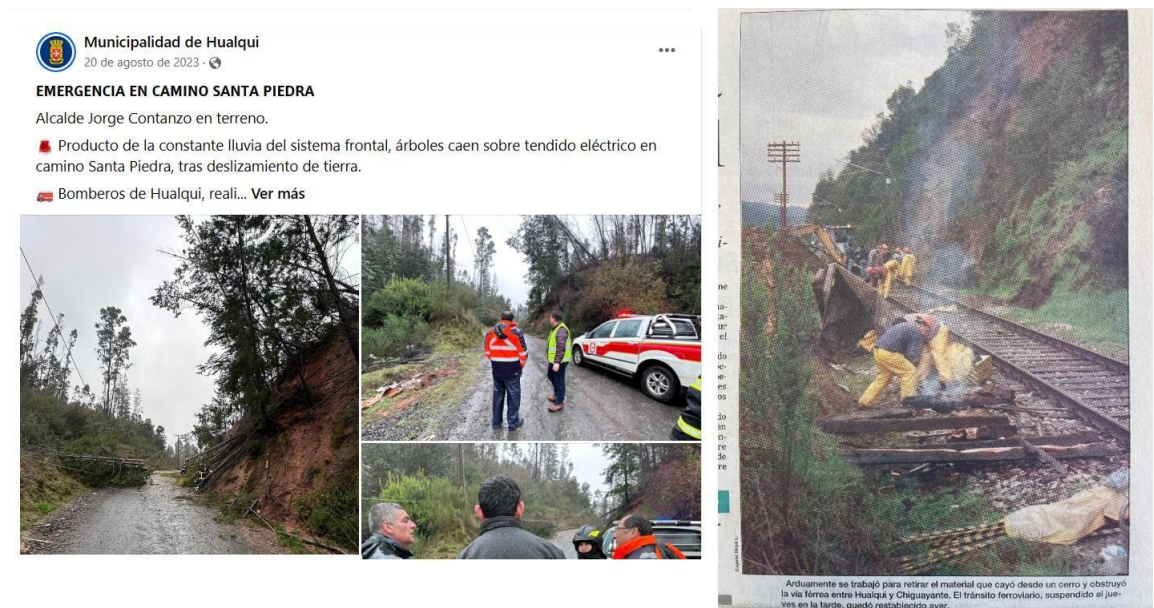
El formato de este inventario es una adaptación a los parámetros y elementos a identificar propuestos por Cruden & Varnes (1996), originalmente en formato de ficha técnica para cada PRM identificado.

Combinado con esta técnica, también se realiza trabajo en SIG, principalmente en ArcMap 10.4.1. Los registros de fotointerpretación obtenidos de Google Earth Pro, deben estar acompañados de imágenes de cada caso, por lo que, necesitan georreferenciación que se realizará en ArcMap para que sean acorde a la escala y localización lo más precisa posible. Todos los puntos de registros serán llevados a una tabla de Excel para su ordenamiento según atributos.

7.3.2 Análisis de Prensa y Redes Sociales

Como se menciona anteriormente, para obtener registros y llevarlos posteriormente al inventario, se analizan los registros sobre procesos de remociones en masa desarrollados en la comuna de Hualqui principalmente en la década de los 90, puesto que corresponde a la principal fuente de información local en este período. Esto también porque desde la década de los 2000 hasta la actualidad, herramientas como Google Earth Pro, la aparición de Redes Sociales, y otros medios de información, amplían la posibilidad de encontrar mayor cantidad de registros o posibles puntos de PRM. Se revisarán ediciones de los diarios “El Sur”, que se encuentran en la hemeroteca de las instalaciones de la Biblioteca central de la Universidad de Concepción. En cuanto a las Redes Sociales, se buscarán registros en la página de la Municipalidad de Hualqui y páginas locales de información variada.

Figura 8. Ejemplos de registros de PRM en la comuna de Hualqui mediante el diario local “El Sur”, y también desde la página de Facebook de la Municipalidad de Hualqui.



Fuente: elaboración propia.

7.3.3 Fotointerpretación en Google Earth Pro

Esta técnica consiste en delimitar el área de estudio de interés, que en este caso es la comuna de Hualqui, y revisar toda su extensión de superficie, sobre todo las áreas de elevaciones, y por tanto, fuerte pendiente, por posibles puntos de PRM. Se obtendrán las imágenes de los respectivos PRM identificados, coordenadas UTM para ingresarlas al inventario y también se obtienen los puntos de control e imagen del posible PRM para georreferenciar y analizar en ArcMap, además de tomar en cuenta la fecha de la imagen para intentar precisar la fecha de ocurrencia tomando en cuenta los registros de precipitaciones.

Figura 9. Ejemplo de deslizamiento rotacional de tierra localizado en la comuna de Hualqui identificado en la ruta O-60, cerca del sector Periquillo, mediante fotointerpretación en Google Earth Pro.

La línea roja representa el área estimada del escarpe del deslizamiento rotacional de tierra, mientras que la azul representa el área estimada de depósito. Los polígonos fueron generados a modo de ejemplo de efectividad de la metodología de fotointerpretación en Google Earth Pro.



Fuente: Fotografía tomada y delimitada por el autor.

7.3.4 Trabajo de Campo

El trabajo de campo, traducido principalmente en salidas a terreno en la comuna de Hualqui responde a la necesidad de registrar eventos de remociones en masa, sobre todo desarrollados en áreas rurales y apartadas de las tramas urbanas principales de la comuna, debido a que los registros de prensa son escasos en zonas relativamente remotas. Es por esto que se combinan registros de prensa con salidas a terreno, donde también se pueden generar registros fotográficos, reconocimiento de terreno y material, entre otros datos.

Figura 10. Ejemplo de deslizamiento rotacional de tierra en sector Paso de Piedra/Maqueuto.



Fuente: Fotografía tomada por el autor, en terreno de 2 de julio, 2023.

7.3.5 Modelo de Susceptibilidad: Frequency ratio

Siguiendo lo expuesto sobre el modelo frequency ratio o FR en el marco teórico anteriormente, este es utilizado con el fin de determinar la probabilidad de que se produzcan PRM en un área determinada teniendo en consideración información espacial relativa a factores desencadenantes, y a la vez, determinar qué factor posee mayor o menor implicancia en los PRM que se registraron en el inventario de remociones. Esto mediante el uso de fórmulas estadísticas, las que se exponen a continuación siguiendo los pasos para aplicar el modelo:

La fórmula utilizada para calcular el FR según Acharya, T.D; Lee, D.H. (2018) es:

$$FR = \frac{\frac{N_{pixels}(LX_i)}{\sum_{i=1}^m N_{pixels}(LX_i)}}{\frac{N_{pixels}(X_j)}{\sum_{j=1}^n N_{pixels}(X_j)}}$$

Donde:

- FR : relación de frecuencia de la clase i del parámetro j .
- $N_{pixels}(LX_i)$: número de píxeles que cuentan con remociones en masa dentro de la clase i del parámetro X .
- $N_{pixels}(X_j)$: número de píxeles dentro del parámetro X_j .
- m : número de clases del parámetro X_j .
- n : número de parámetros del área de estudio (8 en este caso).

Una vez utilizado el modelo FR , sus resultados deben ser normalizados en un rango de valores de probabilidad (0, 1), tal como expone Acharya, T.D; Lee, D.H. (2018). Se calcula utilizando frecuencia relativa o Frequency Relative (RF), que para obtener dicha normalización, se utiliza la siguiente ecuación:

$$RF = \frac{FR_{ij}}{\sum_{i=1}^m FR_{ij}}$$

Ahora bien, teniendo normalizados los resultados de FR aún persiste un inconveniente, que tiene que ver con que la frecuencia relativa o RF considera a todos los factores condicionantes utilizados con un mismo peso o valor. Por lo que, se debe calcular dicho peso de cada variable independiente, pero interrelacionadas entre sí, con la tasa de predicción o PR . Este paso se lleva a cabo con la siguiente fórmula:

$$PR = \frac{(RF_{max} - RF_{min})}{(RF_{max} - RF_{min})min}$$

Una vez solucionado el problema de peso de cada variable independiente interrelacionada, el cálculo del índice de susceptibilidad de remociones en masa o LSI (Landslide Susceptibility Index), se lleva a cabo mediante la suma del producto entre el PR de cada factor condicionante y el RF de cada clase. La fórmula que se utiliza para llevar a cabo este último paso es la siguiente:

$$LSI = \sum(PR * RF)$$

Los valores que resultan de esta última ecuación son los utilizados en la herramienta “ráster calculator” en el SIG ArcMap, para cada ráster que representan los parámetros seleccionados para evaluar la susceptibilidad de remociones en masa en la comuna de Hualqui, para finalmente generar la carta final de susceptibilidad.

Cabe destacar que los valores de cada pixel de cada ráster utilizado como parámetro es de 5 metros, debido a que el ráster que se utilizó como base para generar otros parámetros (pendiente, forma de la pendiente, orientación al sol), que es un archivo DEM (MDT MINVU, 2013), fue acotado para la comuna de Hualqui y posee una resolución de 5 metros por pixel, por lo que, los 8 parámetros seleccionados y analizados poseen la misma resolución. Lo que permitirá tener un resultado con amplio nivel de detalle.

7.3.5.1 Parámetros para evaluar la Susceptibilidad utilizando FR

Los parámetros para la evaluación de este estudio corresponden a una selección hecha en base a trabajos como Hawas Khan., Muhammad Shafique., Muhammad A. Khan., Mian A. Bacha., Safeer U. Shah., Chiara Calligaris. 2019; Meten, M., PrakashBhandary., Yatabe, R. 2015; Acharya, T.D., Lee, D.H. 2018; Kumar, A., Kumar, R. S., & Kumar, V. B. 2019. Gran parte de ellos fueron identificados en la comuna de Hualqui y se exponen en el apartado de resultados. En este sentido, se utilizarán 8 parámetros, que serán analizados en el SIG ArcMap 10.4.1, con formato ráster y una resolución de 5 metros por pixel, y que serán posteriormente utilizados en el modelo frequency ratio. Los parámetros son los siguientes:

- a) Elevaciones
- b) Pendiente en grados
- c) Forma de la pendiente (plana, convexa, cóncava)
- d) Orientación al sol
- e) Distancia a drenajes
- f) Distancia a caminos (carreteras, caminos rurales, caminos de producción forestal)
- g) Índice de vegetación o NDVI
- h) Litología

a) Elevaciones

El factor elevaciones se relaciona con factores físicos que condicionan el desarrollo de PRM, puesto que una gran diversidad de elevaciones condiciona la presencia de leves o fuertes pendientes, además de que los esfuerzos resistivos del terreno se someterán a mayores energías. Este parámetro muestra una distribución espacial más precisa de los PRM registrados en el inventario, que se relaciona directamente con otros parámetros que devienen del factor elevaciones, como la pendiente, orientación al sol y la forma del terreno. Este factor es utilizado por Acharya, T.D.; Lee, D.H. (2018) con el nombre de “relieve”, precisamente para evaluar el valor de implicancia de este factor en el modelo FR.

b) Pendiente en grados

Según Gonzalez de Vallejo (2002), la pendiente determina la dirección de los flujos pluviales sobre la superficie, y también de los subterráneos. Esto también puede determinar la dirección del desplazamiento que se genera por un proceso de remoción en masa, y antes de este, el peso de la masa de material que está ejerciendo sobre la superficie para romper con los esfuerzos resistivos. Para el modelo FR, este parámetro ha sido analizado en todos los artículos utilizados como referencia para este estudio que aplican dicho modelo (Hawas Khan; Muhammad Shafique; Muhammad A. Khan; Mian A. Bacha; Safeer U. Shah; Chiara Calligaris. 2019; Acharya, T.D.; Lee, D.H. 2018; Kumar, A., Kumar, R. S., & Kumar, V. B. 2019).

c) Forma de la pendiente

La forma del terreno se refiere a un parámetro que busca definir principalmente tres clases distintas de formas de terreno: cóncavo, plano, y cóncavo. Estas tres formas de terreno desempeñan un papel crucial en la dinámica de la escorrentía superficial generada en períodos pluviométricos de mediana y fuerte intensidad. Tiene un impacto significativo en los procesos de erosión y la vulnerabilidad de ladera ante las remociones en masa (Kumar, A., Kumar, R. S., & Kumar, V. B. 2019). Si tenemos en consideración una ladera con forma convexa, el efecto de la erosión será menor en comparación con laderas de forma cóncava, puesto que estas últimas serán más propensas a acumular caudal en su escorrentía en las áreas inferiores, y por tanto, el efecto de la erosión será mayor.

d) Orientación al Sol

La orientación al sol en la superficie del área de estudio desempeña un papel crucial, debido a su impacto significativo en factores como la cubierta vegetal, la capacidad de retención de humedad y la resistencia del suelo. Esto evidentemente deviene en la probabilidad de desencadenamiento de procesos de remociones en masa (García-Rodríguez, M.J., Malpica, J.A., Benito, B., Díaz, M., 2008). Entonces, la necesidad del parámetro orientación al sol en el análisis de susceptibilidad de remociones en masa mediante el modelo FR, responde a que la radiación solar que impacta en la superficie es diferenciada según la orientación y exposición al sol que poseen las laderas.

e) Distancia a Drenajes

Los cursos de agua pueden tener un impacto adverso en la estabilidad de una pendiente debido a la erosión de la parte superior de la ladera y a la saturación de la base de un caso de remoción en masa, causado por un aumento de la infiltración de agua (Hawas, Khan., et al. 2019). Por lo que, su influencia debe ser calculada en cuanto a peso o valor de parámetro para ser utilizado en el modelo FR.

f) Distancia a caminos

La presencia de todo tipo de red vial en un área supone que se alteran las condiciones originales naturales de dicho relieve, similar a lo que plantea Hawas, Khan., et al. (2019), que en terrenos montañosos, la construcción de infraestructura de comunicación como carreteras y redes de ferrocarril, a menudo conlleva a la desestabilización de las pendientes, que eventualmente termina desencadenando procesos de remociones en masa o PRM.

g) Índice de Vegetación o NDVI

El índice de diferencia normalizada de vegetación o NDVI (normalized difference vegetation index), es un indicador utilizado comúnmente en teledetección y estudios ambientales para evaluar la salud y densidad de la vegetación en un área determinada (Eos Data Analytics, S.F.). Es un factor utilizado frecuentemente en el modelo FR aplicado al estudio de susceptibilidad de remociones en masa (Acharya, T.D.; Lee, D.H. 2018). El NDVI de un área determinada puede ser obtenido directamente desde un servidor abierto de

imágenes satelitales a escala temporal, o bien puede ser calculado en base a imágenes satelitales en un SIG.

h) Litología

La litología, que comprende las características físico-químicas del material referido a las rocas de un área, es uno de los factores determinantes de amplio uso para estudiar la susceptibilidad de PRM, además de ser ampliamente utilizado en el modelo FR, como en Acharya, T.D.; Lee, D.H. (2018), y Hawas, Khan., et al. (2019). Debido a que la litología define, por ejemplo, la resistencia y permeabilidad del material tanto de la superficie como del subsuelo. Además, este parámetro junto con la pendiente pueden determinar la intensidad que puede desarrollar un PRM en un área específica (Hawas, Khan., et al. 2019).

7.3.6 Validación del método Frequency ratio

7.3.6.1 Enfoque de precisión estadística

Este enfoque comprende la relación entre puntos correspondientes a registros de PRM utilizados para modelar la susceptibilidad con FR, y las clases resultantes correspondientes a los distintos índices de susceptibilidad finales: muy bajo, bajo, moderado, alto, muy alto. Con el fin de corroborar que existe coherencia entre la cantidad de puntos y cada índice final (Berhane, G., Kebede, M., Alfarah, N., Hagos, E., Grum, B., Giday, A., & Abera, T. 2020).

7.3.6.2 Área bajo la curva (ROC).

El área bajo la curva ROC es un método considerado como “muy fiable” para determinar si, en este caso, el modelo FR tuvo un resultado efectivo, o por el contrario, un resultado deficiente en su capacidad de predecir la ocurrencia o no de PRM en un área determinada. La principal característica de este método de evaluación de resultado es la independencia de umbrales utilizados para el cálculo y de interespacios (Vakhshoori, V., & Zare, M. 2018). Para definir los umbrales en este método, se establecen $n+1$ umbrales, donde el primer umbral ($i=1$) corresponde a la susceptibilidad mínima observada en la clase más baja, y el último umbral ($i=n+1$) se sitúa por encima de la susceptibilidad máxima en la clase más alta.

Cada umbral compone una matriz de confusión que clasifica los píxeles en cuatro categorías: verdaderos positivos (TP), falsos positivos (FP), verdaderos negativos (TN) y falsos negativos (FN). Los píxeles correspondientes a las categorías TP y FN representan PRM dentro de las clases por encima y por debajo del valor del umbral respectivamente. Por su lado, los píxeles correspondientes a las categorías TN y FP corresponden a los píxeles etables dentro de las clases por debajo y por encima del valor del umbral respectivamente. A partir de la distribución de estos píxeles para cada umbral, se calculan dos estadísticas fundamentales: la tasa de verdaderos positivos (TPR) y la tasa de falsos positivos (FPR) (Vakhshoori, V., & Zare, M. 2018) . Las fórmulas que se utilizan para calcular TPR y FPR son las siguientes:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP}$$

La curva ROC traza la tasa de verdaderos positivos (TPR) en el eje vertical Y, mientras que la tasa de falsos positivos se traza en el eje X. Para el primer umbral ($i=1$), estos valores se corresponden con el punto (1, 1) en la curva, mientras que para el último umbral ($i=n+1$), los valores se sitúan en el punto (0, 0). Esta representación gráfica ilustra cómo varía la capacidad del modelo FR para detectar verdaderos positivos frente a la tendencia a generar falsos positivos a medida que se ajusta el umbral de clasificación. Por último, el paso final para la validación del modelo, que es el área bajo la curva o AUC, se calcula de la siguiente forma:

$$AUC = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{2} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2} \cdot (y_i + y_{i+1})$$

El valor del área bajo la curva o AUC es una medida que refleja la capacidad de éxito del modelo, en este caso Frequency ratio, utilizando un conjunto de datos tanto de entrenamiento como de prueba. Corresponde a una perspectiva alternativa para analizar la efectividad del modelo para diferenciar las zonas susceptibles a desarrollar PRM, mostrando qué tan bien se ajusta el modelo FR a los datos disponibles.

De este modo se pretende evaluar la tasa de exactitud del modelo FR con el 70% de los puntos correspondientes a los registros de PRM obtenidos, que son los datos de entrenamiento; y por otro lado, la tasa de predicción del modelo FR utilizando el restante 30% de puntos de PRM, que corresponden a los datos de prueba (Vakhshoori, V., & Zare, M. 2018).

