



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**RELACIÓN ENTRE LA PROBABILIDAD DE EXISTENCIA DE PERMAFROST  
Y LA SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN LA ZONA ALTA  
DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO, REGIÓN DE ATACAMA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO  
JAIME ALEJANDRO GONZÁLEZ CANALES

**PROFESORA GUÍA:**  
MARISOL LARA CASTILLO

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**  
VÍCTOR ARIAS VARGAS  
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE  
2023

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE:** Geólogo  
**POR:** Jaime Alejandro González Canales  
**FECHA:** 2023  
**PROFESORA GUÍA:** Marisol Lara Castillo

**RELACIÓN ENTRE LA PROBABILIDAD DE EXISTENCIA DE PERMAFROST Y LA  
SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN LA ZONA ALTA DE LA  
CUENCA DEL RÍO HUASCO, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE.**

El cambio climático ha causado relevantes estragos alrededor de todo el mundo. En particular, en zonas de alta montaña se ha asociado la degradación del permafrost con la generación de remociones en masa, vínculo estudiado principalmente en los Alpes Europeos. A pesar de los antecedentes de esta relación, se han realizado escasos estudios sobre esta en los Andes sudamericanos, en particular, en Chile, y tampoco suele incluirse este fenómeno en estudios de susceptibilidad o peligros de remociones en masa.

El presente trabajo busca ser uno de los primeros acercamientos, en nuestro país, a incluir el permafrost como parte de evaluaciones de susceptibilidad para zonas frías con posible presencia de esta condición, y sus cercanías, a partir de supuestos en zonas con distinta probabilidad de existencia de permafrost, utilizando como área de estudio la zona alta de la Cuenca del Río Huasco. Para esto se utiliza una metodología orientada a evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos, deslizamientos de suelo y caída de rocas a través de la ponderación de factores condicionantes con el uso de sistemas de información geográfica para geología (SIGG), la implementación de un análisis jerárquico de procesos (AHP) y su posterior validación a partir de un inventario de remociones en masa para la zona de estudio.

La presencia y distribución de permafrost en el territorio nacional ha sido estudiada principalmente con modelos probabilísticos de escala global o regional. En particular, Azócar *et al.*, (2017) presenta un mapa con la distribución espacial de condiciones favorables a la presencia de permafrost en la vertiente chilena de los Andes semiáridos, el cual, bajo ciertos supuestos puede usarse para estimar la degradación del permafrost y la susceptibilidad atribuida a esta. Es así como el presente estudio busca comparar la utilidad de incluir la probabilidad de existencia de permafrost como factor condicionante frente al tradicional uso de la exposición al sol, que suele ser asociado a procesos de hielo y deshielo en zonas frías pero que escasas veces incluye otros parámetros como la temperatura.

Las validaciones de los mapas de susceptibilidad muestran resultados similares para escenarios donde se usa la probabilidad de existencia de permafrost o la exposición al sol (usados de manera excluyente), sin embargo, los datos usados podrían estar subestimando la susceptibilidad que aporta la degradación del permafrost, al no contar con una variable temporal en los datos de zonas favorables a esta condición, además de desconocer si las remociones ocurrieron en un periodo donde hubo o no degradación del permafrost. Entre otros resultados, es posible encontrar una mayor concentración de remociones en masa en las zonas con datos de probabilidad de permafrost además de una mayor concentración de remociones en algunas de las clases de favorabilidad de existencia de permafrost.

*Cambios colectivos nacen a partir de cambios individuales,  
Cambiar nuestros hábitos puede evitar mucho daño.  
Libera a tus esclavos, libera el sufrimiento de tu plato.*

## Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi hermana por hacerme reír y darme su confianza y apoyo en general, a mi mamá por siempre ofrecer su ayuda y preocupación por nuestro bienestar, a mi papá por el apoyo académico que me otorgo en parte de mi niñez y adolescencia, a la Almendra por alegrarnos y distraernos con su constante búsqueda de atención y cariño. A mi familia en general, por sus buenos deseos desde que era pequeño. A los que ya no están y que de estarlo se alegrarían por mí.

Agradecer a mi novia Ilse que siempre me apoyó y me ayudó para que el desarrollo y término de la carrera fuera un camino más agradable con su amor, comprensión y ternura.

Mi paso por la universidad no fue nunca fácil, el estrés fue terrible, las ganas de dedicar mi tiempo a otras actividades o congelar siempre estuvieron presentes, quisiera agradecer a mis amigos y compañeros de universidad por hacer más ameno el paso por la carrera, sobre todo a mi grupito de geo, Tille, Cami, Guille, Vicky, Mati, Kim, Palo, Kirty, Chelo, también a mis compas de plan común, sobre todo a Juan, Mario y Tomás cuya compañía y buenos ratos dentro y fuera de la universidad valoro mucho, así como a toda persona de la que recibí apoyo más allá del ámbito académico.

Además, agradecer a mis amigos fuera de la u con los que compartí diversas experiencias y emociones, principalmente Ana, Edu, Gerald, Rayo, Vicente y Belén. Nuestras juntas y salidas ayudaron a sobrellevar en parte el estrés universitario. También agradecer a gente que me entregó conocimientos en otros ámbitos como la música, por ejemplo, Felipe y Diego. Prestarle atención a un ámbito diferente al académico fue fundamental para mí. También, agradecer a toda persona que me incitó a conectar con la empatía hacia los animales, el veganismo y temas afines.

Finalmente agradecer a AFRY por sugerir y despertar el interés en el tema, principalmente a Víctor, por su buena disposición a lo largo de todo el proceso de tesis desde que empezamos a definir y acotar el tema hasta las últimas reuniones. También agradecer por supuesto a mi profesora guía Marisol por su apoyo y ayuda con múltiples consejos y revisiones de avances. La ayuda de ellos fue fundamental para el desarrollo de la memoria.

Agradecimientos a





## **Tabla de Contenido:**

<b>1. Introducción.</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Objetivos generales</i>	2
1.2. <i>Objetivos específicos</i>	2
1.3. <i>Hipótesis de trabajo</i>	2
1.4. <i>Área de estudio</i>	3
<b>2. Marco teórico</b>	<b>4</b>
2.1 <i>Ambiente Glacial y Periglacial</i>	4
2.1.1 <i>Permafrost y otras definiciones asociadas al ambiente periglacial</i>	4
2.1.2 <i>Geomorfologías Indicadoras de permafrost: Glaciares rocosos y protalus rampart</i>	6
2.1.3 <i>Otros indicadores de la presencia de permafrost</i>	11
2.2 <i>Cambio climático</i>	11
2.3 <i>Remociones en masa y susceptibilidad</i>	14
2.4 <i>Efectos del cambio climático en la degradación del permafrost y remociones en masa</i>	16
2.4.1 <i>Impacto térmico e hidrológico en el permafrost</i>	17
2.4.2 <i>Algunos estudios que relacionan el efecto de la degradación del permafrost y las remociones en masa</i>	19
2.5 <i>Metodologías para evaluar susceptibilidad y peligro de remociones en masa.</i>	21
<b>3. Antecedentes</b>	<b>24</b>
3.1 <i>Geomorfología</i>	24
3.2 <i>Clima</i>	25
3.3 <i>Fauna y Vegetación</i>	26
3.4 <i>Glaciares en la zona</i>	27
3.5 <i>Modelos de distribución de permafrost en el área de estudio</i>	29
3.5 <i>Marco geológico</i>	32
<b>4. Metodología</b>	<b>36</b>
4.1 <i>Determinación de factores condicionantes y escenarios estudiados</i>	38
4.2 <i>Elaboración de mapas temáticos</i>	41
4.3 <i>Reclasificación de mapas temáticos mediante análisis jerárquico</i>	44
4.4 <i>Elaboración de mapas de susceptibilidad</i>	45
4.5 <i>Escenarios y validación de resultados</i>	47
<b>5. Resultados</b>	<b>50</b>
5.1 <i>Inventario de remociones en masa</i>	50
5.2 <i>Mapas temáticos</i>	51
5.3 <i>Resultados de la metodología AHP</i>	58
5.4 <i>Mapas de susceptibilidad</i>	63

<b>6. Discusiones</b>	<b>68</b>
6.1 <i>Inventario de remociones en masa</i>	68
6.2 <i>Probabilidad de existencia de permafrost y distribución de remociones en masa.</i>	69
6.3 <i>Probabilidad de existencia de permafrost y degradación</i>	71
6.4 <i>Selección y ponderación de factores condicionantes en metodología AHP</i>	72
6.5 <i>Comparación de mapas: Probabilidad de existencia de permafrost vs Exposición al sol</i>	74
6.6 <i>Recomendaciones y proyecciones a futuro</i>	87
<b>7. Conclusiones</b>	<b>89</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>91</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>104</b>
ANEXO A - <i>Ejemplo metodología AHP</i>	104
ANEXO B - <i>Inventario de remociones en masa</i>	109
ANEXO C - <i>Resultados de metodología AHP en detalle</i>	111
ANEXO D - <i>Mapas de susceptibilidad</i>	117

## Índice de figuras

Figura 1: Área de estudio en la división político-administrativa de Chile. Elaboración propia.....	3
Figura 2: Conceptos relacionados al permafrost. Extraído de Gómez-Lende (2016). Elaboración propia.....	5
Figura 3: Ejemplo de glaciar Universidad el cual es un glaciar cubierto de escombros en la cuenca Rapel representado en la Figura A. Las morrenas laterales sugieren que parte de este glaciar pudo haber transicionando hasta convertirse en un glaciar de roca, en este caso el glaciar de roca Tres Gemelos (representado en la Figura B) que esta debajo del glaciar Universidad. La evolución de un glaciar a un glaciar cubierto de escombros y posiblemente a un glaciar de roca es caracterizada por la reducción del hielo con relación al volumen de los detritos (representado en la Figura C). Extraído de Janke et al., 2015.....	8
Figura 4: Representación de las principales acumulaciones de detritos en un área montañosa. Extraído de Whalley y Azizi (2003).....	9
Figura 5: Diagrama que ilustra la formación de un protalus rampart. Extraído y traducido de Bryant, 2022. ....	10
Figura 6: Promedio anual de la temperatura media en Chile continental utilizando 109 estaciones. La línea segmentada roja es el promedio de 19 estaciones históricas con sesgo corregido, línea segmentada gris indica la tendencia lineal. Extraído de Villarroel et al. (2022) .....	13
Figura 7: Altura de la isoterma cero (línea continua), tendencia lineal (línea punteada). Extraído de Villarroel et al. (2022). ....	13
Figura 8: Clasificación de flujos de acuerdo con su granulometría y al porcentaje de partículas sólidas Extraído de Muñoz et al., 2018. ....	15
Figura 9: Nacimiento del río Huasco en la intersección de los ríos y valles El Tránsito (Izquierda) y El Carmen (Derecha), Fotografía de Alturas Oceánicas, 2010. ....	24
Figura 10: Cuenca del Río Huasco y subcuencas asociadas de acuerdo con la dirección nacional de Aguas. Elaboración propia. ....	25
Figura 11: Inventario de Crioformas elaborado en Universidad de Atacama (2016). Elaboración propia. ..	28
Figura 12: Comparación Visual entre Modelo de Gruber y Azocar para una probabilidad mayor al 75%. (A) Permafrost Favorability Index (PFI) de Azócar et al., 2017 (con una resolución de 30 m/px), (B) PFI remuestreado a 1 km, (C) Permafrost Zonation Index (PZI) modelado por Gruber (2012,; con una resolución de 1 km/px). En Azócar (2013) Extraído de Atacama Ambiente (2021).....	29
Figura 13: Mapa de Permafrost favourability index (PFI) para las áreas con detritos en los Andes Semiáridos de Chile. Extraído de Azócar et al., (2017). ....	31
Figura 14: Unidades geológicas del área de estudio de acuerdo con Ortiz y Merino (2015). Elaboración propia. ....	35
Figura 15: Esquema de tipos de curvatura. Extraído de Molina, 2016. ....	39
Figura 16: Relación entre litologías y resistencia a la compresión simple para muestras de laboratorio de rocas comunes en Chile. Extraído de (Salinas, 2018). ....	44
Figura 17: Relación entre litologías y ángulo de fricción para muestras de laboratorio de rocas comunes en Chile. Extraído de (Salinas, 2018). ....	44
Figura 18: Esquema que ejemplifica la aplicación de AHP para la elaboración de mapa continuo de susceptibilidad. Cada píxel tendrá un Índice de susceptibilidad normalizado (IS <sub>n</sub> ) por cada factor. Este es multiplicado por la ponderación del factor condicionantes correspondiente. Esto se hace con cada factor para luego sumar los valores y obtener un IS final por cada pixel del mapa de susceptibilidad. Extraído de Muñoz (2018). ....	46
Figura 19: Caso de validación 1 para validación donde se consideran las remociones en masa de toda el área de estudio. Elaboración propia. ....	48
Figura 20: Caso de validación 2 donde se consideraron solo las remociones en masa ubicadas en zonas con datos de probabilidad de permafrost (Polígono PFI en el mapa). Elaboración propia. ....	49
Figura 21: Inventario de remociones en masa para el área de estudio. Elaboración propia.....	51
Figura 22: Clases de pendientes para flujos de detritos. Elaboración propia.....	52
Figura 23: Clases de pendientes para deslizamientos de suelo. Elaboración propia.....	52
Figura 24: Categorías de pendientes para caída de rocas. Elaboración propia. ....	53
Figura 25: Categorías del factor curvatura para flujos de detritos. Elaboración propia. ....	53

Figura 26: Exposición al sol según clases. Elaboración propia. ....	54
Figura 27: Distancia a redes de drenaje según clases para flujos de detritos. Elaboración propia. ....	54
Figura 28: Categorías para probabilidad de existencia de permafrost. Elaboración propia. ....	55
Figura 29: Unidades geológicas para flujos de detritos y deslizamientos de suelo. Elaboración propia. ....	55
Figura 30: Unidades geológicas para caída de rocas. Elaboración propia. ....	56
Figura 31: Distancia a fallas para deslizamientos de suelo y caída de rocas. Elaboración propia. ....	56
Figura 32: Clases asignadas al factor acumulación de nieve. Elaboración propia. ....	57
Figura 33: Mapeo a escala 1:14000 de material rocoso. Elaboración propia. ....	57
Figura 34: Ejemplo de cálculo de IS para un píxel del mapa de susceptibilidad de flujo de detritos según los mapas temáticos, sus categorías y susceptibilidad calculada mediante AHP. Elaboración propia. ....	64
Figura 35: Susceptibilidad de flujos de detritos ponderando la exposición al sol en lugar de la probabilidad de permafrost en el área de estudio (Escenario C). Enmarcados en cuadros morados hay zonas con concentración de altos índices (IS). Elaboración propia. ....	65
Figura 36: Susceptibilidad de flujo de detritos integrando la probabilidad de existencia de permafrost como factor condicionante con una menor ponderación (9%) exclusivamente en zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost (Escenario B). Elaboración propia. ....	65
Figura 37: Susceptibilidad de deslizamientos de suelo integrando la exposición al sol como factor condicionante en el área de estudio (Escenario C). Enmarcados en cuadros morados hay zonas con concentración de altos índices (IS). Elaboración propia. ....	66
Figura 38: Susceptibilidad de deslizamientos de suelo integrando la probabilidad de existencia de permafrost como factor condicionante (escenario A) en el área de estudio. Elaboración propia. ....	66
Figura 39: Susceptibilidad de caída de rocas integrando la exposición al sol como factor condicionante en zonas con probabilidad positiva de permafrost (Escenario C). Enmarcados en cuadros morados hay zonas con concentración de altos índices (IS). Elaboración propia. ....	67
Figura 40: Distribución de la susceptibilidad (IS <sub>n</sub> ) aportada por la exposición al sol. Elaboración propia. ....	83
Figura 41: Distribución de la susceptibilidad (IS <sub>n</sub> ) aportada por la probabilidad de existencia de permafrost. Elaboración propia. ....	83
Figura 42: Inventario de remociones en masa en el área de estudio. Elaboración propia. ....	110
Figura 43: Mapa de susceptibilidad de flujo de detritos según escenario A (PFI ponderando 15%) en toda el área de estudio. Elaboración propia. ....	117
Figura 44: Mapa de susceptibilidad de flujo de detritos según escenario B (PFI ponderando 9%). Elaboración propia. ....	118
Figura 45: Mapa de susceptibilidad de flujo de detritos según escenario A (PFI ponderando 15%) limitado a zonas con datos de probabilidad de permafrost. Elaboración propia. ....	118
Figura 46: Mapa de susceptibilidad de flujo de detritos según escenario C (Con exposición al sol) limitado a zonas con datos de probabilidad de permafrost. Elaboración propia. ....	119
Figura 47: Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo según escenario A (con PFI ponderando 17%) en el área total. Elaboración propia. ....	119
Figura 48: Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo según escenario B (con PFI ponderando 10%) en el área total. Elaboración propia. ....	120
Figura 49: Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo según escenario B (Con PFI ponderando 10%) limitado a zonas con datos de probabilidad de permafrost. Elaboración propia. ....	120
Figura 50: Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo según escenario C (Exposición al sol). Limitado a zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost. Elaboración propia. ....	121
Figura 51: Mapa de susceptibilidad de rocas según escenario A. En el total del área de estudio. Elaboración propia. ....	121
Figura 52: Mapa de susceptibilidad de rocas según escenario A. Limitado a zonas con datos de probabilidad de permafrost. Elaboración propia. ....	122
Figura 53: Mapa de susceptibilidad de caída de rocas en el escenario C (Con exposición al sol) en el área total. Elaboración propia. ....	122

## Índice de tablas

<i>Tabla 1: Datos de precipitación y temperatura en estaciones meteorológicas en la cuenca del Salado y del salar de Pedernales. Coordenadas se encuentran en WGS84, temperaturas corresponden a la máxima y mínima de cada día. Extraído del Informe Evento Meteorológico de CODELCO (2015) en Grijalba (2016).</i>	26
<i>Tabla 2: Escala de Saaty (2008) para la toma de decisiones. Extraída de Muñoz (2018), modificación de Saaty (2008).</i>	37
<i>Tabla 3: Selección de factores condicionantes para cada tipo de remoción en masa. Elaboración propia.</i>	41
<i>Tabla 4: Clases para los factores condicionantes de flujos de detritos. Elaboración propia.</i>	42
<i>Tabla 5: Clases para los factores condicionantes de deslizamientos de suelo. Elaboración propia.</i>	42
<i>Tabla 6: Clases para los factores condicionantes de caídas de roca. Elaboración propia.</i>	43
<i>Tabla 7: Ejemplo para comparación a pares extraído de Muñoz (2018).</i>	45
<i>Tabla 8: Ponderaciones de casos de estudio para flujos de detritos. Elaboración propia.</i>	58
<i>Tabla 9: Ponderaciones para los casos de estudio de deslizamientos de suelo. Elaboración propia.</i>	59
<i>Tabla 10: Ponderaciones para casos de estudio de caídas de roca. En una primera instancia el cálculo de la ponderación de la probabilidad de existencia de permafrost resulto con valores bajos, por lo que no se realizó un escenario con ponderaciones más bajas. Elaboración propia.</i>	59
<i>Tabla 11: Resultados mediante metodología AHP. Índices normalizados (IS<sub>n</sub>) de los factores condicionantes de flujos de detritos. Elaboración propia.</i>	60
<i>Tabla 12: Resultados mediante metodología AHP. Índices normalizados (IS<sub>n</sub>) de los factores condicionantes de deslizamientos de suelo. Elaboración propia.</i>	61
<i>Tabla 13: Resultados mediante metodología AHP. Índices normalizados (IS<sub>n</sub>) de los factores condicionantes de caídas de rocas. Elaboración propia.</i>	62
<i>Tabla 14: Distribución de las remociones en masa según la probabilidad de existencia de permafrost. Incluyendo un índice que indica el número de remociones por kilómetro cuadrado considerando el área que ocupa cada rango de probabilidad de existencia permafrost. Elaboración propia.</i>	70
<i>Tabla 15: Distribución de las remociones en masa según la posible presencia del permafrost. Cabe destacar que la fila “Áreas con probabilidad de existencia de permafrost” hace referencia a las remociones identificadas dentro del polígono PFI, mostrado en la Figura 20, mientras que la fila “Áreas sin probabilidad de existencia de permafrost” denota las remociones que se encuentran fuera del polígono PFI mencionado anteriormente. Elaboración propia.</i>	70
<i>Tabla 16: Tipología de intervenciones mineras en glaciares rocosos. Extraído de Brenning y Azócar (2010).</i>	74
<i>Tabla 17: Estadísticas para validación y comparación de mapas de susceptibilidad de flujos de detritos, resultado del muestreado de los puntos de activación de flujos de detritos en el mapa de susceptibilidad respectivo en el total del área de estudio. En la Tabla 8, en la sección Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de los flujos de detritos correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en pixeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de flujos de detritos del inventario para cada escenario. Elaboración propia.</i>	76
<i>Tabla 18: Estadísticas para la validación y comparación de mapas de susceptibilidad de flujos de detritos restringido a zonas con datos de probabilidad de permafrost. En la Tabla 8, en la sección de Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de los flujos de detritos correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en pixeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente, se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de flujos de detritos del inventario. Elaboración propia.</i>	77
<i>Tabla 19: Estadísticas para validación y comparación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos de suelo, resultado del muestreado de los puntos de activación de deslizamientos de suelo en el mapa de susceptibilidad respectivo en el total del área de estudio. En la Tabla 9, en la sección Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de los deslizamientos de suelo correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo</i>	

este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en pixeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de deslizamientos de suelo del inventario para cada escenario. Elaboración propia. .... 80

Tabla 20: Estadísticas para la validación y comparación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos de suelo restringido a zonas con datos de probabilidad de existencia permafrost. En la Tabla 9, en la sección de Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de los deslizamientos de suelo correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en pixeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente, se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de deslizamientos de suelo del inventario. Elaboración propia... 81

Tabla 21: Estadísticas para validación y comparación de mapas de susceptibilidad de caídas de rocas, resultado del muestreo de los puntos de activación de caídas de rocas en el mapa de susceptibilidad respectivo en el total del área de estudio. En la Tabla 10, en la sección Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de las caídas de rocas correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en pixeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente, se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de caídas de roca del inventario para cada escenario. Elaboración propia..... 84

Tabla 22: Estadísticas para la validación y comparación de mapas de susceptibilidad de caídas de rocas restringidas a zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost. En la Tabla 10, en la sección de Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de las caídas de roca correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en pixeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente, se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de caídas de roca del inventario. Elaboración propia. .... 85

Tabla 23: Justificación de la comparación a pares con respecto a las pendientes para deslizamientos de suelo. Elaboración propia. .... 104

Tabla 24: Justificación de la comparación a pares con respecto al factor distancia a fallas para deslizamientos de suelo. Elaboración propia. .... 105

Tabla 25: Justificación de la comparación a pares con respecto al factor probabilidad de existencia de permafrost para deslizamientos de suelo. Elaboración propia. .... 105

Tabla 26: Justificación de la comparación a pares con respecto al factor geología para deslizamientos de suelo. Elaboración propia. .... 106

Tabla 27: Primera matriz de la metodología. Elaboración propia. .... 106

Tabla 28: Matriz normalizada y obtención de las ponderaciones de los factores condicionantes para el escenario A de los deslizamientos de suelo. Elaboración propia..... 106

Tabla 29: Justificación de comparación a pares para la clase 0 o "sin datos". Elaboración propia..... 107

Tabla 30: Justificación de comparación a pares para la clase 0-50. Elaboración propia. .... 108

Tabla 31: Justificación de comparación a pares para la clase 50-75. Elaboración propia. .... 108

Tabla 32: Desarrollo de la comparación a pares y obtención de índices normalizados para las diferentes clases de el factor probabilidad de existencia de permafrost. A diferencia de la obtención de las ponderaciones de factores condicionantes, para los índices normalizados (IS<sub>n</sub>) hay un paso extra que consiste en la normalización de los promedios por el promedio de mayor valor, multiplicado por 100. En este caso se dividen las celdas de las columna "Promedio" por 0,5 (aproximadamente) para obtener el valor del IS<sub>n</sub>. Elaboración propia. .... 109

Tabla 33: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de flujos de detritos en el escenario A. Elaboración propia. .... 111

Tabla 34: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de flujos de detritos en el escenario B. Elaboración propia. .... 111

Tabla 35: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de flujos de detritos en el escenario C. Elaboración propia..... 112

Tabla 36: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de deslizamientos de suelo en el escenario B. Elaboración propia..... 112

<i>Tabla 37: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de deslizamientos de suelo en el escenario A. Elaboración propia.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 38: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de caídas de roca en el escenario A. Elaboración propia. ....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 39: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de deslizamientos de suelo en el escenario C. Elaboración propia. ....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 40: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de caídas de rocas en el escenario C. Elaboración propia.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 41: Desarrollo de comparación a pares para clases de pendientes de flujos de detritos. Elaboración propia. ....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 42: Desarrollo de comparación a pares para clases de acumulación de nieve. Elaboración propia. ....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 43: Desarrollo de comparación a pares para clases de curvatura para flujos de detritos. Elaboración propia. ....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 44: Desarrollo de comparación a pares para clases de distancia a red de drenaje para flujos de detritos. Elaboración propia. ....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 45: Desarrollo de comparación a pares para clases de exposición al sol. Elaboración propia. ....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 46: Desarrollo de comparación a pares para clases de pendientes en deslizamientos de suelo. Elaboración propia. ....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 47: Desarrollo de comparación a pares para clases distancia a fallas en deslizamientos de suelo y caídas de rocas. Elaboración propia.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 48: Desarrollo de comparación a pares para clases de geología en deslizamientos de suelo y flujos de detritos. Elaboración propia. ....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 49: Desarrollo de comparación a pares para clases de geología en caídas de roca. Elaboración propia. ....</i>	<i>116</i>

# **1. Introducción.**

Las remociones o movimientos en masa son agentes geomorfológicos comunes en la región Andina, cuya ocurrencia y propiedades son determinadas por la interacción de varios factores de tipo geológicos, topográficos, climáticos y la actividad antropogénica. Diversas áreas de la región Andina, reconocidas por su actividad sísmica y volcánica, se caracterizan por su abrupta topografía con pronunciadas pendientes que resultan en una alta energía del relieve. Una gran variedad de procesos geomorfológicos influye en la restauración del equilibrio energético, tales como, erosión y transporte de sedimentos de los ríos; particularmente, un medio muy eficaz de transporte son los movimientos gravitacionales en masa, incluidos los flujos de detritos, caídas de roca, deslizamientos de suelo o roca, entre otros, donde la gravedad es la fuerza dominante (Mergili, 2014).

Para Popescu (2000), en el estudio de remociones en masa es usual la clasificación de factores que influyen en la generación de estos eventos en 2 grupos. Es así como hay factores que preparan la ladera y la convierten en una zona inestable y susceptible a ser movilizada (factores condicionantes) y factores desencadenantes, que se encargan de gatillar el evento (Lara, 2007).

Un factor recientemente vinculado a la generación de remociones en masa en zonas de alta montaña en Los Alpes es la degradación del permafrost, éste es definido como el terreno (suelo y/o roca que puede incluir o no hielo o material orgánico) que permanece a temperaturas inferiores a 0 °C por al menos 2 años consecutivos (IPA, s.f.). La degradación de este ha sido asociada con el alza de las temperaturas debido al cambio climático, junto con un aumento de la inestabilidad de laderas, lo cual está fundamentado en base a la comprensión de procesos físicos (Gruber y Haeberli, 2007), la recurrencia de eventos dentro del permafrost marginal o caliente (Allen *et al.*, 2011; Bottino *et al.*, 2002), y la cronología de eventos durante períodos con temperaturas atmosféricas más altas de lo normal entre otros factores (Gaphaz, 2017). A pesar de que hace décadas se empezó a estudiar la relación entre estas variables en Los Alpes, en Los Andes Sudamericanos son escasos los estudios sobre este tema.

Es así como una serie de propiedades condicionan la ocurrencia de remociones en masa, en particular, en los taludes rocosos son relevantes la distribución del permafrost, el historial glacial de la zona, la hidrogeología y las propiedades geotécnicas del macizo rocoso entre otros factores, pero a pesar de la relevancia que puede tener la dinámica del permafrost en la estabilidad de los taludes de roca esta es considerada en detalle solamente en unos pocos estudios (Fischer y Huggel, 2008). Algunos estudios ya han propuesto una relación entre la degradación del permafrost y la ocurrencia de remociones en masa, por ejemplo, Huggel (2009) establece que las zonas de desprendimiento de las avalanchas de roca y hielo pueden estar correlacionadas con alteraciones termales causadas por la interacción térmica del permafrost y el hielo glacial, los efectos volcánicos/geotérmicos y el cambio climático. De



este modo, en un contexto de cambio climático es de alta relevancia el estudio de la distribución y degradación del permafrost y su relación con la generación de remociones en masa en zonas de alta montaña en la Cordillera de los Andes.

En la mayoría de las metodologías para evaluar susceptibilidad a la generación de remociones en masa no se considera la existencia del permafrost y/o su nivel de degradación como factor condicionante, por lo cual es interesante determinar hasta qué punto es importante para la generación de remociones en masa, lo que se busca en el presente estudio.

### **1.1. Objetivos generales**

- Evaluar el efecto de la presencia de permafrost en la susceptibilidad de remociones en masa en la parte alta de la cuenca del Río Huasco, Región de Atacama.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Elaborar un inventario de remociones en masa en zonas con distintas probabilidades de existencia de permafrost dentro del área de estudio, incluyendo además zonas que no tienen probabilidad asignada.
- Adaptar metodologías de susceptibilidad de remociones en masa en zonas con distintas probabilidades de existencia de permafrost y sus cercanías.
- Evaluar la susceptibilidad a remociones en masa en el área de estudio.
- Determinar si existe una correlación entre permafrost y susceptibilidad en el área de estudio.

### **1.3. Hipótesis de trabajo**

La presencia de permafrost es relevante como factor condicionante para la ocurrencia de remociones en masa, por lo que debe ser incluido en las evaluaciones de susceptibilidad para zonas donde esté presente.

## 1.4. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la zona alta de la cuenca del río Huasco, abarcando principalmente la subsubcuenca Río Potrerillos. Se localiza en la zona sureste de la comuna Alto del Carmen en la provincia de Huasco, Región de Atacama, Chile, como se indica en la Figura 1.

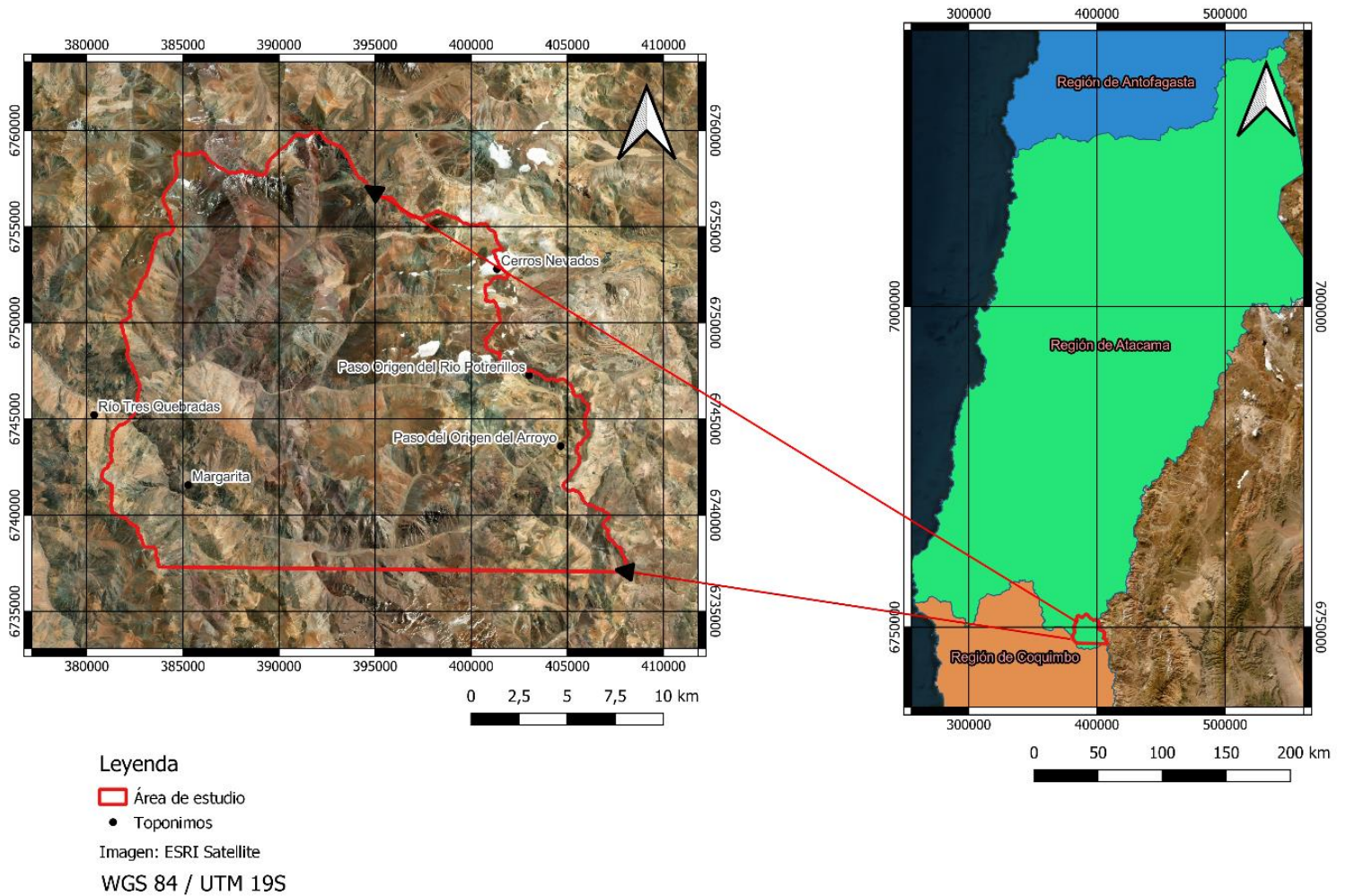


Figura 1: Área de estudio en la división político-administrativa de Chile. Elaboración propia.

## **2. Marco teórico**

En este capítulo se presentan los principales conceptos que serán de utilidad para el desarrollo de este estudio, partiendo por el ambiente glacial y periglacial junto con sus geomorfologías y definiciones propias, cambio climático, remociones en masa, para finalizar con la manera en que se relacionan estos conceptos. Además, se exponen algunas metodologías tradicionales para evaluar la susceptibilidad de remociones en masa.

### **2.1 Ambiente Glacial y Periglacial**

De acuerdo con Gómez-Lende (2016) el ambiente glacial es donde se localizan los glaciares (masas de hielo originadas en la tierra) y suele incluir cumbres montañosas cubiertas de hielo, campos de hielo y casquetes de hielo. Por otro lado, el ambiente periglacial es un ambiente también frío y criogénico, pero no glaciario y el límite físico entre estos 2 ambientes suele ser difuso (Gómez-Lende, 2016). Según Gómez-Lende (2016) el ambiente periglacial está marcado por la ocurrencia de permafrost en profundidad, por la posible presencia de hielo subterráneo preservado durante largo tiempo, por un dominio de ciclos de congelamiento y descongelamiento en la superficie la cual afecta a las rocas y el suelo, y por estar asociado a procesos criogénicos como solifluxión y/o gelifluxión, entre otros. Cabe destacar que, para algunos autores del hemisferio norte, el permafrost no representa un elemento necesario para la existencia del ambiente periglacial, sin embargo, sí lo es para los geocriólogos que trabajan en la Cordillera de los Andes, y debe mencionarse y especificarse (Gómez-Lende, 2016).

#### **2.1.1 Permafrost y otras definiciones asociadas al ambiente periglacial**

El permafrost se define como suelo o roca, incluyendo hielo y materia orgánica que permanece a una temperatura de 0°C o menos, por lo menos dos años consecutivos (Muller, 1943; Van Everdigen, 1976; Kudryavtsev, 1978, como se citó en Trombotto *et al.*, 2014).

Tomando en cuenta esta definición el permafrost puede contener agua y hielo, pero no son necesarios ambos elementos para definir la presencia de permafrost. Cuando el permafrost contiene hielo, puede ser considerado parte del sistema global de la criósfera. Por otro lado, cuando el permafrost carece de humedad suficiente para permitir el desarrollo de formas de hielo intersticial, es comúnmente denominado permafrost seco (Embleton y King, 1975).

Atingente a la zona de estudio es la definición de permafrost de montaña, la cual hace referencia a la presencia de permafrost en elevadas altitudes y en todas las altas montañas y plateaus alrededor de la Tierra (Atacama Ambiente, 2021). Comúnmente, el permafrost de montaña y su gran variabilidad espacial es dominada principalmente por tres factores ambientales a diferentes escalas espaciales que influyen sobre las temperaturas superficiales:

clima, topografía y propiedades del suelo (Hoelzle *et al.*, 2001; Gruber y Haeberli, 2009 en Atacama Ambiente, 2021). Los procesos asociados al clima se refieren a la influencia que la latitud y la circulación global ejercen sobre un área de montaña (escala global). Las condiciones topográficas pueden modificar los procesos climáticos generales (meso-escala) (Atacama Ambiente, 2021). Localmente, los efectos de las condiciones climáticas topográficamente alteradas sobre las temperaturas superficiales son modificados por las propiedades del suelo, el rol de la cubierta de nieve y su influencia sobre la transferencia calórica (micro escala) (Atacama Ambiente, 2021).

