

*Evaluación de la susceptibilidad de remoción en masa en la localidad de El Ingenio, comuna de San José de Maipo, Chile.*



UNIVERSIDAD DE CHILE  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
Escuela de Pregrado  
Carrera de Geografía

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIÓN EN MASA EN  
LA LOCALIDAD DE EL INGENIO, COMUNA DE SAN JOSÉ DE MAIPO, CHILE

Memoria para optar al título profesional de Geógrafa

GABRIELA PAZ DÍAZ VALDIVIESO

Profesora Guía:  
MARÍA VICTORIA SOTO BÄUERLE

SANTIAGO – CHILE

2018

Este trabajo está dedicado a la Cata:

*La manera en que la vida nos juntó no es la que hubiésemos querido, aun no logro comprender la manera en que llegué a involucrarme tan cercanamente en algo que jamás imaginé vivir, pero has dejado en mí una huella imborrable. Sin duda alguna, el término de esta memoria, aunque sé que de manera incomparable, refleja un poco lo vivido por ti:*

*“Un camino largo y durísimo, que a momentos creíamos interminable, en donde perdimos la fe en que llegaría el día en que sonreiríamos por finalmente haber logrado nuestro objetivo.*

*Cuando creíamos que ya estaba todo había finalizado por fin... ¡No! Aún faltaba otro gran paso, y así el tiempo se nos hizo eterno por momentos”*

*¡Pero lo logramos!*

*El camino que nos queda por delante, seguro nos traerá nuevos desafíos, pero ya sabemos que somos mujeres fuertes y luchadoras que podemos hacernos frente a las más grandes dificultades, tú más que yo, sin duda alguna. Ahora, nos queda seguir aprendiendo y disfrutar los nuevos caminos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Si bien esta parte me parece un poco impersonal, porque creo que a las personas a quienes debo agradecerles lo debo hacer de manera personal, aquí va un resumen:

A mis padres, por aceptar siempre mis decisiones sin juzgarme, a pesar de que quizás muchas veces no hayan estado de acuerdo con el camino elegido; con ello demostraron la confianza que depositaron siempre en mí. Y obvio por su amor incondicional!

Agradecer a las profesoras María Victoria Soto y Carmen Paz, quienes estuvieron siempre dispuestas a orientarme y guiarme en este proceso; gracias también por lo enseñado durante toda la carrera porque de sus conocimientos aprendí mucho de aquellas inquietudes que me motivaron a entrar a esta carrera. Le agradezco también al Nacho Ibarra por su buena disposición cada vez que me acerqué a pedirle ayuda, sin duda gran parte de este trabajo es gracias a sus consejos.

Agradezco también a quienes me ayudaron durante el proceso de esta memoria: al Juan por su apaño en la semana de terreno, el mejor asistente que pude haber tenido. Gran parte de la pega de este trabajo salió de esa semana de trabajo, donde caminamos arduamente bajo el sol tomando fotos y puntos gps. ¡Cómo olvidar a Carmen y su guarida! Sin duda que fue un excelente terreno. Le agradezco también a Don Juan Eduardo, dueño del Fundo El Ingenio, por permitirnos acampar dentro del fundo.

En general, agradezco a todos quienes pasaron por esta etapa de mi vida que por fin se termina, ya que quienes conocen mi historia de vida saben que sacar una carrera universitaria ha demorado aaaaños! Hice grandes amistades que quedarán, a quienes les agradezco por todo lo vivido.

Espero quienes lean esta memoria, puedan entenderla: la hice pensando en que cualquier persona que no tenga conocimientos al respecto pueda entenderla y disfrutarla. Y bueno, espero que sea un pequeño aporte, más que en la disciplina del conocimiento, para aquellos que viven en zonas de riesgo; que la contribución de este trabajo sea ayudar a entender a las personas que el planeta en el que vivimos está vivo, activo y que por tanto debemos respetar sus procesos. Debemos comprender que lo que alteramos en ella tiene consecuencias que nos afectarán a nosotros o a otros; que son millones de años de evolución y procesos de una magnitud tal, que cuesta concebirla en la perspectiva humana; entender que son éstos los procesos los que han permitido que podamos disfrutar de sus maravillas, pero a la vez son los que configuran las amenazas a las que nos vemos expuestos; comprender que la Tierra tiende a su equilibrio natural, que su poder es infinitamente mayor al nuestro y que muchas veces subvaloramos, o bien, sobrevaloramos el nuestro. No olvidar que compartimos este espacio con muchas otras especies, y que si bien, todos tenemos el derecho a vivir en zonas seguras, para ello primero, tenemos el deber de ser responsables y respetuosos de lo que hacemos con nuestro planeta; él no es sólo el medio físico donde habitamos, sino que es nuestro hogar y el de muchos otros.

El camino para la reducción del riesgo, sin duda tiene una parte formal del conocimiento, pero creo fuertemente que la conciencia y la empatía son los aspectos críticos para un cambio profundo que nos permita construir un futuro más seguro para todos quienes habitamos este planeta.

## **RESUMEN**

---

Se evalúa la susceptibilidad de remoción en masa en la localidad de El Ingenio, comuna de San José de Maipo, lugar en donde se contempla una extensión urbana por parte de los instrumentos de planificación, lo que podría significar un aumento del riesgo en la zona, ya que dicho asentamiento se emplaza a los pies de laderas con evidentes procesos de remoción en masa que dan cuenta de la inestabilidad en la que se encuentran éstas. La metodología consistió en identificar y analizar la geomorfología de la zona, levantar un inventario a detalle de las remociones en masa, para luego, realizar una modelización de la susceptibilidad de ocurrencia de remoción a través de análisis estadísticos en el que se relacionan los factores condicionantes con los registros de remociones. Los resultados obtenidos dan cuenta de la geodinámica moderna de la zona, en donde las características estructurales de la Cordillera de los Andes determinan un ambiente morfoclimático de montaña que condiciona la estabilidad de las laderas. Se elaboró un Mapa de Susceptibilidad que muestra que casi el 40% de la zona presenta una alta susceptibilidad, lo mismo que ocurre con la mediana susceptibilidad, mientras que la baja susceptibilidad no alcanza el 20%. Se concluye que el área de estudio presenta un alto grado de inestabilidad, en donde los procesos de denudación favorecen la disponibilidad de material que es movilizado a través de diversos tipos de remociones en masa, traduciéndose en potenciales escenarios de desastres si es que no se considera la evaluación geodinámica del relieve en la planificación urbana.

**Palabras Claves:** riesgo geológico, remociones en masa, geodinámica de laderas en ambientes de montaña, factores condicionantes, susceptibilidad de remoción en masa.

## **ABSTRACT**

---

*The landslide susceptibility is assessed for the locality of El Ingenio in the San José de Maipo commune, where an urban extension is contemplated by the planning instruments, which could mean an increase in the risk in the area, since this settlement is located at the foot of slopes with evident processes of landslides that account for the instability in which they are located. The methodology consisted of identifying and analyzing the geomorphology of the area, taking an inventory in detail of the landslides found, and then modeling the susceptibility of landslides in a statistical analysis of the determining factors of landslides, work processed by GIS. The methodology consisted of identifying and analyzing the geomorphology of the area, taking an inventory in detail of the landslides found, then making a modeling of the landslides susceptibility through statistical analysis where the conditioning factors are related to the records of landslides. The results obtained account for the current geodynamics of the area, where the structural characteristics of the Andes mountain range determine a morphoclimatic mountain environment that conditions the stability of the slopes. A Susceptibility Map was drawn up showing that almost 40% of the area presents a high susceptibility, as occurs with the medium susceptibility, while the low susceptibility doesn't reach 20%. It is concluded that the study area presents a high degree of instability, where denudation processes favor the availability of material that is mobilized through various types of landslides, translating into potential disaster scene if it isn't considered the geodynamic assessment of concerns in urban planning.*

**Key words:** geological risk, landslides, slopes geodynamics in mountain, conditioning factors, landslides susceptibility.

## INDICE DE CONTENIDOS

---

<b>CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN.....</b>	<b>9</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	10
1.3. ÁREA DE ESTUDIO.....	13
1.3.1. Características Físico-Naturales.....	15
1.3.2. Características Demográficas .....	17
1.4. OBJETIVOS .....	18
1.4.1. Objetivo General.....	18
1.4.2. Objetivos Específicos.....	18
<b>CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ASUNTO.....</b>	<b>19</b>
2.1. EL RIESGO DE DESASTRES Y SU GESTION.....	19
2.2. GEODINAMICA EN AMBIENTES DE MONTAÑA.....	20
2.2.1. Sistema de Vertientes .....	21
2.2.2. Inestabilidad de Laderas en ambientes de montaña .....	22
2.3. REMOCIONES EN MASA.....	26
2.3.1. Clasificación de remociones en masa.....	26
<b>CAPÍTULO 3: PLANTEAMIENTO METODOLOGICO .....</b>	<b>30</b>
3.1. PRIMERA ETAPA: CONTEXTUALIZACION DE LA PROBLEMÁTICA Y ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	30
3.1.1. Recopilación de Antecedentes Preliminares.....	30
3.1.2. Materiales, herramientas y productos para la elaboración de la cartografía del área de estudio .....	31
3.2. SEGUNDA ETAPA: TRABAJO DE CAMPO .....	32
3.2.1. Pre-campaña de Terreno .....	32
3.2.2. Campaña de Terreno .....	32
3.3. TERCERA ETAPA: CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO	33
3.3.1. Clasificación Unidades Morfológicas .....	33
3.3.2. Materiales, herramientas y métodos para la elaboración de la carta geomorfológica.....	34
3.4. CUARTA ETAPA: ANALISIS DE LA GEODINAMICA ASOCIADA A REMOCIONES EN MASA .....	35
3.4.1. Contextualización Geológica Regional y Local .....	36
3.4.2. Geodinámica de laderas en ambientes de montaña .....	36
3.4.3. Materiales, métodos y Productos de la etapa para la elaboración del Inventario de remociones en masa .....	37

3.5.	QUINTA ETAPA: SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA .....	38
3.5.1.	Modelamiento de Susceptibilidad de Remociones en masa.....	39
3.5.2.	Materiales, métodos y Productos de la etapa para la elaboración del Mapa de Susceptibilidad de Remociones en masa.....	42
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS .....</b>		<b>43</b>
4.1.	CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO ....	43
4.1.1.	Modelado de Laderas .....	45
4.1.2.	Modelado Hídrico y Fluvial .....	48
4.2.	ANÁLISIS DE LA GEODINÁMICA MODERNA ASOCIADA A REMOCIONES EN MASA.....	57
4.2.1.	Marco Geológico Regional .....	57
4.2.2.	Marco Geológico Local.....	60
4.2.3.	Geodinámica moderna: inventario de remociones en masa.....	65
4.3.	EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCION EN MASA.....	74
4.3.1.	Método del Peso de la Evidencia: Selección de Factores Condicionantes .....	74
4.3.2.	Índice del Éxito .....	84
4.3.3.	Análisis de susceptibilidad.....	86
<b>CAPITULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>		<b>89</b>
5.1.	DISCUSIÓN .....	89
5.2.	CONCLUSIONES.....	94
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>94</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>103</b>

## **INDICE DE FIGURAS**

---

Figura N°1.	Cartografía del Área de Estudio.....	14
Figura N°2.	Esquema del movimiento de una caída de bloques.....	27
Figura N°3.	Esquema del movimiento de los deslizamientos.....	28
Figura N°4.	Esquema del movimiento de un flujo de detritos.....	29
Figura N° 5.	Esquema general de la metodología. Fuente: elaboración propia.....	30
Figura N°6.	Histograma Índice del Éxito.....	41
Figura N°7.	Carta geomorfológica del área de estudio.....	44
Figura N°8.	Cara libre y talud .....	46
Figura N°9.	Afloramientos rocosos sobre la vertiente cataclinal. ....	47
Figura N°10.	Vertiente conforme con escamas .....	48
Figura N°11.	Terraza por remoción en masa y vertiente conforme.....	49
Figura N°12.	Conos aluvio-coluviales en vertiente inversa .....	50

Figura N°13. Corte longitudinal de un Cono aluvio-coluvial .....	51
Figura N°14. Terraza Fluvial.....	52
Figura N°15. Escarpe en Terraza Fluvial.....	53
Figura N°16. Microcuenca endorreica .....	53
Figura N°17. Transición vegetacional en área endorreica colmatada .....	54
Figura N°18. Red de drenaje .....	56
Figura N°19. Mapa Geológico simplificado de Chile entre los 32°S y los 35°S.....	57
Figura N°20. Mapa geológico general del área de estudio.....	59
Figura N°21. Perfil estructural del área de estudio .....	61
Figura N°22. Estratificación, pliegues y fallas del área de estudio .....	62
Figura N°23. Perfil esquemático de pliegues estructurales en el Anticlinal El Ingenio. 62	
Figura N°24. Mapa Geológico a escala local.....	65
Figura N°25. Inventario de remociones en masa del área de estudio .....	66
Figura N°26. Caída de bloques en la vertiente anaclinal.....	67
Figura N°27. Bloques rodados en la vertiente cataclinal.....	68
Figura N°28. Grandes deslizamientos .....	69
Figura N°29. Material moderno sobre las superficies de erosión de deslizamientos ...	69
Figura N°30. Deslizamientos en la sección superior de la vertiente cataclinal.....	70
Figura N°31. Flujos de detritos en la parte superior de la vertiente cataclinal.....	71
Figura N°32. Corredores de flujos de detritos .....	72
Figura N°33. Mantos coluviales .....	73
Figura N°34. Depósitos de barro .....	74
Figura N°35. Mapa Factor Altura .....	75
Figura N°36. Mapa Factor Curvatura.....	76
Figura N°37. Mapa Factor Distancia a fallas .....	78
Figura N°38. Mapa Factor Distancia a red de drenaje .....	80
Figura N°39. Mapa de Factor Exposición .....	81
Figura N°40. Mapa Factor Geología.....	82
Figura N°41. Mapa Factor Pendiente .....	83
Figura N°42. Curva índice del éxito .....	85
Figura N°43. Carta de Susceptibilidad de remoción en masa del área de estudio. ....	86
Figura N°44. Número de píxeles en Mapa de Susceptibilidad .....	87
Figura N°45. Mapa de Susceptibilidad con catastro de remociones en masa .....	88
Figura N° 46. Metodologías de evaluación de susceptibilidad .....	90

## **INDICE DE TABLAS**

---

Tabla N°1. Taxonomía de Vertientes.....	21
Tabla N°2. Factores condicionantes relevantes para cada tipo de remoción en masa	23
Tabla N°3. Clasificación de remociones en masa .....	26
Tabla N°4. Clasificación de velocidades de los movimientos en masa .....	27
Tabla N°5. Resumen metodológico para la elaboración de la cartografía del área de estudio .....	31
Tabla N°6. Resumen de actividades, materiales y productos en trabajo de campo ....	33
Tabla N°7. Resumen metodológico para la elaboración de la carta geomorfológica ...	35
Tabla N°8. Resumen metodológico para la elaboración del Mapa de Inventario de remoción en masa .....	38
Tabla N°9. Conteo de densidades de píxeles y pesos para cada Clase/Factor.....	40
Tabla N°10. Resumen de los materiales y procedimientos para la elaboración del Mapa de Susceptibilidad.....	42
Tabla N°11. Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor Altura .....	75
Tabla N°12. Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor Curvatura .....	77
Tabla N°13. Resumen de distribución de Píxel/clase para el Factor distancia a fallas	78
Tabla N°14. Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor distancia a drenaje .....	80
Tabla N°15. Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor Exposición .....	82
Tabla N°16. Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor Geología .....	83
Tabla N°17. Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor Pendiente.....	84

## **INDICE DE ANEXOS**

---

ANEXO N°1. Registros Fotográficos de remociones en masa y sus depósitos .....	103
ANEXO N°2. Tablas de cálculos de pesos para cada factor.....	114
ANEXO N°3. Resumen de los pesos para cada Clase/Factor. ....	115

## **CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN**

---

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

Los eventos naturales que resultan en desastres representan una amenaza para las comunidades que se exponen a tales eventos, siendo uno de los focos de atención de la gestión del riesgo de desastres. Los impactos negativos de estos fenómenos son cada vez mayores, generando pérdidas sociales, económicas y medioambientales (MANSILLA, 2000; CASTRO *et al.*, 2017), razón por la cual la gestión del riesgo se aborda desde enfoque interdisciplinario, toda vez que se asume que los desastres son el resultado de una compleja interacción naturaleza- sociedad, por medio de la exposición de asentamientos humanos en espacios sometidos a los procesos de equilibrio natural que van modificando el entorno (LAVELL, 2002; CASTRO *et al.*, 2015; CASTRO, 2017). De lo anterior se deduce, que el riesgo es una construcción social que puede y debe ser manejada para minimizar los impactos negativos de la ocurrencia de fenómenos naturales.

En este sentido, las ciencias de la tierra aportan a la comprensión del funcionamiento dinámico de dichos sistemas naturales (HAUSER, 2000; GEMMA, 2007; IBARRA, 2013), mientras que desde la planificación urbana es fundamental que se involucren estos conocimientos a los procesos de reducción del riesgo de desastres, sobre todo dentro del contexto latinoamericano, en donde el crecimiento urbano muchas veces ha emergido espontánea y no reguladamente, lo que ha resultado en asentamientos urbanos emplazados en zonas de alta peligrosidad, configurando territorios vulnerables (CASTRO, *et al.*, 2008).

Particularmente, el crecimiento urbano de la región metropolitana ha llevado a su extensión hacia las zonas precordilleranas y cordilleranas con fines habitacionales (CAMPOS, 2014). En este contexto, se evidencia en la zona del cajón del Maipo un importante aumento de la población urbana, como sucede en la localidad de El Ingenio, donde reside la comunidad Balneario El Ingenio. Por su parte, el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS-100) y el Plan Regulador Comunal de la comuna de San José de Maipo contemplan zonas de extensión urbana en territorios cordilleranos, donde los procesos geodinámicos de montaña son evidentemente activos en la actualidad. El problema de dicha extensión urbana es que muchas de estas zonas urbanizables corresponden a pies de laderas, siendo áreas susceptibles a recibir el transporte de material movilizado por procesos de remoción en masa.

En esta línea, una de las etapas de la gestión del riesgo es la identificación de las amenazas (CARDONA, 2005), proceso que implica comprender, entre otras, la geodinámica de los paisajes. Dentro de este contexto, los Andes de Chile Central se caracterizan por sus relieves abruptos, en donde las grandes alturas y las fuertes pendientes, en conjunto con la actividad sísmica y volcánica, configuran paisajes de alta energía que tienden a equilibrarse a través de procesos gravitatorios como son las remociones en masa (MERGILI *et al.*, 2014). Para ello es preciso comprender la interacción de los factores que inciden en la ocurrencia de estos procesos, como son los factores geológicos, geomorfológicos, climáticos y antrópicos (GEMMA, 2007; MOLINA, 2016; SÁNCHEZ, 2014), de manera tal que se pueda predecir el comportamiento de estos paisajes altamente dinámicos.

De acuerdo a lo anterior, la presente memoria de título tiene como finalidad aplicar una metodología que permita evaluar la susceptibilidad de ocurrencia de remociones en masa en ambientes de montaña a través de una modelización de información espacial aplicada a la localidad de El Ingenio. Esta localidad se encuentra emplazada bajo un sistema de ladera con evidentes signos de remociones en masa modernas, lo que indica la inestabilidad actual en la que se encuentran éstas, y que ante eventos hidrometeorológicos y/o sísmicos podrían ser reactivadas, o bien, generar nuevas remociones. Ello se traduce en futuros escenarios de desastres que pueden ser evitados si se cuenta con información actualizada del estado geodinámico del entorno, lo que en definitiva sirve de insumo a la toma de decisiones. De allí que la importancia de profundizar el conocimiento de los territorios expuestos a remociones en masa permite avanzar en la gestión preventiva a través de una planificación urbana que considere estos eventos y sus áreas de influencia y en donde se implementen medidas de mitigación tendientes a reducir el riesgo.

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los desastres ocurridos producto de amenazas naturales, tales como tsunamis, erupciones volcánicas, terremotos, huracanes, inundaciones, entre otras, son una problemática cada vez más común en el mundo entero. De acuerdo con el Informe global de evaluación sobre reducción de riesgo de desastre de las Naciones Unidas, el riesgo derivado de amenazas naturales y socionaturales aumentó en forma significativa entre los años 1990 y 2011; en especial en los países de ingresos medios y bajos, y con economías en rápido crecimiento (UNISDR, 2011). Cifras indican que cerca de mil millones de personas se vieron afectadas por desastres a nivel mundial entre los años 1976-1985 (SASSA & CANUTI, 2009), mientras que en la última década los desastres afectaron a más de cuatro mil millones de personas y causaron la muerte de más de 750.000 personas, llegando a costar alrededor de US\$ 4,4 billones (WALLEMACQ & HOUSE, 2018).

Estudios indican que el desarrollo económico contribuye a configurar nuevas condiciones de riesgo, dado que ello tiende a incrementar la exposición de la población, la infraestructura y las actividades económicas en áreas propensas a la ocurrencia de fenómenos naturales. Esta situación es aún más significativa en países en vías de desarrollo, donde las elevadas tasas de crecimiento demográfico, de pobreza y de desigualdad, sumado a la rápida urbanización en ausencia de una planificación urbana preventiva, han inducido a que una porción importante de la población se localice en áreas expuestas a amenazas (CASTRO *et al.*, 2008; YAMIN *et al.*, 2013; CASTRO *et al.*, 2015).

Es por ello que, junto con el incremento de las preocupantes cifras, a lo largo de las últimas décadas se han desarrollado diversas estrategias para reducir el riesgo de desastres, a través de lo que hoy se conoce como la gestión del riesgo, entendida como un conjunto de acciones integradas que buscan reducir la vulnerabilidad y las condiciones inseguras de la población (BLAIKIE *ET AL.*, 1996).

Así, a nivel internacional, en el año 2005 se firma el Marco de Acción de Hyogo, aprobado por 168 países, incluyendo Chile, el cual tuvo como objetivo delinear una serie

de principios y prioridades para la reducción de pérdidas humanas, económicas y ambientales provocadas por desastres, dentro de un periodo de 10 años (UNISDR, 2005). En la misma línea de acción, el año 2015 se firma el Marco de Acción de Sendai, en el cual los países adscritos se comprometen a intensificar el trabajo mediante el fortalecimiento de las capacidades tanto institucionales, como de la sociedad civil y el mundo privado, incorporando de manera integral la gestión del riesgo de desastres (UNISDR, 2015).

Como resultado de ello, en el año 2012, Chile conforma la Plataforma Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastre, órgano multisectorial e interdisciplinario, cuyo objetivo es incorporar la reducción del riesgo de desastres en las diversas políticas públicas y en la planificación urbana. Para ello, se elabora la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres en el año 2014 y el Plan Estratégico para la Gestión del Riesgo de Desastres, el cual cuenta acciones estratégicas para llevar a cabo entre los años 2015-2018 (ONEMI, 2014; ONEMI, 2016).

Considerando que la disposición geográfica de Chile hace que gran parte del territorio nacional esté expuesto a múltiples amenazas de origen natural, lo que complementado con las condiciones de vulnerabilidad que provoca el crecimiento urbano desregulado y el cambio climático hacen que se configuren nuevos escenarios de riesgos (CASTRO *et al.*, 2008; ONU, 2014; ONEMI, 2016). Ante esto, la disciplina geográfica es una herramienta que aporta a la comprensión del riesgo y a la toma de decisiones desde un enfoque preventivo, favoreciendo así, en la disminución del riesgo de desastres. Parte de ello, implica incrementar el conocimiento sobre los procesos morfodinámicos a los que se encuentran sometidos los diversos territorios, de manera tal que permita avanzar en la primera etapa de la gestión del riesgo, que es la identificación de la amenaza (YAMIN *et al.*, 2013).

En particular para las amenazas asociadas a los ambientes de montaña, se debe considerar que la Cordillera de los Andes se caracteriza por su condición dinámica, en donde constantemente están actuando agentes internos que modelan el paisaje, tales como la actividad sísmica y volcánica (GEMMA, 2007; HAUSER, 2000; MERGILI *et al.*, 2014), así como también agentes externos, como son los eventos hidrometeorológicos. Dichos agentes son parte fundamental de la morfodinámica pasada y presente que han dado como resultado un relieve andino abrupto, caracterizado por la inestabilidad de laderas, y cuya morfología ha sido modelada por procesos tanto acumulativos como erosivos (HAUSER, 2000; MERGILI *et al.*, 2014). Dentro de estos últimos se encuentran las remociones en masa, entendidas como movimientos gravitacionales ya sea de suelo, roca o ambos (CRUDEN, 1991; HAUSER, 2000; HUNGR *et al.*, 2014).

Debido a las características morfodinámicas de los ambientes andinos antes mencionadas, es que los procesos de remoción en masa son eventos de origen geológicos muy recurrentes en Chile, lo que representa uno de los mayores desafíos para la planificación urbana y la gestión del riesgo, debido a que son muchas las localidades que se han asentado a los pies de laderas o cercanos a cursos de agua, quedando expuestas a recibir los impactos generados por este tipo de procesos, constituyéndose en una amenaza latente. HAUSER (2000) señala que prácticas inadecuadas de uso del suelo, ya sea para destinos de vivienda, industria, recreación y/o servicios en zonas marginales de grandes ciudades chilenas se han traducido en una creciente utilización de espacios muy vulnerables a los efectos de remociones en

masa del tipo flujos (SEPULVEDA, 1998; CASTRO *et al.*, 2008; LARA & SEPULVEDA, 2008).

Si además se considera que las remociones en masa son desencadenadas, entre otros factores, por eventos pluviométricos de gran magnitud, los escenarios de riesgos aumentan, dado que evidencias científicas muestran que los fenómenos hidrometeorológicos asociados a extremos climáticos se han intensificado en frecuencia y magnitud (IPCC, 2012), afectando al ciclo del agua y provocando severas consecuencias, sea por sequías extremas, o bien, por eventos pluviométricos de gran intensidad en un período relativamente corto. Esto puede verse agravado, aún más, por la presencia de fenómenos como El Niño o ENSO, por ser gran factor de inestabilidad (GLASSER & ESPINOZA, 2017), por lo que los impactos de los eventos de remoción en masa en estos contextos, y al interactuar con los sistemas humanos expuestos y vulnerables, aumentan los efectos de desastre.

En esta línea, cifras entregadas por la Subsecretaría de Desarrollo Regional señalan que las amenazas de carácter geológicas e hidrometeorológicas produjeron un total de 669 fallecimientos, 127.000 afectados y pérdidas económicas por un monto aproximado de US\$151 millones de dólares entre los años 1981-2000 (IBARRA, 2013). HAUSER (2000) revela cifras específicas para remociones en masa en Chile: en tan sólo 19 eventos ocurridos entre los años 1925-1993 se registraron 653 fallecidos y cerca de 228 desaparecidos, sin evaluar los costos económicos y ambientales.

Dado lo anterior, la presente memoria de título tiene por finalidad aplicar una metodología que permita evaluar la susceptibilidad de ocurrencia de remoción en masa en ambientes de montaña a través de una modelización de información espacial correspondiente a la localidad de El Ingenio, en la comuna de San José de Maipo. Se ha escogido esta área de estudio, ya que dicha localidad se inserta como zona urbana dentro del plan regulador metropolitano de Santiago y del plan regulador comunal de San José de Maipo, permitiendo con ello la expansión urbana mediante la definición de áreas urbanizables contempladas en la nueva actualización del plan regulador que dicha comuna está elaborando (PRCSJM, 2016).

Si bien los instrumentos normativos antes mencionados contemplan un área restringida al desarrollo urbano por considerarse expuesta a riesgos geofísicos asociados a remociones en masa, se permite allí un desarrollo condicionado (PRCSJM, 2009). Por su parte, si bien la actualización del plan regulador comunal requiere llevar a cabo un estudio de riesgo, éste sólo ha enfocado en la localidad de San José, quedando en evidencia la fragilidad a la que se encuentran expuestos los otros asentamientos producto de la débil planificación urbana que priorice en la reducción del riesgo de desastres.

En este sentido, la localidad de El Ingenio representa una zona de riesgo, dado que se encuentra expuesta a las remociones en masa que se originan en las laderas donde se emplaza. Es por ello, que realizar una evaluación de la susceptibilidad hacia este tipo de procesos aporta a la etapa de identificación de la amenaza en el contexto de la gestión y reducción del riesgo.

### **1.3. ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio escogido para la aplicación de este trabajo corresponde a la localidad de El Ingenio, ubicada en la comuna de San José de Maipo. Esta comuna se extiende al suroriente de la región Metropolitana, abarcando la mayor parte de la cordillera de los Andes de la región, razón por la cual se encuentra fuera de los límites metropolitanos del Gran Santiago, condición que le otorga un carácter semi-rural (PRCSJM, 2009). No obstante lo anterior, el plan regulador metropolitano de Santiago (PRMS 100, 2011) define 13 localidades de la comuna como áreas de extensión urbana, dentro de las cuales se encuentra El Ingenio.

La localidad de El Ingenio se ubica aproximadamente a 20 km al sureste de la localidad principal de San José de Maipo. Este asentamiento urbano es el único que se emplaza en la ribera opuesta a la ruta G-25, vía principal que conecta a la zona con la ciudad de Santiago.

Este asentamiento se extiende principalmente sobre la terraza fluvial, y en menor medida en áreas de contacto entre la ladera y dicha terraza. El área de estudio tiene una superficie de 687,2 hectáreas, de las cuales 56,5 están contempladas dentro de los límites de extensión urbana en la nueva actualización del Plan Regulador Comunal (PRCSJM, 2016). Las coordenadas geográficas de este trabajo se extienden entre los 33°44'S y 33°47'S, y los 70°15'W y 70°17'W (ver Figura N°1).

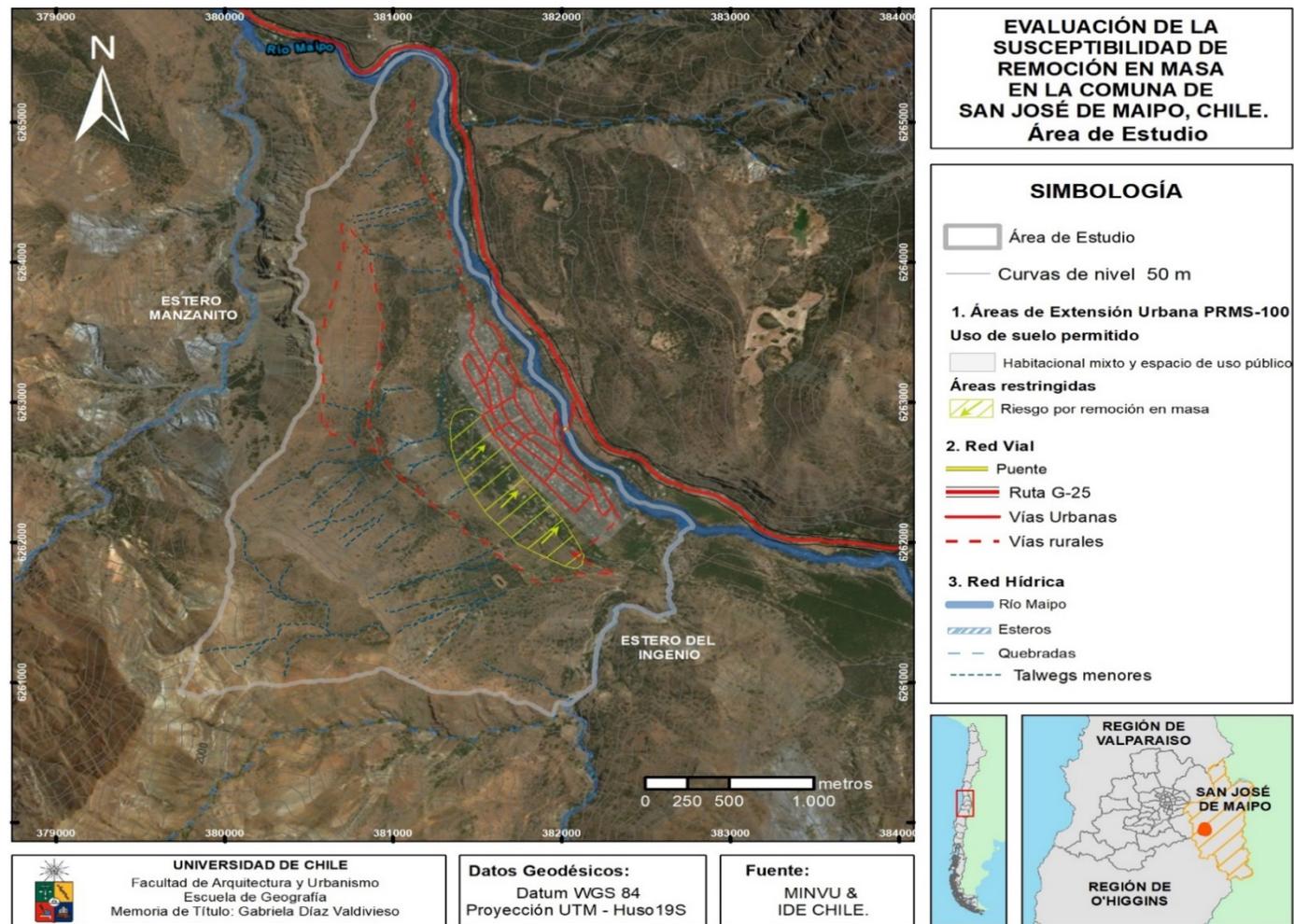


Figura N°1. Cartografía del Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia en base a datos del MINVU e IDE CHILE.

### **1.3.1. Características Físico-Naturales**

La comuna de San José de Maipo se sitúa en la parte alta de la cuenca del río Maipo, cuenca de origen principalmente tectónico con rellenos aluviales, volcánicos y glaciales (MOP-DGA, 2009). De allí que el relieve comunal se compone mayormente por cordones montañosos de carácter estructural con alturas que superan los 6.000 m.s.n.m, tales como los volcanes extintos Marmolejo (6.100 m.s.n.m) y Tupungato (6.570 m.s.n.m), mientras que las unidades volcánicas activas son el complejo volcánico San José (5.856 m.s.n.m) y el volcán Tupungatito (5.603 m.s.n.m) los que son de tipo estratovolcán, en tanto que el volcán Maipo (5.623 m.s.n.m) es del tipo caldera. (I. MUNICIPALIDAD DE SAN JOSÉ DE MAIPO, 2010). Dicha actividad volcánica conlleva la aparición de diversas fuentes hidrotermales que son ampliamente conocidas por visitantes de la zona central debido al desarrollo turístico en torno a ellas, como son las termas de Baños Colina y las termas de El Plomo.

Dentro del dominio de alta montaña, se reconoce el modelado glacial a través de sus altas cumbres, en donde se observan laderas escarpadas de roca expuesta esculpidas por los glaciares. Este dominio de alta montaña condiciona, además, las características hidrológicas de la cuenca del Maipo, dado principalmente por el aporte glacial y la importante nivación estacional (MOP-DGA, 2003). Así, tanto su cauce principal - el río Maipo-, como sus tributarios -los ríos Colorado, Yeso y Volcán- tienen un régimen de alimentación predominantemente nival. Es por ello que sus máximas crecidas ocurren entre los meses de noviembre y marzo producto de los deshielos cordilleranos (MOP-DGA, 2004). Estos cauces, a su vez se alimentan de esteros y quebradas, entre los que destacan para el flanco sur de la cuenca del Maipo -donde se ubica el área de estudio- los esteros Coyanco, Manzanito y del Ingenio; es entre estos dos últimos en donde se localiza este estudio. Dentro de los cuerpos de agua de la comuna, destacan el embalse El Yeso, y las Laguna Negra y del Encañado, principales reservas de agua potable de la región Metropolitana (I. MUNICIPALIDAD DE SAN JOSÉ DE MAIPO, 2010).

