



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A
PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA PARA LA
LOCALIDAD DE COCHOLGÜE, REGIÓN DEL BIOBÍO,
CHILE**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Mauro Ignacio Castillo Carmona

Profesor Patrocinante: Dr. Jorge Andrés Quezada Flory
Profesores Comisión: Prof. Ramiro Ulises Bonilla Parra
Dr. José Luis Palma Lizana

Concepción, 2021



A mi familia y seres queridos...

ÍNDICE

Página

RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Ubicación y accesos	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Clima	3
1.4. Geomorfología	4
1.4.1. Generalidades	4
1.4.2. Geomorfología regional y local	5
1.5. Trabajos anteriores	7
1.6. Agradecimientos	9
2. MARCO GEOLÓGICO	10
2.1. Rocas metamórficas	11
2.1.1. Basamento Metamórfico	11
2.2. Rocas intrusivas	12
2.2.1. Batolito Costero del Sur	12
2.2.2. Plutón Hualpén	12
2.3. Rocas estratificadas	13
2.3.1. Formación Quiriquina	13
2.3.2. Formación Cosmito	13
2.3.3. Formación Andalién	14
2.4. Depósitos no consolidados	14
2.4.1. Depósitos fluviales y litorales	14
3. MARCO TEÓRICO	16
3.1. Terminología	16
3.2. Tipos de remociones en masa	17
3.2.1. Caídas o desprendimientos	18

3.2.2. Volcamientos o topples	19
3.2.3. Deslizamientos	20
3.2.4. Flujos	21
3.2.5. Extensiones laterales	22
3.3. Factores condicionantes	23
3.3.1. Geología	23
3.3.2. Topografía	24
3.3.3. Factor antropogénico	25
3.4. Factores desencadenantes	26
3.4.1. Precipitaciones	26
3.4.2. Sismos	26
3.4.3. Actividad antropogénica	27
4. METODOLOGÍA	28
4.1. Evaluación de la susceptibilidad a remociones en masa	28
4.1.1. Método de ponderación de mapas temáticos	28
4.1.1.1. Selección de los factores condicionantes.....	29
4.1.1.2. Preparación de los mapas temáticos.....	30
4.1.1.3. Reclasificación de factores condicionantes.....	31
4.1.1.4. Determinación de ponderaciones para cada factor condicionante.....	32
4.1.1.5. Validación del mapa de susceptibilidad.....	33
4.2. Evaluación del peligro frente a remociones en masa	34
4.2.1. Estimación de la probabilidad temporal de ocurrencia de remociones en masa	34
4.2.1.1. Selección del factor desencadenante.....	34
4.2.1.2. Determinación de umbrales críticos.....	35
4.2.1.3. Modelo de probabilidad de Poisson en el cálculo de la probabilidad temporal de ocurrencia de remociones en masa.....	35
4.2.1.4. Análisis del peligro frente a remociones en masa.....	36
5. RESULTADOS	37
5.1. Análisis de susceptibilidad	37

5.1.1. Antecedentes de los factores condicionantes.....	37
5.1.1.1. Factores geotécnicos.....	37
5.1.1.2. Factores topográficos.....	44
5.1.1.3. Factor antropogénico.....	45
5.1.2. Mapas temáticos reclasificados.....	47
5.1.2.1. Mapa litológico.....	47
5.1.2.2. Mapa de proximidad a estructuras.....	47
5.1.2.3. Mapa de elevación.....	50
5.1.2.4. Mapa de pendientes.....	50
5.1.2.5. Mapa de forma de laderas.....	50
5.1.2.6. Mapa de usos de suelo.....	54
5.1.3. Mapa de susceptibilidad.....	54
5.2. Análisis de peligro.....	57
5.2.1. Probabilidad temporal de ocurrencia de remociones en masa.....	57
5.2.2. Evaluación del peligro frente a remociones en masa.....	58
6. DISCUSIÓN.....	59
6.1. Discusión global análisis de susceptibilidad.....	59
6.1.1. Validación mapa de susceptibilidad.....	59
6.1.2. Importancia de factores condicionantes.....	60
6.2. Discusión global análisis de peligro.....	64
6.2.1. Umbral crítico y probabilidades de excedencia.....	64
6.2.2. Proyección futura: Cambio climático, variaciones en las precipitaciones y remociones en masa.....	64
7. CONCLUSIONES.....	68
REFERENCIAS.....	70
ANEXO A: PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP).....	77
ANEXO B: FOTOGRAFÍAS DE REMOCIONES EN MASA.....	81
ANEXO C: MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1	Mapa de ubicación del área de estudio..... 2
Figura 1.2	Precipitaciones y temperaturas promedio mensuales periodo 2000-2020..... 4
Figura 1.3	Perfiles topográficos de áreas urbanizadas en la localidad de Cocholegüe..... 6
Figura 2.1	Mapa geológico de la parte norte del Gran Concepción..... 10
Figura 3.1	Esquemas de caídas o desprendimientos en distintos tipos de materiales..... 19
Figura 3.2	Esquemas de volcamientos o topples en distintos tipos de materiales..... 20
Figura 3.3	Esquemas de los tipos de deslizamientos..... 21
Figura 3.4	Esquemas de flujos en distintos tipos de materiales..... 22
Figura 3.5	Esquemas de extensiones laterales en distintos tipos de materiales..... 22
Figura 4.1	Diagrama de flujo del análisis de susceptibilidad..... 29
Figura 5.1	Mapa litológico de Cocholegüe..... 38
Figura 5.2	Contacto entre Basamento Metamórfico y Fm. Quiriquina..... 39
Figura 5.3	Afloramientos debilitados en Fm. Quiriquina..... 40
Figura 5.4	Mapa estructural de Cocholegüe..... 41
Figura 5.5	Falla normal en Cocholegüe..... 42
Figura 5.6	Estructuras con desplazamientos apreciables..... 42
Figura 5.7	Diagrama de roseta para las fallas medidas en terreno..... 43
Figura 5.8	Mapas temáticos derivados del DEM confeccionado..... 45
Figura 5.9	Mapa de usos de suelo..... 46
Figura 5.10	Mapa litológico reclasificado..... 48
Figura 5.11	Mapa de proximidad a estructuras reclasificado..... 49
Figura 5.12	Mapa de elevación reclasificado..... 51
Figura 5.13	Mapa de pendientes reclasificado..... 52
Figura 5.14	Mapa de forma de laderas reclasificado..... 53
Figura 5.15	Mapa de usos de suelo reclasificado..... 55
Figura 5.16	Mapa de susceptibilidad del área de estudio..... 56
Figura 6.1	Remociones en masa en mapa de susceptibilidad ponderado..... 59
Figura 6.2	Representación gráfica del número de eventos por unidad de superficie por mapa temático..... 60
Figura 6.3	Tipos de remociones en masa más frecuentes en el área..... 62
Figura 6.4	Caída de roca asociada a factores estructurales..... 62
Figura 6.5	Perfiles topográficos mostrando laderas plano-cóncavas asociadas a áreas urbanizadas..... 63
Figura 6.6	Cicatriz de deslizamiento rotacional ocurrida durante acontecimientos del 26 y 27 de junio de 2005..... 64
Figura 6.7	Deslizamientos producidos durante los acontecimientos del 9 al 11 de julio de 2006..... 65

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 3.1	Clasificación de remociones en masa según algunos de los parámetros más comunes.....	18
Tabla 4.1	Escala de niveles de susceptibilidad según factor condicionante.....	31
Tabla 4.2	Escala de Saaty.....	32
Tabla 4.3	Matriz de comparación de a pares.....	33
Tabla 5.1	Periodos en los cuales fue superado el umbral crítico.....	57
Tabla 5.2	Probabilidades de excedencia calculadas.....	58



RESUMEN

Se realiza un análisis de susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa para la localidad de Cocholegüe, considerando seis factores condicionantes: litología (tipo de roca y características geomecánicas), proximidad a estructuras (referido a fallas), elevación, pendiente, forma de laderas y usos de suelo. Los resultados del análisis, son representados en un mapa de susceptibilidad escala 1:8.000, en donde se zonifica el área de estudio en regiones con distintos grados de susceptibilidad. La elaboración del mapa, se realiza a partir de la ponderación de mapas temáticos para cada uno de los factores utilizados. Para asignar las ponderaciones relativas a cada factor, es empleado el proceso analítico jerárquico (AHP) como método complementario. Los datos de entrada utilizados, fueron obtenidos directamente de terreno, literatura y como derivados de este mismo trabajo, destacando entre estos últimos, la confección de un modelo de elevación digital (DEM) de alta resolución a partir de un levantamiento fotogramétrico.

Por otra parte, también se efectúa una evaluación preliminar del peligro frente a remociones en masa en la zona, tomando como base el análisis de susceptibilidad descrito anteriormente y las precipitaciones intensas como factor desencadenante principal. En este caso, la evaluación del peligro se llevo a cabo a partir de la estimación de la probabilidad temporal de ocurrencia de remociones en masa, aplicando un modelo de probabilidad de Poisson, habiendo previamente definido un umbral crítico de precipitaciones para la zona. Adicionalmente, se exploran de forma general algunos escenarios futuros respecto a como se modificaría el peligro, considerando las variaciones que experimentarían las precipitaciones producto del cambio climático.

Finalmente, la importancia relativa de los factores condicionantes utilizados en el análisis de susceptibilidad es discutida a partir de la relación espacial existente entre los depósitos de remociones en masa descritos durante el terreno y las zonas de mayor susceptibilidad en el mapa de susceptibilidad ponderado (y en cada uno de los mapas temáticos). Estas observaciones, además son contrastadas con la información recopilada durante el trabajo de campo. De esta forma, se establece que los factores de pendiente y litología son los que tienen una mayor influencia local. Respecto a la evaluación del peligro, tanto el umbral crítico como las probabilidades de excedencia calculadas, son comparadas con los eventos de remociones en masa gatillados por precipitaciones que describen los informes técnicos del área. Así, los datos muestran que el umbral utilizado sirve como un primer acercamiento, pero que aun es necesario definir una cifra más específica para el sector.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de remoción en masa son fenómenos gravitacionales de movilización lenta o rápida de un determinado volumen de suelo, roca o ambos, en distintas proporciones, con velocidades variables, a lo largo de un talud. Constituyen las manifestaciones morfodinámicas más frecuentes en la inestabilidad de las laderas. Entre los factores internos más importantes que contribuyen a generar estos fenómenos, se encuentran: características litológicas (tipo de roca, grado de meteorización, permeabilidad), características estructurales (presencia de diaclasas y/o fallas), los rasgos morfológicos del relieve (topografía, pendientes, altura) y la densidad de la cobertura vegetal (Mardones y Rojas, 2012). Estos procesos, se clasifican de acuerdo al tipo de movimiento y al material involucrado (Cruden y Varnes, 1996; González de Vallejo y Ferrer, 2011; Hungr y otros, 2014), por ejemplo, caídas de roca, deslizamientos de suelo o flujos de detritos.

Cocholgue, no está exento de la ocurrencia de este tipo de eventos. La tónica general en este sector es la presencia de rocas sedimentarias fracturadas, alto grado de erosión marina y afloramientos con paredes de alto ángulo. El resultado, es la ocurrencia de una gran cantidad de eventos de remoción en masa, los cuales han ocurrido a lo largo del tiempo en dicho lugar, dejando como evidencia numerosos depósitos asociados. Por otro lado, es sabido que tanto los terremotos como las precipitaciones muy intensas constituyen algunos de los factores detonantes más comunes para las remociones en masa (Wieczorek, 1996; González de Vallejo y Ferrer, 2011). En Cocholgue, se podría dar la ocurrencia de ambas situaciones, considerando que la provincia de Concepción tiene un clima mediterráneo (muy lluvioso en invierno) y que Chile es un país altamente sísmico.

Así, se puede inferir que Cocholgue es una zona susceptible y potencialmente peligrosa respecto a los procesos de remoción en masa y por tanto un lugar interesante para su estudio. En este contexto, el presente trabajo propone la realización de un análisis de susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa en esta localidad, mediante la obtención de información litológica, estructural y morfológica en terreno. De este modo, se pretende caracterizar y zonificar el área de estudio en regiones con diferentes niveles de susceptibilidad, representadas en un mapa escala 1:8.000 del área de estudio. Adicionalmente, se realiza una evaluación preliminar del peligro con base en la relación existente entre la recurrencia de estos fenómenos en el tiempo y las precipitaciones como factor desencadenante principal.

1.1. Ubicación y accesos

El área de estudio se ubica en la Región del Biobío, al norte de la ciudad de Tomé, en la localidad de caleta Cocholgüe, comprendiendo la región entre los $36^{\circ}35'00''$ - $36^{\circ}36'40''$ S y $72^{\circ}59'10''$ - $72^{\circ}58'10''$ W aproximadamente, incluyendo los sectores de Caleta Grande, Caleta Chica y Villa Cocholgüe (Figura 1.1). El acceso a la caleta desde Concepción se hace a través de la ruta 150 en dirección hacia el norte.

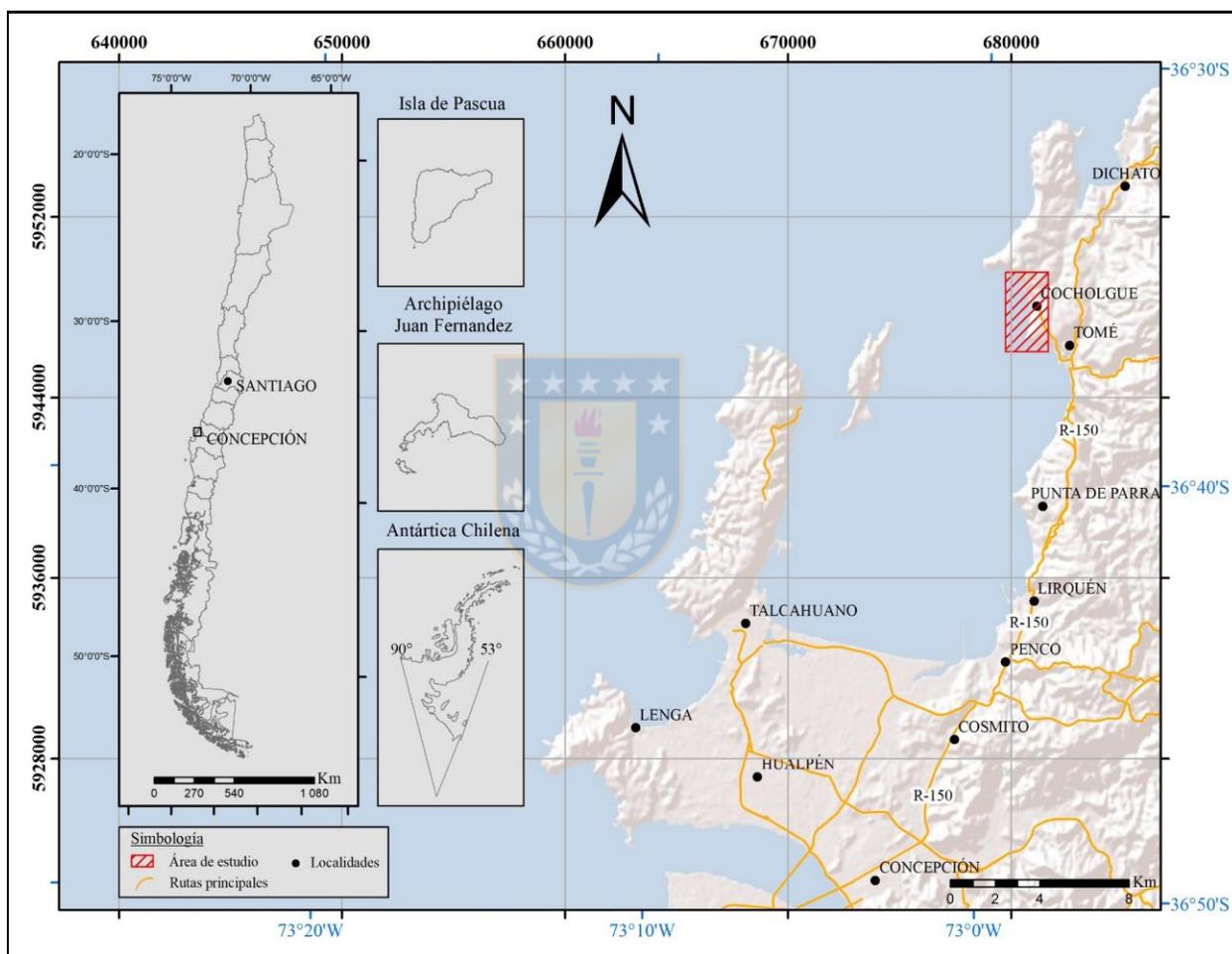


Figura 1.1: Mapa de ubicación del área de estudio. El área de estudio queda aproximadamente 30 km al norte de la ciudad de Concepción por la ruta 150 (R-150).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Determinar la susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa en el área de estudio.

1.2.2. Objetivos específicos

- Reconocer en terreno los diferentes depósitos de remociones en masa presentes en el sector.
- Relacionar la información litológica, estructural y morfológica recopilada en terreno con los procesos de remoción en masa en el área de estudio.
- Identificar la influencia de los diferentes factores condicionantes sobre las remociones en masa de la zona.
- Elaborar un mapa de susceptibilidad geológica escala 1:8.000 del área estudio.
- Evaluar de forma preliminar el peligro geológico con el factor de precipitaciones intensas como desencadenante.
- Evaluar posibles escenarios futuros respecto al peligro frente a remociones en masa.



1.3. Clima

En la Región del Biobío se reconoce una transición desde un clima mediterráneo, predominante en la parte central de Chile, a un clima templado húmedo que prevalece hacia el sur (Muñoz y otros, 2005). Basado en la clasificación de Köppen (1936), la zona costera de la Región del Biobío presenta un clima templado cálido con lluvias invernales y gran humedad atmosférica, caracterizada por inviernos fríos y húmedos, y veranos secos y calurosos, con otoños y primaveras variables tanto en temperaturas como en precipitaciones.

Para la localidad de Cocholgué, los datos de las estaciones meteorológicas Dichato y Estero Bellavista Tomé registrados a lo largo de los años (Figura 1.2) muestran que los meses que concentran la mayor cantidad de precipitaciones son junio, julio y agosto, y en menor medida mayo. En contraste, los meses registrados como los más secos corresponden a diciembre, enero y febrero, y en menor medida marzo. Por otra parte, las mayores y menores precipitaciones promedio se registran en los meses de junio y enero respectivamente.

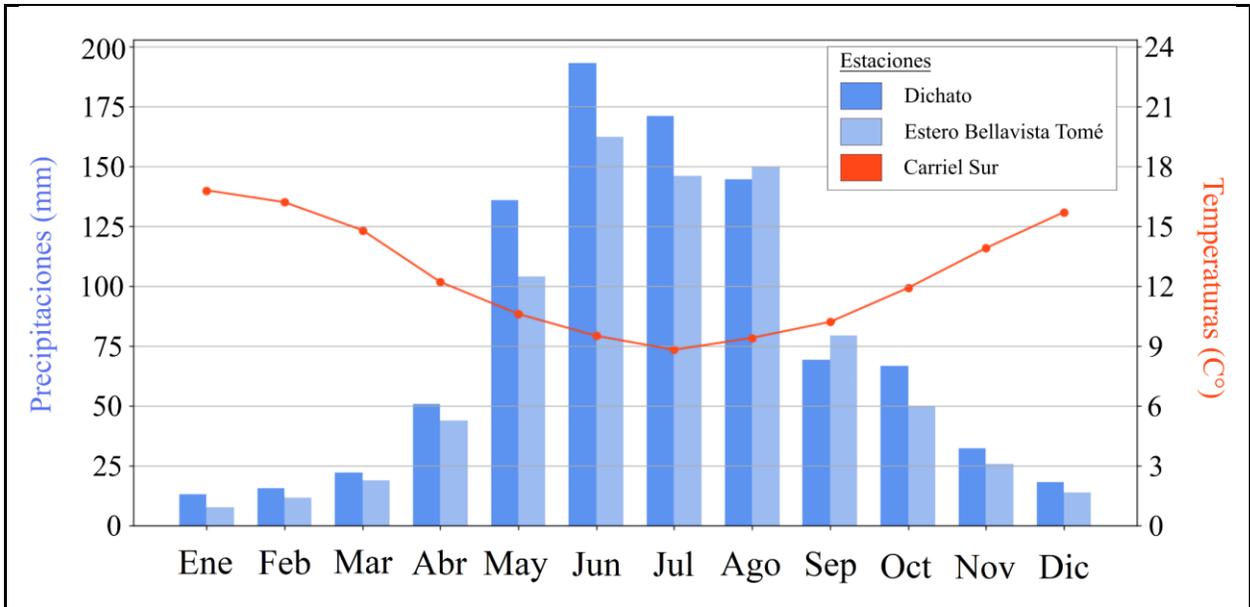


Figura 1.2: Precipitaciones y temperaturas promedio mensuales periodo 2000-2020. Datos de las estaciones Dichato y Estero Bellavista Tomé fueron obtenidos desde la Dirección General de Aguas (DGA). La información de la estación Carriel Sur fue adquirida desde el sitio de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).



1.4. Geomorfología

1.4.1. Generalidades

El territorio chileno se subdivide en cuatro macroformas de relieve principales dispuestas de forma paralela entre sí a lo largo de prácticamente todo el país, las cuales de oeste a este corresponden a: planicies litorales, cordillera de la Costa, depresión intermedia y cordillera de los Andes.

1. Planicies costeras: Se localizan entre el océano Pacífico por el oeste y la cordillera de la Costa por el este, entre el límite norte del país hasta la isla de Chiloé al sur. Son elevadas, muy estrechas y cortadas por acantilados en el norte; anchas en el norte chico e interrumpidas por acantilados en la Zona Central y muy anchas al sur del país.
2. Cordillera de la Costa: Corresponde a una cadena montañosa alta y continua en el norte, confundándose con encadenamientos transversales; en la Zona Central es longitudinal y baja su altitud; al sur del Biobío vuelve a aumentar levemente sus cimas, y recibe el nombre de cordillera de Nahuelbuta. Al avanzar en latitud, comienza a perder su homogeneidad como unidad orográfica hasta que finalmente se hunde en los canales australes.

3. Depresión intermedia: Se extiende en el espacio comprendido entre la cordillera de la Costa por el oeste y la cordillera de los Andes por el este desde el extremo norte hasta el seno de Reloncaví. Es árida en el norte y más fértil en el área austral. Su extensión como rasgo continuo facilita los asentamientos urbanos.
4. Cordillera de los Andes: Es la principal macroforma del relieve chileno, extendiéndose a lo largo de todo el país. Sus características cambian según el área observada: en el norte dominan las depresiones de los salares, donde se presenta la cumbre más alta del país (Nevado Ojos del Salado, 6893 m de altura). La proyección como rasgo permanente la perfila incluso en el territorio antártico, donde se conoce como Antartandes.

1.4.2. Geomorfología regional y local

En la Región del Biobío se distinguen las cuatro unidades morfológicas principales mencionadas anteriormente, siendo las planicies costeras y la cordillera de la Costa las que adquieren mayor relevancia local ya que son las que están presentes en el Gran Concepción. En la región, las planicies costeras se presentan homogéneas, caracterizadas por planos costeros o terrazas. Desde el límite regional norte hasta la desembocadura del río Andalién, las planicies litorales presentan un escaso desarrollo. En la desembocadura del río Biobío se presentan como una llanura inundable, donde al sur del mismo se ve que este ha influido notoriamente en la morfología litoral. Respecto a la cordillera de la Costa, esta se levanta como un macizo imponente de gran altitud, que se extiende desde el río Biobío por el norte hasta el río Imperial por el sur. Algunas de las principales elevaciones de la región se encuentran en los cerros: Altos de Nahuelbuta (1533 m s.n.m.) y el cerro La Piedra del Águila (1379 m s.n.m.).

En Cocholgué, se puede observar la presencia de rasgos geomorfológicos de menor orden los cuales han afectado de forma parcial o total a las planicies litorales, destacando entre estos la presencia de varios niveles de terrazas de erosión marina. Las terrazas de erosión marina en el sector (Figura 1.3) se caracterizan por ser extensas y relativamente discontinuas, debido la presencia de numerosas quebradas profundas que las disectan principalmente en forma perpendicular a la línea de costa, sumado a la presencia de escollos rocosos, del acantilado costero, embahiamientos causados por diferencias litológicas y a la presencia de la plataforma de erosión actual (Cuevas, 2012).

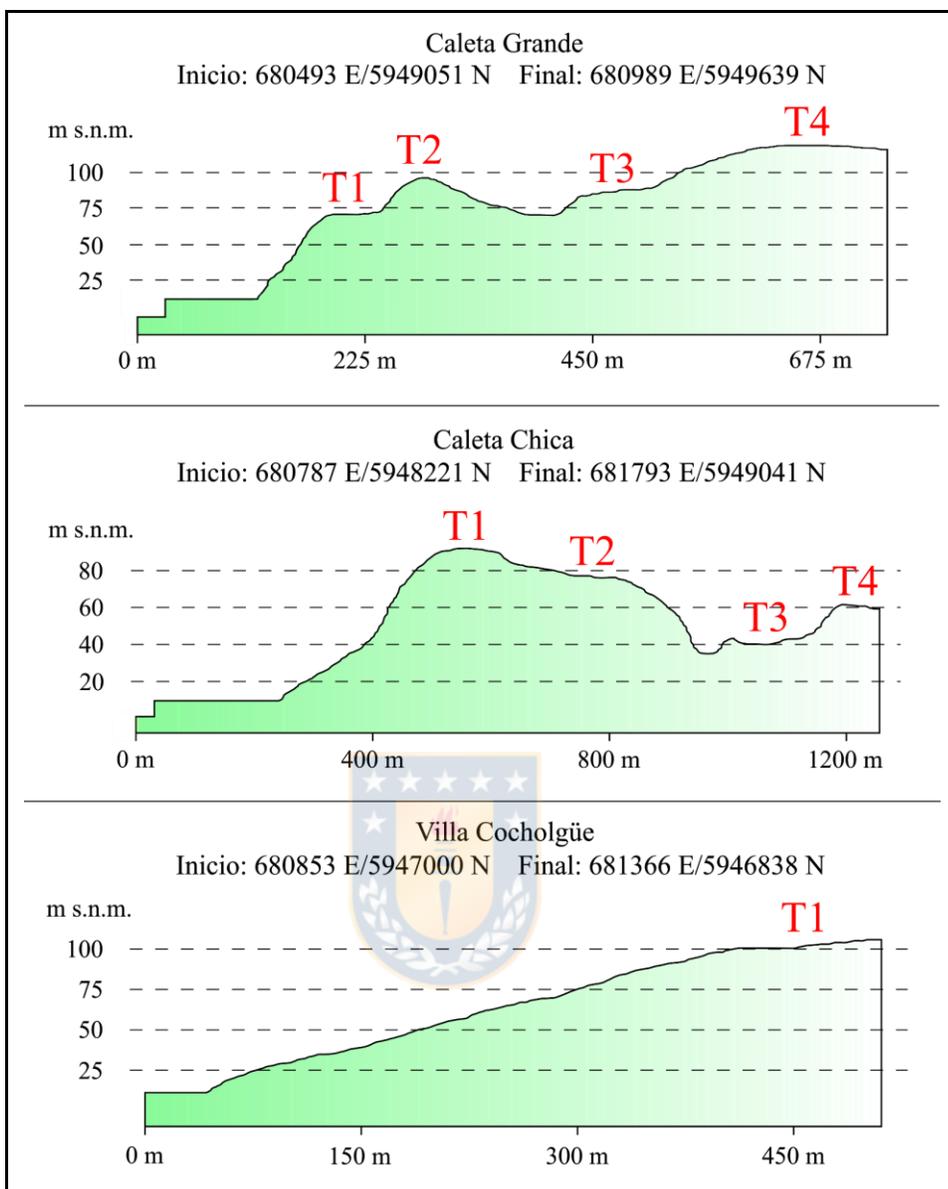


Figura 1.3: Perfiles topográficos de áreas urbanizadas en la localidad de Cocholgüe. Cada uno de los perfiles muestra distintos niveles de terrazas numerados en forma creciente de izquierda a derecha. Las terrazas no son necesariamente correlacionables entre perfiles. Modificado de Cuevas (2012).

La importancia de los distintos niveles de terrazas de erosión marina en el sector es que entrega información importante respecto a los procesos morfogenéticos que han afectado la zona. Estos rasgos, reflejan la interacción entre distintos procesos tectónicos, marinos y de erosión fluvial los cuales determinaron la posición actual de las terrazas y además son los responsables de haber labrado la estructura costera de la zona.

1.5. Trabajos anteriores

Naranjo y otros (2005), estudian las consecuencias relacionadas a las remociones en masa inducidas por lluvias torrenciales durante los días 26 al 27 de junio de 2005. Describen el alto grado de vulnerabilidad en el que se encuentran algunas áreas de la provincia de Concepción, incluida la zona de Cocholgüe. Adicionalmente, mencionan la posibilidad aparente de que exista un umbral de intensidad de precipitaciones, el cual podría servir para la activación de alertas tempranas en comunidades organizadas, mitigando así los efectos que tienen las remociones en masa.

Naranjo y otros (2006), evalúan los efectos de las remociones en masa ocurridas producto de lluvias torrenciales en algunos sectores de la provincia de Concepción, durante los días 9 al 11 de julio de 2006. En la localidad de Cocholgüe, reportan la reactivación de un movimiento multirrotacional observado previamente en el año 2005, el cual afectó algunas viviendas y radieres de ampliación en las áreas de las caletas. Además, el camino de acceso variante construido durante el año 2005 quedó completamente obstruido por caídas de roca. Concluyen que los factores condicionantes principales son la presencia de un potente manto de material meteorizado de baja cohesión, pendientes elevadas y una acelerada e inorgánica intervención antrópica (excavación de laderas, modificación de drenajes, construcción de caminos).

Ramírez y Hauser (2007), examinan la situación de terrenos afectados por procesos de remoción en masa en la provincia de Concepción durante el periodo comprendido entre los años 2005 y 2006. Para Cocholgüe, determinan que en el sector de Caleta Chica está ocurriendo un movimiento de material lento, correspondiente a la reactivación de un paleodeslizamiento, evidenciado en la deformación del pavimento y del terreno en general, mientras que para el sector de Caleta Grande reportan deslizamientos que a futuro podrían comprometer la estabilidad de los suelos de fundación de algunas viviendas. Adicionalmente, como resultado de la inspección comprobaron que no hubo mayores avances en la construcción ni promoción de obras de mitigación de remociones en masa.