Se define además el concepto de permafrost discontinuo como la ocurrencia de permafrost parcialmente distribuido con porcentajes variables de permafrost con regiones adyacentes libres de permafrost. Por ejemplo, en zonas montañosas de la cordillera de los Andes con *MAAT* (temperatura media anual del aire *MAAT* por sus siglas en inglés) típicamente entre  $-2^{\circ}\text{C}$  y  $-3^{\circ}\text{C}$  (Azócar, 2013). Por otro lado, el permafrost esporádico corresponde a la presencia aislada de permafrost en áreas particularmente favorables para la existencia de permafrost debido principalmente a factores ambientales locales favorables bajo una temperatura media anual típicamente entre los  $0^{\circ}\text{C}$  y  $-2^{\circ}\text{C}$  (Atacama Ambiente, 2021).

Otro concepto importante es el de capa activa (véase Figura 2) la cual es definida como una capa superficial que pasa por ciclos de congelamiento y descongelamiento en áreas con permafrost subyacente. La profundidad de esta capa depende de numerosos factores ambientales, entre ellos la temperatura del aire, radiación solar, cubierta nival, tipo de roca, vegetación etc. (French, 2007).

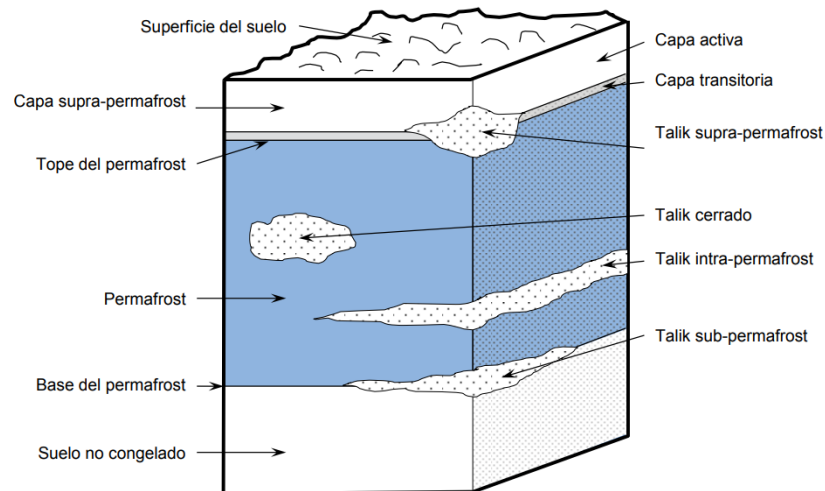


Figura 2: Conceptos relacionados al permafrost. Extraído de Gómez-Lende (2016). Elaboración propia.

### **2.1.2 Geomorfologías Indicadoras de permafrost: Glaciares rocosos y protalus rampart**

Según Atacama Ambiente (2021) en zonas montañosas la presencia de permafrost puede ser detectada a través de indicadores directos e indirectos de la presencia de condiciones propicias. Los Andes centrales están caracterizados por la alta densidad de glaciares rocosos y *protalus Rampart* (Barsch, 1996), entre otras geoformas de relieve típicas de ambiente periglacial.

Los glaciares rocosos activos son considerados por Barsch (1992) como una expresión del permafrost de montaña. Se plantea que no solo la condición de permafrost está dentro de los glaciares rocosos sino también en sus alrededores (Haeberli, 1985; Berthling, 2011) siendo su elevación mínima un buen indicador de la elevación mínima de las superficies con mayor probabilidad de ocurrencia de permafrost (Azócar *et al.*, 2017). Además de ser indicadores de permafrost, los glaciares de roca son indicadores de la presencia de áreas con almacenamiento permanente o estacional de agua en el suelo (Barsch, 1996).

La importancia de los glaciares rocosos en el ambiente periglacial hace necesario definir y discutir esta geoforma. De acuerdo con Capps Jr. (1910) citado en Laboratorio de glaciología (s.f.) estableció una de las primeras definiciones de glaciar de roca vigentes hasta el día de hoy. Según su morfología superficial sería una lengua o cuerpo lobular, normalmente de rocas angulares que se asemeja a un pequeño glaciar. Generalmente están en terrenos de alta montaña (o polar seco) y zonas polares, y usualmente tienen cordones, surcos y lóbulos en su superficie, así como un talud empinado en su frente (Potter, 1972). Su longitud va desde unos pocos metros a varios hectómetros, típicamente varían entre 200 m y 800 m, aunque pueden tener superficies mayores (Barsch, 1996).

Los glaciares rocosos se suelen describir como formas de acumulación rocosas con contenido de hielo variable o nulo, el que ha sido producido, depositado y deformado principalmente durante el periodo Holoceno y en tiempos históricos recientes (Birkeland, 1973; Haeberli *et al.*, 2003).

Existen varias clasificaciones de glaciares rocosos según su geometría, posición geomorfológica, origen del material y estado dinámico (o actividad) que intentan describir de mejor forma un glaciar rocoso (Barsch, 1996; Clark *et al.*, 1998 en Laboratorio de glaciología, s.f.).

De acuerdo con Barsch (1996) los glaciares rocosos se clasifican según su dinámica como formas activas (en movimiento y con hielo en su interior), inactivas (sin movimiento, pero aún con hielo en su interior) y fósiles o relictos (sin movimiento y donde se ha descongelado completamente su contenido de hielo).

El origen de los glaciares rocosos es una discusión no zanjada hasta el momento. Principalmente se contraponen un origen periglacial y un origen glacial. (Whalley y Azizi, 2003; Mahaney *et al.*, 2007 citado en Laboratorio de glaciología, s.f.)

Según Clark *et al.* 1998 en Laboratorio de glaciología (s.f.) el origen de los glaciares de roca pertenece exclusivamente a un ambiente periglacial y de permafrost. Se plantea que la percolación y el congelamiento del agua proveniente de fusión de nieve o precipitación en depósitos no consolidados. La propuesta de origen periglacial para los glaciares rocosos puede ser aplicada especialmente a pequeños glaciares de talud donde es probable que el hielo intersticial del glaciar rocoso se haya originado a partir de procesos de acumulación periglacial como por ejemplo avalanchas.

Por otro lado, una segunda propuesta del origen de los glaciares rocosos considera a estos asociados a transiciones de procesos glaciares o periglaciares donde hay un continuo entre el glaciar blanco en un extremo superior, en el centro un glaciar cubierto y por último en la parte terminal el glaciar rocoso, véase Figura 3 (Wahrhaftig y Cox, 1959; Clark *et al.*, 1998; Burger *et al.*, 1999 citado en Laboratorio de glaciología, s.f.).



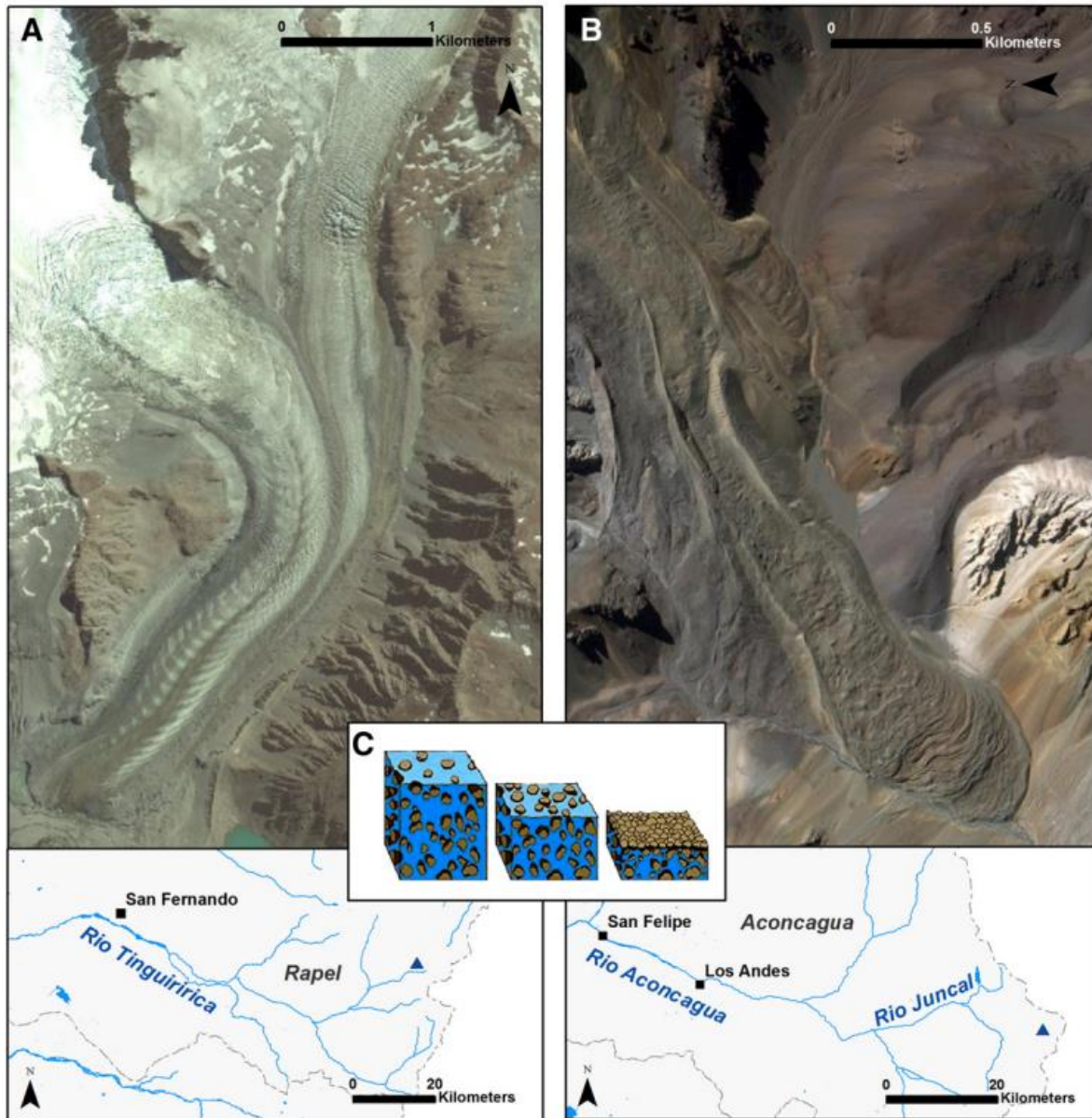


Figura 3: Ejemplo de glaciar Universidad el cual es un glaciar cubierto de escombros en la cuenca Rapel representado en la Figura A. Las morrenas laterales sugieren que parte de este glaciar pudo haber transicionando hasta convertirse en un glaciar de roca, en este caso el glaciar de roca Tres Gemelos (representado en la Figura B) que esta debajo del glaciar Universidad. La evolución de un glaciar a un glaciar cubierto de escombros y posiblemente a un glaciar de roca es caracterizada por la reducción del hielo con relación al volumen de los detritos (representado en la Figura C). Extraído de Janke *et al.*, 2015.

Por último, otra visión sugiere el origen de algunos glaciares rocosos a partir de remociones en masa como caídas de rocas o deslizamientos que afectan a taludes o laderas con depósitos glaciares inestables (Johnson, 1984; Barsch, 1996 en Laboratorio de glaciología, s.f.).

De acuerdo con Borde (1966), citado en Janke *et al.*, (2015) desde la década de 1960 se han evidenciado abundantes glaciares rocosos en la zona Oeste de la Cordillera de los Andes, los cuales han sido descritos como una manifestación de permafrost en zonas de alta montaña. Paskoff (1970) citado en Janke *et al.*, (2015) encontró una relación entre la exposición al sol

y los glaciares de roca, los cuales tenían una mayor aparición en laderas orientadas hacia el sur. Resultados similares se han obtenido en los Andes orientales (Corte, 1976; Janke *et al.*, 2015)

Otros indicadores indirectos de condiciones de permafrost son las terrazas de crioturbación, protuberancias de pingos, geformas de termokarst y los glaciares rocosos embrionarios o iniciales. (Davis, 2000; French, 2007; Villarroel, 2019). Algunas de estas geformas están representadas en la Figura 4.

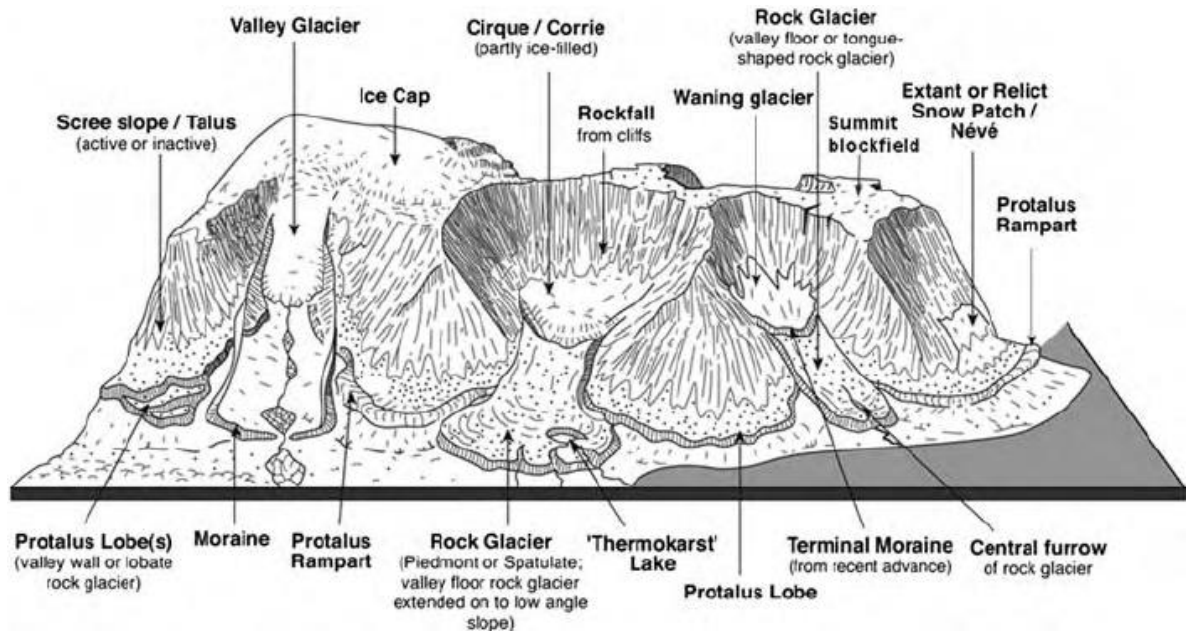


Figura 4: Representación de las principales acumulaciones de detritos en un área montañosa. Extraído de Whalley y Azizi (2003).

A partir de los conceptos previos se define la geomorfología de Protalus Rampart. Si bien se han discutido distintos orígenes, se considera como un glaciar rocoso de talud en una fase de desarrollo temprana, por lo cual también se usa el concepto de glaciar rocoso embrionario, embrionario o inicial (Barsch, 1996; Whalley y Azizi, 2003). Según Barsch, (1996) una de las hipótesis más aceptadas en cuanto a su origen señala que corresponden a depósitos detríticos derivados de la pared del talud acumulados a los pies de un manchón de nieve (véase Figura 5). En su frente se forman cordones y terrazas producto de la reptación del manto detrítico de derrubios supersaturado con hielo, el cual es inestable cuando se alcanza cierto umbral (Volumen de hielo, tensión de cizallamiento).



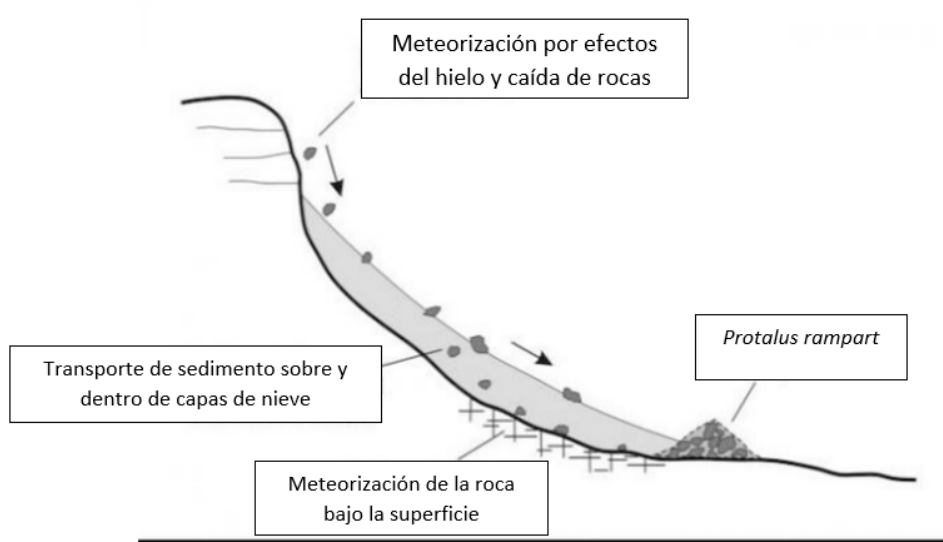


Figura 5: Diagrama que ilustra la formación de un protalus rampart. Extraído y traducido de Bryant, 2022.

Según Gómez Lende, M. (2016) se define *Protalus rampart* como una geoforma identificada como un relieve formado por detritos que se desarrolla a lo largo de una ladera en los márgenes inferiores de un manchón de nieve perenne. Si bien hay discrepancia en la formación de un protalus Rampart, autores proponen este fenómeno como parte de la evolución de un glaciar de escombros y son una forma incipiente de estos. Otras teorías no reconocen la relación entre ambas geoformas (Trombotto, 2000).

Si bien los términos pueden variar en la literatura, en Scapozza *et al.* (2011) han propuesto recientemente que el término 'protalus rampart' se use para definir los pequeños fenómenos de deslizamiento del permafrost.

Otros términos importantes para el ambiente periglacial y muchas veces de importancia en inventarios de crioformas son las laderas de crioflucción y protalus lobe. Las laderas de Crioflucción se caracterizan por tener una forma de “arrugas” en el suelo, producto de la reptación de suelos congelados. Las mismas suelen tener un espaciamiento regular que depende de la pendiente en la que se encuentran. Por la pendiente y tipo de detrito que hay en la ladera esta no podría retener agua de la forma en que lo hace un acuífero, sin embargo, son adecuadas para retenerla congelada en forma de hielo, el cual se funde a medida que el verano y las alzas de temperatura llegan (Milana, 2010 en Universidad de Atacama, 2016). De manera similar *Protalus lobe*, también llamados Lóbulo de talud son creados por la lenta reptación de la superficie del suelo por efectos gravitatorios, lo cual es posible por la plasticidad aportada por el hielo, permitiendo un flujo de alta viscosidad.

### **2.1.3 Otros indicadores de la presencia de permafrost**

Importante además en el ambiente periglacial y en la predicción de la presencia de permafrost es la temperatura promedio anual (MAAT por sus siglas en inglés), la cual es usualmente controlada por parámetros como la latitud, la altitud y la topografía (Barry, 1992; Whiteman, 2000) considerando los efectos de los patrones de circulación atmosférica, las diferencias globales y locales de la potencial radiación solar entrante (PISR por sus siglas en inglés). Para regionalizar o interpolar los datos de las estaciones meteorológicas muchos estudios utilizan regresión con una combinación de predictores que representan la elevación, la posición geográfica, además de fenómenos climáticos locales, sujeto a la disponibilidad de datos y la escala del área de estudio (Lee y Hogsett, 2001; Hiebl *et al.*, 2009).

Otros indicadores indirectos están relacionados a ciertas variables que no son directamente indicadoras de condiciones de permafrost, sin embargo, permiten hacer algunas inferencias acerca de su presencia o ausencia. Entre estos indicadores se encuentran mediciones de la temperatura basal de la nieve (*Bottom temperature of snow cover*, BTS; Permanet, 2013), de las temperaturas superficiales (*ground surface temperature*, GST; Hoelzle, Wegmann y Krummenacher, 1999) y la distribución de la vegetación y la cubierta de nieve (Etzelmüller *et al.*, 2001), además de la relación entre la ya mencionada temperatura promedio anual (MAAT) y la altura (Barsch, 1978).

## **2.2 Cambio climático**

El clima se define como el promedio a largo plazo de las variables meteorológicas en una región. El clima está determinado principalmente por la circulación atmosférica a grandes escalas y por la geografía. De esta forma el clima caracteriza en parte los emprendimientos humanos y los ecosistemas en una región. El clima puede variar a distintas temporalidades desde siglos como ha sido observado en registros atmosféricos a cientos de miles de años. Esto debido, principalmente a factores naturales como la inestabilidad del sistema atmósfera-océanos-criósfera, actividad volcánica, cambios en la corteza continental debido a la tectónica de placas, etc. Sin embargo, un incremento en la concentración de gases invernadero en los últimos siglos, especialmente desde mediados del siglo XIX con la industrialización, es una consecuencia directa de la quema de combustibles fósiles y otras actividades antropogénicas. (Garreaud, 2011).

Cualquier estimación de los cambios observados en Chile se complica debido a la escasa y dispar distribución de estaciones de seguimiento climático en las últimas décadas (Garreaud, 2011). Según Falvey y Garreaud (2009), las variaciones de temperaturas son diferentes dependiendo de la zona, mientras que las temperaturas en el océano y a lo largo de la costa muestran tener bajas de 0.15°C/década, las estaciones en el valle central muestran un ligero aumento y las temperaturas en cordillera (donde se encuentra el área de estudio), muestran

un aumento significativo de casi  $0.25^{\circ}\text{C}/\text{década}$ . El enfriamiento costero y el calentamiento sobre los Andes se verifica en la zona central y norte de Chile.

Datos más actuales muestran, por ejemplo, en 2021 una temperatura media en Chile continental de  $13.47^{\circ}\text{C}$  como se muestra en la Figura 6, siendo el cuarto año más cálido en los últimos 61 años, además  $0.5^{\circ}\text{C}$  más cálido que el promedio entre 1981-2010. De los 10 años más cálidos, 8 se han presentado en las últimas 2 décadas, donde la posición del 2021 en el ranking nos sugiere el dominio de la señal de cambio climático frente a la variabilidad natural del clima, debido que, a pesar de haber estado frente a un evento moderado de La Niña, de igual forma se mantuvo dentro del ranking de los más cálidos de la historia (Villarroel *et al.* 2022).

De acuerdo con Villarroel *et al.* (2022) la altura de la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  es una representación del nivel de altura en donde la temperatura está a  $0^{\circ}\text{C}$ , en donde el área por debajo se encuentra a una mayor temperatura y por sobre ésta a menor temperatura, delimitando las zonas que recibirán precipitación líquida (agua) y sólida (nieve). Este concepto tiene relevancia en el contexto de cambio climático, pues ha ocurrido un aumento de la temperatura del aire en las últimas décadas lo cual sería responsable de un desplazamiento en la altura de la isoterma 0 a niveles más altos, generando una reducción de la superficie andina que recibe nieve, por lo que disminuye la disponibilidad de agua y contribuye a sequías, en especial en el periodo estival (Villarroel *et al.* 2022).

El año 2021 se registraron días con altura de isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  extrema, destacando los meses de invierno y verano con una mayor cantidad de días donde la isoterma se encontró a una altura más alta de lo normal. La tendencia de la isoterma cero durante el periodo 1981-2021 mostrado en la Figura 7 para la zona norte, representada por Antofagasta, muestra un incremento de  $36\text{ m}/\text{década}$  (Villarroel *et al.* 2022).

Por otra parte, ante eventos de precipitación importantes hay un incremento de la escorrentía de aguas lo cual podría influir en la ocurrencia de remociones en masa como por ejemplo flujos de detritos, por lo que es prioritario monitorear su comportamiento (Villarroel *et al.* 2022). De acuerdo con Villarroel *et al.* 2022 se registra un déficit de la precipitación anual en Chile, en particular, en 2021 se alcanzó un déficit de 43% en promedio siendo el segundo año más seco desde 1961 y la precipitación en el país está disminuyendo a razón de un 4% por década durante los últimos 61 años. Otro dato importante y aplicado a la zona de estudio es el hecho de que durante el año 2021 las estaciones cordilleranas de la zona norte presentaron precipitación bajo el promedio, salvo algunas excepciones en la Región de Antofagasta (Villarroel *et al.* 2022). Desde la Región de Atacama al sur se observaron déficit de agua caída, siendo los más importantes entre las regiones de Atacama y Metropolitana con valores cercanos al 70% en promedio. Entre las Regiones de O'Higgins y Los Lagos el déficit se ubicó en torno al 40% (Villarroel *et al.* 2022).

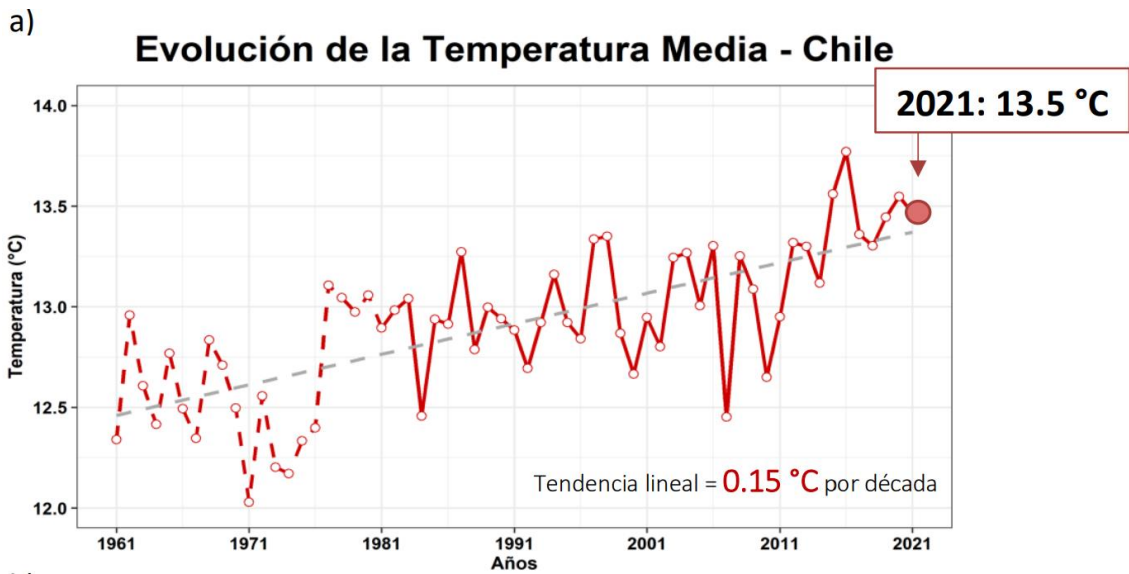


Figura 6: Promedio anual de la temperatura media en Chile continental utilizando 109 estaciones. La línea segmentada roja es el promedio de 19 estaciones históricas con sesgo corregido, línea segmentada gris indica la tendencia lineal. Extraído de Villarroel et al. (2022)

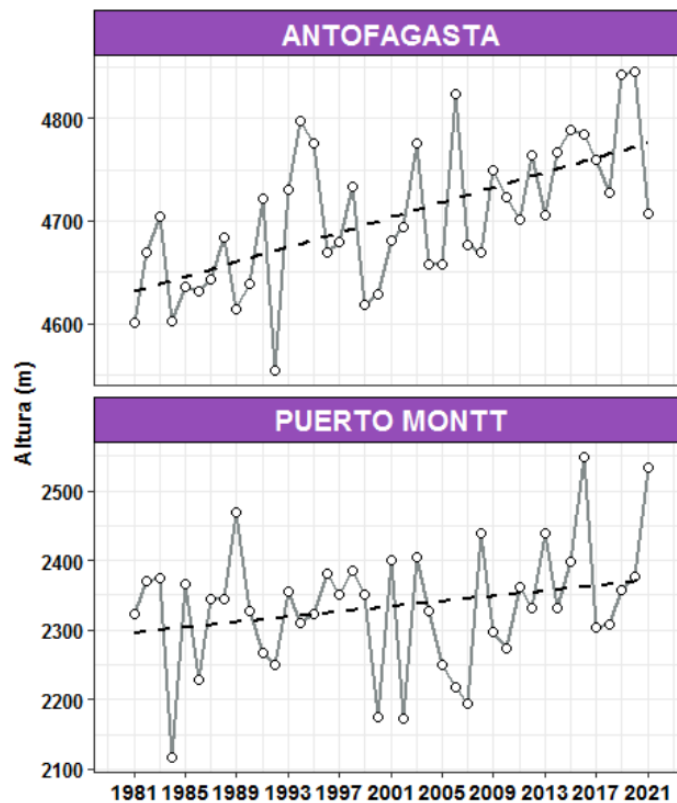


Figura 7: Altura de la isoterma cero (línea continua), tendencia lineal (línea punteada). Extraído de Villarroel et al. (2022).

## 2.3 Remociones en masa y susceptibilidad

El concepto de remociones o movimientos en masa incluye aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de gravedad (Cruden, 1991). Según el tipo de remoción en masa puede variar la velocidad del proceso. Hay remociones lentas, a veces prácticamente imperceptibles y difusas como por ejemplo la reptación de suelos. Otros movimientos como algunos deslizamientos pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de rotura (Crozier, 1999. Glade y Crozier, 2005).

En la literatura científica se encuentran muchas clasificaciones de movimientos en masa, la mayoría de ellas se basan en el tipo de materiales, los mecanismos de movimiento, el grado de deformación del material y el grado de saturación. Las clasificaciones de movimientos en masa de Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988) y sus modificaciones o adaptaciones son, hoy en día, los sistemas más ampliamente aceptados en el mundo de habla inglesa e hispana. Varnes (1958 y 1978) emplea como criterio principal en la clasificación, el tipo de movimiento y, en segundo lugar, el tipo de material. Así, divide los movimientos en masa en cinco tipos: flujos, caídas, deslizamientos, volcamientos y propagaciones. Además, divide los materiales en dos clases: rocas y suelos, éstos últimos subdivididos en detritos y tierra. De esta manera, presenta definiciones para varias posibles combinaciones de tipo de movimiento y material (Proyecto Multinacional Andino, 2007; Varnes, 1978).

Los flujos se definen como un tipo de remoción en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido, el que puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978).

Hungr *et al.* (2001) clasifica los flujos de acuerdo con el tipo y propiedades del material involucrado, la humedad, la velocidad, el confinamiento lateral y otras características que los hacen distinguibles; así mismo, aportan definiciones que enfatizan aspectos de uso práctico útiles para el estudio de amenazas. Es importante establecer la diferencia entre tipos de flujos, por ejemplo, flujo de detritos y avalancha de detritos. En el caso del flujo de detritos (movimiento en masa canalizado) el estudio de amenaza se deberá concentrar en una trayectoria pre-establecida o canal y en el área de depositación o abanico, áreas potencialmente afectadas. En cambio, una avalancha de detritos puede desplazarse sobre áreas abiertas en laderas de alta pendiente. Por supuesto las avalanchas de detritos con frecuencia encuentran un canal pre-existente y se convierten en flujos de detritos. Otra distinción importante de uso práctico para el estudio de amenazas es aquella entre flujos de detritos, crecidas de detritos e inundaciones, véase Figura 8. Las crecidas (*debris flood*) presentan un potencial destructivo relativamente bajo con respecto a los flujos de detritos (*debris flow*) (Hungr, 2005). Según Hungr *et al.* (2014) las crecidas de detritos son rápidos flujos de agua con una gran carga de detritos a lo largo de un canal, también se les llama

flujos hiperconcentrados (Hungar *et al.* 2001). Por otro lado, una inundación se caracteriza por tener menos de un 20% de detritos, siendo mayoritariamente agua (Muñoz *et al.* 2018).

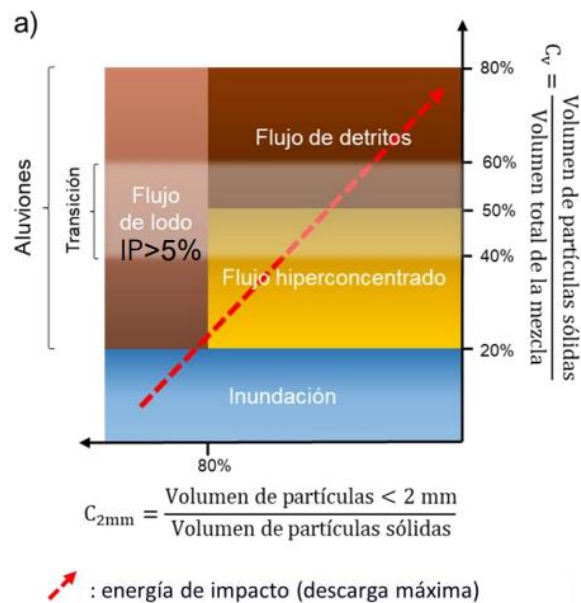


Figura 8: Clasificación de flujos de acuerdo con su granulometría y al porcentaje de partículas sólidas Extraído de Muñoz *et al.*, 2018.

Por otro lado, la caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable. Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento (Varnes, 1978). Hungar *et al.* (2014) hace una distinción entre caídas de roca y caídas de bloque/detrimento/limo, sin embargo, debido a la escala de trabajo para la fotointerpretación solo fueron identificadas las caídas de rocas.

Por último, los deslizamientos se definen como un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante. En el sistema de Varnes (1978), se clasifican los deslizamientos, según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material, en traslacionales y rotacionales. Los deslizamientos traslacionales a su vez pueden ser planares o en cuña. Sin embargo, las superficies de rotura de movimientos en masa son generalmente más complejas que las de los dos tipos anteriores, pues pueden consistir en varios segmentos planares y curvos, caso en el cual se hablará de deslizamientos compuestos. (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

La susceptibilidad, es definida por Sepúlveda (1998) como la potencialidad o capacidad de que ocurra un evento peligroso en un área determinada y el Índice de Susceptibilidad (IS) es el cuantificador de esta condición, usualmente medida en porcentaje (de 0 a 100). Por lo que es importante definir los factores condicionantes que presenta el terreno para un posterior

cálculo de Índice de Susceptibilidad (IS) y dependen directamente de los tipos de remociones en masa a analizar. Por otro lado, se entiende como peligro geológico, o amenaza, a la ‘condición o proceso geológico potencialmente catastrófico’ o bien a la ‘probabilidad de que suceda un evento de este tipo durante un periodo de tiempo en un sitio dado’ (Hauser, 1985; Sepúlveda, 1998). Mientras que riesgo geológico es la cuantificación de vidas perdidas, personas damnificadas, daños en edificaciones, entre otras, que causaría la ocurrencia de un fenómeno peligroso (Varnes, 1984).

## **2.4 Efectos del cambio climático en la degradación del permafrost y remociones en masa**

De acuerdo con Kääb *et al.* (2007) dentro del ambiente periglacial las laderas cementadas por hielo y los glaciares rocosos presentan una fuerte dependencia de su entorno, especialmente de las condiciones climáticas, efectivamente los distintos niveles de altitud en donde se ubican los glaciares rocosos activos, inactivos y fósiles indican que variaciones en la temperatura atmosférica pueden afectar la velocidad y el grado de actividad de los glaciares rocosos. Kääb *et al.* (2007) también estima cambios en la velocidad estacional de glaciares rocosos de hasta un 15% junto con cambios en la velocidad a escala de una década de un 100% con un aumento de la temperatura atmosférica de hasta 1°C.

De esta forma según Humlum (2000) el límite inferior del permafrost de montaña puede trasladarse hacia alturas superiores a medida que incrementa la temperatura atmosférica. Además, glaciares rocosos pueden decaer en su actividad y finalmente perder parcial o totalmente su contenido de hielo. Así, cambios en el clima además de afectar las condiciones térmicas asociadas a los glaciares rocosos, influyen en la actividad geomorfológica de las laderas que alimentan de detritos estas formas (Humlum 2000).

Las alteraciones térmicas del subsuelo pueden ser causadas también por cambios en los regímenes de precipitación con la variación de número de días con cobertura nival que inhibe el intercambio de flujos de energía con la atmósfera (Apaloo *et al.* 2012 como se citó en Atacama Ambiente, 2021). De esta forma, el aumento de la temperatura en la atmósfera y el subsuelo genera una respuesta geomorfológica cambiando las tasas de desplazamiento en glaciares rocosos, cambiando el volumen y extensión de laderas inestables además del cambio en la frecuencia, magnitud y volumen de movimientos en masa (Kellerer-Pirklbauer *et al.* 2011).

De acuerdo con Atacama ambiente (2021) las laderas rocosas o de material no cohesionado en la alta montaña pueden contener permafrost rico en hielo que puede ser afectado variaciones en la temperatura asociadas al cambio global. Esto tiene implicancias en la generación de peligros naturales como flujos de detritos además de la hidrología de las cuencas (Atacama ambiente, 2021). La degradación del permafrost en las laderas de montañas es capaz de liberar detritos antes cementados por hielo que son fácilmente

erosionables durante el deshielo en primavera o lluvias generando remociones en masa (Atacama ambiente, 2021).