Finalmente, los valores resultantes del gráfico del área bajo la curva ROC van desde 0 a 1, o proporcionalmente podrían interpretarse en una escala de 0% a

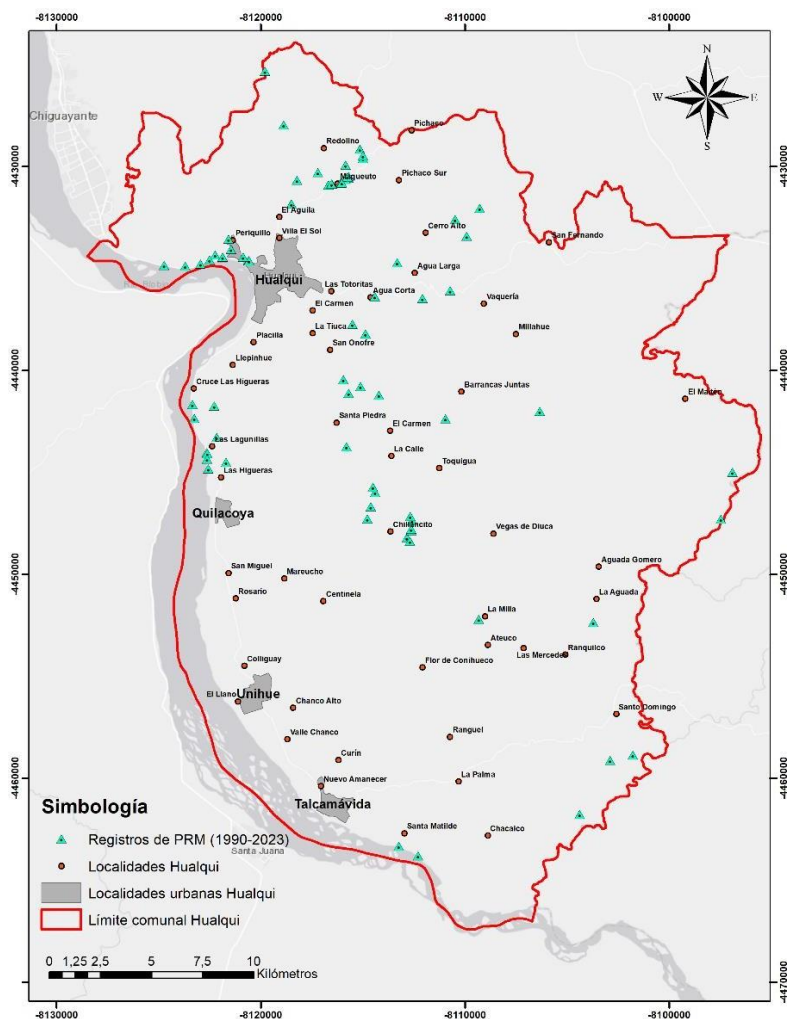
100%. Donde el resultado puede ser catalogado desde “pobre” hasta “muy bueno/casi perfecto”, la escala en este caso sería la siguiente: ≤ 0 (pobre), $0 - 0.2$ (deficiente/leve), $0.2 - 0.4$ (regular), $0.4 - 0.6$ (moderado), $0.6 - 0.8$ (bueno), y $0.8 - 1$ (muy bueno/casi perfecto) (Thongley, & Vansarochana, C. 2021).

8 RESULTADOS

8.1 INVENTARIO DE REMOCIONES EN MASA

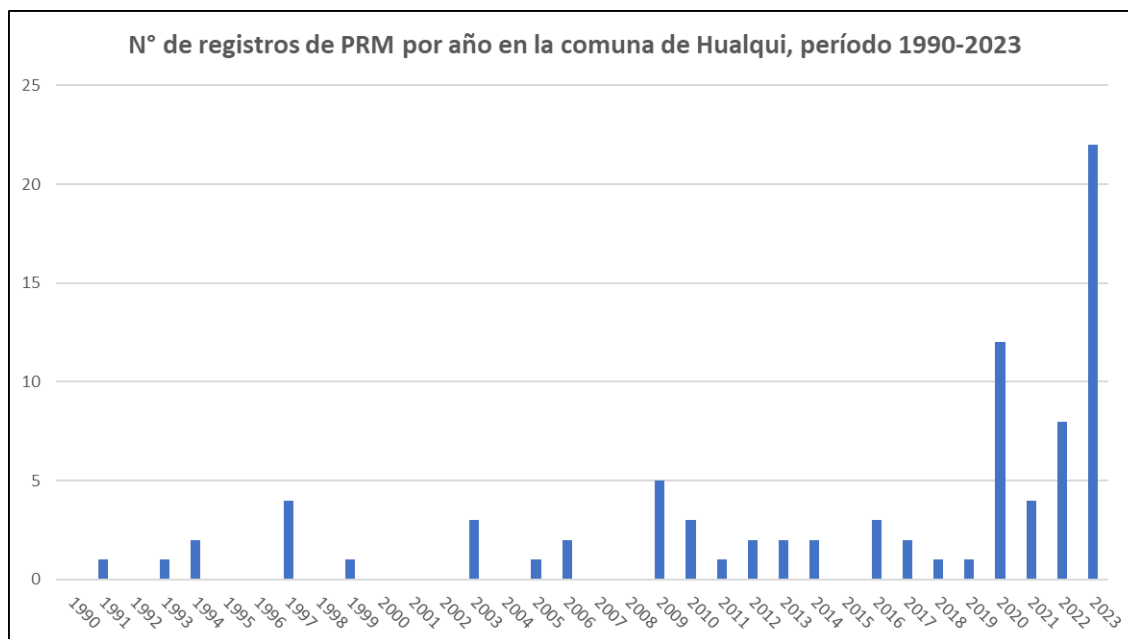
El inventario de PRM para la comuna de Hualqui, en consideración de que fue realizado mediante cuatro metodologías: diario El Sur, fotointepretación en Google Earth Pro, reportes en RRSS, y salidas a terreno. Este se compone de 83 registros totales, los que se muestran en la siguiente carta de distribución.

Figura 11. Carta de registros de PRM en la comuna de Hualqui (periodo 1990-2023).



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Gráfico de distribución de registros de PRM en Hualqui según el periodo de estudio.



Fuente: elaboración propia.

Las concentraciones de puntos de registros pueden observarse en la carta de distribución de PRM en la comuna (figura 11), donde podemos observar que en el sector Periquillo y en la ruta O-60 entre las tramas urbanas principales de Chiguayante y Hualqui, se concentran gran cantidad de registros, también en el sector Maqueuto hacia el norte de Hualqui, se puede observar otra gran concentración de registros. Sin embargo, si lo comparamos con la zona sur de la comuna, se encuentran puntos aislados y lejanos entre ellos, muy pocos en comparación a la zona centro y norte de la comuna.

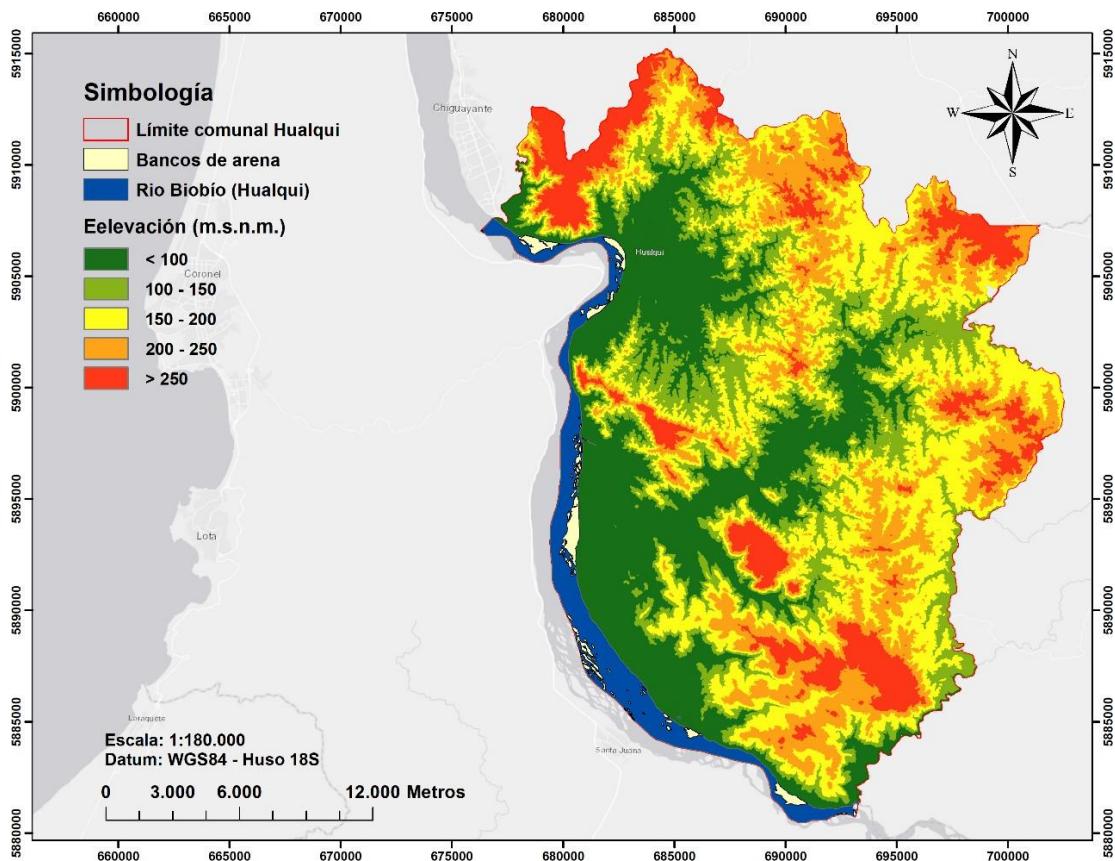
En cuanto a la cantidad de registros, en las dos salidas a terreno del año 2023, tanto de febrero como julio, se recopilaban la mayor cantidad de registros para el inventario, con 22 puntos; le sigue el año 2020 con 12 puntos; el año 2022 con 8 puntos; año 2009 con 5 puntos; los años 1997 y 2021 con 4 puntos cada uno; 2003, 2010 y 2016 con 3 puntos cada uno; los años 1994, 2006, 2012, 2013, 2014 y 2017 con 2 puntos cada uno; los años 1991, 1993, 1999, 2005, 2011, 2018 y 2019 con 1 punto cada uno; y finalmente los años 1990, 1992, 1995, 1996, 1998, 2000, 2001, 2002, 2004, 2007, 2008 y 2015 con 0 puntos cada uno.

8.2 PARÁMETROS PARA LA EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE PRM

8.2.1 Elevaciones

En este factor se utiliza un modelo digital de elevación o DEM, es utilizado para analizar y obtener datos sobre la distribución de los PRM registrados según la elevación del terreno. Además, debemos considerar que en SIG, de un DEM devienen otros factores a evaluar como la pendiente (slope), orientación al sol (aspect), y también la forma del terreno (curvature) para clasificar la topografía con mayor precisión. Proceso que fue realizado en ArcMap 10.4.1.

Figura 13. Carta de elevación, comuna de Hualqui.



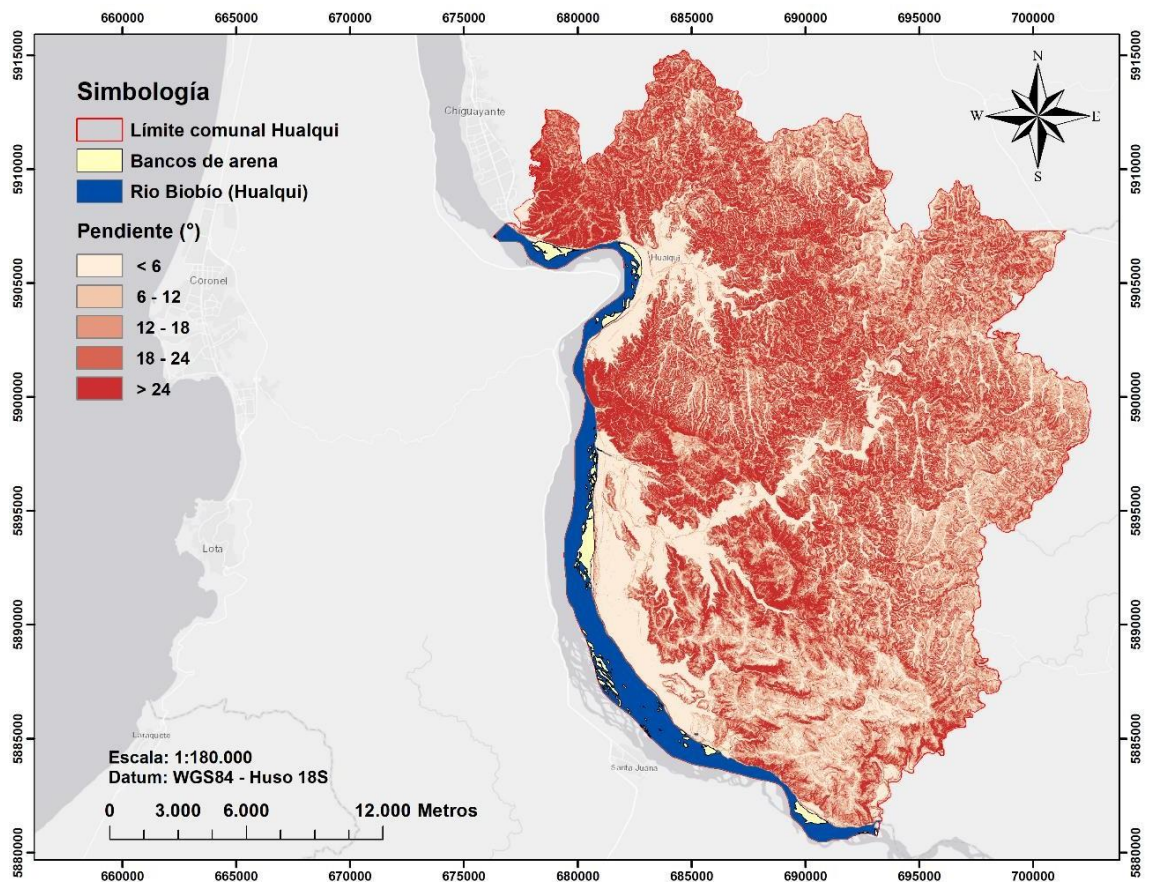
Fuente: elaboración propia a partir de DEM delimitado para la comuna de Hualqui, con resolución de 5 metros por pixel (MDT MINVU, 2013).

En cuanto a la reclasificación para obtener las clases finales con las que se trabajará el método FR, se justifica con la realización de múltiples ensayos para evaluar qué intervalos y clases representarían de mejor forma el terreno de la comuna, esto mediante una observación cualitativa de histograma de intervalos que expone ArcMap cuando se quiere cambiar la clasificación; en simples palabras, se observa y se considera la mayor concentración de datos entre clases, con el fin de no distorsionar o perder información si dejamos una gran concentración de datos fuera de las clases. Por lo que, luego de realizar varios intentos de clasificación de elevaciones, se proponen los siguientes intervalos: < 100, 100 – 150, 150 – 200, 200 – 250, > 250. Con 5 clases de intervalos de elevaciones.

8.2.2 Pendiente en grados

En este caso, la reclasificación del ráster se realizó mediante la herramienta “slope” de ArcMap. Se proponen 5 clases: < 6, 6 – 12, 12 – 18, 18 – 24, > 24. Esto debido a una explicación similar al caso anterior de elevaciones, se observa el histograma de clasificación y se consideran los intervalos que mayor concentración de datos tengan. Al igual que el número de clases, para tener parámetros con reclasificaciones lo más homogéneas posibles entre sí. En ArcMap se utilizó de preferencia una paleta de colores de niveles de rojo, siendo el más claro leve pendiente, y el más intenso, fuerte pendiente.

Figura 14. Carta de pendiente en grados, comuna de Hualqui.

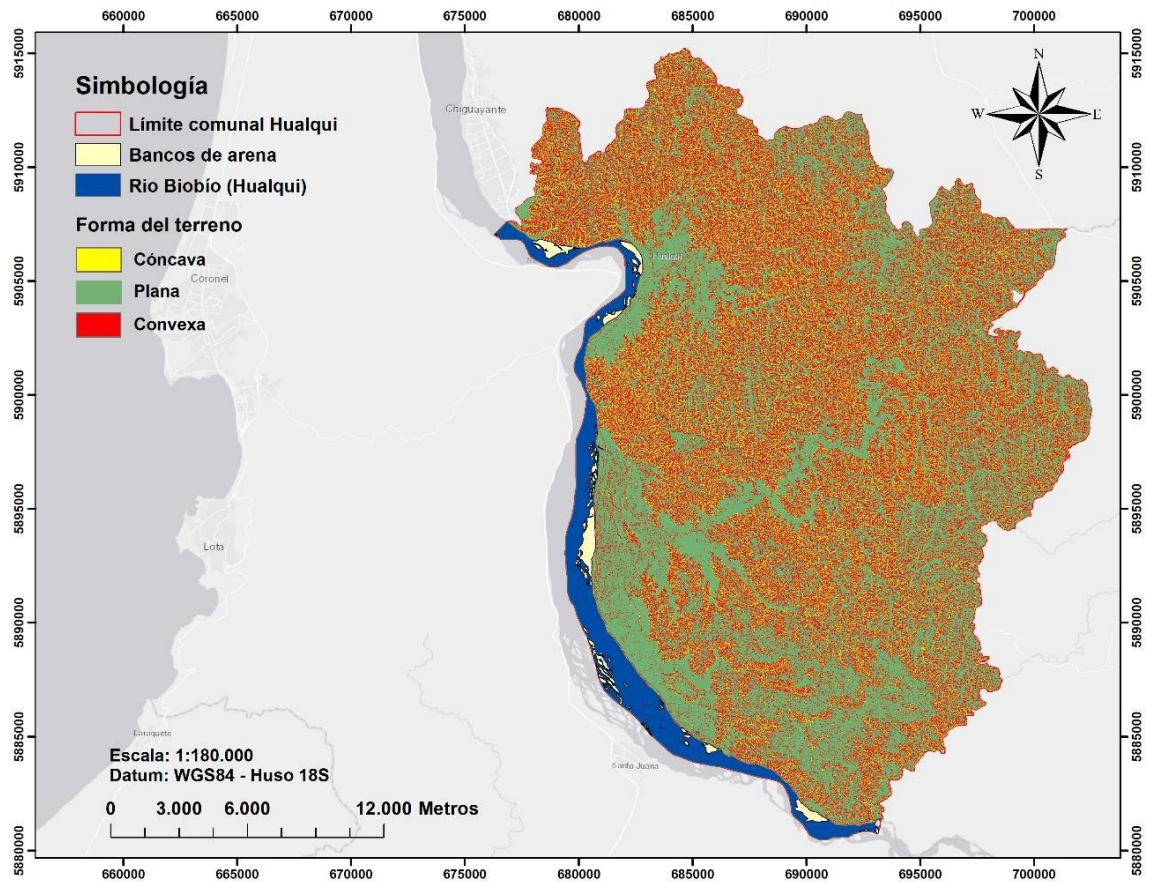


Fuente: elaboración propia en base a ráster DEM delimitado para la comuna de Hualqui, obtenido mediante la herramienta “slope” de ArcMap, con resolución de 5 metros por pixel (MDT MINVU, 2013).

8.2.3 Forma del terreno

Considerando que en este parámetro para ser analizado en el modelo FR, comprende el uso de sólo tres clases de forma de terreno: cóncava, plana y convexa. En cuanto al resultado producto del uso de la herramienta “curvature” de ArcMap, la comuna de Hualqui muestra mayoritariamente una superficie de forma plana de terreno, con un 61,43%; luego sigue la forma convexa, con un 29,01%; y finalmente la forma cóncava de terreno, con un 9,56%.

Figura 15. Carta de forma del terreno, comuna de Hualqui.

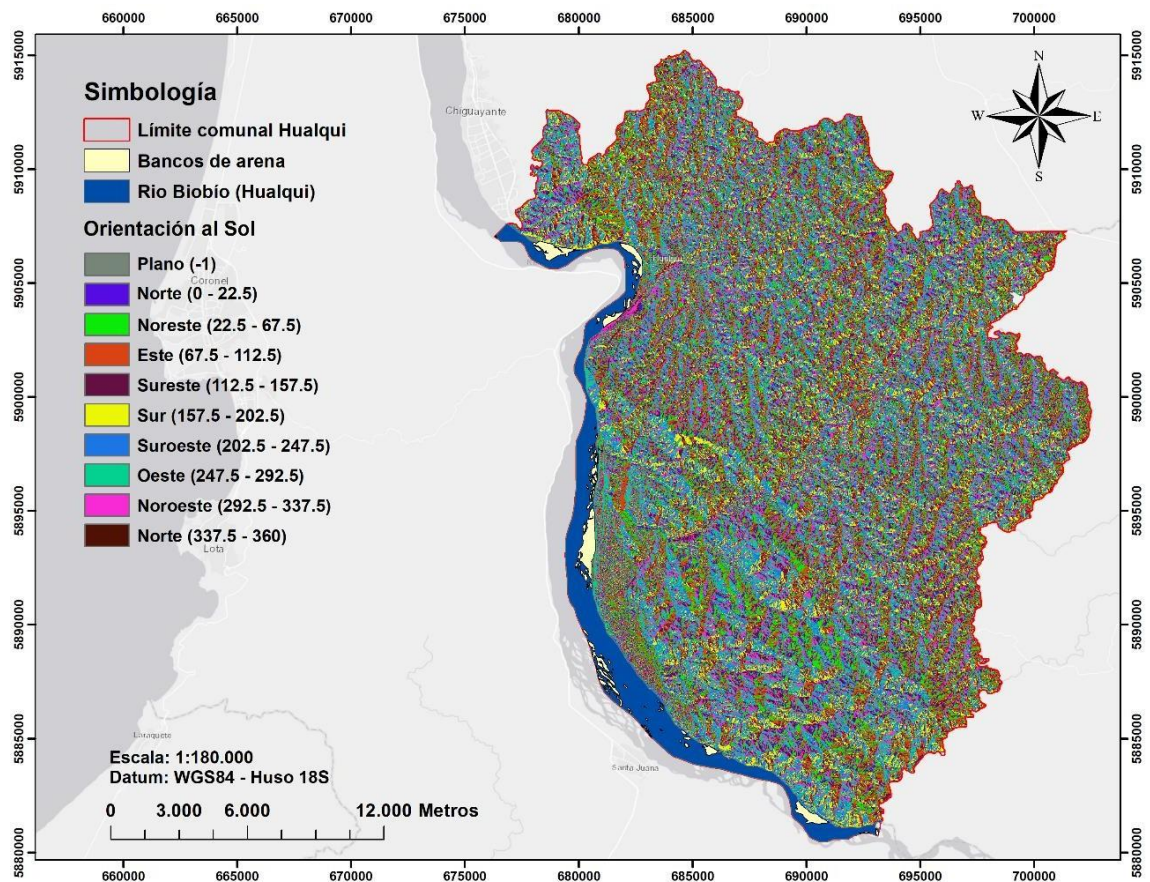


Fuente: elaboración propia a partir de ráster DEM delimitado para la comuna de Hualqui, con resolución de 5 metros por pixel (MDT MINVU, 2013).