En lo que refiere al área de estudio, esta comprende una sección de la subcuenca del Estero del Ingenio que se encuentra delimitada al noreste por el río Maipo, al sureste por una quebrada que confluye en el Estero del Ingenio, al oeste por la divisoria de aguas que limita con la subcuenca del Estero Manzanito. Dicha sección abarca una altitud que va desde los 1.150 m.s.n.m hasta los 2.240 m.s.n.m aproximadamente, lo que indica una altitud media de 1.745 msnm (ver Figura N°1).

El área de estudio presenta un clima mediterráneo de carácter templado cálido, el cual se caracteriza por un invierno frío y una estación seca prolongada, lo que determina una marcada diferencia estacional. Ello genera que las precipitaciones se concentren en la época de invierno con temperaturas que oscilan entre los 3°C y 18°C, mientras que la estación estival se prolonga durante 7 a 8 meses del año, con temperaturas que pueden superar los 30°C y que pueden conllevar periodos de sequía (DI CASTRI & HAJEK, 1976; DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE, 2001; MOP-DGA, 2004 I. MUNICIPALIDAD DE SAN JOSÉ DE MAIPO, 2010).

Lo anterior se explica por las condiciones de la circulación general de la atmósfera en una zona que es de transición, entre el anticiclón subtropical del pacífico suroriental (APSO) por el norte y el cinturón de los vientos del oeste por el sur. Esta transición geográfica es la que produce la marcada estacionalidad de Chile Central, generando

una influencia anticiclónica creciente de sur a norte y de invierno a verano, mientras que la influencia del cinturón de vientos del oeste en el espacio y tiempo resulta a la inversa de la anticiclónica (RUTLANT, 2004). Por tanto, el dominio de los vientos del oeste en invierno, en el cual se alternan altas y bajas presiones que generan perturbaciones del frente polar en latitudes medias, son las que explican la concentración de las precipitaciones en los meses fríos, mientras que el APSO genera una prolongada estación seca con veranos muy cálidos (DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE, 2001, 2017; RUTLANT, 2004; ORMEÑO, 2007).

Sumado a lo anterior, el control orográfico de la Cordillera de la Costa que bloquea la influencia del mar genera una primera diferencia entre barlovento y sotavento, aumentando con ello la temperatura hacia el interior del continente, condición que es profundizada en la Cordillera de los Andes, ya que el efecto orográfico aumenta aún más la variación climática entre zonas costeras y zonas continentales interiores, evidenciado por la amplia oscilación térmica diaria y anual de la zona central de Chile (DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE, 2001; RUTLANT, 2004).

En tanto que para las precipitaciones, las características del relieve local hacen que las precipitaciones de invierno sean del tipo orográfico, en donde las masas de aire oceánico se internan por el valle central y al ascender por la Cordillera de los Andes se encuentran con masas de aire frío, condensándose y precipitando finalmente; mientras que durante las épocas de verano, las masas de aire húmedo que provienen del este, desde Argentina, por procesos de convección precipitan, generando las lluvias de verano en la cordillera (I. MUNICIPALIDAD DE SAN JOSÉ DE MAIPO, 2010). Asimismo, la variación altitudinal genera una transición entre el clima mediterráneo y el frío de altura, aumentando con ello los montos de precipitación y disminuyendo las temperaturas.

Otra consideración de las características climáticas es la presencia del ciclo interanual de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), el cual corresponde a una oscilación térmica del Océano Pacífico que genera en su periodo cálido –El Niño- un aumento la temperatura del mar y por ende una mayor evaporación, con lo cual se intensifican las precipitaciones (RUTLANT, 2004; ORMEÑO, 2007), lo que se traduce en años muy lluviosos que favorecen la susceptibilidad de ocurrencia de eventos de remoción en masa e inundaciones. En tanto que los años en que domina La Niña suelen ser períodos de intensa sequía.

De acuerdo a los antecedentes climáticos antes mencionados, en particular para el caso de estudio se tomaron como referencia los registros hidrometeorológicos proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile. Respecto a la temperatura, la Estación de Pirque (659 m.s.n.m) es la más cercana al área de estudio con datos prolongados (serie 1980-2017), y presenta una temperatura media anual de 14,09°C, mientras que el mes más frío es julio con temperatura media de 8,4°C y el mes más cálido es enero con una temperatura media de 19,8°C (I. MUNICIPALIDAD DE SAN JOSÉ DE MAIPO, 2010). En la Estación Las Melosas (1.527 m.s.n.m), según datos del MOP-DGA (2004) la temperatura media anual es de 14,21°C.

En cuanto a las precipitaciones, se tomaron los registros de la serie 1980-2017 de la estación San Gabriel que se encuentra a 1.266 m.s.n.m. De acuerdo a los datos, la estación tiene una media anual de 594 mm; los meses más lluviosos son julio y junio

respectivamente, con montos que casi alcanzan los 150 mm/mes, en tanto que los meses con menor precipitaciones son enero y diciembre, con montos que bordean los 4mm/mes.

### **1.3.2. Características Demográficas**

La comuna de San José de Maipo se compone de 23 localidades, de las cuales 13 son de carácter urbano y 10 son de carácter rural. La localidad de El Ingenio, de carácter urbana, es un asentamiento de tercer orden a nivel comunal, según la jerarquía determinada por cantidad de población y servicios (I. MUNICIPALIDAD DE SAN JOSÉ DE MAIPO, 2010). Las localidades más cercanas son San Alfonso a 6 km hacia el norte y San Gabriel a 3 km al sur, ambas localidades de segundo orden.

La población comunal llega a los 18.189 habitantes, según la primera entrega de resultados definitivos del Censo 2017 (INE, 2017). No obstante, esta primera entrega no tiene una desagregación a nivel local, por lo que la referencia para la localidad son los datos del Censo 2002 (INE, 2002) en donde la población de El Ingenio llegaba a los 505 habitantes, quedando en la categoría de pueblo según la clasificación del INE; y por la tendencia mostrada entre los años 1992-2002, en que la población creció un 30%, se espera que para el año 2017 ese número sea notoriamente mayor de acuerdo a su acelerado crecimiento (PRCSJM, 2016).

Este asentamiento urbano se ha caracterizado históricamente por ser una zona de balneario y segunda residencia, en donde la ocupación de viviendas llega a alrededor del 20% (I. MUNICIPALIDAD DE SAN JOSÉ DE MAIPO, 2010; PRCSJM, 2016). Sus orígenes como asentamiento se remontan al año 1950, en que parte del fundo El Ingenio es destinado a la subdivisión para venta de parcelas de segunda residencia, lo cual la ha llevado a un desarrollo paulatino de edificaciones y de vías estructurantes dentro del área. Es el fundo el encargado de abastecer de agua potable a la localidad a través de la Corporación Balneario El Ingenio, que es de carácter privado y que administra el espacio público, luminarias y servicios sanitarios. Cabe destacar que la localidad no cuenta con sistema de evacuación de aguas servidas (PRCSJM, 2016).

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo General**

- ✓ Evaluar la susceptibilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa en la localidad de El Ingenio, en la comuna de San José de Maipo.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Identificar y analizar las características geomorfológicas del área de estudio, reconociendo las formas y los procesos morfodinámicos de la zona.
- ✓ Identificar y caracterizar las remociones en masa reconocidas en el área de estudio.
- ✓ Determinar las condiciones de susceptibilidad de ocurrencia de remoción en masa a través de una modelización de geoinformación.

## **CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ASUNTO**

---

### **2.1. EL RIESGO DE DESASTRES Y SU GESTION**

La explicación de los fenómenos naturales y sus impactos sobre los asentamientos humanos ha evolucionado con el tiempo. Perspectivas pasadas concebían los desastres como castigos divinos, sin embargo, el conocimiento de las dinámicas físico-naturales del planeta ha permitido explicar científicamente su ocurrencia, transfiriendo con ello la responsabilidad de los desastres a la sociedad, toda vez que se entiende que es la interacción de los factores sociales con los factores físico-naturales los que determinan su ocurrencia (LAVELL, 2002; RUIZ, 2016).

Lo anterior implica un cambio de paradigma, en el que el centro del problema ya no es el desastre en sí mismo, sino que es el riesgo, poniendo en evidencia que los desastres son el resultado de los contextos sociales, políticos y económicos y por tanto son éstos los que determinan que ciertas esferas de la sociedad se encuentren más expuestas a las amenazas o bien sean más vulnerables frente a los impactos de un fenómeno peligroso (MANSILLA, 2000). En este enfoque se concibe al riesgo como una construcción social, lo que implica poner énfasis en las condiciones de vulnerabilidad, de manera tal que los esfuerzos para reducirlo se concentren en fortalecer la capacidad de las comunidades para responder a los efectos de eventos naturales extremos (CASTRO *et al.*, 2015).

En esta línea, se define al riesgo como la probabilidad de pérdidas y daños ante la ocurrencia de un evento natural; éste se compone de la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad (LAVELL, 2002, 2007), de modo tal que la intervención en cualquiera de sus componentes implica la intervención en el riesgo en sí mismo (CARDONA, 2001).

La amenaza, considerada como el factor externo del riesgo, es un fenómeno potencialmente peligroso, condicionado por su ubicación, magnitud, intensidad y recurrencia (CHARDÓN & GONZÁLEZ, 2002; GELLERT DE PINTO, 2012). De acuerdo a su origen, se reconocen 3 tipos: (1) las amenazas naturales, que resultan de la dinámica geológica, geomorfológica, atmosférica y oceanográfica propia del planeta; (2) las amenazas socio-naturales, que son aquellos fenómenos que parecieran ser de origen natural, pero en donde la acción humana interviene en la generación o en el grado de los impactos; y (3) las amenazas antrópicas, que devienen totalmente de actividades humanas, tales como pueden ser las diferentes fuentes de contaminación del aire, agua o tierra (WILCHES-CHAUX, 1998; LAVELL, 2002, 2007; RUIZ, 2016).

Por su parte, la exposición se refiere tanto a las personas como a los recursos (infraestructura, medios de vida, bienes y/o servicios) que se encuentran dentro del área de influencia de una amenaza, lo que incluye también a los recursos intangibles como son los aspectos culturales (LAVELL, 2007).

La vulnerabilidad, en tanto, es considerada como el factor interno del riesgo, que frente a la exposición a amenazas puede desencadenar los desastres. De allí que se defina como la predisposición o susceptibilidad –tanto física, como económica, política o social– que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir los efectos adversos ante la ocurrencia de un fenómeno peligroso (WILCHES-CHAUX, 1998; LAVELL, 2007; RUIZ, 2016).

De acuerdo a lo anterior, la gestión del riesgo tiene por objetivo reducir el riesgo de desastres a través de prácticas sistemáticas que permitan gestionar la incertidumbre y minimizar los daños y las pérdidas potenciales (UNISDR, 2009). Se trata así, de estrategias de planificación en las que se aplica un conjunto de acciones y procesos bien definidos, orientados al conocimiento, la reducción y a la transferencia del riesgo como medidas *ex ante*, mientras que como medidas son medidas *ex post*, se consideran la preparación y respuesta a las emergencias, así como también la rehabilitación y la reconstrucción (YAMIN *et al.*, 2013).

En síntesis, la gestión del riesgo contiene medidas, en primer lugar, para la prevención y la mitigación; en segundo lugar, para la preparación y la respuesta a emergencias; y, en tercer lugar, para el proceso de recuperación ante los desastres. Dentro de las medidas preventivas se considera fundamental la identificación de las amenazas, entendiendo que es el primer paso para conocer y gestionar los riesgos a los que se expone un territorio. Con ello, la evaluación de riesgos debe incluir la vigilancia y el monitoreo de los fenómenos peligrosos, junto con los estudios de mapas y modelos de peligros y exposiciones, para evaluar la vulnerabilidad de los componentes expuestos (YAMIN *et al.*, 2013).

En este sentido, la evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en la localidad de El Ingenio busca identificar el riesgo, como parte de las medidas preventivas, para así, en eventuales procesos posteriores, definir acciones de mitigación, preparación, respuesta y reconstrucción que permitan reducir integralmente el riesgo ante este tipo de amenazas.

## **2.2. GEODINAMICA EN AMBIENTES DE MONTAÑA**

Los sistemas de laderas se caracterizan por sus formas irregulares, como resultado de los procesos morfogenéticos y denudacionales a las que han sido sometidas, entre los que destacan principalmente, los de origen tectónico, volcánico, glacial o periglacial, fluvial y/o gravitacionales y en donde, además, el ambiente morfoclimático juega un rol muy importante en su configuración (STRAHLER, 1992; GUTIERREZ, 2008; HAUSER, 2000;). Las laderas se consideran sistemas dinámicos abiertos, sujetos a los efectos del desgaste que favorecen el transporte de materiales aguas abajo (FERNANDEZ, 2006), configurándose como el principal medio de aporte de materia y energía hacia planos inferiores (SOTO *et al.*, 2006; PADILLA, 2007).

En particular, los ambientes de montaña, considerados unidades de alta energía en donde los procesos geomorfológicos operan con mayor rapidez e intensidad que en otras regiones, están condicionados por la relación ladera-*talweg*, siendo las laderas los sistemas aportadores de masa, mientras que los *talwegs* son los exportadores de dicha masa hacia otros sistemas, principalmente a la red de drenaje (SOTO *et al.*, 2006; SANCHEZ, 2014). En este sentido, el dominio morfoclimático en los ambientes de montaña hace mucho más evidente la acción de los agentes externos sobre las formas estructurales que sobre relieve bajos, donde la vegetación y la cobertura superficial revisten de mejor manera a las estructuras. Los ambientes de montaña son, por tanto, sistemas de erosión que tienden a rebajar los escarpes y taludes, así como también son sistemas de depositación, toda vez que generan formas correlativas de depositación en

la base de las vertientes o laderas (ARAYA VERGARA, 1985; CASTRO *et al.*, 2003; FERNANDEZ, 2006; SÁNCHEZ, 2014).

Particularmente los Andes de Chile Central, caracterizados por una gran altura, fuerte pendiente y escasa o nula cubierta vegetacional, en ambientes marcados por la tectónica y las estructuras plegadas, favorecen el desarrollo de potentes y amplios depósitos de gravedad, evidenciándose así, las relaciones dinámicas modernas entre las vertientes y las formas de base (CASTRO *et al.*, 2003; SOTO *et al.*, 2007).

### 2.2.1. Sistema de Vertientes

La taxonomía de ARAYA VERGARA (1985) considera a las vertientes de montaña como sistemas que deben explicarse bajo su contexto morfodinámico, es decir, las vertientes individuales se combinan de cierta manera para conformar el sistema mayor de vertientes, y sus características son el resultado de la interacción con todo el sistema. Asimismo, un sistema de vertientes se relaciona correlativamente a las formas de base, quedando implícito en la clasificación la idea de *continuum* entre las morfologías que aportan materiales y aquellas en que éstos se acumulan; por tanto, el estado morfogenético de los aportes de masa permiten inferir condiciones altamente dinámicas de los ambientes de montaña, lo que en definitiva demuestra que son el resultado de procesos actuales y subactuales (CASTRO *et al.*, 2003; FERNANDEZ, 2006; SOTO *et al.*, 2006). La Tabla N°1 sistematiza la taxonomía de vertientes de ARAYA VERGARA (1985).

**Tabla N°1.** Taxonomía de Vertientes

Influencias Estructurales		Influencias Exógenas	
Estructura concordante	Cara libre y talud	Según tendencia erosiva	De flanco activo
	Cara libre rugosa y talud		De flanco pasivo
	Cara libre rugosa		Residual
	Vertiente de Richter		De excavación
	Residual de plateau		
Estructura Monoclinal	Vertiente conforme	Según grado de desgaste de las divisorias	Interfluvios ferales
	Vertiente inversa		
	Vertientes Discordante indefinida		Interfluvios suavizados
	Vertientes Hog-back		

Fuente: Araya Vergara (1985).

Esta clasificación se basa en las influencias estructurales y exógenas, las que inciden diferencialmente en la relación vertiente/*talweg*, por lo cual se entiende como una clasificación de doble base (ARAYA-VERGARA, 1985; SANCHEZ, 2014). A continuación, se hace una revisión de las unidades de vertientes encontradas en la zona de estudio de esta investigación.

- *Influencia Estructural:*

Las vertientes dominadas por influencias estructurales determinan la exposición de afloramientos rocosos, por lo que son vertientes potenciales para el aporte de material detrítico. Se subdividen en estructuras concordantes y monoclinales.

- a) Estructuras Concordantes: son aquellas en donde los afloramientos rocosos pueden tomarse como viables en el aporte de sedimentos y de depósitos contiguos a la ladera (SANCHEZ, 2014).
- b) Estructuras Monoclinales: son vertientes esculpidas en rocas estratificadas que siguen la misma dirección de buzamiento de los estratos, por lo que son consecuentes con la estructura, y tienen un ángulo de pendiente promedio entre 25°- 35° (ARAYA-VERGARA, 1985; SANCHEZ, 2014). En apartados posteriores, se verá que las laderas del área de estudio corresponden a estructuras monoclinales conformes e inversas, también denominadas cataclinales y anaclinales, respectivamente.

- *Influencia Exógena:*

Son sistemas de vertientes en que la acción de los agentes morfogenéticos externos han influido ampliamente en el modelado de sus laderas. De acuerdo al enfoque, se pueden clasificar según:

- a) Tendencia erosiva: se refieren al grado de actividad relativa de vertientes comparadas entre sí, insertas en un sistema mayor, por lo cual, si se advierte oposición de vertientes, es muy posible que una sea activa y la otra pasiva. Ello permite conocer la aptitud de cada una para abastecer materiales o el potencial de transferencia de éstos dentro del sistema mayor (ARAYA-VERGARA, 1985).
- b) Grado de desgaste de las divisorias: las divisorias entre las cuencas elementales pueden ser más o menos afiliadas, dando diferentes grados de rugosidad al terreno. Sin embargo, el grado de afilamiento de los interfluvios no debe atribuirse sólo al tiempo, sino que también a las condiciones tectónicas, morfoclimáticas y litológicas (ARAYA-VERGARA, 1985).

La clasificación de vertientes, al ser estudiada desde las influencias dinámicas a las que son sometidas, demuestra que los procesos de denudación inciden diferencialmente sobre ellas, configurando los diversos tipos de vertientes identificadas por ARAYA-VERGARA (1985). Las características propias de cada ladera -las propiedades litológicas, el drenaje hídrico, los procesos de gravedad y el dominio morfoclimático- son los principales factores que influyen en la morfología resultante en ambientes de montaña, donde domina la influencia estructural (GUTIERREZ, 2008). Así, la intensidad con que actúan estos factores sobre las laderas, determina el grado de inestabilidad de éstas, y consecuentemente, la susceptibilidad que ellas tienen para movilizar los materiales hacia planos inferiores.

### **2.2.2. Inestabilidad de Laderas en ambientes de montaña**

Siguiendo la taxonomía de vertientes de ARAYA-VERGARA (1985), la influencia estructural, plegada y fallada que domina en los ambientes andinos de Chile Central, en donde amplias laderas de roca aflorada, expuestas a intensa meteorización y de fuerte pendiente, constituyen vertientes inestables propicias para la generación de detritos y el

consiguiente aporte de sedimentos ladera abajo, mediante movimientos en masa que pueden ser activados por precipitaciones intensas, acción periglacial o sismicidad, entre otras; siendo por tanto, escenarios muy susceptibles a los procesos de remoción en masa (CASTRO *et al.*, 2003; FERNANDEZ, 2006).

De acuerdo a las características anteriormente mencionadas, los ambientes de montaña favorecen la inestabilidad de las laderas, producto del desequilibrio entre las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno, las que al ser superadas provocan la movilización de los materiales (ALVAREZ, 2006). Estos mecanismos de resistencia o de superación de las fuerzas ejercidas, están relacionados con una serie de factores que, de acuerdo la manera en que actúan sobre el relieve, se clasifican en factores condicionantes o factores desencadenantes. Así, los primeros se relacionan principalmente con la tipología, mecanismo y modelo de ruptura, mientras que los segundos controlan, en gran medida, los volúmenes comprometidos en las remociones (HAUSER A. , 2000).

- **Factores Condicionantes:**

Los factores condicionantes son aquéllos que actúan controlando o potenciando la susceptibilidad a generar fenómenos gravitacionales (SANCHEZ, 2014). En este sentido, la susceptibilidad se define como la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso determinado (SEPÚLVEDA, 1998).

Estos factores están ligados a la naturaleza, composición, estructura y forma de terreno, por lo que son la base de la geodinámica actual. De acuerdo a ello, los factores condicionantes a los procesos de remoción en masa son la geología y geotecnia, la geomorfología, la hidrología e hidrogeología, el clima y la vegetación, y finalmente la actividad antrópica (LARA, 2007; MOLINA, 2016; SANCHEZ, 2014); factores que inciden diferencialmente en la susceptibilidad de cierto tipo de remociones, lo que se expresa en la Tabla N°2.

**Tabla N°2.** Factores condicionantes relevantes para cada tipo de remoción en masa

Tipo de remoción en masa Factores Condicionantes	Caídas	Deslizamientos	Toppling	Flujos	Extensiones Laterales
Geología y Geotecnia	X	X	X	X	X
Geomorfología	X	X	X	X	X
Hidrología e Hidrogeología	X	X	X	X	X
Vegetación y Clima		X		X	X
Actividad Antrópica	X	X	X	X	

Fuente: Hauser (1993) en Lara (2007).

- Geología y Geotecnia:** Las propiedades, tales como humedad, permeabilidad y densidad de los materiales condicionan el comportamiento mecánico de los materiales. Asimismo, la composición litológica y la presencia de morfoestructuras influyen en el grado de meteorización de las rocas y en la

granulometría de suelos, condicionando la resistencia de los depósitos y por tanto, la inestabilidad de las laderas (LARA, 2007; MOLINA, 2016).

En cuanto al tipo de depósitos, las secuencias volcanoclásticas de la Formación Farellones son rocas rígidas y resistentes que se apoyan discordantemente sobre las secuencias de la Formación Abanico, de menor resistencia y mayor deformación plástica, lo que induce esfuerzos tensionales en las últimas, provocando rupturas vinculadas a planos de estratificación, lo que acentúa la desintegración de los materiales y favorece la generación de remociones en masa, tales como deslizamientos, flujos y desprendimientos (HAUSER, 2000).

Respecto a la permeabilidad, los depósitos volcánicos, aluviales, coluviales, y/o de antiguos flujos de detritos son materiales permeables, donde el agua se infiltra fácilmente, favoreciendo la saturación del sustrato y con ello la generación de flujos y deslizamientos; mientras que materiales menos permeables, como los de grano fino y arcillosos, dada su poca capacidad de infiltración, son proclives al escurrimiento superficial más rápido (HAUSER, 1997 en LARA, 2007).

Por su parte, la plasticidad y la humedad del suelo influye directamente en el grado de cohesión de los materiales y por ende en las propiedades de resistencia del suelo. Respecto de la densidad del suelo, ésta es relevante para la resistencia al cizalle, así un suelo denso presentará resistencias mayores a las que puedan tener los suelos sueltos (LARA, 2007).

- b) Geomorfología: Determina la geometría de las vertientes de acuerdo a la topografía, la pendiente, la forma cóncava/convexa, la altura y la orientación, principalmente. Así la topografía escarpada y de fuertes pendientes son rasgos que aumentan la energía cinética y por tanto, amplían la capacidad y cantidad de transporte de material, favoreciendo la generación de flujos, deslizamientos y desprendimientos (LARA, 2007).

La exposición de las laderas por su parte, incide en la cantidad de vegetación, en el grado de humedad del suelo y en los procesos de meteorización de los materiales, incrementando la inestabilidad en las laderas de mayor exposición solar, en los ambientes morfoclimáticos de los Andes de Chile Central (MOLINA, 2016, HAUSER, 2000).

- c) Hidrología e hidrogeología: Este factor se relaciona con la presencia de agua, la que aumenta la inestabilidad en las laderas. El agua en los sustratos rocosos disminuye la resistencia efectiva, aumenta la presión de los poros e incrementa los esfuerzos de corte por el aumento de peso del terreno; mientras que en los suelos provoca la saturación de éste, haciendo que se comporte como un fluido viscoso. El agua, además, actúa como un agente de transporte para el material (LARA, 2007; MOLINA, 2016). Así, los rasgos que inciden en este factor son la red de drenaje, la posición y variación del nivel freático, el caudal y los coeficientes de escorrentía e infiltración.
- d) Clima y Vegetación: El factor clima se relaciona con la erosión y la meteorización de las laderas, influenciado principalmente por las precipitaciones, la temperatura, la radiación solar y el viento, siendo los dos primeros los más importantes, toda vez que influyen en el contenido de agua de los materiales y

rocas, que como se vio en el factor hidrología, afectan a la resistencia de los materiales y por ende aumenta la susceptibilidad a remociones en masa (LARA, 2007; MOLINA, 2016).

La humedad del suelo influye en el desarrollo vegetacional, y dependiendo del dominio morfoclimático en que ésta se desarrolle, puede favorecer la estabilización de las laderas, o bien, aumentar la inestabilidad de éstas. En climas semiáridos, la vegetación actúa como un agente estabilizador del terreno, a través de las raíces que sujetan el suelo y que ayudan a interceptar el agua caída, disminuyendo los procesos de erosión y de saturación del suelo (SELBY, 1993 en MOLINA, 2016).

- e) Actividad Antrópica: El factor humano contribuye a desestabilizar el terreno, toda vez que ciertas actividades aportan material para ser movilizado por futuros eventos, o bien, porque se intervienen cauces que modifican la escorrentía superficial. Así también, ciertas actividades modifican la topografía o deforestan las laderas. Se reconoce también, al cambio climático como un factor antropogénico, ya que ello ha alterado el comportamiento climático, y por tanto los regímenes pluviométricos, situaciones que contribuyen a la generación de remociones en masa. (LARA, 2007; SANCHEZ, 2014).

- *Factores Desencadenantes:*

Corresponden a factores externos que actúan sobre los materiales, incrementando el *stress* de los esfuerzos tensionales o disminuyendo la resistencia de éstos en laderas previamente inestables, activando de manera inmediata la geodinámica de vertientes a través de remociones en masa (LARA, 2007; SANCHEZ, 2014). Los principales factores desencadenantes son las precipitaciones de gran intensidad y los sismos, aunque se reconocen otros de menor incidencia, como derretimiento de nieve o erupciones volcánicas, entre otros, que no serán tratados en esta sección.

- a) Precipitaciones intensas: La intensidad, duración y distribución de eventos pluviométricos que desencadenan movimientos de ladera, depende de la capacidad que tengan dichos eventos para superar los umbrales de estabilización del terreno, lo que varía de acuerdo a las condiciones morfoclimáticas particulares de cada zona. No obstante, en general las precipitaciones cortas e intensas tienden provocar movimientos de masa superficiales, en tanto que los eventos de larga duración son más proclives a generar remociones más profundas (LARA, 2007). HAUSER (2000), establece que el agua es el elemento desencadenante de, prácticamente, todos los procesos de remoción en masa estudiados, aunque la combinación con otros elementos puede aumentar la susceptibilidad, como sucede en periodos El Niño, o en eventos donde la isoterma 0°C se encuentra donde comúnmente la precipitación se da de forma sólida (SANCHEZ, 2014).
- b) Sismos: Las ondas sísmicas producen un cambio temporal en el régimen de esfuerzos de la ladera, perturbando tanto a los esfuerzos normales, como a los de corte, lo que se traduce en una disminución de la estabilidad de las laderas, desencadenando diferentes tipos de movimientos según sean los materiales que componen la ladera, la magnitud del sismo y la distancia al epicentro (LARA, 2006; SUAREZ, 1998 en SANCHEZ, 2014).

## 2.3. REMOCIONES EN MASA

El término remoción en masa incluye a todos aquellos procesos gravitacionales, lentos o rápidos, en que una porción de volumen de roca, suelo o ambos es movilizad hacia niveles inferiores que el original (CRUDEN & VARNES, 1996; HAUSER, 2000; VARNES, 1978). Estos procesos se deben a la interacción de los factores condicionantes con los factores desencadenantes, en donde los primeros potencian las condiciones inestables de las laderas, induciendo una respuesta inmediata –la movilización de masa- cuando actúan los segundos (SEPULVEDA, 1998; HAUSER, 2000; IBABRRA, 2013).

### 2.3.1. Clasificación de remociones en masa

Si bien existen diversas clasificaciones de remoción en masa (SHARPE, 1938; KEEFER & JOHNSON, 1983; HAUSER, 1993; HUNGR *et al.*, 2014), las más utilizadas son las que se derivan de las propuestas de VARNES (1978) y CRUDEN & VARNES (1996) que se basan en el tipo de material y en el mecanismo del movimiento, constituidas por 5 tipos de remociones principales, resumidas en la Tabla N°3.

**Tabla N°3.** Clasificación de remociones en masa

Tipo de Movimiento	Tipo de Materiales				
	Roca	Suelo		Contenido de agua	
		Predominio de material grueso (> del 50%)	Predominio de material fino		
<b>Caída</b>	Procesos respectivos en Rocas	Procesos respectivos en escombros	Caída de suelo	Seco	
<b>Desplome</b>			Caída de suelo	Húmedo	
<b>Deslizamientos</b>			<b>Rotacionales</b>	Deslizamiento Rotacionales de tierra	Mojado
			<b>Traslacionales</b>	Deslizamiento Traslacional de tierra	
<b>Flujos</b>			Flujos de barro	Muy Mojado	
<b>Complejos</b>	Combinación de varios tipos de movimientos				

Fuente: VARNES (1978) en SANCHEZ (2014).

Además de las clasificaciones basadas en el tipo de movimiento y material, CRUDEN & VARNES (1996) realizaron una clasificación en base a la velocidad del movimiento, con 7 clases detalladas en la Tabla N°4.

**Tabla N°4.** Clasificación de velocidades de los movimientos en masa

Clases de Velocidad	Descripción	Velocidad (m/s)	Velocidad Típica
7	Extremadamente rápido	5	5 m/s
6	Muy rápido	0,05	3m/min
5	Rápido	$5 \cdot 10^{-4}$	1,8 m/hr
4	Moderado	$5 \cdot 10^{-6}$	13 m/mes
3	Lento	$5 \cdot 10^{-8}$	1,6 m/año
2	Muy lento	$5 \cdot 10^{-10}$	16 mm/año
1	Extremadamente lento	$<5 \cdot 10^{-10}$	<16 mm/año

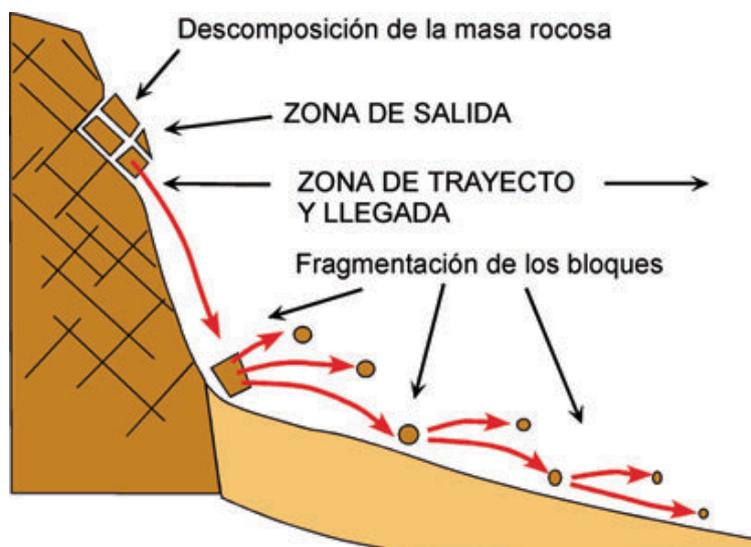
Fuente: CRUDEN & VARNES (1996) en MOLINA (2016).

De acuerdo a la clasificación de VARNES (1978), a continuación, se describen los procesos de laderas presentes en el área de estudio.

- *Caídas de bloques:*

Corresponden a movimientos abruptos de bloques de roca, originados principalmente por discontinuidades preexistentes, desprendiéndose así del macizo rocoso. Ello genera un movimiento en caída libre, rebote o rodamiento, lo que depende principalmente de la forma del bloque y de la curvatura de la ladera (HAUSER, 2000; LARA, 2007; LLORENS & TALLADA, 2009; MOLINA, 2016).

Cuando los bloques impactan la base de las laderas, se fragmentan en porciones más pequeñas que tienden a extenderse superficialmente, lo que significa un aporte de material rocoso de diverso tamaño sobre la ladera (ver Figura N°2) (CAMPOS, 2014; LARA, 2007; LLORENS & TALLADA, 2009; VARNES, 1978).

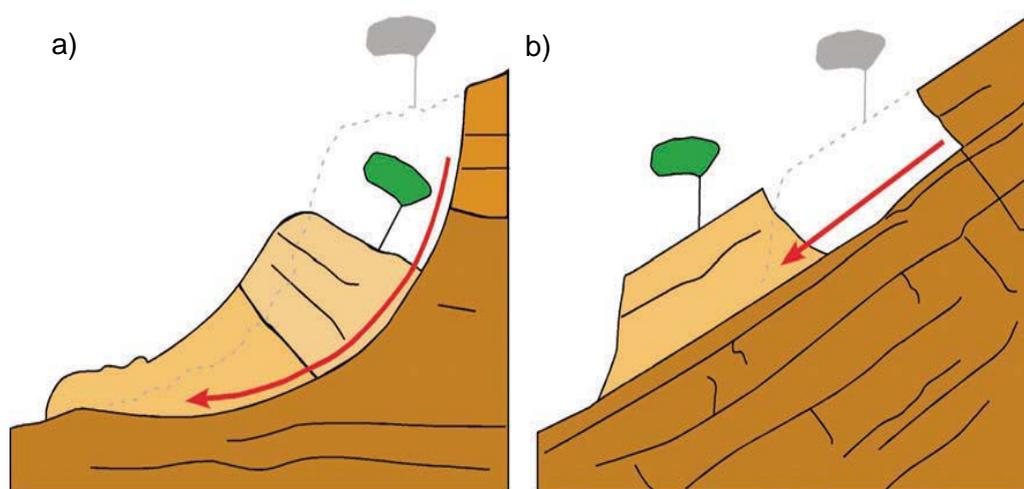


**Figura N°2.** Esquema del movimiento de caída de bloques. Se grafica la zona de salida del bloque, la fragmentación a lo largo del trayecto y la acumulación de fragmentos en la zona de llegada Fuente: COPONS (2007) en LLORENS & TALLADA (2009).

- *Deslizamientos:*

Corresponden a masas de roca o suelo que se deslizan sobre superficies de rotura más o menos netas al superar su resistencia al corte, generando el movimiento de la masa con la preservación general de su estructura interna (HAUSER, 2000; LLORENS & TALLADA, 2009). Según el mecanismo y tipo de rotura, se dividen en traslacionales, rotacionales o complejos (ver Figura N°3), siendo los más comunes los dos primeros (ALVAREZ, 2006; VARNES, 1978).

En los deslizamientos traslacionales, las superficies de rotura son relativamente planas y debilitadas por discontinuidades, por lo que una vez superada su resistencia al corte, la masa comienza a moverse casi sin rotación (ALVAREZ, 2006; HAUSER, 2000; SANCHEZ, 2014). En tanto, en los deslizamientos rotacionales, la superficie de rotura es curva y cóncava, por lo que la masa rota a medida que se desliza, formando un escarpe principal pronunciado, o bien, fragmentándose en bloques de masa que deslizan entre sí y que generan la morfología escalonada típica de los deslizamientos multirrotacionales (ALVAREZ, 2006, CAMPOS, 2014; HAUSER, 2000; MOLINA, 2016).