Ikeda *et al.* (2008) plantea una retroalimentación positiva en la deformación de laderas cercanas al límite inferior del permafrost de montaña. Un aumento en las temperaturas incrementa la deformación de la ladera lo cual permite mayor infiltración de agua, aumentando a su vez la deformación de ladera. Por otro lado, la ausencia de hielo en las laderas podría modificar las tasas de recarga de acuíferos y de los caudales superficiales.

De esta forma un aumento en la temperatura y variaciones en los niveles de precipitación atribuido al cambio climático podrían generar un aumento en la frecuencia y magnitud de las remociones en masa en zonas donde se degrade el permafrost, debido a esto es importante considerar conceptos asociados al ambiente periglacial en evaluaciones de susceptibilidad de zonas pertinentes. Si bien no hay abundantes estudios públicos sobre la degradación del permafrost en Chile, existen mapas de probabilidad de permafrost que podrían dar pistas de su efecto en la generación de remociones en masa, por lo que es apropiado adaptar metodologías para que integren la relación de las dinámicas del permafrost en el estudio de la susceptibilidad, de esta manera el presente estudio pretende ser un primer acercamiento para incluir el permafrost como factor condicionante en evaluaciones de susceptibilidad.

#### **2.4.1 Impacto térmico e hidrológico en el permafrost**

Las variaciones de temperatura en la roca y la percolación del agua en la roca fracturada fría con los correspondientes cambios de fase ocurren acompañados de un intercambio de calor latente, fuertes cambios en la permeabilidad hidráulica y la resistencia mecánica, además de una alteración del campo de tensiones (Deline *et al.*, 2015).

En el sistema de poros de una roca compacta, el contenido de agua en estado líquido y su permeabilidad hidráulica cambian gradualmente por debajo del punto de congelación (Kleinberg y Griffin, 2005). En este rango de temperaturas se espera que la roca empiece a fracturarse y formar lentes de hielo donde las tensiones criogénicas superan la resistencia de la roca y la sobrecarga (Deline *et al.*, 2015). Por otro lado, midiendo emisiones acústicas en rocas metamórficas del lecho rocoso alpino se detecta fracturamiento por congelamiento significativamente bajo los 0°C (Girard *et al.*, 2013 citado en Deline *et al.*, 2015).

Para rocas de baja porosidad la hidrología está controlada principalmente por la permeabilidad del sistema de fracturas (Deline *et al.*, 2015). Pogrebiskiy y Chernyshev (1977) descubrió cambios relevantes de la permeabilidad en granitos fisurados respecto a la roca intacta. Por un lado, el granito fisurado congelado tiene de 1 a 3 órdenes de magnitud menos permeabilidad que la roca descongelada idéntica, lo cual podría indicar que el permafrost saturado del lecho rocoso fracturado actúa como un acuícludo y es importante para el desarrollo de los niveles de agua encaramados y las correspondientes presiones hidrostáticas (Deline *et al.*, 2015).



Los procesos hidrotermales juegan un papel muy relevante para las condiciones hidrostáticas y térmicas en los posibles planos de falla en el lecho rocoso fracturado, pues, la absorción de calor del agua de percolación de la superficie permite el derretimiento del hielo dentro de las fracturas de la roca (Deline *et al.*, 2015).

Desde un punto de vista mecánico la resistencia de la roca con permafrost y el campo de tensión del subsuelo cambian con la temperatura y las condiciones hidráulicas (Deline *et al.*, 2015). El cambio en las tensiones ocurre debido a las presiones crioestáticas e hidrostáticas adicionales y al forzamiento termomecánico (Deline *et al.*, 2015). Un incremento de la presión crioestática de unos pocos megapascuales puede derivarse del hielo, mientras que la expansión en el volumen del agua en proceso de congelación rápida puede causar tensiones de mayor magnitud que disminuyen rápidamente debido a la extrusión del hielo (Matsuoka y Murton, 2008). La presión hidrostática puede provenir del agua subterránea atrapada en el lecho rocoso por una capa impermeable de permafrost (Fischer *et al.*, 2010), o de la entrada de agua derretida en el lecho rocoso fracturado con permeabilidad limitada (Deline *et al.*, 2015). Esto reduce el estrés normal efectivo y como consecuencia de la fricción de un potencial plano de falla, o simplemente aumenta las fuerzas gravitacionales en una pendiente descendente (Deline *et al.*, 2015). Los cambios de la temperatura en el macizo rocoso conducen a cambios de volúmenes por contracción o expansión térmica y por lo tanto a cambios en la tensión dentro del macizo rocoso fracturado o (Gischig *et al.*, 2011).

En el contexto actual de cambio climático donde la temperatura atmosférica está en aumento Villarroel *et al.* (2022), las zonas con presencia de permafrost sufren mayor frecuencia en los ciclos de congelamiento y descongelamiento de las rocas y el suelo (Atacama Ambiente, 2021), de esta forma la degradación del permafrost puede ocurrir a diferentes escalas temporales y espaciales y es muy sensible a las condiciones de la superficie del lecho rocoso, por ejemplo, el extremo calor en los veranos o la desaparición de delgadas capas de hielo conducen al engrosamiento de la capa activa (Noetzli y Gruber, 2009).

Según Buchli *et al.*, (2013) un aumento del grosor y profundidad de la capa activa induce cambios en la circulación del agua de suprapermafrost (agua presente en suelos no congelados, por encima de suelos permanentemente congelados, en la capa activa, entre la superficie del terreno y el tope del permafrost (Gómez-Lende, 2016)). En terrenos de altas pendientes las remociones en masas también podrían comenzar desde la capa activa. Una mayor profundidad de deshielo aumenta la disponibilidad de material suelto para un movimiento en masa de mayor magnitud. Por otro lado, el suelo congelado en profundidad limita la erosión regresiva durante un evento, pero además la infiltración de agua, que podría desencadenar un movimiento en masa (Deline *et al.*, 2015).

La infiltración de agua y la formación de talik (parte del suelo no congelado emplazado en un área con permafrost, a causa de una anomalía local bajo condiciones térmicas, hidrogeológicas o hidro-químicas (Gómez-Lende, 2016)), son favorecidos por el calentamiento/degradación del permafrost (Zenklusen Mutter y Philips, 2012 citado en Deline *et al.* 2015). Al aumentar la temperatura, el hielo disminuye su viscosidad y las tasas

de reptación de permafrost aumentan de forma no lineal, acelerándose cuando la temperatura se acerca a los 0°C (Kaab *et al.*, 2007).

La infiltración de agua puede ocurrir en glaciares rocosos con temperaturas cercanas al punto de fusión generando recarga de los acuíferos dentro o bajo el permafrost por deshielo o una lluvia intensa. Se han reportado desestabilizaciones de glaciares de roca con una aceleración significativa de deslizamiento cuyo inicio parece ser, al menos en algunos casos una respuesta directa a condiciones de hielo más cálidas (Deline *et al.*, 2015).

#### **2.4.2 Algunos estudios que relacionan el efecto de la degradación del permafrost y las remociones en masa**

Si bien en Chile no abundan estudios de remociones en masa en ambiente glacial o periglacial y son aún más escasos estudios de remociones en masa atribuidos a la degradación de permafrost (Atacama Ambiente, 2021), en otros lugares del mundo ya ha sido inferida esta relación, particularmente en Los Alpes (Deline *et al.*, 2015).

Deline *et al.* (2015) explica como los peligros relacionados con la degradación del permafrost en las laderas de escombros se pueden subdividir en (1) peligros directos debido a los movimientos de las formaciones periglaciales, especialmente los glaciares de roca; (2) peligros indirectos inducidos por el suministro de escombros del permafrost activo o en degradación; y (3) características de termokarst debido al derretimiento del hielo intersticial

Refiriéndose a los peligros directos debido a los movimientos de las formaciones periglaciales, las tasas de fluencia de los glaciares de roca dependen del estado térmico del permafrost (Kääb *et al.*, 2007; Delaloye *et al.*, 2008 citados en Deline *et al.* 2015). La relación entre el calentamiento atmosférico, las olas de calor extremo y la aceleración o desestabilización de muchos glaciares de roca en los Alpes durante las últimas décadas puede explicarse por (1) la menor viscosidad del hielo más cerca del punto de fusión, (2) posiblemente el inicio del deslizamiento basal en algunos casos, y (3) una mayor presencia de agua intersticial descongelada (Deline *et al.*, 2015). Por ejemplo, la desestabilización de los glaciares de roca Petit-Vélan y Tsaté (Alpes del Valais) entre 1988 y 1995 sucedió junto al fuerte aumento de la temperatura del permafrost que se produjo alrededor de 1990 (Delaloye y Morard, 2011; Lambiel, 2011, citados en Deline *et al.*, 2015), y el colapso del glaciar de roca Bérard fue provocado por las olas de calor del verano de 2003 y 2006 (Krysiecki, 2009).

La conexión entre la degradación del permafrost y los flujos de escombros han recibido una mayor atención en parte por los de sucesos catastróficos en los Alpes suizos durante el verano de 1987, que desencadenaron numerosos flujos de escombros en laderas empinadas cubiertas de labranza desglaciadas desde el final de la LIA (del inglés *Little Ice Age*) (Zimmermann y Haerberli, 1992). Los frentes de glaciares de roca también proporcionan cantidades

significativas de escombros a los sistemas torrenciales (Zischg *et al.*, 2011), aunque esta relación no es necesariamente directa. En sistemas limitados por escombros (detritos) las variaciones en el suministro de escombros debido a la degradación del permafrost podrían conducir a un aumento de la magnitud y frecuencia de los flujos de escombros, y una fuerte desestabilización podría incluso desencadenar una crisis torrencial (Deline *et al.* 2015).

Un ejemplo de otro tipo de remoción en masa relacionado con la degradación del permafrost es el caso de *Mont Blanc*, donde Ravelin *et al.* (2012) analizó caídas de rocas en *Arete des Cosmiques* por alrededor de quince años con especial atención en caídas de rocas de más de 600 m<sup>3</sup> que afectaron parte de un refugio en 1998. En esta zona cambios en la acumulación de hielo son demostrados con mapas topográficos de las décadas de 1950 y 1970 que muestran cubiertas de hielo en la zona este y sureste del refugio, además entre 1979 y 2003 el grosor de la capa de hielo disminuyó 40 metros y en la actualidad la zona ya no presenta hielo.

Según Deline *et al.* (2015) la caída de rocas de 1998 afectó una losa que tenía una base cubierta de hielo hasta ese año, mientras que una caída de rocas de 2010 al este del refugio posiblemente estuvo relacionada con el reciente descenso de un glaciar. De esta forma la presencia observada de permafrost dentro del macizo rocoso y la concentración de caídas de roca al final de periodos cálidos sugiere que la degradación del permafrost podría haber contribuido a su ocurrencia y el caso *Cosmiques* destaca como el monitoreo de taludes rocosos y permafrost glaciares es necesario para la sustentabilidad de la infraestructura y la gestión de riesgos en zonas de alta montaña (Bommer *et al.*, 2010).

Es común la interacción y transición entre diferentes tipos de remociones en masa pudiendo tener consecuencias inesperadas que estando relacionados a la pérdida de hielo pueden ser aún más catastróficas de la que es comúnmente anticipado (Evans y Delaney, 2014). La caída de rocas de Ritzlihorn en Suiza en 2009 asociada a la pérdida de hielo generó acumulación de material que formó parte de una serie de flujos de detritos durante intensas lluvias en 2009 y 2010 dañando una carretera y cañerías de gas transnacionales (Huggel *et al.*, 2012). Otro ejemplo es una gran caída de rocas en la cara norte de Piz Cengalo, en el valle Bergell en el 2010 en suiza depositando 2-3 Mm<sup>3</sup> de escombros siendo parte de estos arrastrados durante una tormenta en 2012 por flujos de detritos catastróficos que viajaron 4 kilómetros afectando las cercanías del pueblo de Bondo (Deline *et al.*, 2015). La disponibilidad de detritos que aún persisten a partir de la caída de rocas asociada a pérdida de hielo hace esperable que los flujos de detritos persistan durante varios años (Deline *et al.*, 2015).

## 2.5 Metodologías para evaluar susceptibilidad y peligro de remociones en masa.

Es posible distinguir a grandes rasgos 4 métodos utilizados en la evaluación y confección de mapas de susceptibilidad del terreno a producir roturas de las laderas (Lorentz *et al.* 2016; Van Westen, 1994; Soeters *et al.* 1996 citados en Londoño *et al.*, 2017):

1) Determinísticos: Asociados a estudios de la geotecnia de laderas donde se evalúan y cuantifican las propiedades físicas de las laderas aplicando métodos matemáticos específicos para obtener un factor de seguridad (Molina *et al.*, 2017).

2) Heurísticos: En este tipo de modelo el análisis queda a criterio de un experto que asigna pesos o valores (cuantificando la susceptibilidad o el grado de importancia) a una serie de mapas temáticos que representen factores condicionantes relacionados con la ocurrencia de remociones en masa (Cardozo, 2003). Los factores elegidos se suman de acuerdo con una ponderación dando como resultado valores que representan la susceptibilidad que pueden ser agrupados en categorías (Van Westen *et al.*, 1997).

3) Estadístico-probabilísticos: Este tipo de análisis relaciona mapas temáticos de factores condicionantes o parámetros implicados en la inestabilidad de laderas con la distribución espacial de las remociones en masa (Molina *et al.*, 2017) para lo cual se requiere de un inventario o catastro de estas.

4) Geomorfológicos: En este análisis el grado de susceptibilidad del terreno es determinado de manera directa por un experto y sus observaciones en terreno en base al conocimiento y experiencia del investigador (Albornoz, 2018).

Entre los métodos más conocidos y utilizados están los modelos multivariantes. Estos analizan la interacción y dependencia de un conjunto de factores que condicionan la generación de movimientos en masa. Los métodos más utilizados suelen ser la regresión múltiple y análisis discriminante (Jones *et al.* 1961; Neuland 1976; Carrara 1983; Baeza *et al.* 2001). El resultado es una serie de funciones de acuerdo con la presencia/ausencia de remociones en masa que son combinación lineal de los factores de mayor relevancia estadística en la definición de la inestabilidad y consecuente generación de movimientos en masa (Londoño 2017).

Según Londoño *et al.* (2017) el análisis discriminante busca dividir las laderas o unidades del terreno en dos grupos (estable e inestable) utilizando un conjunto de parámetros característicos de las mismas (por ejemplo, orientación, rugosidad, cobertura vegetal, pendiente, litología, entre otras variables disponibles, cuya influencia dependerá del área de estudio). Esta técnica busca la separación óptima de las dos poblaciones, minimizando el error en la clasificación de las laderas previamente identificadas como estables o inestables. Las variables independientes seleccionadas se combinan de forma lineal y la función discriminante adopta la forma:  $D = d_1V_1 + \dots + d_nV_n$ . Donde  $V_i$  son las variables

independientes de mayor relevancia estadística,  $D_i$  son los coeficientes de clasificación estimados y  $D$  es el valor discriminante de la función. Actualmente los sistemas de información geográfica (SIG) permiten operar de mejor manera grandes volúmenes de información y la aplicación de técnicas cuantitativas en la evaluación de la susceptibilidad (Bianchini *et al.* 2016; Chacón *et al.* 1992; Santacana *et al.* 2003). A través del uso de sistemas de información geográfica-geológica (SIGG), los factores analizados pueden obtenerse de forma automática o semiautomática, en algunos casos con un menor costo, gracias a imágenes satelitales como modelos digitales de elevación (MDE), o imágenes multibanda permitiendo ser almacenados y analizados de forma digital.

Aleotti y Chowdhury (1999) desarrolla dos escenarios para la evaluación de peligros por remociones en masa, uno cuantitativo y otro cualitativo. La experiencia en terreno y la generación de mapas de parámetros índices sobrepuestos son la base para la determinación cualitativa de susceptibilidades y peligros geológicos. Por otro lado, el escenario cuantitativo está dado por análisis estadísticos, análisis geológicos-geotécnicos determinísticos o probabilísticos y generación de redes neuronales. Popescu (2000) se basa en la evaluación de dos grupos de factores para determinar la generación de un evento de remoción en masa: los factores que preparan a la ladera y que la convierten en una zona susceptible de ser movilizada (que corresponde a los factores condicionantes) y los gatillantes (llamados también factores desencadenantes), que se encargan de desencadenar el evento.

Lara (2007) y Muñoz (2013) postulan metodologías de evaluación de susceptibilidad de remociones en masa que permiten determinar un índice de susceptibilidad basado en la suma de puntajes ponderados para distintos factores condicionantes de algunos tipos de fenómenos de remociones en masa. Ambos métodos difieren básicamente en la escala de su aplicación.

Las principales etapas consideradas en las metodologías de Lara (2007) y Muñoz (2013) son:

- Estudios preliminares de gabinete: investigación y recopilación de información y antecedentes para la zona de estudio, revisión de material bibliográfico, etc.

- Trabajo de terreno: observación y caracterización de los factores condicionantes de la zona de estudio, tales como geología y estructuras, geomorfología, condiciones hidrológicas e hidrogeológicas, características de la vegetación y clasificación geotécnica de las unidades de roca y suelo presentes en el área, con el objetivo de confeccionar un mapa geológico básico que reúna las unidades reconocidas en la zona de estudio. Se delimita las unidades de suelo y roca que se han identificado, indicando su caracterización, distribución espacial y la geología estructural presente.

- Trabajo de gabinete: división de la zona de estudio en unidades geomorfológicas mediante definición de rasgos geomorfológicos y geológicos similares, y evaluación de susceptibilidad a generación de remociones en masa mediante el cálculo de un índice de susceptibilidad. (Campos 2014).

En Chile, a pesar de la evidencia de un aumento en la temperatura atmosférica atribuida al cambio climático (Villarroel *et al.* 2022) hasta el momento no se han realizado evaluaciones de susceptibilidad que consideren la distribución de permafrost o su degradación de manera directa o semidirecta. Los mayores acercamientos ligados al efecto que este pudiera tener están asociados con estudios que integran la exposición al sol o en algunos casos la elevación que integra de manera indirecta efectos de procesos de hielo y deshielo sin considerar mapas de distribución o probabilidad de existencia de permafrost, menos aún su degradación de manera más directa.

El presente documento busca adaptar y aplicar una metodología semicuantitativa en la zona alta de la cuenca del río Huasco, para integrar el efecto de la retirada del permafrost como factor condicionante debido al contexto de cambio climático.

### **3. Antecedentes**

En este capítulo se introducen antecedentes generales del área de estudio como son la geomorfología, el clima, geología y mapas o estudios de glaciares rocosos y permafrost. Estos antecedentes junto con sus mapas temáticos fueron de utilidad para el conocimiento de la zona y la elección y uso de factores condicionantes en la metodología.

#### **3.1 Geomorfología**



*Figura 9: Nacimiento del río Huasco en la intersección de los ríos y valles El Tránsito (Izquierda) y El Carmen (Derecha), Fotografía de Alturas Oceánicas, 2010.*

Comprendida entre los paralelos  $28^{\circ}30'$  y los  $29^{\circ}40'$  de latitud sur aproximadamente, la cuenca del río Huasco tiene una superficie de  $9.813,75 \text{ km}^2$  (División de planificación y desarrollo, 2013). El río Huasco se forma la localidad de en Junta del Carmen a 90 km de su desembocadura en el mar, por la confluencia de los ríos El Tránsito, que viene del noreste, y El Carmen que viene del sureste, como se aprecia en la Figura 9. De esta forma la cuenca del Río Huasco está conformada por 3 Subcuencas y por 20 subsubcuencas (Tapia, 2014). Las subcuencas corresponden al Río El Tránsito, Río El Carmen y Río Huasco (véase Figura 10). De estas, la subcuenca del río El Tránsito es la que presenta mayor área con una superficie de  $4.135 \text{ km}^2$  (41,9% de la cuenca del Río Huasco), la subcuenca de Río El Carmen tiene una superficie de  $2860 \text{ km}^2$  (31% de la cuenca del Río Huasco) y finalmente la subcuenca del río Huasco con un 27,1% del área de la cuenca homónima (División de planificación y desarrollo, 2013).

El relieve de la cuenca del Río Huasco se caracteriza por la alternancia sucesiva de cordones montañosos y valles de sentido transversal. La Cordillera de la Costa es discontinua, producto de la presencia de estos cordones transversales, y en menor medida por la erosión marina, dando cabida a planicies costeras amplias en la zona de Chañaral (División de planificación y desarrollo, 2013). El valle del Huasco puede dividirse morfológicamente en dos sectores en los 88 km de longitud del río hasta que desemboca en el mar, al norte de la ciudad del mismo nombre. En el primer sector, desde el nacimiento de este curso y la desembocadura

de la quebrada El Jilguero, a 5 Km al oriente de Vallenar, el río escurre por un típico cajón cordillerano, en un lecho relativamente estrecho, confinado por altos cerros de roca mezoica (División de planificación y desarrollo, 2013). Las quebradas laterales interrumpen con sus conos de deyección el curso del río, desviándolo a uno y otro lado. El otro sector corresponde al río en su curso inferior, desde El Jilguero hasta la desembocadura en el mar, con longitud de aproximadamente 55 km, la caja del río se ensancha y el valle se presenta acompañado de extensas terrazas fluviales cuaternarias. Próximo a su desembocadura, al norte de la localidad de Huasco, la caja del río alcanza a más de 2 Km de ancho (División de planificación y desarrollo, 2013).

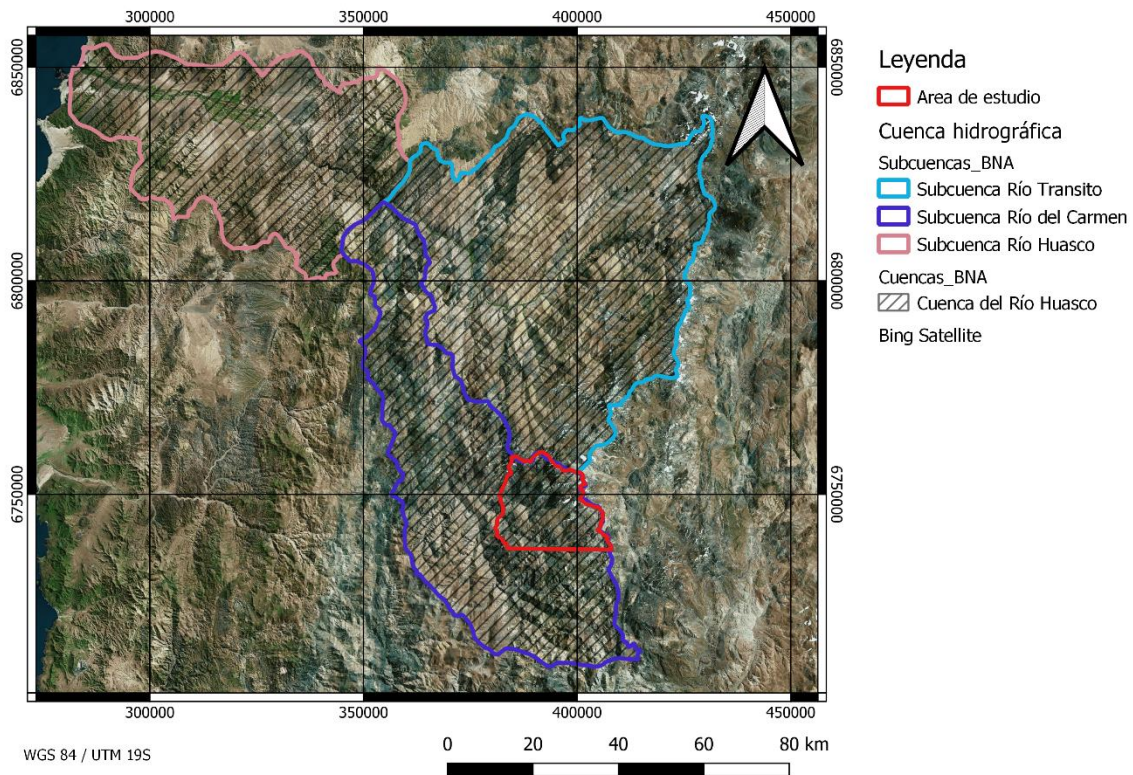


Figura 10: Cuenca del Río Huasco y subcuencas asociadas de acuerdo con la dirección nacional de Aguas. Elaboración propia.

### 3.2 Clima

El área de estudio se ubica en una zona de transición entre climas áridos y semiáridos donde la presencia del anticiclón del Pacífico Sur inhibe las precipitaciones favoreciendo cielos despejados y alta radiación solar (Gascoin *et al.*, 2011 citado en Azócar *et al.* 2017). La altura y morfología de los altos Andes controla la circulación atmosférica, permitiendo un clima Mediterráneo a Desértico en los valles más bajos, el que varía a un clima de Desierto Frío de Montaña, a alturas por sobre los 3.000 m s.n.m. hasta aproximadamente los 5.000 msnm



donde pasa a ser un clima de Tundra de Alta Montaña (Romero *et al.*, 1988 citado en Ortiz y Merino, 2015).

De acuerdo con Ortiz y Merino (2015), en el área de estudio las precipitaciones son escasas, generalmente en forma de nieve o granizo y ocurren principalmente en invierno entre los meses de julio y septiembre, además del “invierno altiplánico” en el verano con las mayores precipitaciones generalmente durante el mes de marzo. Los eventos pluviales en extremos intensos son poco probables en la zona, por ejemplo, aquel que provocó los aluviones que afectaron al Norte Chico entre el 24 y 25 de marzo de 2015 (véase Tabla 1). Los niveles de agua caída y sus efectos concuerdan con el valor umbral de 60 mm/día citado por Hauser (2000) como gatillante de los flujos aluviales en zonas de alta pendiente. Las precipitaciones generaron descargas aluviales, que al norte del área de estudio en la quebrada Las Pircas, desencadenó dos eventos con caudales del orden de 460 y 320 m<sup>3</sup>/s (Naranjo y Olea, 2015). Aunque no se cuenta con datos exactos del área de estudio, se registró un aumento del caudal que cortó el camino en varios tramos del río Potrerillos y Del Carmen. Eventos de similar magnitud se registraron en 1987, año especialmente lluvioso que registra un total de agua caída de 133 mm, con un máximo de precipitación diaria de 53 mm en el aeródromo de Vallenar (Rioseco y Tesser, 2008).

Estación	Ubicación		Precipitación (mm)				Temperatura (°C)		
	N	E	24/3	25/3	26/3	Total	24/3	25/3	26/3
Qda. Los Arroyos	7054160	501855	11	19	5,6	<b>35,6</b>	4,38/-4,41	1,29/-1,53	0,99/-7,19
La Ola	7073187	493576	18,6	35,8	10,2	<b>64,6</b>	7,85/-1,24	2,07/0	2,98/-4,32
Cine Inca	7096817	437415	15,5	58,4	3,5	<b>77,4</b>	14,9/10,8	11,6/8,6	12,3/8,9
Cobresal	7096181	437845	15,5	56	4,5	<b>76</b>	14,7/9,7	21,7/8,5	24,2/8,2
Intelec	7096181	437845	23,5	59,5	9,5	<b>92,5</b>	13,9/9,6	10,3/7,4	11/7,7
Pampa	7099177	393399	2,5	39	0	<b>41,5</b>	20,3/15,3	14,8/13,3	18,8/12,8
Austral N									
Pampa	7082022	394085	6	38	0	<b>44</b>	21,1/17,1	16,9/14,3	19,5/14,9
Austral S									
Población	7086045	339127	4,5	19,8	0	<b>24,3</b>	25,3/19,9	22,8/17,9	22,7/17,8
Aeropuerto									
Capitanía de Puerto*	7085121	337801	0	19,7	0	<b>19,7</b>	25,8/23,1	23,5/18	24/18,6

Tabla 1: Datos de precipitación y temperatura en estaciones meteorológicas en la cuenca del Salado y del salar de Pedernales. Coordenadas se encuentran en WGS84, temperaturas corresponden a la máxima y mínima de cada día. Extraído del Informe Evento Meteorológico de CODELCO (2015) en Grijalba (2016).

### 3.3 Fauna y Vegetación

Como zona de alta montaña, el área de estudio se caracteriza por la acumulación de nieve durante los meses fríos, cuya fusión contribuye al escurrimiento superficial y subterráneo que mantiene frágiles ecosistemas como las vegas, depósitos aluviales saturados en agua con desarrollo de suelo, donde se desarrolla una rica variedad de flora y fauna, con algunas especies endémicas (Hoffmann *et al.*, 1998 citado en Ortiz y Merino, 2015).

La vegetación de estas vegas brinda forraje a muchas especies silvestres como vicuñas, guanacos, burros, zorros, vizcachas y roedores (Iriarte, 2008), además de varias especies de lagartos (Pincheira-Donoso y Nuñez, 2005 citado en Ortiz y Merino, 2015), y aves desde pequeñas especies como chincoles hasta bandurrias y cóndores entre varias otras (Jaramillo

*et al.*, 2005 citado en Ortiz y Merino, 2015). La vegetación de la zona se adapta a los cambios de altura, desde una vegetación de matorral bajo, con especies arbustivas desérticas en los sectores de menor altitud, para dar paso, por sobre los 2.500 a 2.700 m s.n.m., a una vegetación de matorral bajo de altura y estepa. Por sobre los 3.500 m s.n.m., se desarrolla el Piso Andino Inferior, en el que predominan las especies “en cojín” como los yaretales y una variedad de pastos. A mayor altitud por sobre los 4.250 m s.n.m. se desarrolla una zona subnival o de desierto andino, con escasas especies vegetales, como algunas rosetas y escasos pastos de baja altura (Hoffmann *et al.*, 1998; CONAMA, 2008 citados en Ortiz y Merino, 2015).

### **3.4 Glaciares en la zona**

Gran parte de los cuerpos de hielo superficiales de los Andes semiáridos corresponden a pequeños glaciares o glaciaretos, es decir, cuerpos de hielo con superficie inferior a 0,1 km<sup>2</sup> (Azócar *et al.*, 2017). Un pequeño porcentaje de glaciares en esta zona posee más de 1 km<sup>2</sup> de área, concentrados en las cuencas del Río Elqui y Río Huasco. (Nicholson *et al.*, 2009; Rabatel *et al.*, 2011; UGP UC, 2010).

Las cumbres de la zona fronteriza, es decir, sobre los 5.100 m s.n.m. albergan un conjunto de glaciares fríos o glaciares de zonas áridas, únicos en los Andes chilenos, como por ejemplo los glaciares Guanaco (el más grande con 1,64 km<sup>2</sup> y 140 m de espesor máximo), Estrecho, Amarillo, Esperanza, Canito, Ortigas 1 y Ortigas 2. Son glaciares en extremo delicados, pues no se encuentran a 6.000 metros de altura donde se encuentra su zona de estabilidad y registran en ellos superficies de ablación (predominantemente) y períodos de acumulación, en el caso del glaciar Guanaco, su última acumulación de importancia ocurrió hace más de 50 años (Milana y Schmok, 2015). Es bastante común encontrar en los valles del área de estudio formas de erosión glacial y depósitos asociados como morrenas y depósitos fluvioglaciales, generados en los últimos eventos fríos. Según Zech *et al.* (2006) en el cajón del Encierro, el retiro definitivo de los glaciares habría ocurrido hace aproximadamente 12-10 ka. En efecto, toda la región parece haber transitado hacia condiciones de aridez, permitiendo el actual clima desértico de altura en las zonas altas de los Andes (Veit, 1996; Rutilant *et al.*, 1998). Este cambio en las condiciones climáticas es evidenciado desde el Paleógeno, período en que la paleoflora de esta latitud se adaptaba a un clima mucho más lluvioso y cálido que el actual (Villagrán *et al.*, 2004).

Con respecto a inventarios de glaciares y crioformas de la zona de estudio destaca el de Universidad de Atacama (2016) con un inventario de glaciares, ambiente periglacial y otras reservas criosféricas de la III región de Atacama donde además de glaciares descubiertos y cubiertos, se identifican otras crioformas como son glaciares rocosos, Protalus Lobe y laderas de crioflucción mostrados en la Figura 11. Para la cuenca del Río Huasco se identificaron 455 glaciares rocosos, siendo la cuenca con mayor concentración de estos en la Región de Atacama con 2.272 hectáreas (Universidad de Atacama, 2016). Según Azócar *et al.*, (2017) en las cuencas del Río Elqui y del Río Huasco cerca de un 50% de los glaciares rocosos

activos están localizados en zonas con una temperatura media anual promedio (MAAT) de valores negativos.

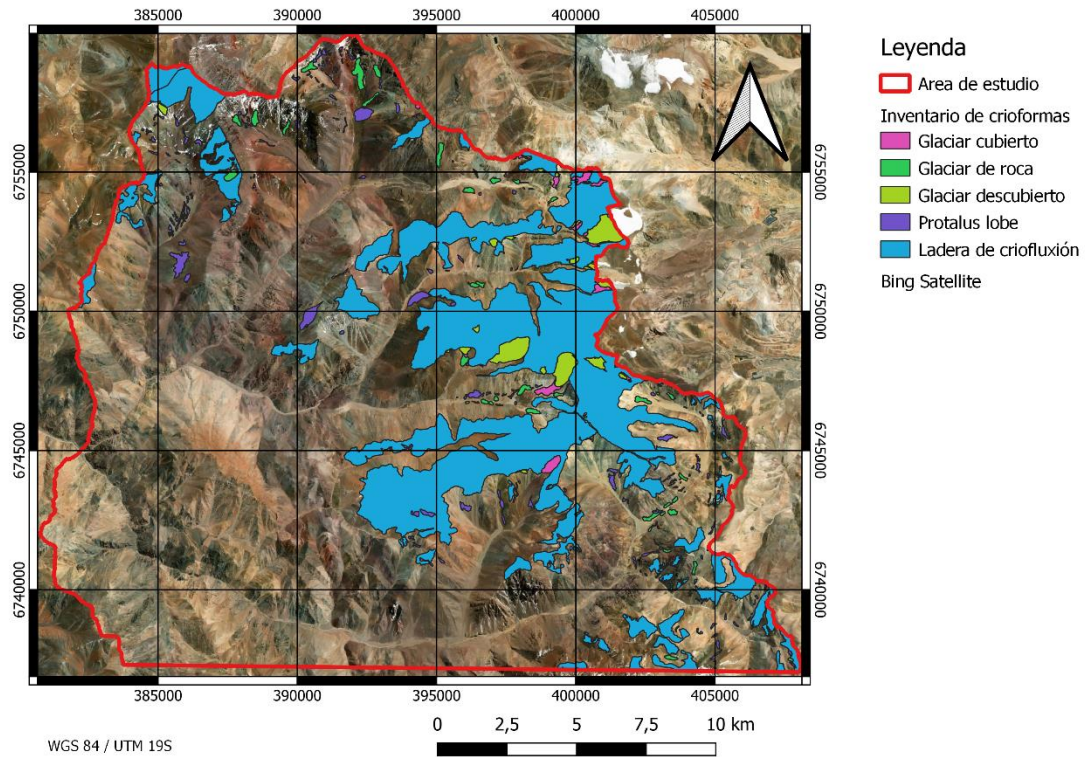


Figura 11: Inventario de Crioformas elaborado en Universidad de Atacama (2016). Elaboración propia.

Además, está disponible un inventario de glaciares de la DGA (Dirección General de Aguas) del año 2022 en el cual se identifican glaciares según la clasificación de UNESCO y también glaciares de roca en todo el territorio nacional con imágenes satelitales.

### 3.5 Modelos de distribución de permafrost en el área de estudio

En Chile son escasos los modelos de distribución de permafrost de montaña a lo largo del territorio. Existen al menos dos modelos regionales o globales que estiman la presencia de permafrost, el modelo global de zonificación de permafrost de Gruber con una resolución de 1 km x 1 km (*Permafrost Zonation Index, PZI*; Gruber, 2012) y el Modelo de Favorabilidad de Permafrost (*Permafrost Favourability Index, PFI*, Azócar *et al.*, 2017) que cubre las cuencas de los ríos Huasco, Elqui Limarí y Choapa incluyendo así la zona de estudio, con una resolución de 30 m x 30 m (Atacama Ambiente, 2021).

El modelo global de zonificación de permafrost de Gruber puede subestimar la distribución de permafrost debido a su resolución y variables de entrada del modelo por lo que debe usarse solo de manera referencial (Atacama Ambiente, 2021).

Por otro lado, el *Permafrost Favourability Index (PFI)* de Azócar *et al.*, (2017) cuya área está enfocada en la parte oeste de los Andes Semiáridos, aproximadamente entre los 29 y los 32° latitud Sur posee una mejor resolución de 30 m/px y está enfocado en superficies cubiertas por detritos. Ambos modelos indican tendencias de mayor distribución de permafrost en las cuencas de río Limarí, río Elqui, río Huasco y río Choapa. Véase Figura 12.