Ramírez y Derch (2010), estudian los efectos geológicos del terremoto del 27F 2010 en las localidades de Cocholgüe y Punta Lavapie, enfocados en la observación de los daños producidos sobre la infraestructura de dichos sectores. Para la zona de Cocholgüe, se reporta la formación de grietas de tracción retrógrada las cuales provocaron daños a numerosas viviendas y afectaron el camino de la variante de acceso a la caleta. Adicionalmente, se reportan caídas de rocas importantes

que afectaron el camino principal dejándolo inutilizable. Finalmente, por las características que presenta el terreno donde se emplazan las caletas Grande y Chica de Cocholgue, todo el sector se encuentra en una situación de moderado a alto peligro frente a remociones en masa, por lo que se propone entre algunas medidas el monitoreo constante del lugar y a futuro la reubicación progresiva de la caleta.

Fernández y otros (2011), confeccionan un mapa de peligro geológico frente a remociones en masa en la localidad de Cocholgue, motivados principalmente por los efectos del terremoto del 27F 2010 y la alta actividad que ha presentado la zona frente a lluvias intensas en los años anteriores. El mapa muestra una evaluación preliminar del peligro y lo zonifica, sirviendo como una base para la toma de decisiones futuras respecto a la planificación territorial en la zona. Los sectores de Caleta Grande y Caleta Chica se corresponden con las zonas de mayor grado de peligro de generación de remociones en masa, reportándose deslizamientos rotacionales mayores. Por otra parte, el sector de Villa Cocholgue presenta un grado de peligro medio, pero de forma focalizada se presentan zonas con un grado de peligro alto.

Cuevas (2012), realiza un análisis de susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa en la localidad de Cocholgue. Entre los factores condicionantes considerados para dicha labor se encuentran la geomorfología, geología (tipo de suelo, saturación, meteorización) y la cobertura vegetal. Además, realiza un catastro de los depósitos de remoción en masa del sector, identificando alrededor de treinta puntos de inventario con alta actividad reciente. Finalmente, determina que en particular para la localidad de Cocholgue los factores condicionantes asociados a una mayor susceptibilidad son el tipo de suelo, el grado de meteorización y las características morfológicas de las laderas.

Mardones y Rojas (2012), estudian los procesos de remoción en masa detonados por el megaterremoto del 27F 2010, en el litoral de la provincia de Concepción. Analizan la morfometría y los factores de peligrosidad de veintidós eventos, de los cuales dos de ellos se produjeron en la localidad de Cocholgue. En ese contexto, determinan el fuerte peso de los factores locales como condicionantes de los procesos de remoción en masa entre los que destaca la topografía, manejo de taludes, grado de saturación del suelo, litología y características estructurales. Además, establecen que la cercanía al epicentro se relaciona con una mayor densidad de eventos.

Alfaro y Sepúlveda (2018), hacen una revisión en terreno de las condiciones geológicas presentes en el sector de Cocholegüe, enfocados específicamente en aquellas que influyen en la estabilidad de las laderas y en las que se pueden relacionar con los procesos de remoción en masa. Estos autores, destacan la mala calidad geotécnica presente en las rocas del acantilado costero, evidenciada por la presencia de bloques de tamaño métrico en algunos sectores de la playa, y además mencionan el alto grado de meteorización penetrativa que presentan las distintas litologías.

1.6. Agradecimientos

Al profesor Jorge Quezada Flory, por la confianza y el apoyo entregado al permitirme desarrollar el presente tema de memoria bajo su tutoría, además de su buena disposición al momento de responder mis inquietudes. A los docentes que formaron parte de la comisión, los que a través de sus acotaciones guiaron el trabajo hacia un mejor resultado.

A mis compañeros Javiera Adriazola Cuevas y Cristóbal Villanueva Pávez, los cuales me proporcionaron apoyo teórico como práctico a lo largo de los días de terreno, y luego a través de las conversaciones que surgieron durante las etapas posteriores del trabajo.

Al Sr. Víctor Andrade de Caleta Grande y al Sr. Claudio Méndez de Tomé, junto a sus familias, por la hospitalidad, buena voluntad y asistencia técnica otorgada durante el trabajo de campo. Además, agradecer de forma general a los pobladores de las caletas por su cooperación y ayuda logística entregada.

Por último, a mis padres, los cuales me brindaron el financiamiento económico necesario para poder llevar a cabo este trabajo de forma plena, y además me ayudaron constantemente durante toda mi carrera universitaria.

2. MARCO GEOLÓGICO

En el Gran Concepción afloran una serie de unidades litoestratigráficas y litodémicas (Figura 2.1) cuyas edades abarcan desde el Paleozoico hasta el Reciente.

Las litologías más antiguas del área corresponden a rocas metamórficas y rocas ígneas de composición intermedia a félsica, las cuales están en contacto de intrusión con respecto a las primeras. En conjunto, ambos grupos de rocas mencionados anteriormente conforman lo que se denomina como basamento cristalino en la región.

Ascendiendo estratigráficamente, sobre el basamento se edifican varias secuencias sedimentarias de origen marino y continental, comenzando en el Mesozoico y con una depositación que persiste hasta la actualidad. Estas secuencias poseen diferentes relaciones de contacto entre ellas, evidenciando distintos eventos tectónicos de escala regional que ocurrieron a lo largo del transcurso de su depositación.

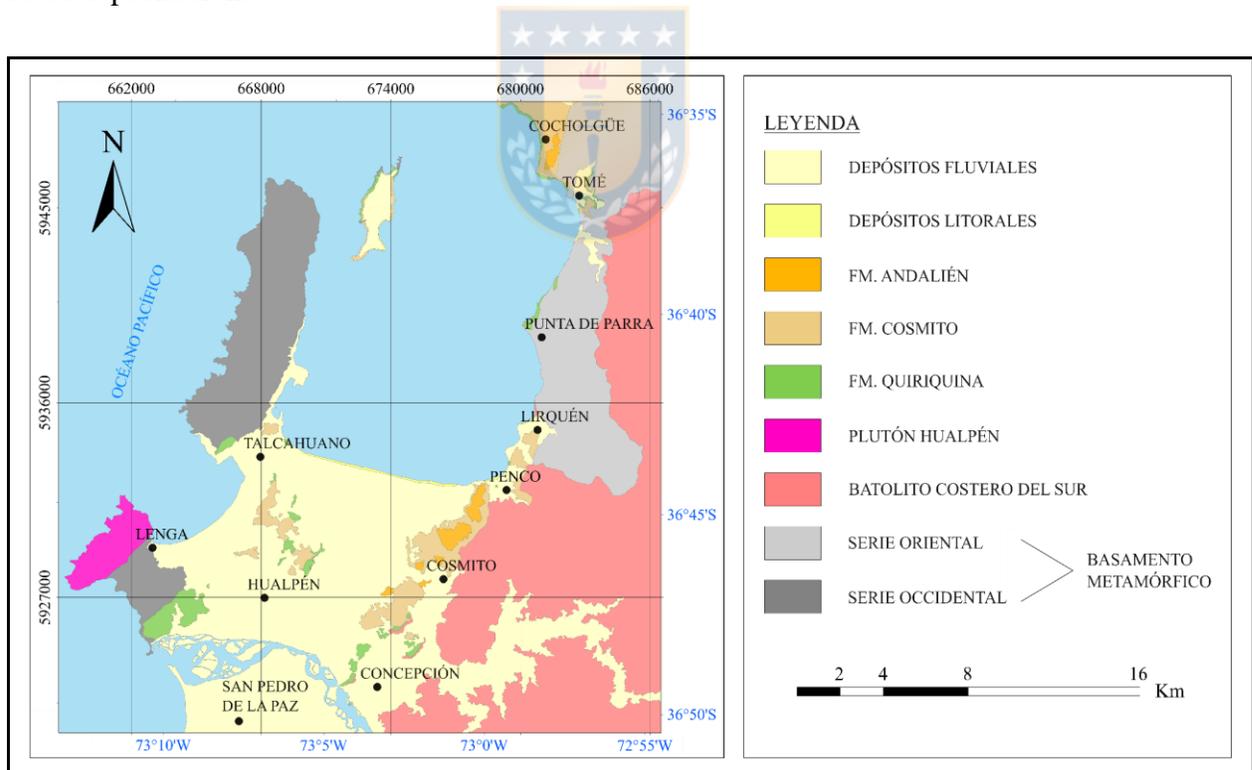


Figura 2.1: Mapa geológico de la parte norte del Gran Concepción. En el mapa se observan las principales unidades litológicas que afloran tanto en la localidad de Cocholgué como en sus alrededores. Basado en CIMM (2004) citado en Sobarzo y otros (2011) y Salazar (2004).

2.1. Rocas metamórficas

2.1.1. Basamento Metamórfico

El Basamento Metamórfico se dispone como dos franjas paralelas de orientación NNE-SSW, aflorando desde Pichilemu hasta Puerto Montt, incluyendo Chiloé (Gajardo, 1981). En la Región del Biobío, es posible encontrarlo en las localidades de Cocholgue, Tomé, Punta de Parra, Concepción, Hualpén, entre otras.

Las franjas del Basamento Metamórfico en su conjunto, constituyen un cinturón metamórfico pareado en el cual se reconocen dos series: Serie Occidental y Serie Oriental, con características litológicas, mineralógicas y condiciones de metamorfismo contrastantes (Aguirre y otros, 1972).

Serie Occidental

La Serie Occidental representa una franja de alto P/T (facies de esquistos verdes a esquistos azules), conformada principalmente por esquistos metapsamopelíticos. En intercalación con la litología anterior, se encuentran esquistos verdes y azules, micaesquistos con porfiroblastos de albita y de forma local metacherts y serpentinitas. El protolito de esta serie corresponde a sedimentos siliciclásticos de fondo oceánico y basitas (Hervé, 1977).

La edad del protolito se estima en el rango Devónico Temprano a Pérmico Temprano y se estima que el metamorfismo que afectó esta serie tuvo una duración de alrededor de 100 Ma, desde el Carbonífero Tardío al Triásico Temprano (Hervé y otros, 2007).

Serie Oriental

La Serie Oriental caracteriza una franja de bajo P/T (facies de esquistos verdes a granulito inferior) constituida principalmente por metapsamitas y metapelitas, pizarras, filitas y esquistos, además de rocas calcosilicatadas y migmatitas en menor medida (Vásquez, 2001). El protolito de esta serie corresponde a una secuencia detrítica de origen terrígeno, asociada al contexto de zona de plataforma de antearco (Hervé, 1988).

Se infiere un rango de edad de deposición entre el Devónico y el Carbonífero para el protolito de esta serie (Glodny y otros, 2008), y una edad de metamorfismo de 298 ± 8 Ma basado en dataciones

de K-Ar (Lucassen y otros, 2004).

2.2. Rocas intrusivas

2.2.1. Batolito Costero del Sur

El Batolito Costero del Sur (Hervé y otros, 1987), corresponde a un conjunto de cuerpos plutónicos que afloran en la parte central de la Cordillera de Nahuelbuta, los cuales están distribuidos de forma continua entre los 32°30' y los 38°00' de latitud sur, y ubicados al este de las rocas del Basamento Metamórfico (Creixell, 2001). El batolito intruye a las rocas metamórficas de la Serie Oriental e infrayace en inconformidad a las rocas estratificadas del Mesozoico.

Litológicamente incluye tonalitas y granodioritas de biotita y hornblenda como rocas predominantes, y en menor medida granitos y dioritas. Estas rocas presentan zonación lateral, con las granodioritas y tonalitas ubicadas en el centro del batolito mientras que en los márgenes dominan composiciones más diferenciadas como algunos cuerpos pegmatíticos y granitos (Creixell, 2001).

La edad del batolito está acotada entre los 300 y los 320 Ma. El relativamente corto periodo de emplazamiento se asocia a una migración del arco a raíz de cambios en los parámetros de subducción (Deckart y otros, 2014).

2.2.2. Plutón Hualpén

El Plutón Hualpén (Creixell, 2001), corresponde a un cuerpo intrusivo epizonal que aflora de forma restringida en las Penínsulas de Hualpén y Tumbes. Se encuentra tanto en contacto de intrusión como por falla con las rocas metamórficas de la Serie Occidental.

Esta unidad, está constituida principalmente por monzogranitos y monzonitas de biotita y muscovita con cantidades menores de cordierita y turmalina. Por otro lado, espacialmente se asocia a diques aplíticos, tonalíticos y andesíticos (Creixell, 2001).

La edad del Plutón Hualpén fue determinada por Lucassen y otros (2004), los cuales asignan una edad de entre 220 ± 5 y 222 ± 2 Ma basado en dataciones radiométricas de Rb-Sr.

2.3. Rocas estratificadas

2.3.1. Formación Quiriquina

La Formación Quiriquina (Biró-Bagoczky, 1982), corresponde a una secuencia sedimentaria marina fosilífera, cuya localidad tipo se encuentra en la bahía Las Tablas ubicada en Isla Quiriquina y su parlocalidad tipo en el sector costero de Cocholgüe. Dentro de la Región del Biobío también se reconocen afloramientos en otras localidades como Tomé, Punta de Parra, Penco, Concepción, Talcahuano, entre otras. La Formación Quiriquina sobreyace en inconformidad al basamento cristalino e infrayace en paraconformidad a las secuencias sedimentarias del Paleógeno y del Cuaternario (Salazar, 2004; Buatois y Encinas, 2011).

La secuencia de esta formación queda descrita de base a techo de la siguiente forma según Salazar (2004): conglomerados polimícticos con clastos de filitas, esquistos, metarenitas y cuarzo lechoso, los cuales tienen tamaños de hasta 10 cm de diámetro; areniscas amarillas con estratificación cruzada intercaladas con lentes conglomerádicos en las cuales se observa *Mytilus primigenius*, *Inoceramus biroi*, *Ostrea* sp., *Dentalium chilensis* y *Baculites* sp.; areniscas glauconíticas granodecrecientes intercaladas con bancos de coquinas las cuales presentan *Pacitrignonia hanetiana* y *Cardium acuticostatum*; areniscas y limolitas verdes, con niveles de concreciones calcáreas alineadas de forma paralela a la estratificación con presencia de *Eubaculites carinatus*, *Chlamys chilensis* y *Solariella* sp.

Biró-Bagoczky (1982), asigna una edad Campaniano – Maastrichtiano sobre la base de su contenido fosilífero. Luego, Stineesbeck (1986) asigna una edad restringida al Maastrichtiano a partir de una comparación global de rangos de amonites. Finalmente, Salazar (2004) también sobre la base de los amonites presentes acota la edad al rango entre la parte final del Maastrichtiano Temprano y la parte inicial del Maastrichtiano Tardío.

2.3.2. Formación Cosmito

Definida por Galli (1967), representa una secuencia sedimentaria marina-continental cuya localidad tipo fue definida 5 km al norte de Concepción en el sector de Cosmito. Además, aflora en las localidades de Coliumo, Cocholgüe, Penco y en los cerros isla de Concepción y Talcahuano. Es descrita como un conjunto de capas levemente inclinadas de lutitas, areniscas, conglomerados

y mantos de carbón, donde en las areniscas es común encontrar estratificación cruzada. Esta formación sobreyace en inconformidad al basamento cristalino, se encuentra en paraconformidad con la Formación Quiriquina e infrayace en discordancia angular a la Formación Andalién.

Esta formación es correlacionable con la Formación Curanilahue definida por Muñoz-Cristi (1956) en base a sus características litoestratigráficas, lo cual permite asignar una edad de Eoceno para estas rocas (Galli, 1967).

2.3.3. Formación Andalién

La Formación Andalién (Galli, 1967), corresponde a una secuencia sedimentaria continental dispuesta de forma horizontal a subhorizontal, definida en las cercanías del río Andalién en el sector donde este bordea por el noreste la ciudad de Concepción. Aflora de manera restringida en las partes altas de los cerros de las localidades de Concepción, Penco y Cosmito. Esta unidad sobreyace en discordancia angular a las rocas de las formaciones Quiriquina y Cosmito. Por otro lado, el límite superior está marcado por una discordancia erosiva con los sedimentos no consolidados de las arenas del río Biobío (Quezada, 1996).

Litológicamente, corresponde a areniscas y conglomerados polimícticos meteorizados con una matriz arenosa a limosa. Los clastos son subredondeados y alargados, encontrándose clastos metamórficos e ígneos principalmente (Galli, 1967).

Dado que esta formación no presenta fósiles, la edad de estas rocas se asigna de forma relativa comparando con los estratos superiores e inferiores. Basado en esto, Galli (1967) asigna una edad de Plioceno-Pleistoceno. Por otro lado, Brüggén (1950) citado en Galli (1967) asigna una edad máxima de Plioceno al correlacionar la Formación Andalién con unas terrazas de esa misma edad en la península de Arauco.

2.4. Depósitos no consolidados

2.4.1. Depósitos fluviales y litorales

Corresponden a aquellos depósitos no consolidados a semiconsolidados, formados a partir de la meteorización, erosión y transporte de rocas preexistentes por medio de agentes fluviales y/o la acción del mar. Estos depósitos sobreyacen a todas las unidades mencionadas anteriormente.

Respecto a los depósitos fluviales, a grandes rasgos se pueden diferenciar dos tipos de depósitos: arenas negras a grises intercaladas con limo transportadas por el río Biobío y que son correlacionables con la Formación Huachipato (Galli, 1967), y los depósitos constituidos por arenas cuarzo-feldespáticas transportadas por el río Andalién los cuales son correlacionables con la unidad informal Arena Andalién (Galli, 1967).

Por otra parte, los depósitos litorales corresponden a depósitos de playa acumulados en litorales paralelos a la línea de costa o como acumulaciones en el interior de ensenadas pequeñas que bordean las bahías de Concepción, San Vicente y Coliumo (Ramírez y otros, 2012). El grueso de estos depósitos lo comprenden sedimentos arenosos negros y claros, además de bioclastos.

Es posible asignar una edad máxima de Pleistoceno en base a sus relaciones de contacto y dado que la sedimentación continúa hasta la actualidad la edad mínima es el Reciente.



3. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se dan a conocer algunas de las principales definiciones referentes a términos y procesos claves en el estudio de las remociones en masa, las cuales se compilaron a partir de la revisión bibliográfica de distintos autores en la materia. Muchos de estos conceptos pueden tener significados diferentes dependiendo del autor que los defina, por lo que en esta sección se recopilan aquellas definiciones que más se adecuan a este trabajo.

3.1. Terminología

1. Remoción en masa: Corresponde a la forma de desplazamiento de material más frecuente y extendida en la superficie. El desplazamiento puede ser lento o rápido, y ocurre producto de la acción gravitacional la cual mueve pendiente abajo volúmenes variables de suelo, roca o ambos hasta un nuevo nivel de estabilidad (Varnes, 1978; González de Vallejo y Ferrer, 2011; Hungr y otros, 2014).
2. Susceptibilidad: Posibilidad de que una zona se vea afectada por un proceso determinado, expresada en grados cualitativos y relativos. Depende de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos geológicos, los cuales pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos a ellos (Campos, 2014).
3. Factores condicionantes: Se denomina así a todo factor que puede contribuir a producir una situación potencialmente peligrosa, y que por lo tanto controlan la susceptibilidad de generar un fenómeno de remoción en masa (Campos, 2014).
4. Factores desencadenantes: Corresponden a aquellos factores que modifican la estabilidad preexistente del terreno, gatillando la ocurrencia de remociones en masa (González de Vallejo y Ferrer, 2011).
5. Peligro: Hace referencia a la probabilidad de que ocurran eventos potencialmente dañinos (p. ej. remociones en masa) en un lugar y tiempo dado, donde la magnitud de dichos eventos generalmente sirve como un primer paso para poder estimar el riesgo asociado a los mismos (Guzzetti y otros, 2005). Es estimado a partir de la susceptibilidad (variabilidad espacial) y el análisis de los factores desencadenantes (variabilidad temporal) del fenómeno estudiado.

6. Vulnerabilidad: Se define como la manifestación de los estados inherentes de un sistema (p. ej. físicos, técnicos, organizacionales y culturales) que es sometido a un peligro natural o que puede ser explotado para ser afectado negativamente (Haines, 2009; Aven, 2011). La vulnerabilidad es un parámetro dinámico, debido a que depende en gran parte de las distintas acciones que tomen las diferentes entidades sociales (Downing y otros, 2005 citado en Miller y otros, 2010; Birkmann y otros, 2013).
7. Riesgo: Corresponde a la probabilidad con la que un peligro puede causar daño a un sistema humano-ambiente vulnerable (UN/ISDR, 2004 citado en Murillo-García y otros, 2017; Birkmann y otros, 2013). En el contexto del trabajo, se entiende como el producto entre el peligro y la vulnerabilidad que tiene un determinado territorio frente a la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa (Rodríguez-Solano y otros, 2013). Las remociones en masa constituyen un riesgo geológico potencial ya que pueden causar pérdidas económicas o daños sociales si es que afectan actividades humanas o infraestructura (González de Vallejo y Ferrer, 2011).
8. Zonificación: Consiste en subdividir la superficie de un terreno en regiones, la cuales representan distintos niveles (previamente definidos y jerarquizados según una escala) de algún parámetro en estudio. Aplicado al contexto de las remociones en masa, dicho parámetro puede corresponder a la susceptibilidad, peligro o riesgo.
9. Suelo: Esta conformado por fragmentos de rocas y minerales de diferentes tamaños, además de presentar materia orgánica. Las partículas sólidas se pueden disponer de diferentes formas, dando lugar a la presencia de espacios vacíos entre las mismas denominados poros los cuales pueden estar parcialmente rellenos por fluidos. El suelo es el resultado de la degradación de las rocas vía procesos de meteorización y/o erosión (Young, 2012; Bell, 2013).

3.2. Tipos de remociones en masa

Existen diferentes clasificaciones para las remociones en masa dependiendo del autor y del parámetro utilizado para la clasificación (p. ej. tipo o modo de movimiento, tipo de material, grado de saturación en agua, profundidad) (Tabla 3.1). En este trabajo, se utilizará como base la

clasificación definida en los trabajos de Varnes (1978) y Cruden y Varnes (1996), considerando algunas actualizaciones de trabajos más recientes.

Tabla 3.1: Clasificación de remociones en masa según algunos de los parámetros más comunes. Basado en Cruden y Varnes (1996) y González de Vallejo y Ferrer (2011).

Tipo de movimiento	Tipo de material	Profundidad
Caídas o desprendimientos	Caída de suelo	Superficial
	Caída de rocas	Superficial
Volcamientos o topples	Volcamiento de suelo	Variable
	Volcamiento de rocas	Variable
Deslizamientos	Deslizamiento de suelo	Superficial o profunda
	Deslizamiento de rocas	Superficial o profunda
Flujos	Flujo de tierra o lodo	Generalmente superficial
	Flujo de detritos	Superficial
	Avalancha de rocas	Profunda
Extensiones laterales	Extensión lateral de suelo	Superficial o profunda
	Extensión lateral de rocas	Superficial o profunda

Nota: Se consideran remociones en masa superficiales aquellas que ocurren dentro de los primeros metros de suelo, generalmente a profundidades < 3 m. En contraste, las remociones en masa profundas ocurren a lo largo de planos de ruptura a profundidades mayores, generalmente > 10 m.

3.2.1. Caídas o desprendimientos

En las caídas, un material (sin restricción de tamaño) se desprende desde una pendiente empinada o un acantilado, a lo largo de una superficie sobre la cual ocurre poco o nada de cizalle, descendiendo principalmente en caída libre por el aire hasta alcanzar el pie de la ladera donde puede seguir moviéndose por rodamiento o saltación (Figura 3.1). El movimiento es rápido a muy rápido, excepto cuando el material desplazado ha sido socavado, contexto en el cual la caída es precedida por pequeños deslizamientos o balanceos (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996).

Es importante recalcar que existe una transición entre ciertos movimientos de caída y de flujo. Esto es relativamente común, donde en la práctica se han observado eventos que exhiben características tanto de caída de rocas como de avalancha de rocas, haciendo problemático definir de forma simple el límite entre ambos tipos de movimiento. En estos casos, Hungr y otros (2014) sugiere como criterio de reconocimiento para las caídas o desprendimientos que el modo de desplazamiento más importante en términos de distancia y peligrosidad debe ocurrir como fragmentos individuales.

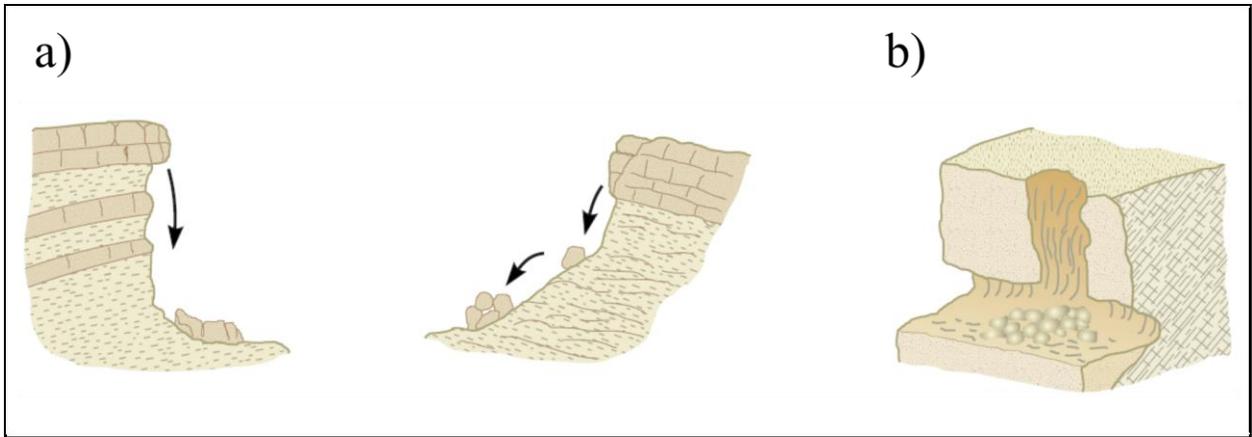


Figura 3.1: Esquemas de caídas o desprendimientos en distintos tipos de materiales. a) Caídas de rocas. b) Caída de suelo. Modificado de González de Vallejo y Ferrer (2011).

3.2.2. Volcamientos o topples

Es el movimiento que involucra la rotación hacia delante de material, el cual se desprende desde una ladera desplazándose en torno a un punto o eje ubicado por debajo del centro de masa de la carga desplazada (Figura 3.2). Pueden ocurrir por la acción de la gravedad, empuje de material adyacente o por la presión de los fluidos en los intersticios o grietas del material (Cruden y Varnes, 1996). En general, esta forma de remoción en masa tiende a ocurrir en zonas donde el manto de los estratos se disponga en dirección opuesta a la inclinación de la ladera en la que se encuentran los mismos, permitiendo que estos roten libremente (González de Vallejo y Ferrer, 2011).

Goodman y Gray (1976) citado en Hungr y otros (2014), describen dos tipos de volcamientos:

1. Volcamiento de bloques: Involucra roca competente, donde el modo de fallamiento ocurre producto de la pérdida de estabilidad y rotación en torno a un punto de uno o varios bloques. Es un proceso frágil, donde mientras mayor sea la inclinación de los bloques menor será la estabilidad hasta un punto en el cual ocurre una aceleración repentina del material.
2. Volcamiento flexural: Afecta a roca menos competente y se caracteriza por la presencia de densos juegos de diaclasas y/o esquistosidades orientadas de forma perpendicular a la dirección de caída en el talud.

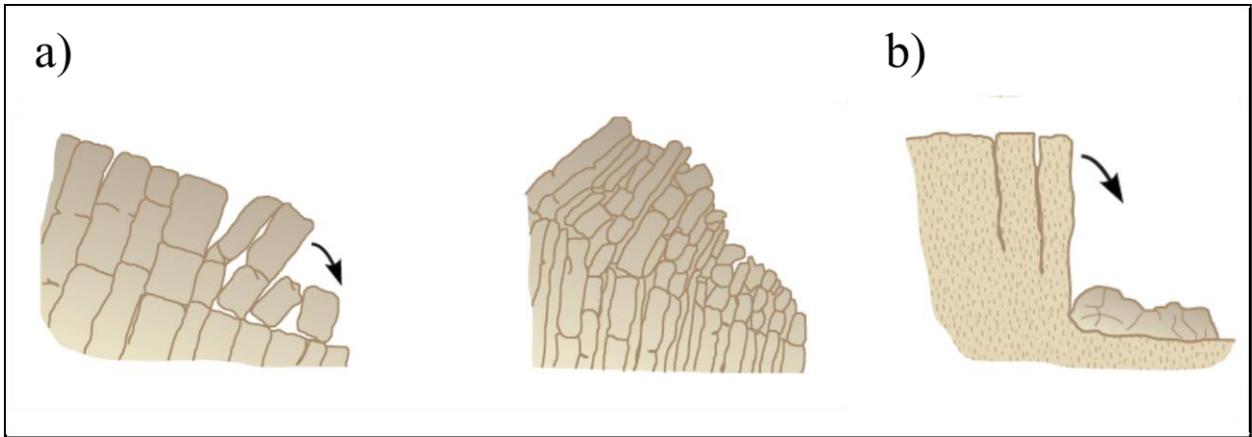


Figura 3.2: Esquemas de volcamientos o topples en distintos tipos de materiales. a) Volcamientos de rocas en bloques. b) Volcamiento de suelo. Modificado de González de Vallejo y Ferrer (2011).

3.2.3. Deslizamientos

Un deslizamiento es un movimiento de material ladera abajo el cual ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o a lo largo de varias zonas de cizalle (Figura 3.3). El movimiento no afecta simultáneamente a todo el material, sino que este se va propagando de forma relativamente gradual (Cruden y Varnes, 1996). Si el material desplazado no alcanza el equilibrio al pie de la ladera, la carga puede continuar moviéndose por cientos de metros, alcanzando grandes velocidades, finalmente derivando en otras formas de remoción (González de Vallejo y Ferrer, 2011).

Los deslizamientos se subdividen en dos tipos según su modo de deslizamiento (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996):

1. Deslizamientos traslacionales: Pueden darse tanto en suelo como en roca, a lo largo de superficies planas preexistentes o discontinuidades del macizo rocoso (p. ej. diaclasas, fallas, planos de estratificación) (González de Vallejo y Ferrer, 2011).
2. Deslizamientos rotacionales: Ocurren con mayor frecuencia en suelos cohesivos o en roca muy meteorizada, donde el fallamiento (superficial o profundo) ocurre a lo largo de superficies curvas concavas hacia arriba o con forma de “cuchara”. Una vez inicia el movimiento el material empieza a rotar dividiéndose en distintos bloques que deslizan entre sí originando superficies con forma de “escalones” (González de Vallejo y Ferrer, 2011).