8.2.4 Orientación al Sol

La orientación al sol de toda el área de estudio fue realizada mediante la herramienta “aspect” presente en ArcMap. Se ingresa como ráster base el DEM acotado para la comuna de Hualqui del MDT MINVU (2013), con resolución de 5 metros por pixel. Como resultado, se obtiene otra capa ráster, con exactitud de características de extensión en relación con el ráster base (DEM). Este muestra los siguientes intervalos: plano (-1), norte (0 – 22.5), noreste (22.5 – 67.5), este (67.5 – 112.5), sureste (112.5 – 157.5), sur (157.5 – 202.5), suroeste (202.5 – 247.5), oeste (247.5 – 292.5), noroeste (292.5 – 337.5), y norte (337.5 – 360).

Figura 16. Carta de orientación al Sol, comuna de Hualqui.



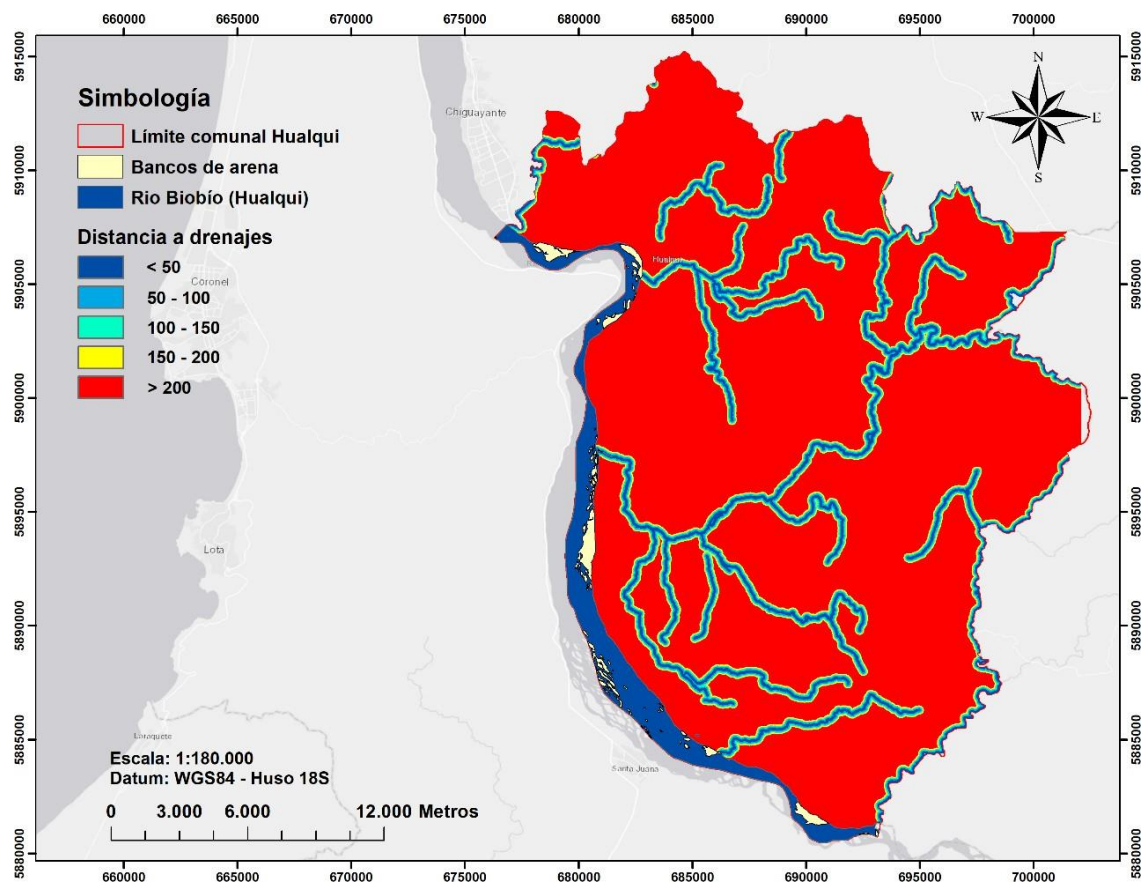
Fuente: elaboración propia a partir de ráster DEM delimitado para la comuna de Hualqui, con resolución de 5 metros por pixel (MDT MINVU, 2013).

8.2.5 Distancia a drenajes

Para este caso, fue utilizada una capa vectorial en formato shapefile disponible en la Geodatabase de cartas para el AMC (MINVU, 2013). Esta capa fue convertida a ráster, con una resolución de salida de 5 metros por pixel. Luego, se utilizó la herramienta “distance > euclidean distance”, para obtener un ráster que luego nuevamente hay que extraer por máscara en base al ráster DEM para resultar con sus límites y extensión exacta. A continuación, se reclasifica el ráster de salida para que presente las siguientes clases propuestas para el modelo FR: < 50, 50 – 100, 100 – 150, 150 – 200, > 200. Cabe destacar que los valores corresponden a metros. Otro tema a destacar es la discriminación de datos disponibles en la capa, puesto que expone desde ríos, como el Biobío o el Gomero, siendo los principales cauces que se encuentran en la comuna; pero

también expone quebradas. Por lo que, para este parámetro se toman en consideración la red de esteros que posee la comuna, y el río Gomero.

Figura 17. Carta de distancia a drenajes, comuna de Hualqui.



Fuente: elaboración propia a partir de capa de red hídrica del AMC, delimitada para la comuna de Hualqui (MINVU, 2013).

8.2.6 Distancia a caminos

La comuna de Hualqui cuenta con una variada red vial, a modo de carreteras, red de ferrocarril, y caminos rurales y caminos para la producción forestal de la zona. Esto ha llevado a que la comuna, para generar esta red vial, se ha visto en la necesidad de modificar una gran variedad de terreno a lo largo de toda la superficie.

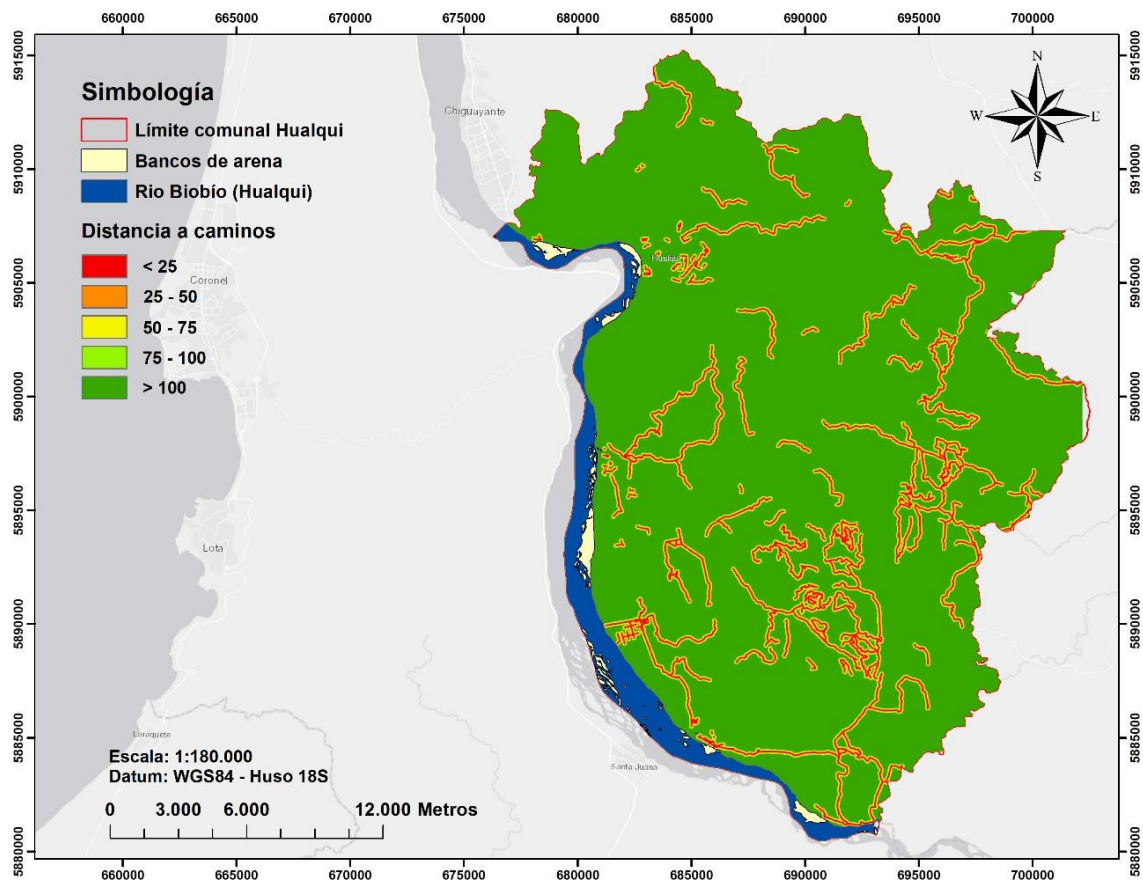
Por ejemplo, en los caminos rurales hacia el norte de Hualqui, se observa en sus costados que ha sido alterada parte de los cerros para poder generar dichos caminos, y por consecuencia, los cortes en el cerro en sus costados respecto a los caminos, tendrán una probabilidad de generar PRM. Ejemplo de ello puede ser observado en la ruta O-670, hacia el norte de Hualqui, donde se presenta una gran variedad de estos caminos para conectar tanto los sectores rurales de la comuna hacia los sectores de Maqueuto, La Leonera, Los Placeres y Pichaco, como también para conectar la producción forestal desarrollada en esta zona con los diversos destinos de la misma.

Figura 18. Ejemplo de deslizamiento de tierra registrado en el sector Maqueuto, ruta O-670 en la comuna de Hualqui.



Fuente: : Fotografía tomada por el autor, en terreno de 2 de julio, 2023.

Figura 19. Carta de distancia a caminos, comuna de Hualqui.



Fuente: elaboración propia a partir de capa de red vial del AMC, delimitada para la comuna de Hualqui (MINVU, 2013).

Entonces, como ya tenemos este antecedente, se considera necesaria la utilización de este parámetro para añadirlo al modelo FR. Para este caso, obtenemos la capa de red vial presente también en la geodatabase de cartografía base para el AMC (MINVU, 2013), en formato shapefile y que debe ser transformada a ráster con resolución de 5 metros por pixel para poder delimitar a la comuna de Hualqui. Posterior a ello, se genera un ráster de distancia a caminos mediante la herramienta “euclidean distance”, y para posterior reclasificación. Se proponen los siguientes intervalos: < 25, 25 – 50, 50 – 75, 75 – 100, > 100.

8.2.7 Índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI)

En este caso, las imágenes satelitales para la comuna de Hualqui fueron obtenidas mediante el hub de información de acceso libre COPERNICUS (S.F.), propiedad del programa de la agencia espacial europea que lleva el mismo nombre. En este sentido, se descargaron dos imágenes del área de estudio,

puesto que las zonas de imagen satelital donde se localizaba toda la superficie comunal de Hualqui se encontraba dividida. Ambas imágenes corresponden a la fecha 4 de abril de 2023. Se generó un mosaico (unión de dos o más archivos ráster) con ambos archivos ráster y extraerlos con la herramienta “extract by mask” de ArcMap para exponer sólo la superficie de Hualqui.

Para llevar a cabo el cálculo del NDVI para la comuna de Hualqui en ArcMap 10.4.1, se necesita agregar al SIG las imágenes con las bandas necesarias para ingresar la fórmula a la calculadora ráster. Se agregan las imágenes con resolución de 10 metros (mínima resolución de ambas imágenes), que contienen las bandas n°4 (color rojo en Sentinel 2a), y la n°8 (NIR o infrarrojo cercano en Sentinel 2a).

Luego, para llegar a la herramienta “ráster calculator”, se realizan los siguientes pasos: ArcToolbox>Spatial analyst tools>Map algebra>Raster calculator. Con el comando matemático “Float”, se considera la fórmula base para calcular el NDVI:

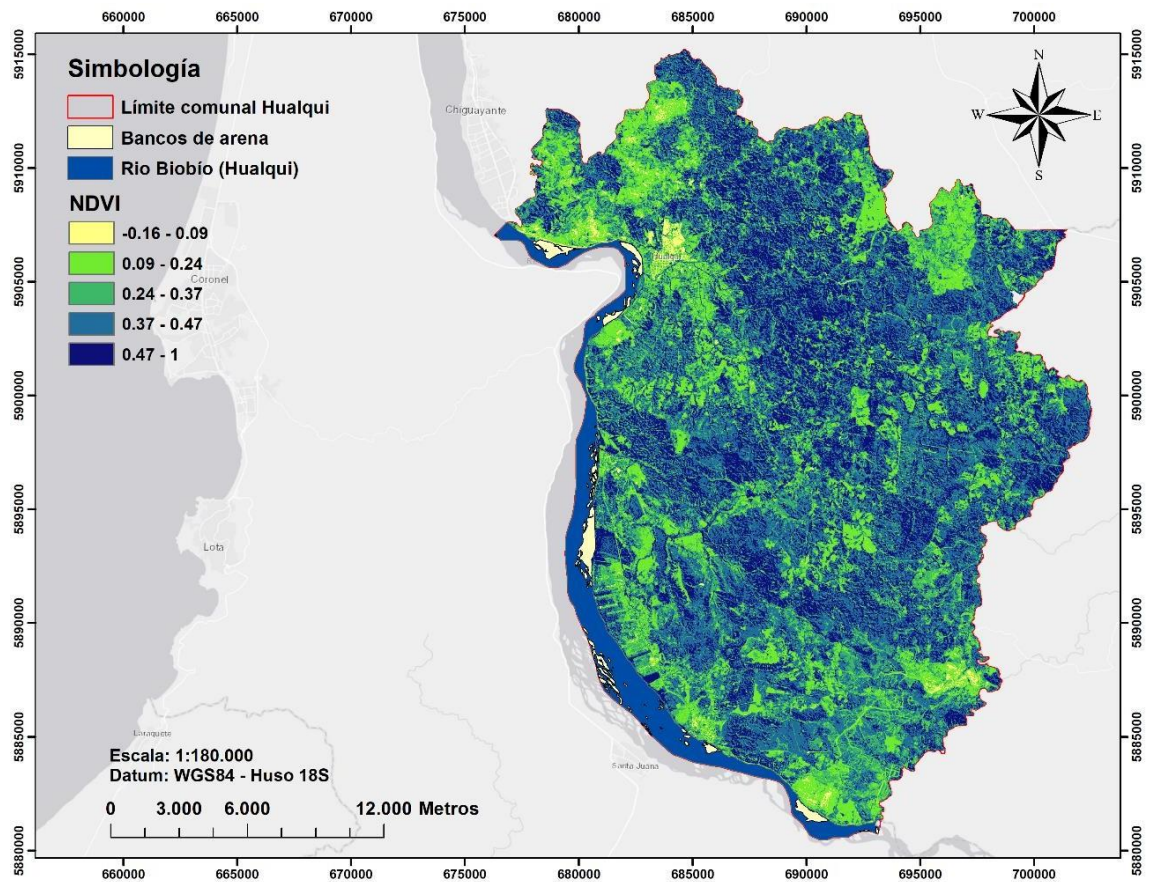
$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Sin embargo, en ArcMap, cada banda posee su propia identificación por número como mencionamos anteriormente, es decir: banda 4 corresponde a rojo, y banda 8 corresponde a infrarrojo cercano. Por lo que, se ingresa de la siguiente forma:

$$NDVI = \frac{Float(Imagen\ ráster\ banda\ 8 - Imagen\ ráster\ banda\ 4)}{Float(Imagen\ ráster\ banda\ 8 + Imagen\ ráster\ banda\ 4)}$$

Luego de guardar el ráster de salida, aplicamos la fórmula y resulta la imagen ráster NDVI para nuestra área de estudio, la que podemos apreciar en la siguiente figura.

Figura 20. Carta de índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI), comuna de Hualqui.

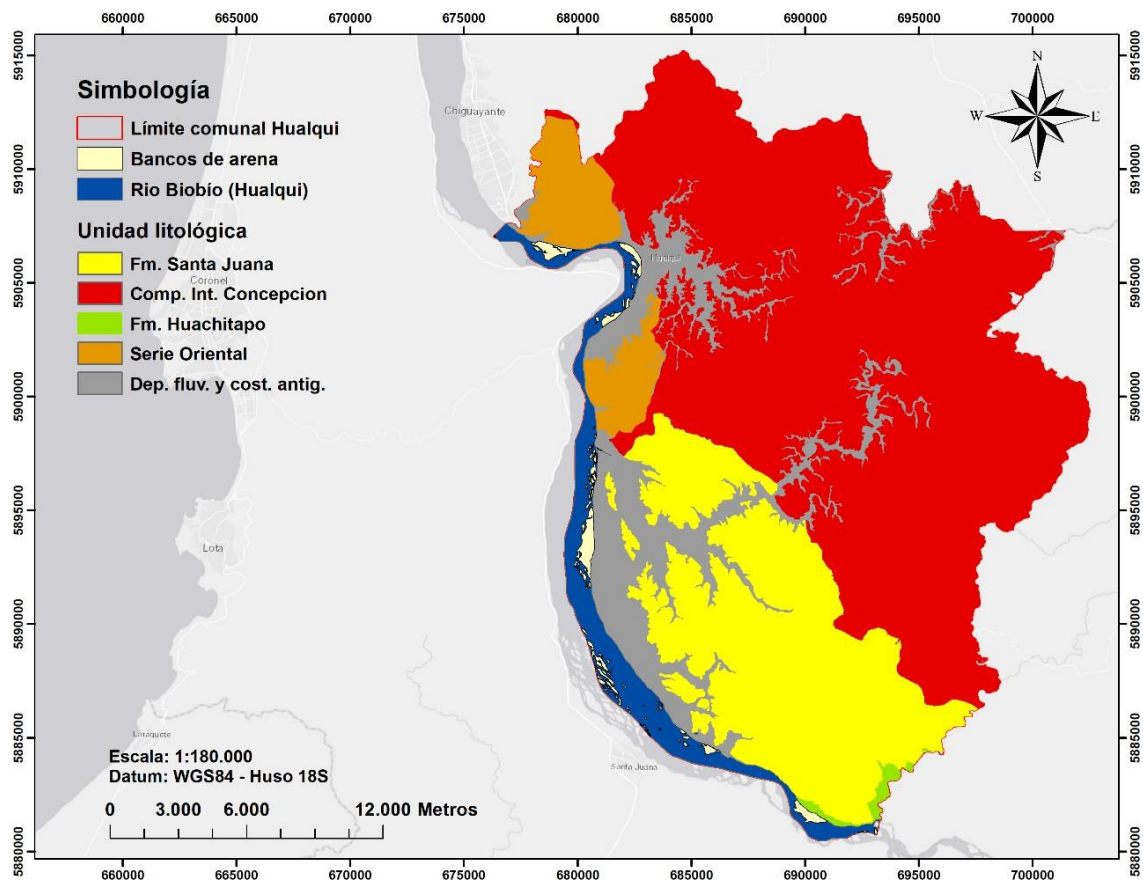


Fuente: elaboración propia a partir de imágenes satelitales SENTINEL 2a (COPERNICUS, S.F.).