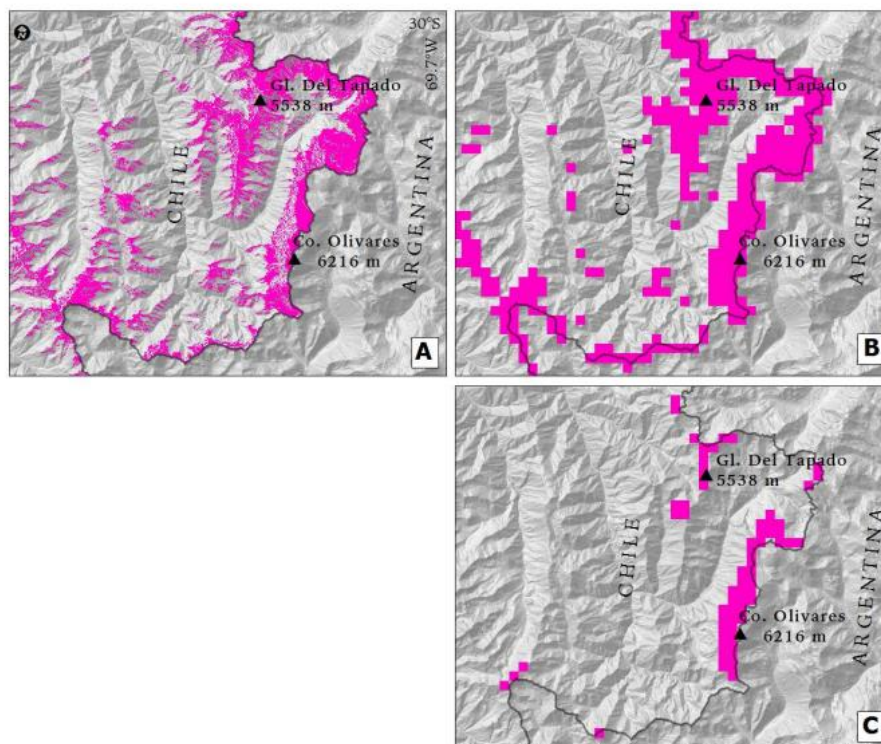


Figura 12: Comparación Visual entre Modelo de Gruber y Azocar para una probabilidad mayor al 75%. (A) Permafrost Favorability Index (PFI) de Azócar *et al.*, 2017 (con una resolución de 30 m/px), (B) PFI remuestreado a 1 km, (C) Permafrost Zonation Index (PZI) modelado por Gruber (2012,; con una resolución de 1 km/px). En Azócar (2013) Extraído de Atacama Ambiente (2021).

Otra ventaja del PFI radica en que incluye evidencia geomorfológica a través de la compilación de inventarios de glaciares rocosos para obtener una variable indicadora de la presencia de permafrost según su estado de actividad. De esta forma este mapa se crea a partir del modelado estadístico de las condiciones topográficas y climáticas, además del estado de actividad de los glaciares de roca. Considerando la radiación solar potencial entrante (Por sus siglas en inglés *PISR*) y la temperatura media anual del aire (Por sus siglas en inglés *MAAT*) como predictores potenciales para la favorabilidad de ocurrencia de permafrost. Con los parámetros mencionados anteriormente la generación del mapa índice de favorabilidad (*PFI* por sus siglas en inglés) en superficies con escombros (Azócar *et al.*, 2017) resultó a partir de un modelo generalizado aditivo (*GAM* Por sus siglas en inglés).

Si bien el modelo incluye los principales factores controladores de la distribución regional del permafrost en los Andes semiáridos chilenos, tales como la temperatura y la cantidad potencial de radiación solar en relación con la elevación y latitud (Azócar y Brenning, 2010), el modelo no considera el efecto local de factores ambientales específicos en las áreas de escombros, como las propiedades del suelo espacialmente variables y los efectos de los parches de nieve de larga duración que pueden influir en los regímenes térmicos del suelo a nivel local (Hoelzle *et al.*, 2001; Apaloo *et al.*, 2012 como se citó en Azócar *et al.* 2017).

El mapa índice de favorabilidad de permafrost (véase Figura 13) sugiere que en las áreas con  $PFI \geq 0.75$  el permafrost estará presente en la gran mayoría de condiciones ambientales. En contraste en áreas donde  $0.5 < PFI < 0.75$  el permafrost estará presente solo en condiciones térmicas favorables descritas en el párrafo anterior. Por último, en áreas con un  $PFI < 0.5$  el permafrost podría estar presente en circunstancias ambientales excepcionales de manera local (Azócar *et al.*, 2017).



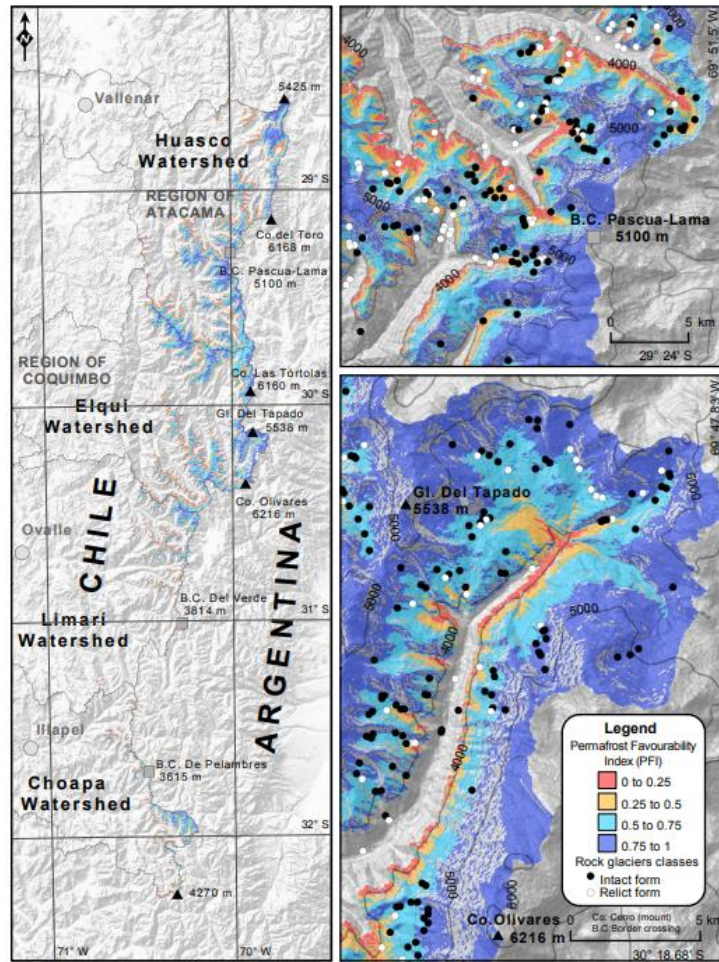


Figura 13: Mapa de Permafrost favourability index (PFI) para las áreas con detritos en los Andes Semiáridos de Chile. Extraído de Azócar et al., (2017).

### 3.5 Marco geológico

Las unidades presentes en el área de estudio presentan un amplio rango de edades desde mediados del Carbonífero (sin contar con el complejo metamórfico el Chepo en las cercanías del área de estudio con registros de una edad máxima de depositación del Ordovícico inferior), hasta depósitos coluviales e incluso antrópicos en el Holoceno.

El área de estudio se caracteriza por la predominancia de unidades de rocas volcánicas e intrusivas, con algunos sectores de rocas sedimentarias. Además, se destaca por la presencia de glaciares blancos y rocosos y la abundancia de depósitos de remoción en masa. La geología de este artículo se basa en la carta 1:100.000 de la Geología de las áreas Río Chollay-Matancilla y Cajón del Encierro (Ortiz y Merino, 2015), la cual será descrita a continuación y representado en la Figura 14.

Se evidencian además varios depósitos de remociones en masa de gran dimensión los cuales fueron complementados con la elaboración de un catastro de remociones en masa a una escala de mayor detalle.

**Intrusivos plutónicos del Carbonífero Inferior Cii (329-324 Ma), (Ortiz y Merino, 2015).**

El granito de quebrada Chacaicito (Cii(gr)) corresponde a un granitoide leucocrático con variaciones entre monzogranito y sienogranito, de grano grueso.

**Estratos del paso Guanaco Sonso PeTrgs (Pérmico Superior-Triásico Inferior?), (Martin *et al.*, 1995)**

Esta sucesión está conformada por rocas estratificadas principalmente volcánicas, mayoritariamente tobas de ceniza y lapilli, tanto líticas, cristalinas y vítreas, de afinidad dacítica a riolítica, en gran parte soldadas con intercalaciones de flujos de lava dacíticos y andesíticos

**Monzogranitos y granodioritas de quebrada la ortiga PeTro (ca. 252 Ma) (Ortiz y Merino, 2015).**

Formada por monzogranitos de anfíbola y biotita, leucocráticos, usualmente isótropos y de grano grueso a muy grueso, algunos con variedades porfídicas, con gruesos cristales de feldespato. Además, se encuentran variaciones locales a granodioritas.

**Complejo plutónico Chollay Trch (248-233 Ma), (Ortiz y Merino, 2015).**

Complejo plutónico con variaciones litológicas desde sienogranitos a tonalitas. En su mayoría, las litofacies del complejo son rocas isótropas, de grano medio a grueso, con anfíbola y /o biotita, con un bajo índice de color de entre 1% a 10%. Casi la totalidad de la unidad presenta alteración propilítica con epidota y clorita diseminada y como reemplazo de cristales de feldespato y máficos.

En el área de estudio se encuentran principalmente monzogranitos leucocráticos a hololeucocráticos de grano grueso a muy grueso y sienogranitos hololeucocráticos de grano medio, en parte porfíricos.

**Intrusivos plutónicos del triásico superior Trsi** (229.215 Ma), (Ortiz y Merino, 2015).

Conjunto de plutones de composición sienogranítica y granítica alcalina, leucocráticos y de grano fino, presentan anfíbola y escasa biotita. Son plutones aislados, algunos de ellos espacialmente vinculados e intruídos en la Formación Pastos Blancos (Trspb).

**Formación Pastos Blancos Trspb** (Carniano-Noriano) (Thiele, 1964; emend. Nasi *et al.*, 1990; emend. Ortiz y Merino, 2015).

Corresponde a una sucesión estratificada conformada por rocas piroclásticas, lavas dacíticas y riolíticas, además de domos y brechas ígneas, también de un carácter félsico. También se distinguen lavas piroclásticas de composición andesítica a andesítica basáltica.

**Intrusivos hipabisales andesítico-basálticos del Río Potrerillos Trsh** (Triásico Superior), (Ortiz y Merino, 2015).

Rocas de textura afanítica y en menor proporción porfírica con fenocristales de plagioclasas de color blanca o rosado. Constituyen afloramientos masivos, sin estructura interna, de contactos irregulares.

**Intrusivos hipabisales riódacíticos Kihd** (ca. 142 Ma?), (Ortiz y Merino, 2015).

Compuesta por varios stocks de composición riódacítica con anfíbol, compuestos por fenocristales de cuarzo y plagioclasa argilizada. En menor proporción andesíticos y dioríticos

**Formación Lautaro JI** (Sinemuriano-Bajociano), (Segerstrom, 1959).

Sucesiones de rocas calcáreas marinas y areniscas carbonáticas, normalmente con alto contenido fosilífero

**Formación Lagunillas Jsl** (Kimeridgiano?-Titoniano), (Jensen, 1976)

Sucesión continental sedimentario-volcánica conformada por rocas sedimentarias de conglomerados y brechas finas con intercalaciones de areniscas (Jsl1) y por lavas andesíticas y basálticas con textura porfídica (Jsl2)

**Dioritas cuarcíferas y tonalitas bocatoma EOb** (37-30 Ma). (Ortiz y Merino, 2015).

Unidad compuesta por rocas porfídicas comúnmente a dioritas cuarcíferas de anfíbola con masa fundamental inequigranular. También son comunes las tonalitas de anfíbola y biotita con masa fundamental cristalina, inequigranular, de grano fino a medio.

**Formación Doña Ana OMda** (Chattiano-Burdigaliano), (Thiele, 1964, emend. Maksaev *et al.*, 1984).



Esta sucesión está conformada por rocas piroclásticas félsicas, principalmente tobas alternadas con capas de areniscas y conglomerados. Sobre estas yacen facies de lavas andesíticas, tobas de cristales y tobas líticas.

**Formación Cerro de las Tórtolas Mct** (Burdigaliano-Langiano), (Maksaev *et al.*, 1984, emend. Martin *et al.*, 1995).

Esta formación corresponde a una sucesión volcánica conformada por tobas líticas, tobas vítreas y rocas piroclásticas de coloración verdosa con clastos andesíticos. Localmente tienen intercalaciones de litoarenitas de grano fino. Además, se encuentra una sucesión de lavas andesíticas con fenocristales de anfíbola y plagioclasa.

**Formación Tambo Mt** (Serravalliano-Tortoniano), (Martin *et al.*, 1995, 1997).

Esta unidad presenta una facies principal de tobas con carácter ignimbrítico y una facies de aglomerados y lavas dacíticas.

**Depósitos glaciales PIHg** (Pleistoceno-Holoceno), (Ortiz y Merino, 2015).

Depósitos no consolidados que están asociados a actividad glacial, incluyendo glaciares de roca, depósitos fluvio-glaciales, además de depósitos morrénicos basales y laterales.

**Depósitos aluviales PIHa** (Pleistoceno?-Holoceno), (Ortiz y Merino, 2015).

Depósitos aluviales de mediana a baja consolidación, presentes usualmente en el fondo de quebradas con escorrentía intermitente y en laderas de cerros con pendiente baja. Algunos depósitos presentan morfologías de abanico aluvial.

**Depósitos de remoción en masa PHrm** (Pleistoceno-Holoceno?), (Ortiz y Merino, 2015).

Depósitos con una consolidación desde muy baja a alta, con fragmentos polimícticos y de mala selección, acumulados en procesos dominados por la gravedad. Los más antiguos son cortados por quebradas de origen aluvial.

**Depósitos fluviales PIHf** (Pleistoceno?-Holoceno), (Ortiz y Merino, 2015).

Los sedimentos corresponden a gravas matrizsoportadas con matriz de arena. Estos cubren los lechos de los ríos y sus planicies de inundación.

**Depósitos coluviales PIHc** (Pleistoceno?-Holoceno), (Ortiz y Merino, 2015).

Depósitos de material detrítico con una consolidación que va desde baja a mediana. Están ubicados en las laderas de los cerros formando conos de deyección. Estos depósitos suelen generar deslizamientos traslacionales del material.

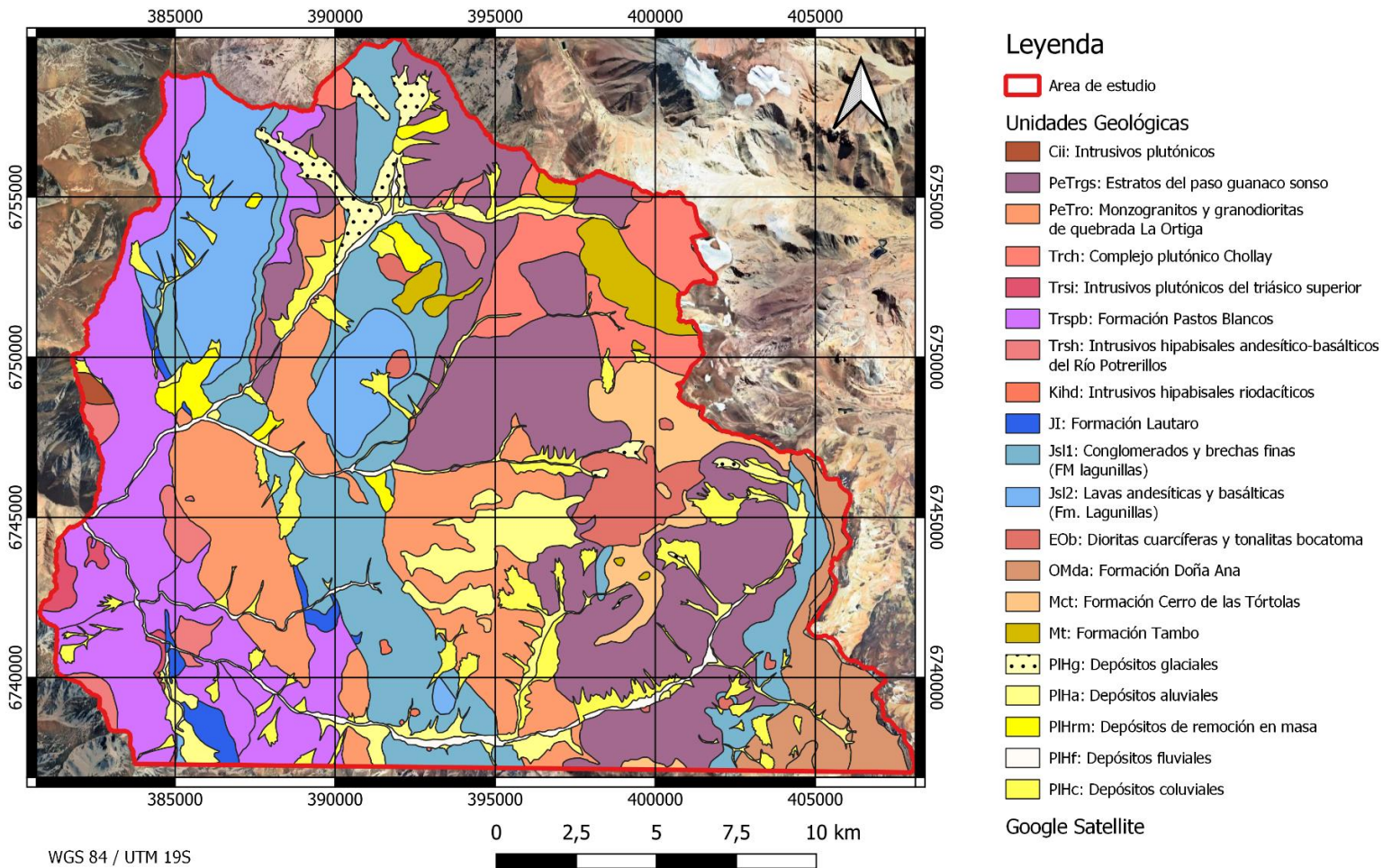


Figura 14: Unidades geológicas del área de estudio de acuerdo con Ortiz y Merino (2015). Elaboración propia.

## **4. Metodología**

En esta sección se desglosan los métodos aplicados en este estudio, así como los datos utilizados y su obtención, explicando desde cómo se realizó el inventario de remociones en masa hasta los criterios que se utilizaron para determinar la susceptibilidad de algunos factores y la elaboración de mapas de susceptibilidad, considerando que en este estudio se evalúa la susceptibilidad de generación de remociones en masa.

La metodología consistió en trabajo de gabinete por lo cual para elegir el área de estudio se consideró una zona donde hubiera suficiente información sobre la geología de la zona y un mapa de probabilidad de existencia de permafrost. Para esta investigación se consideró la carta Geológica de la zona, Geología de las áreas Río Chollay-Matancilla y Cajón del Encierro, regiones de Atacama y Coquimbo, escala 1:100.000 (Ortiz y Merino, 2015) y un mapa de probabilidades de existencia permafrost (Azócar *et al.*, 2017), además de otros documentos asociados al ambiente periglacial, criofomas y cobertura nival de la zona.

Se comenzó el trabajo con la búsqueda de bibliografía asociada a conceptos de remociones en masa, permafrost y su influencia en la generación de remociones en masa, metodologías utilizadas en evaluaciones de susceptibilidad y antecedentes de la zona.

En una siguiente etapa se elaboró un inventario de remociones en masa de aproximadamente 430 km<sup>2</sup> donde se clasificaron los procesos según Hungr *et al.* (2014). Se identificaron los tipos de remociones en masa mediante fotointerpretación, usando imágenes satelitales de Google Earth y complementando con otros mapas como Bing o ESRI a través del software QGIS que permitieron visualizar imágenes de mejor calidad con una menor presencia de nubes u otros inconvenientes con las imágenes satelitales. El inventario incluye tipos de remociones como flujos de detritos, deslizamientos y caída de rocas. Para asegurar una revisión adecuada del área de estudio se dividió la zona en cuadrículas de 1 km<sup>2</sup> y se trabajó el inventario a una escala de 1:7.000 mapeando alrededor de 450 cuadrículas.

La identificación de remociones en masa se marcó a través de puntos estimando el lugar de ocurrencia de eventos de flujos de detritos, caídas de roca, deslizamientos superficiales y deslizamientos no superficiales. Los puntos fueron ubicados ladera arriba sobre depósitos aluviales, coluviales o depósitos de deslizamientos según corresponda, en ocasiones con el apoyo de la carta geológica para su distinción.

Para apoyar la determinación de factores condicionantes en la zona de estudio se trabajó con imágenes satelitales y modelos de elevación digital. Las imágenes satelitales, en este caso Sentinel-2 y Aster son descargadas desde <https://earthexplorer.usgs.gov> para ser procesadas en QGIS a través de combinaciones de bandas. El modelo de elevación digital fue proporcionado por IDE Chile, el cual corresponde originalmente a un modelo ALOS - PALSAR el cual fue corregido restando las diferencias geoidales del modelo EGM2008 mundial a los valores altitudinales del DEM. De esta manera se obtiene un modelo de elevación digital de resolución de 12.5 m/px referenciado de acuerdo con el EGM 2008 para obtener parámetros asociados a la topografía y geología de la zona.

Para obtener los mapas de susceptibilidad se implementó un modelo de análisis discriminante con múltiples variables cuya mezcla y ponderación determinan la susceptibilidad de cada píxel del área de estudio. La evaluación de susceptibilidad se realiza para procesos de tipo flujos, deslizamientos y caídas de rocas por separado. Se determinan los factores condicionantes a partir de estudios anteriores y apoyo de imágenes, y se añade el factor condicionante de probabilidad de existencia de permafrost. Se definen subclases o rangos dentro de cada factor, de manera de determinar la incidencia de estos en la susceptibilidad. Para determinar la relevancia de cada factor condicionante, así como la importancia de cada parámetro (clase) dentro de cada uno de estos, se llevó a cabo el cálculo de un índice de susceptibilidad normalizado mediante aplicación de un análisis jerárquico de procesos (AHP) explicado con más detalle en la sección 4.3, basado en la escala de Saaty (2008), véase Tabla 2. Luego con álgebra de mapas se superponen los mapas reclasificados para así obtener un mapa de susceptibilidad de flujo de detritos, caída de rocas y deslizamientos superficiales. Finalmente, los deslizamientos no superficiales no se consideraron en las evaluaciones de susceptibilidad por su menor frecuencia en el área de estudio en comparación a los otros tipos de remociones, también por la falta de datos en las zonas de generación de los deslizamientos debido a que el mapa de probabilidad de existencia de permafrost está implementado para zonas de escombros y por su complicada clasificación exclusivamente mediante imágenes satelitales.

Los siguientes capítulos muestran la metodología aplicada con mayor detalle.

Intensidad de importancia sobre una escala absoluta	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
2	Leve importancia	-
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
4	Moderada a fuerte importancia	-
5	Importancia esencial o fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
6	Fuerte a muy fuerte importancia	-
7	Muy fuerte importancia	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica
8	Muy fuerte a extrema importancia	-
9	Extrema importancia	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta y totalmente clara
1,1-1,9	Entre 1 y 2, cuando la comparación de importancia es muy estrecha.	Una mejor manera de asignar estos pequeños decimales es comparar dos actividades con un tercero en común, usando la escala de valores del 1 al 9. De esta manera es posible obtener valores como 9/8 o 7/4, entre otros
Recíprocos	$a_{ij}=1/a_{ji}$	Si la actividad i tiene un número asignado cuando se comparó con la actividad j, luego j tiene el valor recíproco cuando se compara con i
Racionales	Razón derivada de la escala	Si la consistencia fuera forzada para obtener n valores numéricos que abarque la matriz

Tabla 2: Escala de Saaty (2008) para la toma de decisiones. Extraída de Muñoz (2018), modificación de Saaty (2008).

## 4.1 Determinación de factores condicionantes y escenarios estudiados

La elección de factores condicionantes y su ponderación es altamente relevante en la generación del mapa de susceptibilidad. Dentro de los múltiples factores usados en evaluaciones de susceptibilidad de remociones en masa algunos autores señalan (Lara, 2007; Rodríguez *et al.*, 2014):

- Pendiente
- Geología
- Geotecnia
- Distancia a la red de drenaje
- Distancia a lineamientos
- Antecedentes de remociones en masa en el área de estudio
- Curvatura
- Elevación
- Acumulación de nieve
- Antrópico
- Vegetación
- Orientación

El presente estudio busca ser un primer acercamiento para integrar el permafrost en evaluaciones de susceptibilidad, para lo cual se incorporó el factor condicionante de probabilidad de existencia de permafrost para evaluar su influencia en la susceptibilidad de remociones en masa. Cabe destacar que es recomendable implementar entre 3 y 6 factores condicionantes para la metodología AHP (Muñoz, 2018).

La selección de factores condicionantes para el área de estudio está basada en análisis bibliográfico de otras evaluaciones de susceptibilidad citados en este capítulo (sección 4.1), principalmente Lara (2007), Rodríguez *et al.*, (2014) y Molina (2016), sujeto a las condiciones climáticas de la zona de estudio y a la disponibilidad de datos al momento de realizar la evaluación y observación de imágenes. De esta manera, los factores condicionantes seleccionados para la evaluación de susceptibilidad en este estudio son mostrados a continuación y varían dependiendo del tipo de procesos de remoción en masa como es mostrado en la Tabla 3:

- Pendiente
- Distancia a la red de drenaje
- Curvatura
- Probabilidad de existencia de permafrost
- Exposición al sol
- Distancia a fallas
- Acumulación de nieve
- Geología

Estos factores son definidos y utilizados de la siguiente manera:

- **Pendiente:** Definida como el ángulo entre la vertical y el vector normal a la superficie, la pendiente es indicadora de la inclinación del terreno siendo un fuerte factor condicionante para remociones en masa, siendo considerado por muchos autores incluso como uno de los factores más importantes para una evaluación de susceptibilidad (Molina, 2016).

Las laderas abruptas con topografías de altas pendientes en las laderas son un factor geomorfológico propicio para la generación de remociones en masa disminuyendo la estabilidad de las laderas (Sepúlveda y Lara, 2008). De esta manera un aumento en la pendiente está asociado a una mayor probabilidad de ocurrencia de fenómenos de remoción en masa (Naquira, 2009)

- **Distancia a la red de drenaje:** Los cursos de agua pueden afectar negativamente a la estabilidad de las rocas y el suelo erosionando las partes bajas de las laderas o saturando las zonas inferiores. En general, la frecuencia de remociones en masa decrece a medida que aumenta la distancia a los ríos. (Dai y Lee, 2002; Youssef *et al.* 2015; Dragičević *et al.*, 2015 citados en Molina, 2016). Asimismo, la saturación del suelo puede generar una disminución en la resistencia del material, disminuyendo su tensión efectiva debido al aumento de la presión de poros (Lambe y Whitman, 1972).

De esta forma la red de drenaje, las posiciones y variaciones del nivel freático entre otros parámetros, son factores que condicionan la generación de movimientos en masa debido a la incorporación de agua en los suelos o macizos rocosos. (Lara, 2007).

- **Curvatura de plano:** La curvatura del terreno indica la tasa de cambio en la pendiente, generando zonas potencialmente aportadoras o receptoras de sedimento, material detrítico y flujos en general. Una ladera con geometría cóncava tiende a recibir sedimentos desde partes altas de la ladera (Becerra, 2022). En particular la curvatura tangencial corresponde a la variación en plano y es perpendicular a la dirección de la pendiente máxima, véase Figura 15 (Molina, 2016) y tiene especial interés ya que influye en procesos como la escorrentía superficial, canalización de aludes, erosión y flujos en general (Felicísimo, 1994).

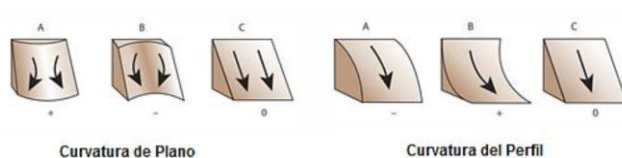


Figura 15: Esquema de tipos de curvatura. Extraído de Molina, 2016.

- **Geología:** La geología y la geotecnia influyen en diferente medida en la generación de distintos tipos de remoción en masa. Las características geológicas que determinan



su efecto son por ejemplo el tipo de depósito, la litología, composición, granulometría, densidad, permeabilidad, etc. (Becerra, 2022).

Materiales de mayor permeabilidad son más susceptibles a ser movilizados debido a la rápida saturación producida por la fácil infiltración de agua, favoreciendo el escurrimiento rápido de agua sobre este material saturado (Lara, 2007).

- **Acumulación de nieve:** La acumulación de nieve tiene relación con la humedad y saturación del suelo y rocas, ya que durante periodos de ablación la nieve se derrite generando escorrentía y procesos de meteorización que favorecen el transporte de detritos y la saturación del material (Molina, 2016; Albornoz, 2018).
- **Distancia a fallas:** Las fallas son capaces de deteriorar la calidad de la roca y el suelo en los alrededores de ellas, razón por la cual han sido usadas en múltiples evaluaciones de susceptibilidad (Rodríguez *et al.* 2014).
- **Exposición al sol:** La orientación de las laderas determina en gran parte su grado de exposición al sol, esto afecta la cantidad de vegetación presente, el grado de humedad del suelo y los procesos de meteorización (Molina, 2016). Además de generar acciones de hielo y deshielo (Lara, 2007). Cabe destacar que este es un factor considerado en el mapa de probabilidad de permafrost elaborado por Azócar *et al.* (2017).
- **Probabilidad de permafrost:** Este factor condicionante está sujeto al mapa de probabilidad elaborado por Azócar *et al.* (2017) el cual determina espacialmente la favorabilidad del permafrost (descrito en la sección 3.5), para la zona de estudio donde los rangos de probabilidad presentan a las siguientes condiciones:
  - El mapa índice de favorabilidad de permafrost sugiere que en las áreas con  $PFI > 0.75$  el permafrost estará presente en la gran mayoría de condiciones ambientales.
  - En contraste en áreas donde  $0.5 < PFI \leq 0.75$  el permafrost estará presente solo en condiciones térmicas favorables asociadas a las propiedades del suelo y la acumulación de nieve.
  - Por último, en áreas con un  $PFI \leq 0.5$  el permafrost podría estar presente en circunstancias ambientales excepcionales de manera local.

Además de la exposición al sol el PFI incluye otras variables como la temperatura y la geomorfología a partir de un inventario de glaciares rocosos para determinar la probabilidad de existencia de permafrost donde hipotéticamente aumentaría la recurrencia de remociones en masa.

El presente estudio aborda evaluaciones de susceptibilidad considerando diferentes escenarios, enfocado principalmente en comparar la utilidad de incluir el factor condicionante de probabilidad de existencia de permafrost que incluye múltiples parámetros en lugar a la exposición al sol (orientación de laderas) que es usada tradicionalmente. Se utilizan estos 2 factores condicionantes de forma excluyente debido a que el mapa de probabilidad de permafrost utilizado incluye la orientación de laderas y usar ambos eventos podría sobreestimar el factor en cuestión.

Debido a las diferencias en los tipos de remociones en masa se utilizaron diferentes factores para cada uno de estos y diferentes clases para el factor de pendientes. De esta forma de acuerdo con el análisis bibliográfico (mencionado en la sección 4.1) y la disponibilidad de datos, se seleccionaron los siguientes factores condicionantes para cada tipo de remoción estudiada, mostrados en la Tabla 3:

<b>Factores condicionantes</b>		
<b>Flujo de detritos</b>	<b>Deslizamientos de suelo</b>	<b>Caídas de roca</b>
Pendiente	Pendiente	Pendiente
Distancia a la red de drenaje	Distancia a fallas	Distancia a fallas
Probabilidad de existencia de permafrost o exposición al sol	Probabilidad de existencia de permafrost o exposición al sol	Probabilidad de existencia de permafrost o exposición al sol
Geología	Geología	Geología
Acumulación de nieve	Acumulación de nieve	Acumulación de nieve
Curvatura		

Tabla 3: Selección de factores condicionantes para cada tipo de remoción en masa. Elaboración propia.

## 4.2 Elaboración de mapas temáticos

Ya elegidos los factores condicionantes a utilizar prosiguió la elaboración de los mapas temáticos asociado a cada uno de ellos. Estos están divididos en clases (véase tablas 4, 5 y 6) las cuales fueron elegidas de acuerdo con el análisis bibliográfico de evaluaciones de susceptibilidad principalmente las mencionadas a continuación:

La división de clases fue realizada con base en los estudios de Lara (2007) para las pendientes, acumulación de nieve y exposición al sol; Rodríguez *et al.*, (2014) para la distancia a fallas y distancia a la red de drenaje y Molina (2016) para la curvatura, con modificaciones hechas por el autor como las categorías de pendientes, distancia a la red de drenaje y acumulación de nieve; con fundamento en la distribución de cada tipo de remoción en masa, la obtención de una red de drenaje de mayor resolución y las condiciones climáticas



del área de estudio. La geología fue dividida de acuerdo con Ortiz y Merino (2015) y las clases de probabilidad de existencia de permafrost están divididas de acuerdo con las discusiones en Azócar *et al.*, (2017).

Clases para factores condicionantes de flujos de detritos						
Pendientes (°)	Distancia a la red de drenaje (m)	Curvatura	Probabilidad de existencia de permafrost (%)	Acumulación de nieve	Geología	Exposición al sol
<10 10-20 20-30 30-40 >40	D < 50 50 < D < 100 100 < D < 200 D > 200	Concavo (<-0,005) Plano (-0,005 a 0,005) Convexo (>0,005)	P = 0 o sin datos 0 < P < 50 50 < P < 75 75 < P < 100	Casi nunca Ocasional Estacional Mayor parte del año	Trch EOb Trsh Cii Trsi(sg) PeTro Kihd PeTrgs Mct Omda Jsl1 Jl Trspb Mt Jsl2 PIHa PIHc PIHrm PIHf PIHg	Orientación Norte Orientación Este y Oeste Orientación Sur

Tabla 4: Clases para los factores condicionantes de flujos de detritos. Elaboración propia.

Clases para factores condicionantes de deslizamientos de suelo					
Pendientes (°)	Distancia a fallas	Probabilidad de existencia de permafrost (%)	Acumulación de nieve	Geología	Exposición al sol
15-20 20-25 25-30 30-40 >40	D<500m 500m<D<1000m 1000m<D<2000m 2000m<D<3000m D>3000m	P=0 o sin datos 0<P<50 50<P<75 75<P<100	Casi nunca Ocasional Estacional Mayor parte del año	Trch EOb Trsh Cii Trsi(sg) PeTro Kihd PeTrgs Mct Omda Jsl1 Jl Trspb Mt Jsl2 PIHa PIHc	Orientación Norte Orientación Este y Oeste Orientación Sur

Tabla 5: Clases para los factores condicionantes de deslizamientos de suelo. Elaboración propia.

Clases para factores condicionantes de caídas de roca					
Pendientes (°)	Distancia a fallas	Probabilidad de existencia de permafrost (%)	Acumulación de nieve	Geología	Exposición al sol
15-20 20-25 25-30 30-35 35-45 >45	D<500m 500m<D<1000m 1000m<D<2000m 2000m<D<3000m >3000m	P=0 o sin datos 0<P<50 50<P<75 75<P<100	Casi nunca Ocasional Estacional Mayor parte del año	Trch EOb Trsh Cii Trsi(sg) PeTro Kihd PeTrgs Mct Omda Jsl1 Jl Trspb Mt Jsl2	Orientación Norte Orientación Este y Oeste Orientación Sur

Tabla 6: Clases para los factores condicionantes de caídas de roca. Elaboración propia.

Los datos utilizados para cada factor condicionante se encuentran a continuación.

- Pendientes, curvatura y exposición al sol:** Los mapas temáticos fueron obtenidas mediante un modelo de Elevación Digital Alos Palsar corregido restando las diferencias del modelo geoidal (EGM2008) mundial a los valores altitudinales del DEM, el cual fue proporcionado por IDE Chile, con una resolución 12.5 m/px a partir de análisis en QGIS.
- Distancia a red de drenaje:** A partir del DEM mencionado anteriormente y el software GRASS se obtiene la red de drenaje de la zona de estudio para posteriormente generar múltiples anillos a través de la herramienta de QGIS “Multi Ring Buffer”, el cual crea varios anillos generando zonas de influencia alrededor de líneas, en este caso la red de drenaje, de esta forma se obtienen polígonos con diferentes distancias a la red de drenaje, los cuales son posteriormente rasterizados.
- Probabilidad de permafrost:** Elaborado por Azócar *et al.* (2017) para la zona de estudio, facilitado por el mismo autor.
- Geología:** Correspondiente a un archivo shape de la carta geológica Geología de las áreas Río Chollay-Matancilla y Cajón del Encierro, regiones de Atacama y Coquimbo, de escala 1:100.000 para luego ser rasterizada. La incidencia en la susceptibilidad de cada categoría fue estimada de acuerdo con algunos parámetros como la resistencia a la compresión simple (*UCS* por sus siglas en inglés), el ángulo de fricción ( $\phi$ ), la cohesión (*C*) y la permeabilidad de las litologías principales asociadas a las unidades geológicas del área, véase Figura 16 y 17 (Salinas, 2018).