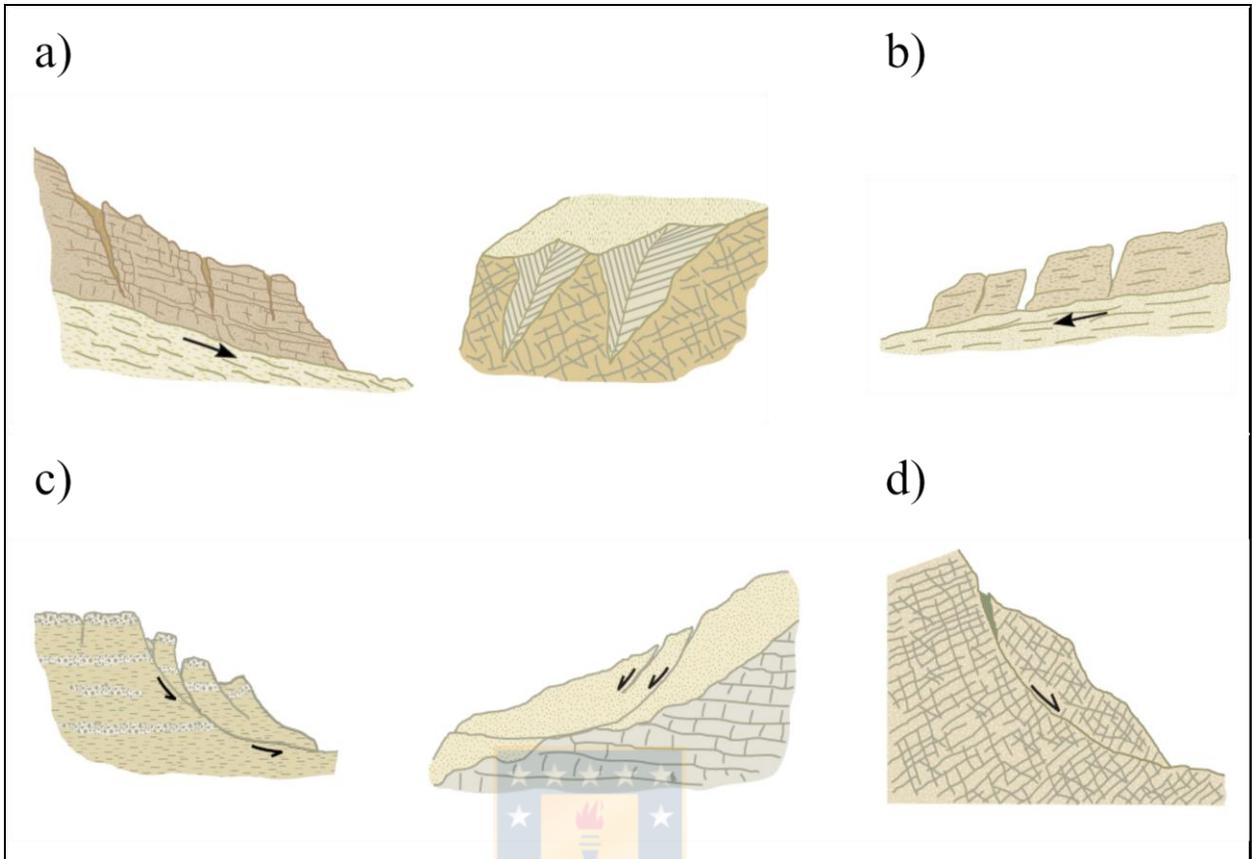


Figura 3.3: Esquemas de los tipos de deslizamientos. a) y b) Deslizamientos traslacionales en roca y suelo respectivamente. c) y d) Deslizamientos rotacionales en suelo y roca respectivamente. Modificado de González de Vallejo y Ferrer (2011).

3.2.4. Flujos

Corresponden a movimientos espacialmente continuos de material, el cual generalmente esta disgregado y presenta un abundante contenido de agua, provocando que este se comporte mecánicamente como un fluido (Figura 3.4). En este tipo de movimientos no se distingue una superficie de ruptura o fallamiento definida. Los flujos tienden a afectar de forma más significativa los suelos de grano fino los cuales muestran una pérdida de resistencia mayor al ser removilizados. Estos movimientos no son muy profundos en relación a su extensión, la cual puede alcanzar varios kilómetros. Estos procesos pueden llegar a ocurrir a lo largo de laderas con pendientes suaves (incluso menores a 10°) si las condiciones son favorables, haciéndolos muy peligrosos (Cruden y Varnes, 1996; González de Vallejo y Ferrer, 2011).

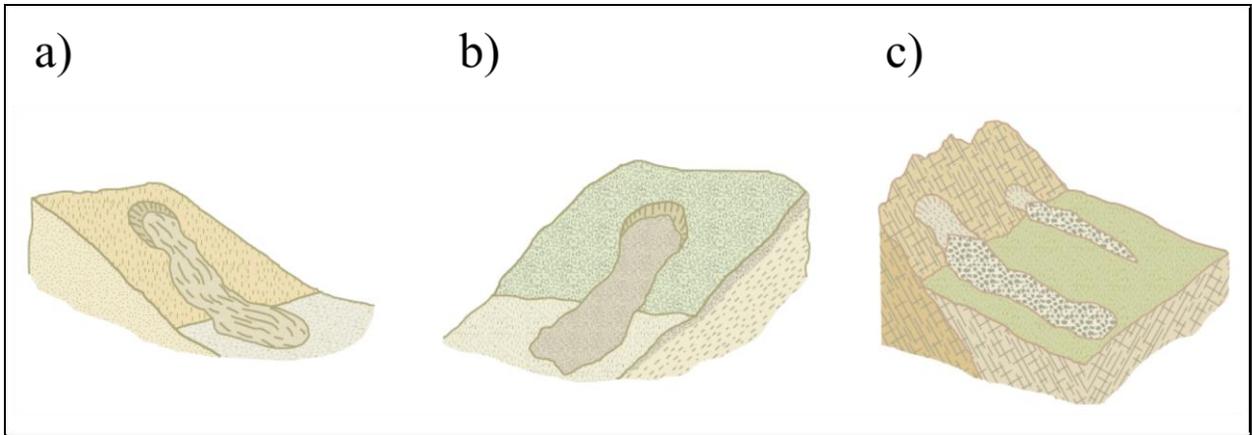


Figura 3.4: Esquemas de flujos en distintos tipos de materiales. a) Flujo de tierra o lodo. b) Flujo de detritos. c) Flujo de rocas o avalancha de rocas. Modificado de González de Vallejo y Ferrer (2011).

3.2.5. Extensiones laterales

Es el movimiento de bloques o de masas de suelo muy coherentes y/o cementadas sobre un material suave y deformable (Figura 3.5). Los bloques se desplazan lentamente ladera abajo a lo largo de pendientes muy bajas. En este caso, el movimiento ocurre por la pérdida de resistencia del material subyacente al ser deformado por el peso de los bloques que yacen sobre el mismo o por comenzar a comportarse como fluido (como cuando ocurre licuefacción) (Cruden y Varnes, 1996; González de Vallejo y Ferrer, 2011).

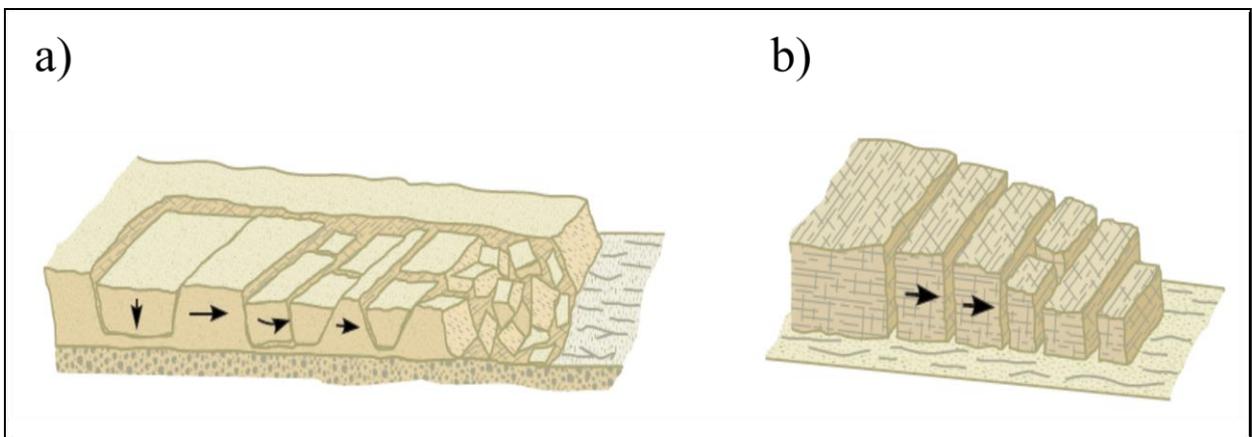


Figura 3.5: Esquemas de extensiones laterales en distintos tipos de materiales. a) Extensión lateral de suelo. b) Extensión lateral de roca o bloques. Modificado de González de Vallejo y Ferrer (2011).

3.3. Factores condicionantes

3.3.1. Geología

Litología

Las características litológicas, en particular la resistencia mecánica al corte y la granulometría (que controla las propiedades hidrogeológicas del material) se consideran dentro de los controles mayores respecto a la ocurrencia de remociones en masa, determinando en gran medida el tipo y estilo de remoción (D'Amato Avanzi y otros, 2004; Borgomeo y otros, 2014). Rocas que presentan una menor resistencia mecánica, en general tienden a ser las que presentan una mayor tasa de ocurrencia de remociones, mientras que las que presentan mayor resistencia mecánica concentran menos eventos (Chen y otros, 2011). Por otro lado, unidades litológicas con un alto contenido de arcillas, han mostrado ser mucho más susceptibles a ser los lugares donde se inician las remociones en masa en zonas con una influencia fluvial importante y/o en lugares donde ocurren lluvias intensas (Borgomeo y otros, 2014).



Grado de alteración y/o meteorización

El material que se encuentre en las laderas y que presente un mayor grado de alteración y/o meteorización tiene una menor resistencia y tiende a ser removilizado con mayor facilidad por los procesos de remoción en masa.

Estructuras

En general, la presencia de debilidades estructurales favorece la ocurrencia de deslizamientos profundos ya que dichas estructuras se comportan como planos de despegue para los procesos de remoción en masa (Roering y otros, 2005 citado en Borgomeo y otros, 2014).

Por otro lado, la presencia de fallas también se relaciona a ciertos rasgos geomorfológicos como los escarpes, los cuales se asocian a pendientes abruptas favoreciendo el colapso gravitacional del material asociado a los mismos (Mardones y Vidal, 2001; Basharat y otros, 2012). Además, frente a ciertos tipos de factores desencadenantes (como los terremotos), las fallas pueden reactivar su movimiento produciendo que las paredes de los bloques colgantes colapsen, desencadenando movimientos de material condicionados por los planos de falla (Basharat y otros, 2012).

Otras debilidades estructurales como diaclasas, estratificación o planos asociados a plegamientos, también pueden condicionar la dirección de propagación de las remociones. Esto ocurre principalmente cuando dichos planos tienen un cierto grado de inclinación provocando deslizamientos de material a lo largo de estos rasgos preexistentes (Basharat y otros, 2012).

3.3.2. Topografía

Elevación

El material que se encuentra a mayores alturas es mucho más propenso a ser erosionado por la actividad fluvial y por tanto a ser evacuado a través de rápidas descargas a lo largo de las quebradas (Chen y otros, 2011). En ese contexto, existe evidencia de que los procesos de remoción en masa tendrían una predisposición a localizarse en aquellos lugares de los cordones montañosos donde el relieve promedio local, las pendientes y las tasas de erosión son altas, actuando hasta cierto punto como un mecanismo de acomodación del relieve en dichas zonas. Sin embargo, esto no significa que las remociones estén completamente restringidas a dichos puntos (Korup y otros, 2007).

Pendiente

Pendientes bajas, se asocian a bajos esfuerzos de corte sobre los materiales que descansan sobre las laderas, por lo cual se espera que las pendientes menos pronunciadas sean más estables y menos propensas a generar remociones en masa que las pendientes que son abruptas. Aun así, los intervalos numéricos específicos en los cuales ocurren remociones en masa son amplios y variados, dependiendo en gran medida de las condiciones naturales presentes en el lugar (D'Amato Avanzi y otros, 2004; Borgomeo y otros, 2014; Korup y otros, 2007).

Forma de laderas

Las formas convexas generalmente son más estables ya que dispersan mejor el material a lo largo de las laderas. Por otro lado, las formas cóncavas son potencialmente inestables ya que tienden a concentrar el agua en los puntos más deprimidos topográficamente contribuyendo a generar una presión de poros adversa (Kayastha y otros, 2013). Así, pendientes con formas cóncavas experimentarían una mayor frecuencia de remociones en masa, siempre y cuando la distribución espacial de las diferentes formas de las pendientes sea relativamente homogénea (D'Amato Avanzi

y otros, 2004).

3.3.3. Factor antropogénico

La intervención del hombre produce modificaciones en el medio natural las cuales pueden tomar un papel fundamental en el desarrollo de los procesos de remoción en masa. Este impacto se expresa principalmente en variaciones espaciales y temporales de los usos de suelo en los distintos lugares conforme se expanden las sociedades humanas, algunos de los cuales pueden afectar las laderas haciéndolas más susceptibles a la erosión, promoviendo la generación de remociones en masa.

Plantaciones forestales y monocultivos

La discusión respecto al impacto que tienen las plantaciones forestales en el suelo ha sido muy polémica, incluso llegando a ser tendenciosa (World Rainforest Movement, 1999 citado en Baltodano, 2000). Muchos estudios han determinado que la mayoría de las plantaciones forestales en el mundo son monocultivos, los cuales abarcan un número reducido de géneros de árboles de rápido crecimiento (p. ej. pinos y eucaliptos) (Richards y otros, 2010; Alem y otros, 2015; Liu y otros, 2018). En esa línea, existe evidencia de que ese tipo de árboles tiene un impacto negativo en el suelo empobreciéndolo y desbalanceando su estructura (Baltodano, 2000; Liu y otros, 2018). Los monocultivos presentan una estructura fisiológica y morfológica muy distinta a la de las especies que se encuentran en los ecosistemas naturales, afectando también el desarrollo de los sistemas hidrogeológicos. La capacidad de los árboles para absorber, retener y liberar el agua de lluvia varía mucho entre las diferentes especies. Por ejemplo, se sabe que ciertos árboles en condiciones naturales como los cipreses tienen una mayor capacidad para retener el agua en su follaje, protegiendo el suelo al evitar que el agua llegue al mismo. En contraste, otras especies usadas en los monocultivos (como la teca) tienden a concentrar el agua de lluvia en las hojas y luego a liberarla al suelo en grandes gotas, promoviendo la escorrentía superficial, dañando más el suelo y favoreciendo la erosión. La infiltración de agua al suelo también se ve afectada. Esta depende del tipo de humus que se forme en el suelo el cual está relacionado directamente con las distintas especies de árboles que se encuentren presentes en el mismo. Comparado con un bosque, los monocultivos tienen suelos con mucha menor infiltración, lo cual a la larga promueve los procesos de erosión y disminuye la recarga de los acuíferos (Baltodano, 2000).

Por otro lado, otras prácticas asociadas a los monocultivos también tienen un impacto negativo en la resistencia del suelo. Ejemplos de estas prácticas, son la eliminación de la cobertura vegetal del suelo, la cual constituye una barrera frente a los agentes erosivos y la compactación del suelo durante las etapas previas a la plantación lo cual promueve la escorrentía superficial y la erosión (Baltodano, 2000; Liu y otros, 2018).

Otras formas de impacto antropogénico

Actividades recurrentes en la industria como las obras de construcción, cortes, terraplenes, plataformas, obras mineras, excavaciones, rellenos o la acumulación de escombros, pueden producir una disminución artificial gradual de la resistencia de los depósitos o macizos rocosos involucrados, debido a la modificación de las pendientes de las laderas al no considerar los controles estructurales naturales que están tendrían en condiciones normales (Meusburger y Alewell, 2008; Campos, 2014).

3.4. Factores desencadenantes



3.4.1. Precipitaciones

Las precipitaciones actúan aumentando el grado de saturación de los materiales, lo cual tiene como resultado la disminución de la resistencia de los mismos durante un tiempo. Además, las precipitaciones intensas contribuyen a aumentar la escorrentía superficial, erosionando más las laderas, y en consecuencia contribuyendo a desencadenar remociones en masa. Las lluvias como factor desencadenante están estrechamente ligadas a su intensidad, duración y distribución (González de Vallejo y Ferrer, 2011). Las precipitaciones de poca o gran intensidad en periodos largos de tiempo tienden a favorecer las remociones en masa profundas, mientras que las lluvias de gran intensidad en periodos cortos de tiempo se relacionan a eventos superficiales donde la susceptibilidad frente a remociones en masa sea alta (Aleotti, 2004).

3.4.2. Sismos

A nivel mundial, los grandes terremotos han detonado una variedad de procesos de remoción en masa y de erosión que afectaron la estabilidad de las laderas, los cuales han sido documentados en numerosos estudios (Ouimet, 2011; Mardones y Rojas, 2012; Schulz y otros, 2012). Las

aceleraciones sísmicas inducidas por los terremotos generan un cambio temporal en el régimen de esfuerzos imperante sobre las laderas, pudiendo desplazar el equilibrio de dichos sistemas desde condiciones estables a condiciones inestables. Dentro de los rasgos de los sismos que influyen en su rol como factor desencadenante, están la magnitud, el largo de la zona de ruptura, las aceleraciones máximas alcanzadas y el periodo de retorno (Campos, 2014).

3.4.3. Actividad antropogénica

La intervención antrópica también puede constituir un factor desencadenante en ciertos contextos. El aumento de la pendiente de los taludes, la construcción de represas y la modificación artificial de cauces puede producir socavamientos a los pies de las laderas. La construcción de redes de drenaje, alcantarillados y la deforestación modifican la infiltración y escorrentía, afectando las tasas de erosión. De esta forma, se puede observar cómo en general el factor antropogénico tiende a acelerar los ritmos de degradación, en donde si dichas intervenciones operan de forma intensa y en periodos relativamente cortos de tiempo, la disminución en la estabilidad de las laderas puede ser suficiente como para desequilibrar los sistemas naturales y gatillar fenómenos de remoción en masa en lugares donde la susceptibilidad sea alta. Los efectos más visibles y comunes son los que se relacionan con la generación de remociones en masa superficiales, en contextos de construcción de vías o urbanizaciones, y por la deforestación (Lara y Sepúlveda, 2008; Cuevas, 2012; Campos, 2014).

4. METODOLOGÍA

4.1. Evaluación de la susceptibilidad a remociones en masa

Se definen cuatro diferentes enfoques en el análisis de la susceptibilidad frente a remociones en masa; probabilístico (utilizando inventarios o catálogos de remociones), heurístico (que puede ser directo basado en el mapeo de unidades geomorfológicas o indirecto referido a la combinación de mapas cualitativos), estadístico (análisis estadísticos bivariados y multivariados) y geotécnico (Roslee y otros, 2017).

La metodología utilizada en este apartado queda enmarcada dentro de los métodos heurísticos, correspondiendo a un mapeo de susceptibilidad vía combinación de mapas cualitativos a través del “Método de Ponderación de Mapas Temáticos”. Este tipo de análisis se basa principalmente en literatura y en el juicio de expertos los cuales determinan la importancia de cada factor utilizado, donde la toma de decisiones también puede ser ayudada por métodos adicionales. En este estudio se decidió utilizar el “Proceso Analítico Jerárquico” (AHP) como método complementario. La explicación detallada de los aspectos más importantes de los procedimientos utilizados se da a conocer en los párrafos siguientes.

4.1.1. Método de ponderación de mapas temáticos

Esta técnica consiste en la utilización de capas *raster* temáticas para cada uno de los parámetros utilizados, las cuales se superponen entre sí sobre la base de su importancia relativa para generar un mapa acumulativo (en este caso un mapa de susceptibilidad). En otras palabras, es un método GIS basado en la recolección, análisis y procesamiento de los factores condicionantes de los procesos de remoción en masa. Es una técnica relativamente común en los estudios de remociones en masa por su fácil aplicación, siendo utilizada ampliamente en diversos análisis de susceptibilidad (Sarkar y Kanungo, 2004; Cartaya y otros, 2008; López, 2013; Roslee y otros, 2017; Awawdeh y otros, 2018; Saleem y otros, 2020). Algunos de los pasos que involucra esta metodología son los mencionados a continuación; selección de los factores relevantes, elaboración de una base de datos con la información pertinente de cada factor, confeccionar los mapas temáticos, asignar una valoración o ponderación a cada factor y validación del modelo. Los distintos pasos mencionados anteriormente quedan mejor representados en la Figura 4.1.

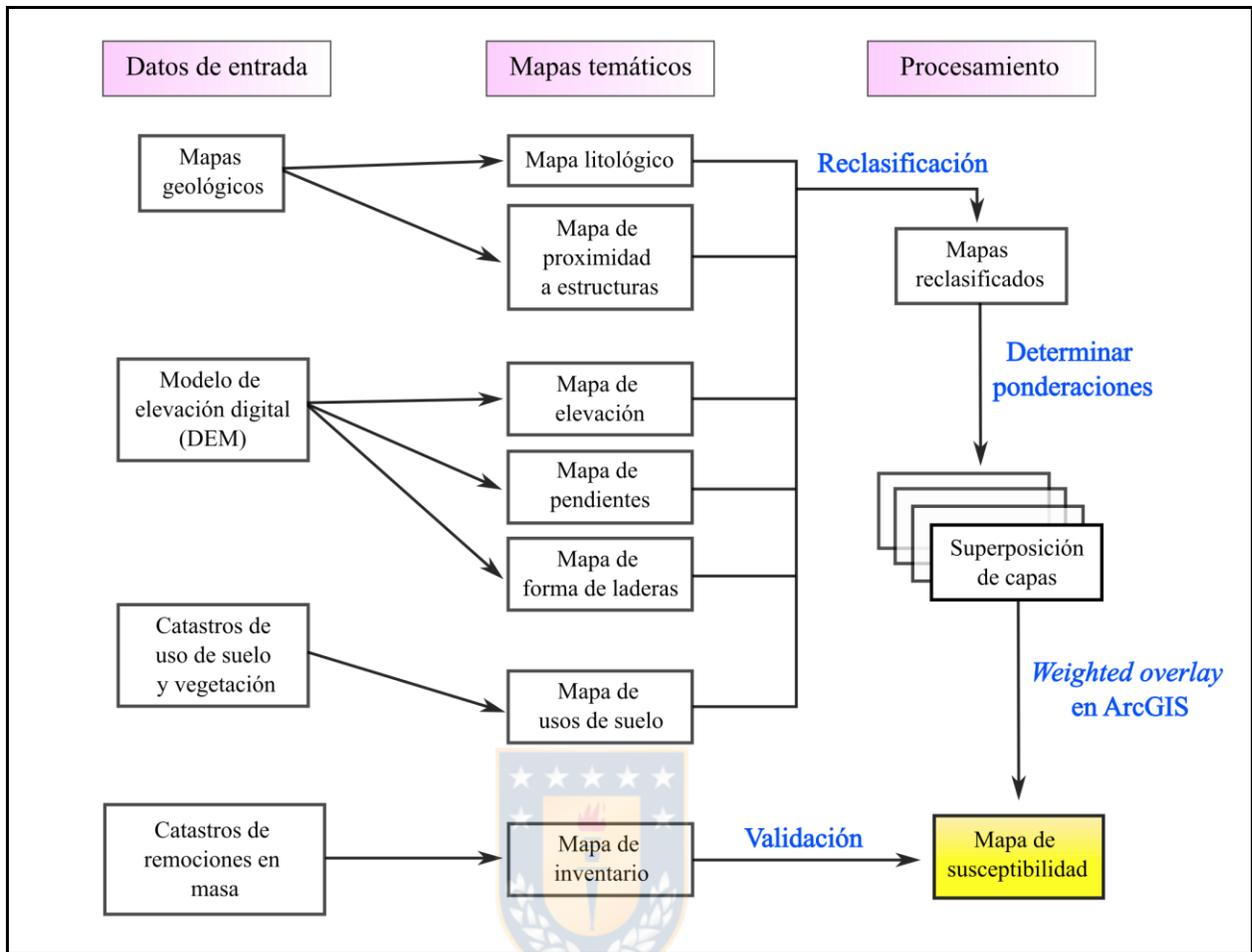


Figura 4.1: Diagrama de flujo del análisis de susceptibilidad. El diagrama ilustra los distintos pasos adoptados durante la metodología, desde la obtención de los datos al procesamiento de los mismos. Considerar que resultados del trabajo de campo también se utilizaron en el desarrollo de los mapas temáticos.

4.1.1.1. Selección de los factores condicionantes

La selección de los factores utilizados en el estudio se efectuó esencialmente en función de aquellos factores sobre los cuales se podía obtener información pertinente a partir de los recursos disponibles y del trabajo de campo. Además, la elección final también se hizo sobre la base de que estos hayan demostrado importancia en terreno.

Los factores condicionantes utilizados para desarrollar el análisis de susceptibilidad fueron clasificados en tres grupos; factores geotécnicos, topográficos y antropogénicos. Los factores geotécnicos, engloban aspectos litológicos (tipo y calidad de roca) y estructurales (proximidad a fallas). Los factores topográficos incluyen la elevación, la pendiente y la forma de las laderas. Finalmente, el factor antropogénico hace referencia a las variaciones en los usos de suelo.

4.1.1.2. Preparación de los mapas temáticos

Toda la información recopilada (tanto de literatura como aquella derivada del producto de este mismo trabajo) referente a los factores condicionantes seleccionados fue digitalizada a través del programa ArcGIS. Posteriormente, dichos resultados fueron procesados y preparados en las distintas capas temáticas requeridas para el análisis de susceptibilidad a través de la utilización del mismo programa.

En detalle, respecto a la obtención y utilización de los datos de los distintos factores condicionantes seleccionados cabe mencionar que:

Los factores geotécnicos se obtuvieron conjuntamente a partir de mapas geológicos e informes técnicos del área de estudio, más la información litológica y estructural recopilada en terreno. A partir de estos datos, fueron hechos los mapas de litología y proximidad a estructuras. En particular, para la construcción del mapa de proximidad a estructuras se utilizó la herramienta de geoprocesamiento *euclidean distance* integrada en ArcGIS.

Los factores topográficos derivan de un modelo de elevación digital (DEM) de alta resolución (20 cm/pix) que fue hecho con datos tomados en terreno en el contexto de un levantamiento fotogramétrico realizado con un dron DJI Phantom 3 Professional. Fueron tomadas alrededor de 2.400 fotografías aéreas distribuidas a lo largo de once misiones de vuelo previamente planificadas en el programa Pix4Dcapture. El procesamiento de las fotografías se realizó en el programa Agisoft Metashape. Con base en el DEM construido, se confeccionaron los mapas de elevación, pendientes y forma de laderas.

Por último, la información de los usos de suelo fue adquirida desde el catastro de uso de suelo y vegetación de la CONAF, el cual se encuentra descargable en formato *shape*. Estos datos fueron usados para realizar el mapa de usos de suelo del área.

4.1.1.3. Reclasificación de factores condicionantes

Con el objetivo de poder contrastar y ponderar la información de los mapas mencionados anteriormente, es necesario definir una escala común que permita establecer dichas comparaciones. De esta forma, se reclasifican las clases de cada una de las capas temáticas según una escala que consta de cuatro niveles; muy baja a baja, moderada, alta y muy alta susceptibilidad (Tabla 4.1).

Tabla 4.1: Escala de niveles de susceptibilidad según factor condicionante. La escala fue construida considerando como guías los trabajos de Mardones y Vidal (2001), D'Amato Avanzi y otros (2004), Chen y otros (2011), Kayastha y otros (2013), López (2013), Borgomeo y otros (2014) y Henríquez (2019).

Niveles de susceptibilidad	Litología	Proximidad a estructuras (m)	Elevación (m s.n.m.)	Pendiente	Forma de laderas	Usos de suelo
Muy baja a baja	Roca sana, bajo contenido de arcilla, alta competencia	>100	<30	<10°	Convexa	Bosques naturales, cuerpos de agua
Moderada	Roca fracturada, moderado contenido de arcilla, alta competencia	50-100	30-60	10-20°	Plano-convexa	Praderas y matorrales, terrenos agrícolas
Alta	Roca alterada y/o fracturada, alto contenido de arcilla, baja competencia	25-50	60-90	20-30°	Plano-cóncava	Plantaciones forestales
Muy alta	Roca muy alterada y/o muy fracturada, alto contenido de arcilla, baja competencia	<25	>90.	>30°	Cóncava	Áreas urbanizadas

Nota: El contenido de arcilla es aplicable solo a rocas sedimentarias. El grado de alteración y/o meteorización en la escala se basa en una simplificación de la clasificación propuesta en ISRM (1981).

Los niveles muy bajo a bajo reflejan una probabilidad de ocurrencia de remociones en masa limitada a la acción de fuertes factores desencadenantes como lluvias muy intensas o cambios muy drásticos en los usos de suelo. Por otro lado, un nivel moderado significa que frente a agentes desencadenantes dichas zonas experimentarían un número limitado de remociones en masa. Las categorías alta y muy alta reflejan que ocurrirá un número considerable de remociones en dichas áreas, incluso en presencia de factores desencadenantes débiles o de poca intensidad.

4.1.1.4. Determinación de ponderaciones para cada factor condicionante

El AHP es un método semicuantitativo utilizado en diversos análisis de susceptibilidad (Ayalew y otros, 2004; López, 2013; Basharat y otros, 2016; Saleem y otros, 2020). Se asigna un peso o valoración a cada uno de los factores condicionantes relativo al resto de los parámetros utilizados a través de una matriz de comparación de a pares (Saaty, 2004; Saaty, 2008). Así, cada factor condicionante es valorado según una escala numérica (Tabla 4.2) en contra del resto de factores de la matriz, expresando que tanto más o menos importante es dicho factor frente a aquél con el cual se esté comparando.

Tabla 4.2: Escala de Saaty. Modificada de Saaty (2008).