**Figura N°3.** Esquema del movimiento de los deslizamientos En a) se grafica un deslizamiento rotacional; (B) deslizamiento traslacional. Fuente: cortesía del Servicio Geológico del Canadá en LLORENS & TALLADA (2009).

La velocidad de los deslizamientos varía de acuerdo al grado de pendiente y al material que lo compone, habiendo movimientos que van desde mm/año hasta metros/día. Si bien suelen causar importantes daños materiales, no suelen ser mortales (LLORENS & TALLADA, 2009).

- *Flujos de detritos:*

Los flujos corresponden al movimiento continuo de masa, compuesta por materiales no cohesionados y saturados de agua, por lo que no presentan superficies de roturas definidas, razón por la cual, durante el movimiento dicha masa adopta la morfología de la ladera por la que escurre (ver Figura N°4) (HAUSER, 2000; ALVAREZ, 2006; HUNGR *et al.*, 2014; LLORENS & TALLADA, 2009; SANCHEZ, 2014).

Los flujos se pueden clasificar de acuerdo a la granulometría y al contenido de agua, ya que son factores que determinan su comportamiento y velocidad (SEPÚLVEDA, 1998).



**Figura N°4.** Esquema del movimiento de un flujo de detritos. Fuente: Servicio Geológico de Estados Unidos en LLORENS & TALLADA (2009).

Los flujos de detritos generalmente se inician en las caberas de los deslizamientos hasta que encuentran una canalización, mezclándose con el agua que por allí escurre. Ello implica un incremento en la concentración y el volumen de la masa, adquiriendo el comportamiento típico de fluido.

El flujo se detiene cuando el escurrimiento hídrico ha disminuido, de manera tal que pierde su comportamiento de fluido, o bien, porque la pendiente del terreno disminuye, depositándose en forma de conos (GEMMA, 2007; LLORENS & TALLADA, 2009).

### CAPÍTULO 3: PLANTEAMIENTO METODOLOGICO

La metodología aplicada se estructuró en cinco etapas de trabajo, esquematizadas en la Figura N°5. La primera de ellas corresponde a una contextualización del ordenamiento territorial y la reducción del riesgo de desastres a nivel nacional, regional, para con ello, caracterizar el estado en estas materias, y en específico, en relación a los procesos de remoción en masa en el área de estudio. La siguiente etapa corresponde al trabajo de campo, mientras que las tres etapas finales responden a los objetivos específicos planteados en este trabajo. Así, en cada una de las etapas se describen los métodos o técnicas aplicadas, las herramientas y materiales utilizados, y los productos obtenidos.

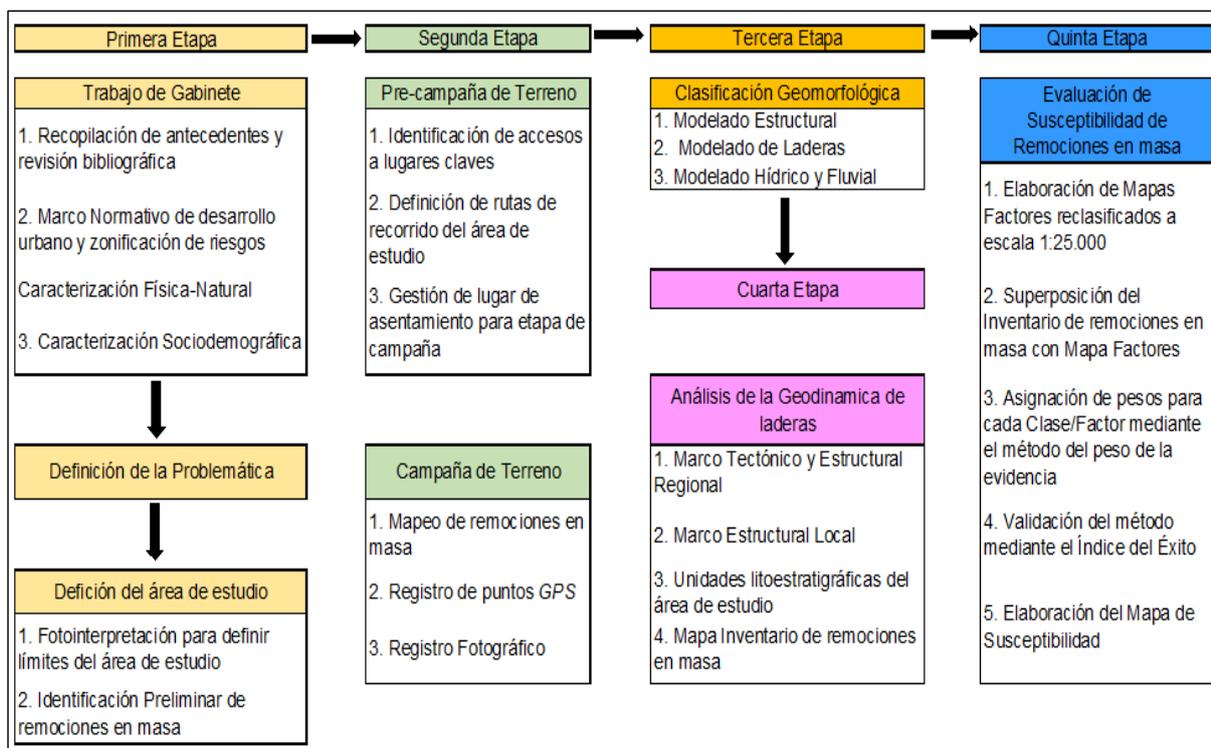


Figura N° 5. Esquema general de la metodología. Fuente: elaboración propia.

### 3.1. PRIMERA ETAPA: CONTEXTUALIZACION DE LA PROBLEMÁTICA Y ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1.1. Recopilación de Antecedentes Preliminares

Esta etapa tuvo como finalidad hacer una caracterización general del área de estudio. Ello contempló una primera fase de revisión bibliográfica para contextualizar la problemática, mediante la exploración de documentos científicos, académicos e institucionales, relacionados con el riesgo de remoción en masa en el contexto general de cambio climático, y en particular, sobre los procesos institucionales de ordenamiento territorial, planificación urbana y gestión del riesgo de desastres en Chile.

En la segunda fase, orientada a la contextualización del marco normativo respecto de los procesos de reducción del riesgo de remoción en masa a nivel comunal y local, se levantaron antecedentes sobre la planificación urbana y los estudios de riesgos contemplados en los instrumentos normativos e indicativos de carácter regional y comunal, tales como el Plan Regulador Metropolitano de Santiago PRMS-100, el Plan

Regulador Comunal (PRC) y el Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) de San José de Maipo). Además, se realizó una entrevista con la Secretaría Comunal de Planificación del municipio (SECPLA-SJM), donde se obtuvieron antecedentes de la nueva actualización del PRC que se está llevando a cabo, en el cual se establecen los nuevos límites permitidos para el desarrollo urbano y la zonificación de áreas restringidas por riesgos de remoción en masa, entre otros, para la localidad de El Ingenio. En este proceso se obtuvieron cartografías, informes y estudios geotécnicos de riesgos; cabe destacar que en este último sólo se aplicó a la localidad de San José de Maipo.

En la tercera fase se elaboraron los antecedentes generales del área de estudio, lo cual contempló, el levantamiento de material bibliográfico, cartográfico y de datos hidrometeorológicos para identificar las características físico-naturales de la comuna, lo que implicó el levantamiento de información relacionada con los rasgos topográficos y geomorfológicos, así como también, información de la red hidrográfica y sus regímenes de alimentación. En tanto que para la caracterización climática y vegetacional, además de una revisión bibliográfica de las particularidades del clima templado cálido que domina en la región central de Chile, se recopilaron datos pluviométricos y de temperatura de las estaciones más cercanas al área de estudio.

Por otro lado, para la caracterización social, se levantó información demográfica a través de datos censales y otras publicaciones oficiales del Estado de Chile. Finalmente, se realizó la revisión bibliográfica que permitiera la comprensión de los fundamentos geomorfológicos, asociados a dinámicas de vertientes en ambientes de montaña, y su correlación con los procesos de remoción en masa.

### **3.1.2. Materiales, herramientas y productos para la elaboración de la cartografía del área de estudio**

En esta sección se especifican los insumos y herramientas utilizadas para la elaboración de la cartografía del área de estudio, resumidos en la Tabla N°5. Cabe destacar que la delimitación del área de estudio se realizó por medio de fotointerpretación a través de las herramientas *Google Earth*, *ArcGIS* y fotografías aéreas del SAF.

**Tabla N°5.** Resumen metodológico para elaborar la carta del área de estudio

<b>Materiales</b> (Capas en formato <i>shape</i> )	<b>Herramientas</b>	<b>Productos</b>
Límites regionales y comunales (IDE CHILE)	<i>Google Earth</i>	Cartografía del área de Estudio. Escala 1:25.000
Áreas de extensión urbana (Fuente: IDE CHILE, Plan Regulador Metropolitano de Santiago)		
Áreas de restricción por riesgo de remoción en masa (Fuente: IDE CHILE, Plan Regulador Metropolitano de Santiago)	<i>ArcGIS</i> 10.5	
Límite área de estudio (Fuente: fotointerpretación)	Fotografías aéreas N°3340 y N°3341, escala 1:50.000 (Fuente: SAF, 1997)	
Red Hídrica (GORE Metropolitano, Proyecto OTAS)		
Red Vial (Fuente: IDE CHILE)		
Curvas de Nivel 50 metros (Fuente: IGM)		

Fuente: Elaboración propia.

### **3.2. SEGUNDA ETAPA: TRABAJO DE CAMPO**

El trabajo de campo consistió en una primera jornada de pre-campaña de un día de duración, y un segundo periodo de campaña, con una duración de 5 días de terreno.

#### **3.2.1. Pre-campaña de Terreno**

Esta jornada se realizó el 12 de febrero del 2018, con el objetivo de generar contacto con organizaciones o entes privados que pudiesen colaborar en la logística y estadía durante la campaña de terreno propiamente tal. En dicha ocasión, se realizó un reconocimiento preliminar, recorriendo la zona urbana de la localidad, identificando accesos a lugares claves y definiendo rutas que permitieran recorrer la máxima extensión del área de estudio en la etapa posterior.

Durante la jornada se concretó una reunión con la corporación Balneario El Ingenio, entidad encargada de la administración urbana de la localidad, y otra reunión con los administradores del Fundo El Ingenio, quienes facilitaron sus dependencias para instalar el campamento en la siguiente etapa.

#### **3.2.2. Campaña de Terreno**

La segunda etapa de terreno se realizó durante los días 19 y 23 de febrero de 2018, en donde se recorrió la zona sistemáticamente mediante excursiones a pie y recorridos en automóvil. La modalidad de trabajo durante estos días consistió en registrar los diversos procesos de remoción en masa, identificando evidencias de erosión del terreno, materiales disponibles y potenciales para ser movilizados, o bien, localizando zonas de acumulación de masa desplazada.

Los registros fueron georreferenciados mediante puntos GPS y mapeados en la cartografía del área de estudio, la que contenía una cuadrícula cada 100 metros y curvas de nivel de 50 metros de equidistancia, lo que permitió localizar de manera relativamente precisa de los hitos a mapear; así también se registró cualquier otro hito relevante que aportara tanto a la elaboración de la carta geomorfológica, como a la de inventario de remociones en masa. Lo anterior se complementó con un registro fotográfico sistemático de todos los hallazgos.

En la Tabla N°6 se resume las actividades y materiales utilizados para la campaña de terreno, así como también los productos obtenidos.

**Tabla N°6.** Resumen de actividades, materiales y productos en trabajo de campo

Actividades	Materiales	Productos
Corregir delimitación área de estudio	Cartografía del área de estudio con curvas de nivel (Figura N°1, elaboración propia).	Mapa de Terreno, con el catastro de remociones en masa y las geoformas menores
Levantamiento topográfico y reconocimiento de unidades geomorfológicas	Carta Geológica Hoja de Santiago 1:250.000 (THIELE, 1980).	
Reconocimiento de procesos de remoción en masa (erosión, transporte y acumulación de materiales movilizados)	Mapa geológico 1:750.000 (FOCK, 2005). Simbología cartográfica para movimientos en masa (GEMMA, 2007).	
Registro fotográfico de todo el proceso, incluyendo unidades morfológicas, catastro de remociones en masa, estado de meteorización de los materiales, vegetación e intervenciones antrópicas	Carta Topográfica Hoja El Ingenio, escala 1:50.000 (IGM, 2007).	Tabla de Registro de puntos GPS
	GPS	
	Cámara Fotográfica	
	Huinchita de medir	
	Herramientas de dibujo (lápices, hojas, etc.)	

Fuente: elaboración propia.

### 3.3. TERCERA ETAPA: CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

El análisis geomorfológico se basa en el estudio de la forma y evolución de las laderas (DOUGLAS, 1977 en GUTIÉRREZ, 2008), definiendo así las unidades morfodinámicas presentes en el área de estudio mediante métodos de clasificación geomorfológica. Para ello, se aplicaron técnicas de fotointerpretación previa y posterior a los trabajos de campo, obteniendo como producto final la carta geomorfológica que sirve de insumo para el análisis morfodinámico de laderas susceptibles a remociones en masa.

#### 3.3.1. Clasificación Unidades Morfológicas

Se realizó una revisión bibliográfica y cartográfica considerando que el paisaje actual se deriva de procesos endógenos que crean el relieve, así como también de procesos exógenos que lo destruyen mediante los agentes externos. Consecuentemente, la identificación de estos procesos permite clasificar las formas reconocidas en terreno según el tipo de procesos que da origen al modelado actual. La estructuración de los modelados definidos en este trabajo son adaptaciones de la clasificación de PEÑA MONNÉ (1997) y de ARAYA VERGARA (1985), de manera tal que permitieran aplicarlos a la zona de estudio, resultando los siguientes modelados a considerar:

- a) *Litología y Modelado Morfoestructural*: Se revisó el marco geológico general del área de estudio para identificar morfoestructuras y unidades litológicas del área de estudio. Si bien el análisis de las propiedades geológicas se profundiza en la cuarta etapa, para los fines de esta fase, se consideraron los escarpes y las

unidades litológicas generales (secuencias volcano-sedimentarias cenozoicas y depósitos no consolidados cuaternarios).

- b) Modelado de Laderas: Se realizó una adaptación a la clasificación de vertientes de ARAYA VERGARA (1985), en donde se identificaron laderas de influencia estructural, que de acuerdo a las características observadas en terreno y mediante la revisión bibliográfica, corresponden a: (1) vertientes conforme con escamas, (2) vertientes inversas con cara libre y talud y (3) vertientes residuales. Cabe considerar que la clasificación de vertientes se complementó con la terminología de relieves de cuesta, donde las vertientes conformes corresponden a laderas cataclinales y las inversas a laderas anaclinales.
- c) Modelado Hídrico y Fluvial: Mediante fotointerpretación e información cartográfica se identificaron las unidades asociadas a los procesos de origen hídrico. Se subdividieron en formas acumulativas, donde se tienen conos aluviales y aluvio-coluviales, además de la terraza de remoción en masa y la terraza fluvial y sus respectivos escarpes; formas asociadas a áreas endorreicas y formas asociadas a la red de drenaje propiamente tal.

### **3.3.2. Materiales, herramientas y métodos para la elaboración de la carta geomorfológica**

En esta sección se detallan los materiales, herramientas y métodos utilizados para la elaboración de la carta geomorfológica. Ello se ha sistematizado en la Tabla N°7. Se debe destacar que todo el proceso ha sido en base a la revisión de documentos y cartografías como complemento del trabajo de campo y de las técnicas de fotointerpretación.

Se elaboraron capas en formato *shape* para cada unidad geomorfológica mediante el software de tratamiento de información geográfica *ArcGIS*.

**Tabla N°7.** Resumen metodológico para la elaboración de la carta geomorfológica.

Información cartográfica	Herramientas	Métodos de identificación y clasificación geomorfológica
<p><u>Geomorfología</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estudios y cartas: (ARAYA VERGARA, 1985; FOCK 2005; ORMEÑO, 2007; THIELE 1980).</li> <li>- Fotografías aéreas N°3340 y N°3341 a escala 1:50.000 (SAF, 1997).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estereoscopio SOKKIA MS16.</li> <li>- Software de sistemas de información geográfica ArcGIS 10.5.</li> <li>- Software Google Earth.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fotointerpretación digital y estereoscópica.</li> <li>-Levantamiento de información en terreno.</li> <li>-Elaboración de <i>shape</i> para cada unidad morfológica homogénea, mediante el dibujo de capas de polilíneas y de polígonos.</li> </ul>
<p><u>Red Hídrica:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Shape</i> de la red hídrica del proyecto OTAS (GORE Metropolitano).</li> </ul>		
<p><u>Topografía*:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Shape</i> de curvas de nivel de equidistancia de 50 metros, (IGM, 2012).</li> </ul> <p>* Considerando que el área de estudio se localiza en zona rural, no fue posible utilizar las curvas de nivel de 10 metros del proyecto OTAS (GORE Metropolitano), ya que éstas sólo alcanzan a cubrir hasta la localidad de San Alfonso. Consecuentemente, las curvas de nivel de menor equidistancia conseguidas son cada 50 metros, correspondientes a la digitalización de la Carta regular escala 1:50.000 de San José de Maipo.</p>		
		<b>Producto</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carta geomorfológica del área de estudio (elaboración propia).</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. CUARTA ETAPA: ANALISIS DE LA GEODINAMICA ASOCIADA A REMOCIONES EN MASA

Esta etapa se divide en dos secciones, la primera de ellas corresponde a la revisión bibliográfica y cartográfica del marco geológico regional y local que determina el estado de meteorización y cohesión de los materiales y por ende la resistencia o inestabilidad de las laderas. En la segunda sección, se aplicaron los métodos de clasificación y catastro de remociones en masa en base al levantamiento en terreno y fotointerpretación, con lo cual se elaboró el mapa de inventario de remociones en masa.

Finalmente, mediante la integración de la caracterización de la unidades geomorfológicas, el marco geológico y estructural, y la geodinámica asociada a los procesos de remociones en masa, se realizó el análisis morfodinámico integrado, considerando todos los elementos revisados que favorecen o determinan la ocurrencia y distribución de cierto tipo de remociones en masa que se dan en el área de estudio, y que en definitiva configuran la susceptibilidad futura, constituyéndose como áreas de riesgos asociados a este tipo de fenómenos.

### **3.4.1. Contextualización Geológica Regional y Local**

En esta sección se hizo una revisión bibliográfica y cartográfica del marco tectónico y estructural regional que determina las grandes morfoestructuras del segmento andino de Chile Central, donde es importante resaltar que el área de estudio se circunscribe en el flanco occidental de la Cordillera Principal, morfoestructura que debe su orogénesis a los procesos de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (FOCK, 2005; RAULD, 2011; THIELE, 1980), en donde se depositaron las secuencias litológicas de origen volcano-sedimentario que afloran en el área de estudio.

Complementariamente se revisaron estudios estratigráficos (VILLELA, 2015), paleogeográficos (QUIROGA ET AL., 2015) y modelos cronológicos y estructurales (CHARRIER ET AL, 2002; FOCK, 2015) que permiten explicar la evolución geológica local. De acuerdo a estos antecedentes, el área de estudio forma parte de una estructura compleja de vergencia al este, denominado anticlinal El Ingenio, en donde las unidades litológicas aflorantes corresponden a la Formación Farellones, siendo la superficie de erosión actual, lo que explica que ciertas laderas se encuentren cubiertas por depósitos no consolidados de edad cuaternaria.

De acuerdo al estudio de VILLELA (2015), las laderas que conforman el área de estudio presentan una serie de pliegues asociados a anticlinales locales que se separan por fallas inversas, lo que determina la configuración de laderas cataclinales y anaclinales evidenciadas durante el análisis geomorfológico.

### **3.4.2. Geodinámica de laderas en ambientes de montaña**

#### **3.4.2.1. Inventario de remociones en masa**

La clasificación de remociones en masa se basó en GEMMA (2007), HAUSER (2000) Y VARNES (1978), mientras que para la simbología cartográfica se utilizó el trabajo de GEMMA (2007), quienes proponen una sistematización de los elementos que debe contener una cartografía según la escala de trabajo, que para este caso ha sido a escala 1:25.000. Se identificaron procesos y depósitos de remoción en masa; los primeros corresponden a las zonas de arranque de material, y por tanto presentan rasgos erosivos, mientras que los segundos son acumulaciones del material transportado por diferentes procesos de depositación. En base a lo anterior, los tipos de remociones presentes en el área de estudio son caídas de rocas, deslizamientos de suelo y roca, y flujos de detritos; mientras que los depósitos de remociones son de origen aluviales, aluvio-coluviales, de barro y mantos coluviales.

La elaboración del mapa de inventario de remociones en masa se desarrolló con los registros tomados en el trabajo de campo, en donde se catastraron 85 puntos asociados a procesos de remociones en masa localizados mediante puntos *GPS*. En una primera fase, estos puntos fueron exportados y visualizados en el software *ArcGIS*, para luego digitalizar en el mismo programa los procesos mapeados en la cartografía de terreno, creando una capa en formato *shape* para cada tipo de remoción en masa, así como también para cada tipo de depósito.

Tal digitalización fue complementada en una segunda fase, con la información de los puntos *GPS*, lo que permitió unir puntos registrados que conformaban parte de una misma unidad de remoción en masa, como ocurrió con numerosos corredores de flujos

de detritos que fueron registrados en diferentes partes de su longitud. Durante esta fase también se complementó el catastro con los registros fotográficos, los que muchas veces permitieron visualizar la extensión completa de los procesos identificados. Asimismo, los *tracks* que guardan la información de los recorridos realizados en terreno permitieron mayor exactitud para localizar los diferentes tipos de procesos y depósitos a mapear.

En una tercera fase, se completó el inventario mediante las técnicas de fotointerpretación a través de las plataformas digitales como *Google Earth* y la herramienta “*basemap*” del software *ArcGIS*, así como también, mediante fotointerpretación de fotografías aéreas. Es preciso señalar, que a modo general la metodología del inventario de remociones en masa se estructuró en tres fases, pero que, en la práctica, las técnicas aplicadas muchas veces se emplearon simultáneamente a fin de esclarecer dudas sobre la ubicación y/o extensión exacta de algún aspecto a mapear.

#### 3.4.2.2. Análisis de la inestabilidad de laderas

Con el levantamiento del contexto geológico regional y local, más el mapa de inventario de remociones en masa, se procedió a realizar un trabajo de análisis de la distribución y concentración para cada tipo de remoción en masa, considerando la ubicación relativa a las unidades morfológicas y su extensión. De esta manera, se establecieron ciertos patrones de comportamiento inestable de las laderas, los que tienden a una diferenciación de los procesos, magnitudes y tipo de materiales que son movilizados de acuerdo a la zona del área de estudio donde se producen, evidenciando unidades geomorfológicas más inestables y dinámicas que otras.

#### **3.4.3. Materiales, métodos y Productos de la etapa para la elaboración del Inventario de remociones en masa**

En la Tabla N°8 se resumen los materiales, herramientas, procedimientos y productos para la elaboración del Mapa de inventario de remoción en masa para el área de estudio.

**Tabla N°8.** Resumen metodológico para elaborar el Inventario de remoción en masa

Materiales	Herramientas	Procedimientos
<p><u>Geología:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estudios y Cartografía de FOCK (2005).</li> <li>- Estudios, diagramas y cartografías de VILLELA (2015).</li> </ul>	<p><u>Software ArcGIS 10.5:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Herramientas de dibujo.</li> </ul> <p><u>Software Google Earth:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Herramienta de Relieve.</li> <li>- Imágenes históricas (desde 1984 en adelante).</li> </ul>	<p>En base a los trabajos revisados, se creó un <i>shape</i> de polígono para las unidades litológicas y otro <i>shape</i> de líneas para las fallas del área de estudio. Para mapear depósitos no consolidados, se utilizaron los conos aluviales y aluvio-coluviales de las unidades geomorfológicas. Estos productos se incluyeron en el Mapa de Inventario de remociones en masa.</p>
<p><u>Inventario:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Puntos GPS en formato <i>shape</i>.</li> <li>- <i>Track</i> o recorrido para cada día de trabajo de campo en formato <i>shape</i>.</li> <li>- Fotografías tomadas en trabajo de campo.</li> <li>- Mapeo de Terreno (registro de remociones en masa dibujadas in situ).</li> </ul>		<p>Para el inventario de remociones en masa se crearon los siguientes <i>shapes</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Corredores de flujo de detritos (líneas).</li> <li>- Caídas de rocas (polígonos).</li> <li>- Deslizamientos de suelo y detritos. (polígonos).</li> <li>- Mantos de detritos (polígonos).</li> <li>- Depósitos de barro (polígonos).</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

### 3.5. QUINTA ETAPA: SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA

En esta etapa se busca evaluar la susceptibilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa, que significa realizar un análisis de las interrelaciones que se dan entre las condiciones del terreno y el catastro de remociones en masa, asumiendo que las remociones en masa ocurren bajo las mismas condiciones que en el pasado (SOETERS & VAN WESTEN, 1996 en MOLINA, 2016). Bajo esta premisa, las condiciones en que ocurrieron este tipo de procesos permiten prever cómo se comportará la dinámica de laderas en el futuro, estableciendo grados de susceptibilidad, de manera tal que se puedan predecir futuras remociones en masa de acuerdo a la evaluación de las condiciones actuales del terreno.

Para ello, se ha aplicado una metodología de análisis estadístico que implica determinar estadísticamente la correlación de las características específicas de cada factor condicionante con la distribución espacial de remociones en masa identificadas en el terreno, mediante el método bivariado del peso de la evidencia. Este tipo de metodología es aplicada mediante el uso de sistemas de información geográfica, en donde el manejo de los distintos datos espaciales es combinado a través de herramientas que procesan estadísticamente la información para, finalmente, establecer rangos de susceptibilidad espacializados en el mapa de susceptibilidad.

Para ello, se seleccionaron los factores que condicionan la estabilidad de las laderas, realizando un mapa para cada factor escogido. La selección de los factores se realizó siguiendo la propuesta metodológica de NÁQUIRA (2009) y MOLINA (2016).

- a) *Altura*: Se relaciona con las condiciones climáticas y de vegetación que se dan en el área de estudio, lo que condiciona el grado de erosión que tienen las laderas.
- b) *Curvatura*: Corresponde a la tasa de cambio de pendiente de las laderas y se relaciona con las características geomorfológicas del área de estudio, lo que influye en los procesos de escorrentía superficial, por lo tanto, condiciona la erosión del terreno, favoreciendo procesos de flujo, entre los más importantes.
- c) *Distancia a fallas*: La presencia de fallas indica el comportamiento sísmico de la zona, lo que condiciona el grado de fracturamiento o la presencia de diaclasas en la roca, afectando la estabilidad de las laderas.
- d) *Distancia a red de drenaje*: La red de drenaje afecta la estabilidad del terreno, debido a que su escurrimiento erosiona el sustrato bajo el que escurre y también lo hace lateralmente, transportando material ladera abajo.
- e) *Exposición*: La exposición solar de las laderas incide en la cantidad de vegetación y en el grado de humedad del suelo, y por tanto afectan el grado de estabilización de las laderas.
- f) *Geología*: Las propiedades litológicas de los materiales inciden en la resistencia y en el grado de meteorización y de alteración de la roca, así como definen el comportamiento plástico y la permeabilidad de los materiales no consolidados.
- g) *Pendiente*: La pendiente se relaciona con la energía cinética y por tanto amplían la capacidad y cantidad de transporte de material. Así, mientras el ángulo de la pendiente se incrementa, también lo hace la tensión de los materiales, por lo que las fuertes pendientes favorecen la generación de remociones en masa.

Luego, cada uno de los mapas de factores es superpuesto al mapa de inventario de remociones en masa, con lo cual se busca determinar la incidencia de los factores en la ocurrencia de remociones en masa. Para ello se realiza el cálculo de pesos de manera estadística, denominado método del peso de la evidencia.

### **3.5.1. Modelamiento de Susceptibilidad de Remociones en masa**

#### **3.5.1.1. Método del Peso de la Evidencia**

Este método se basa en la asignación de pesos de acuerdo al cálculo de densidades en base a la evidencia de remociones en masa. Ello se realiza mediante el conteo de píxeles, que en este caso se realizó con herramientas de álgebra de mapas en el software *ArcGIS*, por lo cual fue necesario convertir todas las capas de información a formato ráster y reclasificarlas en base a las clases definidas en cada factor.

El método de conteo de píxeles se realiza determinando la cantidad de píxeles totales para el mapa de inventario y para cada mapa factor, contrastando así la cantidad de píxeles que contienen evidencias de remoción en masa en cada una de las clases versus la cantidad de píxeles totales. Con ello se aplican procedimientos de cálculos estadísticos que permiten designar un peso ponderado a cada clase de cada factor, donde primero deben calcularse las densidades de píxeles para cada clase, como se ejemplifica en la siguiente tabla.

**Tabla N°9.** Conteo de densidades de píxeles y pesos para cada Clase/Factor

Total Píxeles del Inventario de remociones en masa	Total Píxeles del Área de Estudio	Píxel * 1	Píxel * 2	Píxel * 3	Píxel * 4	W+	W-	Cw
Clases								

Fuente: elaboración propia

Donde las columnas de Pixel\*xi corresponden a:

**Pix\*1** = Nslclass

**Pix\*2** = Nslide - Nslclass

**Pix\*3** = Nclass - Nslclass

**Pix\*4** = Nmap - Nslide - Nclass + Nslclass

**Nmap** = número total de píxeles en el mapa

**Nslide** = número de píxeles con remociones en masa en el mapa

**Nclass** = número de píxeles en la clase

**Nslclass** = número de píxeles con remociones en masa en la clase

Con el conteo de densidades de píxeles, luego se procede a calcular el peso  $W+$  y  $W-$ , de acuerdo a la siguiente fórmula matemática:

$$W_i^+ = \log_e \frac{\frac{Npix_1}{Npix_1 + Npix_2}}{\frac{Npix_3}{Npix_3 + Npix_4}}$$

$$W_i^- = \log_e \frac{\frac{Npix_2}{Npix_1 + Npix_2}}{\frac{Npix_4}{Npix_3 + Npix_4}}$$

Donde  $Npix_i$ , corresponde a Pixel\*xi de la tabla N°9. Fuente: VAN WESTEN (2002).

El  $W+$  indica que la clase/factor está presente hay remociones en masa, y si su valor positivo indica una relación directa, es decir, la presencia de ella es una condición favorable a la ocurrencia de remociones, mientras que si el valor es negativo indica una relación inversa en que es la ausencia la que condiciona la generación de remociones (VAN WESTEN, 2002).

Por el contrario, el  $W-$  relaciona la ausencia de la clase/factor en la ocurrencia de remociones, por tanto, si su valor es positivo indica que su ausencia es la que contribuye a la generación de remociones en masa, mientras que su valor negativo significa que la ausencia no favorece la generación de este tipo de procesos.

Una vez determinados los pesos  $W+$  y  $W-$ , se calcula el peso final o valor de contraste mediante la fórmula:

$$Cw = W+ - W-$$

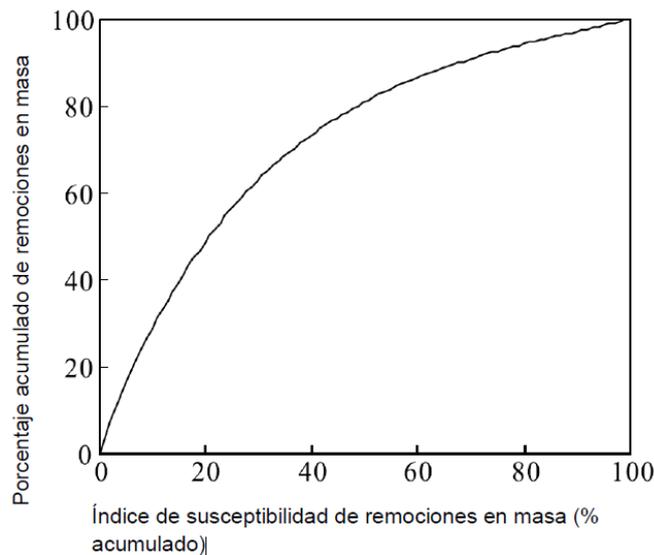
En donde el valor positivo indica que la clase/factor es favorable a la generación de remociones en masa, mientras que su resultado negativo indica que su presencia es condicional inversamente la ocurrencia de remociones en masa.

Luego de establecer los pesos finales para cada clase, éstos son asignados a cada clase, para posteriormente sumar todos los Mapas Factores mediante la calculadora *ráster*. Con ello, se procede a realizar una reclasificación de los valores totales resultantes a través del método estadístico de quiebres naturales, definiendo 10 clases de acuerdo a la propuesta de MOLINA (2016).

### 3.5.1.2. Índice del Éxito

La última parte del análisis de susceptibilidad se evalúa qué tan bien se ajusta el modelo al caso de estudio, de manera tal de determinar si efectivamente los factores condicionantes permiten predecir la ocurrencia de remociones en masa (CHUNG Y FABBRI, 1999 en MOLINA, 2016). Para ello se ordenan las 10 clases de forma ascendente y se realiza un histograma de los porcentajes de frecuencias acumuladas de los pesos finales y de las evidencias de remociones en masa (ver Figura N°6).

De acuerdo al histograma, gran porcentaje de las remociones en masa debiesen coincidir con las zonas de alta o media susceptibilidad; por ende, la forma de la curva también indica cómo se comporta el modelo: mientras más área haya bajo la curva, mejor es la predicción del modelo (MOLINA, 2016).



**Figura N°6.** Histograma Índice del Éxito Fuente: Modificado de XU ET AL (2011) en MOLINA (2016).

Finalmente, con los porcentajes de frecuencia acumulada se determinaron los rangos de susceptibilidad; en este caso se definieron 3 rangos (alta media y baja), con los cuales se reclasificó la capa *ráster* de acuerdo a los porcentajes de pesos acumulados que definen cada rango de susceptibilidad establecida.

### 3.5.2. Materiales, métodos y Productos de la etapa para la elaboración del Mapa de Susceptibilidad de Remociones en masa

Los mapas de factores se realizaron a una escala 1:25.000 y se reclasificaron asignándoles un valor a cada clase según la distribución de los resultados obtenidos en cada uno de ellos. Luego se realizó la superposición con la capa de inventario de remociones, mediante la calculadora ráster. Con la cual se aplicó el conteo de píxeles del método de la evidencia explicado anteriormente.

A continuación, se presenta la Tabla N°10 que resume los materiales y procedimientos para elaborar el Mapa de Susceptibilidad.