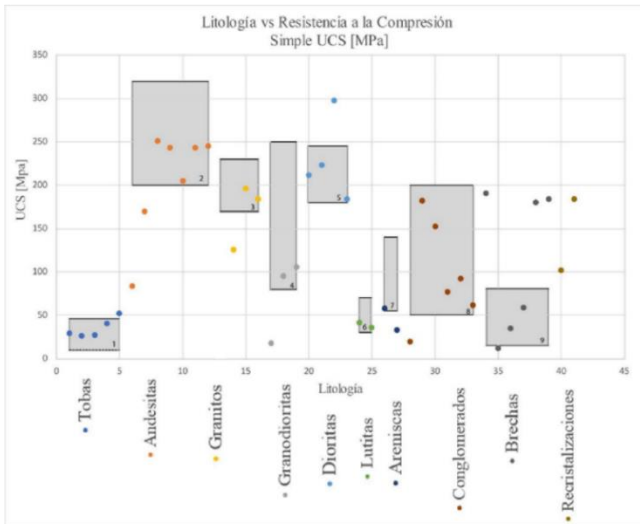


Figura 16: Relación entre litologías y resistencia a la compresión simple para muestras de laboratorio de rocas comunes en Chile. Extraído de (Salinas, 2018).

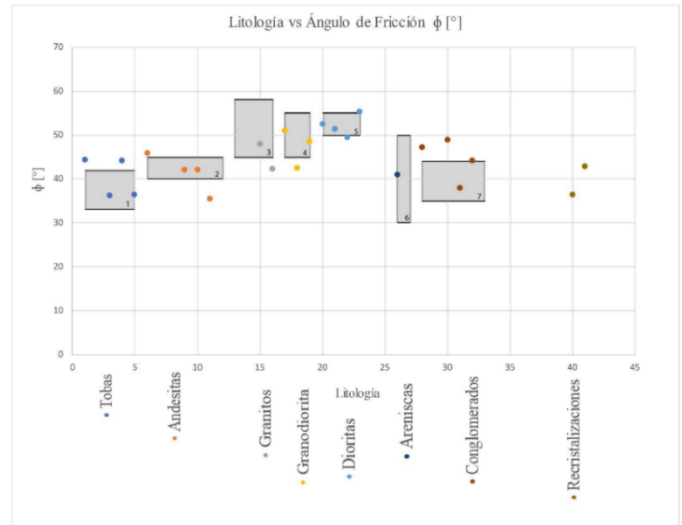


Figura 17: Relación entre litologías y ángulo de fricción para muestras de laboratorio de rocas comunes en Chile. Extraído de (Salinas, 2018).

- Distancia a Fallas:** A partir de las fallas de la carta geológica del área de estudio se generan múltiples anillos a través de la herramienta de QGIS “Multi Ring Buffer” de manera similar a las redes de drenaje para asignar distintos valores de susceptibilidad de acuerdo a la distancia a la distancia a fallas obtenidas de la carta Geología de las áreas Río Chollay-Matancilla y Cajón del Encierro, regiones de Atacama y Coquimbo, de escala 1:100.000. Por último, se rasteriza. Las distancias utilizadas se basan en Rodríguez *et al.*, 2014.
- Acumulación de nieve:** A partir de Universidad de Atacama (2016) se adquiere la acumulación nival, la cual fue obtenida a través de imágenes satelitales MODIS utilizando imágenes desde el año 2000 al 2014.

### 4.3 Reclasificación de mapas temáticos mediante análisis jerárquico

Para estimar qué tan relevante es cada clase dentro de un factor condicionante se calcula un índice de susceptibilidad normalizado (IS<sub>n</sub>) mediante la aplicación de AHP, la cual es una comparación a pares que se puede ver ejemplificada en la Tabla 7 y ejemplificada en el Anexo A. Los valores asignados corresponden a la relación de los parámetros según Saaty (2008), véase Tabla 2, para lo cual se requiere conocimiento en la relevancia que ocupa cada factor para los diferentes procesos de remoción en masa evaluados.

Para estimar el aporte en la susceptibilidad de cada categoría del respectivo factor condicionante y la importancia que tiene con respecto a los demás, se realizó el análisis

jerárquico de procesos, a partir de estimaciones propias del autor con el apoyo de análisis bibliográfico de otras evaluaciones de susceptibilidad mencionadas en este capítulo, principalmente Muñoz, (2018), Lara (2007), Rodríguez et al., (2014) y Molina (2016).

Tras la comparación a pares el peso de las categorías es normalizado, obteniendo así el índice de susceptibilidad (IS<sub>n</sub>) con el cual se reclasifica cada mapa temático para usarlos posteriormente en una calculadora ráster.

Comparación a pares			
Atributo	A	B	C
A	1	5	3
B	1/5	1	1
C	1/3	1	1
Error de consistencia	3%		
Peso	65%	16%	19%
IS <sub>n</sub>	100%	24%	28%

Tabla 7: Ejemplo para comparación a pares extraído de Muñoz (2018).

Para determinar la consistencia de las matrices generadas en la comparación a pares se calcula la razón de consistencia (CR por sus siglas en inglés) inventada por Saaty (1980) la cual mide la magnitud de la diferencia entre la consistencia de los juicios con una consistencia perfecta. Para una consistencia aceptable se debe cumplir la condición de  $CR \leq 0.1$ .

#### 4.4 Elaboración de mapas de susceptibilidad

Para la elaboración de los mapas de susceptibilidad se debe calcular la ponderación de cada factor condicionante. En esta sección de la metodología se realizan comparaciones a pares entre los factores condicionantes de la misma forma en que se comparan las categorías dentro de cada factor, con la excepción de que no se calcula un índice normalizado, sino un porcentaje que servirá para ponderar (Muñoz, 2018).

Para realizar comparaciones a pares de manera justificada, se deben considerar “constantes” los factores condicionantes que no se están comparando y tener conocimiento de la distribución de los índices de susceptibilidad asociado a cada uno de estos, por lo que tiene alta relevancia un buen entendimiento de cada mapa temático y los procesos asociados a cada atributo (Muñoz, 2018).

Para efectos prácticos, para considerar un factor condicionante, este debe tener una ponderación >5%, factores con menores ponderaciones se recomienda no incluirlos en el cálculo. Para elaborar los mapas de susceptibilidad se debe aplicar la ecuación  $IS = \sum a_i \times f_i$

, donde  $i$  es el factor condicionante,  $a_i$  la ponderación asociada al factor  $i$  y,  $f_i$  el mapa reclasificado del factor  $i$  (Muñoz, 2018) (véase Figura 18).

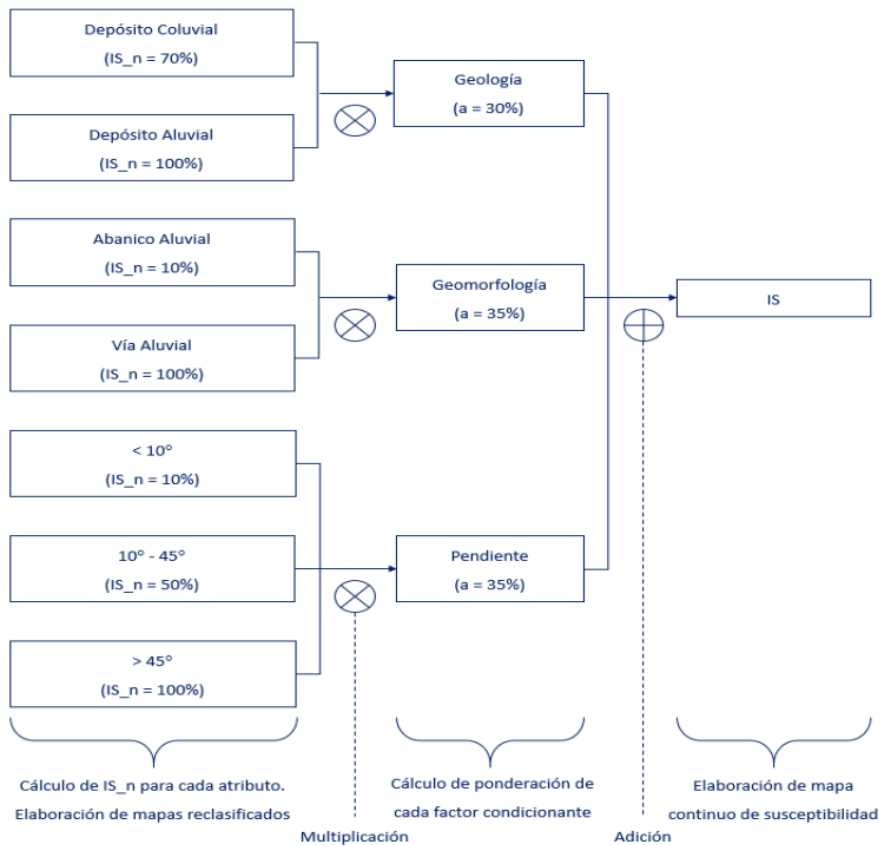


Figura 18: Esquema que ejemplifica la aplicación de AHP para la elaboración de mapa continuo de susceptibilidad. Cada píxel tendrá un Índice de susceptibilidad normalizado (IS\_n) por cada factor. Este es multiplicado por la ponderación del factor condicionantes correspondiente. Esto se hace con cada factor para luego sumar los valores y obtener un IS final por cada pixel del mapa de susceptibilidad. Extraído de Muñoz (2018).

De estas formas, el mapa de susceptibilidad correspondiente se obtiene como la suma de los índices de susceptibilidad normalizados (IS\_n) ya ponderados por su respectivo factor condicionante. Obteniendo así un ráster con un índice de susceptibilidad (IS) para cada píxel.

Cabe destacar que para la generación del mapa de susceptibilidad de caídas de roca se elaboró un mapeo de afloramientos de macizos rocosos a escala 1:14.000 utilizado para cortar el mapa ráster con índices de susceptibilidad con el fin de delimitar las posibles zonas de generación para las remociones con material tipo roca. Para el caso de suelos no se generó este mapeo debido a la presencia de cubiertas de coluvio en múltiples afloramientos donde pudiesen generarse remociones en masa, reflejado en la abundancia de movimientos en masa de material tipo suelo en la gran mayoría del área de estudio.

## 4.5 Escenarios y validación de resultados

Para comparar cuantitativamente los distintos escenarios (Con probabilidad de existencia de permafrost o con exposición al sol) se generaron validaciones de acuerdo con el inventario de remociones en masa. Para esto se realizó un muestreo de los puntos del inventario de remociones de acuerdo con los mapas de susceptibilidad para analizar la distribución de índices de susceptibilidad (IS) de los puntos de activación para cada uno de los escenarios, usando como supuesto que a mayores índices de susceptibilidad (IS) de los puntos de remociones en masa mejor ajustado a la realidad es el mapa de susceptibilidad.

Para determinar si existen diferencias al hacer evaluaciones de susceptibilidad exclusivamente en zonas frías con posible presencia de permafrost, frente a evaluaciones en zonas que incluyen además zonas sin posibilidad de esta condición, se consideraron 2 casos de validación para cada escenario, un caso de validación considerando las remociones en el área total (Figura 19) y otro caso validando los mapas con puntos del inventario de remociones en masa limitados a zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost (es decir a las zonas que comprenden el mapa elaborado por Azócar *et al.* (2017) dentro del área de estudio, véase Figura 20).

A continuación, se muestra un resumen de los escenarios planteados que varían en los factores condicionantes usados y sus ponderaciones. Cada uno de estos escenarios son evaluados en los 2 casos de validación expuestos anteriormente, lo cual es representado de la siguiente forma:

Caso de validación 1: Distribución de los índices de susceptibilidad de acuerdo con las remociones en masa en el área de estudio total

- Escenario A: Con probabilidad de existencia de permafrost.
- Escenario B: Con probabilidad de existencia de permafrost con ponderación menor a la anterior.
- Escenario C: Con exposición al sol reemplazando al factor de probabilidad de existencia de permafrost.

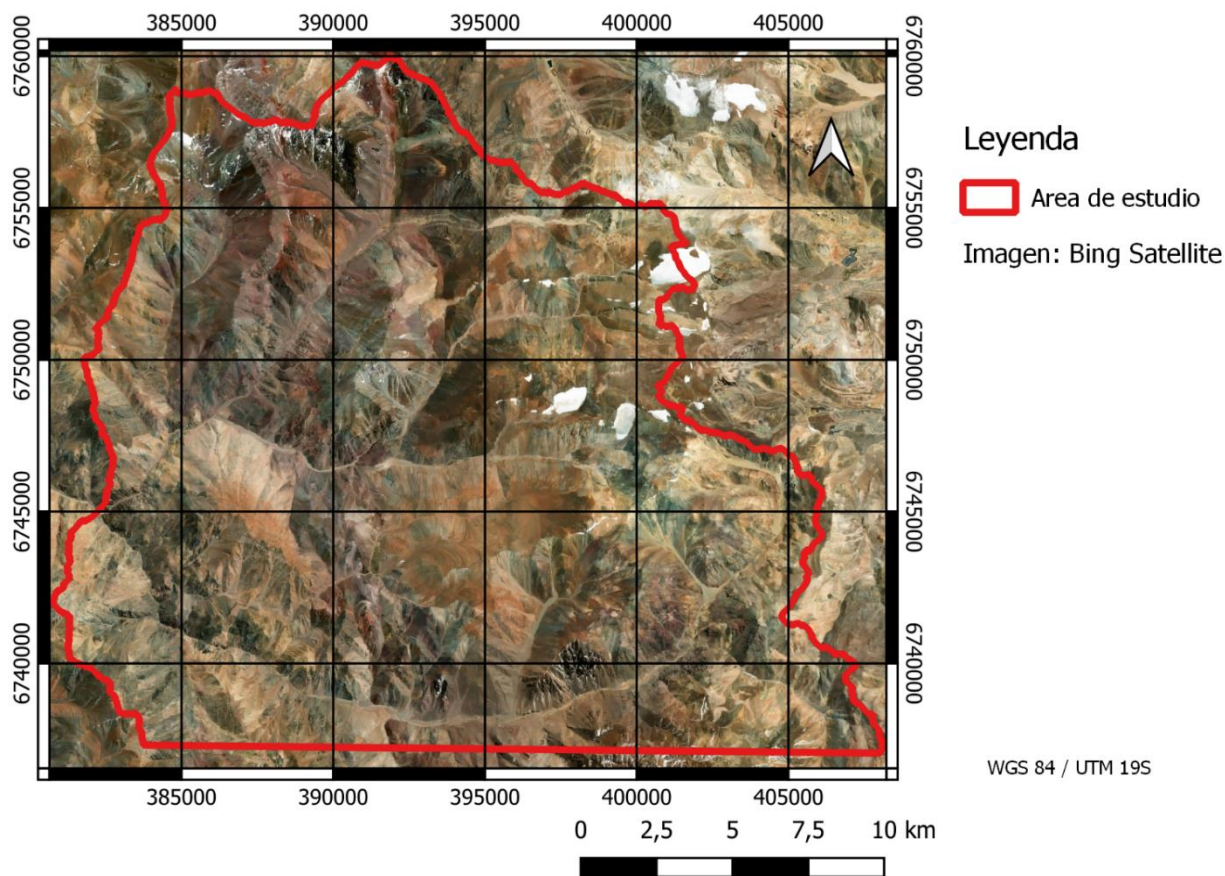


Figura 19: Caso de validación 1 para validación donde se consideran las remociones en masa de toda el área de estudio. Elaboración propia.

Caso de validación 2: Distribución de los índices de susceptibilidad de acuerdo con las remociones en masa exclusivamente en zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost (zonas del mapa elaborado por Azócar *et al.* (2017) dentro del área de estudio).

- Escenario A: Con probabilidad de existencia de permafrost.
- Escenario B: Con probabilidad de existencia de permafrost con ponderación menor a la anterior.
- Escenario C: Con exposición al sol reemplazando al factor de probabilidad de existencia de permafrost



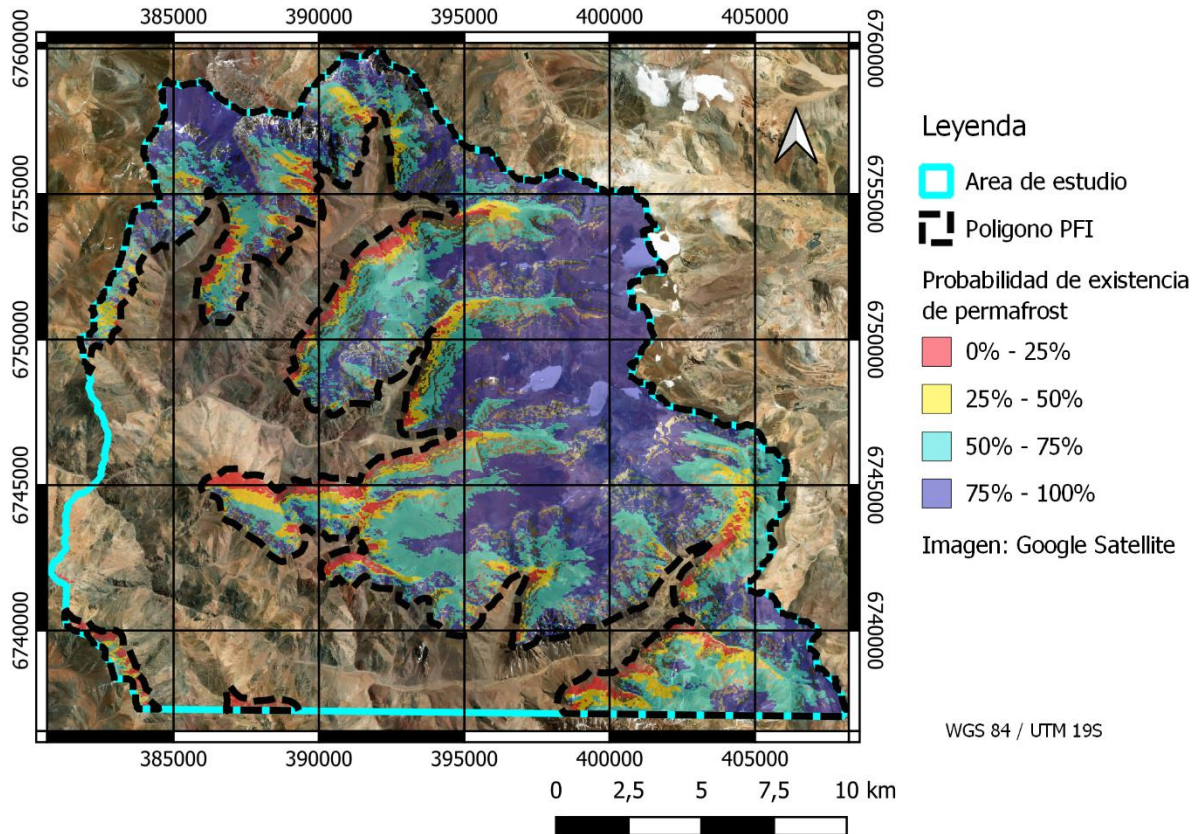


Figura 20: Caso de validación 2 donde se consideraron solo las remociones en masa ubicadas en zonas con datos de probabilidad de permafrost (Polígono PFI en el mapa). Elaboración propia.



## **5. Resultados**

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología tales como el mapa inventario de remociones en masa, mapas temáticos de los factores condicionantes y mapas de susceptibilidad de acuerdo con los escenarios ya mencionados en la metodología.

### **5.1 Inventario de remociones en masa**

Para la elaboración del inventario de remociones en masa de escala 1:7.000 se estimaron, a partir de observación de imágenes (Google Earth) zonas de generación de remociones en masa a partir de identificar los lugares de donde provinieron los depósitos. Con la ayuda de la carta geológica de la zona se estimó el posible origen de algunos depósitos cuaternarios para distinguir el material coluvial del aluvial. Para el caso de los deslizamientos no fue posible determinar la profundidad del suelo y el límite con el macizo rocoso debido a la ausencia de campañas de terreno, por lo cual se distinguieron deslizamientos superficiales de no superficiales usando como criterio la extensión de los depósitos diferenciando los deslizamientos no superficiales como deslizamientos que por sí solos generaron depósitos, por lo general mayor a 20.000 m<sup>2</sup>, además de estar usualmente asociados a Protalus rampart o a glaciares rocosos. Finalmente se identificaron los siguientes puntos de generación (véase Figura 21 y Anexo B).

- 240 flujos de detritos
- 250 caídas de roca
- 275 deslizamientos superficiales
- 67 deslizamientos no superficiales

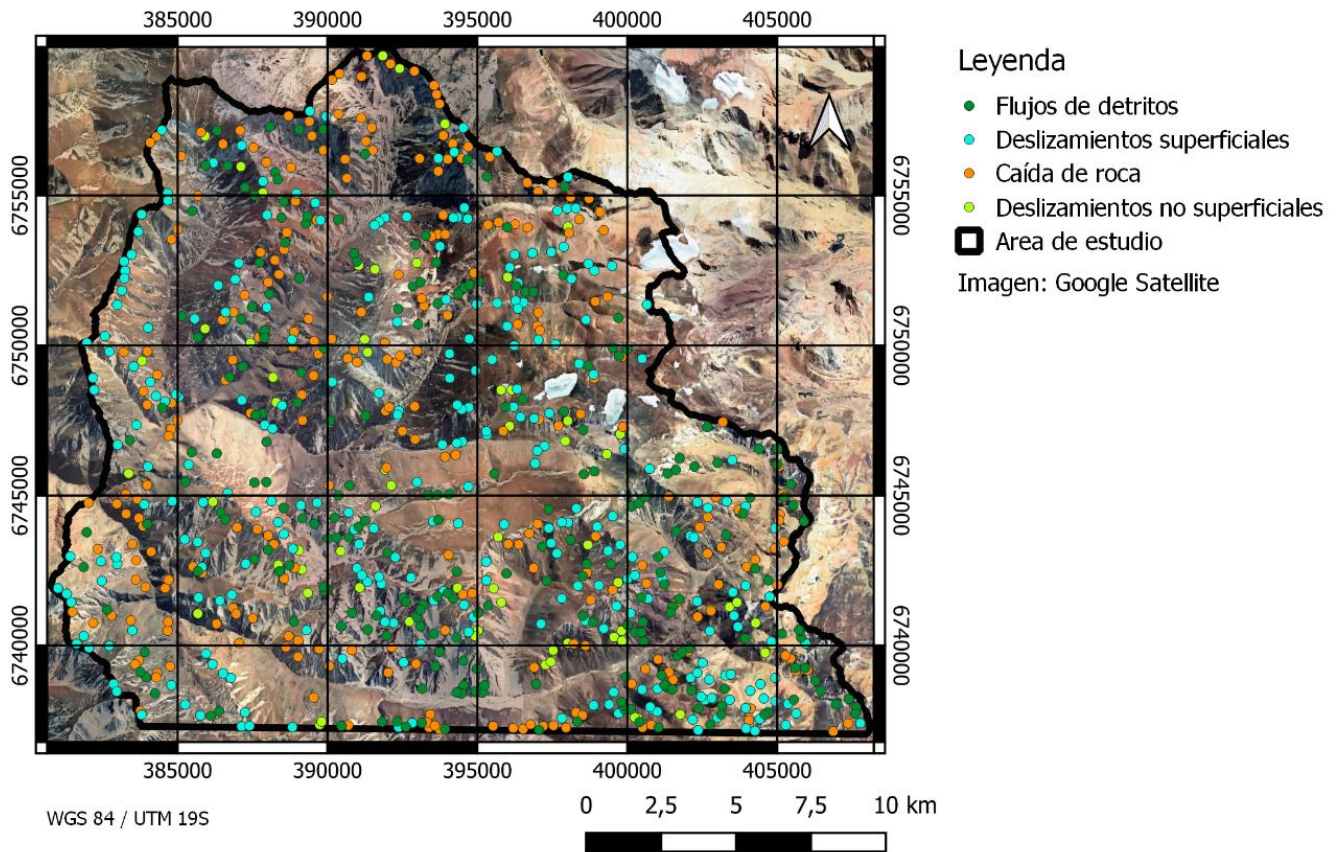


Figura 21: Inventario de remociones en masa para el área de estudio. Elaboración propia.

## 5.2 Mapas temáticos

En esta sección se muestra la distribución en el área de estudio de las clases asignadas a los factores condicionantes utilizados, entre ellas pendientes, exposición al sol, acumulación de nieve etc. La mayoría de los factores poseen las mismas clases para los diferentes procesos de remociones en masa salvo por las pendientes y la geología, las cuales tienen variaciones entre flujos de detritos, deslizamientos de suelo y caída de roca por la naturaleza y el tipo de material de cada tipo de remoción en masa. Los mapas temáticos se presentan en las figuras 22 a 32. Además, se presenta un mapeo de material rocoso en la Figura 33:



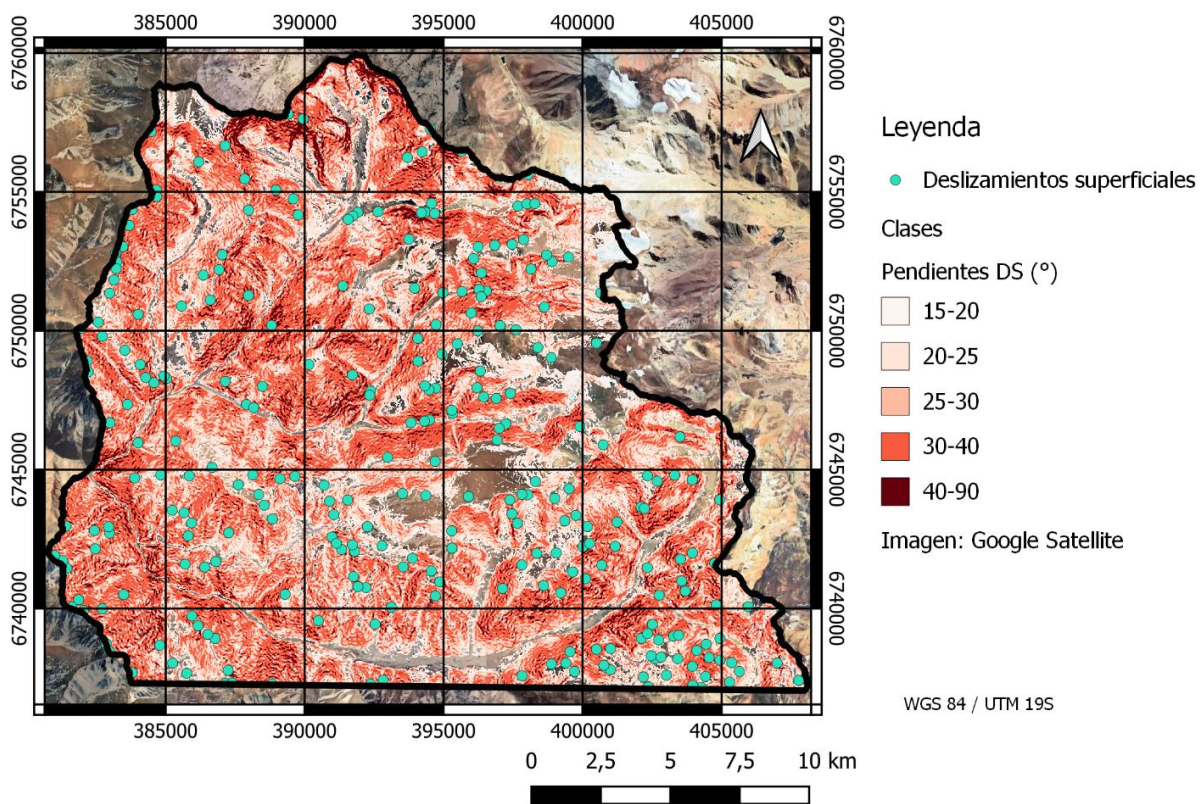


Figura 22: Clases de pendientes para flujos de detritos. Elaboración propia.

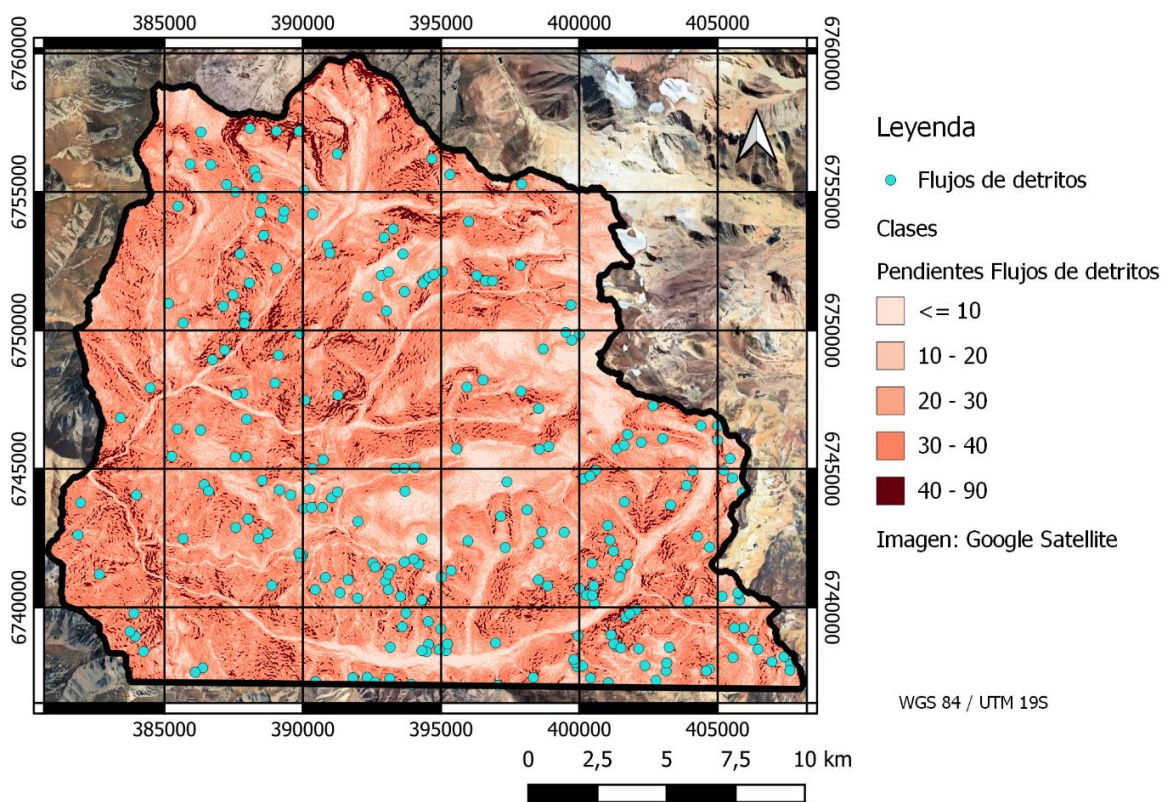


Figura 23: Clases de pendientes para deslizamientos de suelo. Elaboración propia.



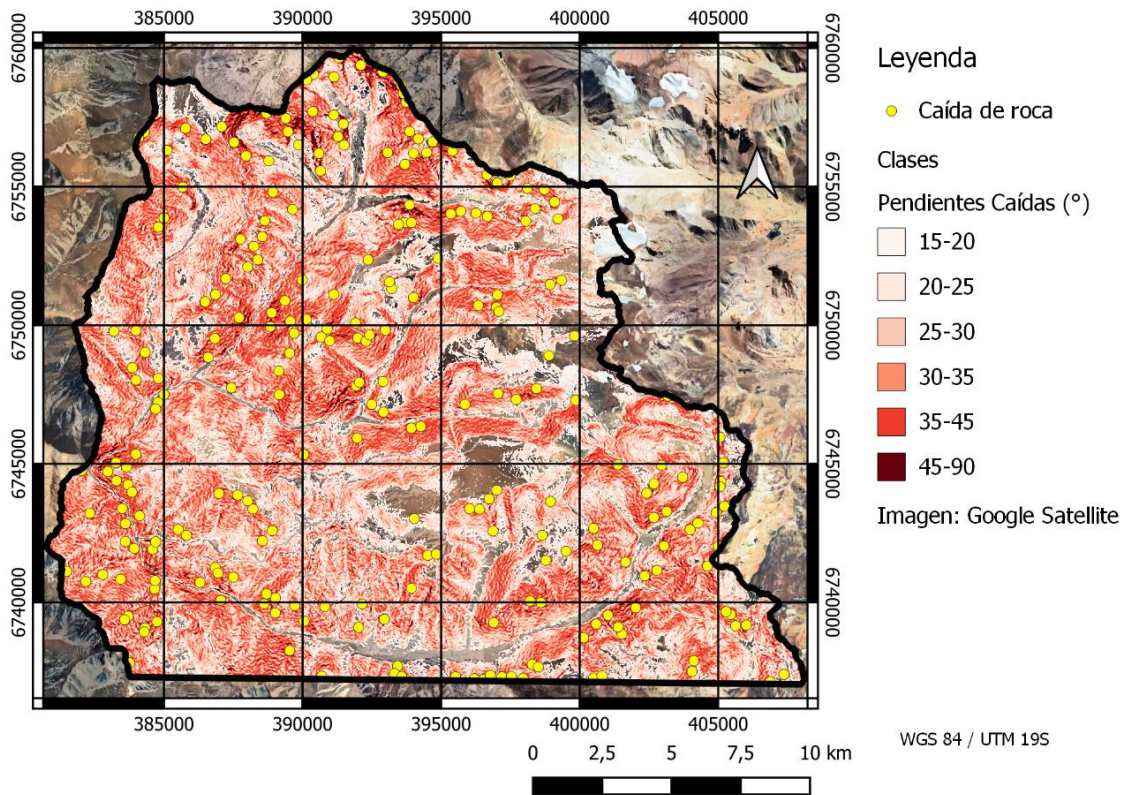


Figura 24: Categorías de pendientes para caída de rocas. Elaboración propia.

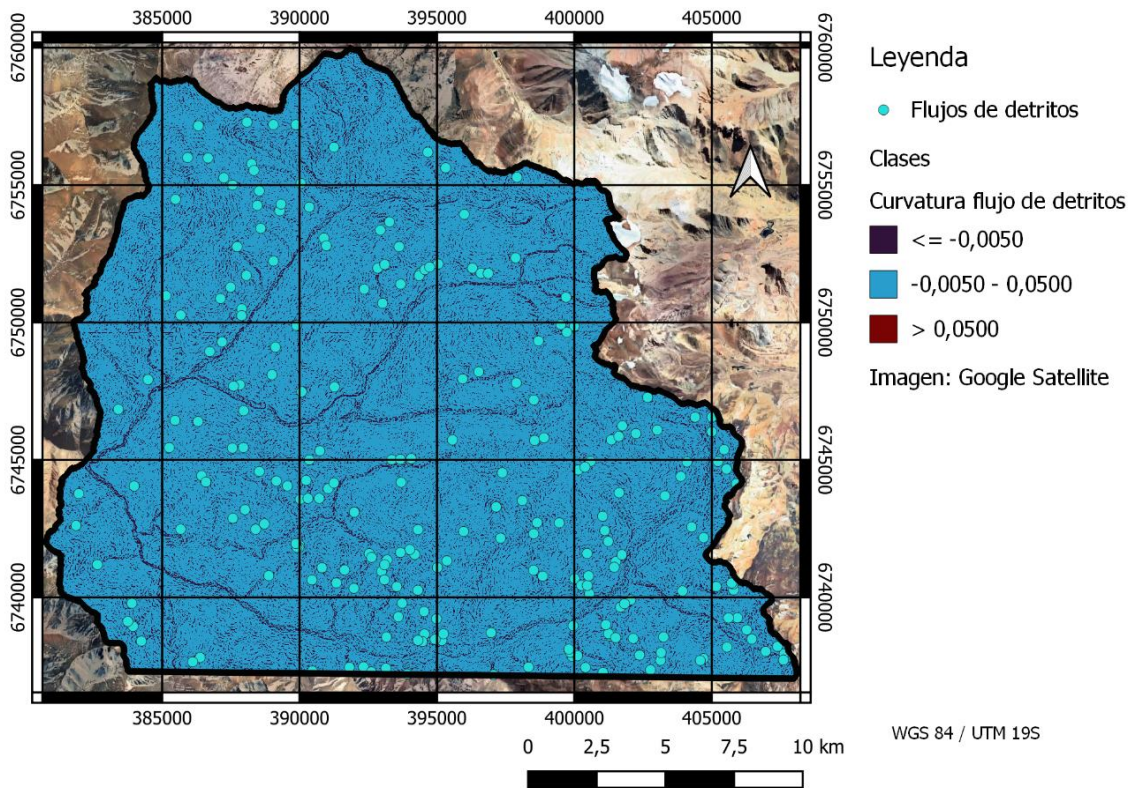


Figura 25: Categorías del factor curvatura para flujos de detritos. Elaboración propia.