Escala	Definición	Explicación
1	Igualmente importantes	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo
3	Moderadamente importante	Preferencia leve de un elemento sobre otro
5	Fuertemente importante	Preferencia fuerte de un elemento sobre otro
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Preferencia muy fuerte de un elemento sobre otro. Predominancia demostrada
9	Importancia extremadamente fuerte	Preferencia clara y absoluta de un elemento sobre el otro
2,4,6,8	Niveles intermedios de los valores anteriores	

En el contexto del trabajo, cuando alguno de los factores ubicados en el eje vertical de la matriz fue considerado más importante que el factor en el eje horizontal con el cual se comparó, dicha comparación adoptó valores entre 1 y 9 (relación directamente proporcional). En contraste, si el factor del eje vertical era considerado como de menor importancia que el factor en el eje horizontal con el cual se comparó, la valoración asignada en este caso se movió entre 1/2 y 1/9 (relación inversamente proporcional). Para realizar las comparaciones fue tomada en consideración la información recopilada tanto de literatura como las impresiones de terreno. Una vez establecida la matriz (Tabla 4.3), se calcularon matemáticamente las ponderaciones (Anexo A). Para asegurarse de que haya habido consistencia en las valoraciones efectuadas se calculó el parámetro *consistency ratio* (CR).

Tabla 4.3: Matriz de comparación de a pares. En la figura se muestran las valoraciones establecidas entre los criterios, así como las ponderaciones obtenidas una vez aplicado el método considerando los datos de la matriz. El CR calculado fue de 0,08 (juicios fueron consistentes).

Criterios	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	Ponderación resultante
[1]Litología	1	5	1/3	6	7	5	0,278 (28%)
[2]Proximidad a estructuras	1/5	1	1/7	3	3	2	0,100 (10%)
[3]Pendiente	3	7	1	7	9	6	0,464 (46%)
[4]Elevación	1/6	1/3	1/7	1	2	1/2	0,050 (5%)
[5]Forma de laderas	1/7	1/3	1/9	1/2	1	1/3	0,033 (3%)
[6]Usos de suelo	1/5	1/2	1/6	2	3	1	0,076 (8%)

Luego de haber definido las ponderaciones para cada factor condicionante, se realiza la superposición de los mapas temáticos reclasificados considerando los valores obtenidos. La ponderación se hizo a través de la herramienta *weighted overlay* disponible en el programa ArcGIS.

4.1.1.5. Validación del mapa de susceptibilidad

Existen distintas formas de validar un mapa de susceptibilidad frente a remociones en masa. Una de ellas, consiste en verificarlos con información de terreno, pero sobre la base de remociones en masa que ocurrieron en el pasado (Kayastha y otros, 2013). Así, comúnmente se utilizan mapas de inventario los cuales se contrastan con el mapa de susceptibilidad para observar si existe o no una correlación positiva en términos de posición, número de eventos y las zonas de mayor susceptibilidad (Kayastha y otros, 2013; Awawdeh y otros, 2018; Saleem y otros, 2020). En este trabajo, se adoptó esta alternativa donde el mapa de inventario utilizado se construyó a partir de los eventos de remociones en masa documentados durante el trabajo de campo realizado en el área de estudio.

4.2. Evaluación del peligro frente a remociones en masa

El peligro frente a remociones en masa se define a partir de que tan probable es la ocurrencia de dichos eventos en un área determinada durante un periodo específico de tiempo. De esta forma, el peligro puede ser obtenido a partir del análisis de las probabilidades espacial y temporal de estos fenómenos.

En términos prácticos, la probabilidad espacial queda caracterizada en los resultados del análisis de susceptibilidad. Por otra parte, la probabilidad temporal es calculada matemáticamente a partir de los datos relativos al factor desencadenante considerado en el estudio y la relación de estos con la recurrencia histórica de los eventos de remociones en masa en el área. La metodología utilizada para calcular esta última probabilidad es descrita en los siguientes subcapítulos.

4.2.1. Estimación de la probabilidad temporal de ocurrencia de remociones en masa

4.2.1.1. Selección del factor desencadenante

La literatura, datos históricos, archivos de prensa y entrevistas a pobladores han permitido establecer la existencia de una correlación directa entre las remociones en masa que han ocurrido en Cocholgué y los periodos de lluvia prolongados (Mardones y Vidal, 2001; Cuevas, 2012). Se destaca un periodo de lluvias torrenciales durante varios días del mes de julio de 2006, el cual detonó uno de los acontecimientos más importantes de remociones en masa en el lugar, marcando un antes y un después en la forma de abordar esta problemática en la zona (Cuevas, 2012).

Cuevas (2012), comprueba estadísticamente la correlación antes mencionada utilizando un modelo de regresión lineal aplicado a los datos de precipitaciones como variable independiente y al número de eventos de remociones en masa como variable dependiente, calculando el coeficiente de determinación (R^2) respectivo.

Por estas razones, en este trabajo se optó por utilizar las precipitaciones intensas como el factor desencadenante principal.

4.2.1.2. Determinación de umbrales críticos

Un umbral constituye el nivel mínimo o máximo necesario para que un proceso ocurra o entre en un estado de cambio. El umbral mínimo define el nivel más bajo por debajo del cual dicho proceso no ocurre, mientras que el umbral máximo representa el nivel por sobre el cual el proceso siempre ocurrirá (Guzzetti y otros, 2007). De esta forma, los umbrales críticos corresponderán a las cantidades de lluvia mínima y máxima necesaria en un periodo de tiempo dado para que ocurran remociones en masa.

En el contexto de esta investigación, se trabajó con un umbral máximo obtenido a partir de información de literatura. La cifra correspondiente a este umbral es de 100 mm de lluvia acumulada en un lapso de 72 horas. Este valor fue definido tomando como base el trabajo de Mardones y Vidal (2001), las cuales comprobaron en su investigación que los derrumbes se intensifican en el área metropolitana de Concepción una vez se supera dicha cantidad.

4.2.1.3. Modelo de probabilidad de Poisson en el cálculo de la probabilidad temporal de ocurrencia de remociones en masa

El cálculo de la probabilidad se realizó aplicando un modelo de probabilidad que estima la ocurrencia de episodios de precipitaciones que excedan los mínimos definidos en el área para producir remociones en masa conforme pase el tiempo. Metodologías similares han sido adoptadas en otros trabajos para calcular esta probabilidad asociada a precipitaciones (Bui y otros, 2013; Wu y Chen, 2013).

Para poder cuantificar la probabilidad temporal de ocurrencia de remociones en masa se plantean las siguientes asunciones: 1) la probabilidad de ocurrencia de un evento de remociones en masa se relaciona directamente con la probabilidad de ocurrencia del umbral crítico, y 2) no ocurrirán u ocurrirán muy raramente eventos de remociones en masa cuando los valores de precipitaciones se encuentren por debajo del umbral utilizado (Chleborad y otros, 2006).

De acuerdo a Crovelli (2000), la probabilidad de que n eventos de remociones en masa ocurran durante un tiempo t puede ser estimada usando una función de distribución de Poisson como la mostrada a continuación:

$$P(N(t) = n) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

con $N(t)$ como el número de remociones ocurridas durante un tiempo t , λ es la tasa de ocurrencia de remociones promedio.

De (1), se desprende que la probabilidad de que una o más remociones en masa ocurran durante un tiempo t (la cual se denomina probabilidad de excedencia), puede ser estimada a partir de la siguiente ecuación:

$$P(N(t) > 1) = 1 - \text{Exp}(-t/\mu) \quad (2)$$

donde μ se define como el intervalo de recurrencia futuro promedio y $\mu = \lambda^{-1}$; t en este caso es el periodo de tiempo en el futuro para el cual la probabilidad de excedencia es calculada.

El intervalo de recurrencia futuro promedio es estimado usando los datos históricos de precipitaciones asumiendo que la ocurrencia futura de remociones en masa se seguirá comportando igual respecto a como ya lo ha hecho en el pasado (Crovelli, 2000). Los datos utilizados fueron tomados desde la estación Dichato de la DGA para un periodo de 20 años (2000-2020).

4.2.1.4. Análisis del peligro frente a remociones en masa

Dado que el análisis de susceptibilidad se hizo a partir de métodos semicuantitativos, el análisis final del peligro frente a remociones en masa se hizo en torno a esta misma línea metodológica. En particular, este se realizó a partir de la integración de las diferentes zonas del mapa de susceptibilidad producido en este mismo trabajo, con la información referente a la probabilidad de excedencia calculada según lo estipulado en (2).

5. RESULTADOS

5.1. Análisis de susceptibilidad

5.1.1. Antecedentes de los factores condicionantes

5.1.1.1. Factores geotécnicos

Litología

Los diferentes grupos de rocas que afloran en el área de estudio son clasificados adoptando los nombres de las formaciones previamente definidas en el área de estudio por trabajos anteriores (Figura 5.1). La descripción de terreno de cada una de las litologías queda detallada en los párrafos siguientes.

Basamento Metamórfico: Estas rocas solo fueron observadas en un solo afloramiento, en el cual se describieron únicamente filitas de color gris oscuro a negro. Además, se pudo observar un abundante desarrollo de vetillas de cuarzo de segregación. Esta unidad fue observada infrayaciendo en inconformidad a las rocas de la Fm. Quiriquina (Figura 5.2). Por otro lado, cabe mencionar que el afloramiento se encontraba topográficamente casi al nivel del mar.

Fm. Quiriquina: Secuencia sedimentaria compuesta casi en su totalidad por areniscas, más un conglomerado basal que marca el inicio de la formación. La orientación promedio de rumbo y manteo medida para estos estratos es de N5°W/9°SW. Las areniscas son fosilíferas y presentan una coloración verdosa en caras frescas, adquiriendo un color amarillo a pardo en caras alteradas. Desde el punto de vista granulométrico, estas son de grano medio a fino, lo que es un rasgo que se mantiene prácticamente a lo largo de toda la columna estratigráfica. Dentro de las estructuras sedimentarias presentes, destaca la laminación paralela en el grueso de la columna junto a la estratificación cruzada planar y en artesa las cuales se vuelven más comunes hacia techo. Adicionalmente, en algunas zonas del acantilado se pueden encontrar niveles de concreciones calcáreas dispuestas de forma paralela a la orientación de la estratificación.

Las rocas de esta formación se encuentran distribuidas espacialmente a lo largo de todo el acantilado costero del área, alcanzando las partes medias-altas de dicha geomorfología. El grado

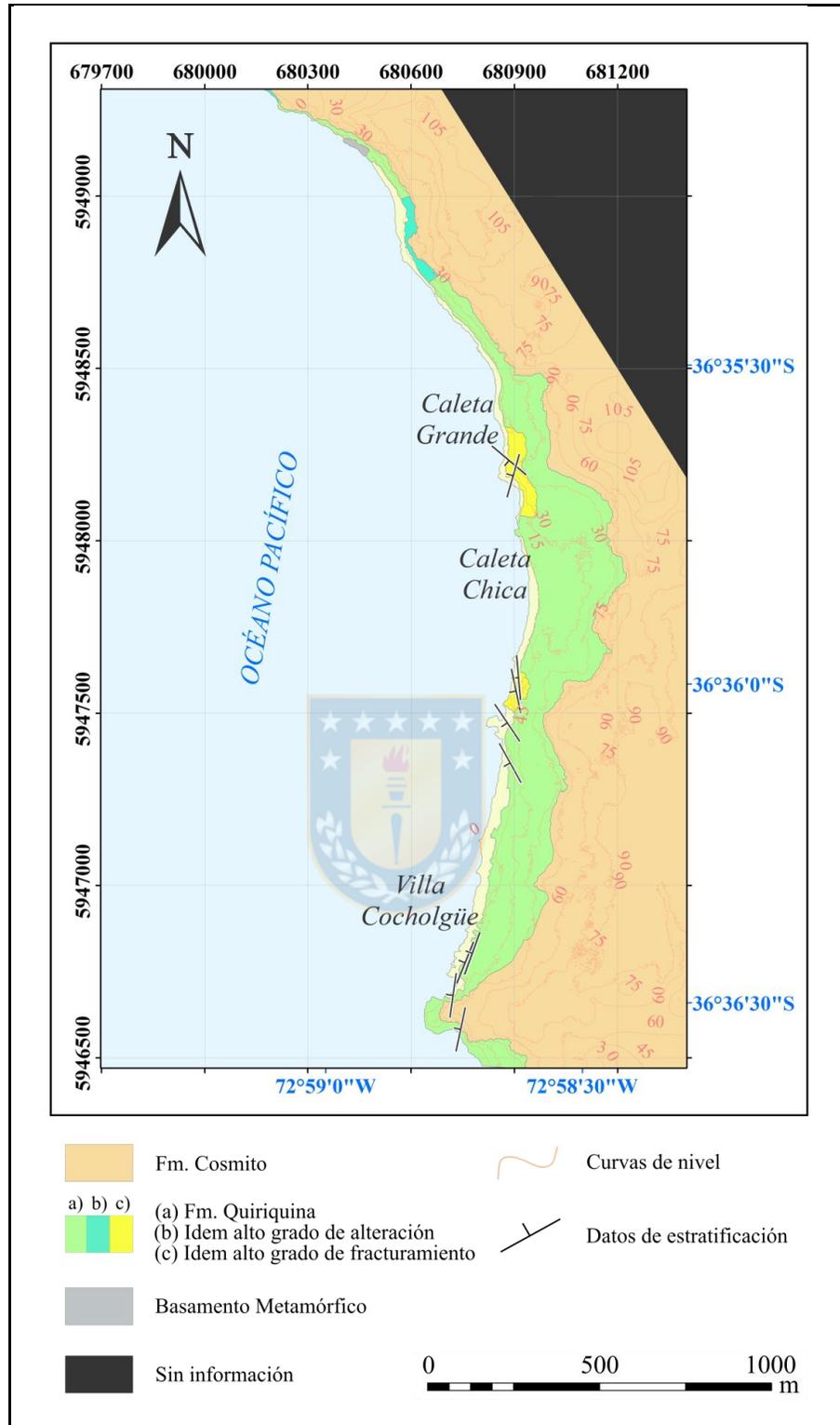


Figura 5.1: Mapa litológico de Cocholgué. En el mapa se observan las principales unidades litológicas que afloran en la localidad de Cocholgué. También se presentan aquellas zonas en las que se pudieron observar variaciones marcadas en el grado de alteración y/o fracturamiento.



Figura 5.2: Contacto entre Basamento Metamórfico y Fm. Quiriquina. Parte inferior; filitas negras del Basamento Metamórfico. Parte superior; conglomerado basal de la Fm. Quiriquina.

de alteración y meteorización presente en las rocas es variable, pero a grandes rasgos se puede definir un grado de alteración moderado, el cual corresponde a la expresión del efecto constante que tiene la erosión marina en las paredes del acantilado. Es necesario destacar que en algunas zonas puntuales del acantilado se pudo observar un alto grado de alteración (Figura 5.3a). Referente al nivel de fracturamiento, la tónica general de los afloramientos no evidencia un diaclasado muy intenso, pero similar a lo ocurrido con el grado de alteración, existen zonas particulares donde la cantidad y densidad de las diaclasas alcanzan un nivel de fracturamiento más alto (Figura 5.3b). No se presenta un gran desarrollo de suelo, con la excepción de lugares en los cuales fueron identificados paleodeslizamientos.

Fm. Cosmito: Se encuentra sobreyaciendo en paraconformidad a las rocas de la Fm. Quiriquina. Aflora como un paquete de areniscas de grano medio intercaladas con pequeños niveles decimétricos de fangolitas de color blanco. En algunos derrumbes, fue posible identificar un

abundante contenido de materia orgánica y lutitas carbonosas. Esto se sustenta bien con el hecho de que, en el extremo norte del acantilado, se pueden encontrar niveles de lutitas oxidadas y un manto de carbón, sobreyaciendo areniscas (J.A. Quezada, comunicación personal, 5 de enero de 2021).

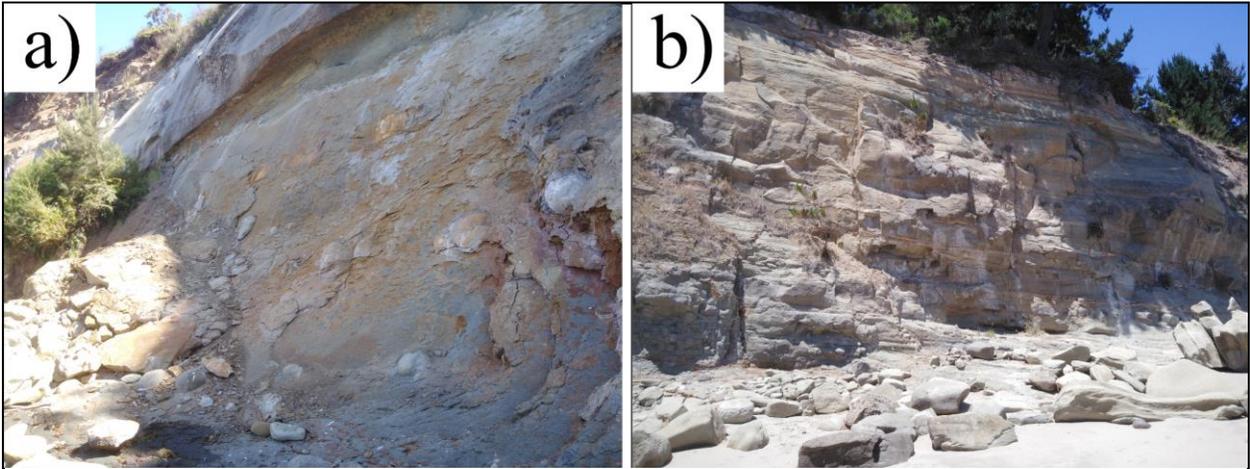


Figura 5.3: Afloramientos debilitados en Fm. Quiriquina. a) Afloramiento altamente alterado en el cual se puede observar cómo se “descascara” la roca desde la pared del acantilado. b) Diaclasas afectando areniscas. Asociados a dichas estructuras también se puede ver un pequeño depósito de caída de rocas.

Las litologías de esta formación se encuentran restringidas topográficamente a la parte más alta del acantilado costero. El grado de alteración presente en estas rocas se define como moderado a alto. Esto queda caracterizado en la oxidación presente en el material desprendido de los derrumbes. No se describen sistemas de diaclasas importantes para esta formación. En contraste con las rocas de Fm. Quiriquina, aquí si se puede ver un desarrollo de suelo considerable, el cual tiene espesores variables estimados dentro del rango de los 1-4 m.

Estructuras

Se midieron un total de diez fallas las que solo fueron encontradas afectando a las unidades sedimentarias del área de estudio (Figura 5.4). En algunos casos, las estructuras se encuentran formando parte de sistemas de fallas conjugados en los cuales solo fue tomada la medida del plano de mayor importancia.

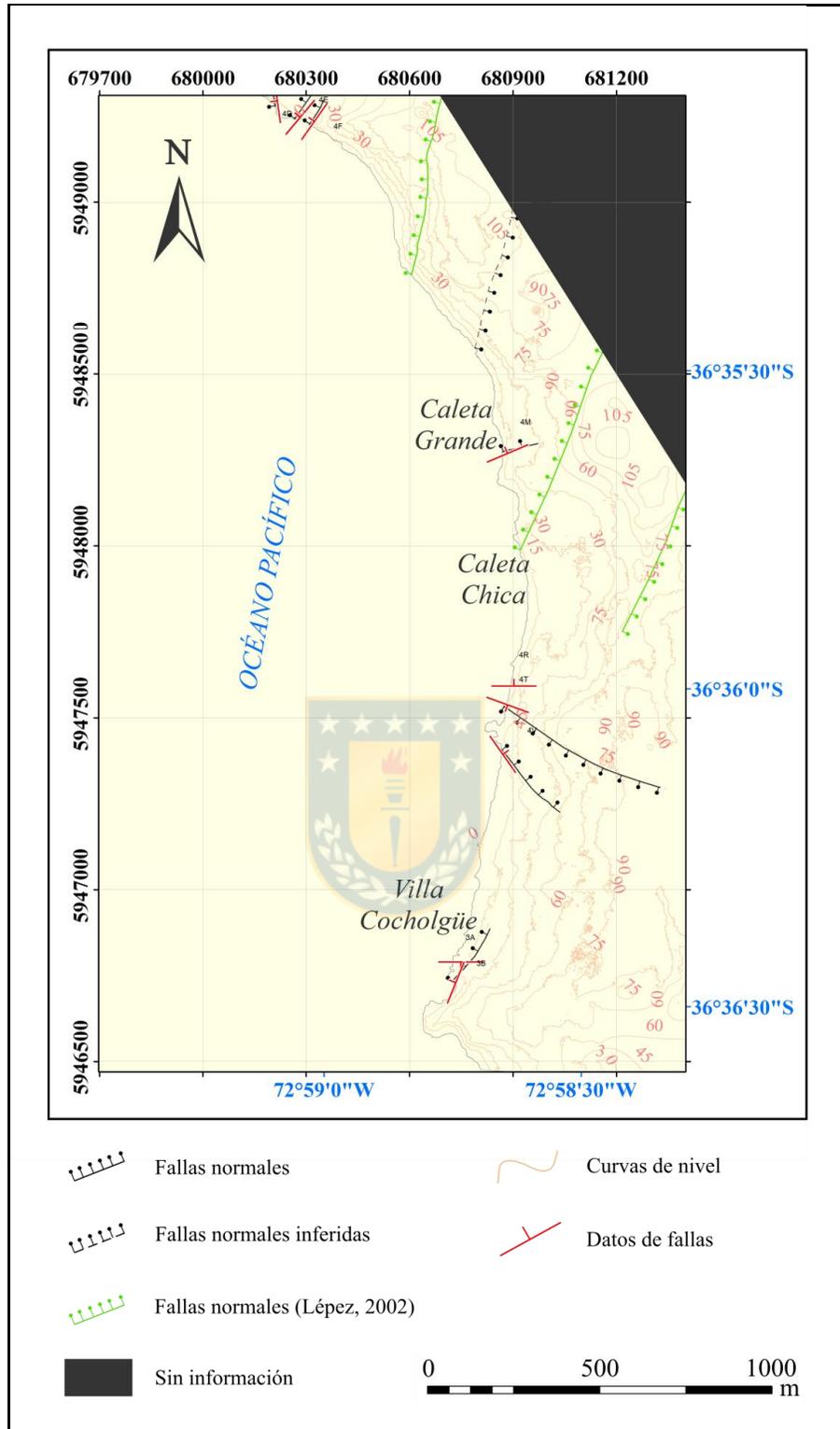


Figura 5.4: Mapa estructural de Cocholgüe. Principales fallas presentes en el área de estudio. Las estructuras fueron trazadas conjuntamente con mediciones de terreno, mapa de lineamientos e información bibliográfica.

Respecto a los planos, estos se caracterizan por ser continuos, tener longitudes métricas y estar asociados a zonas de daño angostas, además de presentar frecuentemente rellenos minerales y/o salbanda de falla (Figura 5.5). A lo largo de estos se pudieron observar principalmente desplazamientos decimétricos y en menor medida desplazamientos métricos (Figura 5.6), lo cual junto a la información de literatura permite determinar la cinemática ya mencionada. Es importante hacer notar que también se identificó la presencia de estrías asociadas a algunos planos, pero estas no siempre estaban presentes.

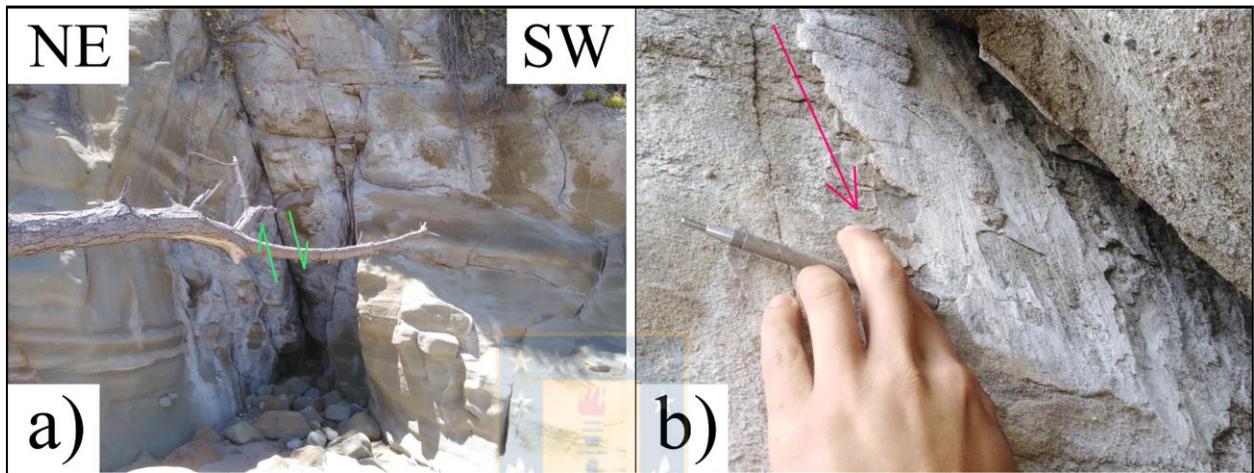


Figura 5.5: Falla normal en Cocholegüe. a) Trazo de falla la cual se encuentra asociada a una pequeña zona de fracturamiento. b) Acercamiento al plano de falla, donde se pueden ver estrías y rellenos minerales. La dirección de la flecha marca la orientación de las estrías, mientras que el sentido de la flecha caracteriza la cinemática que determinan los escalones.

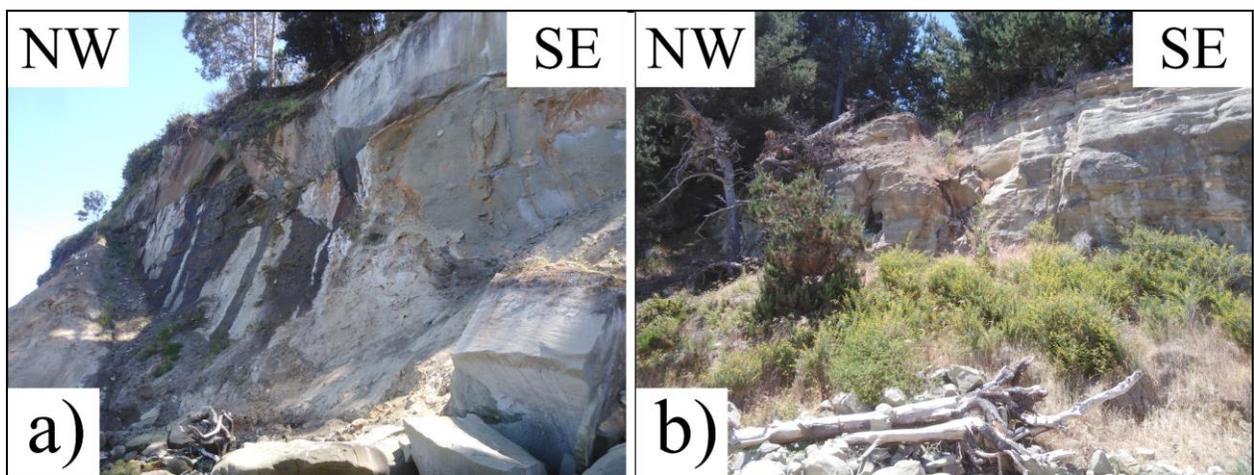


Figura 5.6: Estructuras con desplazamientos apreciables. a) Falla lítrica afectando rocas de Fm. Cosmito y Fm. Quiriquina. Se puede ver un desplazamiento del orden métrico en nivel guía. b) Hemigraben afectando rocas de Fm. Cosmito, con desplazamiento decimétrico. Asociado a la estructura, también se identifica la formación de un anticlinal roll-over (J.A. Quezada, comunicación personal, 5 de enero de 2021).

Es posible distinguir tres grupos de fallas los cuales quedan definidos según sus orientaciones preferenciales respectivas (Figura 5.7). El primer grupo está representado por las estructuras orientadas según rumbos NE-SW constituyendo las fallas de mayor envergadura en el área. El segundo grupo queda caracterizado por las estructuras orientadas según direcciones NW-SE a WNW-ESE siendo este el siguiente en orden de importancia. El último grupo corresponde a estructuras dispuestas según rumbos N-S.

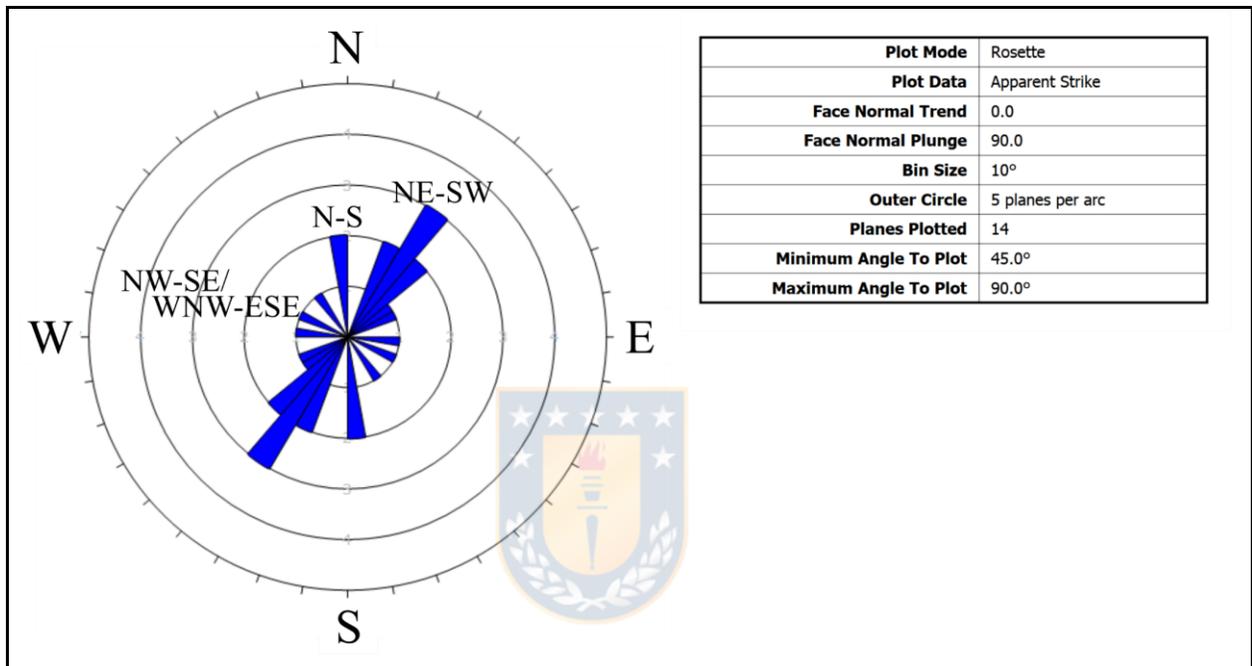


Figura 5.7: Diagrama de roseta para las fallas medidas en terreno. En el diagrama quedan ilustradas las tres orientaciones principales de la zona. Notar que en el diagrama de roseta se utilizó la totalidad de los datos tomados en terreno incluyendo en algunas ocasiones más de un dato medido por estructura.