**Tabla N°10.** Resumen de los materiales y procedimientos para la elaboración del Mapa de Susceptibilidad

Mapa de Factores 1:25.000	Insumo	Procesamiento	
		1. Mapas en Formato ráster	2. Algebra de Mapas
Curvatura Exposición Pendiente Altura	DEM de pixel de 30X30 metros (Aster)	(1) Herramienta de análisis espacial "Surface": <i>curvature, aspect y slope</i> (2) Herramienta de análisis espacial "Reclassify"	(1) Calculadora <i>raster</i> : superposición del inventario de remoción en masa con cada uno de los factores. Se repite 7 veces este paso
Distancia a Fallas	<i>shape</i> de líneas (VILLELA, 2015)	(1) Herramienta de geoprociamiento "Buffer" ( <i>se crea un shape de polígono</i> ) (2) Herramienta <i>Polygon to Raster</i> (3) Herramienta de análisis espacial "Reclassify"	(2) Herramienta de análisis espacial "Reclassify" para cada Mapa Factor, designado los Cw en cada clase
Distancia a red de drenaje	<i>shape</i> de líneas (VILLELA, 2015)	(1) Herramienta de geoprociamiento "Buffer" (2) Herramienta <i>Polygon to Raster</i> (3) Herramienta de análisis espacial "Reclassify"	
Geología	<i>shape</i> de polígonos de Fm. Farellones (elaboración propia)	(1) Herramienta "erase" cortar los espacios que (2) Herramienta "union" para unir las capas de unidades litológicas y depósitos no consolidados (3) Herramienta <i>Polygon to Raster</i>	3. Índice del éxito (1) Herramienta de análisis espacial "Reclassify" en 10 clases de acuerdo a quiebres naturales
	<i>shape</i> de polígonos de Depósitos No consolidados (elaboración propia)	(4) Herramienta de análisis espacial "Reclassify"	
Mapa Inventario	<i>shape</i> de polilíneas: Flujos (elaboración propia)	(1) Herramienta de geoprociamiento "Buffer" de 5 metros (para crear un shape de polígonos que permita la union con las otras capas de remoción en masa)	(2) Herramienta de análisis espacial "Reclassify" en 3 clases de acuerdo a rangos de susceptibilidad, designado los Cw en cada clase
	<i>shape</i> de polígonos: Deslizamientos (elaboración propia)	(2) Unión de <i>shapes</i> de remociones en masa	
	<i>shape</i> de polígonos: Caidas de rocas (elaboración propia)	(3) Herramienta <i>Polygon to Raster</i> (4) Herramienta de análisis espacial "Reclassify"	

Fuente: elaboración propia

## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS**

---

### **4.1. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO**

En este capítulo se presenta el análisis geomorfológico del área de estudio, el cual se compone de la identificación de las unidades morfológicas encontradas en el área de estudio. Para éstas se describen su localización y distribución y sus características principales, además del análisis de las dinámicas y procesos a las que se ven sometidas cada una de estas geoformas.

Para ello, se ha elaborado una cartografía geomorfológica del área de estudio (ver Figura N°7), en donde las unidades han sido catalogadas de acuerdo al marco estructural o al modelado morfogenético al que pertenecen, en base a las clasificaciones geomorfológicas de ARAYA VERGARA (1985) y de PEÑA MONNÉ (1997).

De acuerdo a los agentes modeladores del paisaje, el análisis de cada unidad morfológica que se presenta a continuación está sistematizado de acuerdo al modelado que le da origen, entre los que cuentan, el modelado de laderas o vertientes y el modelado hídrico y fluvial, además de morfoestructuras (escarpes) asociadas a la superficie residual o terrazas, por lo que su se describirán en sus correspondientes apartado.

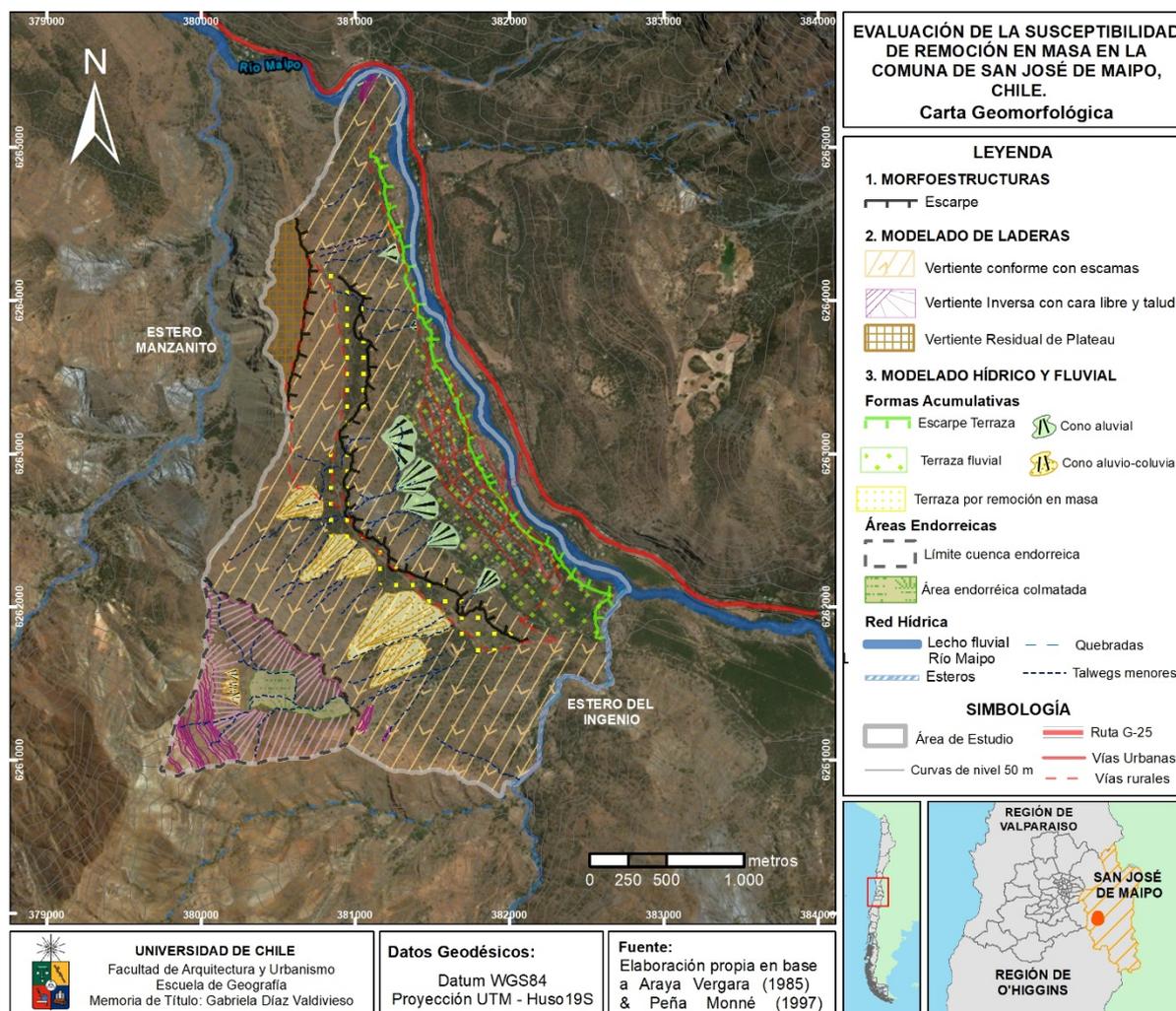


Figura N°7. Carta geomorfológica del área de estudio. Fuente: Elaboración propia en base a ARAYA VERGARA (1985) & PEÑA MONNÉ (1997).

#### **4.1.1. Modelado de Laderas**

El sistema de laderas del área de estudio tiene una influencia estructural, y en términos generales, presenta una inclinación que va de SW a NE. Consecuentemente, la diferenciación de las unidades morfológicas va en esta dirección, que en orden altitudinal decreciente y en el sentido de inclinación corresponden a vertientes inversas, seguidas por vertientes conformes intercaladas una terraza por remoción en masa y una vertiente residual.

Cabe destacar que, si bien las vertientes conformes e inversas hacen referencia a estructuras monoclinales en secuencias estratificadas, se debe considerar que se trata de una adaptación de la taxonomía de ARAYA VERGARA (1985) que permite explicar la morfodinámica específica de estas laderas, ya que, desde una perspectiva estructural, éstas forman parte de una estructura mayor, compleja y plegada, que como se verá en el apartado 4.2.2.2, corresponde al anticlinal El Ingenio. Por lo tanto, al referirse a éstas vertientes, el carácter monoclinal hace referencia a una condición absolutamente local.

En este sentido, las denominadas vertientes conformes corresponden a laderas cataclinales, ya que se disponen paralelas al buzamiento de los estratos y por tanto, son consecuentes a la estructura, mientras que las vertientes inversas, también denominadas anaclinales, están orientadas en sentido contrario a los estratos, por lo que son discordantes a la estructura.

##### *a) Vertiente inversa con cara libre y talud:*

Corresponden a laderas anaclinales que se ubican en la zona de mayor altitud del área de estudio, entre los 1.800 m.s.n.m. y los 2.250 m.s.n.m., aproximadamente. En la parte superior de la ladera se observan las caras libres (ver Figura N°8), que corresponden a afloramientos rocosos de fuerte pendiente, en donde los estratos se disponen contrariamente al sentido de la ladera, lo que favorece el aporte de material disponible para ser movilizado mediante los procesos de gravedad.

Consecuentemente, el material es acumulado en la parte inferior de la ladera, originando el talud, que al ser de menor pendiente que las caras libres, presenta una leve estabilización de los depósitos, lo que ha permitido el desarrollo de suelo y la presencia de matorrales sobre el talud. Hacia la zona norte, en la base del talud, se forman conos aluvio-coluviales con una fuerte preponderancia de los segundos, que demuestran la dinámica moderna de la ladera, reforzando así la idea de la actividad gravitatoria como un agente activo en la movilización de materiales en la actualidad.

Cabe destacar que este sistema de vertiente inversa con cara libre y talud se encuentra ubicado sobre la microcuenca de altura que presenta el área de estudio y que será analizado dentro del modelado fluvial.



**Figura N°8.** Cara libre y talud. En la parte superior de la imagen se observan los afloramientos rocosos de la ladera -cara libre- con la disposición monoclinical de los estratos; en la zona intermedia se encuentra el talud, que de menor pendiente que la cara libre, permite el desarrollo de suelo y vegetación de tipo matorral. En la parte inferior de la imagen, la zona llana corresponde a áreas endorreicas colmatadas. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 21 de febrero de 2018.

*b) Vertiente Conforme con escamas:*

Corresponden a laderas cataclinales, y son la unidad de mayor extensión del área de estudio, abarcando alrededor de 3,8 km<sup>2</sup>, lo que representa más de la mitad de la superficie total del área de estudio. Aparece bajo el límite inferior de la microcuenca endorreica, aproximadamente a los 1.800 m.s.n.m., donde tras un fuerte cambio de pendiente, la ladera se hace más pronunciada hacia la vertiente conforme. Esta unidad se extiende hasta el contacto entre los conos aluviales y la terraza fluvial.

Dado que se trata de laderas que siguen la misma dirección de la estructura, presentan un aspecto relativamente liso y libre de materiales no consolidados. No obstante, su aspecto, la ladera presenta en la parte más alta afloramientos rocosos en forma puntiaguda denominados escamas, los que aportan abundante material para ser movilizado aguas abajo, generando mantos de detritos o presencia de grandes bloques rocosos aislados en medio de la ladera (ver Figura N°9).

Con ello se evidencia la geodinámica externa de la ladera, ya que la acción de los agentes exógenos ha meteorizado la roca aflorada, para posteriormente transportar los fragmentos a través de desprendimientos, o bien, mediante el escurrimiento canalizado que va formando microrrelieves sobre la ladera.

Si bien se trata de una ladera con mucho material detrítico, su aspecto liso indica una relativa estabilización de ésta, considerando que en ella se ha desarrollado un suelo que alberga vegetación baja -principalmente de pradera y matorral- aunque también pueden verse ciertos individuos de árboles, algunos exóticos como álamos, y otros nativos del bosque esclerófilo.



**Figura N°9.** Afloramientos rocosos en forma puntiaguda sobre la vertiente cataclinal. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 21 de febrero de 2018.

Cabe destacar que la vertiente es disectada por la terraza por remoción en masa (ver sección 4.1.2), en donde se marca un claro cambio topográfico, dado que luego de su escarpe la vertiente vuelve a tomar fuerte pendiente, retomando también la movilización de masa aguas abajo. La sección superior de la ladera se caracteriza por tener clastos de mayor tamaño y mayor cantidad de material detrítico suelto, mientras que la sección inferior de la ladera presenta incisiones lineales más profundas, en donde predominan los flujos de detritos y los grandes deslizamientos de suelo (ver Figura N°10).

Consecuente a lo anterior, a medida que se descende, la morfodinámica de la ladera cambia desde los procesos de erosión y transporte, hacia los de depositación, en donde el material movilizado se acumula en forma de abanico, formando conos aluvio-coluviales en el contacto la terraza por remoción en masa, en la sección superior de la vertiente. En tanto, los conos aluviales se desarrollan en el contacto basal entre la vertiente conforme y la terraza fluvial.

#### *c) Vertiente Residual*

Corresponden a unidades geomorfológicas de superficies aplanadas que corresponden a vertientes relictas asociadas a morfodinámicas antiguas que han quedado de manera residual dentro del paisaje actual. En el área de estudio se identificó una unidad correspondiente a este tipo de vertientes, donde la forma aplanada de la ladera es abruptamente interrumpida por un escarpe, generando un fuerte cambio de pendiente aguas abajo (ver Figura N°7).

Esta superficie residual se encuentra a una altitud media de 1.550 m.s.n.m., localizada en el límite poniente del área de estudio. Se trata de una franja con orientación N-S, de un ancho máximo de 280 metros aproximadamente y que, tras su escarpe, aguas abajo hace contacto con la sección inferior de la vertiente conforme.



**Figura N°10.** Vertiente conforme con escamas. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 19 de febrero de 2018.

#### 4.1.2. Modelado Hídrico y Fluvial

Las morfologías resultantes producto de la acción del agua, se dividen según el tipo de proceso al que se ven asociadas, clasificando las unidades morfológicas de acuerdo al trabajo de PEÑA MONNÉ (1997) en: formas acumulativas, formas endorreicas y formas de la red hídrica.

##### a) *Formas Acumulativas:*

Dentro de las formas acumulativas, se encuentran la terraza por remoción en masa, las formas basales de contacto y la terraza fluvial del río Maipo. En cuanto a las primeras, para el caso de estudio se identificaron conos aluvio-coluviales y conos aluviales.

La terraza por remoción en masa corresponde a una superficie aterrazada y su consecuente escarpe. Esta unidad geomorfológica es originada por la acumulación de los depósitos de la gran remoción en masa denominada El Ingenio, de edad pleistocena (GODOY *et al.*, 1994; ANTINAO & GOSSE, 2009). Se ubica a una altura media del sistema de vertientes, aproximadamente en los 1.400 m.s.n.m; y se extiende como una franja de orientación SE-NW que sigue la forma general de la ladera (ver Figura N°11), con un ancho promedio 150 metros. Esta unidad hace contacto con la vertiente cataclinal en su límite superior, mientras que en el inferior hace contacto con los conos aluvio-coluviales, producto de procesos exógenos posteriores.

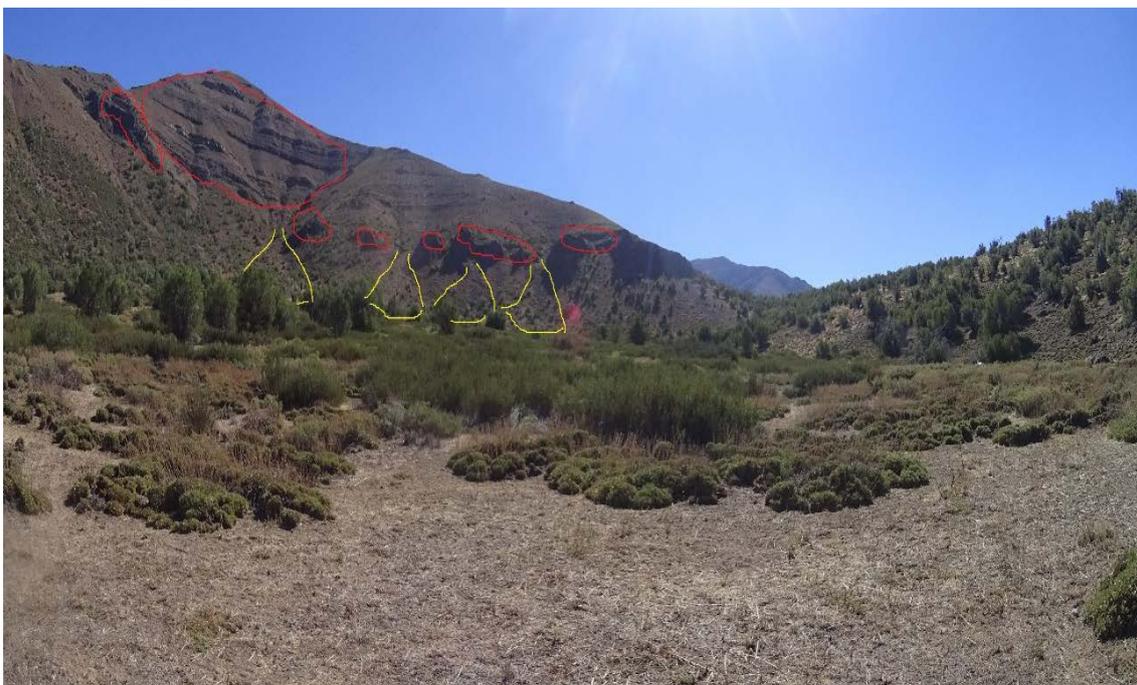


**Figura N°11.** Terraza por remoción en masa y vertiente conforme. Se muestran ambas secciones de la vertiente conforme, disectadas por la terraza por remoción en masa (franja vegetada en mitad de la ladera). Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 19 de febrero de 2018.

Los conos aluvio-coluviales se encuentran concentrados en dos zonas: en la microcuenca endorreica y en la base de la sección superior de la ladera cataclinal. Los conos presentes en la microcuenca están asociados a la dinámica del talud por donde se transporta el material desde las caras libres. Se trata de pequeños conos que nacen desde las incipientes líneas de drenaje por donde escurre el agua, transportando el material no consolidado disponible, el cual se concentra en la base de la ladera de manera extendida.

Dada que la vertiente inversa se encuentra en una etapa inicial de regolitización, es que en ella predominan los procesos coluviales por sobre los procesos aluviales, prevaleciendo, por tanto, material grueso, como gravas y bloques mal seleccionados. En tanto, el bajo aporte de material fino impide que se forme una matriz consolidada.

Si bien la presencia de suelo permite inferir una cierta estabilidad de la ladera, el material coluvial en superficie permite inferir que el cono está constantemente recibiendo material, dando cuenta de la condición altamente dinámica, propio de unidades modernas (ver Figura N°12).



**Figura N°12.** Conos aluvio-coluviales en vertiente inversa. En la imagen se ven afloramientos rocosos (en rojo) que son la fuente principal que aporta a la formación de los conos aluvio-coluviales (en amarillo) que se encuentran en la base del talud. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 19 de febrero de 2018.

En el caso de los conos aluvio-coluviales formados sobre la base de la vertiente cataclinal, al estar dentro de un sistema mucho mayor, son de mayor tamaño que los conos de la microcuenca. En ellos, los procesos aluviales tienen mayor incidencia, ya que los *talwegs* al recorrer una mayor longitud, tienen mayor capacidad de transportar el material fino para ser depositados en el contacto basal con la terraza fluvial.

La zona distal de estos conos se encuentra más estabilizados que los anteriores, ya que sobre ellos se puede ver mayor desarrollo de vegetación, incluyendo la de tipo arbustiva, por lo se deduce un que existe un mayor desarrollo de suelo.

Están compuestos por gravas de diverso tamaño en una matriz fina más consolidada que en el caso anterior (ver Figura N°13). A esto, se le suma el potencial aporte de material detrítico que se encuentra dispuesto en forma de manto sobre la ladera, el cual, al estar suelto, está disponible para ser transportado a través de flujos laminares y que, en casos de precipitación intensa, son potencialmente transportados hasta la zona proximal de los conos. Ello indica que puede haber periódicamente aportes desde dichos mantos coluviales.



**Figura N°13.** Corte longitudinal de un Cono aluvio-coluvial. El corte del cono aluvio-coluvial muestra materiales pobremente seleccionados, habiendo clastos de diverso tamaño en una matriz de gránulos más finos. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 19 de febrero de 2018.

Por su parte, los conos aluviales, se extienden sobre el contacto entre la sección inferior de la vertiente cataclinal y la terraza fluvial. La longitud de la sección inferior es menor que la de la sección superior, lo que influye en la cantidad de material que es erosionado, transportado y por tanto, depositado sobre el contacto, determinando así, el tamaño de los conos; de allí que los conos aluviales sean de menor tamaño que los conos aluvio-coluviales.

Además, por encontrarse en zonas de menor pendiente, se extienden más ampliamente sobre el plano horizontal y con un relieve más suavizado que el de los conos aluvio-coluviales. Por lo mismo, son morfologías mucho más estabilizadas que las anteriores, lo que se evidencia por su tupida vegetación de tipo arbórea, la cual dificulta la identificación de canales de distribución actuales o zonas de alimentación activas que permitan inferir la geodinámica actual de estas unidades.

Sin embargo, los cuatros conos centrales del área de estudio (ver Figura N°7), se encuentran contiguos, aguas arriba, a grandes deslizamientos de suelo y detritos, donde drena la red de drenaje que alimenta a los conos. Así, los grandes deslizamientos evidencian la actividad moderna de los conos a través del aporte de material disponible actualmente: en las zonas proximales de los conos se observan acumulaciones de material detrítico grosero no consolidado, principalmente gravas mayores, mientras que los materiales finos del suelo erosionado por los deslizamientos deben haber progresado aguas abajo, depositándose en las zonas medias o distales de los conos, haciéndolos muchos más estables que en estas zonas.

En cuanto a la terraza fluvial -que sólo tiene un nivel- ésta se desarrolla en la mitad sureste del área de estudio, y presenta una forma en gajo de naranja, es decir, su amplitud horizontal es mayor en su parte central, mientras que hacia los extremos se hace más angosta (ver Figura N°14). Su formación se asocia a edades cuaternarias (holocénicas-pleistocénicas) (THIELE, 1980; FOCK, 2005), donde antiguos lechos fluviales se rellenaron con material transportado por el río, dejando la morfología plana y escalonada que sigue paralelo al curso fluvial actual, y que en su borde interno tiene un abrupto cambio de pendiente, denominado escarpe.



**Figura N°14.** Terraza Fluvial. El escarpe de la terraza, aunque bastante vegetado, presenta signos de erosión producto de su inestabilidad. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 23 de febrero de 2018.

De acuerdo a mediciones en terreno, la terraza tiene una altura promedio de 30 metros, pero a medida que se avanza aguas abajo del río Maipo, esta se va rebajando hasta desaparecer en el último tercio norte del área de estudio.

Como se muestra en la Figura N°15, su escarpe está levemente suavizado, sobre todo hacia el norte del puente, y si bien se encuentra bastante vegetada por árboles que crecen en la base y en zonas donde el escarpe está más suavizado, ayudando a estabilizar la terraza, hay signos de erosión asociada a procesos de deslizamientos desde la parte alta de la terraza, producto de la inestabilidad del escarpe, condición que se explica por el grado de pendiente del escarpe mismo.

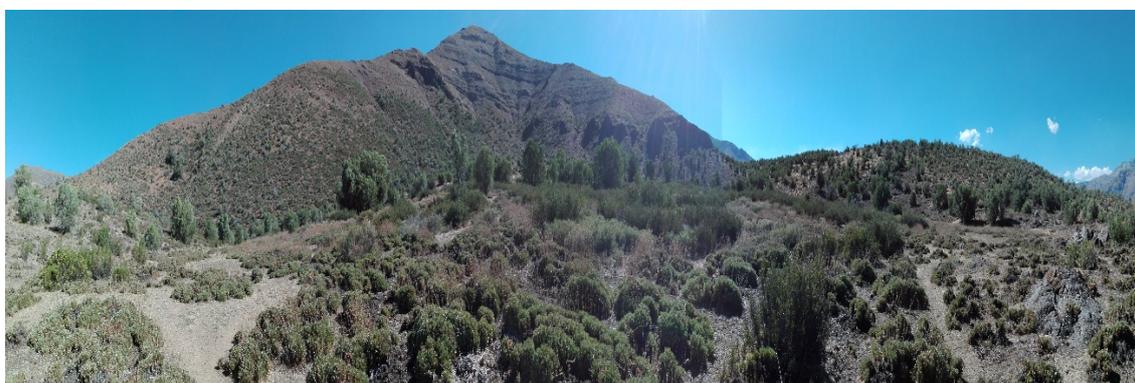
Además, en la Figura N°15 se evidencian de socavamientos laterales erosionados por el río Maipo, de modo que la base de éste va progresivamente desestabilizándose hasta derrumbarse.



**Figura N°15.** Escarpe en Terraza Fluvial. A la izquierda de la imagen se ve el depósito de material proveniente deslizado desde el techo de la terraza; a la derecha se ve el socavamiento lateral producido por el río Maipo. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 23 de febrero de 2018.

*b) Formas Endorreicas:*

La microcuenca endorreica se alza entre los 1.800 y 1.850 m.s.n.m., y tiene una extensión de 890 m<sup>2</sup>. Es un área formada por la vertiente inversa con cara libre y talud y la zona endorreica colmatada, de acuerdo a la clasificación de PEÑA MONNÉ, 1997 (ver Figura N°16).



**Figura N°16.** Microcuenca endorreica. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 20 de febrero de 2018.

La zona endorreica colmatada, es una unidad geomorfológica llana, propicia para concentrar el agua que escurre desde la ladera, transportando con ello, mucho material coluvial fino que va rellenoando la llanura. Aquí, el agua se infiltra para escurrir subsuperficial o subterráneamente, generando la saturación del suelo. Estas condiciones de saturación propician el desarrollo de una vegetación de matorral denso y árboles de especies nativas esclerófilas en la zona de mayor depresión, para hacerse menos densa a medida que se aleja de la zona saturada, en donde predominan las gramíneas y los pequeños matorrales leñosos de hoja dura (ver Figura N°17), adaptaciones propias al ambiente frío de montaña, considerando la altura y las nevadas invernales a los que se ven sometidas.



**Figura N°17.** Transición vegetacional en área endorreica colmatada. En a) se muestra la transición vegetacional a medida que se aleja de la zona saturada, disminuyendo la altura de la vegetación. En b) se muestran los matorrales bajos y la estepa propios de clima de montaña. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 20 de febrero de 2018.

A pesar de que la infiltración se produce en la zona saturada, la pequeña pendiente drena el escaso escurrimiento superficial hacia la zona más baja de la cuenca ubicada en el extremo sureste de la microcuenca (ver Figura N°7), zona en donde se unen los *talwegs* rellenos de abundante material detrítico, para finalmente infiltrarse en el límite con la vertiente monoclin. Esta es, por ende, la zona más saturada.

*c) Red de drenaje:*

La red hídrica está compuesta por un dren principal –río Maipo- y un par de drenes secundarios –esteros y quebradas- los cuales forman parte del perímetro que delimita al área de estudio, mientras que dentro de ésta se identificaron cursos menores que inciden linealmente al sistema de laderas.

El río Maipo en esta zona drena de sur a norte, con un lecho de ancho variable entre los 15 metros en el extremo norte y los 50 metros hacia la parte sur, lo cual indica que es un lecho bastante amplio que permite que el río sea relativamente estable ante eventos pluviométricos hiperconcentrados.

En esta zona el agua del río es turbia debido al alto contenido de sedimentos que es aportado aguas arriba como consecuencia de la alta capacidad erosiva en tal sección. No obstante, en el área de estudio, dicha capacidad disminuye dada la baja pendiente que adquiere el curso del río en esta zona, por lo que éste no alcanza velocidades excesivamente rápidas. Ello posibilita la acumulación de sedimentos que originan lechos mayores, bancos laterales y bancos centrales, los que pueden ser superados durante eventos de crecidas (ver Figura N°18).

Por su parte, los esteros Manzanito, por el norte y Del Ingenio por el sur, son drenes permanentes alimentados por quebradas provenientes de la alta cordillera. Los esteros mencionados tienen un régimen de alimentación nivopluvial, por lo que exhiben las crecidas en primavera y ante eventos pluviométricos concentrados. Son cursos de influencia estructural, por lo que presentan formas encajonadas por paredes rocosas; escurren además sobre el sustrato rocoso. Debido por su elevada pendiente a y por su morfometría encajonada, se genera una alta inestabilidad en la base de las laderas que encajonan a estos cursos, transportando así, material grosero, del tamaño de bloques y gravas mayores.

Finalmente, los *talwegs* menores, son cursos incipientes de alto desnivel altitudinal, por lo que son drenes angostos y con alto grado de entallamiento sobre el terreno. Ello implica que, ante eventos pluviométricos de gran intensidad, los *talwegs* superan su canalización y erosionan la ladera, tanto lateral como en profundidad. Dicho material es transportado aguas abajo hasta depositarse en las zonas de contacto, aportando así a los conos que se desarrollan en la base de estos cursos.



**Figura N°18.** Red de drenaje. En a) encajonamiento y pozones en el estero del Ingenio. En b) el lecho actual y lecho mayor del río Maipo y los bancos de arena en la ribera del frente. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 23 de febrero de 2018.

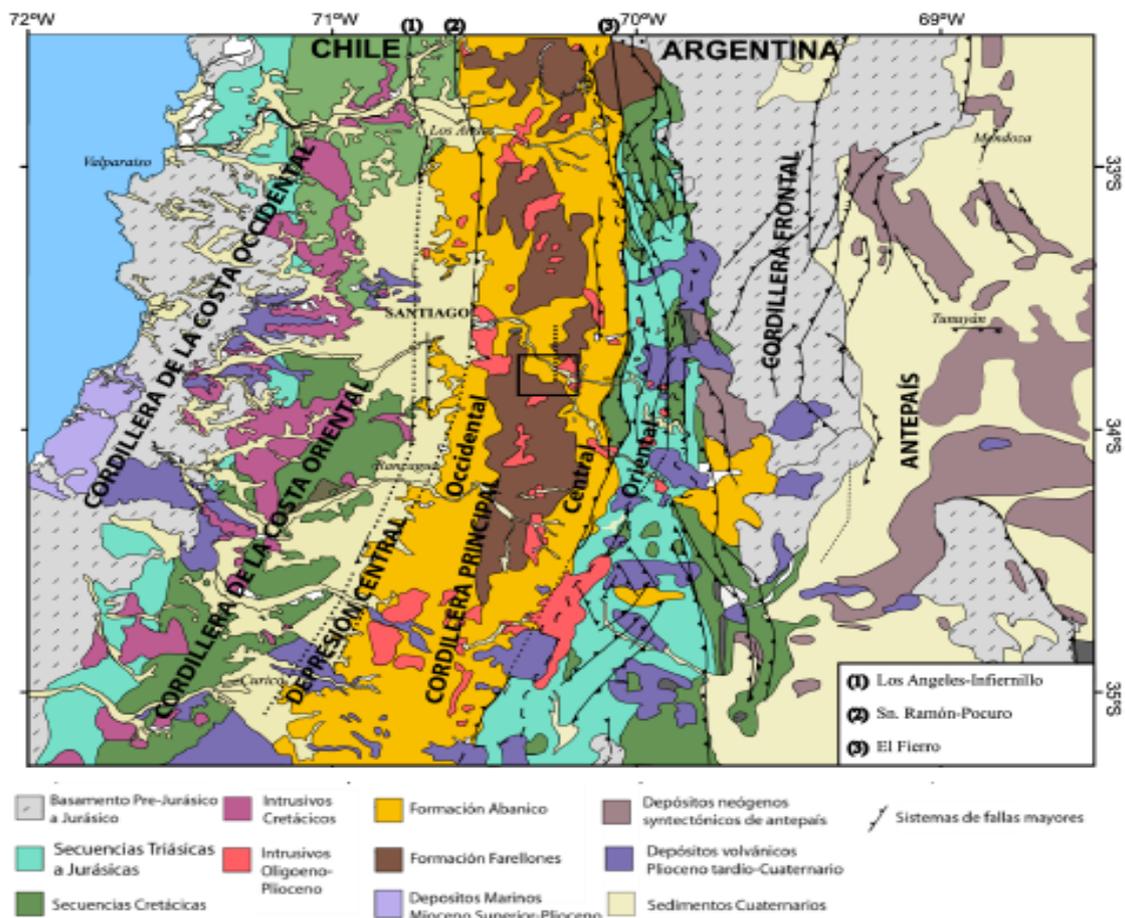
## 4.2. ANÁLISIS DE LA GEODINÁMICA MODERNA ASOCIADA A REMOCIONES EN MASA

En la primera parte de este capítulo se hace una revisión del marco geológico del área de estudio, ya que la geología es un factor que condiciona las características del terreno que propician la generación de movimientos de remoción en masa. De allí que conocer el marco estructural, la edad y la composición mineralógica de los depósitos -factores que determinan el grado de alteración de la roca- permite comprender el grado de inestabilidad del terreno y, por ende, la susceptibilidad de ocurrencia de cierto tipo de remociones propias del lugar. En la segunda parte, se analiza el inventario de remociones en masa desde un enfoque morfodinámico, considerando así, las características geológicas y las unidades geomorfológicas que condicionan que la ocurrencia de estos procesos.

### 4.2.1. Marco Geológico Regional

#### 4.2.1.1. Marco Estructural y Tectónico General

El marco estructural de Chile, entre los 32°S-35°S, condicionado por la subducción de la placa oceánica bajo la placa continental, está conformado por 5 unidades morfoestructurales dispuestas en franjas con dirección N-S. De ellas, la Cordillera Principal es la morfoestructura de mayor relevancia (ver Figura N°19), ya que es en ella donde se generan los mayores alzamientos tectónicos andinos (GONZÁLEZ, 2010).



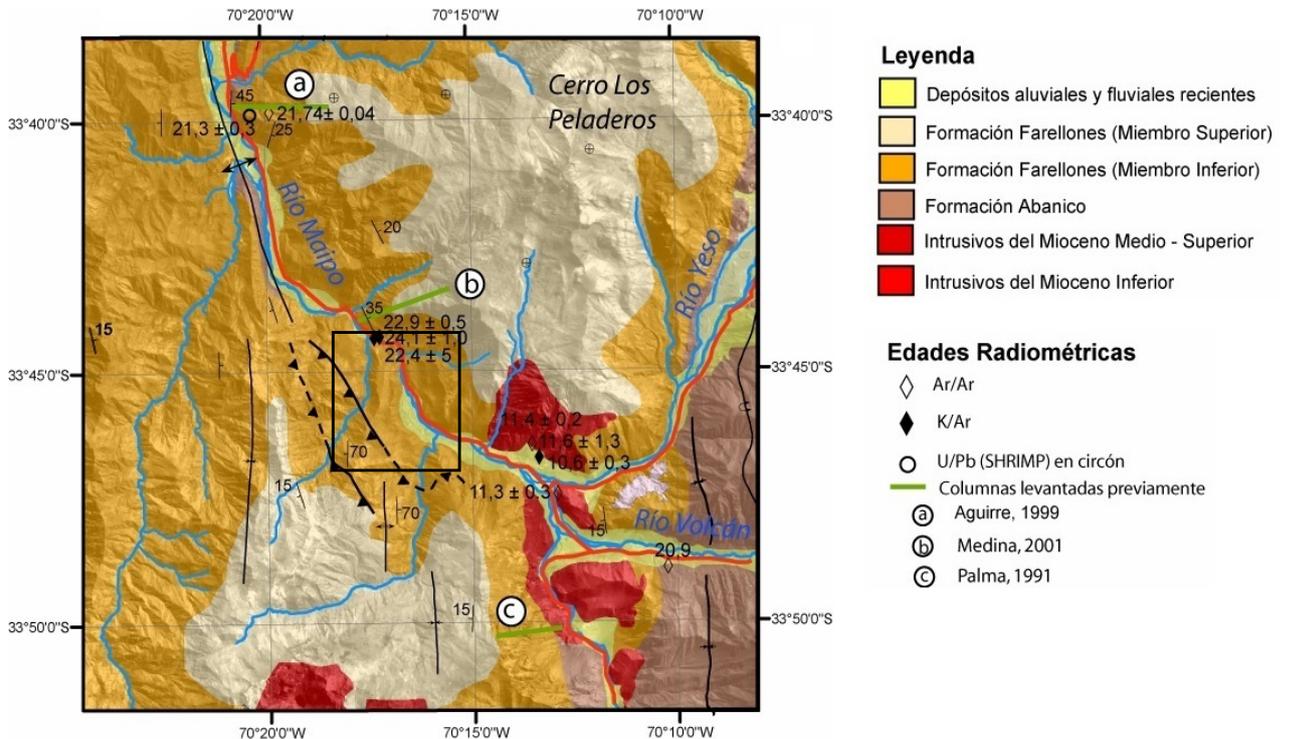
**Figura N°19.** Mapa Geológico simplificado de Chile entre los 32°S y los 35°S. Segmentación morfoestructural con unidades litológicas y los principales sistemas de falla. El recuadro indica la zona de estudio. Fuente: Farías *et al.* (2010) en Villela (2015).