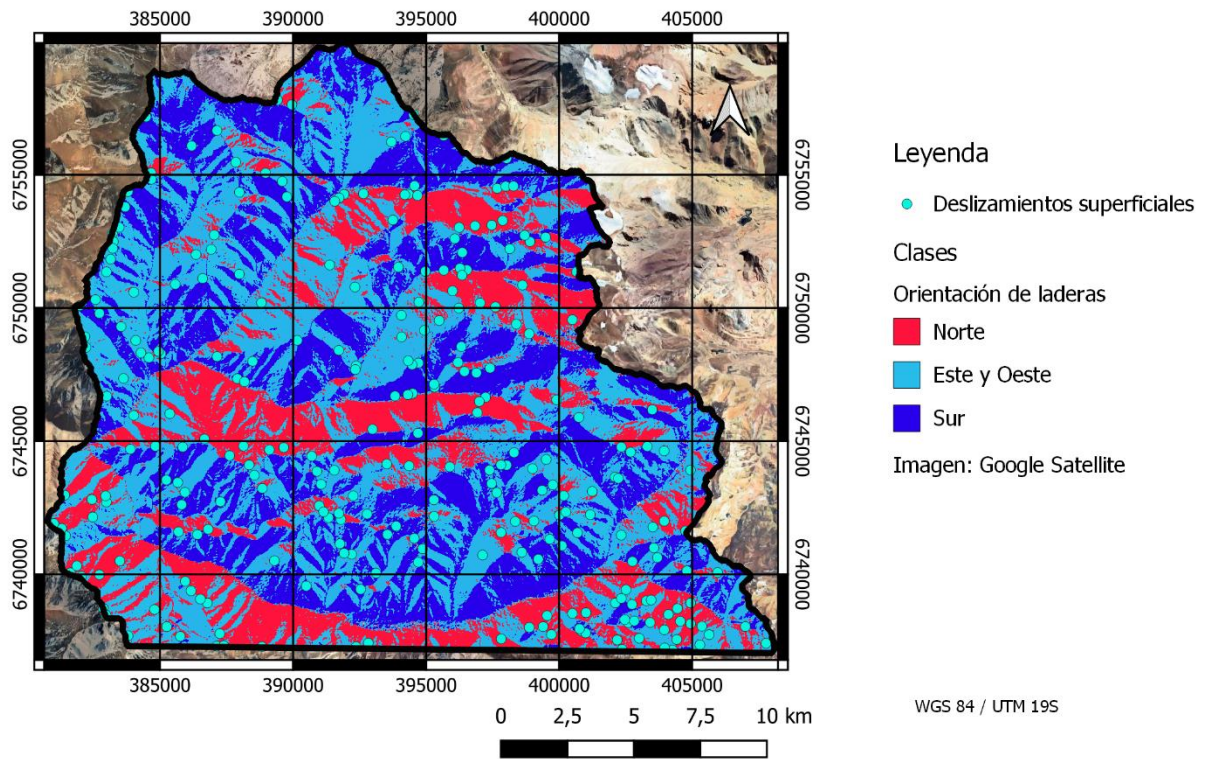


Figura 26: Exposición al sol según clases. Elaboración propia.

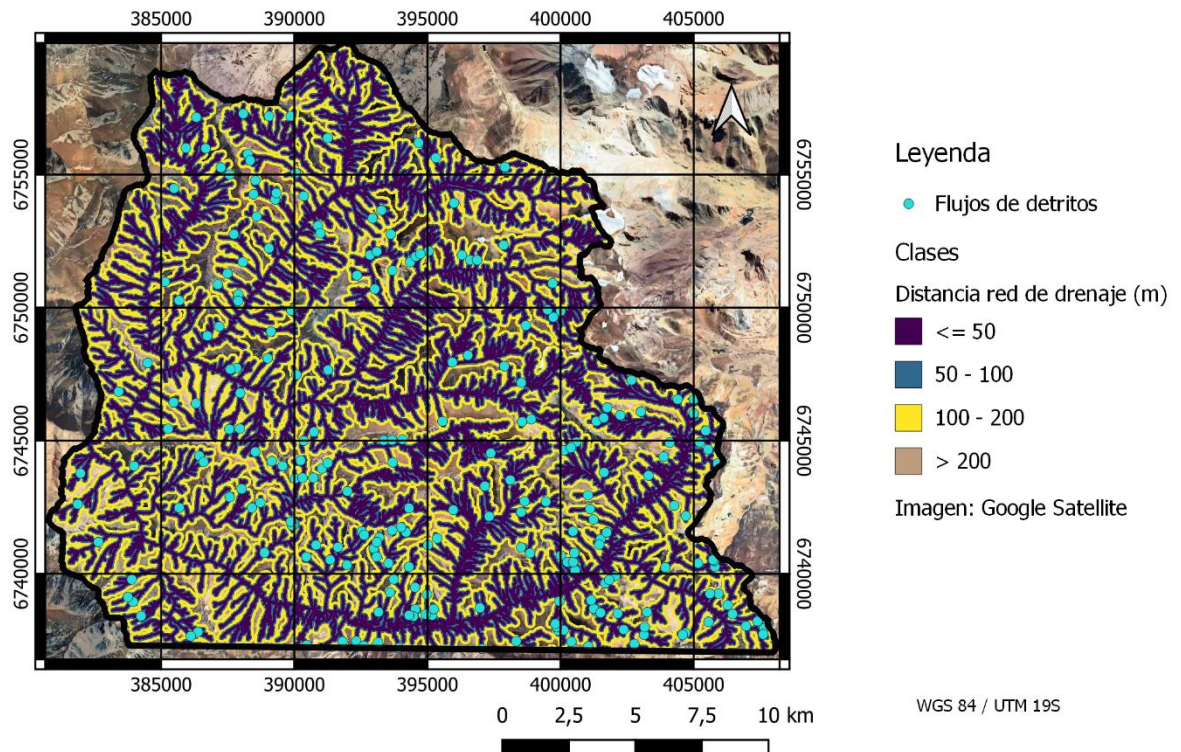


Figura 27: Distancia a redes de drenaje según clases para flujos de detritos. Elaboración propia.



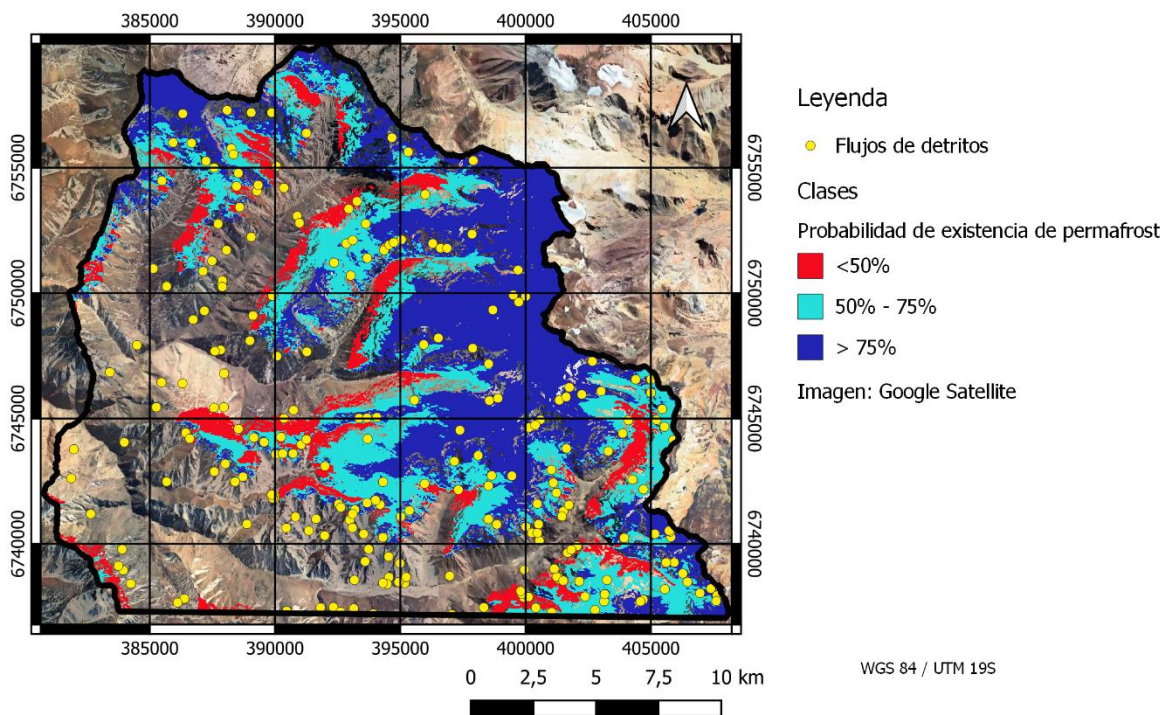


Figura 28: Clases de probabilidad de existencia de permafrost. Elaboración propia.

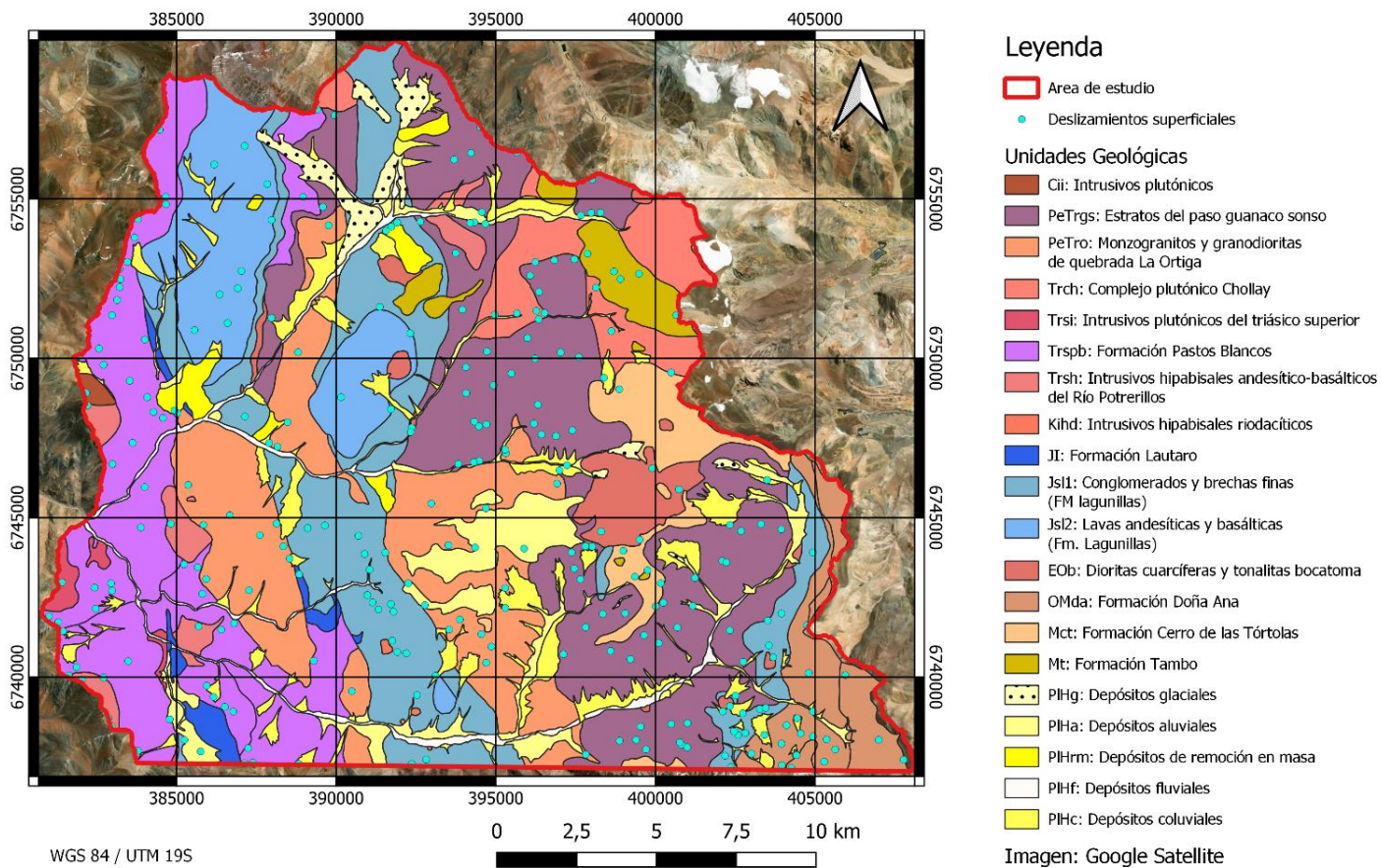


Figura 29: Unidades geológicas para flujos de detritos y deslizamientos de suelo. Elaboración propia.



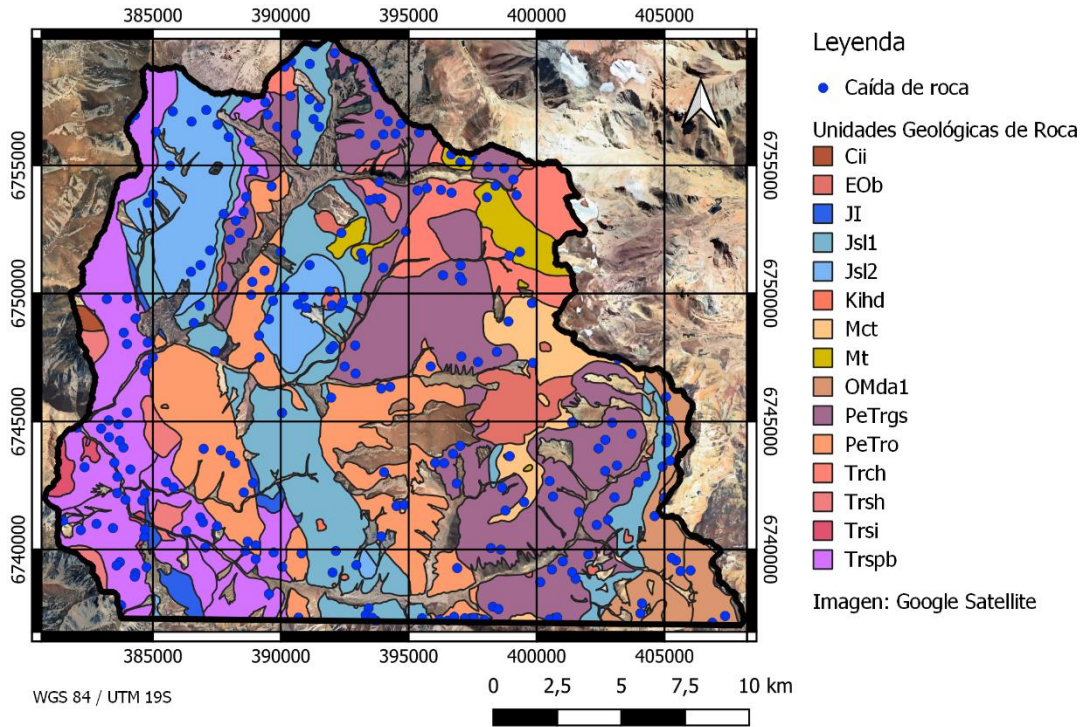


Figura 30: Unidades geológicas para caída de rocas. Elaboración propia.

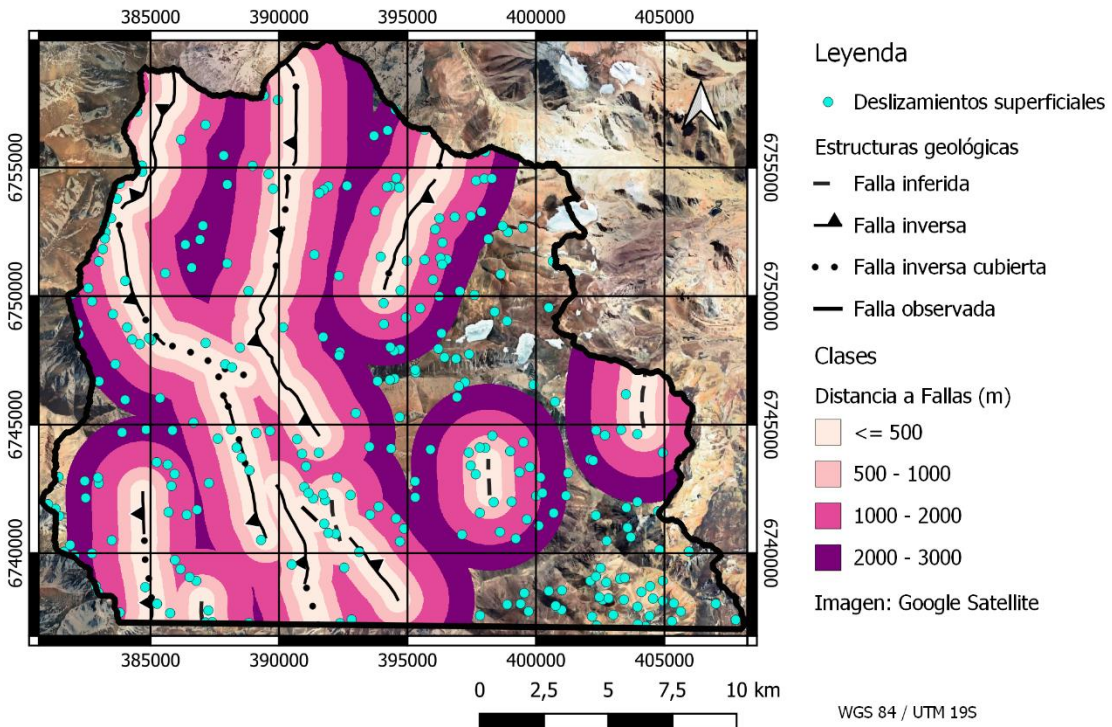


Figura 31: Distancia a fallas para deslizamientos de suelo y caída de rocas. Elaboración propia.

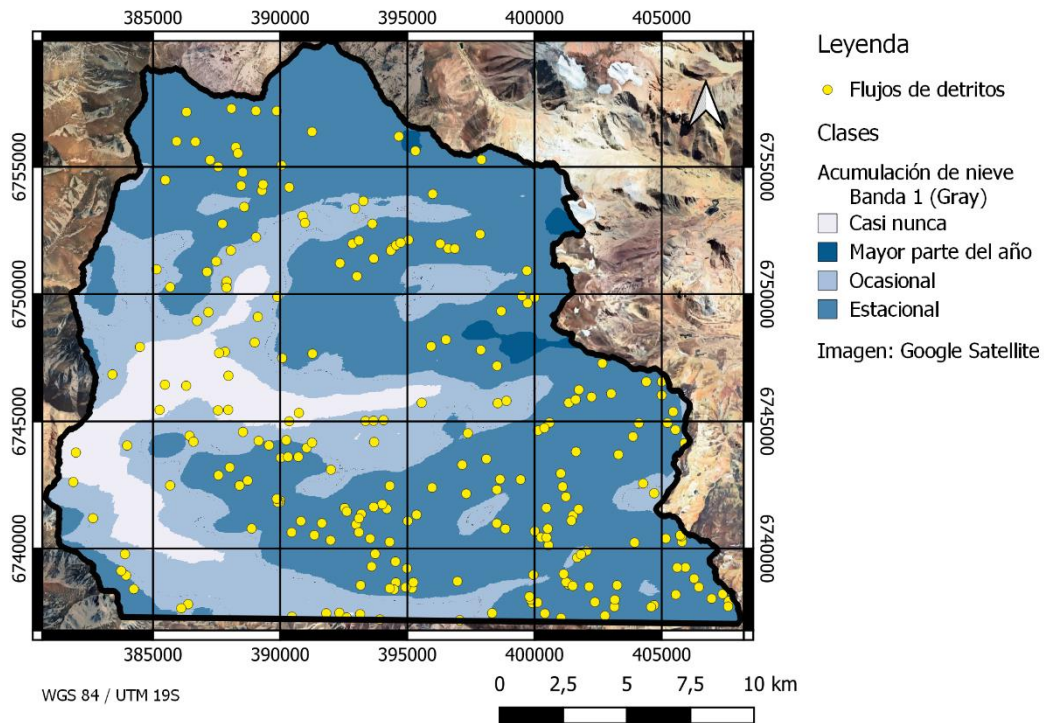


Figura 32: Clases asignadas al factor acumulación de nieve. Elaboración propia.

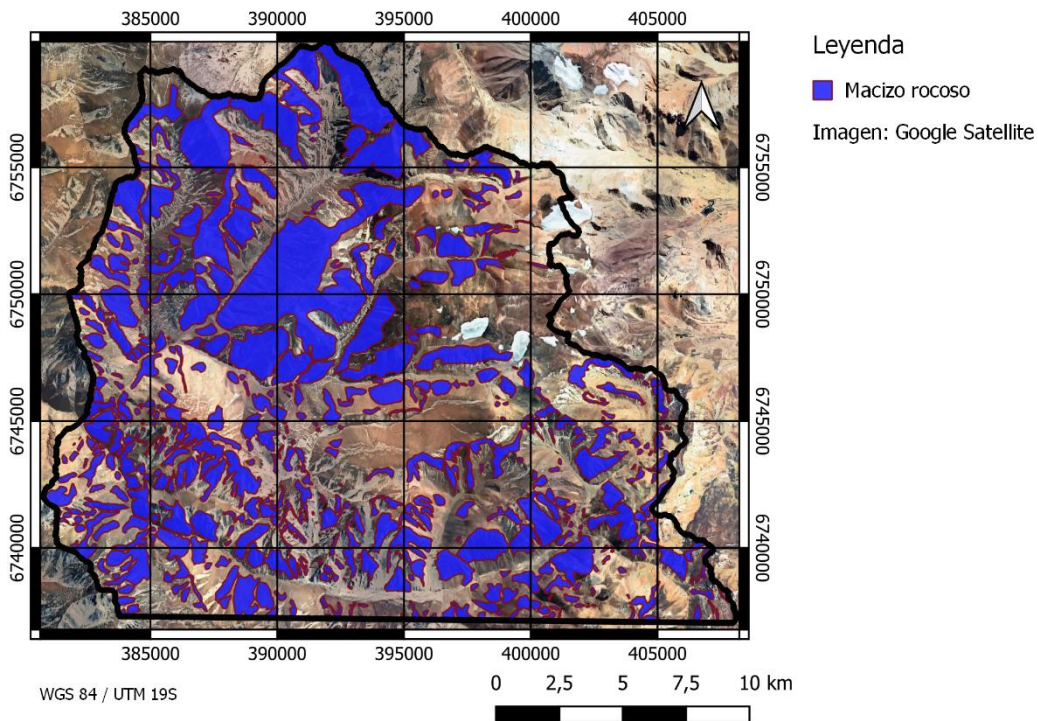


Figura 33: Mapeo a escala 1:14000 de material rocoso. Elaboración propia.



### 5.3 Resultados de la metodología AHP

Los resultados de las comparaciones a pares se obtuvieron a través de matrices donde se obtuvo una ponderación para cada factor condicionante de acuerdo con el escenario, además un índice normalizado (IS\_n) por cada clase dentro de un factor condicionante, el desarrollo de las matrices y algunos ejemplos de las comparaciones a pares se encuentran en el Anexo A.

Con la calculadora ráster en QGIS se sumaron todas los IS\_n ya ponderados por su respectivo factor condicionante para generar el IS final (véase Figura 34) que tendrá cada píxel en el área de estudio. A continuación, se muestran los resultados de las comparaciones a pares empezando por los factores condicionantes para luego mostrar las comparaciones entre las categorías de cada uno de estos.

#### Resultados de ponderaciones de factores condicionantes mediante AHP:

A continuación (tablas 8, 9 y 10), se muestran las ponderaciones obtenidas mediante la comparación a pares para los factores condicionantes en los diferentes casos planteados. Por cada tipo de proceso y para los diferentes escenarios A, B y C. Cabe destacar que para los escenarios evaluados la probabilidad de existencia de permafrost y la exposición al sol son excluyentes. El caso “A” corresponde a ponderaciones incluyendo la probabilidad de existencia de permafrost, el caso “B” es similar, pero con una ponderación más baja en la probabilidad de existencia de permafrost (se omite en caídas de rocas pues en una primera instancia resulto en ponderaciones bajas de este factor condicionante) y por último el caso “C” incluye la exposición al sol.

En el Anexo B se presentan las tablas detalladas de este procedimiento, con todos los puntajes asignados.

Flujos de detritos			
Caso/Clase	Escenario A: Con probabilidad de existencia de permafrost	Escenario B: Con probabilidad de existencia de permafrost con una ponderación menor	Escenario C: Con exposición al sol
Pendientes	22%	24%	23%
Distancia a red de drenaje	16%	17%	17%
Curvatura	10%	11%	12%
PFI	15%	9%	No aplica
Exposición al sol	No Aplica	No aplica	9%
Geología	29%	30%	30%
Acumulación de nieve	8%	9%	9%
Suma	100%	100%	100%

Tabla 8: Ponderaciones de casos de estudio para flujos de detritos. Elaboración propia.

Deslizamientos de suelo			
Caso/Clase	Escenario A: Con probabilidad de existencia de permafrost	Escenario B: Con probabilidad de existencia de permafrost con una ponderación menor	Escenario C: Con exposición al sol
Pendientes	39%	38%	38%
Distancia a fallas	12%	14%	14%
PFI	17%	10%	No aplica
Exposición al sol	No Aplica	No aplica	10%
Geología	23%	27%	27%
Acumulación de nieve	9%	10%	10%
Suma	100%	100%	100%

Tabla 9: Ponderaciones para los casos de estudio de deslizamientos de suelo. Elaboración propia.

Caídas de roca			
Caso/Clase	Escenario A: Con probabilidad de existencia de permafrost	Escenario B: Con exposición al sol	Escenario C: Con exposición al sol
Pendientes	34%	No aplica	35%
Distancia a fallas	12%	No aplica	14%
PFI	11%	No aplica	No aplica
Exposición al sol	No aplica	No aplica	8%
Geología	34%	No aplica	35%
Acumulación de nieve	8%	No aplica	8%
Suma	100%	No aplica	100%

Tabla 10: Ponderaciones para casos de estudio de caídas de roca. En una primera instancia el cálculo de la ponderación de la probabilidad de existencia de permafrost resulto con valores bajos, por lo que no se realizó un escenario con ponderaciones más bajas. Elaboración propia.

### Comparación a pares para categorías de factores condicionantes

De forma análoga, se aplica comparación a pares para determinar la incidencia o peso de cada clase o rango de los factores condicionantes correspondientes. El resultado es un promedio que debe normalizarse para obtener un valor IS<sub>n</sub> correspondiente a la susceptibilidad de cada categoría (para más detalle revisar Anexo A). Las tablas 11, 12 y 13 muestran las categorías de los distintos factores condicionantes implicados y sus respectivos índices (IS<sub>n</sub>) agrupados por tipo de remoción en masa.

Categorías para factores condicionantes de flujos de detritos			
Factores	Clases	Promedio	Susceptibilidad (IS_n)
Pendientes (°)	<10	0,06	15
	10-20	0,10	24
	20-30	0,16	39
	30-40	0,26	63
	>40	0,42	100
Curvatura	Concavo (<-0,005)	0,65	100
	Plano (-0,005 a 0,005)	0,23	35
	Convexo (>0,005)	0,12	19
Distancia a red de drenaje	<50m	0,47	100
	50m<D<100m	0,28	60
	100m<D<200m	0,17	36
	>200m	0,07	16
PFI (%)	P=0	0,14	31
	0<P<50	0,26	58
	50<P<75	0,45	100
	75<P<100	0,14	31
Exposición al sol	Norte	0,56	100
	Oeste-Este	0,32	57
	Sur	0,12	22
Geología	Trch	0,02	18
	EOb	0,02	18
	Trsh	0,02	17
	Cii	0,02	18
	Trsi(sg)	0,02	18
	PeTro	0,03	28
	Kihd	0,02	19
	PeTrgs	0,07	71
	Mct	0,04	42
	Omda	0,05	47
	Jsl1	0,05	50
	Jl	0,04	43
	Trspb	0,04	41
	Mt	0,04	38
	Jsl2	0,03	25
	PIHa	0,10	100
	PIHc	0,10	100
PIHrm	0,10	100	
PIHf	0,10	100	
PIHg	0,10	100	
Acumulación de nieve	Casi nunca	0,11	21
	Ocasional	0,24	46
	Estacional	0,52	100
	Mayor parte del año	0,13	24

Tabla 11: Resultados mediante metodología AHP. Índices normalizados (IS\_n) de los factores condicionantes de flujos de detritos. Elaboración propia.

Categorías para factores condicionantes de deslizamientos de suelo			
Factores	Clases	Promedio	Susceptibilidad (IS <sub>n</sub> )
Pendientes (°)	15-20	0,06	15
	20-25	0,10	24
	25-30	0,15	36
	30-40	0,26	63
	>40	0,42	100
Distancia a fallas	<500m	0,44	100
	500m<D<1000m	0,29	66
	1km<D<2km	0,13	30
	2km<D<3km	0,08	19
	>3000m	0,05	12
PFI (%)	P=0	0,14	31
	0<P<50	0,26	58
	50<P<75	0,45	100
	75<P<100	0,14	31
Exposición al sol	Norte	0,56	100
	Oeste-Este	0,32	57
	Sur	0,12	22
Geología	Trch	0,02	18
	EOb	0,02	18
	Trsh	0,02	17
	Cii	0,02	18
	Trsi(sg)	0,02	18
	PeTro	0,03	28
	Kihd	0,02	19
	PeTrgs	0,07	71
	Mct	0,04	42
	Omda	0,05	47
	Jsl1	0,05	50
	Jl	0,04	43
	Trspb	0,04	41
	Mt	0,04	38
	Jsl2	0,03	25
	PIHa	0,10	100
	PIHc	0,10	100
PIHrm	0,10	100	
PIHf	0,10	100	
PIHg	0,10	100	
Acumulación de nieve	Casi nunca	0,11	21
	Ocasional	0,24	46
	Estacional	0,52	100
	Mayor parte del año	0,13	24

Tabla 12: Resultados mediante metodología AHP. Índices normalizados (IS<sub>n</sub>) de los factores condicionantes de deslizamientos de suelo. Elaboración propia.

Categorías para factores condicionantes de caída de rocas			
Factores	Clases	Promedio	Susceptibilidad (IS_n)
Pendientes	15-20	0,06	18
	20-25	0,08	25
	25-30	0,12	35
	30-35	0,17	51
	35-45	0,24	71
	>45	0,33	100
Distancia a fallas	<500m	0,44	100
	500m<D<1000m	0,29	66
	1km<D<2km	0,13	30
	2km<D<3km	0,08	19
	>3000m	0,05	12
PFI (%)	P=0	0,14	31
	0<P<50	0,26	58
	50<P<75	0,45	100
	75<P<100	0,14	31
Exposición al sol	Norte	0,56	100
	Oeste-Este	0,32	57
	Sur	0,12	22
Geología	Trch	0,03	18
	EOb	0,03	18
	Trsh	0,03	16
	Cii	0,03	18
	Trsi(sg)	0,03	18
	PeTro	0,05	31
	Kihd	0,03	18
	PeTrgs	0,16	100
	Mct	0,09	53
	Omda	0,10	64
	Jsl1	0,12	71
	Jl	0,09	57
	Trspb	0,10	60
	Mt	0,07	45
Jsl2	0,04	27	
Acumulación de nieve	Casi nunca	0,11	21
	Ocasional	0,24	46
	Estacional	0,52	100
	Mayor parte del año	0,13	24

Tabla 13: Resultados mediante metodología AHP. Índices normalizados (IS\_n) de los factores condicionantes de caídas de rocas. Elaboración propia.

## 5.4 Mapas de susceptibilidad

En esta sección se muestra un ejemplo para la obtención del mapa de susceptibilidad (IS) a partir de los IS<sub>n</sub> y ponderaciones de los factores condicionantes obtenidos mediante metodología AHP (cuyo desglose se presenta en el Anexo C). Además, se presentan algunos mapas de susceptibilidad en los diferentes escenarios mencionados en la sección 4.5 (véase el resto de los mapas de susceptibilidad en Anexo D). Estos mapas y su simbología buscan facilitar la representación de dichos valores en un ráster con valores que pueden ir desde el 0 al 100.

Finalmente se realizó en Qgis un muestreo de los puntos de cada tipo de remociones en masa del inventario sobre los mapas de susceptibilidad respectivos obteniendo estadísticas de los índices de susceptibilidad de los píxeles donde se localizan los puntos de activación presentados con más detalle en la sección de discusiones. A continuación, y en las figuras 35 a la 39, se describen algunos mapas de susceptibilidad que presentaron estadísticas con índices de susceptibilidad mayores al resto de los escenarios en cada caso de validación.

La figura 35 representa la validación con los valores de IS más altos al muestrear los flujos de detritos del área total, identificados en el inventario de remociones en masa, con respecto al mapa de susceptibilidad. En este caso corresponde al escenario C, que utiliza la exposición al sol como factor condicionante.

La figura 36 representa la validación con los valores de IS más altos al muestrear los flujos de detritos exclusivamente en zonas con datos de probabilidad de permafrost (véase figura 20). En este caso resulta ser el escenario B, que utiliza la probabilidad de existencia de permafrost como factor condicionante ponderándola con un 9%.

La figura 37 representa la validación con los valores de IS más altos al muestrear los deslizamientos superficiales del área total, identificados en el inventario de remociones en masa, con respecto al mapa de susceptibilidad. En este caso también corresponde al escenario C, que utiliza la exposición al sol como factor condicionante.

La figura 38 representa la validación con los valores de IS más altos al muestrear los deslizamientos superficiales exclusivamente en zonas con datos de probabilidad de permafrost (véase figura 20). En este caso resulta ser el escenario A, que utiliza la probabilidad de existencia de permafrost como factor condicionante ponderándola con un 17%.

Para las caídas de rocas la figura 39 representa la validación con los valores de IS más altos al muestrear este tipo de remociones en masa exclusivamente en zonas con datos de probabilidad de permafrost (véase figura 20). En este caso resulta ser el escenario C, que utiliza la exposición al sol como factor condicionante.



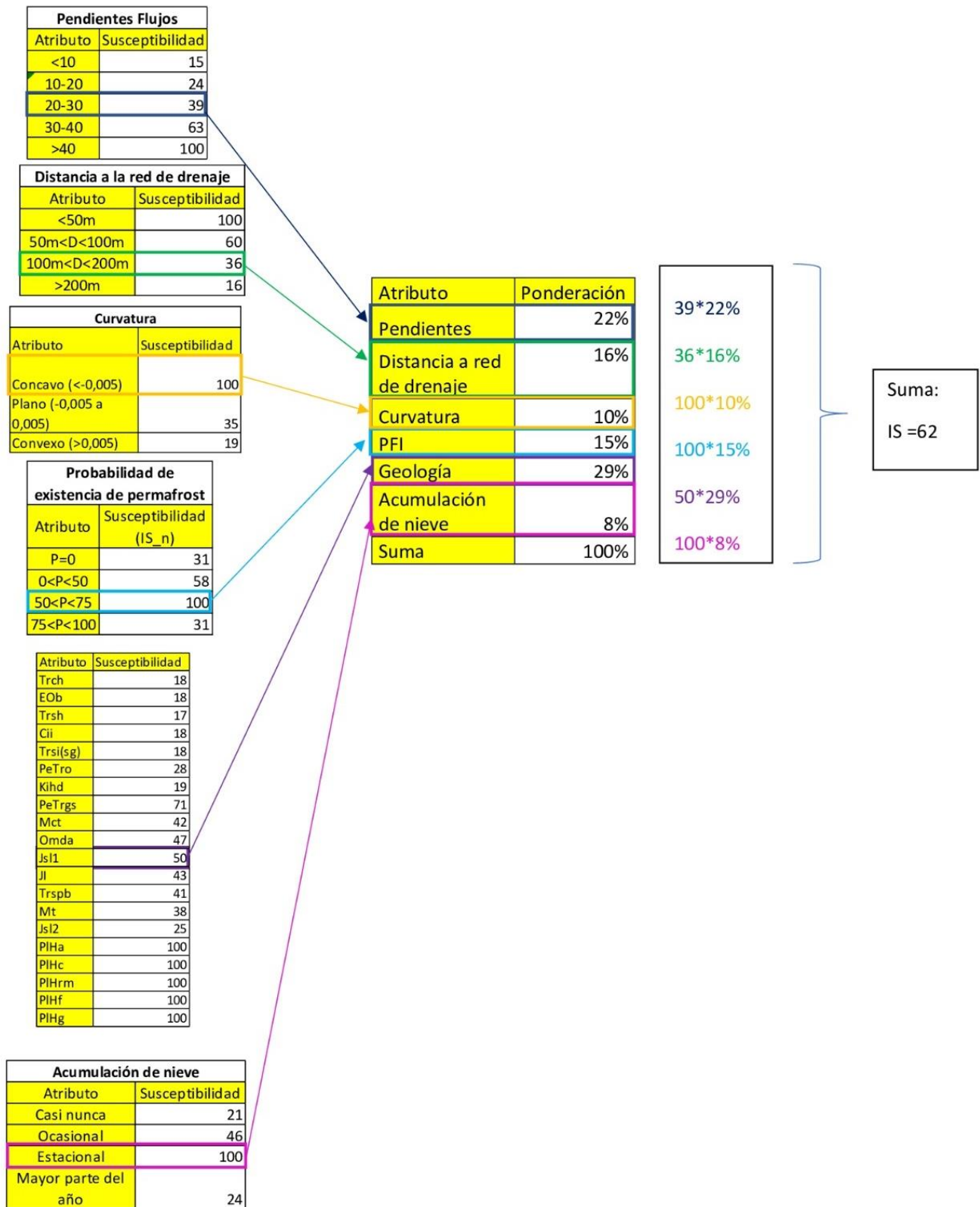


Figura 34: Ejemplo de cálculo de IS para un píxel del mapa de susceptibilidad de flujo de detritos según los mapas temáticos, sus categorías y susceptibilidad calculada mediante AHP. Elaboración propia.