Otro aspecto importante de las fallas, tiene que ver con su vergencia. Debido a que el grupo de mayor predominancia en la zona corresponde a las estructuras con rumbos NE-SW, la mayor cantidad de las fallas presenta vergencias repartidas hacia el noroeste o el sureste. Esta distribución, da como resultado la formación de varios sistemas de *horst* y *graben* en el acantilado costero (Figura 5.4), lo cual además repercute en los pequeños cambios que se aprecian en los basculamientos de los estratos (mediciones oscilan dentro del rango 6-15°).

5.1.1.2. Factores topográficos

Elevación

El valor máximo que alcanza este factor en el área de estudio es de 115 m s.n.m. aproximadamente (Figura 5.8a). La elevación promedio corresponde a 75 m s.n.m. lo cual se correlaciona directamente con la presencia del acantilado costero que es el rasgo geomorfológico predominante en términos de extensión areal en el lugar. Las alturas mínimas son percibidas a lo largo de la línea de costa y estas comienzan a ascender de forma continua al comenzar a desplazarse hacia el este. Por otro lado, las alturas máximas son encontradas en la porción más septentrional del acantilado, estando muchas veces adyacentes a zonas urbanizadas como ocurre en los casos de Caleta Grande y Caleta Chica.

Pendiente

Las pendientes en el sector llegaron a alcanzar valores máximos que rondan en torno a los 90° de inclinación. En contraste, el promedio de los valores de inclinación de las pendientes es mucho menor correspondiendo solo a 16°. Esta diferencia entre los valores máximos y el promedio queda evidenciada al analizar la distribución espacial de las pendientes, observando que aquellas que son más abruptas tienden a estar concentradas en zonas particulares del área, como por ejemplo en el borde del acantilado costero. (Figura 5.8b).

Forma de laderas

No se observa una gran variación espacial en las formas de las laderas dentro del área (Figura 5.8c). Las formas puramente cóncavas o convexas son poco frecuentes y la mayor parte de las laderas recaen dentro de formas de tipo mixto ya sea plano-cóncavas o plano-convexas. Sin embargo, durante el trabajo de terreno, se pudo apreciar la ocurrencia de laderas cóncavas de mayor orden, las cuales se encontraban asociadas a los sectores sobre los cuales se asientan las caletas Grande y Chica.

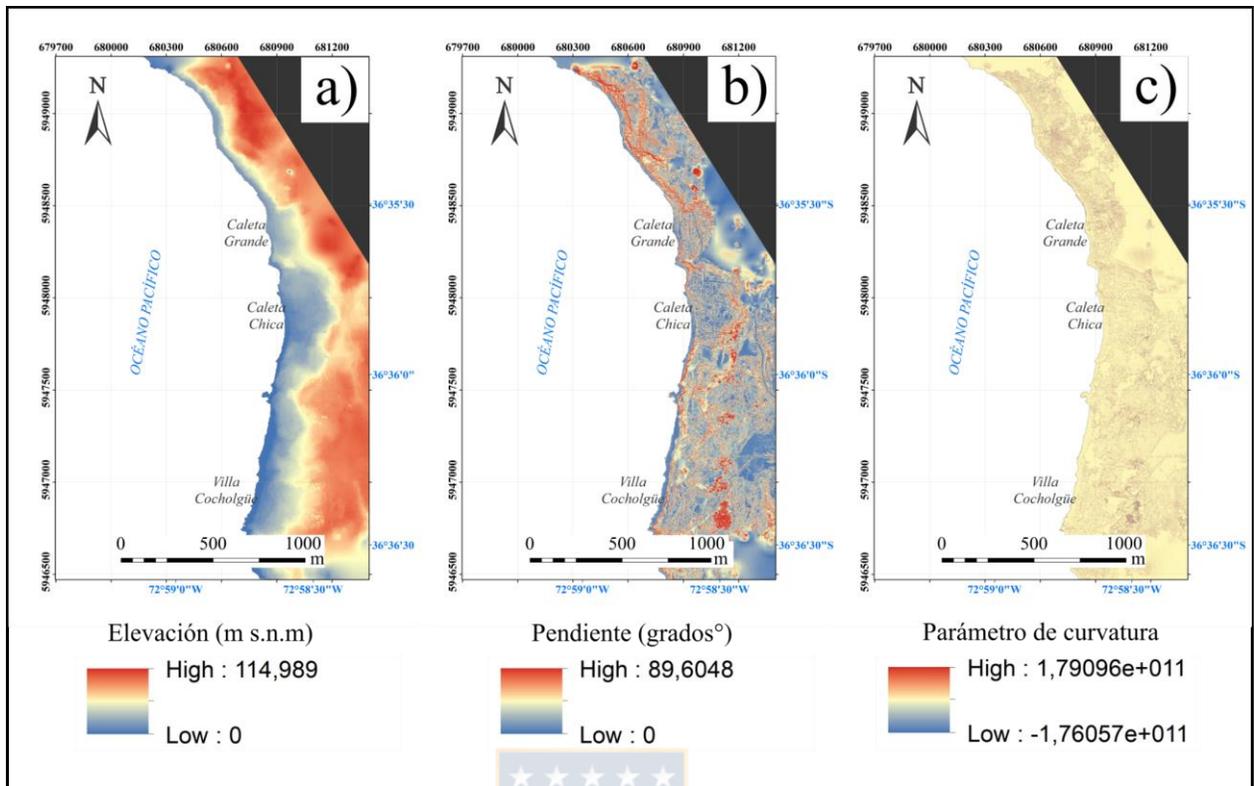


Figura 5.8: Mapas temáticos derivados del DEM confeccionado. a) Mapa de elevación. b) Mapa de pendientes. c) Mapa de forma de laderas. Los valores positivos del parámetro de curvatura reflejan laderas cóncavas. Por el contrario, los valores negativos representan superficies convexas.

5.1.1.3. Factor antropogénico

Usos de suelo

Se reconocen un total de cuatro usos de suelo dentro de la superficie estudiada (Figura 5.9). El primero corresponde al uso de áreas urbanas e industriales, el cual engloba los lugares ocupados por las ciudades, pueblos y las zonas industriales. Luego están los usos de bosques, que se subdividen en dos tipos; plantaciones forestales y bosques nativos. Respecto a las plantaciones forestales, la especie más frecuente es el eucalipto común (*Eucalyptus globulus*) seguida del pino insigne (*Pinus radiata*). Por otra parte, en los bosques nativos predomina la presencia del litre (*Lithraea caustica*). Finalmente, el último uso de suelo corresponde a las praderas y matorrales.

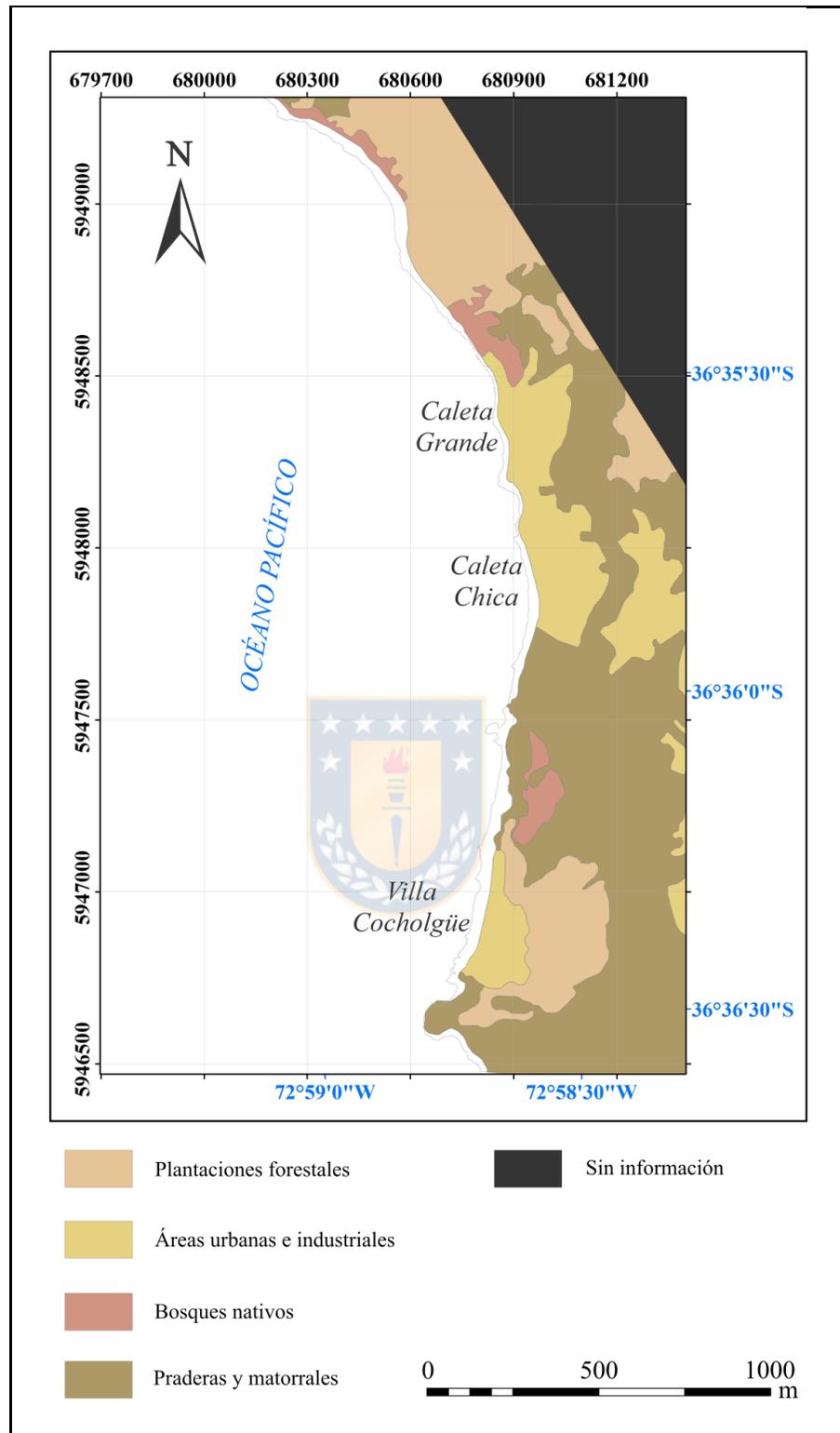


Figura 5.9: Mapa de usos de suelo. La figura muestra la distribución espacial de los distintos usos de suelo presentes en Cocholgue. Los *shapes* se obtuvieron desde el catastro de uso de suelo y vegetación de la CONAF.

5.1.2. Mapas temáticos reclasificados

A continuación, se presentan todos los mapas temáticos mostrados anteriormente reclasificados a partir de una escala de susceptibilidad común para cada uno de ellos. La explicación de las distintas clases que conforman la escala de susceptibilidad utilizada, así como los criterios guías y rangos relativos a los factores condicionantes se encuentran definidos en el apartado metodológico de este mismo informe.

5.1.2.1. Mapa litológico

Se asigna una susceptibilidad muy baja a baja a las rocas del Basamento Metamórfico debido a su alta competencia y posición topográfica desfavorable para los procesos de remoción en masa. Un nivel de susceptibilidad moderado es asignado a las rocas de la Fm. Quiriquina, con base en que presentaron una buena competencia y que no se encontraron siendo afectadas con gran intensidad por sistemas de diaclasas. Por otro lado, para las zonas particulares de dicha formación en las cuales fueron encontrados estados avanzados de fracturamiento y/o alteración se les asigno un nivel de susceptibilidad alto. Un nivel muy alto de susceptibilidad es asignado a las rocas de Fm. Cosmito, las que, por su posición topográfica, avanzado desarrollo de suelo y alto contenido de arcillas presentan condiciones ideales para la generación de remociones en masa. El mapa litológico reclasificado se puede ver en la Figura 5.10.

5.1.2.2. Mapa de proximidad a estructuras

La variación espacial de los distintos niveles de susceptibilidad de acuerdo al parámetro de proximidad a estructuras queda representada en la Figura 5.11. Se puede determinar que en el lugar existe una predominancia por parte de los niveles de susceptibilidad menos favorables para producir remociones en masa en términos de sus extensiones superficiales. Alrededor del 80% del área total estudiada corresponde a zonas de muy baja a baja susceptibilidad y moderada susceptibilidad, en donde estas a su vez se distribuyen dentro de dicha superficie según una razón de 2:1 respectivamente. En contraste, solo un 10% del área total quedo asignado dentro del nivel de muy alta susceptibilidad. Cabe mencionar la estrecha relación espacial en la que se encuentran las áreas urbanizadas del sector y las regiones de alta y muy alta susceptibilidad definidas según este factor.

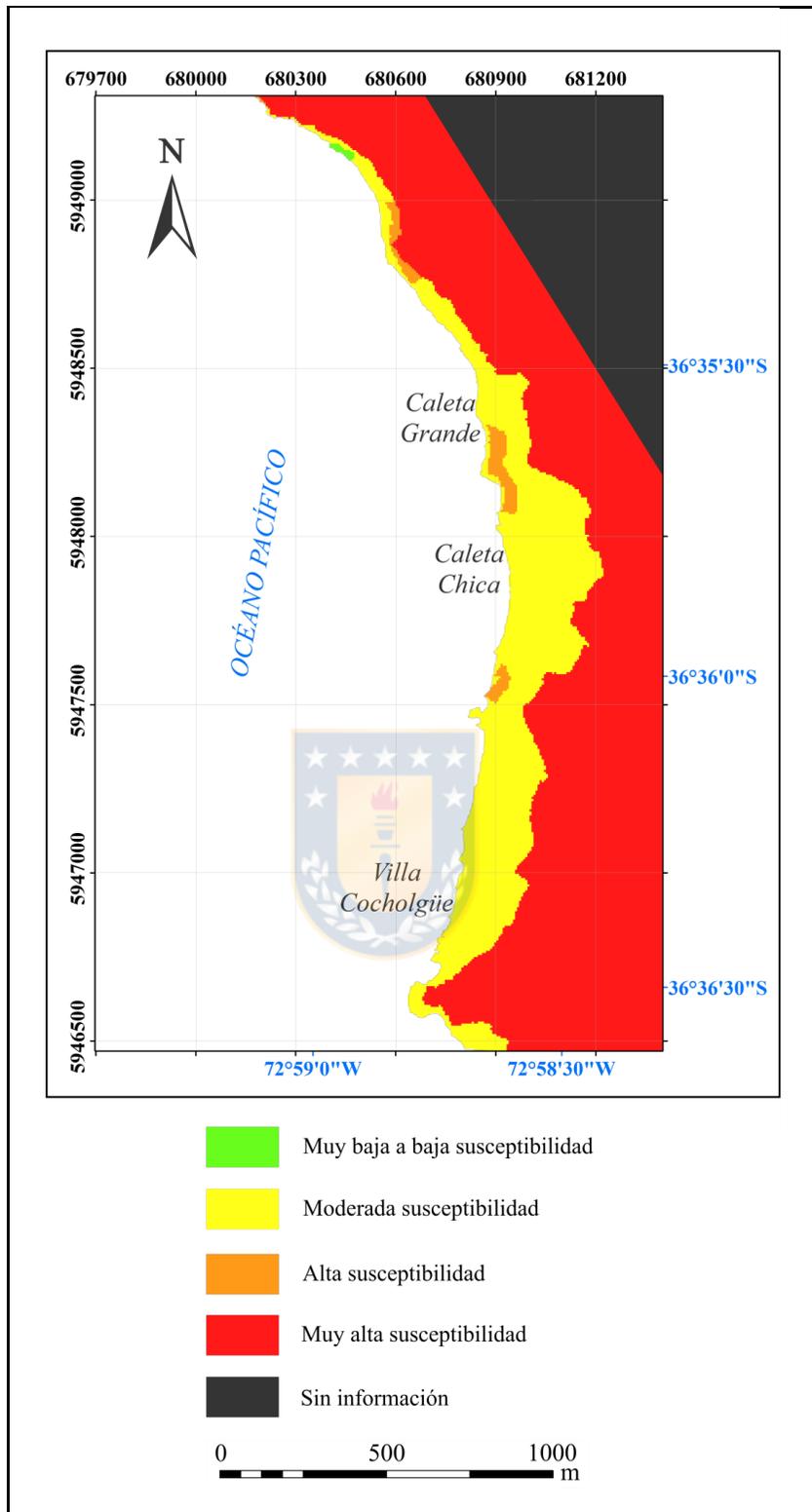


Figura 5.10: Mapa litológico reclasificado. Muy baja a baja susceptibilidad (Basamento Metamórfico), moderada susceptibilidad (Fm. Quiriquina), alta susceptibilidad (Zonas alteradas y/o diaclasadas de Fm. Quiriquina) y muy alta susceptibilidad (Fm. Cosmito).

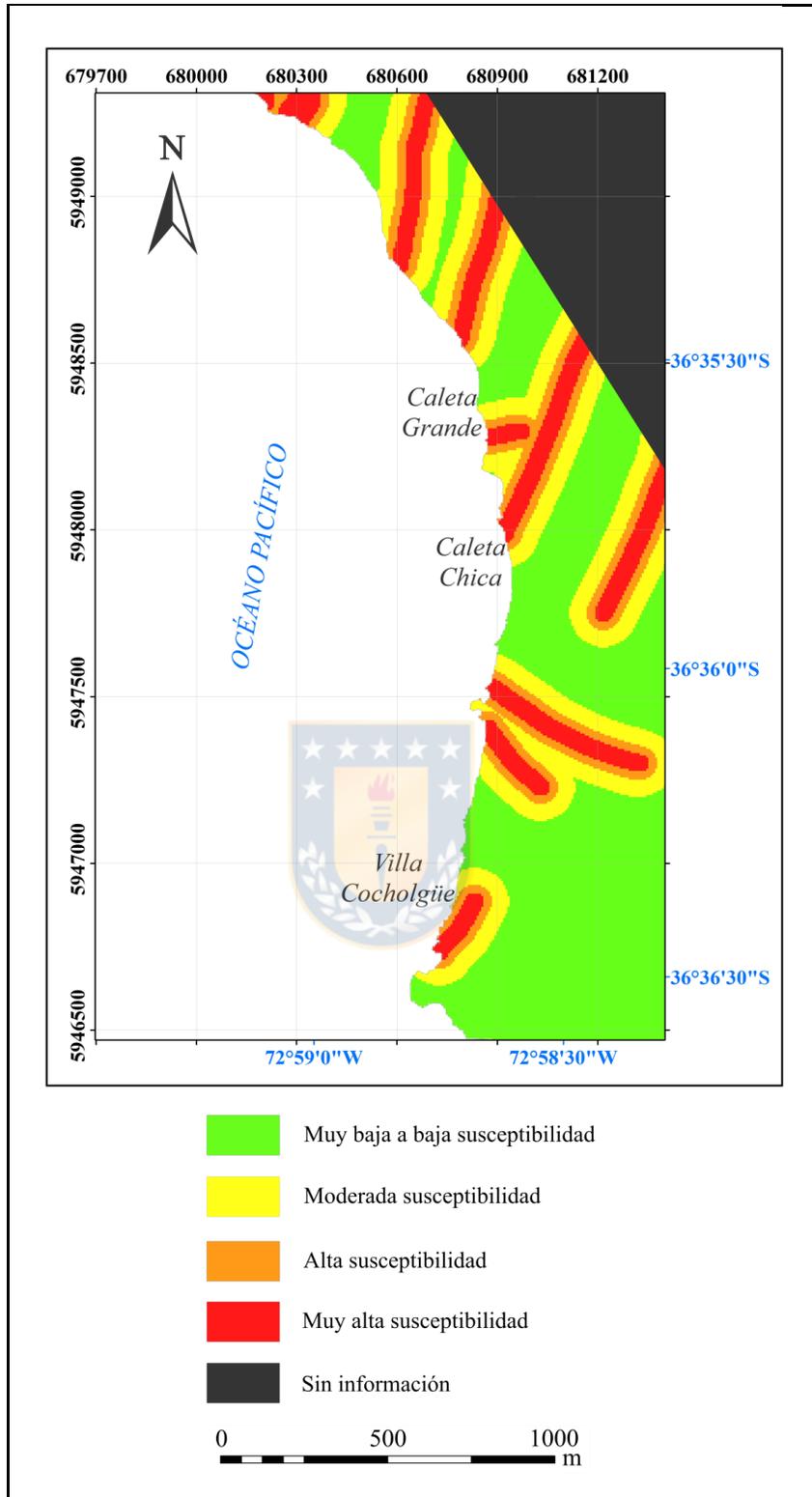


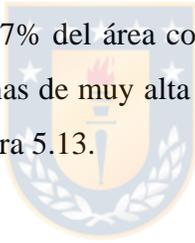
Figura 5.11: Mapa de proximidad a estructuras reclasificado. Muy baja a baja susceptibilidad (>100 m), moderada susceptibilidad (50-100 m), alta susceptibilidad (25-50 m) y muy alta susceptibilidad (<25 m).

5.1.2.3. Mapa de elevación

Se puede observar que los datos de elevación se distribuyen de manera homogénea a lo largo de los diferentes niveles de susceptibilidad comparativamente con la mayoría del resto de los factores condicionantes (Figura 5.12). Las elevaciones relacionadas a las zonas de muy baja a baja susceptibilidad se encuentran distribuidas a lo largo de un 12% del sector de estudio. Por otra parte, las regiones que recaen dentro del nivel de susceptibilidad moderada abarcan un 23%. Finalmente, las superficies ocupadas por las zonas de alta y muy alta susceptibilidad representan un 65% del área total. Las extensiones particulares de estas últimas corresponden a un 36% y 29% de la superficie total respectivamente.

5.1.2.4. Mapa de pendientes

De menor a mayor grado de susceptibilidad se tiene que: el 33% de la superficie total es ocupado por las zonas dentro de los niveles de susceptibilidad muy baja a baja, un 28% es abarcado por las zonas de susceptibilidad moderada, 17% del área corresponde a zonas de alta susceptibilidad, y finalmente un 22% corresponde a zonas de muy alta susceptibilidad. Estos valores se encuentran representados gráficamente en la Figura 5.13.



5.1.2.5. Mapa de forma de laderas

Existe una dominancia en términos de superficie por parte de las laderas con formas que han sido asignadas a los niveles intermedios de susceptibilidad por sobre las que pertenecen a los niveles extremos dentro de la escala (Figura 5.14). En particular, las laderas con una susceptibilidad moderada son las más extendidas dentro del terreno, cubriendo el 70% de la zona estudiada. En segundo lugar, están las laderas pertenecientes a un nivel de susceptibilidad alto, las cuales figuran un 29% de la superficie total. Las laderas con menor extensión, corresponden a aquellas a las cuales se les asignaron los niveles de muy baja a baja susceptibilidad y muy alta susceptibilidad, representando solo valores menores al 1% del área.

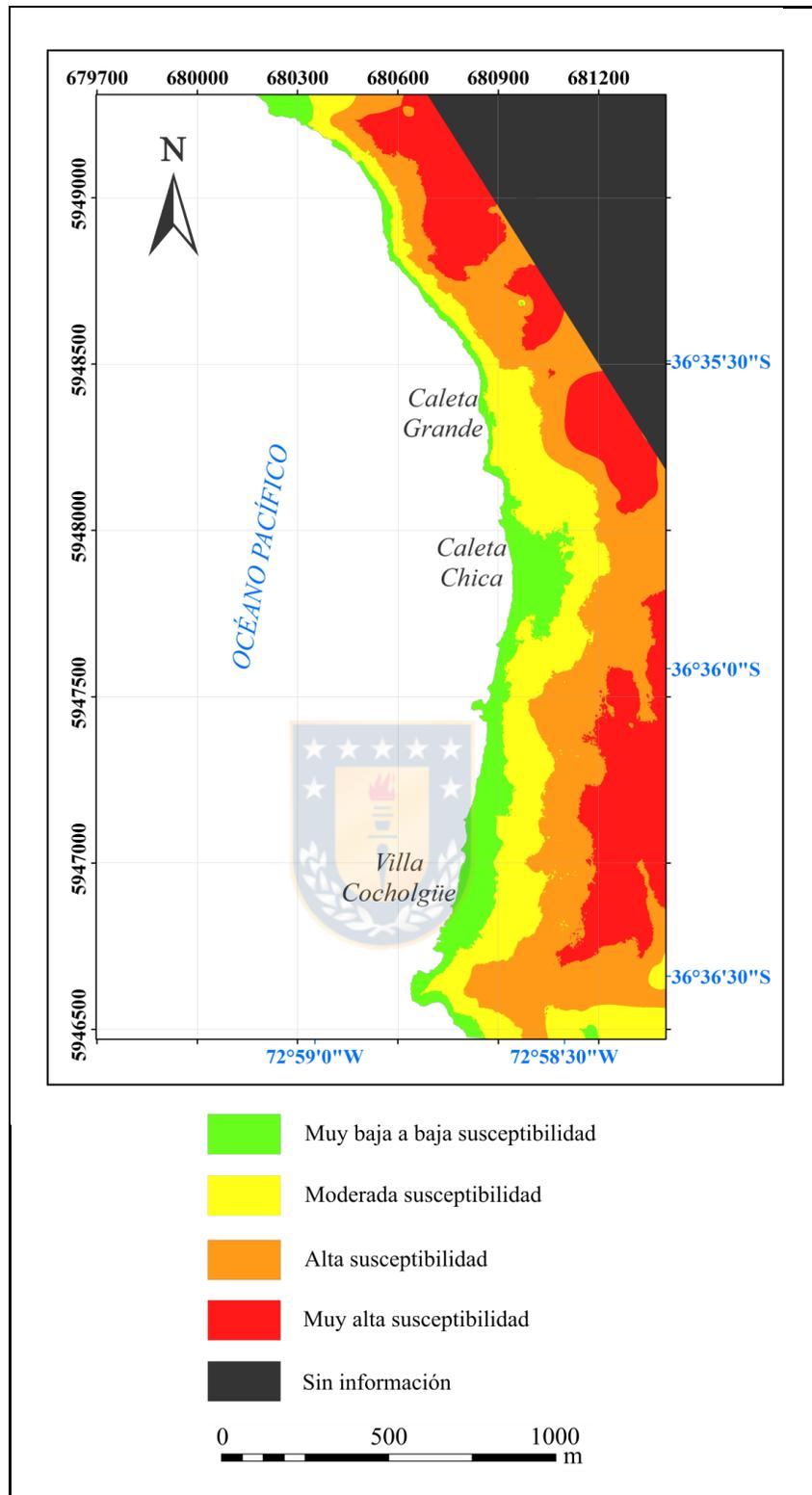


Figura 5.12: Mapa de elevación reclasificado. Muy baja a baja susceptibilidad (< 30 m s.n.m.), moderada susceptibilidad (30-60 m s.n.m.), alta susceptibilidad (60-90 m s.n.m.) y muy alta susceptibilidad (> 90 m s.n.m.).

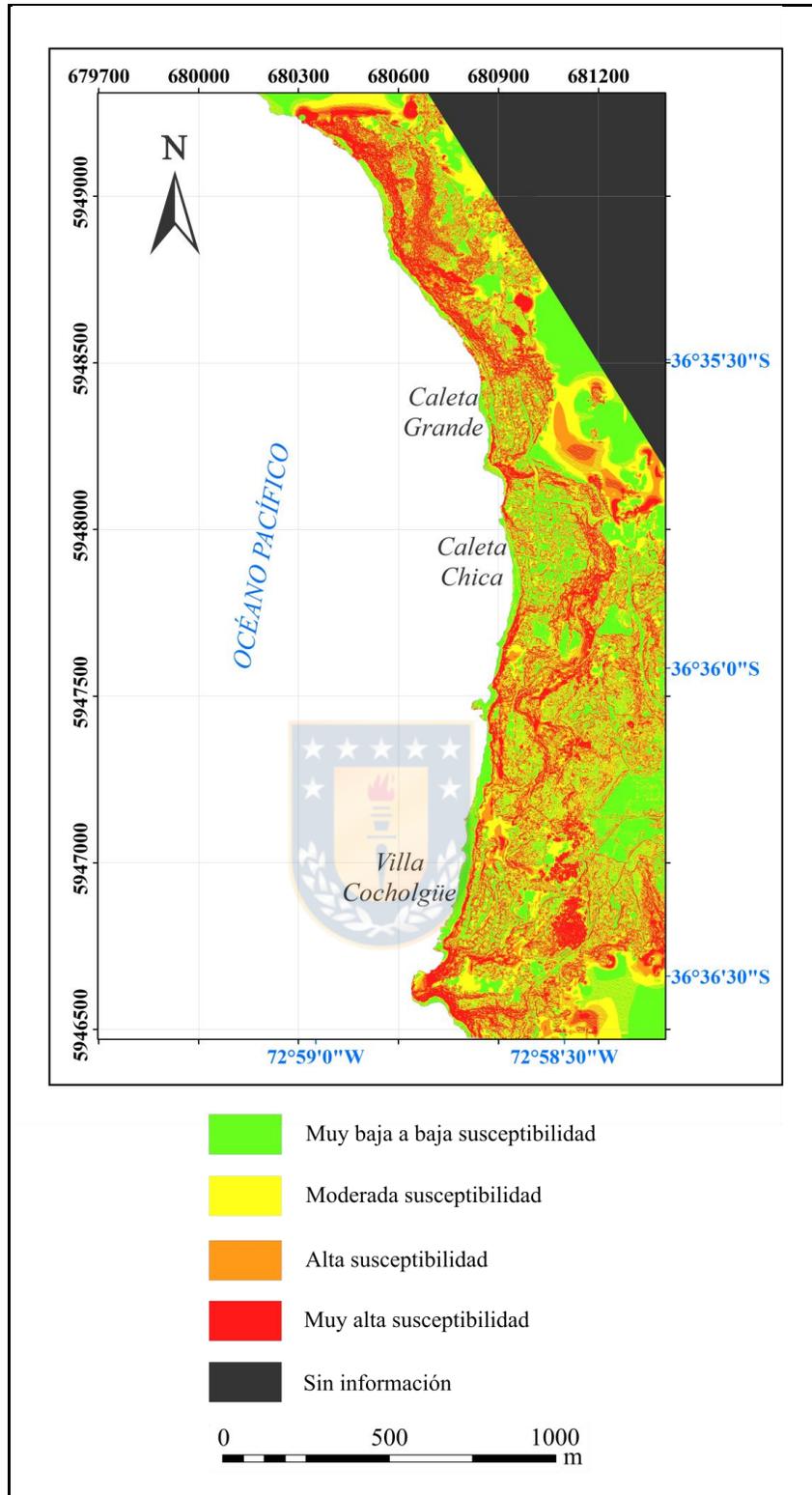


Figura 5.13: Mapa de pendientes reclasificado. Muy baja a baja susceptibilidad ($<10^\circ$), moderada susceptibilidad ($10-20^\circ$), alta susceptibilidad ($20-30^\circ$) y muy alta susceptibilidad ($>30^\circ$).