8.2.8 Litología

Entre las características del material, podemos mencionar la permeabilidad y capacidad resistiva ante esfuerzos que puedan desencadenar remociones en masa. En este sentido, Hualqui cuenta con las unidades: Formación Huachiato, con un 0,45% de superficie; Serie oriental, con 5,09% de superficie; Depósitos fluviales y costeros antiguos, con un 11,76% de superficie; Formación Santa Juana, con un 21,92% de superficie; y finalmente Complejo intrusivo Concepción, con un 55,07% de superficie; el restante porcentaje lo cubren los bancos de arena y la superficie que cubre el cauce del río Biobío dentro de los límites comunales de Hualqui, con un 0,93% y un 4,77% de superficie respectivamente.

Figura 21. Carta de unidades litológicas, comuna de Hualqui.



Fuente: elaboración propia a partir de Geología de Campo II, carrera de Geología, Universidad de Concepción (2015).

8.3 TABLA DE DATOS Y VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO FR

Esta tabla, realizada en base a Acharya, T.D.; Lee, D.H. (2018), muestra como parte de sus resultados finales, los valores o pesos de cada parámetro reclasificado para evaluar qué parámetro muestra mayor incidencia en el desencadenamiento de PRM a nivel comunal. En este sentido, en el índice de predicción o PR, ubicado en la última columna de la tabla x; el parámetro litología es el que posee mayor incidencia, con un valor de 3.05, le sigue forma del terreno, con un valor de 2.92; luego pendiente, con un valor de 2.24; elevación, con un valor de 2.18; NDVI, con valor de 2.11; distancia a drenajes, con valor de 2.01; distancia a caminos, con valor de 1.47; y finalmente orientación al sol o aspect, con valor de 1.

Tabla 3. Valores y resultados por parámetro para el modelo FR.

Factor	Clase	Pixeles Clase	Pix Clase (%)	Area RM	Pixeles RM	Pix RM (%)	FR	RF	RF (%)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min RF)min	PR
Pendiente	< 6°	5465549	25.33%	75	3	5.08%	0.00000	0.039	4	0.039	0.538	0.499		2.24
	6 - 12°	4216796	19.54%	75	3	5.08%	0.00000	0.051	5					
	12 - 18°	3964157	18.37%	250	10	16.95%	0.00000	0.181	18					
	18 - 24°	3395448	15.73%	225	9	15.25%	0.00000	0.190	19					
	> 24°	4537184	21.03%	850	34	57.63%	0.00001	0.538	54					
	Total	21579134	100.00%	1475	59	100.00%	0.00001	1.000	100					
Elevación	< 100	6385190	29.59%	925	37	62.71%	0.00001	0.530	53	0.044	0.530	0.486		2.18
	100 - 150	3752254	17.39%	175	7	11.86%	0.00000	0.171	17					
	150 - 200	5372178	24.90%	275	11	18.64%	0.00000	0.187	19					
	200 - 250	3991836	18.50%	75	3	5.08%	0.00000	0.069	7					
	> 250	2077676	9.63%	25	1	1.69%	0.00000	0.044	4					
	Total	21579134	100.00%	1475	59	100.00%	0.00001	1.000	100					
NDVI	-0.16 - 0.09	1200493	5.56%	25	1	1.69%	0.00000	0.058	6	0.058	0.527	0.469		2.11
	0.09 - 0.24	3558958	16.49%	675	27	45.76%	0.00001	0.527	53					
	0.24 - 0.37	4318436	20.01%	325	13	22.03%	0.00000	0.209	21					
	0.37 - 0.47	7316397	33.90%	225	9	15.25%	0.00000	0.085	9					
	0.47 - 1	5184850	24.03%	225	9	15.25%	0.00000	0.121	12					
	Total	21579134	100.00%	1475	59	100.00%	0.00001	1.000	100					
Dist. Drenajes	< 50	890787	4.13%	50	2	3.39%	0.00000	0.193	19	0.000	0.448	0.448		2.01
	50 - 100	791957	3.68%	0	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	100 - 150	769301	3.57%	100	4	6.78%	0.00001	0.448	45					
	150 - 200	752470	3.49%	25	1	1.69%	0.00000	0.114	11					
	> 200	18342688	85.13%	1300	52	88.14%	0.00000	0.244	24					
	Total	21547203	100.00%	1475	59	100.00%	0.00001	1.000	100					
Litología	Cuerpos de Agua	1030315	4.77%	0	0	0.00%	0.00000	0.000	0	0.000	0.680	0.680	0.223	3.05
	Dep fluviales recientes	200203	0.93%	0	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Serie Oriental	1099195	5.09%	325	13	22.03%	0.00001	0.680	68					
	Com int Concepción	11884080	55.07%	925	37	62.71%	0.00000	0.179	18					
	Fm Santa Juana	4730897	21.92%	150	6	10.17%	0.00000	0.073	7					
	Fm Huachipato	97431	0.45%	0	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	dep fluv y cost anguiuos	2537013	11.76%	75	3	5.08%	0.00000	0.068	7					
	Total	21579134	100.00%	1475	59	100.00%	0.00002	1.000	100					

Orientación al Sol (Aspect)	Plano	60968	0.28%	0	0	0.00%	0.00000	0.000	0	0.000	0.223	0.223	1.00
	Norte	1361296	6.31%	50	2	3.39%	0.00000	0.059	6				
	Noreste	2808869	13.02%	100	4	6.78%	0.00000	0.057	6				
	Este	2531401	11.73%	350	14	23.73%	0.00001	0.223	22				
	Sureste	2268129	10.51%	125	5	8.47%	0.00000	0.089	9				
	Sur	2513893	11.65%	225	9	15.25%	0.00000	0.144	14				
	Suroeste	2900970	13.44%	175	7	11.86%	0.00000	0.097	10				
	Oeste	3011756	13.96%	200	8	13.56%	0.00000	0.107	11				
	Noroeste	2788897	12.92%	125	5	8.47%	0.00000	0.072	7				
	Norte	1332955	6.18%	125	5	8.47%	0.00000	0.151	15				
Total	21579134	100.00%	1475	59	100.00%	0.00002	1.000	100					
Forma de la Pendiente (Curvature)	Cóncava	2063173	9.56%	600	24	40.68%	0.00001	0.753	75	0.103	0.753	0.650	2.92
	Plana	13256882	61.43%	525	21	35.59%	0.00000	0.103	10				
	Convexa	6259079	29.01%	350	14	23.73%	0.00000	0.145	14				
	Total	21579134	100.00%	1475	59	100.00%	0.00002	1.000	100				
Dist. Caminos	< 25	732776	3.40%	50	2	3.39%	0.00000	0.308	31	0.000	0.327	0.327	1.47
	25 - 50	639220	2.96%	25	1	1.69%	0.00000	0.176	18				
	50 - 75	620501	2.88%	0	0	0.00%	0.00000	0.000	0				
	75 - 100	597378	2.77%	25	1	1.69%	0.00000	0.189	19				
	> 100	18969403	87.99%	1375	55	93.22%	0.00000	0.327	33				
	Total	21559278	100.00%	1475	59	100.00%	0.00001	1.000	100				

Fuente: elaboración propia.

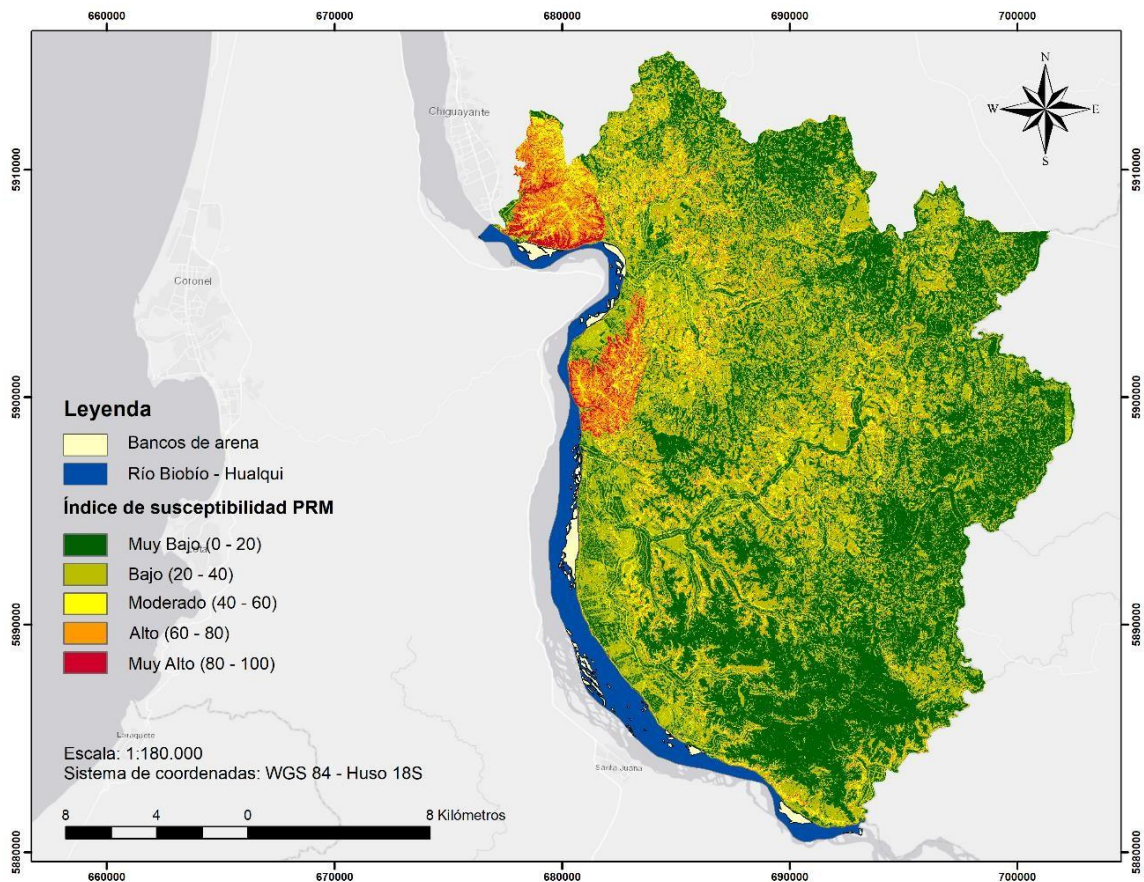
Si observamos el porcentaje RF, en la columna n°10 de izquierda a derecha, notaremos que en el parámetro más incidente en el desencadenamiento de PRM según el modelo frequency ratio, que es litología, muestra una alta correlación entre puntos de PRM registrados y la superficie de la clase n°3 (68), que contiene a la unidad litológica “Serie oriental”. Por lo que esta clase es muy susceptible a desarrollar PRM y se espera que su zona sea zonificada como “muy alto” índice de susceptibilidad en el resultado final. En cuanto al parámetro forma de la pendiente, se espera que en el resultado se zonifiquen las formas cóncavas del terreno con un “muy alto” índice de susceptibilidad, debido a que también concentra un alto valor de porcentaje FR (75). Y en el parámetro con la tercera mayor incidencia en la evaluación de susceptibilidad, que es pendiente, se espera que las pendientes mayores a 24° muestren un “alto” o “muy alto” índice de susceptibilidad, debido a que concentra un porcentaje FR de 54.

Los restantes parámetros, debido a que poseen menor incidencia tal como lo muestra el orden anteriormente descrito, se espera que en el resultado final se muestren menos representativos, excepto en los parámetros de distancia a drenajes y caminos, sobre todo en este último puesto que gran parte de los registros de PRM obtenidos en terreno se identificaron alrededor de caminos interiores/rurales en Hualqui.

8.4 CARTA DE SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A PRM EN LA COMUNA DE HUALQUI

En la figura 22 se muestra la carta de susceptibilidad obtenida y posterior a obtener el resultado final, se realizó una reclasificación del raster con el fin de separar cada índice de susceptibilidad por clases y mostrar la cantidad de pixeles por cada una. Esto para obtener la superficie aproximada según cada clase de índice, que puede ser observado en la siguiente tabla:

Figura 22. Carta de susceptibilidad de la comuna de Hualqui.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Superficie de índice de susceptibilidad según clase.

Clase (índice)	Nº pixeles	Superficie (mt2)	Superficie (hect.)
1 (Muy bajo)	10.144.170	253.604.250	25.360,43
2 (Bajo)	7.046.706	176.167.650	17.616,77
3 (Moderado)	2.436.000	60.900.000	6.090
4 (Alto)	1.485.341	37.133.525	3.713,35
5 (Muy alto)	430.338	10.758.450	1.075,85
Total	21.554.109	538.563.875	53.856,39

Fuente: elaboración propia

La superficie final en hectáreas de la comuna según el total de pixeles de clases es casi exacta a las 53.696,8 hectáreas que posee Hualqui según SIMEF (2018), por lo que la superficie de la carta final posee representatividad bastante alta. Esto a destacar debido a que el análisis en SIG realizado para obtener el

resultado se trabajó con capas raster con resolución de 5 metros por pixel, lo que en teoría entregaría un resultado con alto nivel de detalle.

Notaremos claramente una predominancia de las clases “alto” y “muy alto” índice de susceptibilidad a desarrollar PRM en los alrededores de los sectores de Periquillo y Quilacoya. Esto se explica, primero por la alta concentración de registros multitemporales en estos sectores, y segundo por la relación entre esta misma concentración de registros y la superficie de clase de uno de los parámetros, que es litología y corresponde a la unidad “Serie oriental”. Es decir, en una superficie muy baja en comparación por ejemplo con las otras unidades litológicas de este mismo parámetro, se pudieron identificar gran cantidad de PRM a escala temporal.

Luego, en la zona centro y norte de la comuna de Hualqui también notaremos una predominancia de los índices “moderado” y “alto” de susceptibilidad, esto si bien también se explica con el caso anterior, la unidad litológica en este caso es “Complejo intrusivo Concepción”, sin embargo, la superficie de esta unidad es bastante extensa en comparación a “Serie oriental”, incluso con más de la mitad de superficie comunal (55,07%), y si bien en esta zona encontramos la mayoría de registros de PRM, aquí la relación con la superficie se distancia considerablemente. Entonces, la predominancia de estos índices puede explicarse con el parámetro pendiente, si observamos nuevamente la carta de pendiente (figura 14), notaremos una alta concentración de fuertes pendientes desde las localidades de Chillancito hasta el norte de Maqueuto, en parte también explicado por la presencia hacia el este de la comuna de Hualqui de la cordillera de la costa, por lo que tenemos una gran serie de elevaciones, correspondientes principalmente a cordones graníticos en la clasificación geomorfológica.

8.5 VALIDACIÓN DEL RESULTADO ENTREGADO POR EL MÉTODO FREQUENCY RATIO

8.5.1 Correlación entre puntos de PRM y clases correspondientes al índice de susceptibilidad (enfoque de precisión estadística).

En ArcMap, utilizando la herramienta “tabulate area”, que se utilizó anteriormente para obtener el área de píxeles de remociones en masa según clase de cada parámetro utilizado; se extraen la cantidad de puntos en formato raster correspondientes a los registros de PRM utilizados para generar la carta final según cada una de las cinco clases que corresponden al índice de susceptibilidad resultantes.

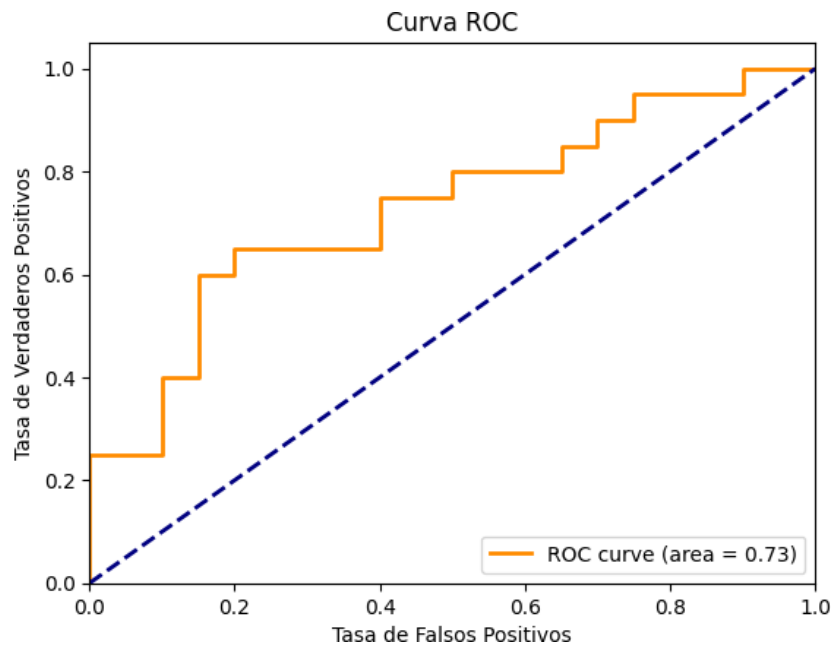
Tabla 5. Cantidad de PRM por clase en la carta de susceptibilidad.

Clase (índice)	N° de PRM
1 (Muy bajo)	4
2 (Bajo)	8
3 (Moderado)	10
4 (Alto)	13
5 (Muy alto)	24
Total	59

Fuente: elaboración propia.

8.5.2 Área bajo la curva ROC para tasa de predicción y exactitud del modelo FR

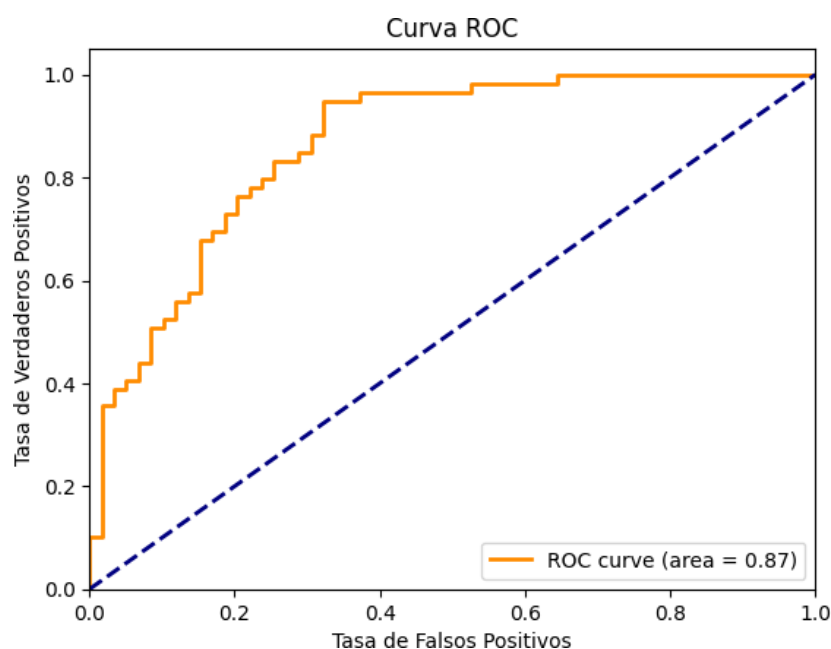
Figura 23. Gráfico de área bajo la curva ROC para tasa de predicción.



Fuente: elaboración propia.

El gráfico ROC muestra un resultado de 0.73, que puede ser interpretado como un resultado “bueno”.

Figura 24. Gráfico de área bajo la curva ROC para la tasa de exactitud.



Fuente: elaboración propia.

El gráfico ROC muestra un resultado de 0.87, que puede ser interpretado como “muy bueno”.

8.6 CARTA DE SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A PRM Y EL INSTRUMENTO DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL COMUNAL DE HUALQUI (PLAN REGULADOR COMUNAL)

Como ya se ha mencionado anteriormente en la problemática de este estudio, la comuna de Hualqui cuenta con el Plan Regulador Comunal o PRC como su principal instrumento de ordenamiento territorial. Este tuvo su última actualización el año 2017, cuando se publicó en el diario oficial el 25 de marzo del mismo año (Biblioteca del Congreso Nacional, S.F.). La actualización del PRC de Hualqui dispone sus zonificaciones en el artículo 2.1 del capítulo I de zonificación, título II de disposiciones específicas, que cuenta con las siguientes zonificaciones:

- a) Zonas residenciales (residencial mixta desde 1 a 11).
- b) Zonas de equipamiento: B1, de equipamiento de categoría local; B2, de equipamiento de categoría comunal; y B3, de cementerio.
- c) Zonas de actividades productivas: C1 y C2 de industria y taller 1 y 2 respectivamente.