La cordillera Principal está compuesta por el flanco Occidental de edad Cenozoica, compuesto por rocas volcánicas y sedimentarias que corresponden principalmente a las Formaciones Abanico y Farellones (FOCK, 2005; THIELE, 1980). El flanco Oriental por su parte, de edad Mesozoica, está compuesto por rocas sedimentarias –de origen marino y continental- con intercalaciones de rocas volcánicas, fuertemente deformada que constituyen la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua (ARRIAGADA & VARGAS, 2015; FOCK, 2005; RAULD, 2011; SCHACHTER, 2008).

Diversos autores sugieren que el alzamiento de la Cordillera Principal se origina cuando los procesos de subsidencia regional, durante el Eoceno-Oligoceno, formaron un sistema de cuencas extensionales de intra-arco, con orientación Norte-Sur, formando la Cuenca de Abanico sobre la cual se depositó la Fm. Abanico en el Eoceno Medio-Oligoceno Superior (CHARRIER *et al.*, 2002; FOCK *et al.*, 2006; RALUD, 2011; VILLELA *et al.*, 2015). Posteriormente, durante el Oligoceno Superior-Mioceno Inferior Temprano, comienza un proceso de inversión de la cuenca, a la vez que se deposita sintectónicamente sobre ella el Miembro Inferior de la Fm. Farellones, generando una deformación compresiva en ambas unidades. Mientras continúa la inversión tectónica, en el Mioceno Medio-Mioceno Tardío, se deposita el Miembro Superior de la Fm. Farellones, pero además se produce una migración al Este de la deformación compresiva, generando así, la Faja plegada y corrida del Aconcagua, zona en la que se concentra la deformación que produce la exhumación final de la Cordillera Principal durante el Plioceno-Holoceno, configurando la morfología que conocemos en la actualidad (FOCK *et al.*, 2006; GONZÁLEZ, 2010; RAULD, 2011; VILLELA, 2015).

De acuerdo al modelo de evolución morfoestructural, el área de estudio se circunscribe en el flanco occidental de la Cordillera Principal. Para THIELE (1980) la zona corresponde a la Fm. Abanico, sin embargo, estudios estratigráficos posteriores indican que correspondería al Miembro Inferior de la Fm. Farellones (FOCK, 2005; FOCK *et al.*, 2006; VILLELA 2015; VILLELA *et al.*, 2015). La controversia se explica porque las relaciones de contacto entre ambas formaciones son complejas. Así, las unidades presentan gran variación lateral de facies (VILLELA, 2015), mientras que el contacto entre ellas se presenta tanto discordante (THIELE, 1980), como concordante (FOCK, 2005). Lo anterior ha supuesto una transición continua entre los niveles superiores de Abanico hacia los niveles inferiores de Farellones mediante discordancias progresivas asociadas a la inversión de la cuenca; discordancias que son más evidentes en los bordes de la cuenca, donde la deformación fue más intensa, mientras que, en el sector central de la cuenca, la menor deformación permitió un contacto concordante o pseudo-concordante (FOCK, 2005; QUIROGA *et al.*, 2015; THIELE, 1980; VILLELA, 2015).

Por su parte, el sector de El Ingenio corresponde a una estructura compleja vergente al Este que es asociada al gran Anticlinal del Maipo. Dataciones en el flanco oriental del sugieren que rocas anteriormente asociadas a la Fm. Abanico, corresponderían al Miembro Inferior de Farellones, unidad que se extiende hacia el flanco sur, donde se ubica este trabajo (VILLELA, 2015; VILLELA *et al.*, 2015). Consecuentemente, para este caso se considerará la propuesta de FOCK (2005), debido a que las investigaciones geológicas posteriores siguen el planteamiento de dicho trabajo (ver Figura N°20).



**Figura N°20.** Mapa geológico general del área de estudio Los números corresponden a las edades radiométricas datadas, mientras que las letras (a), (b) y (c) indican la ubicación de las columnas estratigráficas. El recuadro negro indica la ubicación del área de estudio. Fuente: FOCK (2005), modificado de Baeza (1999) y Sernageomin (2003).

#### 4.2.1.2. Estratigrafía Regional

De acuerdo a la Figura N°15, las unidades litológicas del área de estudio son:

- Formación Farellones (Tsf) (Klohn, 1960):

Según dataciones radiométricas, THIELE (1980) le asigna una edad miocena a la formación, la que está compuesta de lavas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas, en donde las lavas predominan por sobre las tobas y brechas. La secuencia está alternada por rocas volcanoclásticas más finas, en tramos de 4 a 5 metros, lo que produce una marcada estratificación que la diferencia de la Fm. Abanico. Su espesor se estima en 2.500 metros, aunque éste aparece aumentado por los mantos intrusivos y lacolitos que se intercalan en la serie (THIELE, 1980).

El contacto con la Fm. Abanico es una transición de pseudo-concordante a discordante (FOCK, 2005), mientras que el techo de esta formación corresponde a la actual superficie de erosión. La disposición de los estratos son subhorizontales, con una inclinación máxima de 25° permite diferenciarla de la Fm. Abanico, la que se encuentra más plegada (THIELE, 1980).

- Depósitos No Consolidados (Q):

Corresponden a secuencias sedimentarias del Holoceno y en parte del Pleistoceno, que incluye depósitos fluviales, fluvioglaciales, aluviales, lacustres y gravitacionales, además de depósitos de cenizas volcánicas modernas. Así, los depósitos fluviales,

fluvioglaciales y aluviales se asocian a la depresión intermedia y a los rellenos de los valles interiores, donde destacan los rellenos fluviales que forman las terrazas, y que sobre los 1.500 m.s.n.m. gradan a depósitos fluvioglaciales. En tanto, los depósitos gravitacionales corresponden a acumulaciones detríticas producidas por la reptación del suelo y de taludes, éstos últimos de mayor importancia hacia el interior de los valles, ya que presentan mucho material suelto que evidencian la inestabilidad de dichos taludes, debido a los permanentes movimientos de volúmenes importantes de material (THIELE, 1980). Los depósitos lacustres en tanto, se asocian a lagos represados por morrenas en la cuenca alta del Maipo; mientras que los depósitos glaciales, compuestos por morrenas, rellenan las cabeceras de los esteros ubicados sobre la cota 2.500 m.s.n.m. (THIELE, 1980).

#### **4.2.2. Marco Geológico Local**

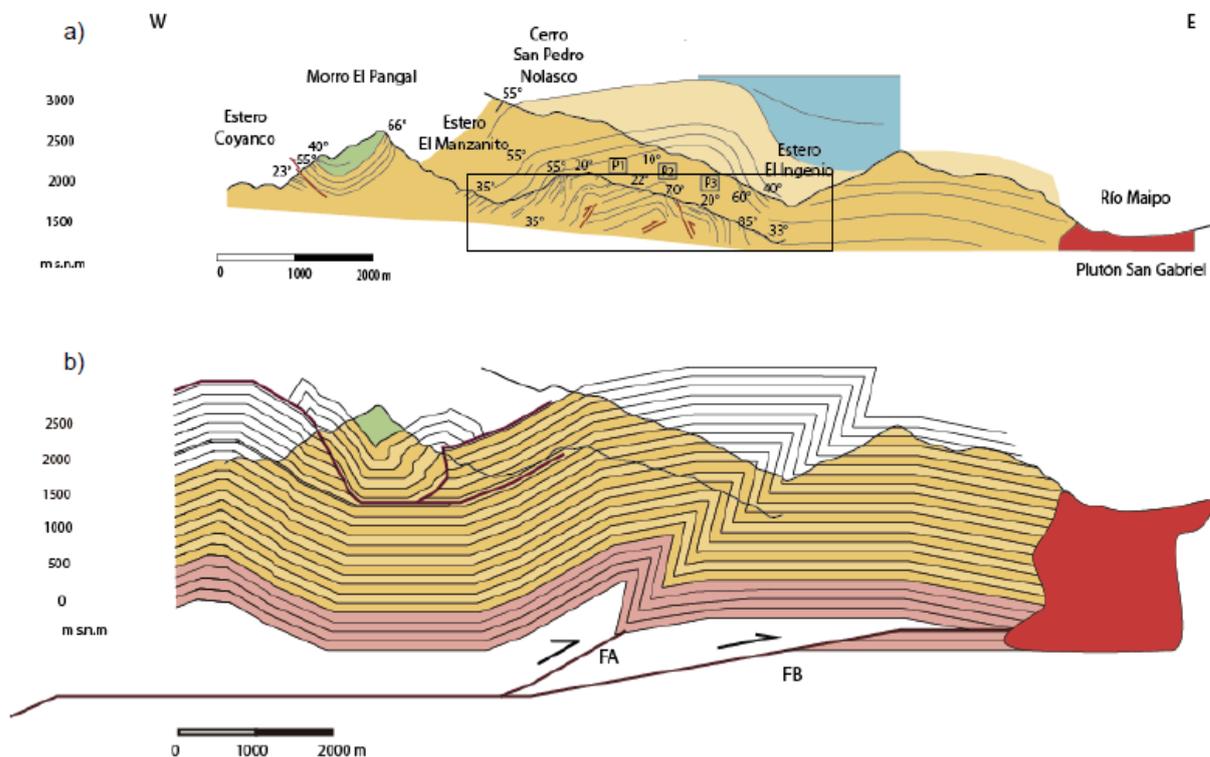
##### **4.2.2.1. Estructuras Locales**

El sector de El Ingenio se caracteriza geológicamente por ser una estructura compleja. THIELE (1980) lo interpretó como un sinclinal volcado, pero estudios posteriores proponen que se trata de un anticlinal, denominado El Ingenio, el que corresponde a una prolongación hacia el sur de una estructura mayor denominada Anticlinal del Maipo (FOCK, 2005; FOCK *et al.*, 2006 y FARIAS *et al.*, 2010; VILLELA, 2015).

VILLELA (2015) realizó un estudio del desarrollo estructural de la zona, donde describió al Anticlinal El Ingenio como una estructura de primer orden, de orientación NNW, y con una media longitud de onda de 5 km. Identificó además, estructuras de segundo orden que se concentran en el plano axial o núcleo del anticlinal, y que corresponden a fallas inversas y pliegues con vergencia principalmente hacia el este. Lo anterior se condice con FOCK (2005), quien plantea que la secuencia en la ribera suroeste del río Maipo es cabalgada hacia el noreste, principalmente a través de fallas inversas de bajo ángulo, concentrándose así la deformación, en el miembro inferior de la Fm. Farellones.

Particularmente, entre el estero El Manzanito y el estero El Ingenio, los estratos se encuentran intensamente cizallados, fallados, y plegados, pero en donde los niveles estratigráficos se deforman diferencialmente, lo que es atribuido al contraste de competencia de las rocas. Así, como muestra la Figura N°21, se observa un gran anticlinal en los niveles superiores y más competentes, compuestos principalmente de tobas y conglomerados, mientras que en los niveles intermedios y menos competentes, compuestos principalmente por areniscas y lutitas, se observan una serie de fallas y pliegues de menor longitud de onda con vergencia al este (VILLELA, 2015; VILLELA *et al.*, 2015). Es en los niveles intermedios en los que se concentra el área de estudio.

El análisis de la deformación de los estratos realizado por VILLELA (2015) sugiere que el flanco oriental del Anticlinal El Ingenio se encuentra más deformado que flanco occidental, observando en el primero una serie de tres pliegues, que de oeste a este son P1, P2 y P3 (ver Figura N°22).

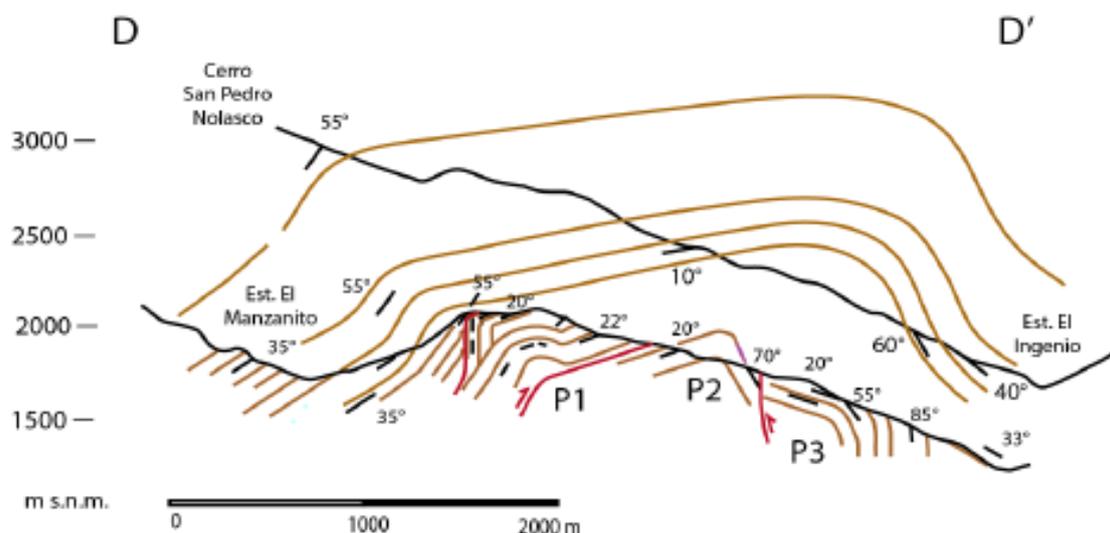


**Figura N°21.** Perfil estructural del área de estudio El perfil (a) muestra las estructuras de primer orden -Anticlinal El Ingenio- y de segundo orden -fallas y pliegues- que configuran la zona de estudio, demarcada en el recuadro negro. El perfil (b) explica el comportamiento morfotectónico que originó al anticlinal. Fuente: VILLELA (2015).

La Figura N°22 muestra la serie de pliegues, en donde P1 corresponde a un anticlinal abierto de media longitud de onda de 500 metros, que se separa de P2 a través de una falla (en rojo) paralela a la estratificación. P2 por su parte, corresponde a un pliegue anticlinal abierto de media longitud de onda de 700 metros. Finalmente, P3, separado de P2 por una falla inversa que miente al este, presenta ambos flancos inclinados hacia el este, pero con un manto mucho mayor de su flanco oriental.



**Figura N°22.** Estratificación, pliegues y fallas del área de estudio. En el diagrama se observa el manteo de los estratos y los cambios asociados a fallas, lo que demuestra la serie de 3 pliegues (P1, se ubica en la ladera sur del estero Manzanito que no se alcanza a observar en la imagen). Fuente: VILLELA (2015), tomada de Google Earth.



**Figura N°23.** Perfil esquemático de pliegues estructurales en el Anticlinal El Ingenio. Perfil del tramo D-D' (referencia del perfil D-D' en Figura N°18), donde se muestran los pliegues P1, P2, P3, con los datos de manteo para cada flanco, y las fallas (en rojo) que los separan. Fuente: VILLELA (2015).

#### 4.2.2.2. Estratigrafía Local

La estratigrafía local está constituida por las estructuras litológicas miocenas y por los depósitos cuaternarios modernos que cubren en la mayoría del área de estudio a las estructuras. Los primeros corresponden a afloramientos rocosos que aparecen principalmente en las zonas de mayor altitud y pendiente, y que han sido asignados al miembro inferior de la Fm. Farellones; mientras que los depósitos modernos que sobreyacen a las estructuras, corresponden a materiales no consolidados que dan cuenta de los procesos de denudación que han meteorizado la roca, formando regolitos que se depositan ladera abajo a través diferentes procesos erosionales que los definen como tales. A continuación se detallan las unidades que se identificaron localmente.

- Miembro Inferior de la Fm. Farellones (Tsfj):

Se define como una secuencia, principalmente sedimentaria, compuesta por conglomerados, areniscas y lutitas, con intercalaciones de tobas cristalinas y líticas. Tiene un espesor de, por lo menos, 800 metros (AGUIRRE, 1999 en VILLELA, 2015). En el levantamiento de columnas estratigráficas realizado por VILLELA (2015) se establece que al tanto al oeste del estero Del Ingenio, como en el estero Manzanito afloran secuencias de rocas sedimentarias, compuestas, principalmente, por niveles de areniscas y lutitas. Las sucesiones de areniscas laminadas con lentes de conglomerados alcanzan los 50 metros de potencia, en donde, además, se observa, progradación y marcas de fondo en las areniscas que permiten interpretar el incipiente desarrollo de un ambiente lacustre.

Las secuencias sedimentarias se caracterizan por ser rocas blandas y de granulometría fina, por lo que tienden a disgregarse poco a poco, generando numerosas pero pequeñas remociones en masa. En tanto, las rocas volcánicas, tales como tobas y brechas, que se encuentran en menor medida conglomerados en la zona, son rocas de mayor dureza y por tanto tienen una mayor resistencia; sin embargo, cuando superan el umbral generan grandes remociones en masa

- Depósitos No Consolidados (Q):

- a) Depósitos Aluviales (Qa):

Son depósitos de granulometría variable, principalmente gravas y arenas, en una matriz fina. Se acumulan en forma de abanicos en el fondo de valle, en contacto con los depósitos fluviales que conforman la terraza. Se trata de depósitos provenientes de flujos esporádicos de diversa energía y por tanto de volumen variable (GONZÁLEZ, 2010). En esta clase se incorporan también los materiales depositados en la microcuenca endorreica, ya que, si bien éstos podrían corresponder a depósitos lacustres, no se evidencia un predominio de granulometría fina, ni tampoco laminación estilo *varves*.

- b) Depósitos Coluviales (Qac)

Son depósitos de materiales gruesos, con escasa matriz fina, depositados en forma de conos en la base de las laderas donde la pendiente disminuye, o bien, extendidos en forma de mantos superficiales sobre las laderas de alta pendiente (Se trata de material detrítico grueso transportado por los *talwegs* menores asociados a

corredores de flujos, y que por tanto provienen de los afloramientos rocosos donde comienzan los procesos de denudación.

*c) Depósitos Coluviales (Qc):*

Son depósitos de material detrítico suelto sin matriz fina, que han sido transportados por escurrimiento laminar o por procesos de gravedad, por lo que se disponen en forma de mantos superficiales sobre las laderas de alta pendiente (FOCK, 2005; GONZÁLEZ, 2010).

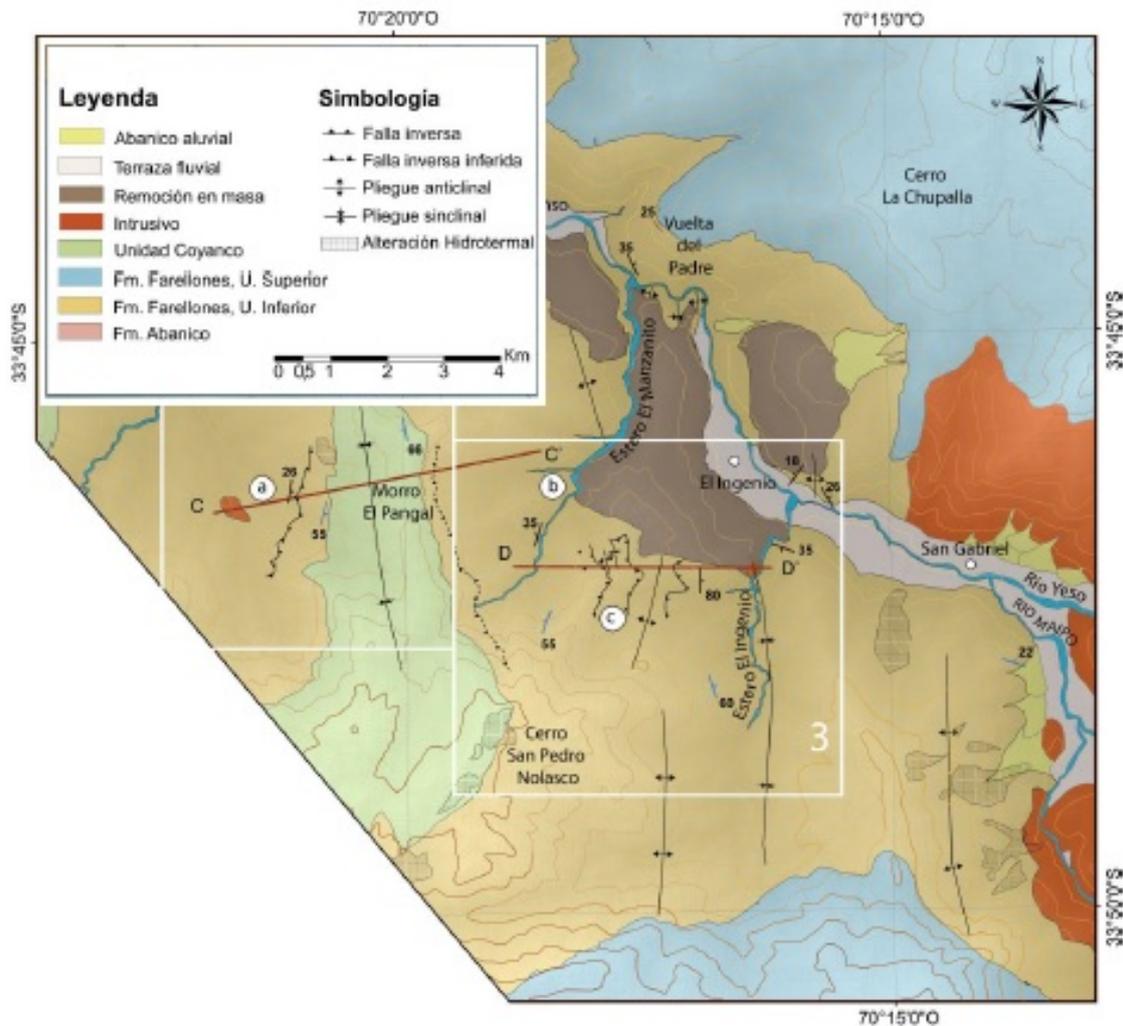
*d) Depósitos Fluviales (Qf):*

Corresponden a los depósitos de la terraza fluvial, compuestos principalmente por gravas de distinto tamaño y subredondeadas debido a la acción hídrica. Se trata de clastos que rellenaron antiguos lechos del río, depositándose horizontal y paralelamente al curso actual del río. Se evidencia sólo un nivel de terraza.

*e) Depósitos de remoción en masa (Qrm):*

Corresponden a depósitos del derrumbe ocurrido en el pleistoceno tardío, donde el cerro San Sebastián que se encuentra en la ribera opuesta al área de estudio se derrumbó y remontó hasta la ribera sur, en donde se extiende aplanadamente, dejando una morfología de terraza. Corresponden bloques de masa de origen volcanoclástico que encuentran cohesionados a pesar del intenso fracturamiento (GODOY *et al.*, 1994).

A modo de síntesis, es importante considerar para el análisis de los procesos de ladera, que las secuencias volcano-sedimentarias del área de estudio fueron sometidas a intensas deformaciones tectónicas, tanto por episodios extensivos, como por posteriores episodios compresivos que alzaron y plegaron las estructuras. Ello configuró laderas muy empinadas, con un alto grado de fallamiento en ambientes morfoclimáticos de montaña, condiciones que potencian la meteorización de las rocas, haciéndolas muy susceptibles a los procesos de denudación que inestabilizan las laderas y generan grandes volúmenes de material no consolidado disponibles para ser movilizado mediante remociones en masa. La evolución morfoestructural que condiciona la distribución de las unidades litológicas recubiertas por depósitos modernos en gran parte de las laderas estructurales, y que determina la presencia de fallas que se sintetiza gráficamente en el mapa geológico local (ver Figura N°24).



**Figura N°24.** Mapa Geológico a escala local. Se muestra la presencia de fallas inversas y la serie de pliegues asociados éstas. Fuente: VILLELA (2015).

#### 4.2.3. Geodinámica moderna: inventario de remociones en masa

Durante el trabajo realizado en terreno se catastraron 85 puntos asociados a procesos de remociones en masa que fueron localizados mediante puntos *GPS*, para luego ser exportados y visualizados en el software *ArcGIS*, en donde se complementaron mediante trabajo de fotointerpretación, obteniendo así el Mapa de Inventario de remociones en masa (ver Figura N°25). Se reconocieron zonas de arranque y transporte de material, y zonas de acumulación de material depositado por procesos de remoción en masa. De acuerdo a esto, en el área de estudio se identificaron 3 tipos de remociones en masa: caída de bloques, deslizamientos de suelo y detritos, y flujos de detritos; mientras que las zonas de acumulación de masa corresponden a depósitos aluviales, aluvio-coluviales, de barro y mantos coluviales. En el Anexo N°1 se adjuntan registros fotográficos de estos procesos de ladera.

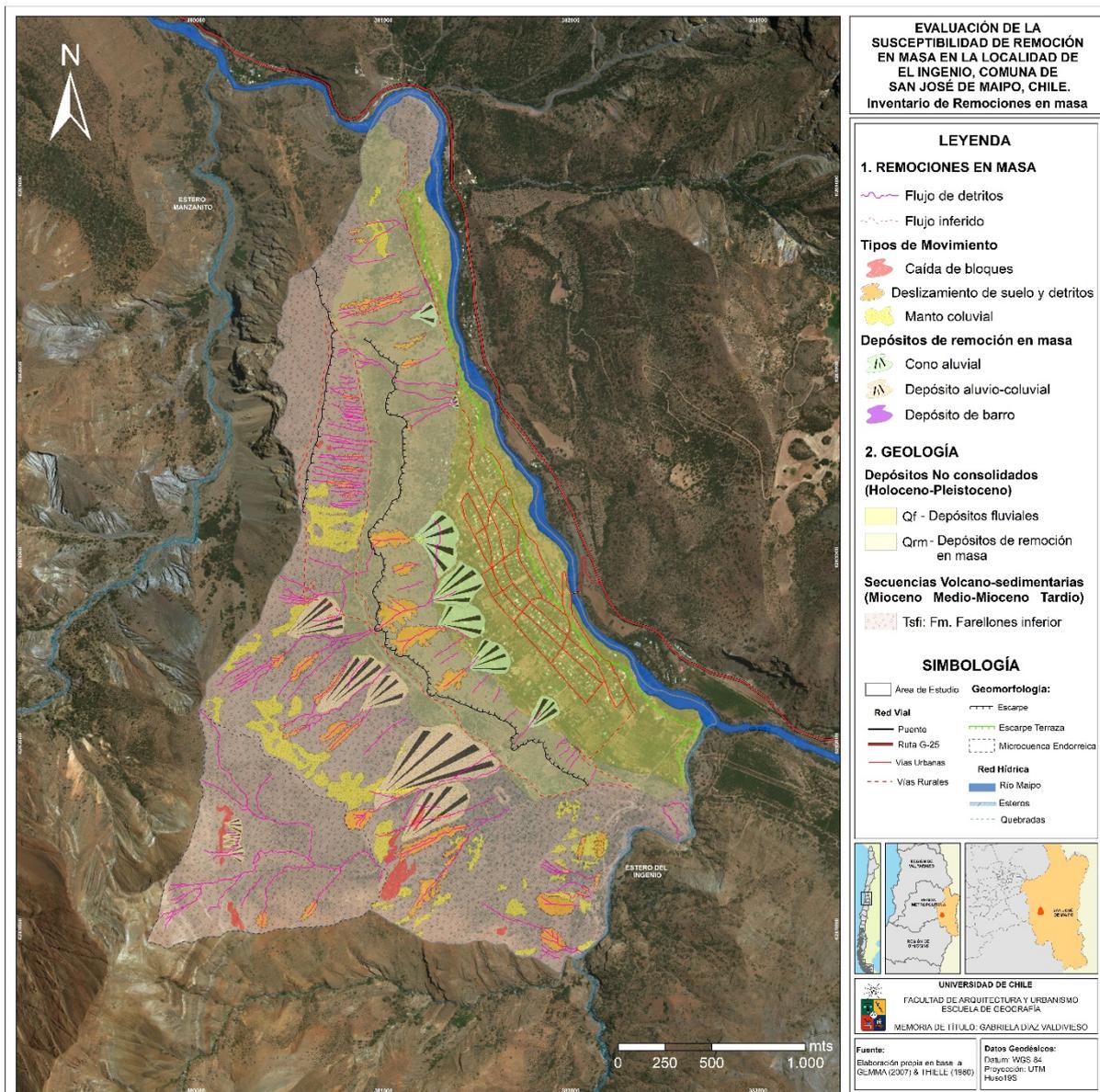


Figura N°25. Inventario de remociones en masa del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al mapa, la mayor cantidad de remociones presentes son del tipo flujos de detritos, los que se extienden por toda el área de estudio; le siguen los deslizamientos de suelo y detritos, que varían ampliamente en extensión y estado de actividad, mientras que las caídas de rocas son las que menos se observan, concentrándose principalmente en la zona de mayor altitud del área de estudio. En cuanto a los depósitos, tal como se mencionó anteriormente (ver capítulo 4.1), los conos aluvio-coluviales se concentran en la sección superior de la ladera, mientras que los conos netamente aluviales se ubican en la parte inferior de la ladera, en contacto con la terraza fluvial. Por su parte, los mantos coluviales, abarcan grandes extensiones de ladera, siendo uno de los más relevantes en el aporte de masa, ya que junto con los flujos de detritos y caídas de rocas son de carácter moderno y activos, aportando grandes volúmenes de detritos al sistema.

A continuación, se describen las principales características para cada tipo de remoción, indicando su ubicación relativa al área de estudio, extensión y el estado dinámico actual.

#### 4.2.3.1. Caídas de bloques

Este tipo de remoción en masa se concentra en las zonas de alta pendiente y escaso desarrollo de suelo, por lo que son áreas propensas a los afloramientos rocosos. Se identificaron dos formas en que afloran las rocas; unos se ubican en la parte superior de la microcuenca (ver Figura N°26), y están asociados a la vertiente inversa de cara libre y talud, mientras que los segundos, se ubican aguas abajo de la microcuenca endorreica sobre la ladera cataclinal con escamas (ver Figura N°10). En los primeros se evidencia una estratificación horizontal bien definida, formando una pared rocosa relativamente lisa, por tanto si bien la roca está expuesta a la meteorización y por ende al desprendimiento y la caída libre, la disgregación de la roca en este sector no está en un estado tan avanzado como sí ocurre en el segundo caso, en donde los afloramientos presentan un estado de desintegración mayor, evidenciado en las escamas rocosas descritas en el capítulo 4.1, las que tienen formas muy irregulares y con una mayor concentración de bloques de rocas dispuestas ladera abajo de sus correlativos afloramientos, lo que da cuenta de una intensa meteorización de éstos últimos.



**Figura N°26.** Caída de bloques en la vertiente anaclinal. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 21 de febrero de 2018.

Las caídas de rocas abarcan un área de 4,4 hectáreas, distribuidas en 10 polígonos mapeados en el inventario de remoción en masa, configurándose como las remociones en masa de menor superficie. No obstante, aquello, la geodinámica es muy actual, viéndose bloques que sobreyacen muy superficialmente los suelos o se encuentran sobre coberturas detríticas escasamente vegetadas; asimismo se notó un escaso desarrollo de líquenes sobre los bloques, siendo todos ellos factores que dan cuenta de una movilización y depositación moderna (ver Figura N°27).



**Figura N°27.** Bloques rodados en la vertiente cataclinal. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 21 de febrero de 2018.

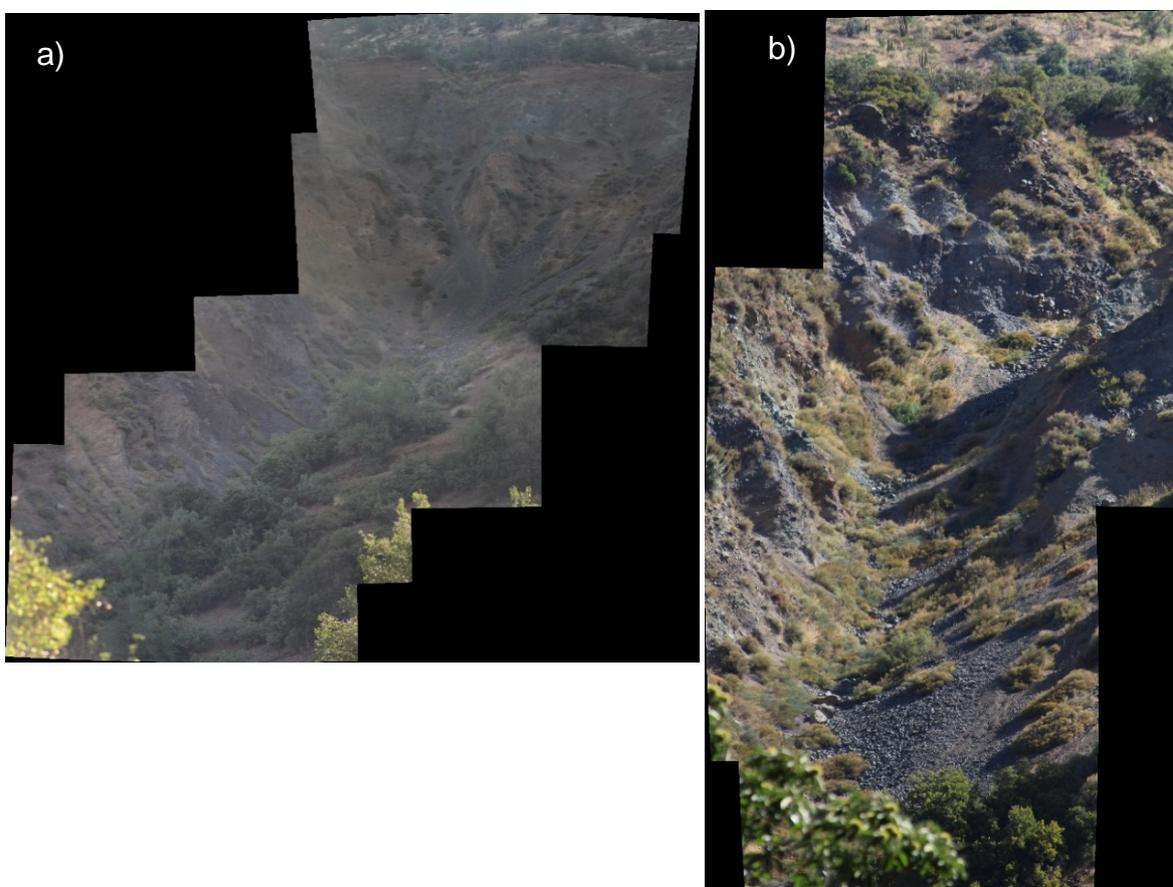
#### 4.2.3.2. Deslizamientos de suelo y detritos

En este tipo de remociones en masa destacan 4 grandes deslizamientos que se ubican en la sección inferior, bajo la terraza por remoción en masa (ver Figura N°28). Son fácilmente reconocibles a distancia por su gran tamaño (entre 1,5 y 2 hectáreas aproximadamente). Si se mira hacia el área de estudio desde la ruta G-25 a la altura de El Ingenio, se observan claramente las superficies de rotura que corresponden a las zonas de arranque de los grandes volúmenes de masa, caracterizados por escarpes de gran extensión y profundidad que dejan al descubierto los sustratos estructurales que subyacían a la cubierta de material no consolidado que fue movilizado ladera abajo.