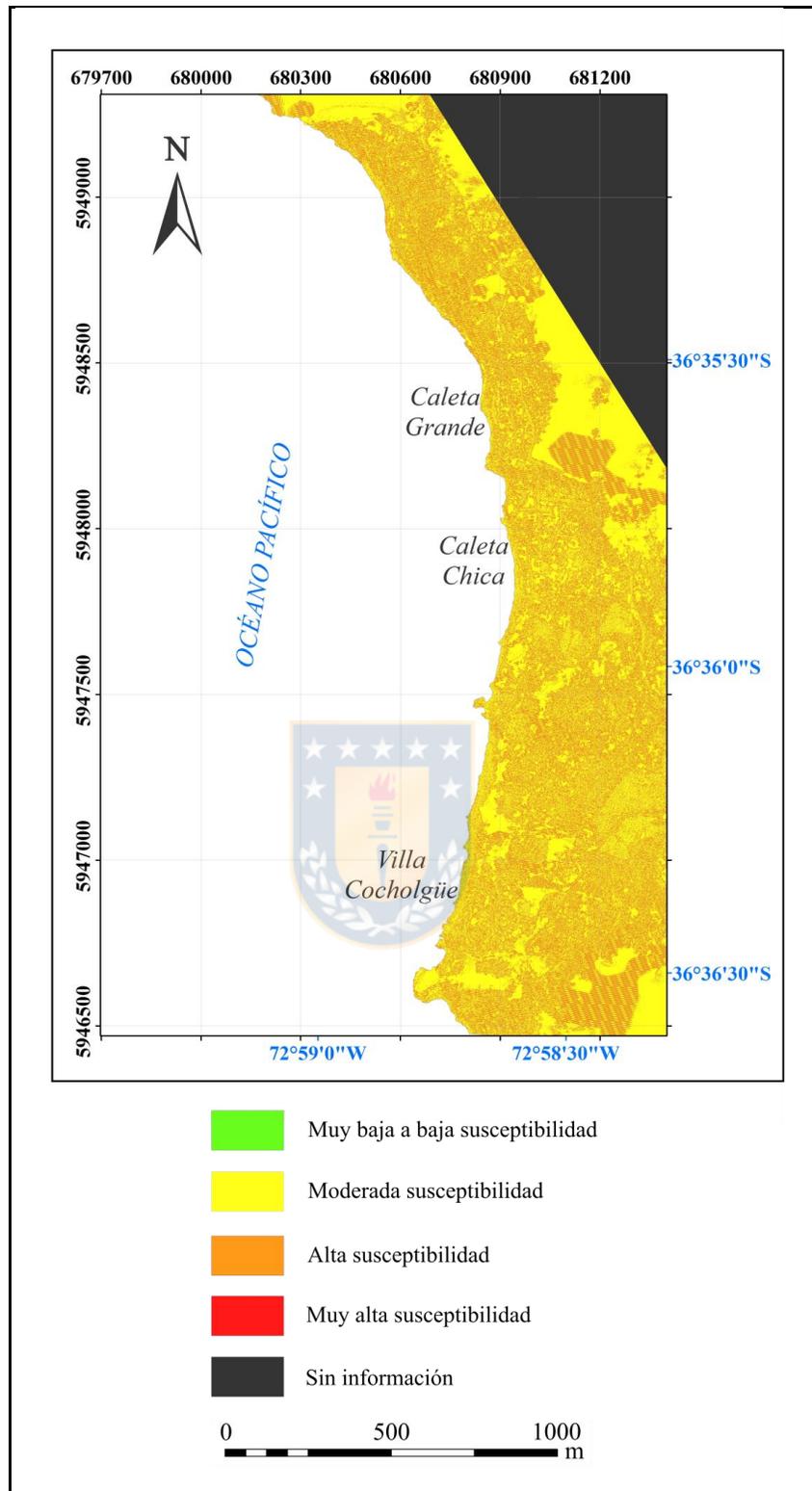


Figura 5.14: Mapa de forma de laderas reclasificado. Muy baja a baja susceptibilidad (laderas convexas), moderada susceptibilidad (laderas plano-convexas), alta susceptibilidad (laderas plano-cóncavas) y muy alta susceptibilidad (laderas cóncavas).

5.1.2.6. Mapa de usos de suelo

Similar a lo que ocurre con el parámetro de elevación, las superficies utilizadas por los usos de suelo del lugar se encuentran distribuidas de forma uniforme dentro de los distintos niveles de susceptibilidad definidos (Figura 5.15). La mayor extensión es ocupada por las zonas de susceptibilidad moderada, abarcando un 34% de la superficie total. Le siguen las regiones que pertenecen a un nivel de susceptibilidad muy alta, las cuales corresponden a un 28% del área. Los sectores pertenecientes a los niveles de susceptibilidad alta y muy baja a baja representan un 23% y 15% respectivamente.

5.1.3. Mapa de susceptibilidad

El mapa de susceptibilidad ponderado del área de estudio puede ser analizado en la Figura 5.16. Las áreas de los distintos niveles de susceptibilidad relativas al total corresponden a: 1% (muy baja a baja susceptibilidad), 39% (moderada susceptibilidad), 49% (alta susceptibilidad), y 11% (muy alta susceptibilidad).

Las áreas de muy alta susceptibilidad se encuentran focalizadas en ciertas regiones del terreno. De manera general, se puede determinar la presencia de tres grandes regiones de muy alta susceptibilidad: la primera, se encuentra en la parte norte del área asociada al acantilado costero; la segunda, corresponde a una franja algo más angosta ubicada en la parte posterior de Caleta Chica; la última, queda definida en la parte sur del área, asociada a los cerros sobre los que esta Villa Cocholgüe y esta además se extiende un poco más hacia el norte. Respecto a las áreas de alta susceptibilidad, al igual que las áreas de muy alta susceptibilidad, estas también aparecen principalmente asociadas a las partes altas de los cerros del sector y a aquellas zonas del acantilado costero que presentan mayores inclinaciones. Es importante destacar que algunas de estas zonas también se pueden correlacionar bien con los aspectos litológicos y estructurales, sobre todo aquellas que se ubican cerca de la línea de costa en zonas no tan pronunciadas del acantilado. Las regiones de susceptibilidad moderada, representan los lugares con elevaciones menores y sobre estas se encuentran asentados los principales centros urbanos. Finalmente, las áreas de susceptibilidad muy baja a baja corresponden solo a lugares muy excepcionales, indicando que el contexto general de Cocholgüe es el de presentar altos índices de susceptibilidad, favorables respecto a la ocurrencia de los procesos de remociones en masa.

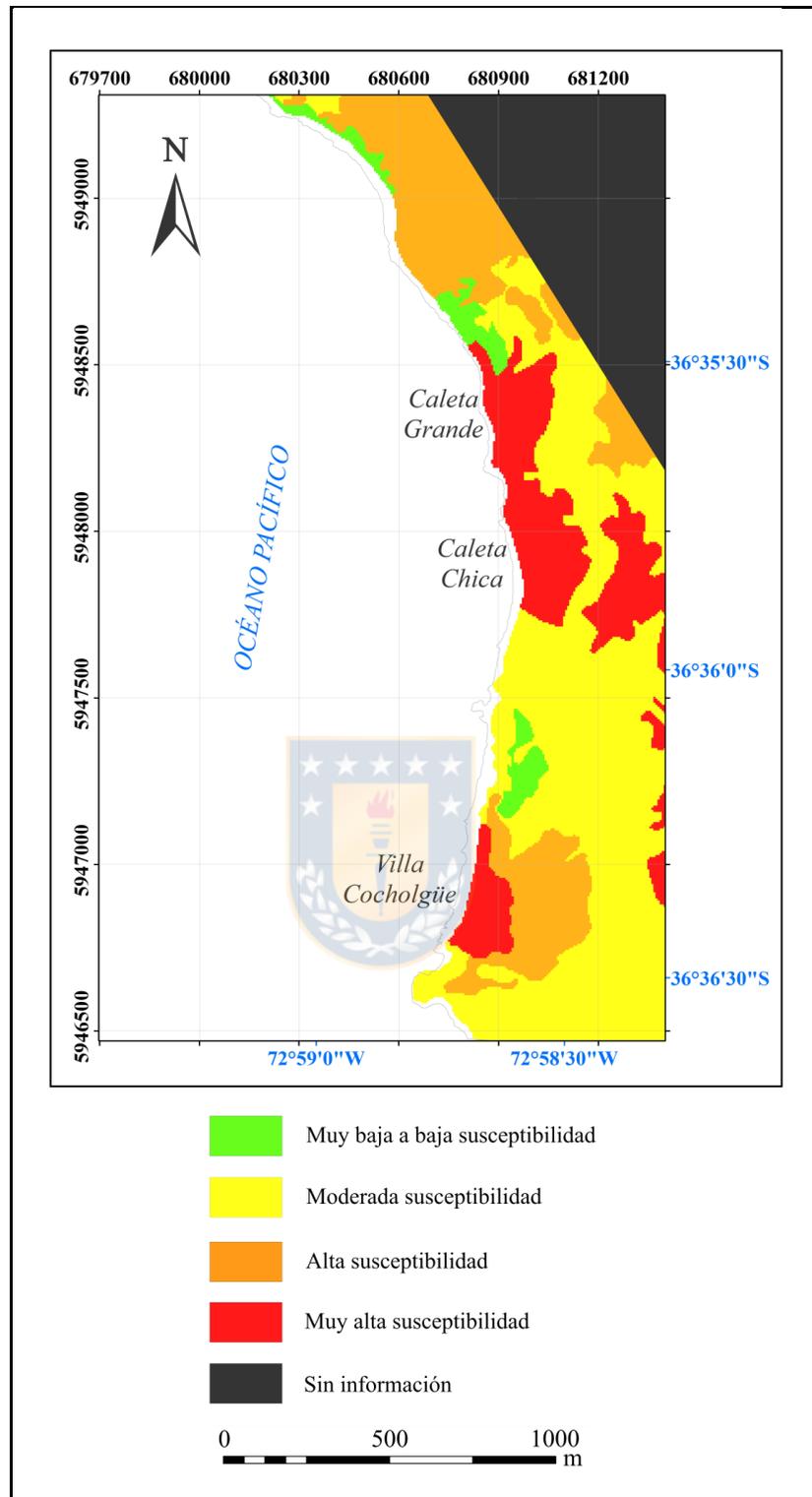


Figura 5.15: Mapa de usos de suelo reclasificado. Muy baja a baja susceptibilidad (bosques nativos), moderada susceptibilidad (praderas y matorrales), alta susceptibilidad (plantaciones forestales) y muy alta susceptibilidad (zonas urbanas e industriales).

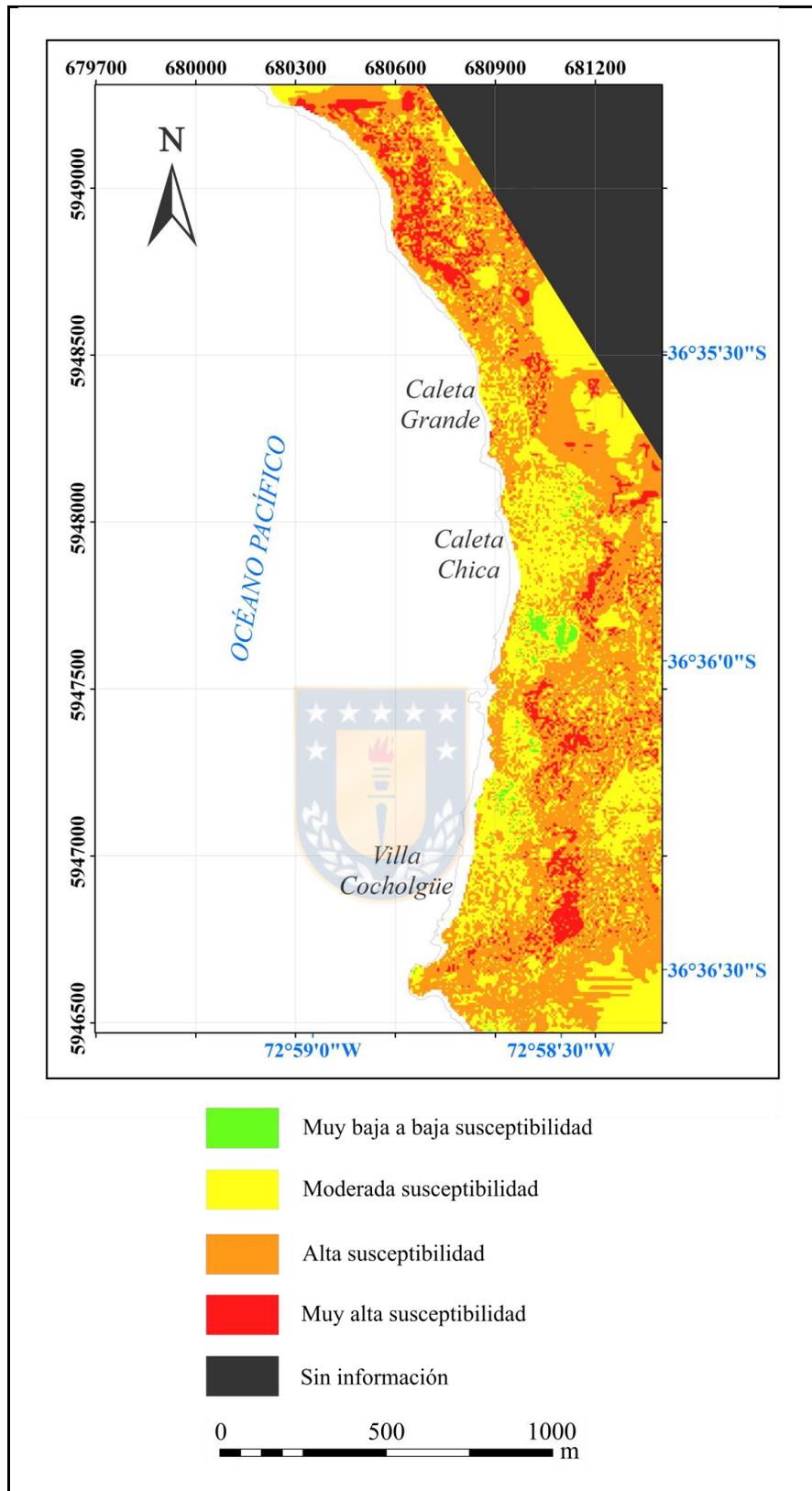


Figura 5.16: Mapa de susceptibilidad del área de estudio.

5.2. Análisis de peligro

5.2.1. Probabilidad temporal de ocurrencia de remociones en masa

Debido a que la superficie del área de estudio tiene poca extensión, no es considerada la existencia de una variabilidad espacial importante en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones. Así, los datos de precipitaciones y los resultados obtenidos a partir de ellos pueden ser extrapolados al área completa. Utilizando series de tiempo con los datos de precipitaciones diarias, se cuantifica el número de veces en que el umbral crítico definido en la metodología es superado dentro del periodo de tiempo abarcado por los datos (Tabla 5.1).

Tabla 5.1: Periodos en los cuales fue superado el umbral crítico. Fechas de inicio y término para los periodos en que el umbral crítico fue superado. Los periodos de más de tres días de duración se contabilizan según las diferentes combinaciones posibles de tres días seguidos dentro de la duración del mismo. Datos: estación Dichato (DGA).

N°	Fecha inicio	Fecha término	PP acumuladas en 72 hrs (mm)
1	26-6-2000	28-6-2000	102
2	19-5-2001	21-5-2001	104.7
3	20-5-2001	22-5-2001	105.2
4	24-5-2001	26-5-2001	113.1
5	25-5-2001	27-5-2001	118.6
6	26-5-2001	28-5-2001	103.6
7	22-8-2002	24-8-2002	105
8	23-8-2002	25-8-2002	127.5
9	24-6-2005	26-6-2005	150
10	25-6-2005	27-6-2005	150
11	26-6-2005	28-6-2005	200
12	28-6-2005	30-6-2005	105
13	24-8-2005	26-8-2005	110.2
14	25-8-2005	27-8-2005	117.2
15	4-6-2006	6-6-2006	121
16	8-7-2006	10-7-2006	131
17	9-7-2006	11-7-2006	142.3
18	10-7-2006	12-7-2006	120.3
19	16-5-2008	18-5-2008	120.7
20	17-5-2008	19-5-2008	160.7
21	18-5-2008	20-5-2008	151.5
22	16-6-2009	18-6-2009	129
23	20-6-2010	22-6-2010	123.6
24	21-6-2010	23-6-2010	122
25	4-7-2010	6-7-2010	113
26	25-6-2019	27-6-2019	105
27	26-6-2019	28-6-2019	137.3

El número de veces en los que fue superado el umbral crítico posteriormente es utilizado para determinar la tasa de ocurrencia de remociones promedio (λ), tomando en cuenta la duración total de las series de tiempo. Luego, la probabilidad de excedencia para el área de estudio es calculada (Tabla 5.2).

Tabla 5.2: Probabilidades de excedencia calculadas. Se encuentran detalladas las probabilidades temporales de ocurrencia de una o más remociones en masa dentro de periodos de uno, tres y cinco años.

N° de veces en que el umbral fue excedido	λ	μ	Probabilidad temporal para diferentes periodos de recurrencia		
			$t = 1$ año	$t = 3$ años	$t = 5$ años
27	1.35	0.741	0.741	0.983	0.999

5.2.2. Evaluación del peligro frente a remociones en masa

Las probabilidades de excedencia calculadas para los diferentes periodos de recurrencia corresponden a: 74% (un año), 98% (tres años) 100% (cinco años). De estas cifras se desprende que, 1) con una frecuencia de prácticamente una vez al año podría excederse el umbral crítico definido y por tanto ocurrir al menos una remoción en masa, y 2) cada un mínimo de tres años y un máximo de cinco años se superaría con certeza dicho umbral y por tanto una o más remociones ocurrirían. Es importante recordar que la probabilidad de ocurrencia final de las remociones en masa está sujeta a que también existan las condiciones de susceptibilidad necesarias para que se produzcan estos eventos.

Tomando en consideración el hecho de que en el área los lugares que presentan susceptibilidades muy bajas a bajas son extremadamente escasos, que la mayor extensión superficial en el sector corresponde a zonas de alta susceptibilidad, y que la probabilidad de excedencia aumenta relativamente rápido con el tiempo, es factible determinar que la mayor parte de la zona se encuentra dentro de un nivel de peligro moderado a alto, el cual ira en aumento conforme pase el tiempo alcanzando niveles de peligro altos a muy altos dentro de un máximo de tres a cinco años, siempre y cuando no ocurran uno o más eventos de remoción en masa previo a dicho periodo de tiempo.

6. DISCUSIÓN

6.1. Discusión global análisis de susceptibilidad

6.1.1. Validación mapa de susceptibilidad

El nivel de validez del mapa de susceptibilidad estará representado por qué tan buena es la correlación espacial existente entre los eventos registrados durante el trabajo de terreno, respecto a las zonas de alta y muy alta susceptibilidad definidas en el mapa. Por tanto, el número de eventos individuales asociados a cada una de las zonas del mapa es contabilizado. Esta cifra por sí misma no es tan representativa, ya que la extensión superficial de cada zona influye en la cantidad total de eventos que estas experimentarían, debido a que estos procesos están sujetos a un valor de probabilidad espacial. Así, se calcula un nuevo parámetro, correspondiente al número de eventos por unidad de superficie, el cual se obtiene a partir del cociente entre el número total de eventos individuales de una zona y su área en km^2 (Figura 6.1b).

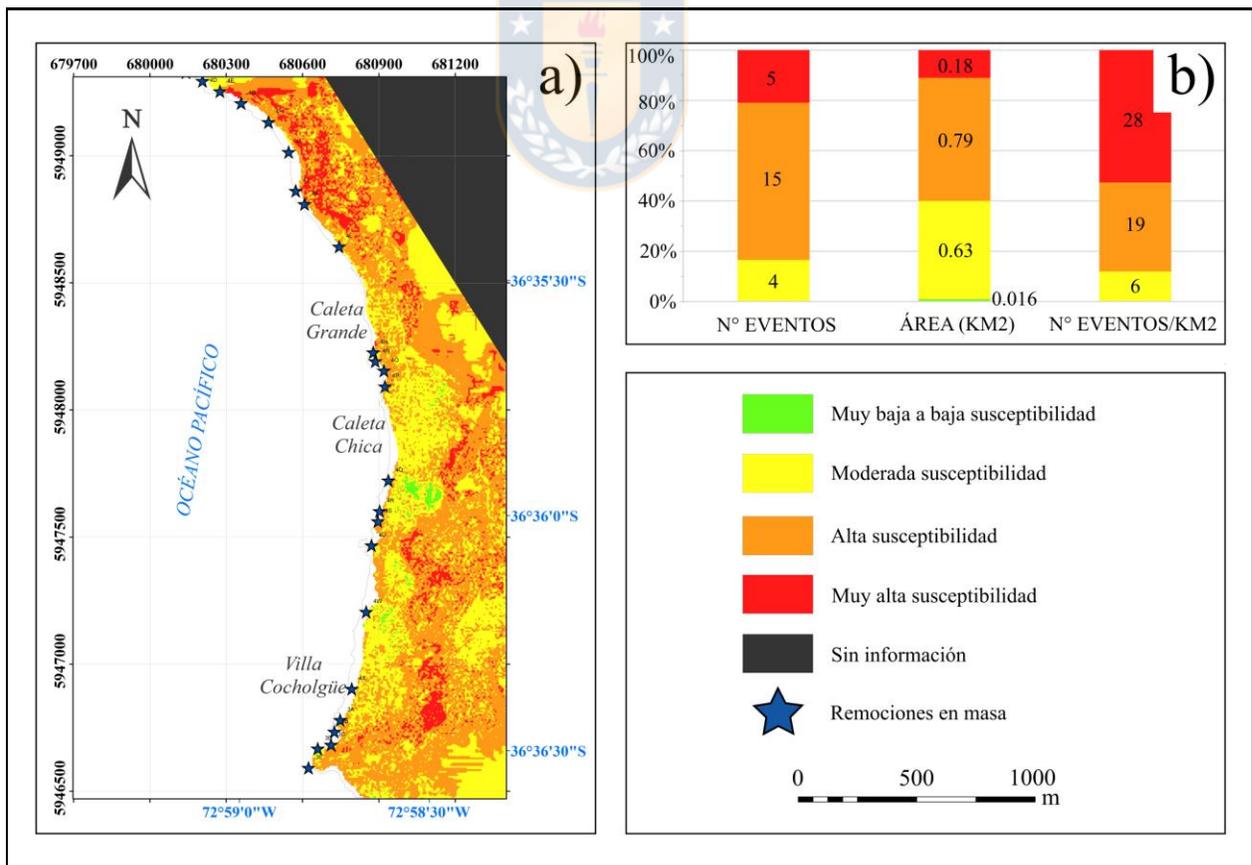


Figura 6.1: Remociones en masa en mapa de susceptibilidad ponderado. a) Mapa de susceptibilidad con eventos registrados en terreno. b) Número de eventos total y por unidad de superficie para cada zona.

El mayor número de eventos por unidad de superficie se encuentra relacionado a las zonas de muy alta susceptibilidad. La segunda región que experimenta más eventos corresponde a las zonas de susceptibilidad alta. Los eventos restantes se distribuyen a lo largo de las zonas de susceptibilidad moderada. No se registran eventos asociados a las zonas de susceptibilidad muy baja a baja. Por consiguiente, se puede determinar que el mapa de susceptibilidad ponderado caracteriza de buena manera la distribución espacial que presentan los eventos registrados en el área.

6.1.2. Importancia de factores condicionantes

De forma similar a lo descrito en el apartado anterior, el grado de influencia individual por parte de cada uno de los factores condicionantes también debería verse reflejado en la correlación espacial entre los eventos y las zonas de alta y muy alta susceptibilidad definidas en sus mapas temáticos reclasificados respectivos. De este modo, se calcula el número de eventos por unidad de superficie asociados con las distintas zonas de susceptibilidad de cada uno de los mapas por factor. Estos valores quedan representados en la Figura 6.2.

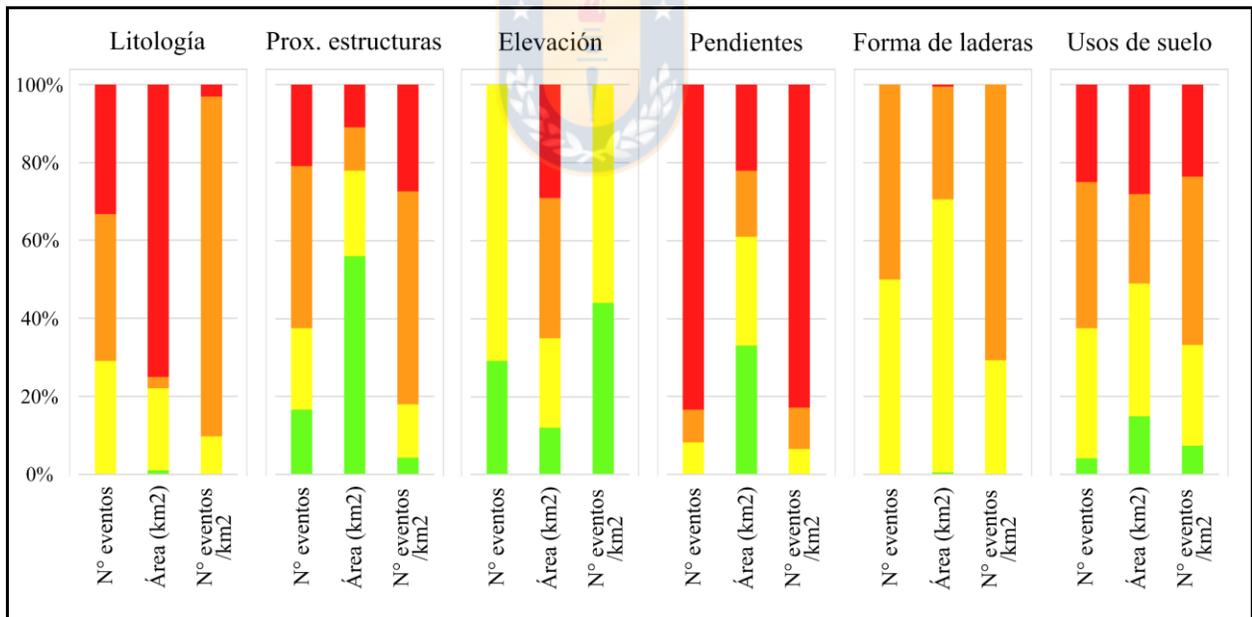


Figura 6.2: Representación gráfica del número de eventos por unidad de superficie por mapa temático. Para cada factor condicionante se representa el número de eventos por unidad de superficie y los parámetros asociados. Los colores se corresponden con la escala de susceptibilidad, y el largo de las barras representa la proporción respecto al total del parámetro analizado que recae dentro de la zona representada.

Del análisis de este parámetro, se observa que los factores de litología, pendientes y estructuras son los que experimentan un mayor número de remociones por unidad de superficie asociadas a sus zonas de alta o muy alta susceptibilidad. Esto refleja *a priori*, que estos factores corresponderían a los que poseen una mayor influencia dentro del área, contrastando bien con el hecho de que son igualmente los factores a los que se les asignó mayor ponderación en el análisis de susceptibilidad. Adicionalmente, también se puede señalar que basado en la muy alta concentración de eventos que muestra el parámetro de litología en las zonas de alta susceptibilidad, este factor podría haber tenido una mayor ponderación individual, llegando a rivalizar en jerarquía con el factor de pendientes. Sin embargo, este último es el factor que proporcionalmente presenta la mayor cantidad de eventos por unidad de superficie asociados específicamente a zonas de muy alta susceptibilidad. Por otro lado, la extremadamente alta cifra de remociones asociadas a las zonas de alta susceptibilidad en el mapa de litología, también puede explicarse con que se haya sido muy conservativo al momento de trazar dichas zonas en términos de sus extensiones superficiales.

La información recopilada en terreno refuerza lo mencionado anteriormente. Las caídas de roca constituyen la forma de remoción en masa más común en el sector (Figura 6.3a), y estas se originan típicamente en taludes empinados, más el hecho de que se relacionan con aspectos estructurales como diaclasas o fallas (Figura 6.4). Además, el alto grado de meteorización y/o erosión presente en algunas secciones del acantilado también puede llegar a favorecer esta y otras formas de desprendimientos al ir socavando progresivamente el pie de dicha geomorfología. Estas secciones, se encuentran localizadas en las porciones del acantilado que se proyectan de forma más pronunciada hacia el mar, donde por la posición de la ladera respecto a la dirección de las corrientes reciben con mayor intensidad los efectos de la erosión marina. El nivel de desestabilización producido por este tipo de erosión puede llegar a ser igual o superior al efecto que tiene el aumento en la presión de poros sobre los taludes (Doi y otros, 2020). La segunda forma más frecuente de remoción en masa corresponde a los deslizamientos (Figura 6.3b). Estos depósitos se pueden asociar a controles litológicos, ya que mostraron haberse originado en material poco consolidado, cuya fuente se puede atribuir a la capa de suelo que se ha ido formando con el tiempo en la cabecera del acantilado. Los planos de deslizamiento, generalmente se asocian con el contacto entre roca sana y meteorizada. Aquí, también adquiere relevancia otro aspecto importante el cual es la estratificación. Si bien, esta no presenta grandes inclinaciones, por su orientación respecto al acantilado, podría facilitar el despegue de material desde las laderas.

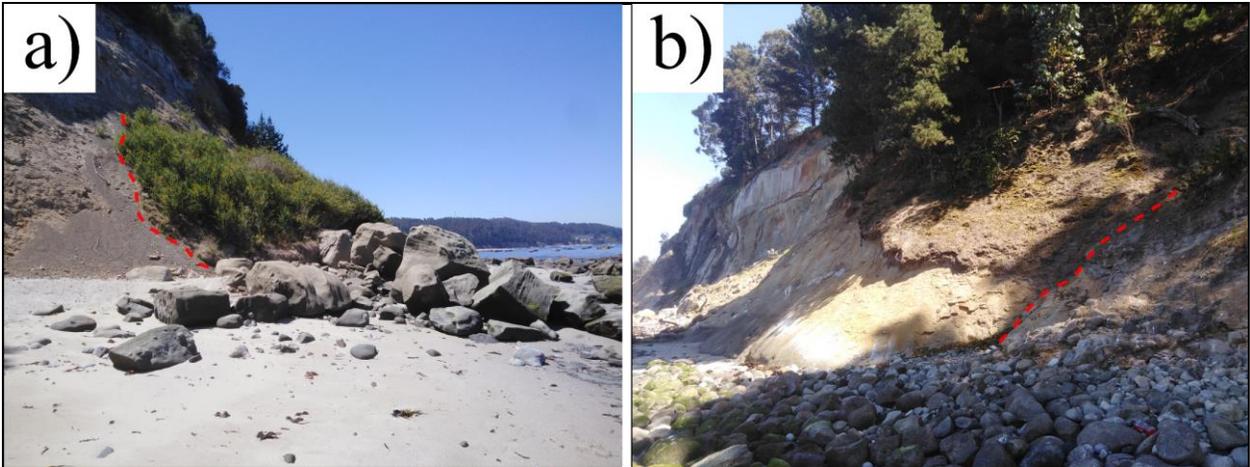


Figura 6.3: Tipos de remociones en masa más frecuentes en el área. a) Depósito de caída de rocas, se pueden ver bloques de tamaños métricos. Deslizamiento rotacional, superficie de cizalle marcada en rojo. b) Deslizamiento traslacional. Se distingue una superficie de cizalle, probablemente producida por desacople de nivel meteorizado.