- d) Zonas de infraestructura: D1 y D2 de infraestructura de transporte y sanitaria respectivamente.
- e) Zonas de espacio público: EP1 y EP2, de plaza y área verde pública y plaza y parque destinado de BNUP (bienes nacionales de uso público) respectivamente.
- f) Zonas de área verde: AV1, AV2 y AV3; de área de planicie fluvial, área verde en pendiente, y área verde con equipamiento respectivamente.

Mientras que en un apartado dentro del mismo artículo 2.1 del capítulo 1 de zonificación, título II de disposiciones específicas; se destacan las denominadas áreas retringidas al desarrollo urbano, que son las siguientes:

- a) Áreas de riesgo: áreas de riesgo por inundación de cauce natural, áreas de riesgo por remociones en masa, y áreas de riesgo por incendios forestales.
- b) Zonas no edificables: fajas de ferrocarril, fajas de línea de alta tensión, y faja de protección de gasoducto.

Notaremos inmediatamente que en las zonificaciones y áreas dispuestas en la actualización del PRC de Hualqui se menciona explícitamente este tema como “riesgo de remociones en masa”. No obstante, no se exponen las mencionadas en el mismo PRC las “áreas de riesgo a remociones en masa”, tanto en las zonificaciones urbanas, que al fin y al cabo, sólo hicieron zonificaciones de todas las categorías mencionadas anteriormente en las localidades urbanas, como también en los apartados de medidas de gestión sugeridas por el plan.

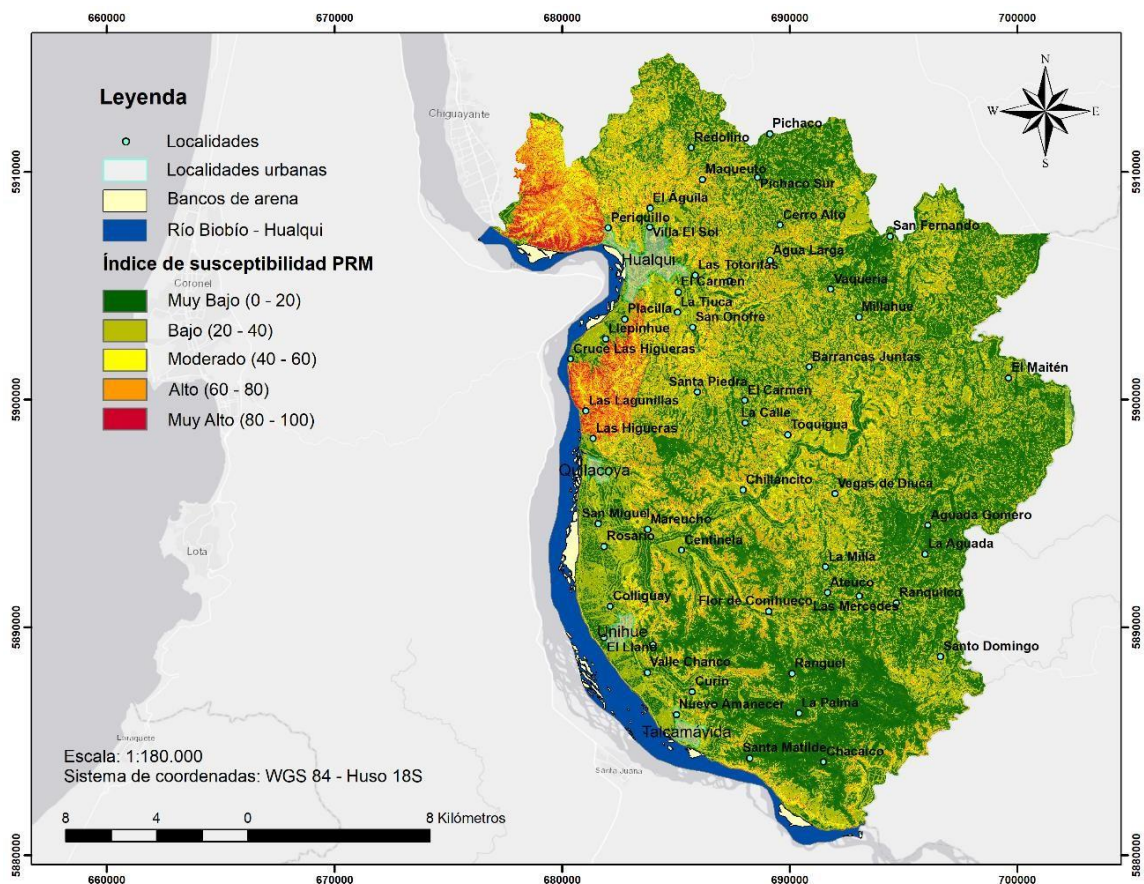
Las áreas de riesgo en general en el PRC, quedan bajo disposición de las definiciones entregadas por el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción para determinar zonas restringidas al desarrollo urbano, con el nombre de “zonas no edificables” o “áreas de riesgo” (Biblioteca del Congreso Nacional, 2023). Las definiciones son las siguientes:

- 1- Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos y tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.
- 2- Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
- 3- Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.
- 4- Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.

En este contexto, si volvemos a la carta de susceptibilidad resultado del modelo frequency ratio, tenemos toda una serie de sectores y localidades (figura 25), sobre todo rurales que poseen desde un “moderado” hasta “muy alto” índice susceptibilidad frente a PRM, por mencionar algunas: Agua corta, Agua larga,

Las Totoritas, El Carmen, San Onofre, Maqueuto, Periquillo, Placilla, Llepinhue, Las Lagunillas, Las Higueras. Estas localidades y sectores de Hualqui no se mencionan en la actualización del PRC, ya que, se reitera que toda área que sea catalogada de riesgo queda sujeta a las disposiciones del artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, pero que sí deberían estar explícitamente expuestas y acompañadas de una carta. Ahora bien, debido a que los antecedentes de la comuna de Hualqui referido a este tipo de estudios, es decir, un estudio que aborde el peligro, riesgo, o misma susceptibilidad frente a PRM son prácticamente nulos. Esta herramienta podría sugerir sectores, como los mencionados anteriormente, que puedan entrar dentro de la segunda definición del artículo 2.1.17, y por tanto, catalogarlos tanto “zonas no edificables” como también “áreas de riesgo”. Por lo que, ya es un estudio base que puede ser considerado para tomar decisiones en el organismo gubernamental local, es decir, la municipalidad de Hualqui, además de conectar con la comunidad y generar un proceso participativo para una gestión más eficiente del territorio.

Figura 25. Carta de susceptibilidad frente a PRM y capa de localidades y sectores de Hualqui.



Fuente: elaboración propia.

9 CONCLUSIONES

El resultado general es positivo dentro de las posibilidades para realizar este estudio, esto referido a la disponibilidad de material de trabajo, metodologías, y capacidades técnicas en cuanto al uso de SIG. En cuanto a capas vectoriales, archivos raster y otros no fueron muy accesibles, puesto que el material que podríamos catalogar como “accesible” son las capas vectoriales disponibles en el portal IDE Chile o en la Biblioteca del Congreso Nacional, sin embargo, estas se encuentran desactualizadas o la escala es demasiado grande para abordar un estudio a escala comunal; lo mismo ocurrió con la capa geológica utilizada tanto para la descripción de la geología de la comuna como también usada para el parámetro litología en el modelo FR, que en comparación con la capa realizada por SERNAGEOMIN a escala 1:1.000.000 se observan claras diferencias de detalle e incluso información referida a unidades geológicas y litológicas. Este tipo de casos corresponden a limitaciones para desarrollar esta clase de estudios, por lo que también es necesario que la información espacial sea actualizada y detallada con acceso más amplio.

Si nos referimos a los factores desencadenantes de los PRM identificados, se concluye que el factor precipitaciones es el principal, puesto que tanto en los registros obtenidos de prensa local, redes sociales y salida a terreno muestran de forma explícita esta relación; en cuanto a la técnica de fotointerpretación, también se considera el factor precipitaciones, pero con un nivel de confianza cualitativo cuestionable. Las precipitaciones, si bien han disminuido en el total anual en los últimos años, tal como lo muestra la figura 12 de precipitaciones, aún siguen desarrollándose con eventos cortos pero intensos, lo que desencadena a veces de forma instantánea después de unas horas de lluvia un PRM, como también en fechas posteriores, esto último debido a la acumulación de precipitaciones, que también debilitan la superficie del suelo y sus esfuerzos resistivos. Entonces, respecto a la primera pregunta de investigación, se comprueba que sí se han desarrollado PRM en la comuna de Hualqui dentro de los últimos 30 años y con una gran variedad de registros y sectores que los han experimentado, no sólo en áreas urbanas, sino también rurales.

En cuanto a las condiciones físico-naturales del área de estudio, se concluye que Hualqui es una comuna que sí cuenta con una gran diversidad de condiciones para desarrollar PRM a lo largo de toda su extensión. Primero debemos destacar la presencia de la cordillera de la costa hacia la zona este de la comuna, correspondiendo a cordones graníticos que cuentan con una serie de elevaciones, fuertes pendientes y formas cóncavas y convexas de terreno, es por esto que parte de los parámetros que contienen esta información debían ser utilizados en el modelo FR, puesto que suponen características fundamentales

que puedan tener implicancia en registros de PRM, o bien desarrollarlos en algún momento. Todo esto si volvemos al apartado de remociones en masa presente en el marco teórico de este estudio, y también en el apartado de parámetros para el modelo FR, además de los resultados de los parámetros expuestos en cartas que muestran las condiciones físico-naturales de Hualqui.

El resultado del modelo FR muestra una clara concordancia con lo anterior expuesto, puesto que tal como se explica anteriormente respecto al modelo, cada parámetro o factor que se analiza en SIG y se utiliza para evaluar la susceptibilidad frente a PRM en un área posee un valor o peso. En la tabla de datos y valores de parámetros para el modelo FR (tabla 2), la última columna de izquierda a derecha muestra el índice de predicción, que en la práctica es el valor de cada parámetro. En este sentido, el parámetro con mayor peso es litología, con un valor de 3.05; luego sigue forma del terreno, con un valor de 2.92; y el tercer parámetro con mayor peso es pendiente, con un valor de 2.24. Estos tres parámetros modelaron el resultado, puesto que se observa una concordancia con los índices de susceptibilidad desde “muy bajo” hasta “muy alto” con estas tres capas reclasificadas, sobre todo litología y sus dos claros sectores de “alto” y “muy alto” índice de susceptibilidad respecto a la unidad “Serie oriental”. En sí es un resultado esperado, puesto que estos tres factores condicionan el desarrollo de los PRM en la teoría y práctica, además de ser un buen resultado desde el punto de vista cualitativo, en el sentido de que las áreas de mayor susceptibilidad coinciden con la cercanía a uno o varios puntos de registros de remociones; y desde el punto de vista cuantitativo, el método de validación de área bajo la curva ROC entregó una tasa de exactitud para este caso concreto de 0.87, catalogado como “muy bueno”.

Por lo que, esta carta podría ser considerado para la visualización de áreas más o menos susceptibles al desarrollo de PRM, no sólo en las cercanías a las localidades urbanas, sino que toda la comuna en sí. Esto último sobre todo si en teoría tenemos en consideración futuros cambios en la planificación territorial de Hualqui y se quieren realizar cambios de uso de suelo, por ejemplo residenciales. Anteriormente se mencionan una serie de localidades hacia el interior de la comuna que muestran desde un “moderado” hasta un “alto” o “muy alto” índice de susceptibilidad, por lo que podrían ser considerados como áreas de riesgo y por ende, no habilitar usos de suelo con fines de ampliación residencial o de infraestructura.

9.1 RECOMENDACIONES FINALES

La realización de un inventario de remociones en masa para una comuna que cuenta con la gran mayoría de su superficie de tipo rural, como lo es Hualqui, y que debido al uso de diversas metodologías de recopilación de registros, sean fotointerpretación, terrenos, prensa local o redes sociales, se han encontrado múltiples registros de PRM a lo largo de la comuna, e incluso algunos de ellos en un mismo sector; constituye una base se pueda seguir ampliando y utilizando para múltiples fines relativos a la planificación territorial comunal. Además, se destacan en este mismo sentido las técnicas de fotointerpretación y búsqueda de registros en la prensa local; la primera porque Google Earth Pro constituye una herramienta sencilla en cuanto a acceso y manejo de la misma, las imágenes desde el año 2003 poseen buena calidad de detalle, y por lo tanto, es posible identificar PRM en un área de estudio, además de descargar la imagen para referenciar el suceso; la segunda técnica constituye otro medio efectivo para obtener registros, debido a que el diario “El Sur” posee múltiples apartados que, entre muchos temas contingentes, muestra sucesos a lo largo de toda el área metropolitana de Concepción en cuanto a catástrofes naturales, y entre ellas se encuentran los PRM, y si bien no se encontraron tantos registros para la comuna de Hualqui considerando que se cubrió toda la década de 1990 y los primeros años de los 2000, no así en comparación con las salidas a terreno o fotointerpretación, aún así es una metodología.

Finalmente, se espera que este estudio pueda tener un uso efectivo en la planificación territorial comunal, puesto que en la actualización del PRC no se especifican las áreas de riesgo o susceptibles directamente frente a PRM en la comuna. Por lo que, la carta y el inventario de remociones en masa pueden ser utilizados o considerarlos referentes para futuros cambios en los usos del suelo, y también como base para seguir actualizando la información mediante se desarrollan nuevos PRM en la comuna de Hualqui, y así generar nuevas cartas de susceptibilidad actualizados, o bien experimentar con otros métodos u otras finalidades de estudio.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Adamo, S. B. (2001). Espacios sub-nacionales especiales: áreas de alta vulnerabilidad ambiental. Cepal.org. Recuperado el 2 de mayo de 2023, de:
https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/susana_adamo.pdf
- Acharya, T.D., Subedi, A. and Lee, D.H. (2018). Evaluation of Water Indices for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal. *Sensors*, 18, 2580. <https://doi.org/10.3390/s18082580>
- Becerra Baeza, C., & De Rurange Espinoza, J. (2018). Modelo de susceptibilidad a procesos de remociones en masa en rutas cordilleranas de Chile Central: Ruta 115 CH, Paso Pehuenche, Región del Maule. Susceptibility model to processes of mass removals in cordilleran routes of Central Chile: Route 115 CH, Paso Pehuenche, Maule Region. *Semanticscholar.org*. Recuperado el 17 de septiembre de 2023, de <https://pdfs.semanticscholar.org/0453/6c63800070fb00f1ed2a387aa7d34dd16e79.pdf>
- Berhane, G., Kebede, M., Alfarah, N., Hagos, E., Grum, B., Giday, A., & Abera, T. (2020). Landslide susceptibility zonation mapping using GIS-based frequency ratio model with multi-class spatial data-sets in the Adwa-Adigrat mountain chains, northern Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103795>.
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2023). Decreto 47: Fija Nuevo Texto de la Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcciones. Recuperado el 18 de abril de 2023, de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=8201>
- Biblioteca del Congreso Nacional. SIIT. (2005). Clima y vegetación Región del Biobío. Bcn.Cl. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region8/clima.htm>
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2023). Decreto 1495: Promulga actualización Plan Regulador Comunal de Hualqui. Recuperado el 12 de septiembre de 2023, de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1101335>.
- CEDEUS. (S/F). Área metropolitana de Concepción: indicadores. Recuperado el 18 de abril de 2023, de <http://indicadores.cedeus.cl/ciudad/5#:~:text=El%20%C3%81rea%20Metropolitana%20de%20Concepci%C3%B3n,%2C%20Talcahuano%2C%20Tom%C3%A9%20y%20Hualpen>.
- Cordero, E. (2007). El derecho urbanístico, los instrumentos de planificación territorial y el régimen jurídico de los bienes públicos. *Revista*

- de Derecho de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. XXIX (Valparaíso, Chile, 2do Semestre de 2007) [pp. 269 - 298]
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996). Landslide Types and Processes, Special Report Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 247:36-75.
 - CONAMA. (2007). Variaciones climáticas en Chile Para el siglo XXI: Resumen Ejecutivo. Uchile.cl. Recuperado el 12 de abril de 2023, de http://dgf.uchile.cl/PRECIS/articles-39442_pdf_Estudio_texto.pdf
 - Filun, P. A. L. (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.
 - García-Rodríguez, M.J., Malpica, J.A., Benito, B., Díaz, M., 2008. Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. Geomorphology 226, 15-24.
 - Geología de Campo II. (2015). Geología del sector nororiental del río Biobío, entre las coordenadas 36°58'-37°12'S y 73°00'-72°43'W, Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra: 181pp. Concepción.
 - Gobierno de México. (2018). ¿Qué es una Megalópolis? Gob.mx. Recuperado el 19 de julio de 2023, de <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/que-es-una-megalopolis?idiom=es>.
 - González de Vallejo, Luís., Ferrer, Mercedes., Ortuño, Luís., Oteo, Carlos. (2002). Ingeniería Geológica. PEARSON EDUCACIÓN, Madrid, 2002. BBN: 84-205-3104-9. Materia; Geología, 55. Recuperado de https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%202.pdf.
 - Hauser A. (2000) "Remoción en masa." Servicio Nacional de geología y minería. Boletín No 59, versión actualizada 200, 89p. Santiago.
 - Highland, L.M., and Bobrowsky, Peter, 2008, The landslide handbook—A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
 - Instituto Nacional de Estadísticas. (2017). Resultados Censo 2017. Censo2017.cl. Recuperado el 8 de abril de 2023, de <http://resultados.censo2017.cl/Region?R=R08>.
 - Kanungo, D. & Arora, Manoj & Sarkar, Shantanu & R.P.Gupta,. (2009). Landslide Susceptibility Zonation (LSZ) Mapping – A Review. Journal of South Asia Disaster Studies. 2. 81-105. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/257676704_Landslide_Susceptibility_Zonation_LSZ_Mapping_-_A_Review3.
 - Kumar, A., Kumar, R. S., & Kumar, V. B. (2019). GIS-based comparative study of information value and frequency ratio method for landslide hazard

zonation in a part of mid-Himalaya in Himachal Pradesh. Innovative Infrastructure Solutions.