Probablemente se trata de deslizamientos antiguos, pero modernos, ya que se pueden observar estas superficies de ruptura en las imágenes satelitales y aéreas utilizadas en este trabajo, siendo la más antigua del año 1984, disponible en *Google Earth*. A esto se suma la cobertura vegetal que presenta la masa movilizada que se depositó a los pies de estos deslizamientos (ver Figura N°29-a), dando cuenta de la antigüedad y relativa estabilización de tales depósitos. Sin embargo, la geodinámica actual en estas zonas es altamente activa, toda vez que dichas superficies de erosión han sido rellenadas con abundante material suelto, principalmente producto de la movilización por flujos detríticos actuales (ver Figura N°29 b).



**Figura N°28.** Grandes deslizamientos. Enumerados del 1 al 4, los grandes deslizamientos de suelo y detritos ubicados bajo la terraza por remoción en masa. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 22 de febrero de 2018.



**Figura N°29.** Material moderno sobre las superficies de erosión de deslizamientos. En a) la vegetación se desarrolló en la zona baja del deslizamiento, evidenciando una relativa estabilización de los depósitos del deslizamiento que permiten inferir su antigüedad. En b) la actividad reciente ha rellenado la superficie de erosión con material detrítico. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 22 de febrero de 2018.

En total se catastraron 44 deslizamientos, los que en su totalidad abarcan más de 20 hectáreas, variando significativamente en extensión entre unos y otros. Los grandes deslizamientos presentan, en general, una forma subredondeada, dado que abarcan mucho material tanto en profundidad, como lateral y longitudinalmente. Los deslizamientos menores, que se concentran principalmente en la parte superior de la vertiente cataclinal (ver Figura N°30), inmediatamente bajo el límite de la microcuenca y en donde prima la erosión lineal, presentan una forma alargada y angosta y con menor incisión en profundidad, abarcando por tanto menor volumen de masa, pero con mayores evidencias de actividad reciente.



**Figura N°30.** Deslizamientos en la sección superior de la vertiente cataclinal. Los deslizamientos abarcan gran parte de la sección superior de la ladera con superficies de roturas alargadas y muy contiguas unas de otras. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 22 de febrero de 2018.

#### 4.2.3.3. Flujos de Detritos

Son el tipo de remoción en masa más frecuente, pero dada su morfología de incisiones lineales muy angostas no fue posible contabilizar el área que abarcan, sino solamente su extensión longitudinal. Se contabilizaron cerca 150 de corredores de flujo de detritos, con un par de ellos de más de 1 Km de extensión, y otros que sobrepasan los 500 metros de longitud, llegando en total a los casi 35 Km lineales.

En la parte alta de las laderas, donde se inician de los procesos de denudación, los flujos aparecen como someras incisiones en el terreno, constituidos principalmente por materiales groseros sueltos (ver Figura N°31), pero a medida que escurren ladera abajo, la canalización de estos flujos son cada vez más profundas y anchas, aumentando así

el volumen de agua, lo que incide a su vez, en la cantidad y granulometría del material transportado, generando una variación en la granulométrica a lo largo de los corredores de flujos. Así, en las zonas de arranque predominan los coluvios escasamente sedimentados, mientras que en las secciones distales los flujos que se tornan más plásticos aportan a una mayor concentración de materiales finos y más compactados.

Cabe destacar que mucho material detrítico drena hacia los escarpes de los deslizamientos generando un *talweg* que concentra canalizadamente el material para continuar su curso aguas abajo a través de un corredor de los flujos; así es común ver que los flujos de detritos están asociados a la base de las superficies de erosión de los deslizamientos (ver Figura N°32).



**Figura N°31.** Flujos de detritos en la parte superior de la vertiente cataclinal. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 20 de febrero de 2018.



**Figura N°32.** Corredores de flujos de detritos. a) zona proximal de un corredor de flujo que incide someramente la ladera cataclinal. b) un corredor flujo que escurre sobre el plano de rotura de un pequeño deslizamiento Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 20 de febrero de 2018.

#### 4.2.3.4. Depósitos de Remociones en masa

Esta tipología comprende depósitos aluviales y aluvio-coluviales que fueron descritos en el capítulo 4.1, por lo que en esta sección sólo se describirán los mantos coluviales y los depósitos de barro.

##### a) Mantos Coluviales:

Si bien todo el sistema de laderas contiene coluvios sobreyaciendo al suelo, se definieron los mantos coluviales como áreas en que éstos se concentran en abundancia, dispuestos en forma superficial y sin compactación, de manera que cubren totalmente el suelo y parte de la vegetación, lo que da cuenta de procesos actuales de depositación (ver Figura N°33). En el área de estudio, son los segundos depósitos de mayor extensión, luego de los conos aluvio-coluviales, y ocupan un poco más de 30 hectáreas.

En la disposición de estos depósitos predominan los procesos de gravedad por sobre el escurrimiento hídrico, aunque, de todas maneras, éste último también aporta al transporte y depositación de los coluvios a través del escurrimiento superficial laminar, lo que permite inferir que estos materiales han sido depositados

por procesos de remoción en masa del tipo caídas de rocas o flujos de detritos no canalizados. Por lo mismo, los mantos coluviales se concentran particularmente en la parte alta de la ladera cataclinal, donde los procesos de denudación han meteorizado las rocas afloradas, generando un importante aporte de material detrítico grueso disponible para ser movilizado en masa.



**Figura N°33.** Mantos coluviales. Los mantos coluviales que se disponen sobre la ladera cataclinal, cubriendo el suelo y la vegetación de gramíneas o de pequeños matorrales. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 20 de febrero de 2018.

*b) Depósitos de barro:*

Son los depósitos que menor influencia tienen sobre el área de estudio, cubriendo solamente 0,2 hectáreas, los que se distribuyen en la base de pequeños corredores de flujos (ver Figura N°34). Debido a que el área de estudio presenta solo un par de éste tipo de depósitos, con apariencias muy recientes y con un predominio de la granulometría fina, comparado con los otros depósitos, es posible inferir que fueron desencadenados por eventos pluviométricos más intensos de lo normal que activaron corredores de flujo efímeros, erosionando el suelo y/o transportando el material más fino hasta la terraza fluvial.

Estos depósitos se ubican en la parte norte del área de estudio, bajo la ladera residual, lo que explica una mayor preponderancia de materiales finos si se compara con los de la ladera de influencia estructural. Dado que estos materiales se incorporan a un alto contenido de agua, la masa transportada actúa como un fluido que, al llegar a la terraza, donde pierde abruptamente pendiente, se dispersa horizontalmente, acumulándose en forma de pequeños lóbulos de material bien

compactado, indicando así, velocidades lentas a moderadas en el momento de su depositación.



**Figura N°34.** Depósitos de barro. Fuente: Registro propio en trabajo de campo, 22 de febrero de 2018.

### **4.3. EVALUCIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCION EN MASA**

Como se mencionó en el capítulo 3, para la aplicación de la metodología de evaluación de susceptibilidad de ocurrencia de remociones en masa, se seleccionaron 7 factores a considerar. A continuación se realiza la descripción de los resultados para cada uno de éstos, indicando la reclasificación y el porcentaje de píxeles y pesos finales ( $C_w$ ) para cada clase. Para mayor detalle de los cálculos de peso revisar Anexo N°2.

#### **4.3.1. Método del Peso de la Evidencia: Selección de Factores Condicionantes**

##### **4.3.1.1. Altura**

La altura fue reclasificada en 5 clases en orden ascendente y considerando que el desnivel altitudinal del área de estudio es de 1.200 metros aproximadamente (ver Figura N°35).

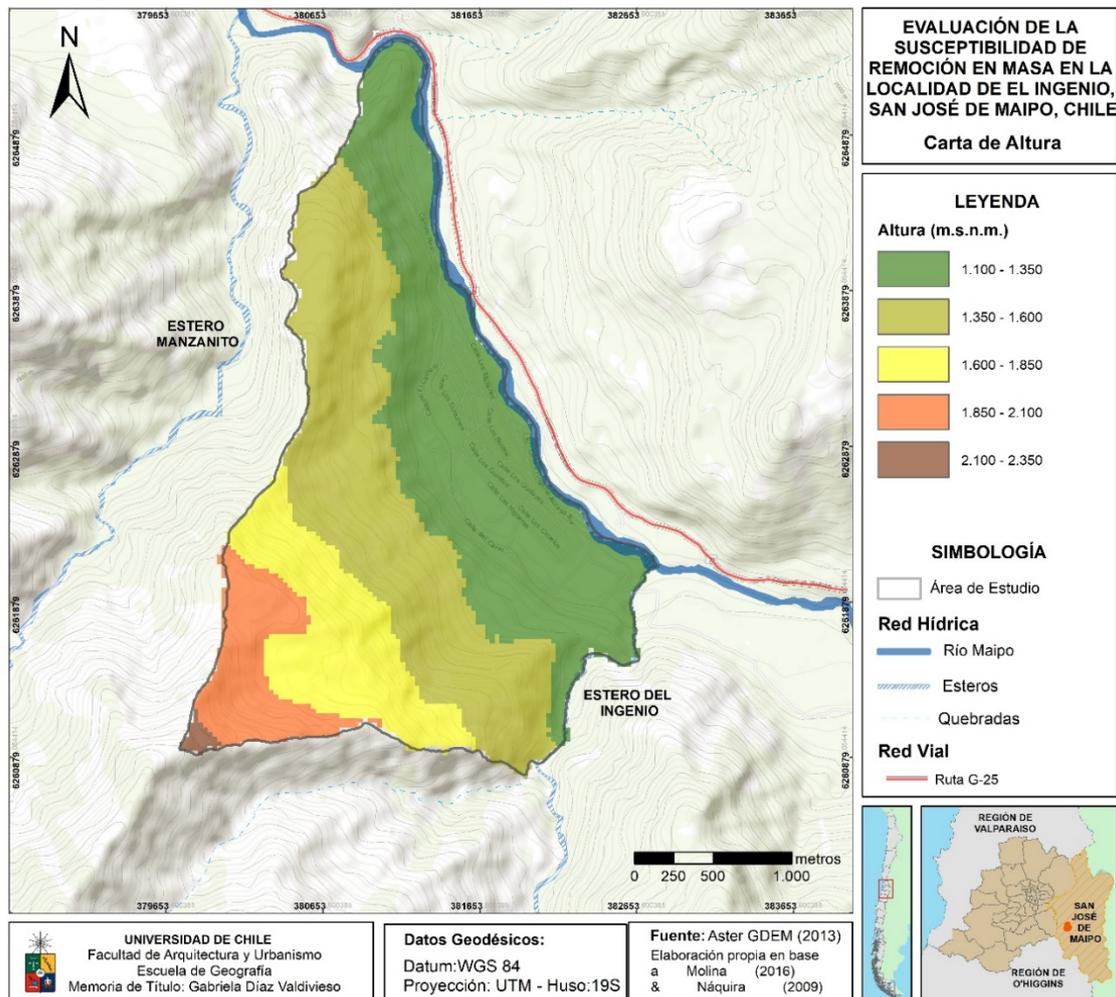


Figura N°35. Mapa Factor Altura. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la Tabla N°11, las alturas más abundantes van entre los 1.100 – 1.350 m.s.n.m., con más del 40% de la superficie total. Sin embargo, las remociones en masa se concentran principalmente entre los 1.350 – 1.600 m.s.n.m., lo que corresponde a la segunda clase, tanto en orden altitudinal ascendente, como en extensión superficial.

Tabla N°11. Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor Altura

Factor	Clases	Píxel/Clase	%	Píxel con RM/Clase	%	Cw
Altura (m.s.n.m.)	1.100-1.350	3118	41,03	270	21,60	-1,0770970
	1.350-1.600	2650	34,87	602	48,16	0,6665750
	1.600-1.850	1137	14,96	238	19,04	0,3553168
	1.850-2.100	655	8,62	140	11,20	0,3576167
	2.100-2.350	39	0,51	0	0,00	-0,0061114
	<b>TOTAL</b>	<b>7599</b>	<b>100</b>	<b>1250</b>	<b>100</b>	

Fuente: elaboración propia.

Luego de las dos primeras clases, a medida que se asciende en altura, se disminuye en áreas totales y en porcentaje de remociones para cada clase, lo que puede deberse a que la forma del área de estudio disminuye horizontalmente a medida que aumenta la altura, cubriendo, por ende, menor superficie.

Finalmente, el peso de la evidencia ( $C_w$ ) de este factor demuestra que no hay una relación directa entre aumento de altura con aumento de remociones en masa; tampoco lo hay entre la extensión superficial de cada clase con la ocurrencia de remociones en masa. Se puede afirmar lo anterior, debido a que la primera clase (de mayor % de superficie y de menor altura) es la que menor incidencia tiene para activar remociones en masa (en verde), en tanto que la clase que le sigue en altura es la que más favorece (en amarillo) las remociones en masa de acuerdo al peso final.

#### 4.3.1.2. Curvatura

El factor se ha reclasificado en cóncavo, plano y convexo, siendo la clase plana poco significativa, dada su baja concentración en el catastro de remociones y en el área total de estudio. La Figura N° 36 muestra la distribución espacial de las clases de este factor.

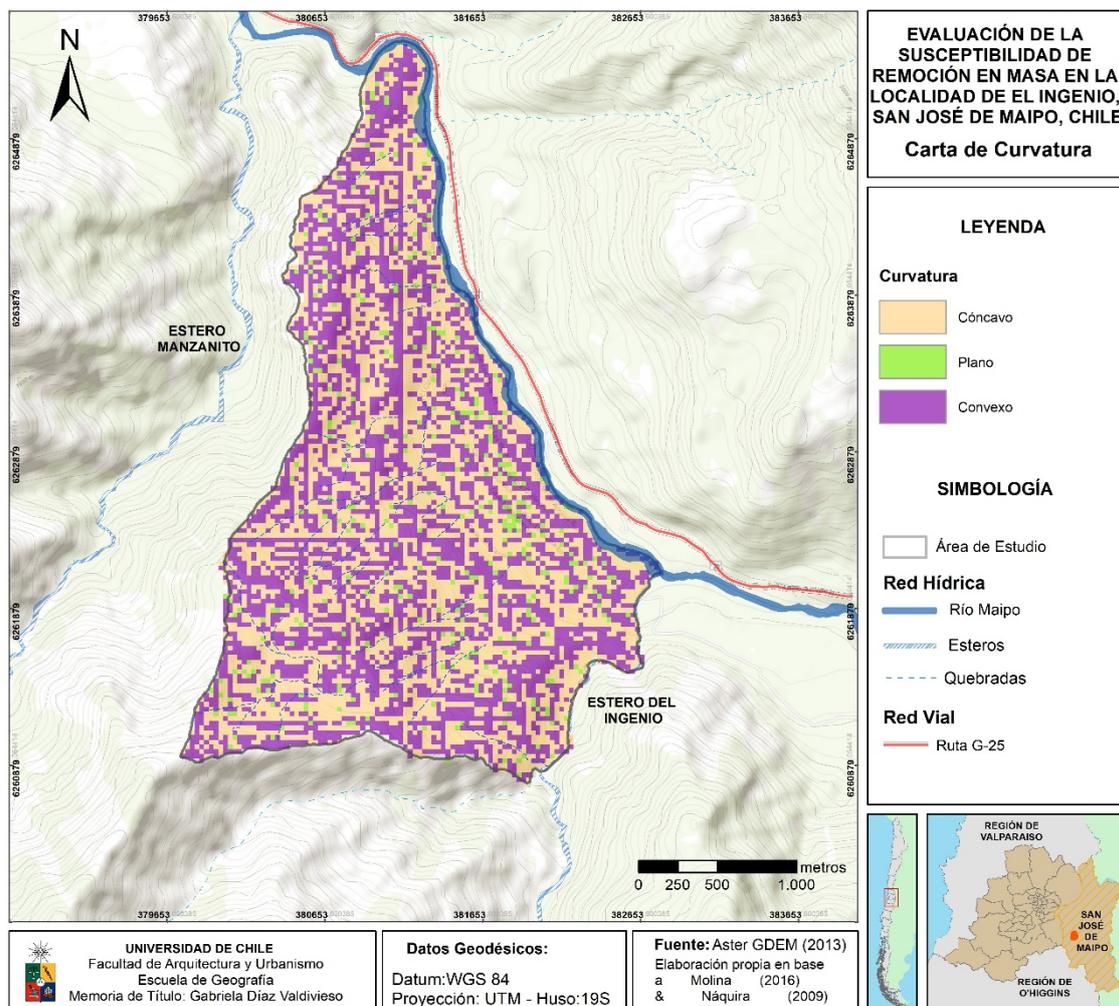


Figura N°36. Mapa Factor Curvatura. Fuente: elaboración propia.

La curvatura de las laderas condiciona la ocurrencia de remociones en masa, toda vez que las zonas cóncavas tienden a concentrar la red de drenaje; mientras que las zonas convexas las dispersan, siendo las primeras más susceptibles a los movimientos de masas. La evidencia de los pesos finales ( $C_w$ ) de la Tabla N°12 demuestran ese supuesto, dado que el mayor peso se ubica en laderas cóncavas, mientras que, y a pesar del bajo porcentaje de píxeles, la curvatura plana es la de menor peso y por ende menos susceptibles a las remociones. La preponderancia de la clase cóncava se hace más evidente si se considera que el porcentaje de píxeles con remociones en masa es mayor que el porcentaje total de esta clase.

**Tabla N°12.** Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor Curvatura

Factor	Clases	Píxel/Clase	%	Píxel con RM/Clase	%	$C_w$
Curvatura	Cóncavo	3669	48,28	663	52,70	0,228228
	Plano	339	4,46	44	3,50	-0,2882579
	Convexo	3591	47,26	551	43,80	-0,1503283
	<b>TOTAL</b>	<b>7599</b>	100	<b>1258</b>	100	

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.1.3. Distancia a fallas

La Figura N°37. Mapa Factor Distancia a fallas presenta la distribución de las 7 clases en las que se reclasificó el factor, donde se puede ver que la extensión espacial de las clases va incrementando a medida que se aleja de alguna falla. Es por ello que los pesos finales de las dos clases más cercanas, es decir, a menos de 100 metros de alguna falla, muestran una relación inversa a la ocurrencia de remociones (ver Tabla N°13).

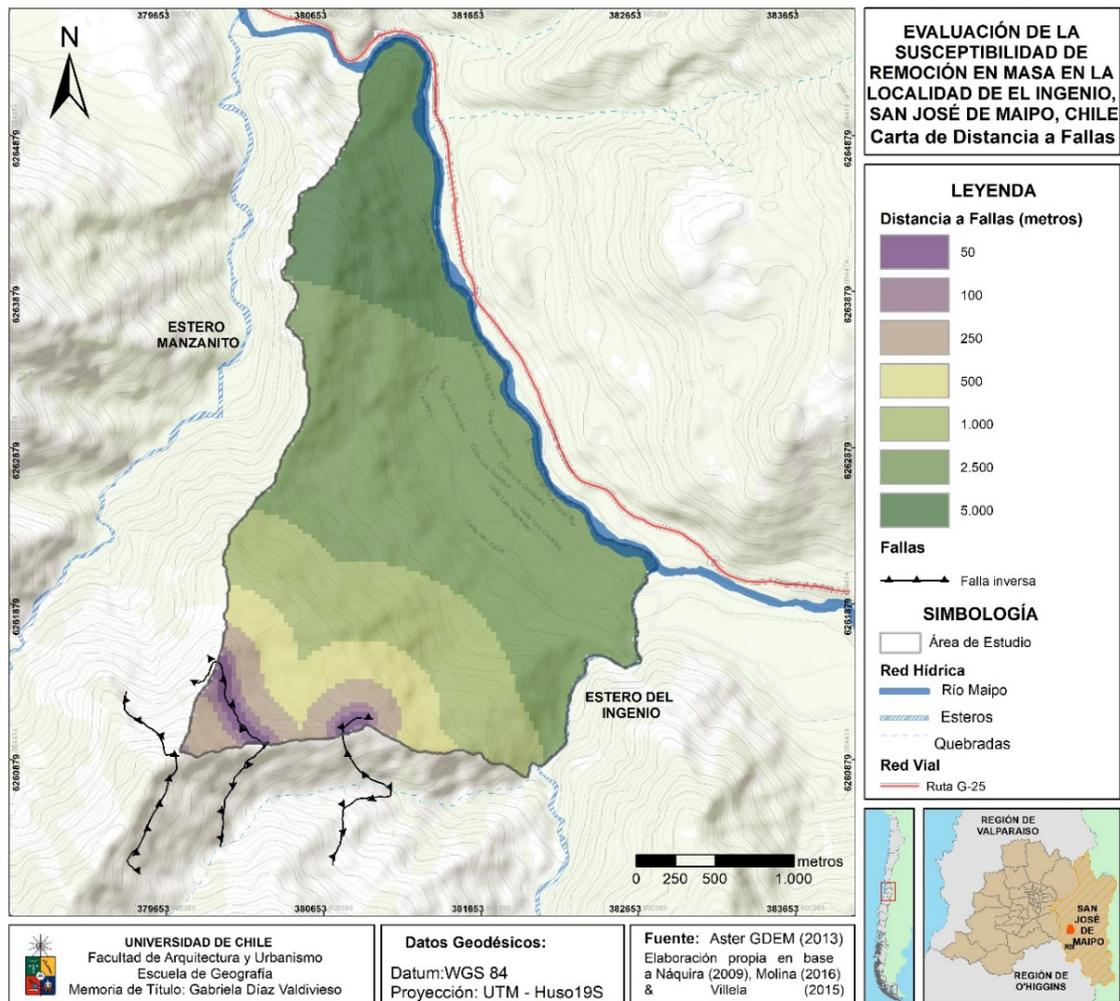


Figura N°37. Mapa Factor Distancia a fallas. Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, considerando que la clase que tiene una relación más directa (verde) con la ocurrencia de remociones en masa - 250 metros- sólo representa el 4,82% del área total, y que el porcentaje de remociones casi dobla esta cifra, se puede inferir que los resultados de los pesos negativos de las primeras clases se deban a la reducida extensión espacial de éstas.

Tabla N°13. Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor distancia a fallas

Factor	Clases	Píxel/Clase	%	Píxel con RM/Clase	%	Cw
Distancia a Fallas (m)	50	96	1,25	14	1,11	-0,1432365
	100	107	1,40	15	1,19	-0,1900932
	250	369	4,82	108	8,59	0,7918044
	500	590	7,70	147	11,69	0,5754375
	1000	1392	18,17	267	21,24	0,2329108
	2500	3744	48,88	528	42,00	-0,3350032
	5000	1362	17,78	178	14,16	-0,3208343
	<b>TOTAL</b>	<b>7660</b>	<b>100</b>	<b>1257</b>	<b>100</b>	

Fuente: elaboración propia.

En este sentido, la tabla N°13, muestra que los resultados de  $C_w$  de las clases más alejadas son las que mayor extensión espacial tienen en el área de estudio, sin embargo, sus pesos negativos dejan ver que a medida que se aleja de una falla, la susceptibilidad de remociones disminuye, como habría de esperarse, si se considera que el efecto sísmico y la propagación de ondas asociados a este factor, favorecen la inestabilidad de las laderas y por tanto aumentan la susceptibilidad de remociones.

#### 4.3.1.4. Distancia a red de drenaje

Este factor se reclasificó en 7 clases, considerando que la distancia máxima no supera los 500 metros, y el mínimo se determinó en 25 metros debido a consideraciones metodológicas afines con el tamaño del píxel (ver Figura N°38).

De acuerdo a los pesos de la evidencia de la Tabla N°14, el factor distancia a red de drenaje es muy condicionante a la ocurrencia de remociones en masa, pero su influencia es limitada espacialmente, ya que como es de esperarse, la clase más cercana -25 metros- presenta el valor  $C_w$  más alto del factor; sin embargo, debido a que son escurrimientos canalizados, a medida que se alejan, éstos pierden fuertemente su incidencia en los procesos de remoción; de allí que las clases que le siguen en distancia -entre los 50 y los 300 metros- tienen pesos negativos, en tanto que si bien la de 400 metros es positiva, es muy cercana a cero.

Lo anterior demuestra que el escurrimiento afecta al terreno bajo y circundante al drenaje, ya que ello implica erosión del sustrato rocoso o del suelo por el que escurre el canal; o bien una erosión lateral, incidiendo en la inestabilidad de la ladera de las zonas más próximas a dichos canales, haciéndolas propensas a las remociones en masa.

Si bien, los pesos negativos se observan en las clases más alejadas, su valor no es inverso a la distancia, como habría de esperarse. Así el valor de  $C_w$  tiende a disminuir hasta la tercera clase, en donde tiene su valor más bajo, y luego comienza nuevamente a aumentar, lo que podría indicar un comportamiento aleatorio, relacionado más bien con la extensión de área de las clases. En este sentido, llama la atención el valor de  $C_w$  de la clase de 500 metros, ya que su alto peso indica condiciones muy favorables para procesos de ladera, pero podría explicarse porque su reducido porcentaje de píxeles totales se asocia a un alto porcentaje de remociones en masa, lo que podría deberse a que parte de esta clase se ubica en la zona del escarpe de la vertiente residual, en donde el brusco cambio de pendiente propende al arranque de procesos de flujo.

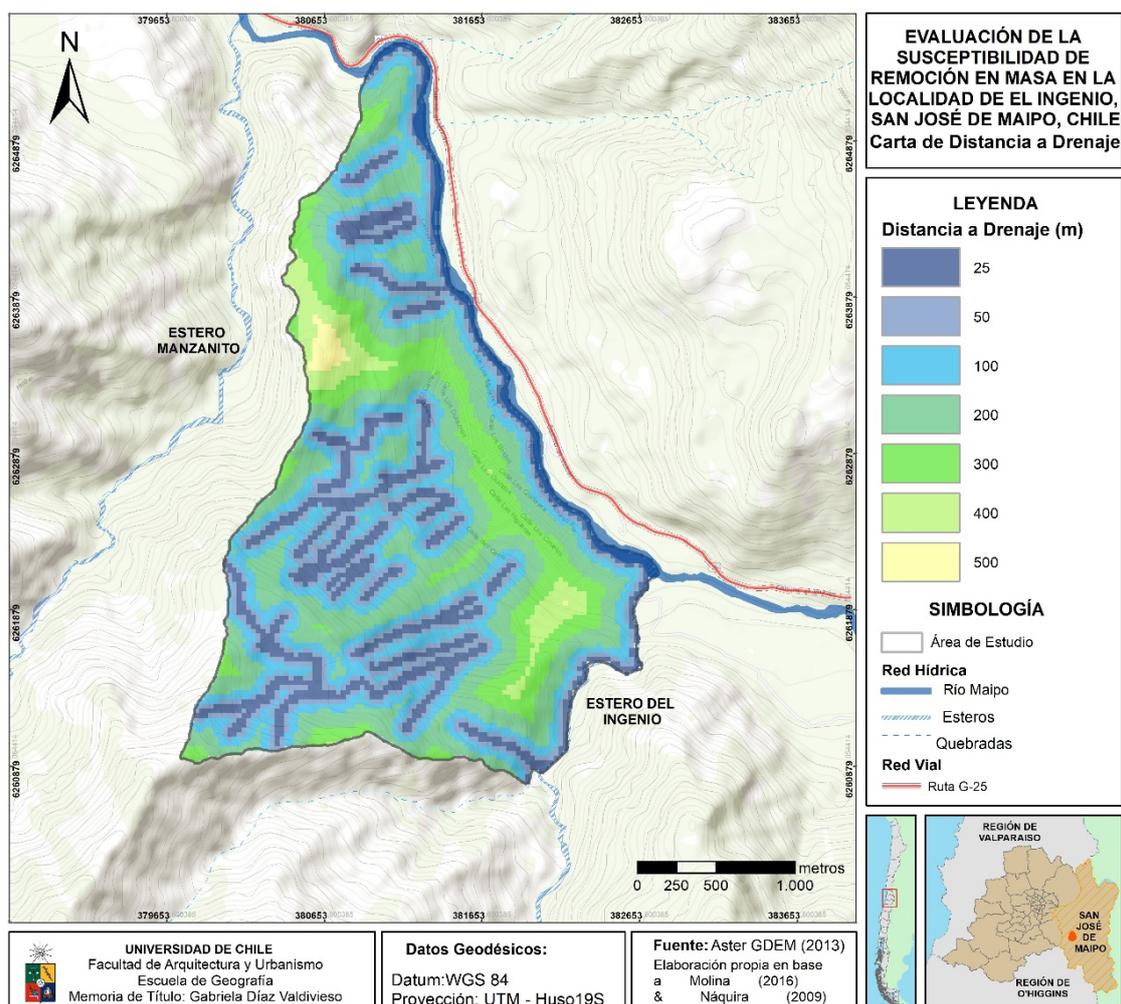


Figura N°38. Mapa Factor Distancia a red de drenaje. Fuente: elaboración propia.

Tabla N°14. Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor distancia a drenaje

Factor	Clases	Píxel/Clase	%	Píxel con RM/Clase	%	Cw
Distancia a red de drenaje (m)	25	1295	16,91	657	52,27	2,2883017
	50	1088	14,20	117	9,31	-0,5569945
	100	1749	22,83	135	10,74	-1,0321859
	200	2130	27,81	171	13,60	-1,0317623
	300	1026	13,39	87	6,92	-0,8398040
	400	310	4,05	61	4,85	0,2295447
	500	62	0,81	29	2,31	1,5150595
	<b>TOTAL</b>		<b>7660</b>	<b>100</b>	<b>1257</b>	<b>100</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.1.5. Exposición

Como se evidencia en la cartografía y en la tabla resumen (ver Figura N°39 y Tabla N°15), las laderas se distribuyen en orden decreciente en Este, Norte, Sur, Oeste y Plano, concentrándose en las dos primeras más del 90% de los pixeles totales y también de remociones en masa.

En este sentido, hay una concordancia también entre la distribución de las laderas y los pesos finales  $C_w$ , dado que es la ladera de exposición Este la que mayor incidencia tiene en la susceptibilidad de remociones en masa, en tanto que la ladera oeste es la que menos favorece su ocurrencia, debido a que los relieves planos (que es el de menor cantidad de pixel) son poco propensos a este tipo de procesos que deben su movimiento a los efectos gravitatorios, lo que explica que no sea esta clase la de menor  $C_w$ .

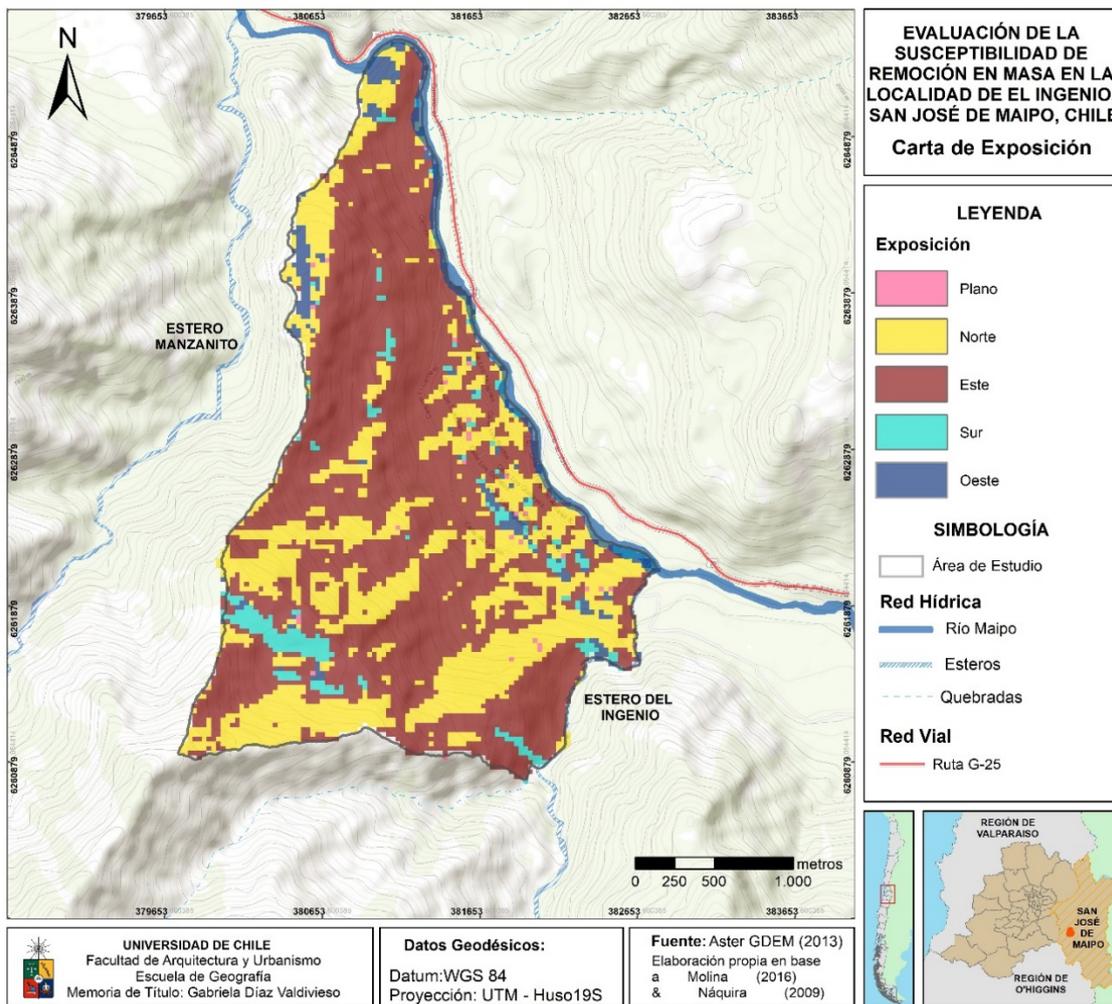


Figura N°39. Mapa de Factor Exposición. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la amplia variación del peso de la evidencia, se puede inferir que la orientación de las laderas influye fuertemente la susceptibilidad del terreno para la ocurrencia de remociones en masa.