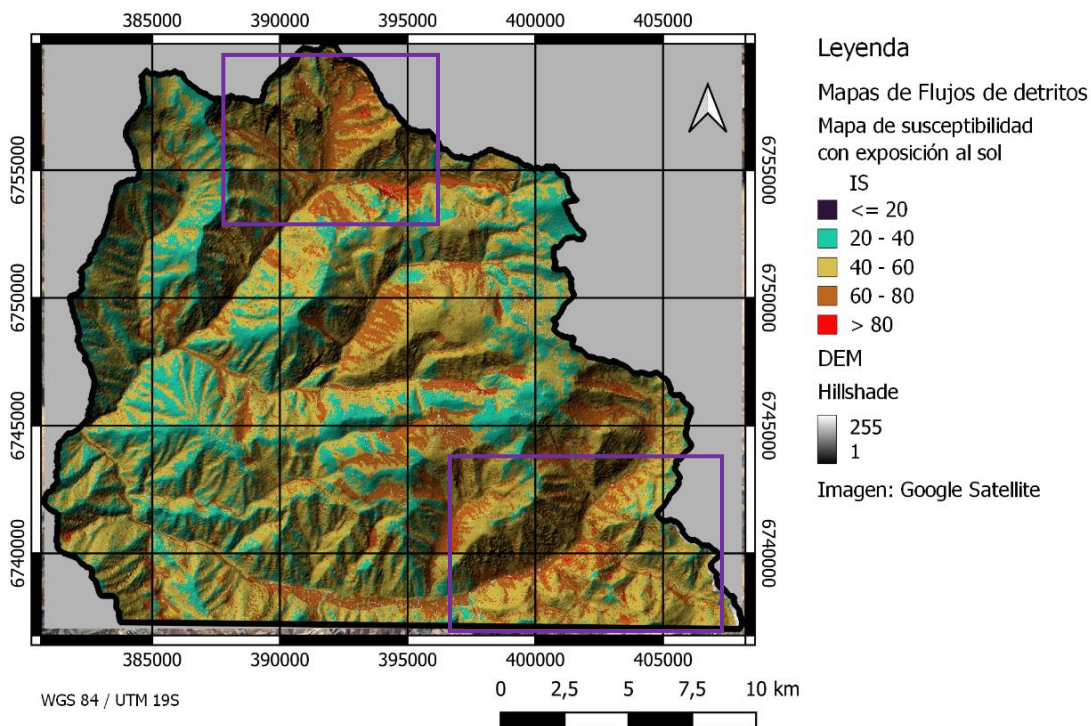


Figura 35: Susceptibilidad de flujos de detritos ponderando la exposición al sol en lugar de la probabilidad de permafrost en el área de estudio (Escenario C). Enmarcados en cuadros morados hay zonas con concentración de altos índices (IS). Elaboración propia.

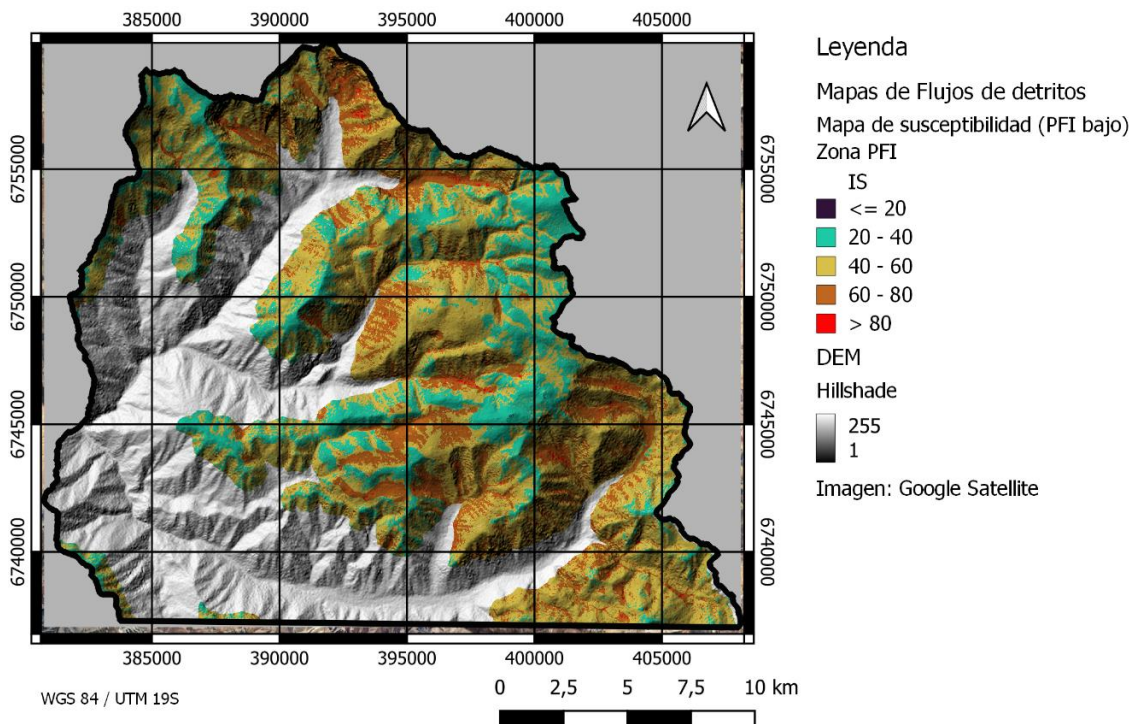


Figura 36: Susceptibilidad de flujo de detritos integrando la probabilidad de existencia de permafrost como factor condicionante con una menor ponderación (9%) exclusivamente en zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost (Escenario B). Elaboración propia.



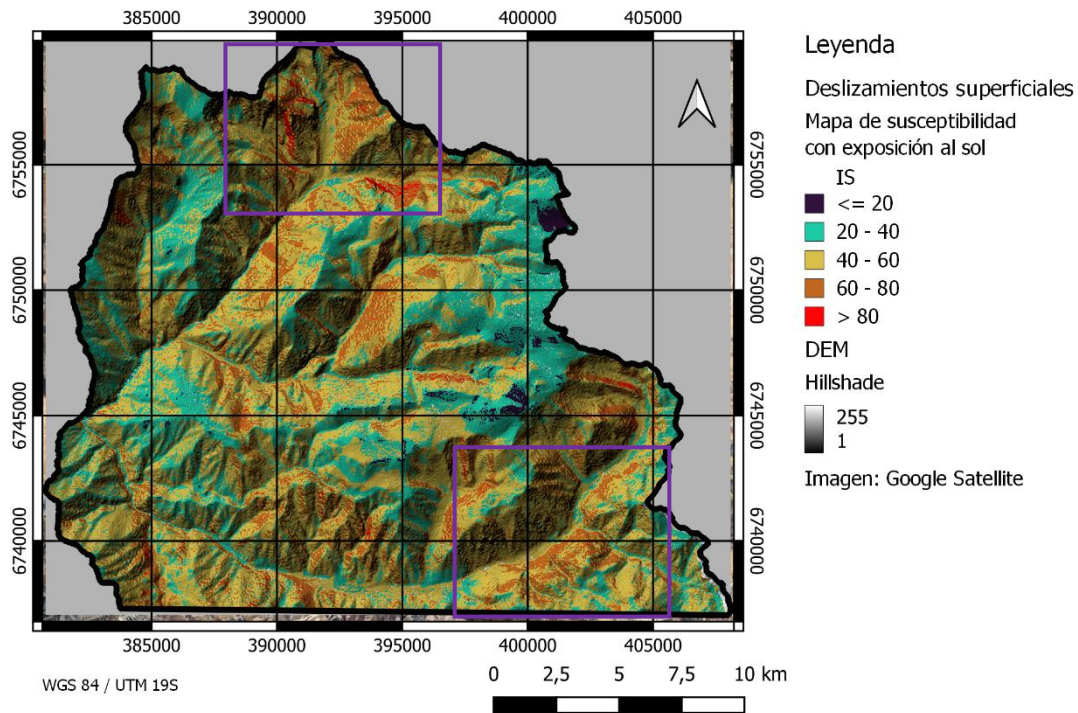


Figura 37: Susceptibilidad de deslizamientos de suelo integrando la exposición al sol como factor condicionante en el área de estudio (Escenario C). Enmarcados en cuadros morados hay zonas con concentración de altos índices (IS). Elaboración propia.

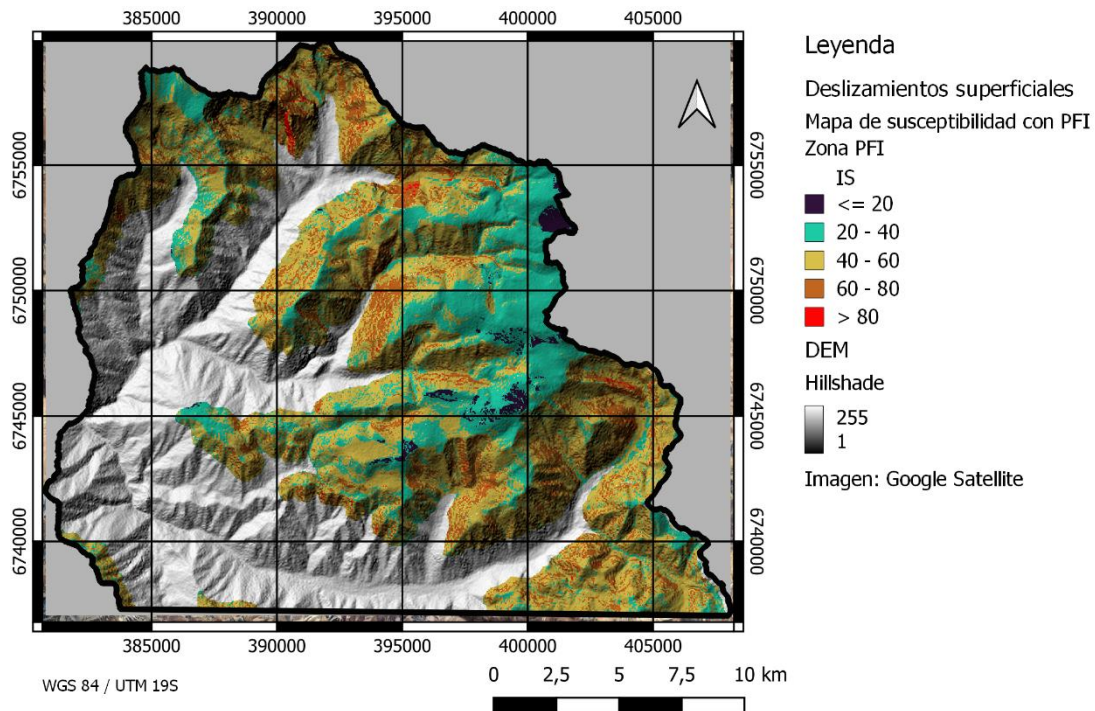


Figura 38: Susceptibilidad de deslizamientos de suelo integrando la probabilidad de existencia de permafrost como factor condicionante (escenario A) en el área de estudio. Elaboración propia.

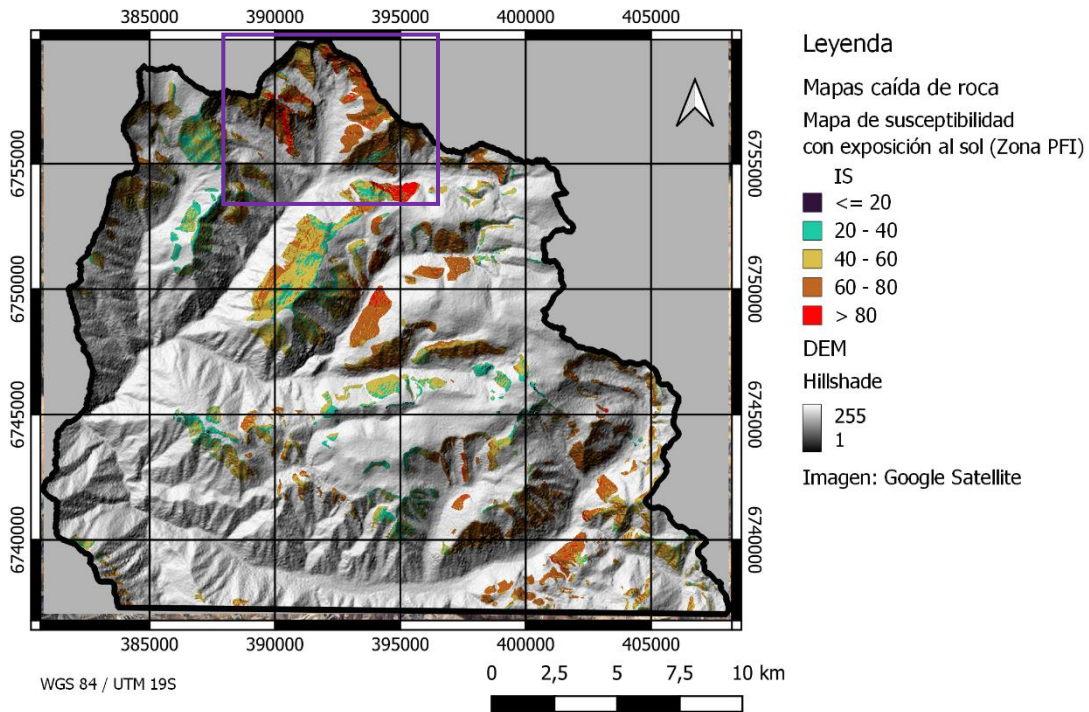


Figura 39: Susceptibilidad de caída de rocas integrando la exposición al sol como factor condicionante en zonas con probabilidad positiva de permafrost (Escenario C). Enmarcados en cuadros morados hay zonas con concentración de altos índices (IS). Elaboración propia.

Respecto a las figuras presentadas, es importante mencionar la concentración de índices de susceptibilidad altos en las zonas norte y sureste del área de estudio enmarcadas en morado en las figuras.

## **6. Discusiones**

En este capítulo se analizan y discuten la metodología y resultados con el fin de revelar un panorama más claro sobre la relación entre la probabilidad de existencia de permafrost y las remociones en masa en el área de estudio.

### **6.1 Inventario de remociones en masa**

El inventario de remociones en masa elaborado a partir de puntos de generación de remociones de tipo flujo de detritos, deslizamiento de suelo y caída de rocas es una estimación y no debe considerarse como la ubicación exacta de la ocurrencia de los respectivos procesos, debido a que la escala de trabajo no permitió determinar con exactitud el píxel desde donde se generó cada remoción o bien el sitio exacto pudo haber sido erosionado o cubierto con nuevas capas de sedimento.

De esta forma, al identificar las activaciones con puntos se ignora la información que pudiera aportar el resto de la zona de generación, ya que dependiendo del píxel en que se marque el punto puede cambiar el valor en los mapas temáticos y, por ende, afectar la distribución de índices de susceptibilidad considerado en las validaciones. Por estas razones se sugiere para trabajos posteriores realizar inventarios con mapeo a través de polígonos que involucren de mejor manera las zonas de generación de remociones en masa, integrando más información de estas, pues al establecer remociones con puntos podría perderse información generando un posible sesgo en los datos.

Otro análisis importante tiene relación con la escala temporal de la ocurrencia de remociones en masa en el área de estudio y la degradación del permafrost. El inventario de remociones en masa fue elaborado a través de imágenes satelitales que aportaron información sobre la ubicación espacial para cada evento identificado, sin embargo, no fue viable reconocer la antigüedad de las remociones en masa en la zona, dado que estas remociones pudieron haber ocurrido hace mucho tiempo.

Por otro lado, el fenómeno de degradación del permafrost tiene especial importancia en las últimas décadas por lo que es un fenómeno más actual. Si bien varias de las remociones en el área de estudio pudieron ser condicionadas por la degradación del permafrost, es probable que gran parte de los eventos de remoción en masa ocurrieran en periodos donde la distribución del permafrost, y por ende su degradación fuera diferente a la actual.

Para asociar la degradación del permafrost con la distribución de remociones en masa de manera más rigurosa es deseable que se identifiquen los eventos que ocurrieron en las últimas décadas donde se registran alzas considerables en la temperatura debido al cambio climático. Para esto se propone realizar inventarios de remociones en masa a partir de imágenes satelitales de mayor antigüedad y comparar con inventarios actuales, de manera en que sea posible identificar remociones recientes que pudiesen estar asociadas al fenómeno de degradación del permafrost en las últimas décadas. Particularmente, se sugiere realizar estos estudios en zonas donde haya grandes extensiones de permafrost que pudiesen mostrar un

número considerable de remociones en masas recientes, esto hace necesario el estudio de la distribución de permafrost en más lugares del territorio nacional, por ejemplo, al sur de Chile.

## **6.2 Probabilidad de existencia de permafrost y distribución de remociones en masa.**

La susceptibilidad por probabilidad de existencia de permafrost viene dada por los siguientes supuestos:

- El mapa índice de favorabilidad de permafrost, y de acuerdo con lo expuesto en el capítulo 3.5, sugiere que en las áreas con  $PFI \geq 0.75$  el permafrost estará presente en la gran mayoría de condiciones ambientales.

Debido a las condiciones favorables de permafrost se infiere que en estos rangos de probabilidad el permafrost no presentará una degradación apreciable, por lo cual se considera menos relevante en términos de susceptibilidad.

Cabe destacar que las áreas que no tienen probabilidad de permafrost se les asignó el mismo grado de susceptibilidad que las zonas con  $PFI \geq 0.75$  dentro del factor condicionante en cuestión.

- En contraste, en áreas donde  $0.5 \leq PFI \leq 0.75$  el permafrost estará presente solo en condiciones térmicas favorables asociadas a las propiedades del suelo y la acumulación de nieve.

Dentro de las consecuencias del cambio climático está el aumento de la altura de la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  (Villaruel *et al.* 2022) junto con mayores tasas de fusión de nieve y menor acumulación de esta dejando en contacto directo el suelo con la atmosfera la cual tiene una tendencia al alza en la temperatura (Villaruel *et al.* 2022) generando entonces una paulatina degradación del permafrost y el engrosamiento de la capa activa, lo cual podría tener implicancias en la generación de remociones en masa (Atacama Ambiente, 2021), por lo cual se infiere una mayor relevancia en la susceptibilidad de esta zona de probabilidad de permafrost.

- Por último, en áreas con un  $PFI \leq 0.5$  el permafrost podría estar presente en circunstancias ambientales excepcionales de manera local.

Este escenario puede ser explicado a partir de 2 supuestos:

La zona con probabilidad de permafrost menor al 50% no cumple con las condiciones de temperatura necesarias para alcanzar el estado de permafrost desde tiempos con condiciones climáticas mucho más frías como la última



glaciación. Por otro lado, está la posibilidad de que el aumento de la temperatura y la retirada de manchones de nieve o menores volúmenes de acumulación de esta en las últimas décadas hayan degradado el permafrost haciendo posible su existencia solo de manera excepcional. Debido a que no se cuenta con la evidencia suficiente para asegurar esta última aseveración, pero ante la evidencia de aumento en la altitud de la isoterma 0°C se consideró esta zona con una importancia levemente superior en cuanto a susceptibilidad con respecto a las zonas sin datos de probabilidad de existencia de permafrost.

Estos supuestos se ven reflejados al menos parcialmente en la distribución de remociones en masa muestreadas según la probabilidad de existencia de permafrost.

La relevancia de la probabilidad de existencia de permafrost sobre la susceptibilidad en remociones en masa se ve reflejada en cómo se distribuyen las activaciones de acuerdo con los rangos de probabilidad de existencia permafrost. A continuación, en la Tabla 14, se muestra cómo se comportan las remociones en masa según este factor:

Probabilidad de permafrost (%)	Área (Km <sup>2</sup> )	Frecuencia de flujos	Frecuencia de flujos/Km <sup>2</sup>	Frecuencia de caída de rocas	Frecuencia de caídas/Km <sup>2</sup>	Frecuencia de deslizamientos superficiales	Frecuencia de Deslizamientos/Km <sup>2</sup>
0	224,6	115	0,51	178	0,79	119	0,53
0<P<50	30,6	16	0,52	6	0,20	33	1,08
50<P<75	70,4	50	0,71	24	0,34	62	0,88
75<P<100	103,7	59	0,57	42	0,40	61	0,59

Tabla 14: Distribución de las remociones en masa según la probabilidad de existencia de permafrost. Incluyendo un índice que indica el número de remociones por kilómetro cuadrado considerando el área que ocupa cada rango de probabilidad de existencia permafrost. Elaboración propia.

Zona	Área (Km <sup>2</sup> )	Frecuencia de flujos	Frecuencia de flujos/Km <sup>2</sup>	Frecuencia de caída de rocas	Frecuencia de caídas/Km <sup>2</sup>	Frecuencia de deslizamientos de suelo	Frecuencia de Deslizamientos de suelo/Km <sup>2</sup>
Áreas con probabilidad de existencia de permafrost	265	155	0,58	159	0,60	203	0,77
Áreas sin probabilidad de existencia de permafrost	162	85	0,52	91	0,56	72	0,44

Tabla 15: Distribución de las remociones en masa según la posible presencia del permafrost. Cabe destacar que la fila "Áreas con probabilidad de existencia de permafrost" hace referencia a las remociones identificadas dentro del polígono PFI, mostrado en la Figura 20, mientras que la fila "Áreas sin probabilidad de existencia de permafrost" denota las remociones que se encuentran fuera del polígono PFI mencionado anteriormente. Elaboración propia.

En la Tabla 14 una mayor concentración de flujos de detritos puede apreciarse en las zonas de probabilidad de existencia de permafrost entre 50% y 75% con respecto a los otros rangos de probabilidad. Para el caso de los deslizamientos de suelo se observa una concentración alta en este mismo rango, solo siendo superada por la concentración de remociones en los rangos de probabilidad entre 0% y 50% pudiendo ser un sesgo del inventario de remociones en masa al presentar eventos que ocurrieron sin presencia de degradación de permafrost en un pasado donde no era relevante este fenómeno. Por último, las caídas de roca presentan una concentración más variable de acuerdo con los rangos de probabilidad pudiendo esto ser explicado por cómo está elaborado el mapa de probabilidad de permafrost, el cual está contemplado principalmente zonas de detritos, hecho por el cual muchas activaciones de caídas de roca no presentan una probabilidad de existencia de permafrost asignada (valores “sin datos” en el mapa de probabilidad PFI).

En la Tabla 15 puede observarse un mayor número de remociones en masa por unidad de área en las zonas con posible presencia de permafrost, independiente del tipo de proceso, siendo especialmente relevante los deslizamientos de suelo que presentan una concentración de remociones en masa significativamente mayor en las zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost. La distribución de remociones en masa de acuerdo con la posible presencia de permafrost indica que podría ser relevante esta condición para la generación de procesos de remociones en masa y su susceptibilidad, sin embargo, esta mayor concentración de remociones en masa pudiera deberse a otros factores condicionantes que hacen más susceptibles estas zonas por lo que no es concluyente esta relación. Se sugiere finalmente estudiar la distribución de remociones en masa que hayan ocurrido en las últimas décadas y pudieran ligarse de manera más directa a la degradación del permafrost.

### **6.3 Probabilidad de existencia de permafrost y degradación**

La degradación del permafrost puede tener consecuencias en la permeabilidad y en los campos de tensión de la roca y el suelo (Deline *et al.*, 2015) convirtiendo este proceso en un factor relevante a integrar en evaluaciones de susceptibilidad y peligros en un contexto de cambio climático donde las temperaturas van en aumento y la altitud de la isoterma 0°C se eleva, disminuyendo la presencia temporal y espacial de manchones de nieve que estabilizan las temperaturas en zonas de gran altitud generando así un aumento en el grosor de la capa activa y una degradación del permafrost.

La mayoría de los estudios sobre la influencia del permafrost en las remociones en masa hace referencia a la degradación de este en relación con los aumentos de temperatura atmosférica asociados al cambio climático, sin embargo, a nivel nacional no hay estudios públicos de áreas extensas que incluyan la degradación del permafrost en zonas de alta montaña. Por lo mismo el presente estudio pretende ser un primer acercamiento para involucrar el permafrost en evaluaciones de susceptibilidad y peligros de remoción en masa integrando su probabilidad de existencia.

A partir del mapa de probabilidad de existencia de permafrost utilizado y los supuestos ya mencionados se puede estimar de forma aproximada zonas donde pudiera haber degradación del permafrost, sin embargo, son necesarios estudios que involucren una variable temporal, incluyendo investigaciones que determinen como se distribuye el permafrost en diferentes periodos de tiempo para involucrar la degradación de este de una manera más rigurosa, integrando además la distribución de la acumulación de nieve y propiedades del suelo para llevar a cabo análisis más precisos y evaluaciones de susceptibilidad que representen de mejor manera el efecto de la degradación del permafrost en la ocurrencia de remociones en masa.

Este tipo de análisis y evaluaciones no aplica solamente a las cumbres más altas de los Andes Semiáridos, ya que el retroceso de los glaciares (los cuales abundan a lo largo del territorio nacional en zonas de alta montaña) acompaña un desarrollo del ambiente periglacial, en un proceso que demuestra lo inestable que pueden ser los sistemas de la naturaleza y como los procesos exógenos influyen en la superficie terrestre (Ermolin *et al.*, 2015), de esta forma en el largo plazo zonas con ambiente glacial (o sus alrededores) que son propensas a sufrir incrementos de temperatura podrían verse afectadas y desarrollar un ambiente periglacial con presencia de permafrost y una posible degradación en otras zonas de la cordillera de los Andes. Con las proyecciones del cambio climático es probable una venidera alza en las temperaturas que influirá en la distribución del permafrost y su degradación en las siguientes décadas, por lo que es oportuno estimar cambios en la susceptibilidad de las zonas en un futuro a mediano o largo plazo con un posible aumento de las remociones en zonas con existencia de permafrost que aún no se degrada o que está recientemente en proceso de degradación.

## **6.4 Selección y ponderación de factores condicionantes en metodología AHP**

Un elemento importante para considerar es que la metodología AHP fue desarrollada bajo el criterio del autor del estudio, comparando con ponderaciones de otras evaluaciones de susceptibilidad mencionadas anteriormente en el capítulo 4.1. Si bien las matrices son consistentes de acuerdo con la razón de consistencia calculada, se sugiere que para estudios posteriores la comparación a pares sea hecha en base al criterio de un grupo de especialistas en el tema de manera de desarrollar un resultado más adecuado y sin sesgos debido a la subjetividad de esta metodología.

Si bien los factores condicionantes utilizados (salvo la probabilidad de existencia de permafrost) son recurrentemente utilizados en evaluaciones de susceptibilidad es de importancia la actualidad de los datos, por ejemplo, en la acumulación de nieve o la escala en que están representados, por ejemplo, la geología.

Cabe destacar el alcance limitado del mapa temático de la geología debido a la escala de la carta utilizada (1:100.000) por lo que no se consideran cambios litológicos a nivel local, además para cada unidad de la carta geológica suelen haber más de una litología y su

distribución no está determinada a nivel local en la carta geológica. En cuanto a la acumulación de nieve se recomienda en primer lugar integrarlo en un mapa de probabilidad de existencia de permafrost para una mejor estimación de las zonas con degradación, por otro lado, también se recomienda que la acumulación de nieve esté sujeta a datos lo más actualizados posible para estudiar un escenario actual o de un futuro cercano de manera adecuada.

Cabe destacar también que otros factores condicionantes pueden afectar la susceptibilidad de movimientos en masa, sin embargo, no fueron incluidos debido a que para la metodología de análisis jerárquico de procesos para evaluaciones de susceptibilidad se sugiere un limitado número de factores condicionantes a comparar en las matrices.

Entre los factores condicionantes no considerados está la vegetación que no fue incluida principalmente debido a su escasez en la zona (en un ambiente semiárido) y sobre todo a lo difícil de cuantificarla a través de los píxeles de imágenes satelitales Sentinel-2 con resolución espacial de 10 m/px marcando generalmente solo vegetación en la cercanía de los ríos lo cual hizo poco práctico su consideración en la evaluación. Además, para el caso de los flujos de detritos no se consideró la influencia de la distancia a fallas por influir de manera indirecta y en el caso de la geotecnia, al no contar con datos locales de las rocas o el suelo este factor no pudo ser incluido para ningún tipo de remociones en masa estudiados.

Otro parámetro que pudiese afectar en la susceptibilidad es el factor antrópico. Este es relevante en la degradación del permafrost, la cual que puede verse incrementada en glaciares rocosos por efectos geotérmicos y geoquímicos (Grebenets *et al.*, 1997; Hollesen *et al.*, 2009, citados en Brenning y Azócar, 2010). Por ejemplo, un glaciar rocoso recubierto con depósito de lastre podría verse condicionado a un eventual colapso lo cual potencialmente es capaz de generar una mezcla de detritos, hielo, y material de arrastre como lodos de estanques de relave convirtiéndose en un flujo de detritos capaz de desplazarse quebrada abajo por largas distancias (Valenzuela, 2004; Brenning, 2008 citados en Brenning y Azócar, 2010). Otro ejemplo es la construcción de caminos y otros tipos de infraestructura básicas sobre glaciares rocosos lo cual es capaz de afectar el balance energético del permafrost a través de la compactación y remoción de material causando una posible degradación del permafrost (Brenning y Azócar, 2010). En Chile donde la industria minera tiene gran potencial es de vital importancia la fiscalización de estas con estudios de impacto ambiental que pudieran tener además impacto indirecto en la susceptibilidad de remociones en masa. Por ejemplo, en las cercanías de las zonas de estudio se encuentra el proyecto Pascua Lama, el cual afectó de manera irreversible a glaciares blancos y rocosos (Herr, 2021). Estas y otras consecuencias ambientales asociadas a intervención antrópica, en particular de la industria minera sobre glaciares rocosos se presentan en la Tabla 16.

Tipo de intervención	Posibles consecuencias ambientales	Posibles consecuencias económicas	Efectos en el tiempo
Remoción completa o parcial de glaciares rocosos	Pérdida de un reservorio de hielo subterráneo fósil, reducción de caudales de ríos	Disponibilidad reducida de agua en la cuenca	Cambio inmediato
	Alteración irreversible del paisaje	Reducción del valor turístico del paisaje	Cambio inmediato
Creación de depósitos de lastre sobre glaciares rocosos	Aceleramiento, inestabilidad y posible colapso de glaciares rocosos	Riesgo para vidas humanas e infraestructura minera y pública; necesidad de monitoreo y control	Meses a décadas
	Contaminación de agua almacenada en glaciares rocosos como consecuencia del <i>Acid Rock Drainage</i> (ARD)	Necesidad de monitoreo y tratamiento del agua; mayor escasez de agua	Años a décadas
	Degradación del permafrost y posible inestabilidad de glaciares rocosos como consecuencia de la producción de calor en reacciones exotérmicas del ARD	Riesgo para vidas humanas e infraestructura minera y pública	Años a décadas
Construcción de caminos sobre glaciares rocosos	Degradación basal del permafrost de glaciares rocosos por efecto del gradiente térmico; posible inestabilidad basal	Riesgo para vidas humanas e infraestructura minera y pública	Décadas a siglos
	Degradación superficial del permafrost por la alteración de propiedades físicas superficiales como el albedo y la conductividad térmica	Peligro para usuarios del camino	Años a décadas
	En caso de accidentes, contaminación con sustancias tóxicas transportadas (por ejemplo combustible)	Disponibilidad reducida de agua en la cuenca; necesidad de monitoreo	Meses a años

Tabla 16: Tipología de intervenciones mineras en glaciares rocosos. Extraído de Brenning y Azócar (2010).

## 6.5 Comparación de mapas: Probabilidad de existencia de permafrost vs Exposición al sol

En la siguiente sección se presentan y discuten estadísticas de las validaciones hechas a los mapas de susceptibilidad en los distintos escenarios. Los mapas de susceptibilidad elaborados tienen un IS (índice de susceptibilidad) asociado a cada píxel, por lo que al realizar un muestreo de acuerdo con el inventario de remociones en masa es de esperar que los puntos de activación debieran ser escasos en píxeles con IS bajos, concentrándose en valores intermedios y/o altos.

De esta forma al comparar estadísticas se pretende contrastar las evaluaciones de susceptibilidad para determinar la utilidad de la probabilidad de existencia de permafrost como factor condicionante en contraste con la exposición al sol que es un factor que suele ser usado en diferentes contextos climáticos y geomorfológicos para evaluaciones de susceptibilidad.

Cabe destacar que el mapa temático de exposición al sol es un mapa que incorpora la orientación de laderas en toda el área de estudio (véase Figura 40), sin embargo, no considera otros parámetros como la temperatura media anual del aire o geomorfológicas asociadas al ambiente periglacial, es decir, no considera diferencias en laderas con la misma orientación que poseen diferentes temperaturas o presencia/probabilidad de existencia de permafrost.

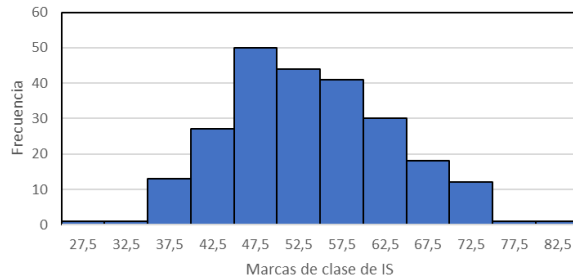
A continuación (en las tablas 17 a 22) se muestran estadísticas para cada escenario y caso con el fin de plantear discusiones para los resultados de los mapas de susceptibilidad de los procesos de remoción en masa estudiados.



## Validación de mapa de susceptibilidad para flujos de detritos con respecto al total del área de estudio

### Escenario A: Incluyendo PFI con ponderación de 15%

Distribución de IS de flujos de detritos del inventario de remociones en masa para el mapa de susceptibilidad del escenario A

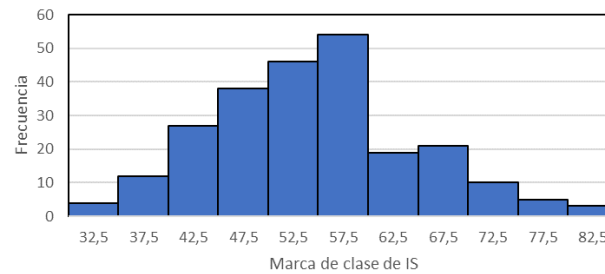


IS	Remociones sobre IS
40	94%
45	82%
50	62%
55	43%

Promedio	Mediana
53,87	52,45

### Escenario B: Incluyendo PFI con ponderación de 9%

Distribución de IS de flujos de detritos del inventario de remociones en masa para el mapa de susceptibilidad del escenario B

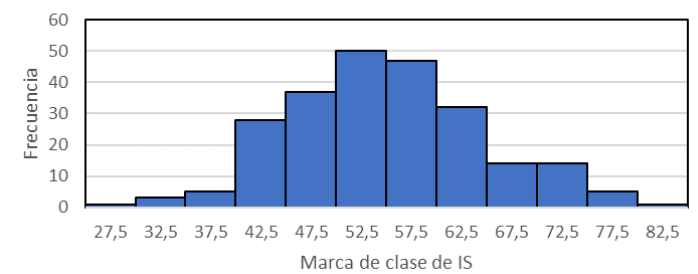


IS	Remociones sobre IS
40	93%
45	82%
50	66%
55	47%

Promedio	Mediana
54,45	53,74

### Escenario C: Incluyendo exposición al sol con ponderación de 9%

Distribución de IS de flujos de detritos del inventario de remociones en masa para el mapa de susceptibilidad del escenario C



IS	Remociones sobre IS
40	96%
45	84%
50	69%
55	48%

Promedio	Mediana
54,75	54,70

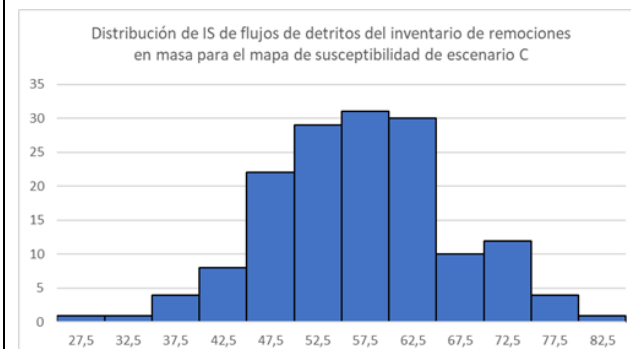
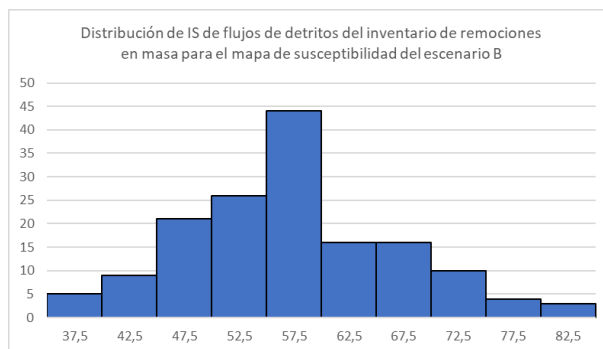
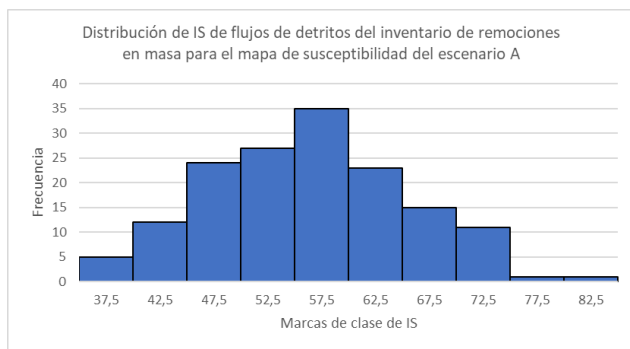
Tabla 17: Estadísticas para validación y comparación de mapas de susceptibilidad de flujos de detritos, resultado del muestreo de los puntos de activación de flujos de detritos en el mapa de susceptibilidad respectivo en el total del área de estudio. En la Tabla 8, en la sección Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de los flujos de detritos correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en pixeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de flujos de detritos del inventario para cada escenario. Elaboración propia.