- Lara, M.; Sepúlveda, S.A. 2010. Landslide susceptibility and hazard assessment in San Ramón Ravine, Santiago de Chile, from an engineering geological approach. *Environmental Earth Sciences* 60 (6): 1227-1243.
- Marín, Mónica, Neira, Hugo, Garrido, Natalia, Báez, Francisco. SERNAGEOMIN Chile. (2021). Visor Territorial de fallecidos por Remociones en Masa (R.M.) en Chile entre los años 1938-2020. Recuperado el 12 de mayo de 2023, de <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/33193>
- 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022012000300004>
- 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* (Santiago), 27(81), 97-122. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612001008100006>
- Márquez Poblete, M. A., & Veloso Pérez, E. (2021). El ordenamiento territorial en Chile: estado del arte. *Estado, Gobierno Y Gestión Pública*, 18(35), pp. 139–. <https://doi.org/10.5354/0717-8980.2020>.
- MINVU. (2013). Imágenes y Cartografía Base para el área Metropolitana de Concepción. Región del Biobío.
- MINVU. (2017). 11° Modificación Plan Regulador Metropolitano de Concepción. Recuperado el 20 de junio de 2023, de https://eae.mma.gob.cl/storage/documents/04_Anteproyecto-Planos_PRM_Concepci%C3%B3n.pdf.pdf
- Ministerio del Medio Ambiente. (2019). Cambio Climático. Recuperado el 17 de septiembre de 2023, de <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/>
- Municipalidad de Hualqui. (2016). PLADECO Hualqui. Recuperado el 15 de septiembre de 2023, de <https://docplayer.es/92182837-Plan-de-desarrollo-comunal.html>
- Muñoz, E. (2013). Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores urbanas: estudio de caso en Viña del Mar, V región. Recuperado el 17 de septiembre de 2023, de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114667>
- Naranjo, J., Arenas, M., Ramírez, P. (2006). Remociones en masa causadas por las precipitaciones de los días 9 al 11 de julio de 2006, en algunos sectores de la provincia de Concepción. Recuperado el 17 de septiembre de 2023, de https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RBIO-056.pdf

- Novillo, C. (2022). Qué es riesgo ambiental y ejemplos. Recuperado el 10 de mayo de 2023, de <https://www.ecologiaverde.com/que-es-riesgo-ambiental-y-ejemplos-2014.html>
- Ortúzar, S. (2010). Introducción a la planificación territorial. Ucentral.cl. Ediciones Universidad Central, Comité Editorial - Facultad de Arquitectura Urbanismo y Paisaje. Recuperado el 18 de julio de 2023, de <http://fidonline.ucentral.cl/pdf/Introduccion%20a%20la%20planificacion.pdf>
- Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, et al. (2007). Technical Summary. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (Eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 23-78.
- Pollock W, Wartman J. Human Vulnerability to Landslides. Geohealth. 2020 Oct 1;4(10):e2020GH000287. doi: 10.1029/2020GH000287. PMID: 33094206; PMCID: PMC7567151.
- SEREMI MINVU - Región del Biobío. (2016). Anteproyecto actualización Plan Regulador Comunal de Hualqui. Recuperado el 6 de abril de 2023, de https://eae.mma.gob.cl/storage/documents/04_Anteproyecto_PRC_Hualqui_1.pdf.pdf.
- SEREMI MINVU Región del Biobío. (2017). Modificación Plan Regulador Metropolitano de Concepción. Gob.cl. Recuperado el 12 de mayo de 2023, de <https://prmconcepcion.minvu.gob.cl/wp-content/prmc/doc/03-ordenanza-2018.pdf>- Museo Geológico SERMAGEOMIN. (S/F). ¿Cómo se originan los terremotos? Sernageomin.cl. Recuperao el 10 de mayo de 2023, de https://www.sernageomin.cl/Museo_Geologico/terremotos/losTerremotos.html#:~:text=Un%20terremoto%20es%20el%20movimiento,acumulada%20durante%20un%20largo%20tiempo
- Sistema de Información Territorial Rural, Centro de Información de Recursos Naturales. (2021). Recursos Naturales: comuna de Hualqui. Sitrural.cl. Recuperado el 20 de junio, 2023, de https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2022/06/Hualqui_rec_nat.pdf
- SIMEF. (2018). Comuna de Hualqui: informe comunal. Simef.migagri.gob.cl. Recuperado el 15 de septiembre de 2023, de <https://simef.minagri.gob.cl/bibliotecadigital/bitstream/handle/20.500.12978/124/R08206-INFORME%20COMUNAL%20HUALQUI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Shahabi, H., Hashim, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. Sci Rep 5, 9899. <https://doi.org/10.1038/srep09899>

- Ulloa, I. (2022). Diagnóstico del estado de los suelos en la comuna de Hualqui, región del Biobío: consecuencias de los cambios de uso. Recuperado el 17 de septiembre de 2023, de <http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/10054/1/Tesis%20Ivette%20Ulloa%20Image.Marked.pdf>
- United States Geological Survey. (2004). Landslide types and processes. Reston, Virginia. U.S. Department of interior and U.S. Geological Survey. Fact Sheet 2004-3072.
- Thongley, & Vansarochana, C. (2021). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model at Ossey watershed area in Bhutan. Engineering and Applied Science Research, 56-64.
- Vakhshoori, V., & Zare, M. (2018). Is the ROC curve a reliable tool to compare the validity of landslide susceptibility maps? Geomatics, Natural Hazards and Risk, 249-266.

11 ANEXOS

11.1 Inventario de PRM para la comuna de Hualqui

ID	Fecha (24hrs antes de registro)	Año de ocurrencia	Subtipo de PRM	Coordenada Este	Coordenada Norte	Sector	Factor Desencadenante	Fuente
HUA00001	17 de julio	1991	Flujo de barro	681940.161	5907199.831	Periquillo	Lluvia intensa	Diario El Sur
HUA00002	29 de junio	1993	Deslizamiento rotacional de tierra	682626.991	5906746.081	Periquillo	Lluvia intensa	Diario El Sur
HUA00003	20 de julio	1994	Deslizamiento rotacional de tierra	681860.231	5907600.441	Periquillo	Lluvia intensa	Diario El Sur
HUA00004	21 de julio	1994	Caída de rocas	681151.521	5901088.371	Cuesta Quilacoya	Lluvia intensa	Diario El Sur
HUA00005	30 de julio	1997	Deslizamiento rotacional de tierra	682641.451	5906737.481	Ribera Norte BioBio/Línea férrea	Lluvia intensa	Diario El Sur
HUA00006	29 de julio	1997	Deslizamiento rotacional de tierra	680300.631	5901176.491	Línea férrea Hualqui-Quilacoya	Lluvia intensa	Diario El Sur
HUA00007	29 de julio	1997	Deslizamiento rotacional de tierra	681567.001	5898894.801	Cuesta Quilacoya	Lluvia intensa	Diario El Sur
HUA00008	19 de agosto	1997	Deslizamiento rotacional de tierra	680359.011	5900621.621	Línea férrea Hualqui-Quilacoya	Lluvia intensa	Diario El Sur
HUA00009	21 de agosto	1999	Deslizamiento rotacional de tierra	679312.101	5906616.671	Línea férrea Hualqui-Chiguayante	Lluvia intensa	Diario El Sur
HUA00010	27 de noviembre	2003	Deslizamiento rotacional de tierra	688744.841	5883384.971	Línea férrea Talcamávida	Lluvia intensa	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00011	27 de noviembre	2003	Deslizamiento rotacional de tierra	687991.641	5883770.861	Línea férrea Talcamávida	Lluvia intensa	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00012	27 de noviembre	2003	Deslizamiento rotacional de tierra	700885.941	5896226.762	Cerca de Aguada Gomero	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00013	22 de abril	2005	Deslizamiento rotacional de tierra	693892.371	5900606.371	Cerca de Barrancas juntas	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00014	30 de enero	2006	Deslizamiento rotacional de tierra	690196.671	5900403.741	Cerca de Barrancas juntas	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00015	12 de octubre	2009	Deslizamiento rotacional de tierra	687198.931	5897026.741	La Calle	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00016	27 de febrero	2006	Deslizamiento rotacional de tierra	690493.901	5905394.681	Cerca de Barrancas juntas	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00017	12 de octubre	2009	Deslizamiento rotacional de tierra	687050.491	5896564.701	Chillancito	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)

HUA00018	23 de marzo	2010	Deslizamiento rotacional de tierra	695089.561	5884853.361	Cerca de Chacaico	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00019	12 de octubre	2009	Deslizamiento rotacional de tierra	687378.761	5897589.812	Chillancito	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00020	12 de octubre	2009	Deslizamiento rotacional de tierra	687292.521	5897798.021	Chillancito	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00021	17 de mayo	2009	Deslizamiento rotacional de tierra	690747.981	5908164.961	Cerca de Cerro Alto	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00022	29 de octubre	2011	Deslizamiento rotacional de tierra	701378.911	5898056.691	Cerca de El Maitén	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00023	29 de diciembre	2012	Deslizamiento rotacional de tierra	691725.001	5908582.891	Cerca de Cerro Alto	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00024	26 de agosto	2012	Deslizamiento rotacional de tierra	684104.571	5912013.361	Cerca de Redolino	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00025	23 de marzo	2010	Deslizamiento rotacional de tierra	696336.381	5886931.262	Cerca de Santo Domingo	Posible terremoto 8.8	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00026	16 de abril	2013	Deslizamiento rotacional de tierra	683429.131	5914131.951	No Sector (al noroeste de Rodolino)	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00027	17 de abril	2013	Deslizamiento rotacional de tierra	695800.731	5892323.981	Cerca de La Aguada	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00028	16 de septiembre	2014	Deslizamiento rotacional de tierra	681219.851	5899861.881	Las Lagunillas	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00029	22 de febrero	2014	Deslizamiento rotacional de tierra	691190.077	5907500.931	Cerca de Cerro Alto	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00030	23 de marzo	2010	Flujo de detritos	691317.931	5892547.851	La Milla	Posible terremoto 8.8	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00031	21 de enero	2016	Deslizamiento rotacional de tierra	687083.031	5910990.491	Maqueuto	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00032	21 de enero	2016	Deslizamiento rotacional de tierra	687083.031	5910990.491	Maqueuto	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00033	19 de febrero	2016	Deslizamiento rotacional de tierra	689402.721	5905110.441	Cerca de Agua Larga	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00034	25 de septiembre	2017	Deslizamiento rotacional de tierra	699393.331	5904324.621	No Sector	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00035	25 de septiembre	2017	Deslizamiento rotacional de tierra	697220.851	5887120.051	Cerca de Santo Domingo	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)
HUA00036	12 de marzo	2018	Deslizamiento rotacional de tierra	681323.031	5906993.401	Periquillo	Lluvia	Google Earth Pro (Fotointerpretación)

HUA00037	28 de junio	2019	Deslizamiento rotacional de tierra	687532.641	5905227.801	Agua Corta	Lluvia	Redes Sociales (pag. Municipalidad de Hualqui)
HUA00038	30 de junio	2020	Deslizamiento rotacional de tierra	681598.441	5906879.012	Camino Hualqui-Periquillo	Lluvia	Redes Sociales (pag. Municipalidad de Hualqui)
HUA00039	16 de febrero	2023	Deslizamiento rotacional de tierra	680740.701	5906651.081	Ruta 0-60	Incendio forestal	Redes Sociales (pag. Municipalidad de Hualqui)
HUA00040	08 de junio	2023	Flujo de barro	685814.301	5909624.251	Camino a Maqueuto	Lluvia intensa	Redes Sociales (pag. Municipalidad de Hualqui)
HUA00041	08 de julio	2023	Flujo de barro	688447.012	5906532.871	Agua Larga	Lluvia intensa	Redes Sociales (pag. Municipalidad de Hualqui)
HUA00042	19 de agosto	2023	Deslizamiento rotacional de tierra	686291.661	5899392.441	Santa Piedra	Lluvia intensa	Redes Sociales (pag. Municipalidad de Hualqui)
HUA00043	15 de septiembre	2023	Flujo de barro	685954.512	5909661.571	Maqueuto	Lluvia intensa	Redes Sociales (pag. Municipalidad de Hualqui)
HUA00044	16 de agosto	2022	Deslizamiento rotacional de tierra	681608.277	5906901.253	Periquillo	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00045	16 de agosto	2022	Flujo de barro	686498.758	5910391.901	Los Placeres	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00046	16 de agosto	2022	Deslizamiento rotacional de tierra	686613.511	5909937.035	La Leonera	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00047	16 de agosto	2022	Deslizamiento rotacional de tierra	687195.634	5910633.974	Los Placeres	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00048	16 de agosto	2022	Deslizamiento rotacional de tierra	687188.615	5910742.389	Los Placeres	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00049	16 de agosto	2022	Deslizamiento rotacional de tierra	686601.435	5909891.345	La Leonera	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00050	16 de agosto	2022	Caída de rocas	686492.624	5909830.523	La Leonera	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00051	16 de agosto	2022	Flujo de barro	686308.326	5909671.742	La Leonera	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00052	19 de septiembre	2020	Deslizamiento rotacional de tierra	683613.357	5888994.582	Unihue	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00053	20 de septiembre	2020	Deslizamiento rotacional de tierra	680827.394	5899283.473	Las Higueras	Acumulación de lluvia	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00054	21 de septiembre	2020	Deslizamiento múltiple (indefinido)	680842.213	5899240.494	Las Higueras	Acumulación de lluvia	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00055	22 de septiembre	2020	Flujo de barro	680830.255	5899020.529	Las Higueras	Acumulación de lluvia	Terreno (2 de febrero, 2023)

HUA00056	23 de septiembre	2020	Deslizamiento rotacional de tierra	680873.276	5898651.603	Las Higueras	Acumulación de lluvia	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00057	09 de julio	2021	Deslizamiento rotacional de tierra	686236.243	5902010.668	Camino Bulnes	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00058	09 de julio	2021	Deslizamiento rotacional de tierra	686433.167	5901475.913	Camino Bulnes	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00059	09 de julio	2021	Deslizamiento rotacional de tierra	687609.535	5901373.734	Camino Bulnes	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00060	19 de septiembre	2020	Caída de rocas	688587.284	5895782.234	Chillancito	Acumulación de lluvia	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00061	19 de septiembre	2020	Deslizamiento rotacional de tierra	688699.402	5895647.068	Chillancito	Acumulación de lluvia	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00062	19 de septiembre	2020	Deslizamiento rotacional de tierra	688754.684	5896058.012	Chillancito	Acumulación de lluvia	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00063	19 de septiembre	2020	Deslizamiento rotacional de tierra	688764.231	5896126.269	Chillancito	Acumulación de lluvia	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00064	19 de septiembre	2020	Caída de rocas	688807.154	5896446.235	Chillancito	Acumulación de lluvia	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00065	19 de septiembre	2020	Deslizamiento rotacional de tierra	688737.418	5896619.571	Chillancito	Acumulación de lluvia	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00066	09 de julio	2021	Deslizamiento rotacional de tierra	686900.848	5901731.705	Camino Bulnes	Lluvia intensa	Terreno (2 de febrero, 2023)
HUA00067	25 de junio	2023	Flujo de barro	685811.131	5909621.381	Maqueuto	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00068	25 de junio	2023	Flujo de barro	685940.711	5909656.531	Maqueuto	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00069	25 de junio	2023	Caída de rocas	686285.471	5909671.991	Maqueuto	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00070	25 de junio	2023	Deslizamiento rotacional de tierra	686316.701	5909689.931	Maqueuto	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00071	25 de junio	2023	Caída de rocas	686336.612	5909701.221	Maqueuto	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00072	25 de junio	2023	Deslizamiento rotacional de tierra	686568.291	5909928.511	Maqueuto	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00073	25 de junio	2023	Deslizamiento rotacional de tierra	687326.381	5901044.121	Maqueuto	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00074	25 de junio	2023	Deslizamiento rotacional de tierra	684339.881	5908909.271	Maqueuto	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00075	25 de junio	2023	Flujo de detritos	684350.161	5908921.741	Maqueuto	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)

HUA00076	25 de junio	2023	Deslizamiento rotacional de tierra	684583.371	5909838.521	Paso de Piedra/Maqueuto	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00077	25 de junio	2023	Deslizamiento rotacional de tierra	685412.401	5910116.541	Redolino	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00078	25 de junio	2023	Deslizamiento rotacional de tierra	686637.501	5904162.571	Lo Vargas	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00079	25 de junio	2023	Flujo de barro	687133.571	5903780.021	Lo Vargas	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00080	25 de junio	2023	Flujo de barro	682416.901	5906880.101	El Águila	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00081	25 de junio	2023	Flujo de barro	681602.241	5906904.151	El Águila	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00082	25 de junio	2023	Deslizamiento rotacional de tierra	681088.231	5906799.661	Línea férrea Hualqui-Chiguayante	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)
HUA00083	25 de junio	2023	Deslizamiento rotacional de tierra	680141.941	5906572.921	Línea férrea Hualqui-Chiguayante	Lluvia intensa	Terreno (2 de julio, 2023)

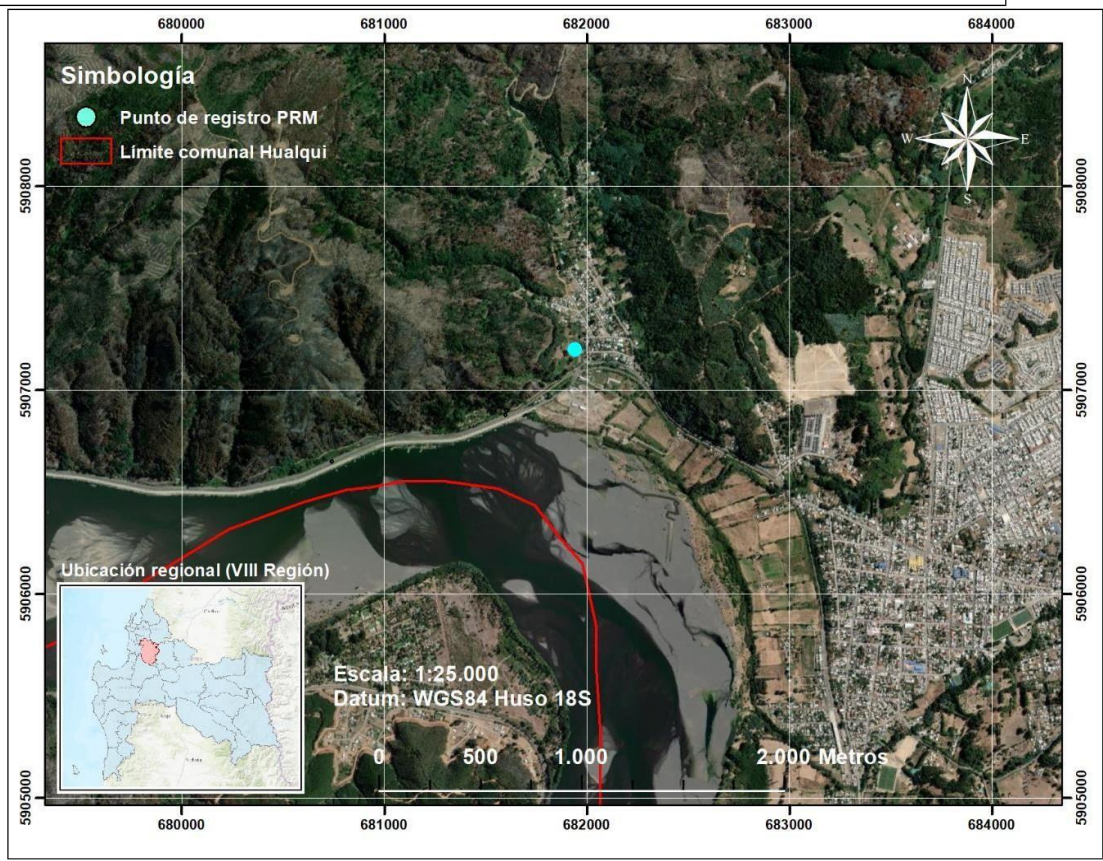
11.2 Ficha de inventario de PRM en la comuna de Hualqui, en base a Gajardo (2022).

Ficha de Inventario de Procesos de Remociones en Masa en el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile basado en Prensa Local.

Tipo de Remoción en Masa	Flujo de barro
Fecha de ocurrencia	17 de julio de 1991
Fecha de publicación	18 de julio de 1991
Factor desencadenante	Lluvia intensa
Intensidad pp. o magnitud sismo	No aplica
Ubicación relativa	Sector Periquillo
Fuente de información (URL, etc.)	https://drive.google.com/file/d/1-MDrHns8Z2sUhwD-1rW8yxSnEiZQvVOE/view?usp=sharing
Víctimas fatales	No aplica
Desaparecidos	No aplica
Damnificados	No aplica
Infraestructura afectada	Ruta O-60, parte de la ruta fue cortada para remover material
Costo de los daños	No calculado
Otros datos	Se menciona en el reporte de que la ruta ya había sido afectada por este tipo de fenómenos en el mismo sector
Imagen de la noticia	



Ubicación aproximada



Ficha de Inventario de Procesos de Remociones en Masa en el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile basado en Prensa Local.