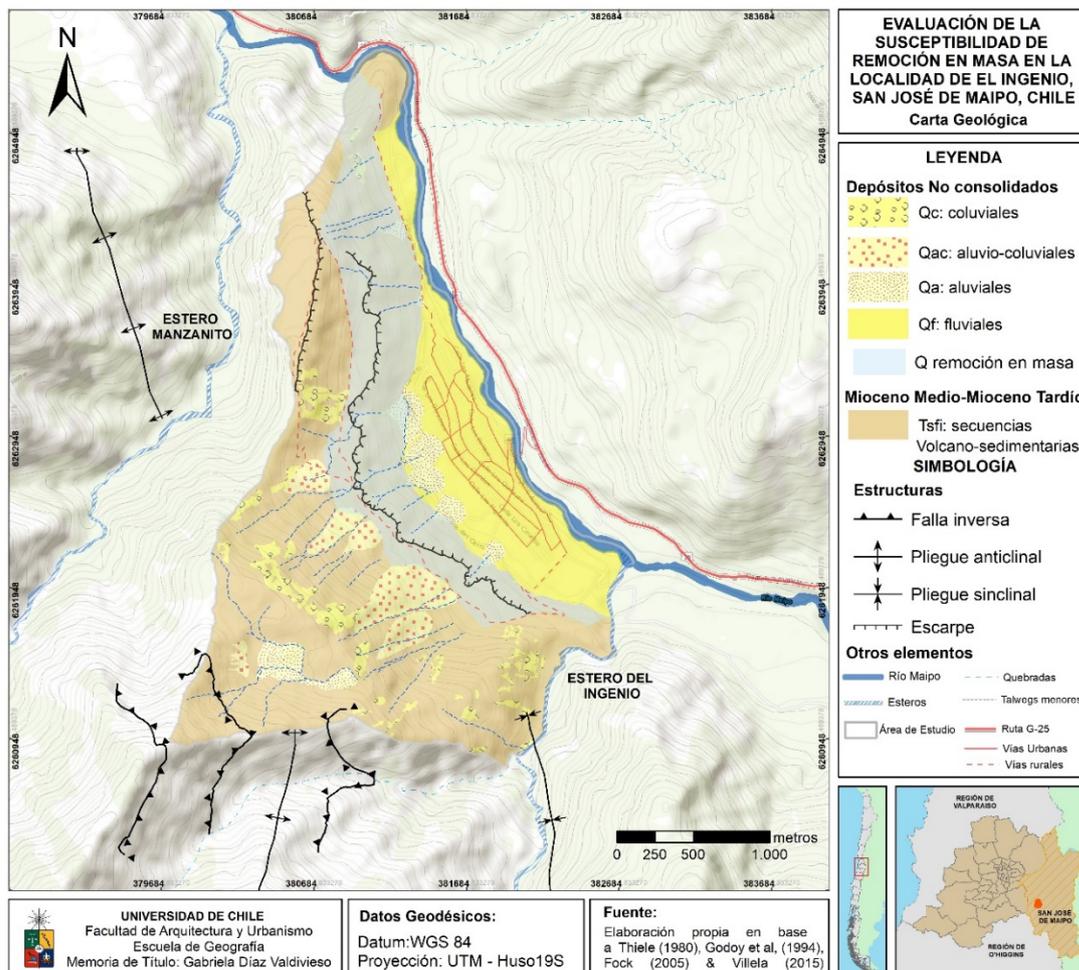
**Tabla N°15.** Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor Exposición

Factor	Clases	Píxel/Clase	%	Píxel con RM/Clase	%	Cw
Exposición	Norte	2362	31,08	217	17,25	-0,8838097
	Este	4656	61,27	969	77,03	0,8999941
	Sur	298	3,92	65	5,17	0,3654144
	Oeste	252	3,32	6	0,48	-2,1218480
	Plano	31	0,41	1	0,08	-1,7789641
	<b>TOTAL</b>		<b>7599</b>	<b>100</b>	<b>1258</b>	<b>100</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.1.6. Geología

Como se mencionó en la sección 4.2, la geología del área de estudio se compone de la Fm. Farellones inferior y de depósitos no consolidados de diverso origen, los que han sido espacializados en detalle para este análisis en la carta geológica (ver Figura N°40).



**Figura N°40.** Mapa Factor Geología. Fuente: elaboración propia.

La Tabla N°16 evidencia una gran variación del Cw, donde la Fm. Farellones es la unidad de mayor extensión del área de estudio, a la vez que es la que más favorece la ocurrencia de remociones, debido a que se trata de rocas que tienden a la disgregación y regolitización. Luego, destacan los depósitos de remoción en masa, ya que son los segundos con mayor extensión en el área de estudio y si bien no presentan los mayores

pesos del factor, su valor positivo indica la potencial susceptibilidad a los procesos de ladera. En tanto, los depósitos fluviales son los terceros con mayor extensión, sin embargo, son muy poco susceptibles a remociones, lo que puede deberse a la relativa horizontalidad y al mayor grado de compactación de sus depósitos, condiciones que los hacen menos inestables que los otros depósitos no consolidados.

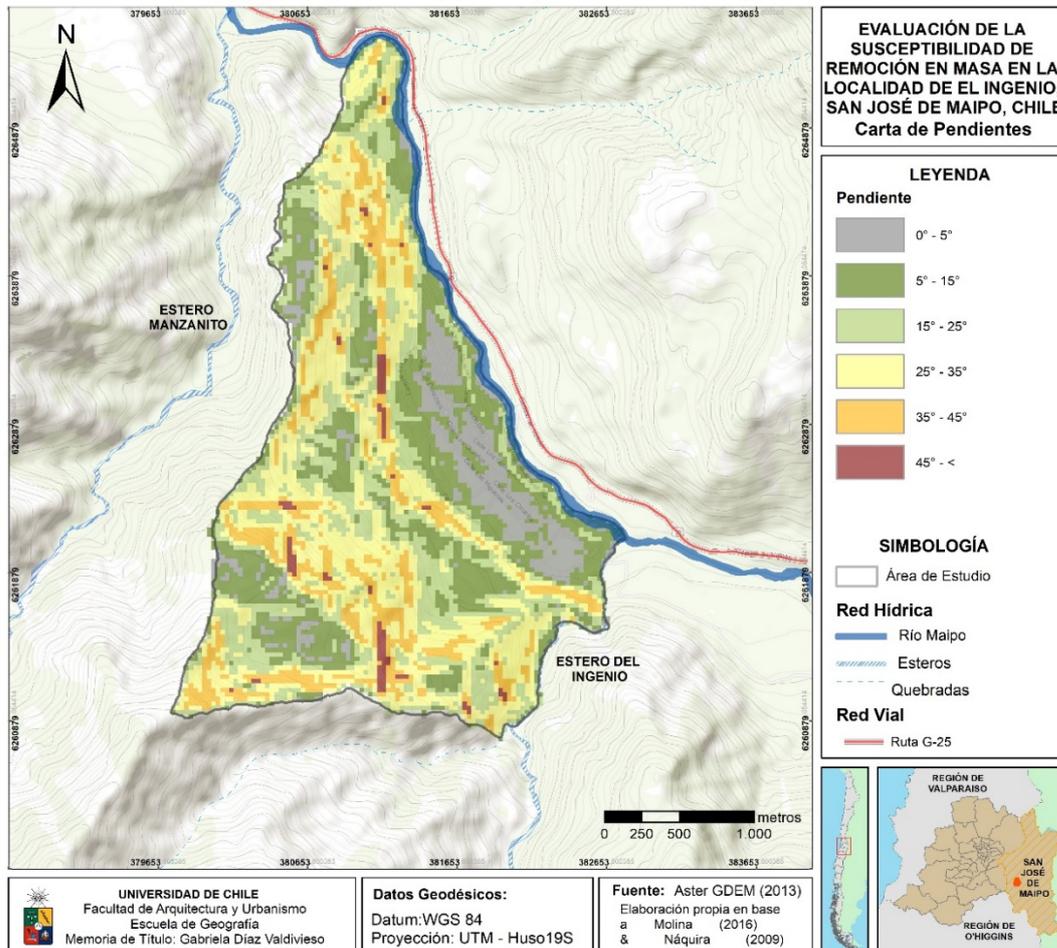
**Tabla N°16.** Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor Geología

Factor	Clases	Píxel/Clase	%	Píxel con RM/Clase	%	Cw
Geología	Qa	274	3,63	10	4,46	0,2778418
	Qac	400	5,30	78	6,13	0,2036209
	Qc	314	4,16	21	1,03	-1,5538106
	Qf	1313	17,40	1081	0,72	-3,5704586
	Qrm	1816	24,06		26,89	0,2008141
	Tsfi	3430	45,45	67	60,78	0,7711786
	<b>TOTAL</b>		<b>7547</b>	<b>100</b>	<b>1257</b>	<b>100</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.1.7. Pendiente

Este factor se reclasificó en 7 clases según el grado de pendiente (ver Figura N°41).



**Figura N°41.** Mapa Factor Pendiente. Fuente: elaboración propia.

La tendencia de la Tabla N°17 demuestra el comportamiento esperable para el factor de pendiente, ya que las pendientes más bajas presentan valores negativos, mientras que de la tercera clase en adelante los valores son positivos, lo que define que son pendientes que favorecen la inestabilidad de laderas.

En el detalle de los valores  $C_w$  se observa que la clase de menor pendiente es también la de menor peso en relación a la susceptibilidad de remociones, y junto con la clase que le sigue, que llega a los 15° de pendiente, son las dos únicas que presentan valores negativos, representando así pendientes propensas a la estabilidad.

**Tabla N°17.** Resumen de distribución de Píxel/clases para el Factor Pendiente

Factor	Clases	Píxel/Clase	%	Píxel con RM/Clase	%	$C_w$
Pendiente	0°-5°	801	10,54	15	1,19	-2,4517970
	5°-15°	1867	24,57	159	12,64	-0,9234123
	15°-25°	1766	23,24	309	24,56	0,0986745
	25°-35°	2057	27,07	513	40,78	0,7715948
	35°-45°	998	13,13	241	19,16	0,5681868
	45° y +	110	1,45	21	1,67	0,1848415
	<b>TOTAL</b>	<b>7599</b>	<b>100</b>	<b>1258</b>	<b>100</b>	

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, la tendencia sería esperar que a medida que se aumenta en pendiente, también se aumente en el valor del peso, lo que no ocurre, ya que como se destaca en verde, el mayor  $C_w$  aparece en la cuarta clase que corresponde a pendientes entre los 25°-35° y luego tiende nuevamente a disminuir. Ello puede producirse, como se infiere para otros factores, porque la condición de inestabilidad se adquiere desde cierta pendiente en adelante, y luego de ella cualquier rango es susceptible a su ocurrencia, por lo que la diferencia de pesos para estas clases se puede deber a la conjugación de éste más los otros factores.

#### 4.3.2. Índice del Éxito

Como se menciona en la sección 3.5, la obtención de los pesos finales permite generar una nueva capa ráster mediante la suma de los valores  $C_w$ , con la cual a través de una reclasificación se obtiene el Mapa de Susceptibilidad. Para ello se han determinado 3 rangos de susceptibilidad: alta, media, baja.

A continuación, se presenta la curva del índice de éxito que reconoce, mediante las frecuencias acumuladas de los pesos y de las remociones en masa, el comportamiento que tienen estas variables. En base a esta curva, se puede comprobar si los resultados obtenidos permiten predecir la susceptibilidad de remociones en masa para el área de estudio, determinando qué tan apropiadamente se ha ejecutado el modelo aplicado.

En base a la forma y valores de la curva se concluye que el método ha funcionado, ya que como se ha planteado en la metodología, la gran mayoría de las remociones en masa debiesen concentrarse entre las clases media y alta, como ocurre con la Figura N°42.

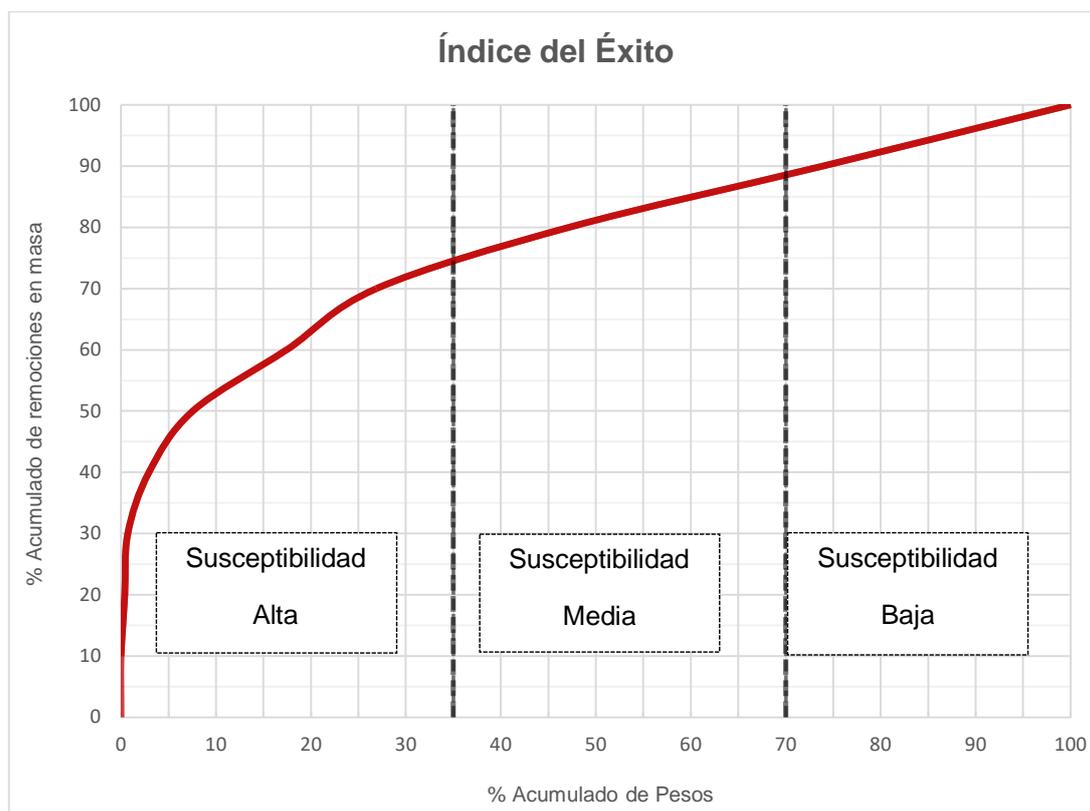


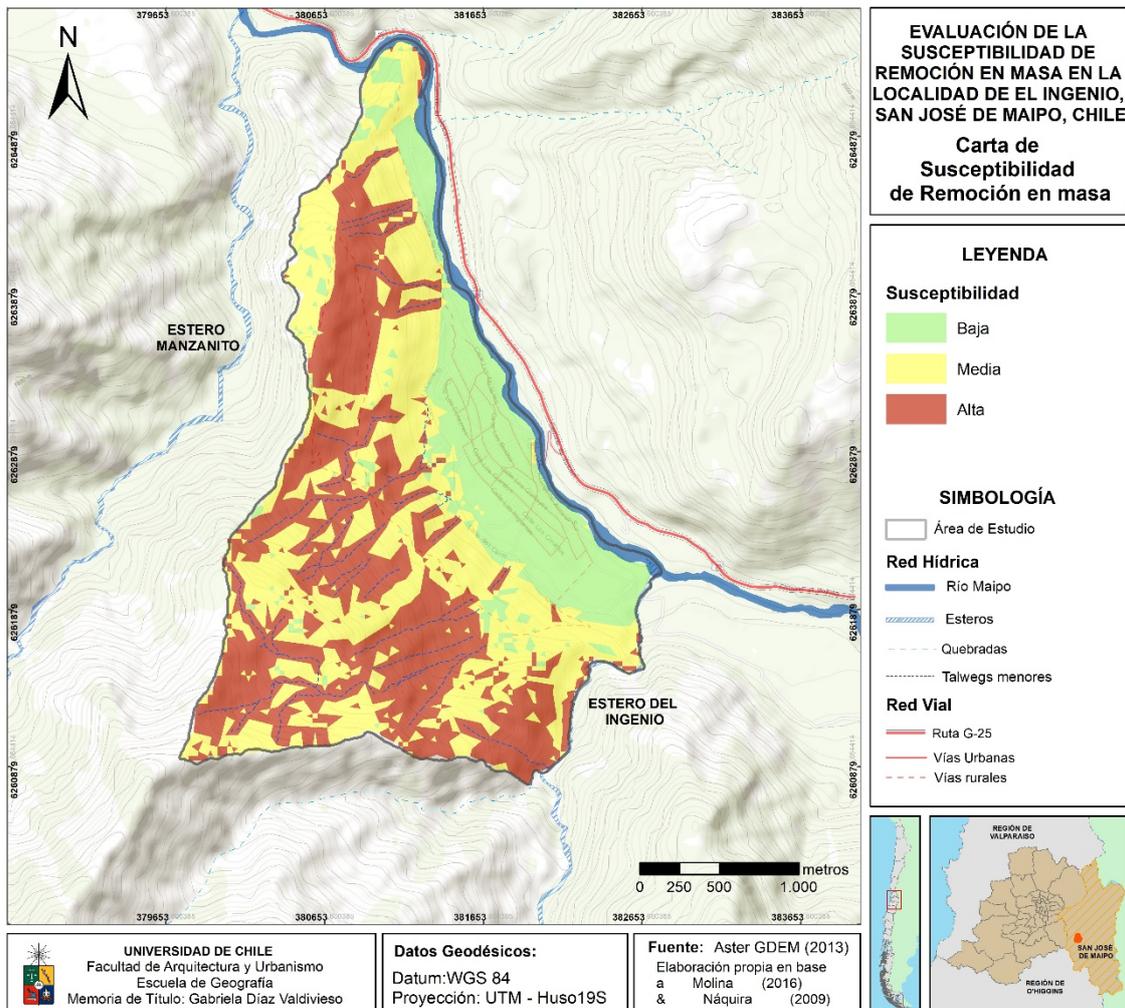
Figura N°42. Curva índice del éxito. Fuente: elaboración propia.

En este caso, para determinar las clases alta, media y baja se tomaron como valores de referencia los porcentajes utilizados en el trabajo de MOLINA (2016), con adaptaciones acorde a los resultados obtenidos en la curva, quedando los siguientes rangos:

- a) *Susceptibilidad Alta*: abarca entre el 0% y el 35% de los pesos acumulados. Este rango concentra casi el 75% acumulado de las remociones en masa catastradas.
- b) *Susceptibilidad Media*: abarca entre el 35% y el 70% de los pesos acumulados. Este rango abarca casi el 15% de las remociones acumuladas del inventario.
- c) *Susceptibilidad Baja*: abarca entre el 70% y el 100% de los pesos acumulados. Este rango supera levemente el 10% de las remociones en masa acumuladas catastradas en el inventario.

### 4.3.3. Análisis de susceptibilidad

La ratificación del método de la evidencia indica que es viable espacializar y definir las 3 clases de susceptibilidad antes mencionadas, lo cual es presentado en la Carta de Susceptibilidad de remoción en masa representada en la Figura N°43.



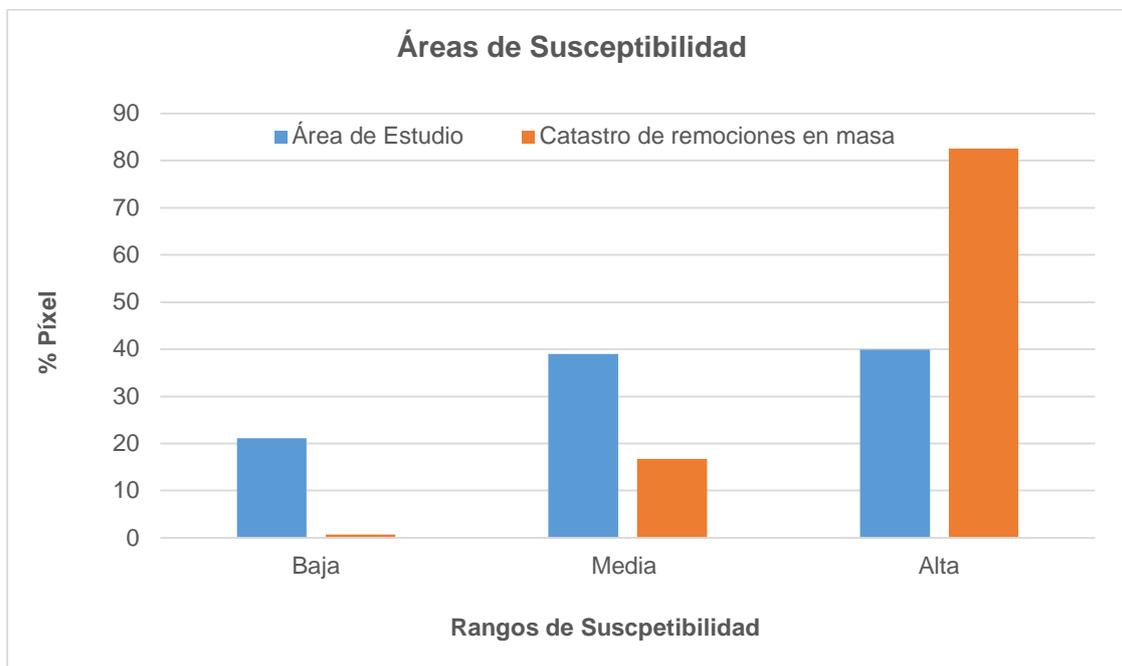
**Figura N°43.** Carta de Susceptibilidad de remoción en masa del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

La carta de susceptibilidad hace evidente que la baja susceptibilidad se concentra principalmente en la zona de menor altura del área de estudio, donde se sitúa la terraza fluvial. Ello se explica por la conjunción de varios factores, que han sido resumidos mediante el cálculo de conteo de pixel y pesos en el Anexo N°3.

Entre los factores que influyen en que la zona de la terraza fluvial sea predominantemente de baja susceptibilidad, destaca la geología que allí tiene un peso negativo importante, de hecho, el menor peso de todas las Clase/Factor. También condiciones de baja altura, baja pendiente y una significativa distancia a fallas son las clases de factores que presentan valores de pesos de contraste negativos, indicando que el comportamiento de estos factores allí no favorece a la ocurrencia de remociones

en masa, lo que significa que sus clases no afectan negativamente la estabilidad de las laderas.

Sin embargo, la distribución espacial de las zonas de media y alta susceptibilidad es más compleja por lo que su análisis se apoya en los datos estadísticos que se sintetizan en la Figura N°44, donde se comparan la cantidad de píxeles totales para el área de estudio versus la cantidad de píxeles con evidencias de remoción en masa.



**Figura N°44.** Número de píxeles en Mapa de Susceptibilidad. Fuente: elaboración propia.

La distribución de píxeles del área de estudio para la clase media y alta es relativamente similar, cercana al 40%. Sin embargo, hay una marcada diferencia en cuanto a la concentración de remociones en masa en cada una de estas categorías, ya que en la clase de susceptibilidad media sólo se sitúa el 17% de las remociones catastradas, mientras que en la categoría de alta susceptibilidad este valor llega a 83%, siendo evidente su mayor condición de inestabilidad.

Respecto de la espacialización de los rangos, la carta de susceptibilidad muestra una mayor concentración de zonas de media susceptibilidad en la zona adyacente superior de la terraza fluvial, en donde se ubican los conos de origen aluvial, área que por lo demás presenta una pendiente moderada, y se encuentra bastante alejada de fallas. Lo mismo ocurre en las zonas de plateau también tienden a concentrar una mediana susceptibilidad.

En tanto, que a medida que se aumenta en altura, también aumenta la concentración de áreas con alta susceptibilidad. En esta misma dirección, aumenta la exposición de laderas norte, la distancia a fallas es menor, al igual que la red de drenaje, la cual además es más contigua que en zonas más bajas; también la pendiente en términos generales tiende a aumentar su grado, a excepción de las áreas endorreicas colmatadas

que son relativamente llanas. Con todo ello, es posible inferir que son clases/factores que en esta zona favorecen la inestabilidad y por ende la ocurrencia de remociones.

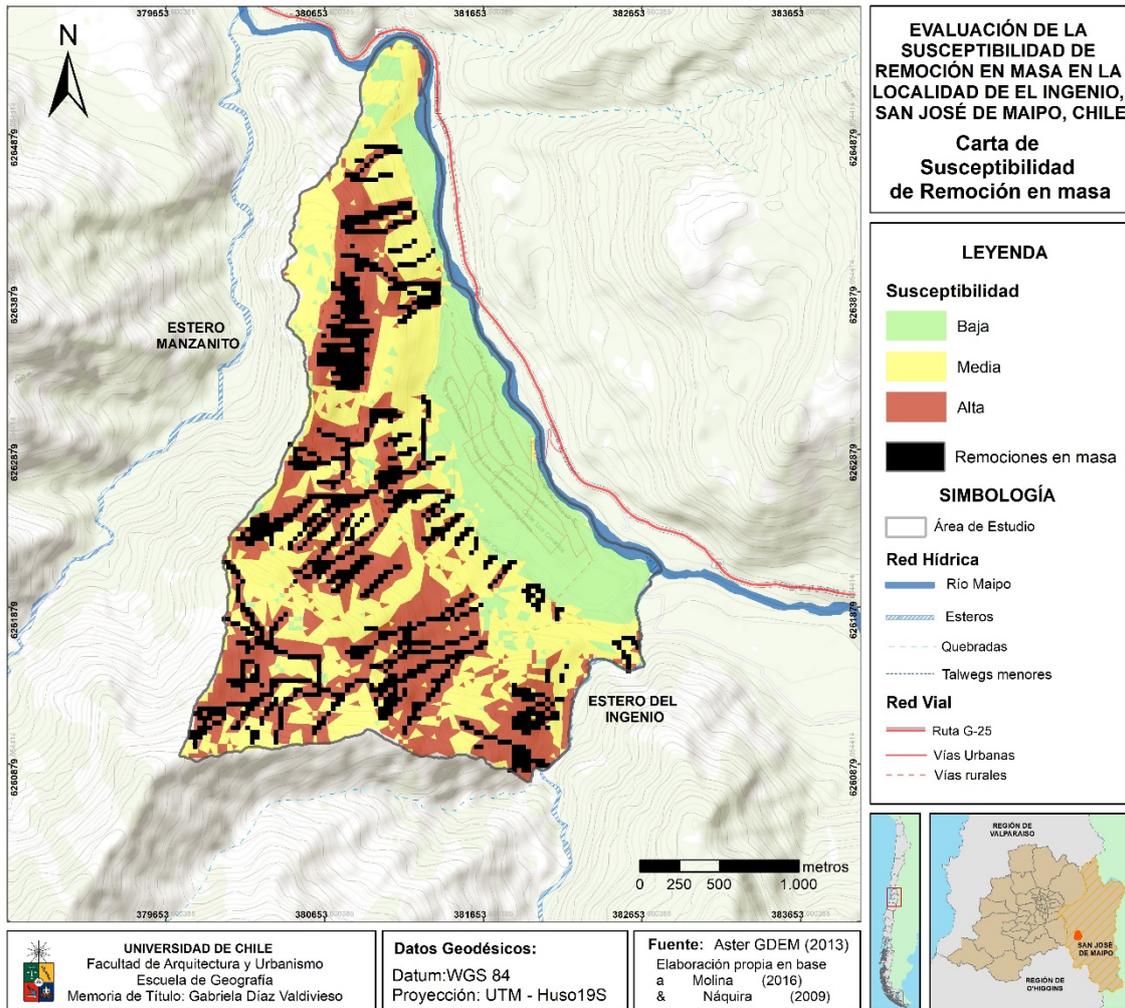


Figura N°45. Mapa de Susceptibilidad con catastro de remociones en masa. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se presenta la Figura N°45, ya que de ella se desprende que las zonas de alta susceptibilidad son áreas de influencia que condicionan la inestabilidad de las laderas más allá del alcance que tienen las remociones catastradas, ya que como se observa en la cartografía, el registro de remociones en masa coincide con las zonas de alta susceptibilidad, pero además éstas superan la superficie de su extensión, lo que indica que los factores condicionantes a la inestabilidad de las laderas tienen un dominio mayor al que se ha ejercido hasta entonces en ellas, constituyéndose así como potenciales zonas para nuevos procesos, o bien para la reactivación de otros antiguos.

## **CAPITULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

---

### **5.1. DISCUSIÓN**

Las remociones en masa son procesos que ocurren cuando las condiciones geotécnicas del terreno superan los umbrales de resistencia de los materiales, provocando el movimiento descendente de éstos SEPULVEDA, 1998; (HAUSER, 2000). Sin embargo, su generación se debe a múltiples factores que se conjugan en un lugar y momento determinado para desestabilizar las laderas; factores entre los que se cuentan la geología, la geomorfología, la hidrología y red de drenaje, el clima y vegetación, y los factores de origen antrópico (LARA, 2007; MOLINA, 2016).

Considerando entonces que las remociones en masa se definen como procesos gravitacionales en que un volumen de roca, suelo o ambos es movilizado hacia niveles inferiores (VARNES, 1978; CRUDEN & VARNES, 1996), los ambientes de montaña propios de la cordillera de los Andes suelen ser más susceptibles a los movimientos de masa, ya que, en estos paisajes, la interacción de los agentes modeladores que configuran un relieve abrupto producto del dominio estructural. Sumado a esto, se tiene que las condiciones morfoclimáticas de altura van formando unidades de alta energía en donde los procesos de denudación operan con mayor rapidez e intensidad, generando laderas altamente dinámicas y expuestas a los procesos de laderas que resultan en remociones en masa (MERGILI *et al.*, 2014).

Particularmente en la zona andina de Chile central, en donde se circunscribe el área de estudio, la combinación del carácter morfológico, geológico, tectónico y geomecánico del relieve resulta propicio para el desarrollo de remociones en masa, debido a que la Fm. Farellones, conformada por rocas volcánicas rígidas y resistentes, se apoya sobre la Fm. Abanico, integrada por rocas menos resistentes y susceptibles a deformaciones plásticas, provocando esfuerzos tensionales en las rocas de menor resistencia; estas condiciones acentúan los procesos de desintegración superficial y favorecen el desarrollo de remociones en masa (HAUSER, 2000).

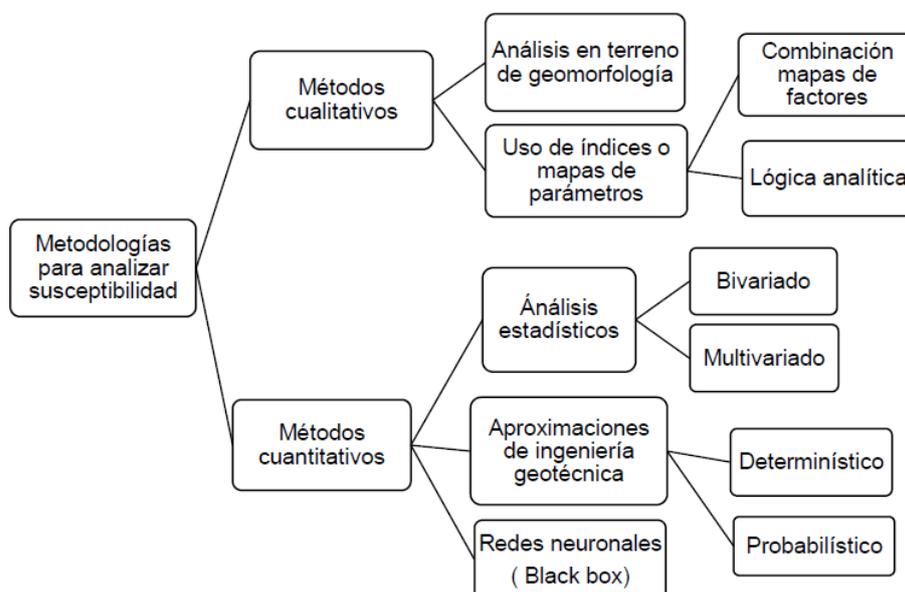
En base a lo anterior, las laderas de ambientes de montaña, que son geodinámicamente muy activas, representan desde la perspectiva del riesgo, amenazas naturales de alto riesgo, sobre todo en zonas donde el crecimiento urbano ha expandido los asentamientos hacia las zonas montañosas que rodean los valles, como sucede en la región Metropolitana de Santiago (LARA & SEPULVEDA, 2008); zonas que en muchos casos presentan numerosas evidencias de remociones en masa pasadas, resultando ser áreas proclives a reactivaciones, aumentando con ello el riesgo (HAUSER A. , 2000; MENDOZA & ARISTIZABAL, 2017).

No obstante aquello, éste tipo de amenazas, a diferencia de otro tipo de amenazas naturales que están fuera de la intervención humana, admiten cierto manejo mediante la intervención de los factores que condicionan la inestabilidad de las laderas, pudiendo reducir así los impactos y pérdidas de población e infraestructuras expuestas (HAUSER, 2000). Parte de ello, implica, realizar estudios que permitan evaluar tales condiciones y faciliten la comprensión de la geodinámica de una zona dada, de manera de poder predecir su comportamiento a futuro, tarea que se realiza mediante metodologías de evaluación de susceptibilidad.

La susceptibilidad se define como la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada o de generar un proceso geológico determinado (SCHACHTER, 2008). Su evaluación se hace aplicando métodos que permiten determinar la estabilidad del terreno en una zona de estudio en base a la asignación de pesos de los factores que intervienen en ello, para lo cual existen metodologías tanto cualitativas, como cuantitativas (ver Figura N°46), lo que supone una primera dificultad en cuanto a la elección del método, ya que la capacidad de predicción y éxito de éstos depende del carácter del estudio, de acuerdo a los conocimientos del evaluador, la información disponible y la escala espacial en la que se apliquen los modelos.

Así, por una parte, los métodos cualitativos o heurísticos se caracterizan por requerir del criterio de un experto, quien determina de manera subjetiva en base a sus conocimientos geomorfológicos, fotointerpretación y observaciones en terreno, el grado en que los factores condicionantes intervienen, estableciendo parámetros cualitativos de susceptibilidad. En tanto, en los métodos cuantitativos se hacen análisis a través de modelos matemáticos o estadísticos que permiten cuantificar la susceptibilidad, asignando valores de pesos a los factores condicionantes, o bien, evaluando las condiciones geotécnicas del terreno que permiten determinar un factor de seguridad.

Figura N° 46. Metodologías de evaluación de susceptibilidad



Fuente: ALEOTTI Y CHOWDHURY (1999) en MOLINA (2016).

En cuanto a las escalas de trabajo, los métodos bivariados y multivariados poseen en común que la escala de trabajo recomendada debe ser en torno al 1: 25.000, mientras que los métodos heurísticos se recomiendan para trabajos de escala regional (1:50.000 a 1:100.000). Los métodos determinísticos, como las evaluaciones geotécnicas, tienen su aplicabilidad a escalas locales que no superen 1:10.000 (SOETERS & VAN WESTEN, 1996; NÁQUIRA, 2009).

De acuerdo a lo planteado anteriormente, es que en este trabajo se escogió la metodología de tipo estadística bivariada, en la que se compara estadísticamente la distribución espacial de remociones registradas en un inventario con los factores condicionantes de inestabilidad, asignándoles un peso calculado matemáticamente.

Una de las principales ventajas de los métodos estadísticos es que éstos son capaces de relacionar distintas variables con la evidencia de remociones en masa y, a partir de esto, predecir futuros eventos (SCHACHTER, 2008). Para este caso el modelo aplicado es una adaptación de los trabajos de NÁQUIRA (2009) y MOLINA (2016), quienes emplearon el método denominado *Peso de la evidencia*, en el que la asignación de los pesos se hace de acuerdo a la presencia/ausencia de remociones en masa y sus densidades para cada uno de los factores seleccionados, estableciendo con ello parámetros probabilísticos de ocurrencia de remociones en masa. La elección de este método se basa en su aplicabilidad para la escala de trabajo, que en el caso del área de estudio corresponde a 1:25.000, asegurando con ello que los resultados obtenidos sean efectivos en la predicción del comportamiento de susceptibilidad, lo que en este caso funcionó considerando la validación que permite el método de la curva índice del éxito.

A su vez, la elección de la escala de trabajo estuvo determinada por la resolución de la información geoespacial. Ello representa, otra dificultad si se considera que los recursos disponibles para esta investigación limitaron el acceso a imágenes satelitales de alta resolución o la posibilidad de obtener curvas de nivel de equidistancia menor a las disponibles en esta zona, que corresponden a las elaboradas por el Instituto Geográfico Militar, de 50 metros de equidistancia. Si bien existen curvas de nivel de 5 metros para la comuna de San José de Maipo, éstas sólo abarcan las localidades más cercanas al Gran Santiago, debido a que fueron elaboradas para estudios urbanos pertenecientes al Gobierno Regional Metropolitano de Santiago.