Figura 6.4: Caída de roca asociada a factores estructurales. Bloque cúbico de tamaño métrico, con presencia de estrías de falla y fibras de crecimiento, asociado a rotura en cuña. Fuente: J.A. Quezada, comunicación personal, 5 enero 2021.

El factor de uso de suelos tendría una importancia intermedia, ya que, aunque la mayor cantidad de las remociones se encuentran agrupadas en sus zonas de alta y muy alta susceptibilidad, la diferencia relativa con el número de remociones en las otras zonas no es tan amplia. Aun así, no se descarta la posibilidad de que este factor sea más influyente, ya que todos los eventos registrados se tomaron a lo largo de la línea de costa, pudiendo haber un sesgo de ubicación (Figura 6.1a).

Finalmente, los factores de menor importancia con base en el número de eventos por unidad de superficie, estarían comprendidos por los factores de elevación y forma de las laderas. En estos casos no se observa una preferencia clara de los eventos por las zonas de mayor susceptibilidad, donde inclusive en el caso del factor de elevación, una gran cantidad de eventos por unidad de superficie se registran en las zonas de muy baja a baja susceptibilidad. Es necesario señalar que el factor de forma de laderas tiene una incidencia más clara al trabajar a una escala más general. El perfil topográfico del sector muestra que tanto Caleta Grande como Caleta Chica están construidas a los pies de grandes laderas con formas plano-cóncavas, en las que se describen desplazamientos lentos de hasta 10 cm/año (Cuevas, 2012) (Figura 6.5). Esto último, coincide con lo mencionado por algunos autores, los cuales describen que ambas caletas se encuentran fundadas sobre depósitos de antiguos deslizamientos, los cuales se reactivan en periodos de precipitaciones intensas (Ramírez y Hauser, 2007; Ramírez y Derch, 2010). Por consiguiente, se puede inferir que la geomorfología actual sobre la que se asientan las caletas, se construyó a partir de la actividad de antiguos deslizamientos, y que la actividad reciente está condicionada por el plano actual de la ladera.

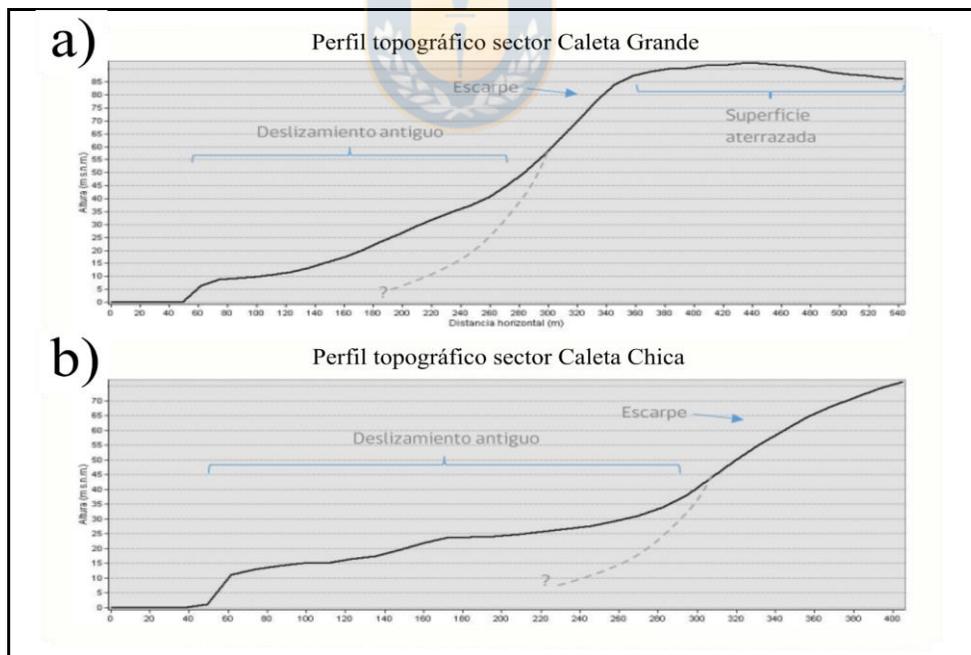


Figura 6.5: Perfiles topográficos mostrando laderas plano-cóncavas asociadas a áreas urbanizadas. a) Perfil sector Caleta Grande. b) Perfil sector Caleta Chica. En ambos casos, la línea segmentada representa la posible zona de despegue de los paleodeslizamientos. Modificado de Alfaro y Sepúlveda (2018).

6.2. Discusión global análisis de peligro

6.2.1. Umbral crítico y probabilidades de excedencia

A partir de la revisión del catastro nacional de desastres naturales para el periodo 1980-2015 (elaborado por SERNAGEOMIN) y de informes técnicos realizados en el área de estudio (Naranjo y otros, 2005; Naranjo y otros 2006; Ramírez y Hauser, 2007; Ramírez y Derch, 2010), se determina que en la localidad de Cocholgue han ocurrido dos eventos de remociones en masa gatillados por precipitaciones intensas con consecuencias graves para los principales centros urbanos. Las fechas y los detalles de estos eventos se describen a continuación:

Acontecimientos del 26 y 27 de junio de 2005: Deslizamientos, flujos de detritos y de barro, producto de lluvias torrenciales ocurridas en la zona. Reactivación de antiguos depósitos de deslizamientos rotacionales (Figura 6.6), además de nuevos deslizamientos en taludes de fundaciones de viviendas.



Figura 6.6: Cicatriz de deslizamiento rotacional ocurrida durante acontecimientos del 26 y 27 de junio de 2005. Deslizamiento afecta la cobertura de suelo y vegetación en sector alto de Caleta Grande. Naranjo y otros (2005).

Acontecimientos del 9 al 11 de julio de 2006: Deslizamientos, flujos de detritos y caídas de rocas como resultado de lluvias torrenciales ocurridas en la zona. Se produjo la reactivación del

movimiento multirrotacional observado el año 2005, tanto en Caleta Grande como en Caleta Chica (Figura 6.7). Las caídas de roca se originaron desde taludes adyacentes a caminos, los cuales en algunos casos quedaron completamente obstruidos.

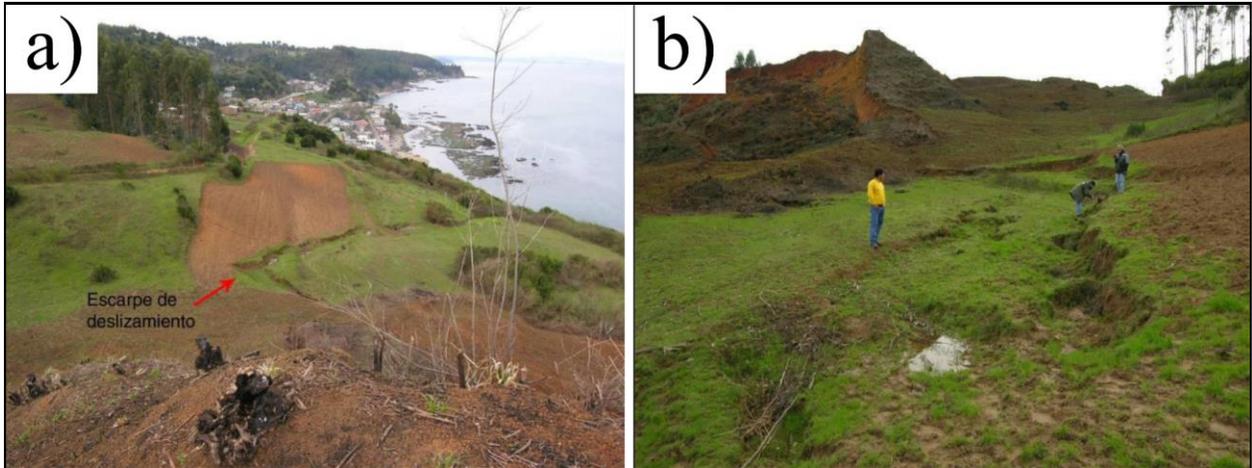


Figura 6.7: Deslizamientos producidos durante los acontecimientos del 9 al 11 de julio de 2006. a) Escarpe de deslizamiento generado en sector alto de Caleta Grande, el cual muestra indicios de reactivación menor. Sin embargo, involucra un volumen de material superior a los 100 m³. b) Otros deslizamientos multirrotacionales. En primer plano, escarpes de deslizamientos. Modificado de Naranjo y otros (2006).

Al realizar la comparación entre las fechas en las cuales se reportan los eventos descritos anteriormente, y los periodos en los cuales fue alcanzado el umbral máximo de precipitaciones del trabajo (Tabla 5.1), se puede observar que ambos eventos se dieron en condiciones en las cuales fue superado este último valor. Esta correlación positiva entre los eventos y el umbral máximo, sugiere que al menos como un primer acercamiento, la cifra de precipitación acumulada utilizada funciona relativamente bien para la realidad del sector. No obstante, aún es necesario definir una cifra más adecuada a partir de métodos estadísticos, ya que las precipitaciones acumuladas para los periodos en los que ocurrieron estos eventos se movían dentro de rangos más altos (hasta 50-100 mm por encima del umbral máximo).

Respecto a las probabilidades de excedencia, la recurrencia esperada a partir de lo calculado en la Tabla 5.2, se aleja de lo que muestran los informes analizados. Las probabilidades de excedencia obtenidas, implican que como mínimo debieron haber ocurrido cuatro eventos de remociones en masa en el periodo abarcado por los últimos veinte años. Esta diferencia entre la frecuencia de eventos reportados y los esperados, se puede explicar principalmente en torno a dos razones. La primera, es que tanto el catastro de desastres naturales como los informes técnicos, se focalizan

principalmente en aquellos fenómenos que tuvieron repercusiones directas sobre el capital humano y material. En consecuencia, muchos de los eventos que ocurrieron en lugares alejados de los núcleos urbanizados no fueron tomados en cuenta. Ejemplo de esto, son los varios depósitos de remociones en masa que se registraron durante el trabajo de campo, pero que no se contemplan en los informes (Figura 6.1a). La otra razón, tiene que ver con el valor del umbral máximo utilizado. Como ya fue mencionado, la cifra aún necesita definirse mejor con metodologías más específicas, y en el caso de que se defina un umbral máximo distinto, las probabilidades de excedencia calculadas percibirían una variación, pudiéndose ajustar más a la recurrencia real.

6.2.2. Proyección futura: Cambio climático, variaciones en las precipitaciones y remociones en masa

El cambio climático constituye un fenómeno actual y de creciente relevancia en la agenda ambiental internacional, el cual ha demostrado tener efectos irreversibles sobre el medioambiente. Una de las consecuencias del cambio climático, es la modificación que se produce sobre la distribución estadística de los parámetros atmosféricos (Sanabria y otros, 2009). De esta forma, dichas variaciones podrían repercutir sobre la ocurrencia de remociones en masa, al alterar aspectos como la frecuencia o intensidad con la que ocurren las precipitaciones.

Existe un amplio consenso por parte de la comunidad científica respecto a que el calentamiento global tendrá profundos efectos sobre el ciclo hidrológico (IPCC, 2007 citado en Jakob y Lambert, 2009). Producto del calentamiento de la atmósfera, y del aumento de las temperaturas superficiales de los océanos, las tasas de evaporación incrementarán. En consecuencia, la atmósfera presentará un mayor contenido de humedad, a temperaturas más altas, resultando en que se produzcan tormentas mucho más intensas en los océanos y sobre las regiones costeras situadas en las latitudes medias del planeta (Jakob y Lambert, 2009). Estos antecedentes, son valiosos para el área de estudio dada su ubicación geográfica y el hecho de que gran parte de las remociones en masa ocurridas en el lugar son desencadenadas por eventos hidroclimáticos como las precipitaciones intensas o prolongadas. Así, un aumento en las precipitaciones puede llevar a que se superen con mayor frecuencia los umbrales críticos de la zona, provocando a futuro una mayor ocurrencia de remociones en masa.

Por otra parte, también se deben tomar en consideración enfoques adicionales. Araya-Osses y otros (2020), proyectan que habrá una disminución en la cantidad de precipitaciones promedio a lo largo de las zonas entre las regiones de Atacama y del Biobío, siendo estas las que además experimentarían las mayores variaciones a raíz del cambio climático en el país. Este escenario, conduce hacia la posibilidad de que sectores que presentan altos niveles de susceptibilidad como la localidad de Cocholgue, podrían eventualmente convertirse en menos peligrosos respecto a los procesos de remoción en masa desencadenados por precipitaciones.

De todas maneras, la relación entre el cambio climático y el peligro frente a remociones en masa es un fenómeno complejo. Cabe destacar que una disminución de las precipitaciones también podría modificar la distribución espacial que presentan los usos de suelo. Este hecho se expresaría principalmente en una disminución de las coberturas vegetales, provocando que los suelos se vuelvan más propensos a erosionarse y por tanto aumentando su susceptibilidad. Gariano y otros (2015), estudiaron las variaciones geográficas y temporales de varios eventos de remociones en masa inducidos por precipitaciones en la región de Calabria, Italia. Encontraron que, a pesar de que hubo una disminución en los valores de precipitaciones mensuales, las remociones en masa comenzaron a necesitar superar umbrales menores de precipitación para poder ocurrir, atribuyendo este fenómeno a un aumento en la susceptibilidad del territorio. Polemio y Petrucci (2010), observan que, a pesar de haber una disminución en las precipitaciones mensuales en su área de estudio, la ocurrencia de remociones en el lugar no experimentó un decrecimiento significativo. Considerando que el nivel de peligro de un lugar depende de su susceptibilidad y de que tan probable es que ocurran los procesos desencadenantes, la sola disminución en las precipitaciones no necesariamente implicará menor peligro.

7. CONCLUSIONES

Los dos tipos de remoción en masa más frecuentes dentro del área de estudio corresponden a las caídas de roca y a los deslizamientos. Esto se determinó en función de los depósitos que fueron registrados durante el trabajo de campo.

La mayor parte del área de estudio se encuentra asociada a zonas que presentan altos grados de susceptibilidad. Un 49% de la zona estudiada se encuentra dentro de niveles altos de susceptibilidad, y en contraste solo un 1% de la zona estudiada corresponde a niveles muy bajos a bajos de susceptibilidad.

Los factores condicionantes que evidencian una mayor importancia respecto a la influencia que tienen sobre la ocurrencia de los procesos de remoción en masa son las pendientes, litología y proximidad a estructuras. Esta influencia se expresa a partir de la preferencia que muestran los eventos por las zonas de mayor susceptibilidad relativas a estos factores (número de eventos por unidad de superficie).

Los factores de forma de laderas y usos de suelo, presentan una importancia intermedia-baja, pero pueden llegar a ser potencialmente más relevantes. Respecto al factor de usos de suelo, esto es porque puede existir un sesgo de ubicación respecto a los eventos registrados, pudiendo haberse contabilizado menos eventos por unidad de superficie de los que debería haber en sus zonas de mayor susceptibilidad. Por otra parte, el factor de forma de laderas adquiere mayor importancia al ser analizado desde un punto de vista geomorfológico. Esto es en virtud de que los principales centros urbanos del sector están asentados sobre grandes laderas plano-cóncavas, las cuales han mostrado experimentar actividad reciente.

La distribución espacial de la susceptibilidad a lo largo de la línea de costa no es homogénea, abarcando desde susceptibilidades moderadas a susceptibilidades muy altas. La distribución espacial de los eventos de remociones en masa catalogados durante el terreno evidencia un comportamiento similar, donde estos tienden a concentrarse en *clusters* o acumulaciones, en vez de estar distribuidos a lo largo de todo el acantilado. Lo anterior, responde a variaciones importantes en las características geomecánicas del acantilado, donde dichas acumulaciones de eventos se correlacionan con zonas donde converge la influencia de varios factores condicionantes.

De forma preliminar, se puede determinar que la mayor parte del área de estudio se encuentra dentro de grados de peligro moderados a altos, los cuales posiblemente pueden aumentar hacia niveles de peligro altos a muy altos, dependiendo de si se cumplen o no las condiciones estipuladas para el umbral crítico utilizado.

A pesar de que el umbral crítico utilizado en el trabajo funciona bien como un primer acercamiento para analizar la recurrencia de los eventos de remociones en masa del sector, se plantea la necesidad de definir una cifra más precisa a través de métodos estadísticos.

La proyección futura a largo plazo del peligro frente a remociones en masa en el sector es incierta, debido a las diferentes propuestas respecto a cómo variarían las precipitaciones en el sector. Además, dada la compleja relación entre factores condicionantes y precipitaciones, posiblemente se requiera de análisis cuantitativos más específicos para poder establecer escenarios futuros con un mayor grado de certidumbre.



REFERENCIAS

- AGUIRRE, L., HERVÉ, F., & GODOY, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile: an outline. *Krystallinikum*, 9, 7-19.
- ALEM, S., PAVLIS, J., URBAN, J., & KUCERA, J. (2015). Pure and mixed plantations of *Eucalyptus camaldulensis* and *Cupressus lusitanica*: their growth interactions and effect on diversity and density of undergrowth woody plants in relation to light. *Open Journal of Forestry*, 5(04), 375.
- ALEOTTI, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering geology*, 73(3-4), 247-265.
- ALFARO, A., & SEPÚLVEDA, N. (2018). Informe técnico por peligro de remociones en masa, sector Caleta Cocholgüe, comuna de Tomé, región del BioBío. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile.
- AVEN, T. (2011). On some recent definitions and analysis frameworks for risk, vulnerability, and resilience. *Risk Analysis: An International Journal*, 31(4), 515-522.
- AWAWDEH, M. M., ELMUGHRABI, M. A., & ATALLAH, M. Y. (2018). Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from North Jordan. *Environmental Earth Sciences*, 77(21), 732.
- AYALEW, L., YAMAGISHI, H., & UGAWA, N. (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1(1), 73-81.
- BAGÓCZKY, L. B. (1982). Revisión y redefinición de los Estratos de Quiriquina, Campaniano-Maastrichtiano, en su localidad tipo, en la isla Quiriquina, 36°37' latitud Sur, Chile, Sudamérica, con su perfil complementario en cocholgue. *III Congreso Geológico Chileno*. Vol. 1: 29-64 pp. Concepción.
- BALTODANO, J. (2000). Monoculture forestry: a critique from an ecological perspective. Tree trouble: a compilation of testimonies on the negative impact of large-scale monoculture tree plantations prepared for the 6th COP of the FCCC. *Friends of the Earth International*, pp. 2-10.
- BASHARAT, M., ROHN, J., EHRET, D., & BAIG, M. S. (2012). Lithological and structural control of Hattian Bala rock avalanche triggered by the Kashmir earthquake 2005, sub-Himalayas, northern Pakistan. *Journal of Earth Science*, 23(2), 213-224.
- BASHARAT, M., SHAH, H. R., & HAMEED, N. (2016). Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4), 1-19.
- BELL, F. G. (2013). *Engineering properties of soils and rocks*. Elsevier.
- BIRKMANN, J., CARDONA, O. D., CARREÑO, M. L., BARBAT, A. H., PELLING, M.,

- SCHNEIDERBAUER, S., KIENBERGER, S., KEILER, M., ALEXANDER, D., ZEIL, P., & WELLE, T. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Natural hazards*, 67(2), 193-211.
- BORGOMEIO, E., HEBDITCH, K. V., WHITTAKER, A. C., & LONERGAN, L. (2014). Characterising the spatial distribution, frequency and geomorphic controls on landslide occurrence, Molise, Italy. *Geomorphology*, 226, 148-161.
- BUATOIS, L. A., & ENCINAS, A. (2011). Ichnology, sequence stratigraphy and depositional evolution of an Upper Cretaceous rocky shoreline in central Chile: Bioerosion structures in a transgressed metamorphic basement. *Cretaceous Research*, 32(2), 203-212.
- BUI, D. T., PRADHAN, B., LOFMAN, O., REVHAUG, I., & DICK, Ø. B. (2013). Regional prediction of landslide hazard using probability analysis of intense rainfall in the Hoa Binh province, Vietnam. *Natural hazards*, 66(2), 707-730.
- CAMPOS, F. (2014). Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en la Quebrada de los Chanchos, Región Metropolitana, Chile. Tesis de pregrado. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- CARTAYA, S., PACHECO, H., & MÉNDEZ, W. (2008). METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS EN MICROCUCENCAS DE DRENAJE, ESTADO VARGAS, VENEZUELA.
- CHEN, H., LIN, G. W., LU, M. H., SHIH, T. Y., HORNG, M. J., WU, S. J., & CHUANG, B. (2011). Effects of topography, lithology, rainfall and earthquake on landslide and sediment discharge in mountain catchments of southeastern Taiwan. *Geomorphology*, 133(3-4), 132-142.
- CHLEBORAD, A. F., BAUM, R. L., & GODT, J. W. (2006). Rainfall thresholds for forecasting landslides in the Seattle, Washington, area: exceedance and probability. *US Geological Survey Open-File Report*, 1064, 31.
- CREIXELL, C. (2001). Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30' y 38°00'. *Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.*
- CROVELLI, R. A. (2000). Probability models for estimation of number and costs of landslides. United States Geological Survey Open File Report 00-249.
- CRUDEN, D. M., & VARNES, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3- Landslide types and processes. *Transportation research board special report*, (247).
- CUEVAS, M. (2012). Susceptibilidad de remoción en masa, caleta Cocholgüe, comuna de Tomé. *Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.*
- D' AMATO AVANZI, G., GIANNECCHINI, R., & PUCCINELLI, A. (2004). The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). *Engineering*

Geology, 73(3-4), 215-228.

DECKART, K., HERVÉ ALLAMAND, F., FANNING, M., RAMÍREZ, V., CALDERÓN, M., & GODOY, E. (2014). U-Pb geochronology and Hf-O isotopes of zircons from the Pennsylvanian Coastal Batholith, south-central Chile.

DOI, I., MATSUURA, S., OSAWA, H., SHIBASAKI, T., & TOSA, S. (2020). Effects of coastal erosion on landslide activity revealed by multi-sensor observations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(10), 2291-2299.

FERNÁNDEZ, J., FALCÓN, M.F., VENEGAS, C., ARENAS, M. (2011). Evaluación Preliminar de Peligros Geológicos: Áreas Caletas de Cocholgue. 1 Mapa. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile.

GAJARDO, A. (1981). Geología de la Hoja Concepción-Chillán escala 1: 250.000, Región del Bío Bío. Mapas Geológicos Preliminares de Chile. N° 4. *Instituto de Investigaciones Geológicas*.

GALLI, C. (1967). Geología Urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano. Informe final del proyecto de investigación N°75. *Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción*.

GARIANO, S. L., PETRUCCI, O., & GUZZETTI, F. (2015). Changes in the occurrence of rainfall-induced landslides in Calabria, southern Italy, in the 20th century. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 15, 2313-2330.

GLODNY, J., ECHTLER, H., COLLAO, S., ARDILES, M., BURÓN, P., & FIGUEROA, O. (2008). Differential late paleozoic active margin evolution in south-central Chile (37 s–40 s)—the lanahue fault zone. *Journal of South American Earth Sciences*, 26(4), 397-411.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L., & FERRER, M. (2011). *Geological engineering*. CRC Press.

GUZZETTI, F., REICHENBACH, P., CARDINALI, M., GALLI, M., & ARDIZZONE, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1-4), 272-299.

GUZZETTI, F., PERUCCACCI, S., ROSSI, M., & STARK, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and atmospheric physics*, 98(3-4), 239-267.

HAIMES, Y. Y. (2009). On the complex definition of risk: A systems-based approach. *Risk Analysis: An International Journal*, 29(12), 1647-1654.

HENRÍQUEZ, A. (2019). *Análisis de susceptibilidad a remociones en masa en la comuna de Corral, al norte de los 39° 54' S, Región de los Ríos, Chile* (Doctoral dissertation, Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Ciencias de la Tierra).

HERVÉ, F. (1977). Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, South Central Chile. Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile. T. Ishikawa y L. Aguirre editores. *Japan Society for the promotion of Science*: 1-51 pp.

Tokyo.

HERVÉ, F., GODOY, E., PARADA, M. A., RAMOS, V., RAPELA, C., MPODOZIS, C., & DAVIDSON, J. (1987). A general view on the Chilean-Argentine Andes, with emphasis on their early history. *Circum-Pacific Orogenic Belts and Evolution of the Pacific Ocean Basin*, 18, 97-113.

HERVÉ, F. (1988). Late Paleozoic subduction and accretion in Southern Chile. *Episodes Journal of International Geoscience*, 11(3), 183-188.

HERVÉ, F., FAUNDEZ, V., CALDERÓN, M., MASSONE, H. J., & WILLNER, A. P. (2007). Metamorphic and plutonic basement complexes. In *The Geology of Chile* (pp. 5-19).

HUNGR, O., LEROUEIL, S., & PICARELLI, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.

ISRM (1981): Rock characterisation testing and monitoring. In: Brown, E.T. (ed.) Pergamon Press, Oxford.

JAKOB, M., & LAMBERT, S. (2009). Climate change effects on landslides along the southwest coast of British Columbia. *Geomorphology*, 107(3-4), 275-284.

KAYASTHA, P., DHITAL, M. R., & DE SMEDT, F. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences*, 52, 398-408.

KOPPEN, W. D. (1936). Das geographische system der klimat. *Handbuch der klimatologie*, 46.

KORUP, O., CLAGUE, J. J., HERMANN, R. L., HEWITT, K., STROM, A. L., & WEIDINGER, J. T. (2007). Giant landslides, topography, and erosion. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(3-4), 578-589.

LARA, M., & SEPÚLVEDA, S. (2008). Remociones en masa. *Apuntes del curso*.

LÉPEZ, L. (2002). Estructuras geológicas Comuna de Tomé [Mapa]. 1:100.000. Tomé: Ilustre Municipalidad de Tomé. Dirección de Obras Municipales.

LIU, C. L. C., KUCHMA, O., & KRUTOVSKY, K. V. (2018). Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. *Global Ecology and conservation*, 15, e00419.

LÓPEZ, P. (2013). Evaluación de peligrosidad por procesos de remoción en masa en los cerros La Unión y Zaror. Comuna de Talcahuano, Región del Biobío (Chile).

LUCASSEN, F., TRUMBULL, R., FRANZ, G., CREIXELL, C., VÁSQUEZ, P., ROMER, R. L., & FIGUEROA, O. (2004). Distinguishing crustal recycling and juvenile additions at active continental margins: the Paleozoic to recent compositional evolution of the Chilean Pacific margin (36–41 S). *Journal of South American Earth Sciences*, 17(2), 103-119.

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.

MARDONES FLORES, M., & ROJAS HERNÁNDEZ, 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.

MEUSBURGER, K., & ALEWELL, C. (2008). Impacts of anthropogenic and environmental factors on the occurrence of shallow landslides in an alpine catchment (Urseren Valley, Switzerland). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 509-520.

MILLER, F., OSBAHR, H., BOYD, E., THOMALLA, F., BHARWANI, S., ZIERVOGEL, G., WALKER, B., BIRKMANN, J., VAN DER LEEUW., S., ROCKSTRÖM, J., HINKEL, J., DOWNING, T., FOLKE, C., & NELSON, D. (2010). Resilience and vulnerability: complementary or conflicting concepts?. *Ecology and Society*, 15(3).

MUÑOZ-CRISTI, J. (1956). Handbook of South American Geology. Geol. Soc. America Mem, 65, 187-214.

MUÑOZ, J., FERNÁNDEZ, B., VARAS, E., PASTÉN, P., GÓMEZ, D., RENGIFO, P., MUÑOZ, J., ATENAS, M., & JOFRE, J. (2005). Chilean water resources and related environmental issues, Geology of Chile (Moreno, T., & Gibbons, W. editores). Geological Society of London: 215-230 pp. Londres.

MURILLO-GARCÍA, F. G., ROSSI, M., ARDIZZONE, F., FIORUCCI, F., & ALCÁNTARA-AYALA, I. (2017). Hazard and population vulnerability analysis: a step towards landslide risk assessment. *Journal of Mountain Science*, 14(7), 1241-1261.

NARANJO, J. A., RAMÍREZ, P., CLAVERO, J., & HAUSER, A (2005). REMOCIONES EN MASA CAUSADAS POR LLUVIAS TORRENCIALES, JUNIO 26–27, 2005 CONCEPCIÓN, VIII REGIÓN.

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. *Geólogos*.

OUIMET, W. B. (2011). The hills came tumbling down. *Nature Geoscience*, 4(7), 424-425.

POLEMIO, M., & PETRUCCI, O. (2010). Occurrence of landslide events and the role of climate in the twentieth century in Calabria, southern Italy. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43(4), 403-415.

QUEZADA, J. (1996). Geología urbana y ambiental de la ciudad de Concepción. *Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Concepción, Chile*.

RAMÍREZ, P., & HAUSER, A. (2007). Situación actual de terrenos afectados por remociones en masa en algunos sectores de la provincia de Concepción, durante los años 2005 y 2006. Informe

técnico, Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile. 10p.

RAMÍREZ, P., & DERCH, P. (2010). Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: Informe Cocholgue-Punta Lavapié, Región del Bio Bío. INF-BIO BÍO-04. Informe técnico, Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile.

RAMÍREZ, P., VIVALLOS, J., CÁCERES, D., & FONSECA, A. (2012). Microzonificación sísmica de la ciudad de San Pedro de la Paz, Región del Biobío, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Ambiental N°16: 3 mapas en una hoja escala 1:20.000. Santiago.

RICHARDS, A. E., FORRESTER, D. I., BAUHUS, J., & SCHERER-LORENZEN, M. (2010). The influence of mixed tree plantations on the nutrition of individual species: a review. *Tree Physiology*, 30(9), 1192-1208.