Tipo de Remoción en Masa	Deslizamiento de tierra
Fecha de ocurrencia	29 de junio de 1993
Fecha de publicación	30 de junio de 1993
Factor desencadenante	Lluvia intensa
Intensidad pp. o magnitud sismo	No aplica
Ubicación relativa	Sector Periquillo
Fuente de información (URL, etc.)	https://drive.google.com/file/d/1Xom2Q9t3IleE-bIE_6VZ9W4iTVqgL9/view?usp=sharing
Víctimas fatales	No aplica
Desaparecidos	No aplica
Damnificados	No aplica
Infraestructura afectada	Camino sector Periquillo, a la entrada de Hualqui
Costo de los daños	No calculado
Otros datos	Se reitera en el reporte la ocurrencia de “derrumbes” en el sector Periquillo, obstruyendo la circulación de vehículos por retiro de material.
Imagen de la noticia	



Fin en l

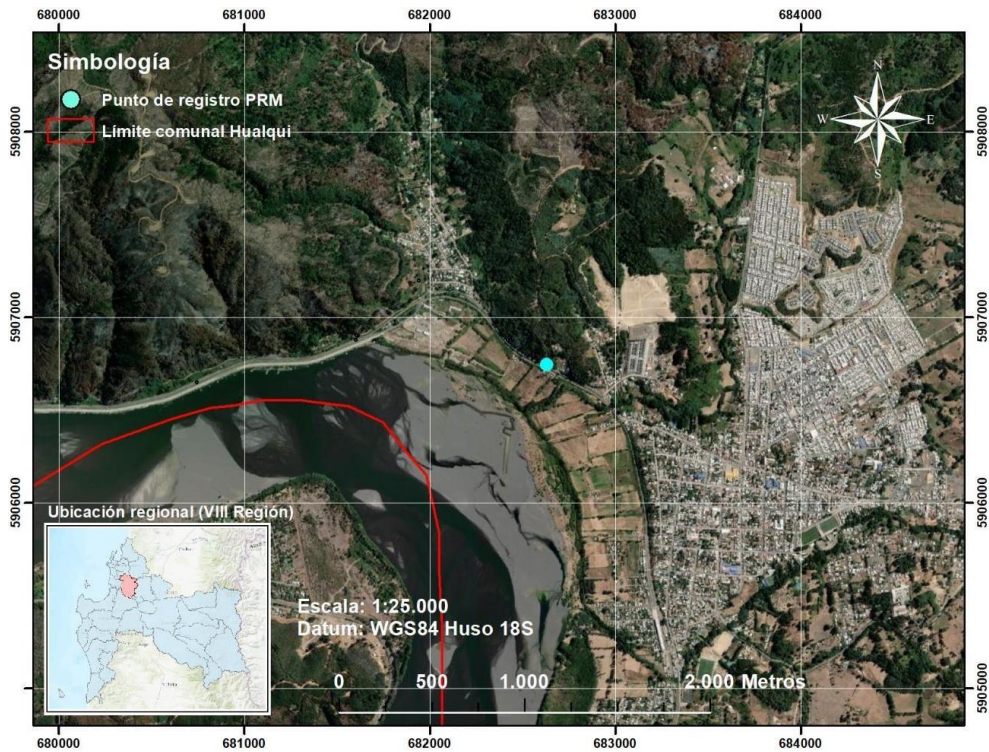
En un l...
midor de...
suelos d...
de la em...
dirigente...
gremio, ...
negociac...
El cont...
de negoc...
dó que e...
"conside...
benefici...
presa a...
se fijó p...
Asimi...
no de n...
julio, v...

Derrumbe en Periquillo

- El reblandecimiento del terreno a causa de las intensas lluvias de la semana pasada provocaron, una vez más, el derrumbe del cerro ubicado junto al camino en el sector de Periquillo a la entrada de Hualqui. El riesgo de accidentes en esta ruta, tal como se observa en la fotografía, ha aumentado considerablemente a causa de la obstrucción de la mitad de la calzada con tierra y lodo.

Se r...
Ser...
tadi...
pide...
una...
Lisc...
das...
vas...
ope...
El...
tér...
me...
La...
lo...
pia...
cu...
mu...

Ubicación aproximada



Ficha de Inventario de Procesos de Remociones en Masa en el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile basado en Prensa Local.

Tipo de Remoción en Masa	Deslizamiento de tierra
Fecha de ocurrencia	20 de julio de 1994
Fecha de publicación	21 de julio de 1994
Factor desencadenante	Lluvia intensa
Intensidad pp. o magnitud sismo	13,9mm de lluvia en período ininterrumpido previo a reporte en el diario
Ubicación relativa	Sector Periquillo
Fuente de información (URL, etc.)	https://drive.google.com/file/d/13BuPjkVPw094Y29I5tgWddl75dYC5utM/view?usp=sharing
Víctimas fatales	No aplica
Desaparecidos	No aplica
Damnificados	No aplica
Infraestructura afectada	Interrupción de tránsito temporal debido a retiro de material de deslizamiento en camino hacia Periquillo
Costo de los daños	No calculado
Otros datos	Registro se relaciona con aumento considerable de caudal del río Biobío debido a intensa lluvia
Imagen de la noticia	

enches
obío
or
i

zona donde
7.52 metros

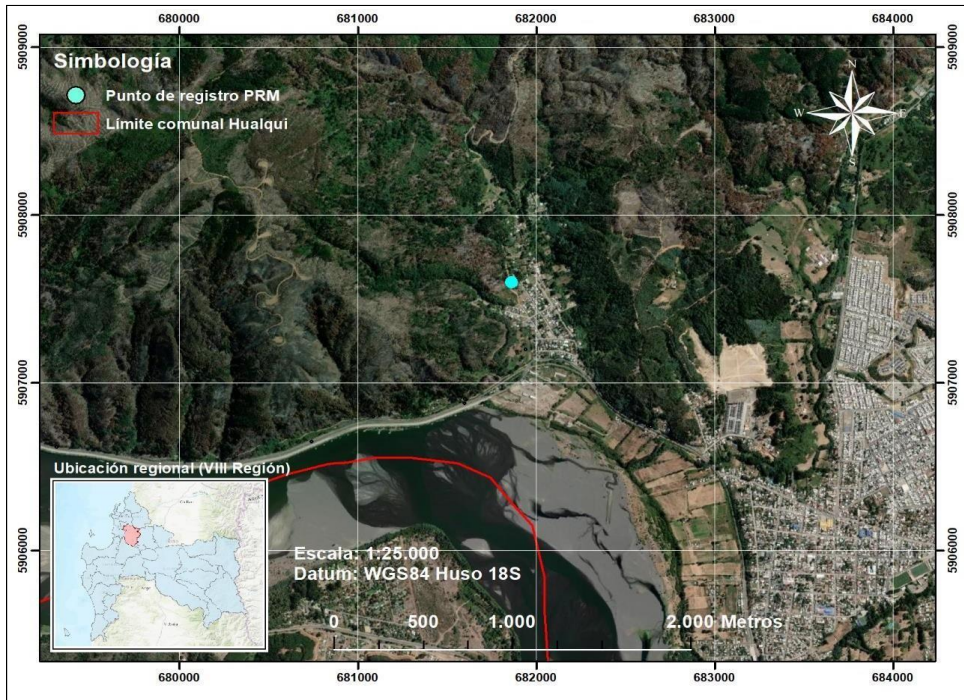
nal tiempo,
aisiadas por el
m perdidos sus
a.
Hualqui, sector
mbe de tierra,
lad a trabajar
t vía.
oyó ayer el río
aumentado el
diendo. El año
mo fue de 8.58
ría a todos los
serías, espe-
es costaneras
canzaron 13.9
y que se llega
ros y un défi-
rma a la fe-
gína 11.



En el sector Periquillo, de Hualqui, un derrumbe obligó a personal de Vialidad a trabajar en el despeje de la vía en horas de la tarde de ayer. En este sitio se registra permanentemente este problema, debido a lo blando del terreno que cede ante las primeras lluvias fuertes, como ocurrió en las últimas horas.

Chilenses residentes la cesan en Suiza El día miércoles

Ubicación aproximada



Ficha de Inventario de Procesos de Remociones en Masa en el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile basado en Prensa Local.

Tipo de Remoción en Masa	Caída de rocas
Fecha de ocurrencia	21 de julio de 1994
Fecha de publicación	22 de julio de 1994
Factor desencadenante	Lluvia intensa
Intensidad pp. o magnitud sismo	No especifica
Ubicación relativa	Cuesta Quilacoya
Fuente de información (URL, etc.)	https://drive.google.com/file/d/1NKqM-HeQAi7hjG7JQZLd8-9MnWvEGJRg/view?usp=sharing
Víctimas fatales	No aplica
Desaparecidos	No aplica
Damnificados	No aplica
Infraestructura afectada	Daño al camino de la cuesta Quilacoya, que cedió parte de su vía debido al suceso
Costo de los daños	No calculado
Otros datos	Tráfico de vehículos en la cuesta siguió aún estando limitado debido a la estrechez del camino
Imagen de la noticia	

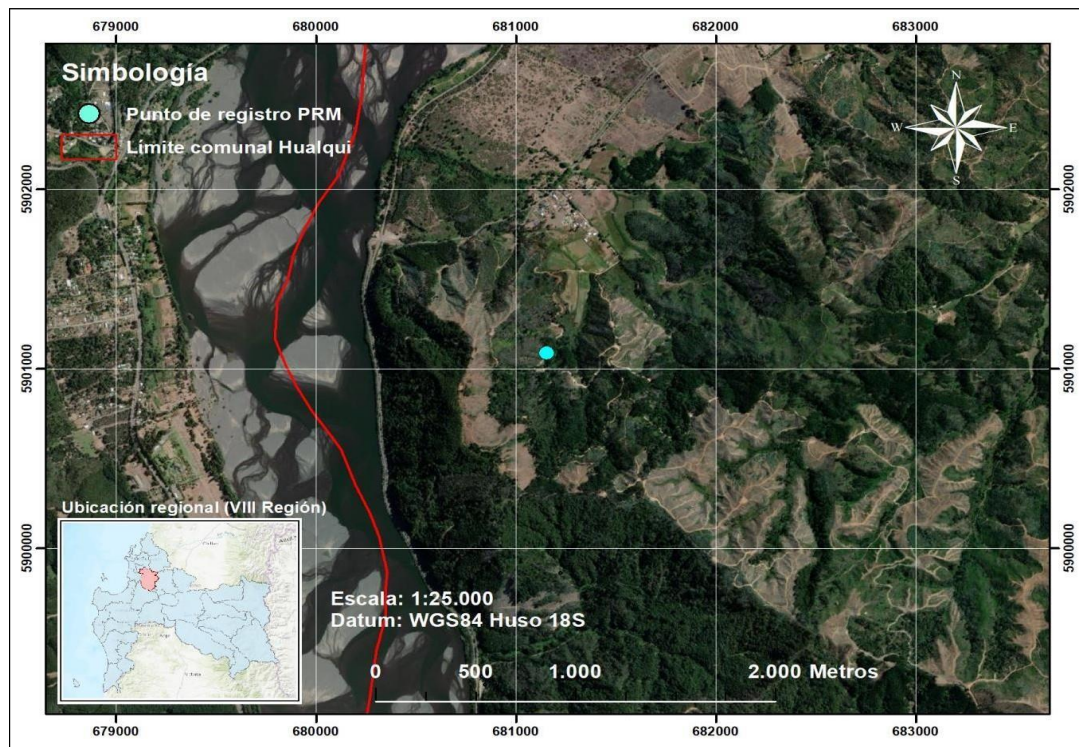
EL SUR - Concepción, viernes 22 de julio de 1994

Peligro en Cuesta Quilacoya

• En un verdadero peligro se ha convertido el camino Hualqui-Quilacoya a la altura de la cuesta del mismo nombre. Las últimas lluvias han reblandecido el terreno, cortando la ruta en tres tramos muy peligrosos, como se observa en la fotografía. Vialidad ha estado realizando trabajos de mantenimiento en el sector, pero la estrechez del camino obliga a los conductores a tomar debidas precauciones para evitar accidentes con graves consecuencias.



Ubicación aproximada

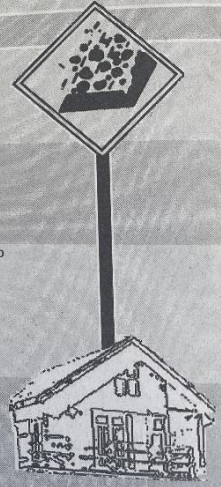


Ficha de Inventario de Procesos de Remociones en Masa en el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile basado en Prensa Local.

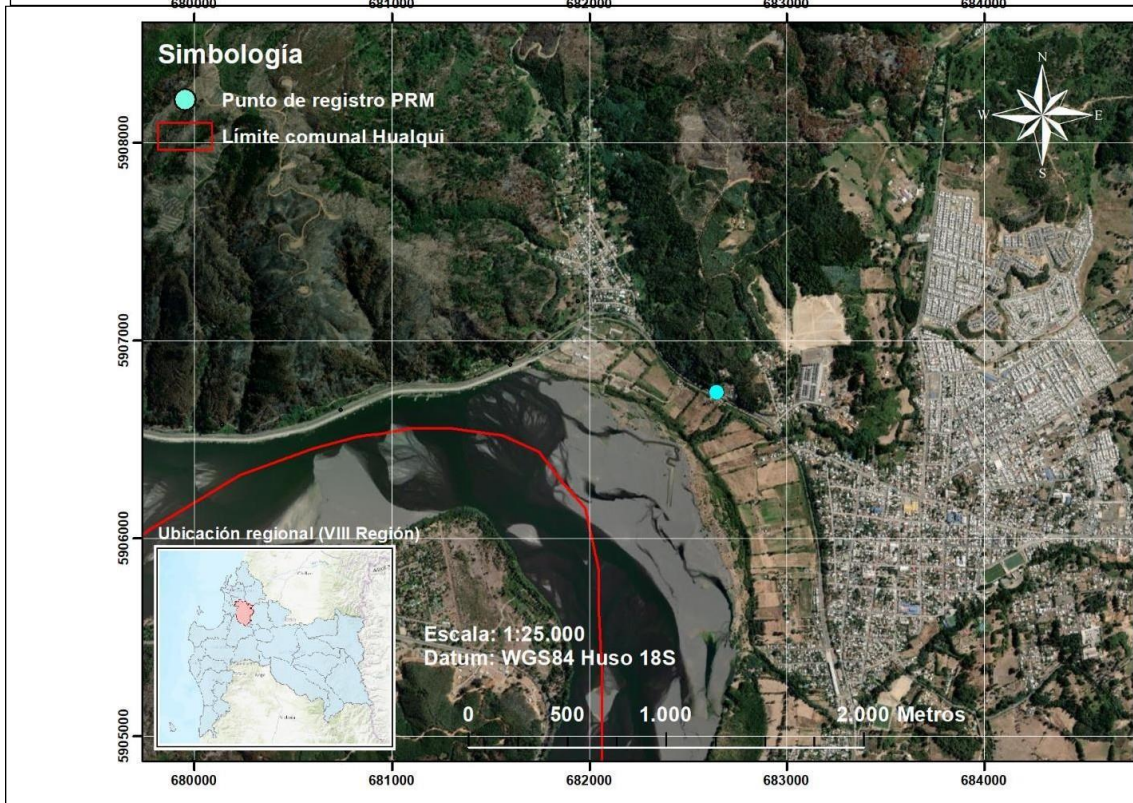
Tipo de Remoción en Masa	Deslizamiento de tierra
Fecha de ocurrencia	30 de julio de 1997
Fecha de publicación	31 de julio de 1997
Factor desencadenante	Lluvia intensa
Intensidad pp. o magnitud sismo	No especifica
Ubicación relativa	Línea férrea ribera norte Biobío
Fuente de información (URL, etc.)	https://drive.google.com/file/d/1ChHE6nYV6H4PtB VIZUEEVBSGu44LCBve/view?usp=sharing
Víctimas fatales	No aplica
Desaparecidos	No aplica
Damnificados	No aplica
Infraestructura afectada	Línea férrea fue desplazada hacia el río Biobío debido a deslizamiento
Costo de los daños	No estimado
Otros datos	
Imagen de la noticia	

Barro y más barro

Fecha	Comuna	Sector	Consecuencias
12.06	Tomé	Cerro Alegre	60% de vivienda inutilizada
16.06	Concepción	Conjunto Vicente Palacios	16 casas anegadas con barro
18.06	Concepción	Calle Malaquías Concha Valle Nonguén Villuco	Anegamiento con barro 2 casas con peligro de derrumbe Camino cortado por deslizamiento de tierra
19.06	Concepción	Pedro de Valdivia 195	Colada de barro inundó avenida
20.06	Chiguayante	Villa San Marcos Población Papen 1 y 2 Población La Rivera	Aisladas por derrumbes de tierra
21.06	Chiguayante	Población Valle del Sol	40 metros de cerro se desplomaron en patio de casas
22.06	Chiguayante	Población Valle del Sol	Se agravó situación. Familias desalojadas
24.06	Tomé	Caleta Cocholgüe	5 casas con daños mayores por resquebrajamiento de cerro
25.06	Concepción	Palomares	Calles recién pavimentadas cubiertas por capa de barro
7.07	Concepción	Pedro de Valdivia 195	Colada de barro inhabilitó dos viviendas
28.07	Concepción	Pedro de Valdivia 195	El mismo fenómeno cortó el tránsito en avenida
29.07	Concepción	Agüita de la Perdiz	5 familias damnificadas por deslizamiento de tierra
30.07	Concepción	Cerro La Pólvora Agüita de la Perdiz Palomares	12 derrumbes en distintos puntos provocaron un muerto, 40 albergados y cortes de tránsito.
30.07	Hualqui	Ribera norte del Biobío	Derrumbe del terraplén dejó bajo el agua la vía férrea
2.08	Talcahuano Concepción	Denavi Sur Agüita de la Perdiz Cerro La Pólvora Palomares Pedro de Valdivia 195	3 viviendas afectadas por derrumbe de cerro Peligro de deslizamiento de tierra y barro.



Ubicación aproximada



Ficha de Inventario de Procesos de Remociones en Masa en el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile basado en Prensa Local.

Tipo de Remoción en Masa	Deslizamiento de tierra
Fecha de ocurrencia	29 de julio de 1997
Fecha de publicación	1 de agosto de 1997
Factor desencadenante	Lluvia intensa
Intensidad pp. o magnitud sismo	No especifica
Ubicación relativa	Cuesta Quilacoya
Fuente de información (URL, etc.)	https://drive.google.com/file/d/1T6rShUu41irGE-EIvZBEDRCYOYF8rsRE/view?usp=sharing
Víctimas fatales	No aplica
Desaparecidos	No aplica
Damnificados	No aplica
Infraestructura afectada	Sector de la cuesta Quilacoya tuvo que ser intervenida con maquinaria para remover material
Costo de los daños	No estimado
Otros datos	En el reporte se menciona polémica gubernamental sobre temas de vialidad en la comuna de Hualqui, por falta de coordinación
Imagen de la noticia	

Tránsito restringido entre Hualqui y Quilacoya

Derrumbe desata polémica de Vialidad y alcalde Galán

• Servicio de OO.PP. se queja por falta de colaboración del municipio. Jefe comunal, Renato Galán, desestimó esta crítica y acusó a Vialidad de falta de coordinación para reparar caminos secundarios

La Municipalidad de Hualqui está preocupada sólo de pedir y de criticar, pero no de cooperar en las soluciones viales, afirmó el director regional de Vialidad Egon Wolff.

Indicó que la situación no se da en otras comunas de la región, las que además de solicitar la reparación de un camino específico, se comprometen a proporcionar un camión o a disponer de otro tipo de recursos para facilitar la tarea.

Puntualizó que Vialidad está permanentemente preocupada de mantener un tránsito óptimo tanto en la Cuesta Quilacoya, que une a la localidad de ese mismo nombre con Hualqui, como en la vía alternativa que va por el sector de Chillancito.

Agregó que los últimos dos derrumbes en la cuesta Quilacoya se produjeron el lunes y miércoles, despejándose la vía en forma inmediata, de modo, que en ningún momento existió un aislamiento del sector.

Añadió que en la ruta alternativa a Quilacoya, por Chillancito, lo que hubo fue una inundación producto de la crecida de un río que es afluente del Biobío. Precisó que mejorando las condiciones climáticas se iniciarán las reparaciones que corresponda.

Falta coordinación

El alcalde de Hualqui, Renato Galán, en tanto, sostuvo que falta coordinación con Vialidad para realizar los trabajos de la red secundaria de

caminos que interesan al municipio.

Sostuvo que nunca ese organismo público, ha consultado a las autoridades comunales sobre los caminos rurales que "para nosotros es prioritario mantener en buenas condiciones".

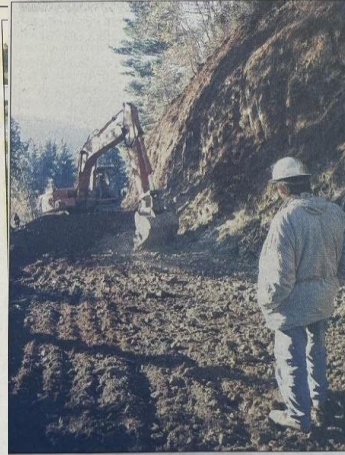
Como ejemplo, indicó que el próximo jueves, el Concejo Municipal realizará una sesión especial a la que asistirán autoridades de la dirección provincial de Vialidad, para conocer, recién, los proyectos que ejecutará ese organismo en la red secundaria vial de Hualqui, donde se invertirán casi mil millones de pesos.