Lo anterior condicionó que se trabajara con modelos digitales de elevación (*DEM*) obtenidas del sensor remoto *Aster* que tienen una resolución espacial 30x30 metros, de donde se obtuvieron los parámetros de pendiente, exposición, altura y curvatura. De acuerdo a la resolución espacial del *DEM*, se debió haber trabajado a una escala de 1:30.000, sin embargo, para esta investigación se redefinió la escala en 1:25.000, lo que posiblemente generó ciertas distorsiones espaciales, reconociéndose esto como una limitante en el trabajo de evaluación de susceptibilidad de ocurrencia de remociones en masa para la localidad de El Ingenio.

La limitante antes descrita puede ser compensada con el trabajo de campo que se realizó, ya que la metodología aplicada para el levantamiento de información consistió en recorrer a pie sistemáticamente toda la zona de estudio, identificando a detalle la geomorfología del lugar con mediciones *gps* y métricas; además de un registro de todos los tipos de remociones en masa, tanto de sus formas erosivas, como las de depositación; así también aquellas que abarcan pequeñas extensiones hasta las que alcanzan los centenares de metros. Dicho trabajo se tradujo en un inventario de remociones en masa sumamente detallado de información, lo cual resulta fundamental para la metodología del peso de la evidencia. Sin embargo, por las limitaciones de los conocimientos, no fue posible aplicar una metodología que evaluara el estado de las remociones en masa; si bien, las evidencias geomorfológicas permiten establecer que se trata de procesos modernos y hasta actuales, se requiere de conocimientos en geotecnia para establecer si las condiciones de las remociones en masa catastradas corresponden a procesos inactivos, suspendidos, latentes, abandonados, estabilizados o relictos como se propone en los trabajos de GEMMA (2007).

Otro desafío que se presenta en las metodologías de susceptibilidad es la selección de los factores condicionantes a considerar y la determinación del número de clases en que cada uno de estos parámetros son divididos, ya que ello representa el comportamiento geodinámico del relieve, variando fuertemente la preponderancia de unos por sobre otros de acuerdo a la zona morfoclimática en la que se apliquen estos métodos.

Si bien, existe un consenso entre los autores sobre los factores condicionantes a la estabilidad de las laderas, en donde regularmente se cuentan la geología, geomorfología, red de drenaje, clima y vegetación y actividad antrópica (CAMPOS, 2014; HAUSER A., 2000; MOLINA, 2016; LARA, 2007; NÁQUIRA, 2009; SCHACHTER, 2008), por ejemplo para la geomorfología se define en base a diversos parámetros, como curvatura, exposición, pendiente, etc.; lo mismo ocurre con la hidrología, en donde se puede tomar la distancia a la red de drenaje, así como también su densidad (NÁQUIRA, 2009). El factor vegetación también es tratado de diferentes maneras, ya que para ciertos autores éste parámetro se expresa en variables como la exposición y altura (MOLINA, 2016; NÁQUIRA, 2009), mientras que para otros son incluidos como una capa sola de análisis (SANCHEZ, 2014). En este caso, la variable vegetación no se incorporó, debido a que no se pudieron obtener capas de información vegetal detallada para la zona de estudio, y porque además su presencia en el área de estudio, como se evidenció en el trabajo de campo, es escasa y las zonas en donde concentra más notoriamente corresponden a cultivos de frutales ubicados en zonas planas, y por tanto poco propensos a los procesos de remoción en masa.

Finalmente, cabe reflexionar sobre los alcances de este estudio en relación a los objetivos de la gestión del riesgo. En este sentido, el presente trabajo se ha enfocado en la identificación de la amenaza, lo cual implica evaluar la morfodinámica del paisaje heredado. Sin embargo, ello es una primera aproximación hacia la reducción del riesgo de desastres, ya que como se ha mencionado en otras secciones de esta memoria, el riesgo es una construcción social que no se entiende si no existe población, infraestructura o bienes materiales que estén expuestos a sufrir los daños o pérdidas por la ocurrencia de algún evento natural; por ende, además intervienen los aspectos sociales e individuales, tales como la percepción (YAMIN *et al.*, 2013). Con todo, estos nuevos paradigmas del riesgo de desastres han posicionado el análisis y la evaluación de las dimensiones sociales como procesos clave para comprender los factores de riesgo subyacentes en un territorio, expresado en las particularidades locales, la percepción social del riesgo, las condiciones de vulnerabilidad y las capacidades de resiliencia de la población. Por tanto, queda abierta la posibilidad de extender los estudios hacia la evaluación de la exposición y la determinación de la vulnerabilidad social, comprendiendo que son éstos los factores que determinan que una amenaza natural se concrete en un desastre, lo cual puede ser evitado si la gestión del riesgo se enfoca en aumentar las capacidades sociales, además de las medidas preventivas o de mitigación frente a amenazas (CASTRO *et al.*, 2015).

En este sentido, el terremoto en la zona central de Chile el año 2010 y los aluviones en la zona norte el año 2015, revelaron la exposición del territorio a múltiples amenazas, pero sobre todo fueron eventos que demostraron que es la vulnerabilidad, en sus diversas dimensiones, la que condicionó los resultados en cada territorio; eventos tras los cuales se hizo patente la complejidad y relevancia del riesgo, demostrando que se

requiere una mejor comprensión de los factores involucrados en la ecuación de riesgo para tener la capacidad de afrontar eventos futuros en mejores condiciones.

Ello implica, catastrar sistemáticamente por un lado, las condiciones sociales, residenciales y económicas de la población asentada en la localidad de El Ingenio, considerando distribución etaria, niveles de educación, tasas de ocupación/desempleo, población prevalente, etc., ya que todo ello permite evaluar no sólo la exposición física, si no también, las fragilidades sociales que determinan los niveles de vulnerabilidad, y que en definitiva hacen que los impactos de una amenaza se transformen – o no- en desastres.

Así también, considerar el funcionamiento de los medios de abastecimiento permitirían planificar las emergencias y organizar a la comunidad de manera tal que ésta cuente con una mayor capacidad de respuesta ante eventos de diversa índole, que incluso pueden tener su origen fuera de los procesos naturales, y por sobre todo que les permita superar los reveses pos eventos, aumentando con ello la resiliencia de la comunidad local. De este modo, es fundamental que toda comunidad sea un agente activo en toda la línea de gestión del riesgo, por lo tanto, se deben incluir etapas de difusión respecto de los riesgos a los que se encuentran expuestos, de manera que sean ellos mismos quienes puedan identificar cualquier signo de potencial desencadenamiento, tales como pueden ser las remociones en masa.

Si además se considera el contexto de cambio climático, considerado como un amplificador del riesgo de eventos extremos (CASTRO *et al.*, 2008; IPCC, 2012), entonces se manifiesta la necesidad de desarrollar nuevas estrategias de mitigación y adaptación orientadas al aumento de la resiliencia de la población que vive en territorios específicos.

En esta línea, la gestión integral del riesgo de desastres debe incluir un enfoque prospectivo, evitando la construcción de riesgos; un enfoque correctivo, que trate los riesgos existentes; y un enfoque compensatorio, de transferencia del riesgo y el fortalecimiento de la capacidad de recuperación (CASTRO, 2017). Es en este contexto que el ordenamiento territorial y la planificación urbana deben hacerse parte de los procesos de reducción del riesgo de desastres, integrando estos enfoques en los procesos de actualización de los planes reguladores y los planes de desarrollo territorial, ya que las evidencias demuestran que los modos de expansión urbana tienden a aumentar el riesgo si es que no hay una visión integral que concilie los diferentes usos del suelo con adecuadas zonificaciones que respeten las geodinámicas particulares de los territorios. Ello, ya implica un desafío en sí mismo, debido a las dificultades que implica encontrar modelos adecuados de medición del riesgo para cada territorio en particular, porque como se expuso anteriormente, esto significa evaluar las condiciones física-naturales, como también las de carácter social, demográfica, económicas y ecológicas, lo que en definitiva impone una dificultad a los proceso de toma de decisiones que aseguren un ordenamiento territorial, primero correctivo y luego preventivo en la tarea de la reducción del riesgo (YAMIN *et al.*, 2013; CASTRO, 2017).

## **5.2. CONCLUSIONES**

Respecto de la caracterización geomorfológica, el área de estudio presenta un predominio de laderas conformes y en menor medida laderas inversas. Debido a que el sistema de laderas se encuentra fuertemente influenciado por el dominio estructural, éstas se caracterizan por tener afloramientos rocosos que determinan que los procesos de remoción en masa tengan una importante componente de bloques y detritos.

En las laderas predomina material no consolidado, recubriendo al sustrato rocoso (Formación Inferior). Corresponden a formas acumulativas de diferente origen morfogénico, las cuales se clasificaron de acuerdo al tipo de material y a los procesos que lo depositaron. Entre éstas se identificó una terraza generada por remoción en masa, de edad pleistocena, que se extiende a una altura media del sistema de vertientes.

Otras formas acumulativas, son las formas de contacto de base, tales como los conos aluvio-coluviales que predominan en la parte alta de la ladera y que se caracterizan por tener material más grosero que los conos aluviales que predominan en el contacto con la terraza fluvial.

Las formas fluviales conforman el nivel de terraza pleistocena, cuya dinámica actual está asociada a la erosión lateral del río.

En relación al inventario de remoción en masa se evidencia que éstos son procesos actuales, incluso al momento del catastro. Se identificaron caídas de bloques y/o de detritos, deslizamientos de suelo y roca, y flujos de detritos, aunque hacia la zona norte algunos de ellos son de barro.

Respecto de la evaluación de susceptibilidad de ocurrencia de remociones en masa, ésta se clasificó en alta, media y baja. De acuerdo al modelo aplicado, se pudo concluir que los factores más determinantes, por sus valores extremos, son la geología, la distancia a red de drenaje y la pendiente.

La baja susceptibilidad se concentra principalmente en la zona de menor pendiente, correspondiente a la terraza fluvial. La susceptibilidad alta y media se distribuyen en las laderas inversas y conformes principalmente. Los conos aluvio-coluviales tienden a una alta susceptibilidad, mientras que los conos aluviales son de mediana susceptibilidad.

La evaluación de susceptibilidad ha evidenciado que el área de estudio presenta una alta condición dinámica que se refleja en numerosos eventos de remoción en masa. Dado que se trata de un sistema de laderas donde este tipo de procesos son recurrentes, las remociones en masa representan una amenaza latente para el asentamiento urbano de El Ingenio, lo cual debe ser un factor a considerar en la planificación urbana que promueva la reducción del riesgo de desastres.

## BIBLIOGRAFÍA

---

AGUIRRE, R. (1999). *Deposición y deformación de la secuencia volcánica terciaria en el sector cordillerano de Pata del Diablo, Cajón del Maipo*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.

ALEOTTI, P., & CHOWDHURY, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*(58), 21-44.

ALVAREZ, M. (2006). *Factibilidad de utilización de técnicas geofísicas en estudios de fenómenos de remoción en masa. Caso: deslizamiento de San José de Maipo*. Memoria para optar al título profesional de Geólogo, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago.

ANTINAO, J., & GOSSE, J. (2009). Large rockslides in the Southern Central Andes of Chile (32–34.5°S): Tectonic control. *Geomorphology*, 104, 117–133.

ARAYA VERGARA, J. (1985). Análisis de la Carta Geomorfológica de la Cuenca del Río Mapocho. *Informaciones Geográficas*, 32, 31-47.

ARRIAGADA, C., & VARGAS, G. (2015). *Geología del Valle del río Yeso*. Apuntes Curso Geología de Campo II (GL-6101), Santiago de Chile.

BLAIKIE, P., CANNON, T., DAVID, I., & WISNER, B. (1996). *Vulnerabilidad: el entorno social, político y económico de los desastres*. La RED, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina .

CAMPOS, F. (2014). *Evaluación de la Susceptibilidad de remociones en masa en la Quebrada de Los Chanchos, Región Metropolitana, Chile*. Memoria para optar al título profesional de Geóloga, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago.

CARDONA, O. (2001). *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'enginyers de camins, canals i ports, Barcelona.

CARDONA, O. (2005). *Indicadores de riesgo de desastre y de Gestión de riesgos: Informe Resumido*. Banco Interamericano de Desarrollo , Washigton D.C.

CASTRO, C. (2017). REDER, una revista para avanzar en la reducción del riesgo de desastres y el mejoramiento del bienestar humano. *REDER*, 1(1), 1-5.

CASTRO, C., IBARRA, I., LUKAS, M., ORTIZ, J., & SARMIENTO, J. P. (2015). Disaster risk construction in the progressive consolidation of informal settlements: Iquique and Puerto Montt (Chile) case studies. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 13, 109-127.

CASTRO, C., ORTÍZ, J., DELGADO, J., JIMÉNEZ, V., QUIROGA, S., SOSA, E., . . . SARMIENTO, J. (2008). Aproximación Metodológica a una Articulación entre Gestión del Riesgo, Gestión Ambiental y Ordenamiento Territorial. *Geograficando*, 4(4), 159-177.

CASTRO, C., SOTO, M., & CHAVEZ, C. (2003). Aporte moderno de masa y su implicancia en la definición de niveles de riesgo natural. (U. d.-B. Departamento de Ciencias Sociales, Ed.) *Tiempo y Espacio*, 13.

CHARDON, A., & GONZÁLEZ, J. (2002). *Indicadores para la Gestión de Riesgos*. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, Instituto de Estudios Ambientales. Manizales: Banco Interamericano de Desarrollo.

CHARRIER, R., BUSTAMANTE, M., COMTE, D., ELGUETA, E., FLYNN, J., ITURRA, I., . . . WYSS, A. (2002). The Abanico extensional basin: regional extension, chronology of tectonic inversion and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch für Geologie Und Palaontologie-Abhandlungen*, 236(1-2), 43-77.

CHUNG, C., & FABRI, A. (1999). Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(12), 1389–1399.

COPONS, R. (2007). Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocosos al Solà d'Andorra la Vella. *Monografies del CENMA*, 213.

CRUDEN, D. (1991). A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*(43), 27-29.

CRUDEN, D. M., & D.J., V. (1996). Landslide types and processes. *En Landslides: Investigation and Mitigation*. (K. Turner, & R. Schuster, Edits.) Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press.

DI CASTRI, F. &. (1976). *Bioclimatología de Chile*. Santiago: Universidad Católica de Chile.

DIRECCIÓN METEREOLÓGICA DE CHILE. (2001). *Climatología Regional*. Departamento de Climatología y Meteorología.

DIRECCIÓN METEREOLÓGICA DE CHILE. (2017). Reportes Meteorológicos. Temperaturas Medias Mensuales. Estación Pirque, cuenca río Maipo. Santiago. Recuperado el 26 de diciembre de 2017, de < <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>>

DIRECCIÓN METEREOLÓGICA DE CHILE. (2017). Reportes Meteorológicos. Temperaturas Medias Mensuales. Estación Pirque, cuenca río Maipo. Santiago. Recuperado el 26 de diciembre de 2017, de <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>

DOUGLAS, I. (1977). *Humis Landforms*. Cambridge: The MIT Press.

FARÍAS, M., COMTE, D., CHARRIER, R., MARTINOD, J., DAVID, C., TASSARA, A., . . . FOCK, A. (2010). Crustal scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building. *Tectonics*, 29(3).

FERNÁNDEZ, R. (2006). *Evaluación Espacial de procesos erosivos y su Influencia sobre el Corredor de Comercio Las Leñas Vi Región del Libertador Gral. Bernardo O'higgins*. Memoria para optar al título profesional de Geógrafo, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Santiago.

FOCK, A. (2005). *Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S*. Tesis para optar al grado de Magister en

Ciencias. Mención Geología, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.

FOCK, A., CHARRIER, R., FARIAS, M., & MUÑOZ, M. (2006). Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile Central: Inversión de la cuenca de Abanico (33°-34°S). *Asociación Geológica Argentina, Publicación Especial N°6*, 48-55.

GELLERT DE PINTO, G. I. (2012). El cambio de paradigma: de la atención de desastres a la gestión del riesgo. *Boletín Científico Sapiens Research*, 2(1), 13-17.

GLASSER, R., & ESPINOZA, P. (2017). Juntos, reducimos los riesgos climáticos y de desastres. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), ONU*. Obtenido de [En línea] revisado en <<http://newsroom.unfccc.int/es/accion-climatica/juntos-reducimos-los-riesgos-Climaticos-y-de-desastres/>>

GODOY, E., LARA, L., & UGALDE, I. (1994). Derrumbes de cerro holocenos en los Andes. *Congreso Geológico Chileno*, 1, págs. 310-314. Concepción.

GONZÁLEZ, P. (2010). *Geología y Geomorfología del Complejo de Remoción en Masa La Engorda, Chile Central*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago de Chile.

GRUPO DE ESTÁNDARES PARA MOVIMIENTOS EN MASA (GEMMA). (2007). *Movimientos en masa en la región Andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Canadá: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional N°4.

GUTIERREZ, M. (2008). *Geomorfología*. Madrid, España: Pearson Educación S.A.

HAUSER, A. (1993). *Remociones en masa en Chile*. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.

HAUSER, A. (2000). *Remociones en masa en Chile*. Santiago, Chile: Boletín N°59. Servicio Nacional de Geología y Minería.

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

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

IBARRA, I. (2013). *Geomorfología aplicada en la evaluación y análisis de amenazas naturales en la zona sur de la Comuna de Pichilemu: Sectores de Punta Lobos – Cahuil - Estero Nilahue. VI Región Chile*. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Santiago.

ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE SAN JOSÉ DE MAIPO. (2010). *Plan de Desarrollo Comunal San José de Maipo 2010 – 2014. Tomo I: Caracterización y Diagnóstico Técnico Comunal*. Santiago: PAC Consultores.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE). (2002). *Censo Nacional de Población y de Vivienda*. Base de Datos REDATAM, Chile.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE). (2017). *Censo Nacional de Población y de Vivienda*. Chile.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor y P.M. Midgley. Cambridge y Nueva York: Cambridge University Press.

KEEFER, D., & JOHNSON, A. (1983). *Earthflows: morphology, mobilization and movement*. USGS Professional Paper 1264.

KLOHN, C. (1960). *Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, Colchagua y Curicó* (Vol. Boletín N°8). Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas.

LARA, M. (2007). *Metodología para la Evaluación y Zonificación de Peligro de Remociones en Masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana*. Tesis para optar al Grado de Magister en Ciencias. Mención Geóloga, Universidad De Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago de Chile.

LARA, M., & SEPULVEDA, S. (2008). *Remociones en Masa. Apuntes del Curso GL62C*. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.

LAVELL. (2007). *Apuntes para una reflexión institucional en países de la Subregión Andina sobre el enfoque de la Gestión del Riesgo*. PREDECAN, Proyecto de Apoyo a la Prevención de Desastres en La Comunidad Andina.

LAVELL, A. (2002). *Sobre la Gestión del Riesgo: Apuntes hacia una Definición*. (L. RED, Ed.) Recuperado el 14 de marzo de 2018, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/riesgo-apuntes.pdf>

LLORENS, R., & TALLADA, A. (2009). Movimientos de Laderas. Landslides. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 284-294.

MANSILLA, E. (2000). *Riesgo y ciudad*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad De Arquitectura, División de estudios de postgrado.

MENDOZA, J., & ARISTIZABAL, E. (2017). Metodología para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos lineales. Estudio de caso en el acueducto del municipio de Fredonia, Antioquia. *Ingeniería y Ciencia*, 13(26), 173-206.

MERGILI, M., MARCHANT, C., & MOREIRAS, S. (2014). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 113-131.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP) & DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). (2003). *Evaluación de los recursos Hídricos superficiales en la cuenca del río Maipo*. Informe Técnico, Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Santiago.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP) & DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). (2004). *Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Maipo*. Santiago: CADE-IDEPE Consultores.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP) & DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). (2009). *Estrategia Nacional de Glaciares. Fundamentos*. Santiago: Centro de Estudios Científicos CECS.

MOLINA, C. (2016). *Análisis de Susceptibilidad de remociones en masa en las Costas del Fiordo Comau, X Región, Chile*. Memoria para optar al título profesional de Geóloga, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago.

NÁQUIRA, M. (2009). *Susceptibilidad de remociones en masa en las costas de fiordos cercanos a Hornopirén, X Región*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago de Chile.

OFICINA NACIONAL DE EMERGENCIAS (ONEMI). (2014). *Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres*. Santiago: Comunicaciones ONEMI.

OFICINA NACIONAL DE EMERGENCIAS (ONEMI). (2016). *Plan Estratégico Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. Plataforma Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres*.

ORMEÑO, A. (2007). *Geomorfología dinámica del río Maipo en la zona cordillerana de Chile central e implicancias neotécnicas*. Memoria para optar al Título Profesional de Geólogo. Memoria para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geología, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago.

PADILLA, R. (2007). *Dinámica Geomorfológica Actual del Paisaje de Montaña, Correspondiente al Bloque Sur-Oeste de la Región Metropolitana. Universidad de Chile.. Profesora Guía: María Victoria Soto B*. Memoria para optar al título profesional de Geógrafo, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Santiago.

PEÑA-MONNÉ, J. (1997). *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. Logroño (España): Geoforma ediciones.

PLAN REGULADOR COMUNAL DE SAN JOSÉ DE MAIPO (PRCSJM). (2016). *Actualización Estudios Plan Regulador Comunal de San José de Maipo*. Etapa 3: Actualización Normativa Proyecto Plan Regulador Comunal. Plano Zonificación, Vialidad y Áreas Restringidas al Desarrollo Urbano Localidades de El Ingenio y San Gabriel. Lámina 06, Ilustre Municipalidad de San José de Maipo.

PLAN REGULADOR COMUNAL DE SAN JOSÉ DE MAIPO (PRCSJM). (s.f.). *Memoria Explicativa*. Ilustre Municipalidad de San José de Maipo.

PLAN REGULADOR METROPOLITANO DE SANTIAGO (PRMS-100). (2011). *Proposición Documento Memoria Explicativa Modificación Plan Regulador Metropolitano MPRMS 100 – Actualización de Áreas de Extensión Urbana y Reconversión*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Secretaría Regional Ministerial Región Metropolitana, , Santiago, Chile.

QUIROGA, R., FARÍAS, M., CHARRIER, R., & FOCK, A. (2015). Evolución estructural y paleogeográfica del sector oriental de la Cuenca de Abanico (Cordillera Principal, entre 33°18'- 33°25'S). *XIV Congreso Geológico Chileno*, 1, págs. 69-72. La Serena, Chile.

RALUD, R., FOCK, A., GARCÍA-HUIDOBRO, F., LETELIER, V., BADILLA, P., GALLARDO, J., . . . CANCINO, O. (2015). Estudio de peligro, susceptibilidad, vulnerabilidad y medidas de mitigación en la ruta de alta montaña 115-Ch, Paso Internacional Pehuenche, Región del Maule (~36°S). *Impacto de las Geociencias en la Sociedad* (págs. 170-173). La Serena: XIV Congreso Geológico Chileno.

RAULD, R. (2002). *Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago Oriente, entre el río Mapocho y la quebrada de Macul*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología.

RAULD, R. (2011). *Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la Falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile central (33°S)*. Tesis para optar al grado de doctor en Ciencias, Mención Geología, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago de Chile.

RUIZ, P. (2016). *Estudio del incremento de la Exposición al riesgo volcánico Comuna de Puerto Varas, Región de los Lagos, Chile*. Memoria para optar al título de Geógrafa, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Santiago.

RUTLANT, J. (2004). *Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997-1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile. El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile*. Valparaíso: CONA, Chile.

SANCHEZ, N. (2014). *Geodinámica del Sistema de Vertientes de media montaña, asociado al sector de Totalillo, Guanaqueros Y Tongoy, Región De Coquimbo*. Memoria para optar al título Profesional de Geógrafa, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Santiago.

SASSA, K., & CANUTI, P. (2009). *Landslides-disasters risk reduction*. Berlin: Springer.

SCHACHTER, P. (2008). *Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en el sector nororiente de la Cuenca de Santiago mediante métodos estadísticos multivariados*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología.

SELBY, M. (1993). *Hillslope materials and processes* (Second Edition ed.). Oxford University Press.

SEPULVEDA, S. (1998). *Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana*. Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.

SHARPE, C. (1938). *Landslides and related phenomena: a study of mass-movements of soil and rock*. New York: Columbia University Press.

SOETERS, R., & VAN WESTEN, C. (1996). Slope instability, recognition, analysis, and zonation. (A. S. Turner, Ed.) *Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report 247*, 129-177.

SOTO, M., CASTRO, C., RODOLFI, G., MAERKER, M., & PADILLA, R. (2006). Procesos geodinámicos actuales en ambiente de media y baja montaña. *Revista de Geografía Norte Grande*(35), 77-95.

SOTO, M., CASTRO, C., RODOLFI, G., MARKER, M., FERNÁNDEZ, R., PADILLA, R., & RUGIERO, V. (2007). Carta Geomorfológica de la sección central y occidental de la Región Metropolitana de Santiago. *Investigaciones Geográficas*, 39, 91-99.

STRAHLER, A. (1992). *Geografía Física*. Barcelona: Omega.

SUAREZ, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil, Colombia.

THIELE, R. (1980). Hoja Santiago, Región Metropolitana. *Carta Geológica de Chile*(29). Servicio Nacional de Geología y Minería.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR). (2005). *Marco de Acción de Hyogo para 2005-2015: aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres*. Hyogo: Naciones Unidas.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR). (2011). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. GAR. Ginebra: Naciones Unidas.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR). (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*,. Sendai: Naciones Unidas.

VARNES, D. (1978). Slope movement types and processes. *En Landslides, Analysis and Control*, 11-33. (R. Schuster, & R. Krizek, Edits.) Washington D.C: Transportation Research Board, National Academy of Sciences.

VILLELA, D. (2015). *Desarrollo Estructural de la cordillera principal al suroeste del río Maipo, Sector de El Ingeni, Región Metropolitana, Chile (33°40'-33°50'S)*. Memoria para optar al título de Geóloga, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago de Chile.

VILLELA, D., FARIAS, M., CHARRIER, R., & FOCK, A. (2015). Geología estructural en sector de El Ingenio, Cajón del Maipo, RM, Chile (33°40'-33°50'S). *Tectónica y Deformación Cortical Andina*, (págs. 125-128). La Serena.

WALLEMACQ, P., & HOUSE, R. (2018). *Economic Losses, Poverty and Disasters 1998-2017*. Université catholique de Louvain, The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). UNISDR.

WESTEN VAN, C. (2002). Remote sensing and geographic information systems for natural disaster management. (A. Skidmore, Ed.) *Environmental modelling with GIS and remote*, 200-226.

WILCHES-CHAUX, G. (1998). Auge, caída y levantada de Felipe Pinillo, mecánico y soldador o yo voy a correr el riesgo: Guía de La Red para la gestión local del riesgo. *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*.

*Evaluación de la susceptibilidad de remoción en masa en la localidad de El Ingenio, comuna de San José de Maipo, Chile.*

XU, C., DAI, F., XU, X., & LEE, Y. H. (2012). GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China. *Geomorphology*( 145), 70-80.

YAMIN, E., GHESQUIERE, F., CARDONA, O., & ORDAZ, M. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre: el caso de Bogotá, Colombia*. Banco Mundial, Universidad de los Andes.

## **ANEXOS**

---

### **ANEXO N°1. Registros Fotográficos de remociones en masa y sus depósitos**

#### a) Caída de bloques





*Evaluación de la susceptibilidad de remoción en masa en la localidad de El Ingenio, comuna de San José de Maipo, Chile.*









7





b) Deslizamientos de suelo y detritos:



Deslizamiento Vegetado



c) Flujos de detritos:





d) Mantos Coluviales



e) Depósitos de barro



**ANEXO N°2.** Tablas de cálculos de pesos para cada factor

a) Altura:

Factor	Clases	Píxel/Clase	Píxel con RM/Clase	Total Píxel RM	Total Píxel Área de Estudio	Píxel * 1	Píxel * 2	Píxel * 3	Píxel * 4	W+	W-	Cw
Altura (m.s.n.m.)	1.100-1.350	3118	270	1259	7660	270	989	2848	3553	-0,7298138	0,3472832	-1,0770970
	1.350-1.600	2650	602	1259	7660	602	657	2048	4353	0,4017749	-0,2648000	0,6665750
	1.600-1.850	1137	238	1259	7660	238	1021	899	5502	0,2971241	-0,0581927	0,3553168
	1.850-2.100	655	140	1259	7660	140	1119	515	5886	0,3236120	-0,0340047	0,3576167
	2.100-2.350	39	0	1259	7660	0	1259	39	6362	0,0000000	0,0061114	-0,0061114

b) Curvatura:

Factor	Clases	Píxel/Clase	Píxel con RM/Clase	Total Píxel RM	Total Píxel Área de Estudio	Píxel * 1	Píxel * 2	Píxel * 3	Píxel * 4	W+	W-	Cw
Curvatura	Cóncavo	3669	663	1259	7660	663	596	3006	3395	0,11454589	-0,1136819	0,2282278
	Plano	339	44	1259	7660	44	1215	295	6106	-0,276649249	0,0116087	-0,2882579
	Convexo	3591	551	1259	7660	551	708	3040	3361	-0,081741512	0,0685867	-0,1503283

c) Distancia a Fallas:

Factor	Clases	Píxel/Clase	Píxel con RM/Clase	Total Píxel RM	Total Píxel Área de Estudio	Píxel * 1	Píxel * 2	Píxel * 3	Píxel * 4	W+	W-	Cw
Distancia a Fallas (m)	50	96	14	1259	7660	14	1245	82	6319	-0,1415254	0,0017110	-0,1432365
	100	107	15	1259	7660	15	1244	92	6309	-0,1876019	0,0024913	-0,1900932
	250	369	108	1259	7660	108	1151	261	6140	0,7437473	-0,0480571	0,7918044
	500	590	147	1259	7660	147	1112	443	5958	0,5229993	-0,0524382	0,5754375
	1000	1392	267	1259	7660	267	992	1125	5276	0,1878468	-0,0450639	0,2329108
	2500	3744	528	1259	7660	528	731	3216	3185	-0,1806609	0,1543424	-0,3350032
	5000	1362	178	1259	7660	178	1081	1184	5217	-0,2687338	0,0521005	-0,3208343

d) Distancia a Red de Drenaje:

Factor	Clases	Píxel/Clase	Píxel con RM/Clase	Total Píxel RM	Total Píxel Área de Estudio	Píxel * 1	Píxel * 2	Píxel * 3	Píxel * 4	W+	W-	Cw
Distancia a red de drenaje (m)	25	1295	657	1259	7660	657	602	638	5763	1,6554822	-0,6328195	2,2883017
	50	1088	117	1259	7660	117	1142	971	5430	-0,4900161	0,0669785	-0,5569945
	100	1749	135	1259	7660	135	1124	1614	4787	-0,8550596	0,1771263	-1,0321859
	200	2130	171	1259	7660	171	1088	1959	4442	-0,8123894	0,2193729	-1,0317623
	300	1026	87	1259	7660	87	1172	939	5462	-0,7527709	0,0870331	-0,8398040
	400	310	61	1259	7660	61	1198	249	6152	0,2195574	-0,0099873	0,2295447
	500	62	29	1259	7660	29	1230	33	6368	1,4969247	-0,0181348	1,5150595

e) Exposición:

Factor	Clases	Píxel/Clase	Píxel con RM/Clase	Total Píxel RM	Total Píxel Área de Estudio	Píxel * 1	Píxel * 2	Píxel * 3	Píxel * 4	W+	W-	Cw
Exposición	Norte	2362	217	1259	7660	217	1042	2145	4256	-0,6648610	0,2189487	-0,8838097
	Este	4656	969	1259	7660	969	290	3687	2714	0,2898327	-0,6101614	0,8999941
	Sur	298	65	1259	7660	65	1194	233	6168	0,3494853	-0,0159291	0,3654144
	Oeste	252	6	1259	7660	6	1253	246	6155	-2,0874356	0,0344124	-2,1218480
	Plano	31	1	1259	7660	1	1258	30	6371	-1,7750609	0,0039032	-1,7789641

f) Geología:

Factor	Clases	Píxel/Clase	Píxel con RM/Clase	Total Píxel RM	Total Píxel Área de Estudio	Píxel * 1	Píxel * 2	Píxel * 3	Píxel * 4	W+	W-	Cw
Geología	Qa	274	56	1259	7660	56	1203	218	6183	0,2669931	-0,0108487	0,2778418
	Qac	400	77	1259	7660	77	1182	323	6078	0,1922896	-0,0113313	0,2036209
	Qc	314	13	1259	7660	13	1246	301	6100	-1,5160244	0,0377861	-1,5538106
	Qf	1313	9	1259	7660	9	1250	1304	5097	-3,3498307	0,2206279	-3,5704586
	Qrm	1816	338	1259	7660	338	921	1478	4923	0,1507373	-0,0500769	0,2008141
	Tsfi	3430	764	1259	7660	764	495	2666	3735	0,3763698	-0,3948089	0,7711786

g) Pendiente

Factor	Clases	Píxel/Clase	Píxel con RM/Clase	Total Píxel RM	Total Píxel Área de Estudio	Píxel * 1	Píxel * 2	Píxel * 3	Píxel * 4	W+	W-	Cw
Pendiente	0°-5°	801	15	1259	7660	15	1244	786	5615	-2,3327701	0,1190269	-2,4517970
	5°-15°	1867	159	1259	7660	159	1100	1708	4693	-0,7480377	0,1753746	-0,9234123
	15°-25°	1766	309	1259	7660	309	950	1457	4944	0,0753429	-0,0233315	0,0986745
	25°-35°	2057	513	1259	7660	513	746	1544	4857	0,5242806	-0,2473142	0,7715948
	35°-45°	998	241	1259	7660	241	1018	757	5644	0,4815702	-0,0866166	0,5681868
	45° y+	110	21	1259	7660	21	1238	89	6312	0,1820225	-0,0028189	0,1848415

ANEXO N°3. Resumen de los pesos para cada Clase/Factor.

Factores	Clases	Peso Final	Factores	Clases	Peso Final
Distancia a red de drenaje (metros)	25	2,2883017	Distancia a Fallas (metros)	50	-0,1432365
	50	-0,5569945		100	-0,1900932
	100	-1,0321859		250	0,7918044
	200	-1,0317623		500	0,5754375
	300	-0,8398040		1000	0,2329108
	400	0,2295447		2500	-0,3350032
	500	1,5150595		5000	-0,3208343
Geología	Qa	0,2778418	Exposición	Norte	-0,8838097
	Qac	0,2036209		Este	0,6999941
	Qc	-1,5538106		Sur	0,3654144
	Qf	-3,5704586		Oeste	-2,1218480
	Qrm	0,2008141		Plano	-1,7789641
	Tsfi	0,7711786			
Pendiente	0° - 5°	-2,4517970	Altura (m.s.n.m.)	1.100 - 1.350	-1,0770970
	5° - 15°	-0,9234123		1.350 - 1.600	0,6665750
	15° - 25°	0,0986745		1.600 - 1.850	0,3553168
	25° - 35°	0,7715948		1.850 - 2.100	0,3576167
	35° - 45°	0,5681868		2.100 - 2.300	-0,0061114
	45° - <	0,1848415		Menor de todos	
				Mayor de todos	
Curvatura	Cóncavo	0,2282278	Menor del factor		
	Plano	-0,288257905	Mayor del factor		
	Convexo	-0,150328251			

Se destacan los pesos mayores (verde) y menores (amarillo) para cada factor y también el mayor (rojo) y menor (morado) de todos los pesos finales. Fuente: elaboración propia.