RODRIGUEZ-SOLANO, J. G., QUINTANA-CABEZA, C. D., RIVERA-ALARCÓN, H. U., & MOSQUERA-TELLEZ, J. (2013). Zonificación del peligro de remoción en masa en las zonas urbanas según método de análisis Mora y Vahrson: Estudio de Caso. *Revista ambiental agua, aire y suelo*, 4(1).

ROSLEE, R., MICKEY, A. C., SIMON, N., & NORHISHAM, M. N. (2017). Landslide susceptibility analysis (LSA) using weighted overlay method (WOM) along the Genting Sempah to Bentong Highway, Pahang. *Malaysian Journal of Geosciences (MJG)*, 1(2), 13-19.

SAATY, T. L. (2004). Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of systems science and systems engineering*, 13(1), 1-35.

SAATY, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.

SALAZAR, C. (2004). Ammonites del Maastrichtiano de la Formación Quiriquina, VIII Región del Bío-Bío, Chile: sistemática, bioestratigrafía y afinidades paleobiogeográficas. *Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.*

SALEEM, J., AHMAD, S. S., & BUTT, A. (2020). Hazard risk assessment of landslide-prone sub-Himalayan region by employing geospatial modeling approach. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 1-18.

SANABRIA, J., MARENGO, J., & VALVERDE, M. (2009). Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno). Climate change scenarios using regional models for the Peruvian Altiplano (Department of Puno). *Revista Peruana Geo-Atmosférica*, 1, 134-149.

SARKAR, S., & KANUNGO, D. P. (2004). An integrated approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(5), 617-625.

SCHULZ, W. H., GALLOWAY, S. L., & HIGGINS, J. D. (2012). Evidence for earthquake

triggering of large landslides in coastal Oregon, USA. *Geomorphology*, 141, 88-98.

SOBARZO, V., VILLALOBOS, F., & KING, R. (2011). Estudio de la estabilidad de taludes en roca meteorizada de la formación Quiriquina. *Obras y proyectos*, (9), 38-48.

STINNESBECK, W. (1986). Faunistic and paleocological conditions of the Quiriquina Formation (Maastrichtian) of central Chile. *Palaeontographica A*, 194, 99-237.

VARNES, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.

VÁSQUEZ, P. (2001). Petrología y geotermobarometría del basamento metamórfico de la Cordillera de la Costa de Chile, entre los 36°30'S y 38°00'S. *Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito)*.

WIECZOREK, G. F. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 4-Landslide triggering mechanisms. *Transportation Research Board Special Report*, (247).

WU, C. Y., & CHEN, S. C. (2013). Integrating spatial, temporal, and size probabilities for the annual landslide hazard maps in the Shihmen watershed, Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(9), 2353.

Young, R. (2012). *Soil properties and behaviour* (Vol. 5). Elsevier.





**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



ANEXO A

**PROCESO ANALÍTICO
JERÁRQUICO (AHP)**

El AHP es una metodología que responde a la necesidad de mejorar la toma de decisiones por parte de los evaluadores en problemas de diversa índole, en presencia de una multitud de parámetros con diferentes importancias relativas entre ellos. El método tiene fundamentos psicológicos, matemáticos y empíricos.

En primer lugar, es necesario definir una estructura jerárquica entre los factores que se quieran ponderar. Con este objetivo, la metodología plantea una escala de valoración común (Tabla A.1) que sirve como guía para el evaluador.

Tabla A.1: Escala de Saaty. Modificada de Saaty (2008).

Escala	Definición	Explicación
1	Igualmente importantes	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo
3	Moderadamente importante	Preferencia leve de un elemento sobre otro
5	Fuertemente importante	Preferencia fuerte de un elemento sobre otro
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Preferencia muy fuerte de un elemento sobre otro. Predominancia demostrada
9	Importancia extremadamente fuerte	Preferencia clara y absoluta de un elemento sobre el otro
2,4,6,8	Niveles intermedios de los valores anteriores	

Cada uno de los parámetros del estudio (en este caso cada uno de los factores condicionantes utilizados en el análisis de susceptibilidad) se comparan a través de una matriz de comparación de a pares, basado en la escala de Saaty. De esta manera, cuando un elemento tenga mayor importancia que aquel con el cual se está comparando, su valoración respecto a dicho elemento se moverá dentro de 1 a 9 en la escala (en caso contrario, si el elemento en cuestión tiene menor importancia, su valoración se expresara a través de los inversos multiplicativos de las cifras de la escala: $1/2$, $1/3$, ..., $1/9$).

Al suponer que tenemos un número n de parámetros, la matriz A de comparación de a pares resultante presentara dimensiones de $n \times n$. La comparación de a pares, se ejecuta de tal modo que el parámetro en la fila i ($i = 1, 2, \dots, n$) se valora respecto a cada parámetro alterno ubicado en cada

una de las columnas j ($j = 1, 2, \dots, n$) de la matriz. Los elementos de A quedan definidos como a_{ij} . La matriz A obtenida queda expresada en la Tabla A.2.

Tabla A.2: Matriz de comparación de a pares. Para ejemplificar: el factor de litología tiene una importancia muy fuerte respecto al factor de forma de laderas ($a_{15} = 7$). Por otro lado, al comparar el factor de litología respecto al factor de pendientes, este último es levemente más importante ($a_{13} = 1/3$). Además, notar que si $a_{ij} = k$, entonces $a_{ji} = 1/k$.

Criterios	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
[1] Litología	1	5	1/3	6	7	5
[2] Proximidad a estructuras	1/5	1	1/7	3	3	2
[3] Pendiente	3	7	1	7	9	6
[4] Elevación	1/6	1/3	1/7	1	2	1/2
[5] Forma de laderas	1/7	1/3	1/9	1/2	1	1/3
[6] Usos de suelo	1/5	1/2	1/6	2	3	1

Para el cálculo de las ponderaciones de cada uno de los parámetros utilizados, se debe normalizar la matriz A obtenida para crear una matriz nueva (Tabla A.3). Este proceso, requiere calcular el cociente entre cada uno de los elementos individuales a_{ij} de A y la sumatoria de la columna a la cual pertenece dicho elemento. Las ponderaciones finales de cada parámetro estarán dadas por el promedio de los valores pertenecientes a la fila que se corresponde con dicho parámetro. El vector resultante de la operación anterior, queda definido como P .

Tabla A.3: Matriz normalizada.

Criterios	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	Ponderación final (P)
[1] Litología	0,212	0,353	0,176	0,308	0,280	0,337	0,278 (28%)
[2] Proximidad a estructuras	0,042	0,071	0,075	0,154	0,120	0,135	0,100 (10%)
[3] Pendiente	0,637	0,494	0,527	0,359	0,360	0,404	0,464 (46%)
[4] Elevación	0,035	0,024	0,075	0,051	0,080	0,034	0,050 (5%)
[5] Forma de laderas	0,030	0,024	0,059	0,026	0,040	0,022	0,033 (3%)
[6] Usos de suelo	0,042	0,035	0,088	0,103	0,120	0,067	0,076 (8%)

Para asegurar que haya habido consistencia en las valoraciones, se debe calcular el parámetro de consistencia o *consistency ratio* (CR), el cual se obtiene siguiendo los siguientes pasos: 1) obtener el producto entre la matriz A y el vector P, obteniendo el vector AxP, 2) calcular la sumatoria de los elementos que conforman el vector AxP, definida como n_{max} , 3) determinar el índice de consistencia (CI) según la ecuación mostrada a continuación:

$$CI = \frac{n_{max} - n}{n-1} \quad (1)$$

Luego, 4) determinar el índice aleatorio (RI):

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

Finalmente, 5) a partir de los valores obtenidos en (1) y (2) obtener CR según:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

Así, si el resultado de la ecuación (3) es menor o igual a 0,1, significa que los juicios hechos por el evaluador tienen una consistencia aceptable y por lo tanto los resultados también son consistentes. En caso contrario, este deberá revisar sus valoraciones. El CR obtenido en este trabajo fue de 0,805.



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



ANEXO B

**FOTOGRAFÍAS DE
REMOCIONES EN MASA**

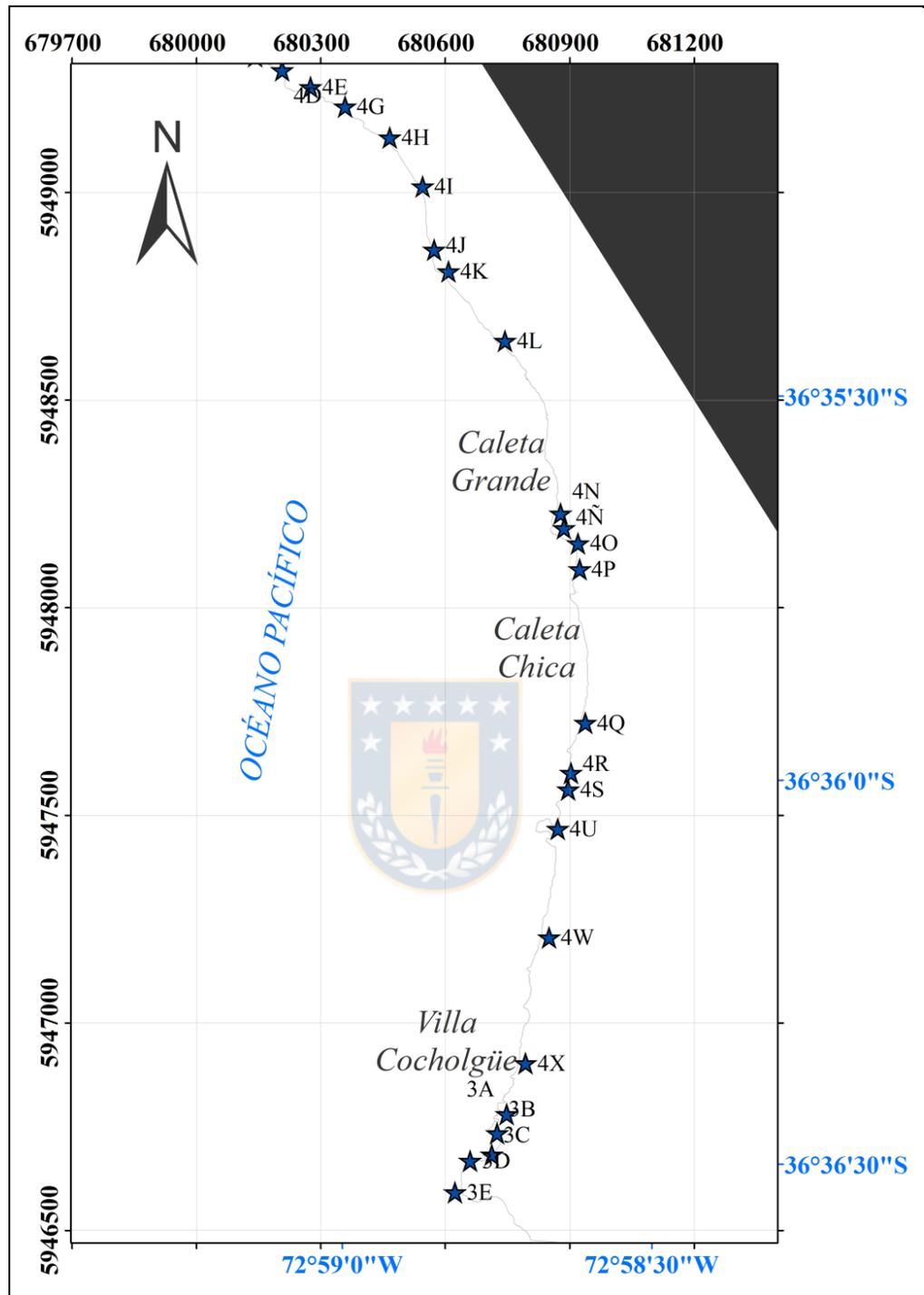


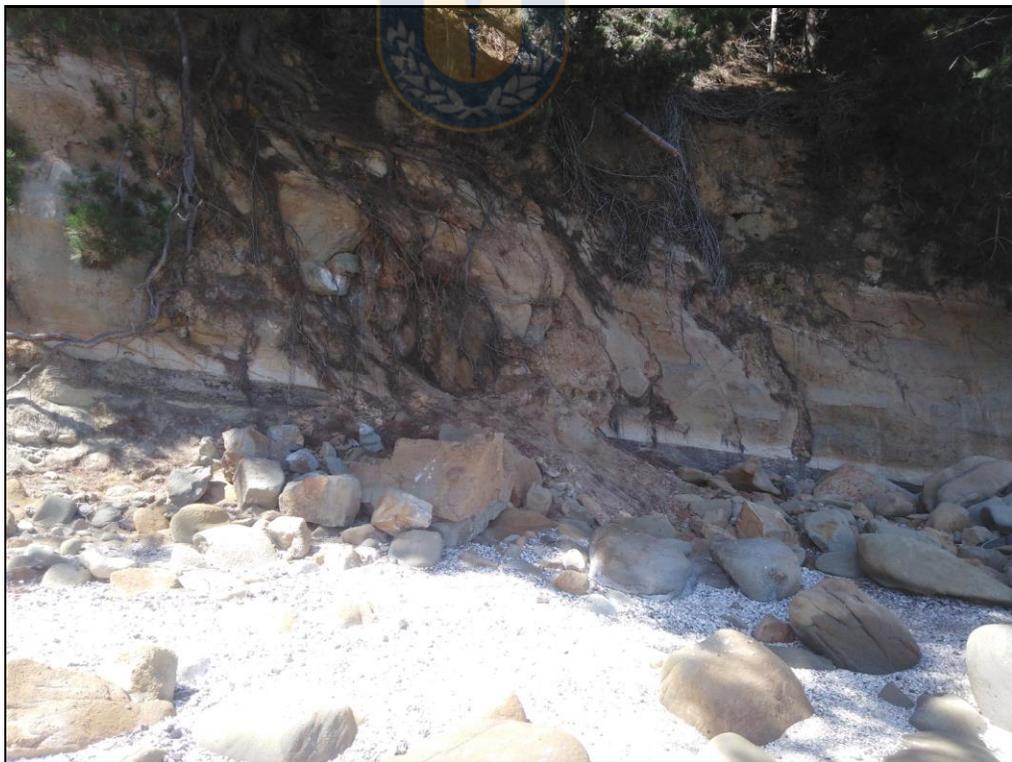
Figura B.1: Mapa de inventario con los depósitos de remoción en masa registrados durante terreno.

Tabla B.1: Depósitos de remoción en masa registrados durante terreno.

Punto	Tipo	Este	Norte
3A	Desprendimiento	680748	5946780
3B	Deslizamiento	680725	5946734
3C	Caída de rocas, flujo de detritos	680712	5946683
3D	Caída de rocas	680660	5946668
3E	Caída de rocas	680624	5946592
4A	Caída de rocas y suelo	680046	5949381
4B	Caída de rocas	680083	5949354
4C	Caída de rocas	680142	5949328
4D	Caída de rocas	680207	5949294
4E	Caída de rocas	680275	5949253
4G	Deslizamiento, caída de rocas	680359	5949206
4H	Deslizamiento	680466	5949132
4I	Caída de rocas	680545	5949014
4J	Caída de rocas, deslizamiento	680573	5948862
4K	Deslizamiento	680608	5948810
4L	Caída de rocas, deslizamiento	680744	5948642
4N	Caída de rocas	680878	5948226
4Ñ	Caída de rocas	680887	5948191
4O	Caída de rocas	680920	5948154
4P	Caída de rocas, deslizamiento	680924	5948093
4Q	Deslizamiento	680938	5947722
4R	Caída de rocas	680903	5947602
4S	Caída de rocas, flujo de detritos	680897	5947562
4U	Caída de rocas, deslizamiento	680871	5947467
4W	Caída de rocas, deslizamiento	680850	5947206
4X	Caída de rocas	680794	5946903



Fotografía 1: Depósitos de remoción en masa en punto 3B.



Fotografía 2: Depósitos de remoción en masa en punto 3C.



Fotografía 3: Depósitos de remoción en masa en punto 3D.



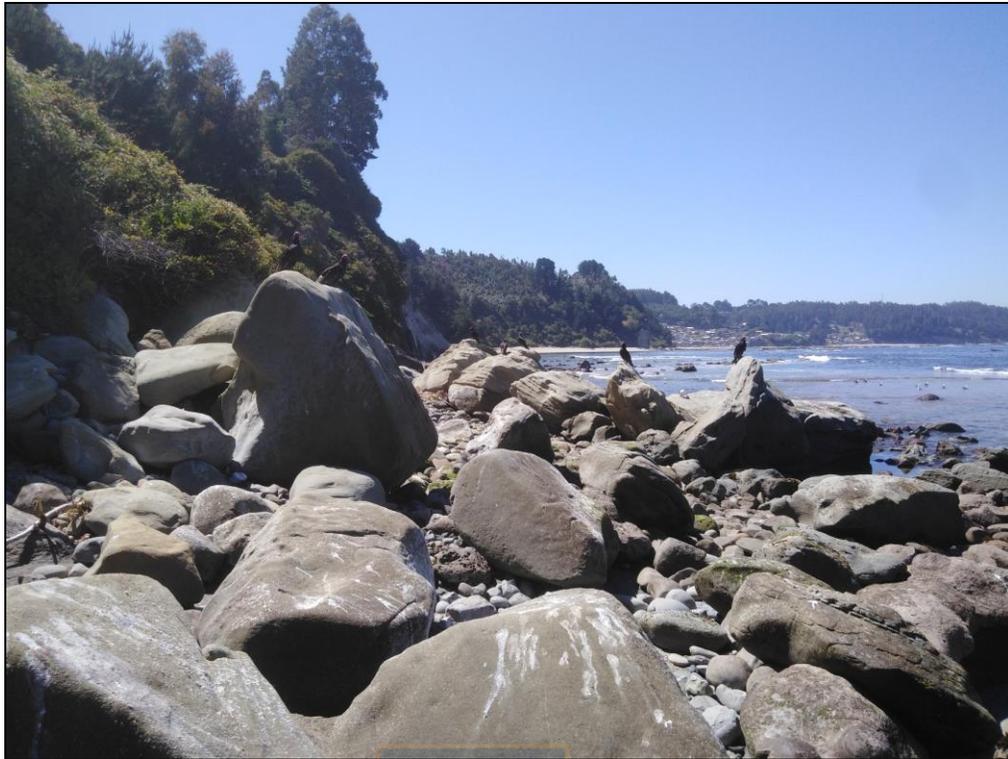
Fotografía 4: Depósitos de remoción en masa en punto 3E.



Fotografía 5: Depósitos de remoción en masa en punto 4A.



Fotografía 6: Depósitos de remoción en masa en punto 4B.



Fotografía 7: Depósitos de remoción en masa en punto 4C.



Fotografía 8: Depósitos de remoción en masa en punto 4D.



Fotografía 9: Depósitos de remoción en masa en punto 4E.



Fotografía 10: Depósitos de remoción en masa en punto 4G.



Fotografía 11: Depósitos de remoción en masa en punto 4H.



Fotografía 12: Depósitos de remoción en masa en punto 4I.



Fotografía 13: Depósitos de remoción en masa en punto 4J.



Fotografía 14: Depósitos de remoción en masa en punto 4K.



Fotografía 15: Depósitos de remoción en masa en punto 4L.



Fotografía 16: Depósitos de remoción en masa en punto 4N.



Fotografía 17: Depósitos de remoción en masa en punto 4Ñ.



Fotografía 18: Depósitos de remoción en masa en punto 4O.



Fotografía 19: Depósitos de remoción en masa en punto 4P.



Fotografía 20: Depósitos de remoción en masa en punto 4Q.



Fotografía 21: Depósitos de remoción en masa en punto 4R.



Fotografía 22: Depósitos de remoción en masa en punto 4S.



Fotografía 23: Depósitos de remoción en masa en punto 4U.



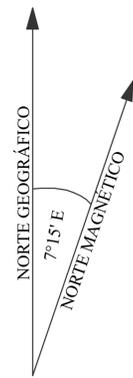
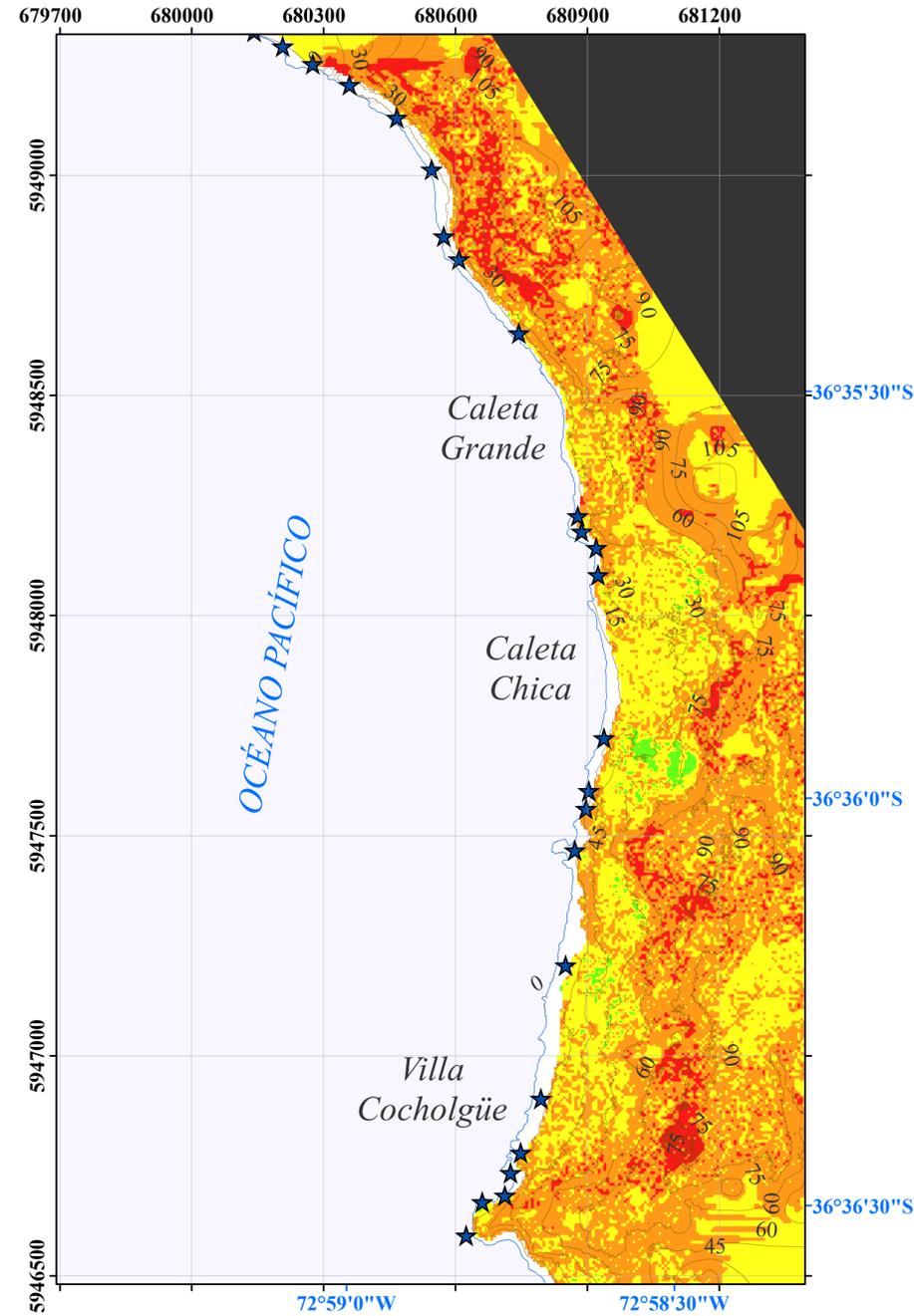
Fotografía 24: Depósitos de remoción en masa en punto 4W.



Fotografía 25: Depósitos de remoción en masa en punto 4X.



MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A REMOCIONES EN MASA - LOCALIDAD DE COCHOLGÜE



ESCALA 1:8.000



Equidistancia curvas de nivel: 15 m
Proyección Universal de Mercator (UTM), Zona 18S, Datum WGS84

GENERALIDADES

INTRODUCCIÓN Y ALCANCES DEL TRABAJO

El objetivo del presente mapa es el de realizar una zonificación de los distintos grados de susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa en la localidad de Cocholgüe, Comuna de Tomé, Región del Biobío, Chile.

Susceptibilidad: Posibilidad de que una zona se vea afectada por un proceso determinado, expresada en grados cualitativos y relativos. Depende de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos geológicos, los cuales pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos a ellos (Campos, 2014).

Factores condicionantes: Se denomina así a todo factor que pueda generar una situación potencialmente peligrosa, y que por lo tanto controlan la susceptibilidad de generar un fenómeno de remoción en masa (Campos, 2014).

Remoción en masa: Corresponden a la forma de desplazamiento de material más frecuente y extendida en la superficie. El desplazamiento puede ser lento o rápido, y ocurre producto de la acción gravitacional la cual mueve pendiente abajo volúmenes variables de suelo, roca o ambos hasta un nuevo nivel de estabilidad (Varnes, 1978; González de Vallejo y Ferrer, 2011; Hungr y otros, 2014).

Existen diferentes clasificaciones para las remociones en masa dependiendo del autor y del parámetro utilizado para la clasificación (p. ej. tipo o modo de movimiento, tipo de material, grado de saturación en agua, profundidad). En este estudio, se utilizará como base la clasificación definida en los trabajos de Varnes (1978) y Cruden y Varnes (1996), considerando algunas actualizaciones de trabajos más recientes. Las dos formas de remoción en masa más frecuentes en el área de estudio son las caídas de rocas y los deslizamientos.

Caídas o desprendimientos: En las caídas, un material (sin restricción de tamaño) se desprende desde una pendiente empinada o un acantilado, a lo largo de una superficie sobre la cual ocurre poco o nada de cizalle, descendiendo principalmente en caída libre por el aire hasta alcanzar el pie de la ladera donde puede seguir moviéndose por rodamiento o saltación. El movimiento es rápido a muy rápido, excepto cuando el material desplazado ha sido socavado, contexto en el cual la caída es precedida por pequeños deslizamientos o balanceos (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996).

Deslizamientos: Un deslizamiento es un movimiento de material ladera abajo el cual ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o a lo largo de varias zonas de cizalle. El movimiento no afecta simultáneamente a todo el material, sino que este se va propagando de forma relativamente gradual (Cruden y Varnes 1996). Si el material desplazado no alcanza el equilibrio al pie de la ladera, la carga puede continuar moviéndose por cientos de metros, alcanzando grandes velocidades finalmente derivando en otras formas de remoción (González de Vallejo y Ferrer, 2011).

METODOLOGÍA

La metodología utilizada queda enmarcada dentro de los métodos heurísticos, correspondiendo a un mapeo de susceptibilidad con base en la superposición ponderada de mapas temáticos cualitativos por cada factor condicionante utilizado. La estimación de las ponderaciones, se realizó apoyándose en el "Proceso Analítico Jerárquico" (AHP) como método complementario (Saaty, 2004; Saaty, 2008). Los factores condicionantes utilizados corresponden a: litología (que engloba el grado de alteración y calidad de roca), proximidad a estructuras, elevación, pendiente, forma de laderas y usos de suelo.

LEYENDA

NIVELES DE SUSCEPTIBILIDAD

- Muy alta** (Red square): La categoría de susceptibilidad muy alta, refleja que ocurrirá número muy cuantioso de remociones en dichas áreas, incluso en presencia de factores desencadenantes débiles o de poca intensidad.
- Alta** (Orange square): La categoría de susceptibilidad alta, caracteriza aquellas zonas en las que ocurrirá un número considerable de eventos, incluso en presencia de factores desencadenantes débiles o de poca intensidad.
- Moderada** (Yellow square): El nivel de susceptibilidad moderado, significa que frente a agentes desencadenantes, dichas zonas experimentarán un número limitado de remociones en masa.
- Muy baja a baja** (Green square): Las regiones correspondientes a los niveles muy bajo a bajo, indican una probabilidad de ocurrencia de remociones en masa limitada a la acción de fuertes factores desencadenantes como lluvias muy intensas, sismos o cambios muy drásticos en los usos de suelo.



SIMBOLOGÍA

- (Blue line): LÍNEA DE COSTA
- (Brown line): CURVAS DE NIVEL
- (Blue star): DEPÓSITOS DE REMOCIONES EN MASA
- (Black square): ZONAS SIN INFORMACIÓN

REFERENCIAS

CAMPOS, F. (2014). Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en la Quebrada de los Chanchos, Región Metropolitana, Chile. Tesis de pregrado. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

CRUDEN, D. M., & VARNES, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. Transportation research board special report, (247).

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L., & FERRER, M. (2011). Geological engineering. CRC Press.

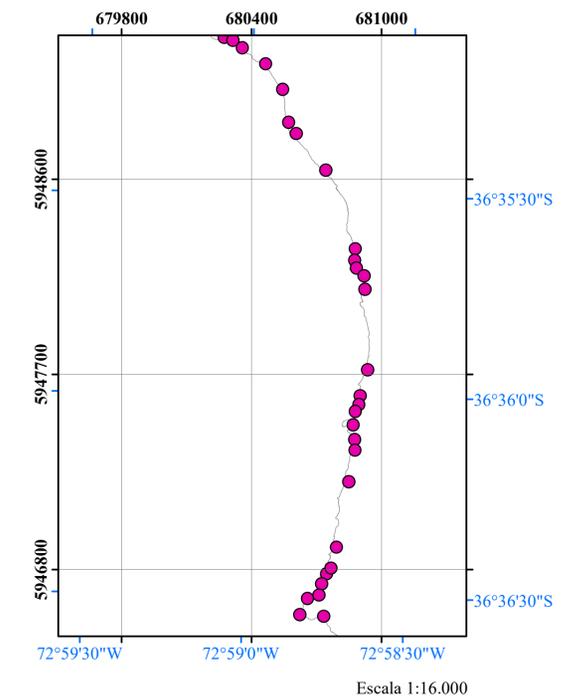
HUNGR, O., LEROUÉIL, S., & PICARELLI, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, 11(2), 167-194.

SAATY, T. L. (2004). Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). Journal of systems science and systems engineering, 13(1), 1-35.

SAATY, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International journal of services sciences, 1(1), 83-98.

VARNES, D. J. (1978). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33.

MAPA DE PUNTOS DE TERRENO - LOCALIDAD DE COCHOLGÜE



- (Blue line): LÍNEA DE COSTA
- (Pink circle): PUNTOS DE TERRENO

Nota: No están incluidos los puntos que se recorrieron durante los días en que se realizó el levantamiento fotogramétrico del área.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA

ANEXO C
MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A REMOCIONES EN MASA PARA LOCALIDAD DE COCHOLGÜE, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE

Mauro Castillo C.

2021