El edil desestimó las críticas de falta de cooperación hechas por Egon Wolff y sostuvo que su municipio ha intentado sostener, siempre, un contacto con la Dirección de Vialidad.

"Sin embargo, puntualizó, nunca hemos encontrado la acogida esperada".

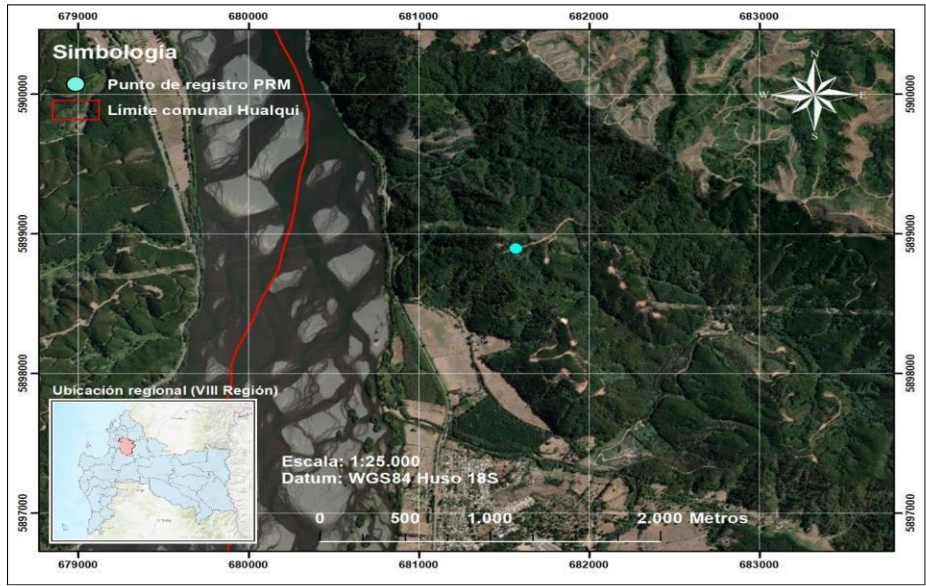
Añadió que ayer se encontraban trabajando, en la habilitación de las rutas afectadas por el mal tiempo, personal municipal y de Vialidad, por lo que "el señor Wolff debió estar mal informado cuando afirmó que no existe cooperación por parte nuestra".

Por último, Galán informó que el municipio, mediante decreto, restringió el tránsito de camiones con un peso superior a las ocho toneladas por la Cuesta Quilacoya y por la vía alternativa de Chillancito, medida que se mantendrá hasta el 15 de octubre.



Nuevamente la Cuesta Quilacoya presentó problemas con las últimas lluvias. Personal de Vialidad trabaja en el lugar para mantener habilitada la ruta que une a la localidad de ese mismo nombre con Hualqui.

Ubicación



Ficha de Inventario de Procesos de Remociones en Masa en el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile basado en Prensa Local.

Tipo de Remoción en Masa	Deslizamiento de tierra
Fecha de ocurrencia	29 de julio de 1997
Fecha de publicación	31 de julio de 1997
Factor desencadenante	Lluvia intensa
Intensidad pp. o magnitud sismo	No especifica
Ubicación relativa	Cuesta Quilacoya/línea férrea
Fuente de información (URL, etc.)	https://drive.google.com/file/d/1dP6LbV3yEmegDqO4-pey_De06OJuMYVe/view?usp=sharing
Víctimas fatales	No aplica
Desaparecidos	No aplica
Damnificados	No aplica
Infraestructura afectada	Línea férrea de servicio EFE Concepción-Santiago
Costo de los daños	No estimado
Otros datos	Se menciona que 2 mil personas podían quedar aisladas en los sectores de Quilacoya, Unihue y Talcamávida por temporal
Imagen de la noticia	

EL SUR - Concepción, Jueves 31 de Julio de 1997

I N T E R C O

EFE reanudó anoche servicio a Santiago

Derrumbe afectó a camino y a vía férrea en Hualqui

Un derrumbe en la cuesta Quilaco-ya, que une a Hualqui con la localidad del mismo nombre, interrumpió el tráfico de Ferrocarriles Concepción-Santiago.

El problema, registrado cerca de las 16 horas del martes, obligó a la Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE) a disponer de servicios de buses para trasladar a sus usuarios hasta Chillán, lugar desde el que reanuda el servicio.

Alejandro Guzmán, jefe del Servicio Regional de Pasajeros de EFE, explicó que los técnicos de la empresa lograron habilitar anoche la vía que rosó la cubierta por el deslizamiento de tierra.

Los trabajadores repararon la línea que salió de su curso natural e intentaban reponer el tendido eléctrico que surge de energía eléctrica a las máquinas. Explicó que esta última tarea demorará más y que, mientras tanto, se usará una locomotora diesel en el tramo en que no hay electricidad.

Camino

En la comuna de Hualqui, en tanto, la directora de la Oficina de Emergencia, Clara Canales, explicó que el derrumbe ocurrió justo en la base de la cuesta Quilaco-ya. La situación no sólo afectó la vía férrea, sino que debilitó el camino que usan vehículos menores y la locomoción colectiva.

Agregó que ésta es, por ahora, la única alternativa que permite el contacto con unas dos mil personas en Quilaco-ya, Talcahuán, Unihue y otros poblados menores. El otro acceso, por la ruta San Onofre-Chillico-Quilaco-ya, está interrumpido en dos partes por derrumbe y desborde del río Quilaco-ya.

Padro Lillo, de la Dirección Provincial de Viabilidad, manifestó que el organismo acudió a la cuesta el mismo martes y que dispone de maquinaria y personal capacitado para atender la emergencia.

Hacia solo dos semanas que la cuesta se había entregado al tránsito, luego de trabajos de ensanche que facilitarían el paso de vehículos en caso de derrumbes, situación que ocurre todos los inviernos.

En cuanto al acceso alternativo a las áreas rurales de la comuna de Hualqui, dijo que esperarían hoy que baje el río Quilaco-ya para habilitar el camino por Chillanco.

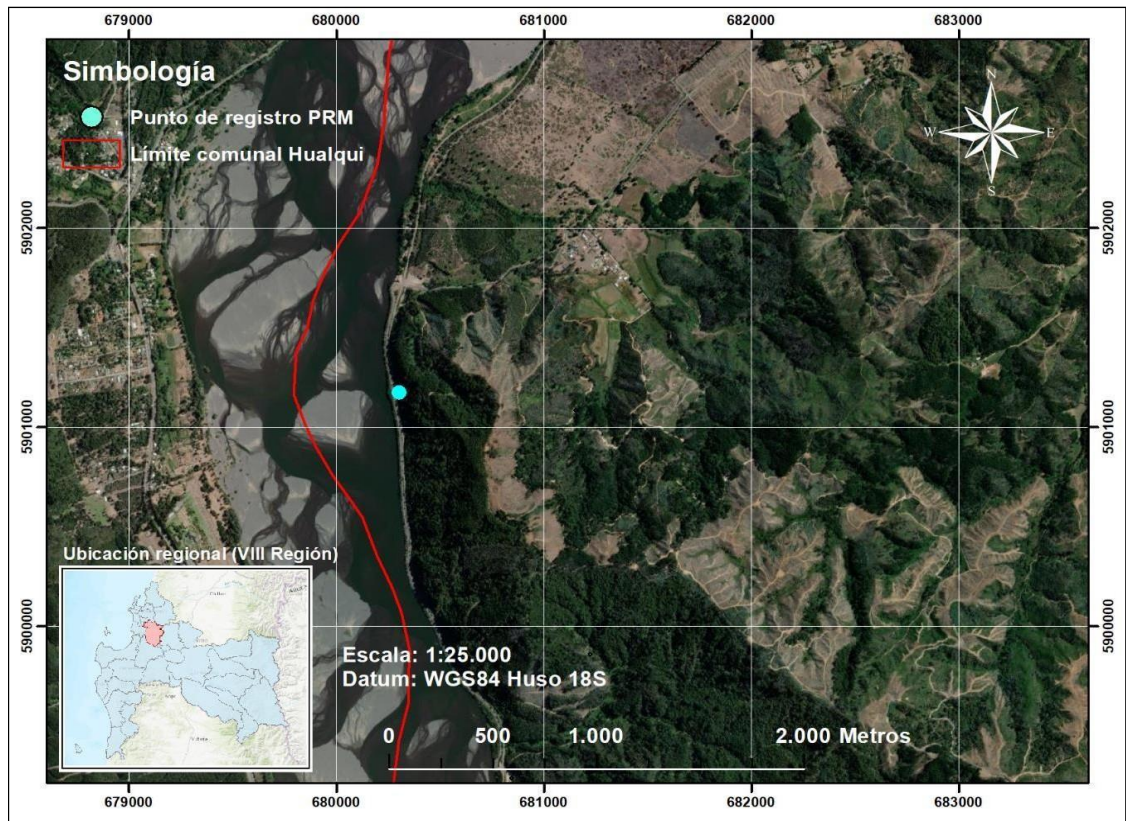
Int E

La que da del drá cinc tida solo retil ras una Mut gúit arte liza toz El pue da f es si ada

Frete a la denominada cuesta Quilaco-ya se produjo el derrumbe que interrumpió ayer el tráfico ferroviario entre Santiago y Concepción. Trabajadores de EFE terminaron anoche de despejar la vía.



Ubicación aproximada



Ficha de Inventario de Procesos de Remociones en Masa en el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile basado en Prensa Local.

Tipo de Remoción en Masa	Deslizamiento de tierra
Fecha de ocurrencia	17 de agosto de 1997
Fecha de publicación	18 de agosto de 1997
Factor desencadenante	Lluvia intensa
Intensidad pp. o magnitud sismo	No especifica
Ubicación relativa	Línea férrea Hualqui-Quilacoya
Fuente de información (URL, etc.)	https://drive.google.com/file/d/1btDJW3H3WBnylau_crlzHWxehgVCBjriD/view?usp=sharing
Víctimas fatales	No aplica
Desaparecidos	No aplica
Damnificados	No aplica
Infraestructura afectada	Línea férrea entre Hualqui y Quilacoya fue cortada por unas horas para remover material
Costo de los daños	No estimado
Otros datos	No aplica
Imagen de la noticia	

cuadas de
anecen en
el alber-
o Munic-

litaría un
cia en el
donde se
as: 12 de
Cerro La
evantarán
cios bás-

es afecta-
rehusaban
, como lo
des muni-
sivos des-
decidieron
sladándo-
o a casas

ente tuvo
divia a la
hace va-

En otras ciudades

En otros puntos de la región el temporal también se hizo sentir, aunque no con la fuerza de los anteriores frentes. En Talcahuano sólo hubo una familia damnificada por un derrumbe que destruyó parcialmente su vivienda en el Cerro La Gloria.

La situación en San Pedro no fue grave, según informó el alcalde Jaime Soto, quien indicó que sólo se registraron inundaciones en los sectores de Lomas Coloradas y Michaihue. En este último una familia resultó damnificada.

En Coronel, la Caleta Maule volvió a sufrir las inclemencias del tiempo y las familias que viven a la orilla del mar debieron ser evacuadas debido a las fuertes marejadas.

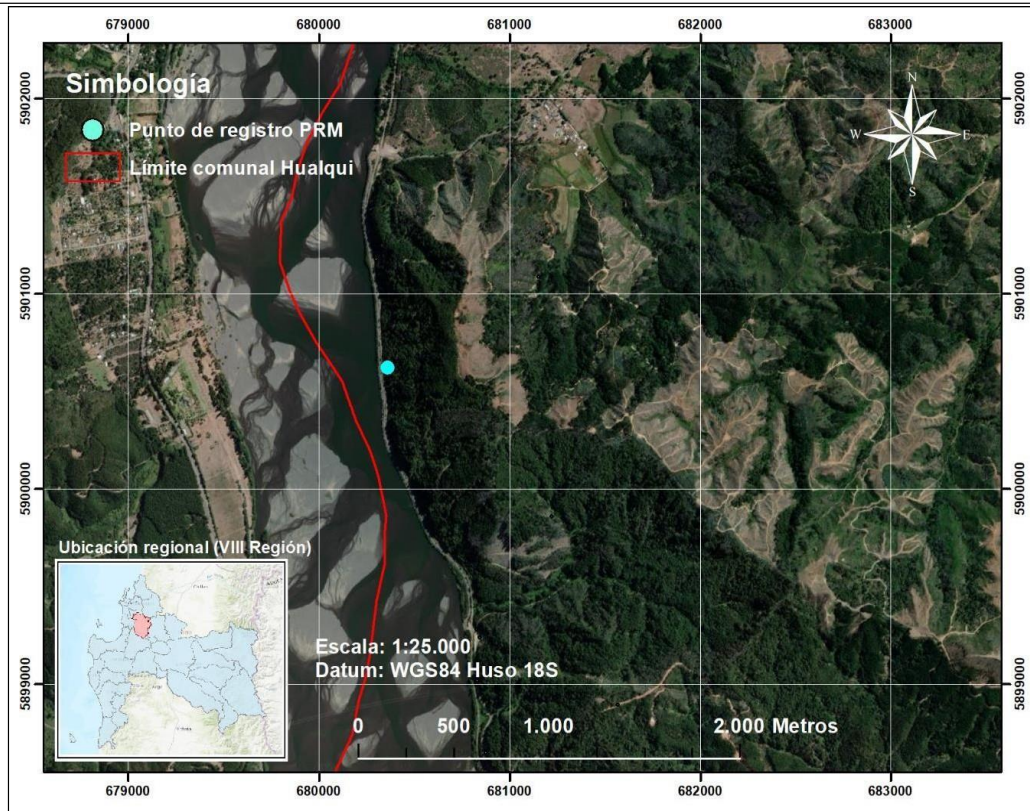
En Hualqui, la situación no pasó a mayores y sólo se produjo la interrupción, por algunas horas, de la línea férrea entre Hualqui y Quilacoya.



En Ag...
dejand...
cubiert...

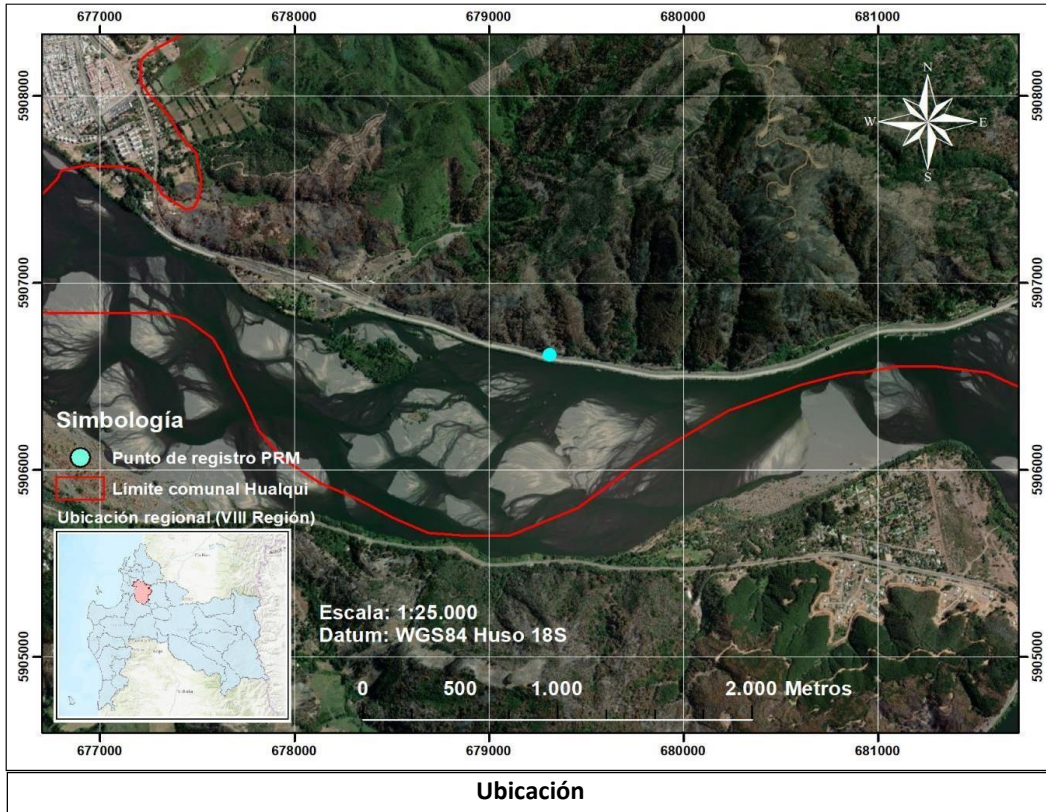
Meteorología de...
que el agua caía...
ras alcanzaba a...
un total acumul...

Ubicación aproximada



Ficha de Inventario de Procesos de Remociones en Masa en el Área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío, Chile basado en Prensa Local.

Tipo de Remoción en Masa	Deslizamiento de tierra
Fecha de ocurrencia	19 de agosto de 1999
Fecha de publicación	21 de agosto de 1999
Factor desencadenante	Lluvia intensa
Intensidad pp. o magnitud sismo	No especifica
Ubicación relativa	Línea férrea entre Chiguayante y Hualqui
Fuente de información (URL, etc.)	https://drive.google.com/file/d/1t3yXRSL2X1VfZ15oXKDF4b3XQApe34gs/view?usp=sharing
Víctimas fatales	No aplica
Desaparecidos	No aplica
Damnificados	No aplica
Infraestructura afectada	Línea férrea entre Hualqui y Chiguayante fue cortada más de 24 horas para remover material
Costo de los daños	No estimado
Otros datos	No aplica
Imagen de la noticia	



11.3 Registros de PRM en Hualqui, terreno del 2 de febrero, 2023

<p>Deslizamiento de tierra cerca de Periquillo</p>	<p>Flujo de barro en sector Los Placeres</p>
	
<p>Deslizamiento de tierra en sector La Leonera</p>	<p>Deslizamiento de tierra en sector Los Placeres</p>
	
<p>Deslizamiento de tierra en sector Los Placeres</p>	<p>Deslizamiento de tierra en sector La Leonera</p>



Caída de rocas en sector La Leonera



Flujo de barro en sector La Leonera



Deslizamiento de tierra en sector Unihue



Deslizamiento de tierra en cruce Las Higueras



Deslizamiento de tierra (múltiple debido a escarpes realizados en obras de la ruta O-60) en cruce Las Higueras



Flujo de barro cerca del sector Las Higueras



Deslizamiento de tierra cerca del sector Las Higueras



Deslizamiento de tierra en la ruta O-722, camino sector Bulnes



Deslizamiento de tierra en sector Bulnes

Deslizamiento de tierra en sector Bulnes, ruta O-718



Caída de rocas en sector Chillancito



Deslizamiento de tierra en sector Chillancito



Deslizamiento de tierra en sector Chillancito



Deslizamiento de tierra en sector Chillancito



Caída de rocas en sector Chillancito



Deslizamiento de tierra en sector Chillancito



Deslizamiento de tierra en ruta 0-722, sector Bulnes



Flujo de barro en sector Maqueuto



Flujo de barro en sector Maqueuto



Caída de rocas en sector Maqueuto



Deslizamiento de tierra en sector Maqueuto



Caída de rocas en sector Maqueuto



Deslizamiento de tierra en sector Maqueuto



Deslizamiento de tierra en sector Maqueuto



Deslizamiento de tierra en sector Maqueuto



Flujo de detritos en sector Maqueuto



**Deslizamiento de tierra entre los sectores
Paso de Piedra/Maqueuto**



Deslizamiento de tierra en sector Redolino



Deslizamiento de tierra en sector Lo Vargas



Flujo de barro en sector Lo Vargas

	
<p>Flujo de barro en sector El Águila</p>	<p>Flujo de barro en sector El Águila</p>
	
<p>Deslizamiento de tierra en línea férrea Hualqui-Chiguayante</p>	<p>Deslizamiento de tierra en línea férrea Hualqui-Chiguayante</p>



Fuente: elaboración propia en terreno.