## Validación de mapa de susceptibilidad para flujos de detritos exclusivamente para zonas con datos de probabilidad de existencia permafrost

### Escenario A: Incluyendo PFI con ponderación de 15%

### Escenario B: Incluyendo PFI con ponderación de 9%

### Escenario C: Incluyendo exposición al sol con ponderación de 9%



IS	Remociones sobre IS
40	97%
45	89%
50	73%
55	56%

IS	Remociones sobre IS
40	97%
45	91%
50	77%
55	60%

IS	Remociones sobre IS
40	96%
45	91%
50	76%
55	58%

Promedio	Mediana
56,63	56,64

Promedio	Mediana
57,37	57,44

Promedio	Mediana
56,85	56,33

Tabla 18: Estadísticas para la validación y comparación de mapas de susceptibilidad de flujos de detritos restringido a zonas con datos de probabilidad de permafrost. En la Tabla 8, en la sección de Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de los flujos de detritos correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en pixeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente, se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de flujos de detritos del inventario. Elaboración propia.

Los mapas de susceptibilidad de flujos de detritos con validación en el área de estudio total (véase Tabla 17), es decir, en el caso de validación 1 (Figura 19), entrega resultados similares en los diferentes escenarios, siendo el caso con los índices más altos la evaluación con la exposición al sol como factor condicionante (Escenario C) con una mediana y media más altas que en los casos donde se pondera la probabilidad de existencia de permafrost (Escenarios A y B). Resultados similares se evidencian en la concentración de remociones con índices de susceptibilidad en deciles altos.

Esto podría explicarse en parte por una mayor presencia de fallas en la zona oeste del área de estudio, pudiendo generar mayor disponibilidad de escombros y condicionar la generación de flujos de detritos en esa zona, lo cual no fue considerado en los factores condicionantes usados, al contrario, en gran parte de las zonas con cercanía a fallas no hay datos de probabilidad de existencia de permafrost lo cual lleva el IS\_n mínimo en esa categoría (véase Tabla 11, en la sección resultados y Figura 41 en la presente sección 6.5). Resultando en píxeles con índices de susceptibilidad no lo suficientemente altos en áreas cercanas a fallas y afectando así a los IS que tienen los puntos de remociones en esta zona para la validación en los escenarios que llevan la probabilidad de existencia de permafrost como factor condicionante.

Al comparar las estadísticas de los escenarios A, B y C exclusivamente en áreas con datos de probabilidad de existencia de permafrost también entregan resultados similares entre sí, siendo para esta validación los valores con IS más alto los de la evaluación con probabilidad de existencia de permafrost como factor condicionante con una ponderación de 9% (Escenario B), siendo este caso el que tiene valores de IS más alto de los 6 casos (Escenarios A, B y C en validaciones con respecto al área total y con respecto a áreas con datos de probabilidad de permafrost) vistos para flujos de detritos.

Para la validación del mapa de susceptibilidad de flujos de detritos exclusivamente en áreas con datos de probabilidad de existencia de permafrost (véase Tabla 18), es decir, para las zonas que abarca el mapa elaborado por Azócar *et al.*, (2017) en el área de estudio, hubo un aumento de los valores de IS en cada uno de los 3 escenarios, comparados con la validación respecto al área total, lo cual podría indicar que las zonas con probabilidad de permafrost son más susceptibles lo cual se corrobora con la mayor concentración de remociones en masa en esa zona (véase Tabla 15). Otra alternativa para explicar esto es que los factores condicionantes utilizados influyen en la susceptibilidad de manera distinta en zonas con posible presencia de permafrost frente a zonas que carecen de esta condición. Esto podría ser explicado, al menos en parte, por las diferentes influencias que pudiese tener la exposición al sol en la susceptibilidad dependiendo de la temperatura.

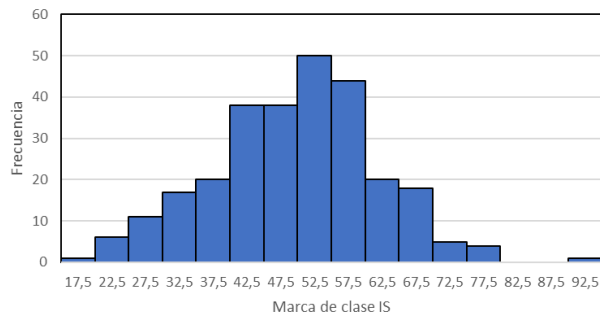
Para el caso de los flujos de detritos los escenarios presentan resultados bastante similares entre sí, en particular, parece ser relevante incluir la presencia de permafrost o su probabilidad de existencia como factor condicionante al evaluar susceptibilidad exclusivamente en zonas con sospechas o datos de probabilidad de existencia de este, por lo que se aconseja incluirlo en evaluaciones de susceptibilidad de flujos de detritos a escala local y media (1:10.000 a 1:100.000). Para zonas que incluyan un porcentaje relevante de

área sin probabilidad de existencia de permafrost se sugiere integrar la exposición al sol en estos sectores.

## Validación de mapa de susceptibilidad para deslizamientos de suelo con respecto al área total de estudio

### Escenario A: Incluyendo PFI con ponderación de 17%

Distribución de IS de deslizamientos de suelo del inventario de remociones en masa para el mapa de susceptibilidad del escenario A

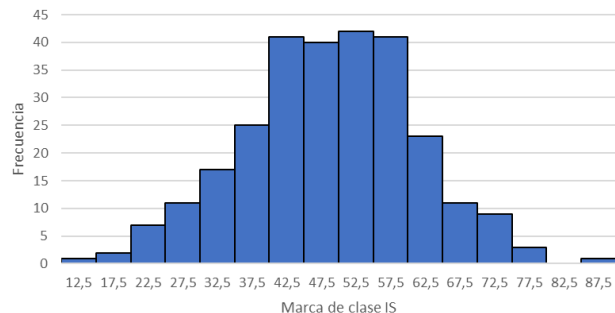


IS	Remociones sobre IS
40	80%
45	66%
50	52%
55	34%

Promedio	Mediana
49,65	50,29

### Escenario B: Incluyendo PFI con ponderación de 10%

Distribución IS de deslizamientos de suelo del inventario de remociones en masa para el mapa de susceptibilidad del escenario B

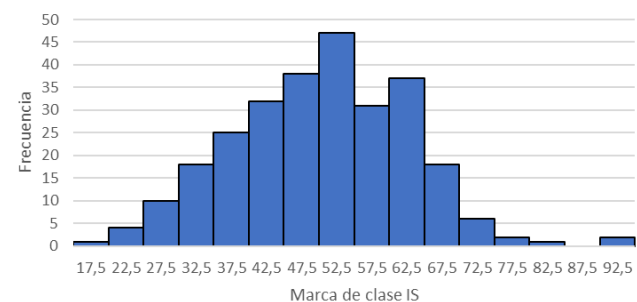


IS	Remociones sobre IS
40	77%
45	62%
50	47%
55	32%

Promedio	Mediana
48,91	49,10

### Escenario C: Incluyendo exposición al sol con ponderación de 10%

Distribución de deslizamientos de suelo según IS incluyendo Exposición al sol para el área de estudio total



IS	Remociones sobre IS
40	79%
45	67%
50	53%
55	36%

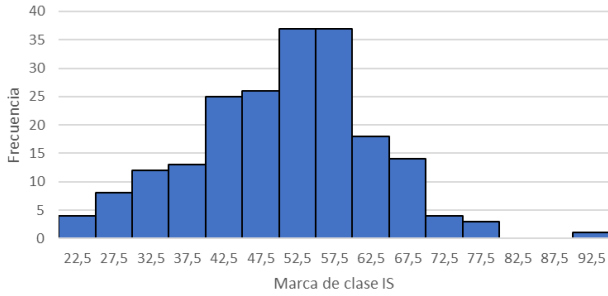
Promedio	Mediana
50,41	50,64

Tabla 19: Estadísticas para validación y comparación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos de suelo, resultado del muestreo de los puntos de activación de deslizamientos de suelo en el mapa de susceptibilidad respectivo en el total del área de estudio. En la Tabla 9, en la sección Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de los deslizamientos de suelo correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en pixeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de deslizamientos de suelo del inventario para cada escenario. Elaboración propia.

## Validación de mapa de susceptibilidad para deslizamientos de suelo restringido a zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost

### Escenario A: Incluyendo PFI con ponderación de 17%

Distribución de IS de deslizamientos de suelo del inventario de remociones en masa para el mapa de susceptibilidad del escenario A

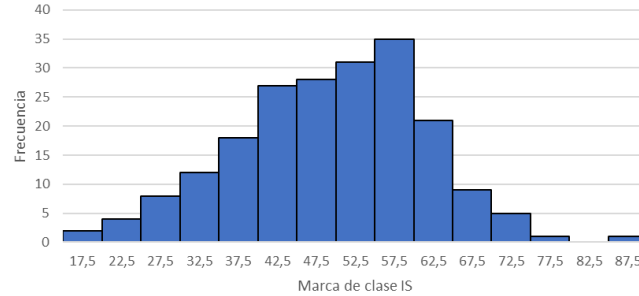


IS	Remociones sobre IS
40	82%
45	69%
50	56%
55	38%

Promedio	Mediana
50,53	51,54

### Escenario B: Incluyendo PFI con ponderación de 10%

Distribución de IS de deslizamientos de suelo del inventario de remociones en masa para el mapa de susceptibilidad del escenario B

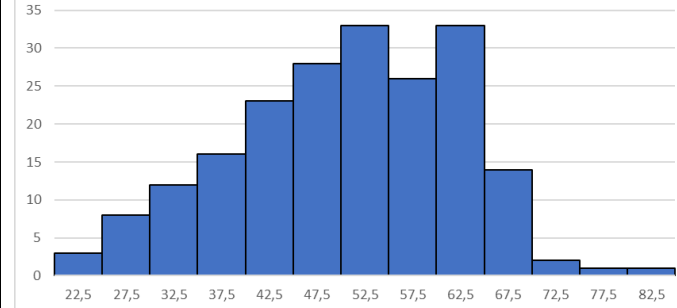


IS	Remociones sobre IS
40	78%
45	65%
50	51%
55	36%

Promedio	Mediana
49,41	50,37

### Escenario C: Incluyendo exposición al sol con ponderación de 10%

Distribución de IS de deslizamientos de suelo del inventario de remociones en masa para el mapa de susceptibilidad del escenario C



IS	Remociones sobre IS
40	81%
45	69%
50	55%
55	39%

Promedio	Mediana
50,66	50,86

Tabla 20: Estadísticas para la validación y comparación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos de suelo restringido a zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost. En la Tabla 9, en la sección de Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de los deslizamientos de suelo correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en píxeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente, se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de deslizamientos de suelo del inventario. Elaboración propia.



Para los deslizamientos de suelo en la validación respecto al área de estudio total (véase Tabla 19) se comparan los 3 escenarios, obteniendo resultados similares entre sí, siendo el caso con índices más altos el mapa que incluye la exposición al sol, lo cual podría atribuirse en parte a que las zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost presentan ya incluidos el factor de exposición al sol, sin embargo las zonas sin datos de probabilidad de permafrost presentan todas el  $IS_n$  mínimo para este factor condicionante (véase Figura 41) y no consideran la orientación de laderas. Esto ocurre para todos los tipos de remociones lo cual podría explicar en parte los resultados levemente inferiores para las validaciones que incluyen la probabilidad de existencia de permafrost en el área total.

Para la validación exclusivamente en zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost (véase Tabla 20), el caso con remociones de mayores índices resultó ser el mapa con una ponderación de 17% para la probabilidad de existencia de permafrost (Escenario A). Este mapa es el que obtiene los índices más altos de las 6 validaciones propuestas para deslizamientos de suelo. Lo cual es reafirmado con la alta cantidad de deslizamientos superficiales en áreas con probabilidad de permafrost (véase Tabla 14 en sección 6.2).

Comparando la validación que incluye el total del área de estudio frente a la validación que incluye exclusivamente zonas con datos de probabilidad de permafrost (véase casos de validación 1 y 2 en Figura 19 y 20 respectivamente), es posible apreciar un aumento en los índices de susceptibilidad para el segundo caso de validación en los 3 escenarios planteados. Lo cual podría ser indicador de que las zonas con probabilidad de existencia de permafrost son más susceptibles que el resto del área de estudio, corroborado con la Tabla 15 que indica una concentración de remociones en masa considerablemente más alta en las zonas con posible presencia de permafrost. Al igual que en los flujos de detritos otra manera de explicar los mayores índices en estas zonas es considerando que los factores condicionantes utilizados en estas evaluaciones tienen diferentes influencias en la susceptibilidad. En particular, esto podría explicarse, al menos en parte por la exposición al sol, ya que esta podría tener una influencia en la susceptibilidad que cambia dependiendo de la presencia de permafrost (o su probabilidad) y la ausencia de esta condición.

Para el caso de los deslizamientos de suelo hay resultados bastante estrechos en las diferentes validaciones, por lo que no se ha demostrado con los datos y ponderaciones utilizadas una sustancial diferencia entre usar datos asociados al permafrost en el área de estudio con respecto a una evaluación tradicional con exposición al sol, aun evaluando exclusivamente en zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost.

Se recomienda incorporar el factor condicionante asociado al permafrost de un modo en que abarque de manera más directa la degradación de este, por ejemplo, integrando la variable temporal en la presencia o probabilidad de existencia de permafrost. Cabe destacar que el presente estudio es un primer acercamiento para integrar la variable de permafrost en evaluaciones de susceptibilidad, por lo que son necesarios más estudios para cuantificar e integrar la importancia de esta variable en la ocurrencia de remociones en masa.

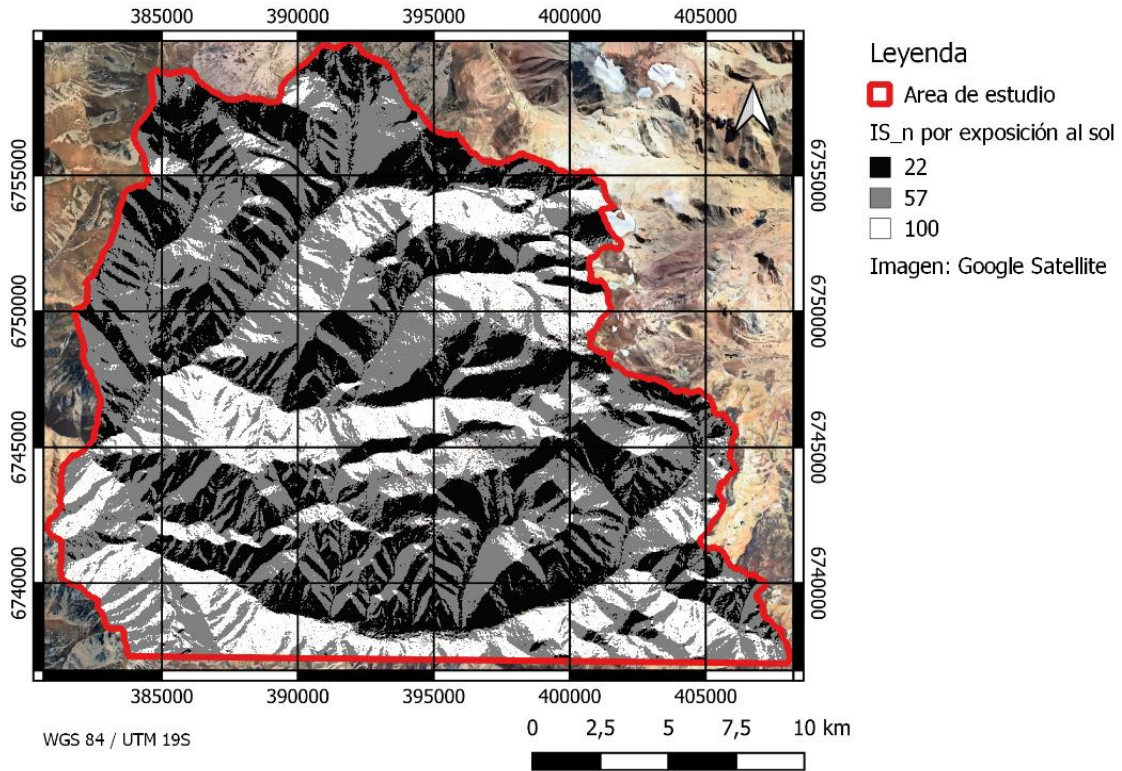


Figura 40: Distribución de la susceptibilidad ( $IS_n$ ) aportada por la exposición al sol. Elaboración propia.

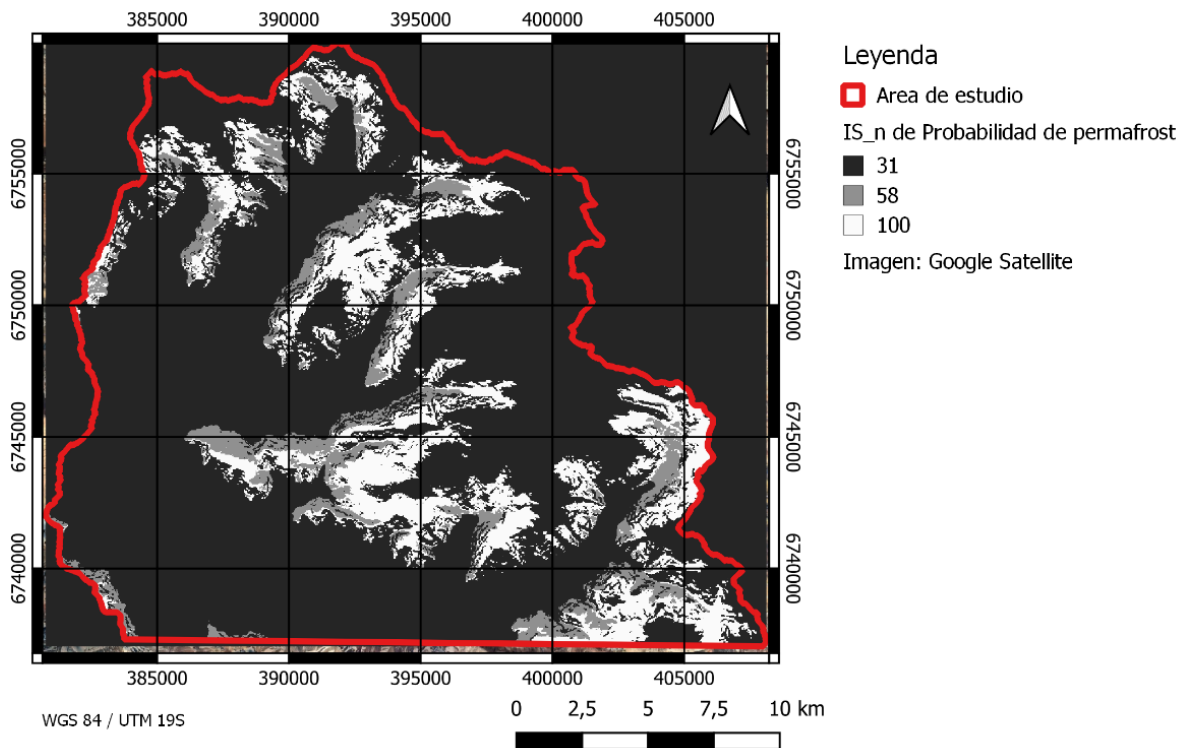


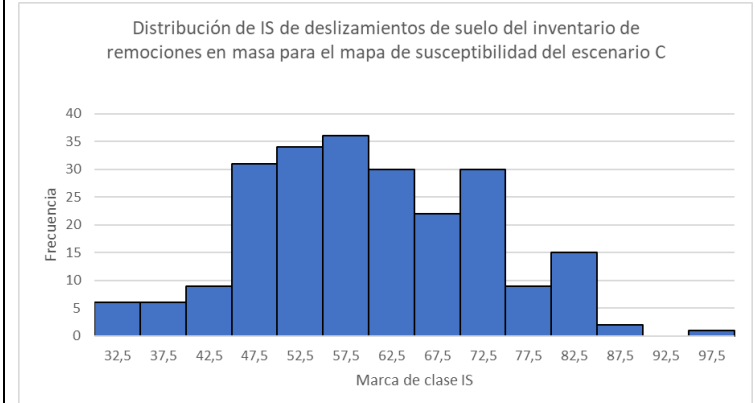
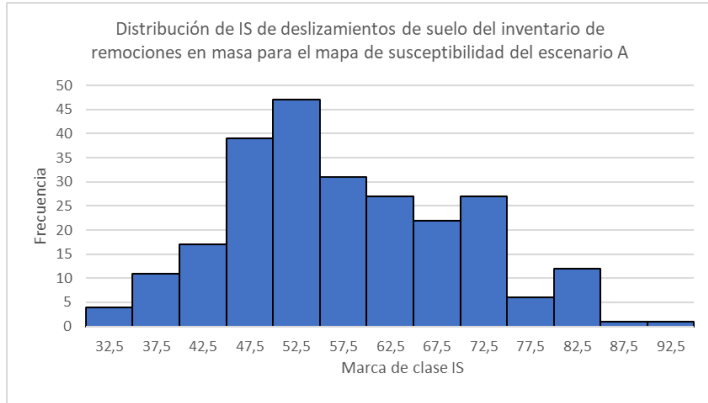
Figura 41: Distribución de la susceptibilidad ( $IS_n$ ) aportada por la probabilidad de existencia de permafrost. Elaboración propia.

## Validación de mapa de susceptibilidad para caídas de rocas en el área total de estudio

### Escenario A: Incluyendo PFI con ponderación de 11%

### Escenario B

### Escenario C: Incluyendo exposición al sol con ponderación de 8%



**No aplica**

IS	Remociones sobre IS
40	94%
45	87%
50	71%
55	52%

IS	Remociones sobre IS
40	95%
45	91%
50	77%
55	63%

Promedio	Mediana
57,81	56,73

Promedio	Mediana
60,28	59,18

*Tabla 21: Estadísticas para validación y comparación de mapas de susceptibilidad de caídas de rocas, resultado del muestreo de los puntos de activación de caídas de rocas en el mapa de susceptibilidad respectivo en el total del área de estudio. En la Tabla 10, en la sección Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de las caídas de rocas correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en pixeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de caídas de roca del inventario para cada escenario. Elaboración propia.*

## Validación de mapa de susceptibilidad para caídas de roca restringido a zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost.

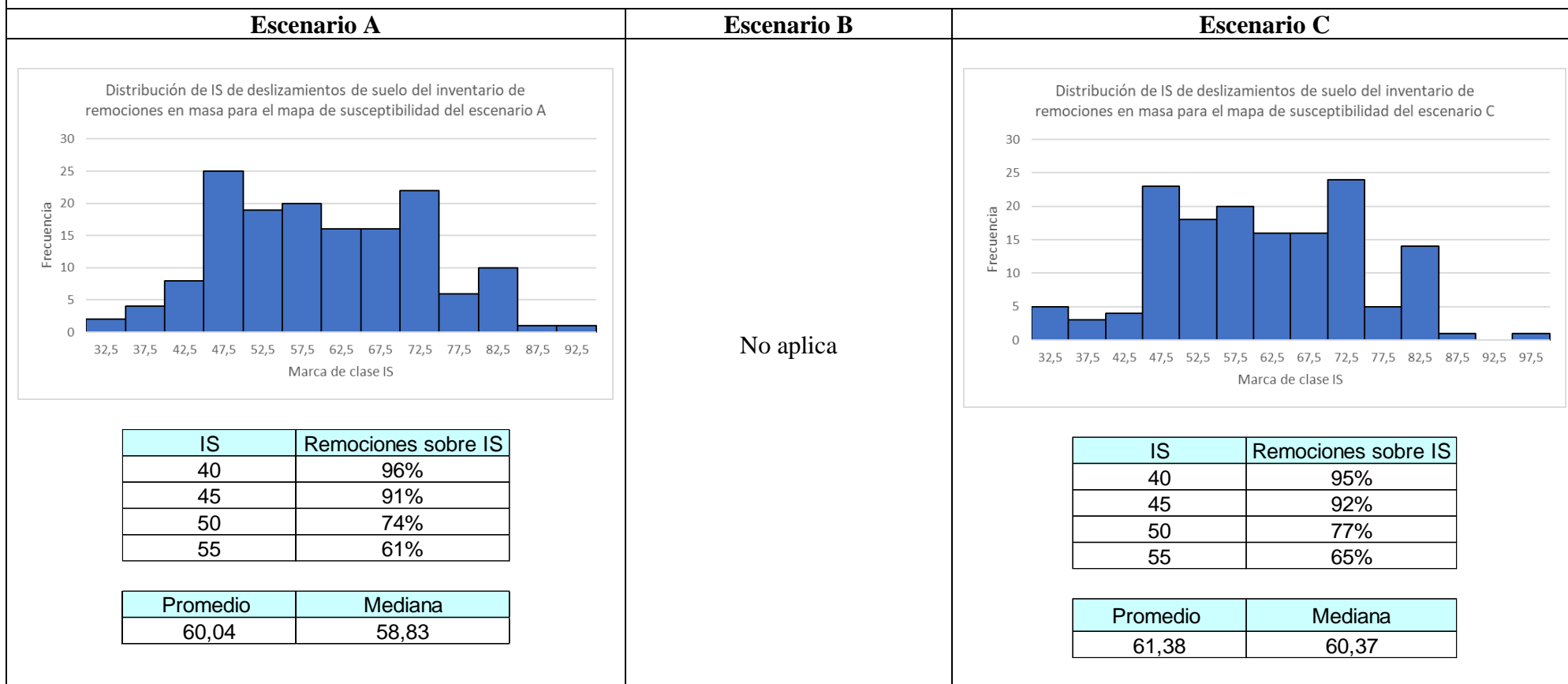


Tabla 22: Estadísticas para la validación y comparación de mapas de susceptibilidad de caídas de rocas restringidas a zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost. En la Tabla 10, en la sección de Resultados, se presentan las ponderaciones de cada escenario. Estadísticas incluyen gráficos presentando como se distribuyen los índices de susceptibilidad de las caídas de roca correspondientes al inventario de remociones en masa. Bajo este se presentan estadísticas con el porcentaje de remociones que hay en pixeles sobre determinado índice de susceptibilidad (IS), por último, en orden descendente, se presenta el promedio y la mediana de los valores IS de los puntos de caídas de roca del inventario. Elaboración propia.

Para las caídas de rocas, en la validación con respecto al área de estudio total (véase Tabla 21), se obtuvieron índices mayores ocupando el factor condicionante de exposición al sol (Escenario C), lo cual tiene relación con la distribución de zonas de caídas de roca en el área de estudio, en particular, en áreas con datos de probabilidad de existencia de permafrost (véase Tabla 14).

De las 4 validaciones estudiadas el mapa con mayores índices corresponde al que incluye la exposición al sol restringido a áreas con datos de probabilidad de existencia de permafrost (véase Tabla 22). Esto puede explicarse en gran parte porque el mapa elaborado por Azócar *et al.* (2017) está implementado para zonas de detritos, por lo que muchos de los puntos de activación de caídas de rocas están localizados en zonas donde el píxel no tiene datos de probabilidad de permafrost asociada y por lo tanto poseen el IS<sub>n</sub> mínimo de esta categoría.

El mapa de susceptibilidad de caídas de roca que incluye la exposición al sol (Escenario C) tiene índices de mayor valor en los puntos de activación en la validación restringida a zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost en comparación al caso de validación del total del área de estudio. Esto ocurre también para deslizamientos de suelo y flujos de detritos, lo cual da indicios de que la posible presencia de permafrost condiciona una mayor susceptibilidad, independiente del tipo de proceso, lo cual está basado además en la mayor concentración de remociones en masa en estas zonas, evidenciado en la Tabla 15. Otra alternativa para explicar el aumento de IS en las zonas con posible presencia de permafrost es que la susceptibilidad que aportan los factores condicionantes estudiados es variable dependiendo de la presencia o no de permafrost. En particular, esto podría deberse a la exposición al sol y la frecuencia de procesos de hielo y deshielo que varía dependiendo de la temperatura y que no fue considerado en el escenario C al solo considerar la orientación de laderas.

Cabe destacar que todas las validaciones realizadas hechas consideraron remociones con una antigüedad de ocurrencia desconocida, por lo que pudieron o no ser condicionadas por la degradación del permafrost actual. De esta forma, para una validación que busque determinar la importancia de la degradación del permafrost es deseable un inventario que considere exclusivamente remociones de las últimas décadas.

Los datos utilizados en el presente estudio no permiten ratificar la predominancia de la probabilidad de existencia de permafrost por sobre la exposición al sol en las caídas de rocas, por lo que se sugiere realizar mayores estudios para determinar la relevancia de la presencia o degradación del permafrost como factor condicionante. Para evaluaciones de escala media o regional que incluyan zonas con MAAT cercanas a 0°C, se recomienda incorporar la exposición al sol de manera que integre diferencias en su influencia dependiendo de la temperatura o al menos un parámetro que se aproxime, por ejemplo, la altura, en su defecto. Otra opción es utilizar un mapa de probabilidad de existencia de permafrost que considere macizos rocosos además de una variable temporal que integre la degradación del permafrost de manera más directa, así como otras variables como la acumulación de nieve.

Para el caso de los deslizamientos de mayor escala, por ejemplo, los de la carta geológica en Ortiz y Merino (2015), no fue posible realizar una evaluación de susceptibilidad incluyendo el factor asociado al permafrost pues la zona de generación de muchas de las remociones en

masa no presenta detritos y el mapa elaborado por Azócar *et al.* (2017) no asigna datos de probabilidad de existencia de permafrost a varias de estas zonas. La mayor parte de los deslizamientos no superficiales del inventario de remociones en masa que tienen probabilidad de existencia de permafrost asignada están concentrados en zonas con un  $PFI > 0.7$  por lo que parece haber una tendencia a la generación de este tipo de remociones en altas probabilidades de existencia de permafrost, pero no hay mayores conclusiones con respecto a este tipo de remociones con los datos utilizados y obtenidos en este estudio.

En Chile son escasos los estudios de remociones en masa en el ambiente glacial y periglacial, así como la incidencia de la degradación de permafrost en movimientos en masas lo cual se ha basado solamente en inferencias (Atacama Ambiente, 2021). Por ejemplo, en la cuenca del Río Elqui, en el Cerro Las Tórtolas ocurrió la desestabilización progresiva de un glaciar de roca que concluyó con el deshielo en la primavera de 2016 que probablemente disminuyó la cohesión de los materiales provocando su colapso, transformándose en un flujo detrítico (Iribarren y Bodin, 2010). También hay algunos de estudios de desestabilización y aceleramiento de glaciares rocosos intervenidos por la actividad minera (Brenning, 2008; Brenning y Azócar, 2010).

Otro ejemplo es el de la avalancha de rocas del Estero Paraguirre en 1987, a la cual se le atribuye como probable condicionante la degradación del permafrost en la zona de inicio de la avalancha (Hauser, 2000; Casassa y Marangunic, 1993), sin embargo, no existen datos que corroboren la presencia de hielo o su degradación en la zona de generación de la remoción en masa (Atacama Ambiente 2021).

Ante la falta de información en el territorio nacional es relevante indagar de manera más profunda la relación que tiene la degradación del permafrost con las remociones en masa en las zonas de alta montaña de los Andes pues, una mayor profundidad de deshielo aumenta la disponibilidad de material suelto para movimientos en masa de mayor magnitud (Deline *et al.*, 2015).

## **6.6 Recomendaciones y proyecciones a futuro**

En esta sección se busca recomendar acciones para estudios futuros que busquen integrar al permafrost como factor condicionante en zonas que lo ameriten. Se recomienda

- Modelar la distribución del permafrost de montaña a nivel nacional incluyendo además del *MAAT* y la exposición al sol, el efecto de manchones de nieve y propiedades del suelo, al menos para estudios de escala local.
- Monitorear la temperatura del suelo y estudiar el grosor del permafrost y la capa activa para zonas montañosas en variados intervalos de tiempo para analizar la degradación del permafrost e incluirlo de manera más directa en evaluaciones de susceptibilidad de peligros y remociones en masa.
- Realizar inventarios de remociones en masa que consideren eventos con ocurrencia en las últimas décadas de modo en que tengan relación con la actual degradación del permafrost debido al cambio climático.



- Se sugiere estudiar la influencia de la exposición al sol en la susceptibilidad a diferentes alturas y temperaturas, pues su efecto podría variar de acuerdo con estos parámetros y podría ser insuficiente incluir solo la orientación de laderas sin considerar el resto de los parámetros en zonas con *MAAT* cercano a 0°C
- Se recomienda realizar más estudios que integren el permafrost en evaluaciones de susceptibilidad ya sea como distribución/probabilidad de existencia o como degradación de este para más zonas en los andes semiáridos y también para zonas más australes del país donde pudiera potencialmente haber permafrost.

## **7. Conclusiones**

En Chile y en los Andes de América del Sur en general, la degradación del permafrost y sus consecuencias son un tópico no lo suficientemente estudiado en contraste, por ejemplo, con los Alpes, donde hay mayores estudios y muestras más claras de la relación entre la degradación del permafrost y la ocurrencia de remociones en masa.

Parte importante en el estudio de remociones en masa, y en particular en evaluaciones de susceptibilidad es la elaboración de un inventario de remociones en masa que permita validar los mapas de susceptibilidad y discutir acerca de cómo se distribuyen las remociones en masa en el área de estudio. Para el presente estudio, la elaboración de un inventario de remociones en masa a escala 1:7.000, con más de 800 remociones en masa en el área de estudio entre flujos de detritos, caídas de rocas y deslizamientos dan pistas claras de ser una zona susceptible con abundancia de remociones en masa.

Los factores condicionantes utilizados en el presente estudio corresponden a la probabilidad de existencia de permafrost, exposición al sol, pendiente, distancia a la red de drenaje, geología, acumulación de nieve, curvatura y distancia a fallas, los cuales suelen ser utilizados en otras evaluaciones de susceptibilidad, salvo por el factor de probabilidad de existencia de permafrost. Sin embargo, hay otros factores que también podrían influir en la susceptibilidad de remociones en masa, tales como la geotecnia o el factor antrópico los cuales no fueron incluidos debido a la falta de información para utilizarlos como mapas temáticos y al limitado número de parámetros que se sugiere para el tipo de metodología usada. Otro aspecto por considerar es la escala y la actualidad de los datos utilizados. En particular, el mapa temático de geología está basado en la carta geológica escala 100.000 de Ortiz y Merino, (2015) y no considera variaciones locales en las litologías, lo cual podría afectar de manera considerable los mapas de susceptibilidad por las altas ponderaciones de la geología como factor condicionante.

Para el caso de la probabilidad de existencia de permafrost cabe destacar las diferencias en la distribución de las remociones en masa en las zonas de distinta probabilidad, las cuales parecen concentrarse en zonas de  $0.5 < \text{PFI} < 0.75$  y  $\text{PFI} < 0.5$ . Además, un alza en la concentración de remociones en masa para las zonas que presentan datos de probabilidad de permafrost podrían ser indicios de que posiblemente el permafrost podría tener una relevancia significativa en la generación de remociones en masa y por ende en la susceptibilidad de estas en el área de estudio.

Sin embargo, para tener una mejor noción de cómo se relaciona la ocurrencia de remociones en masa con la distribución del permafrost y su degradación es necesario la elaboración de un inventario de remociones en masa con eventos que hayan ocurrido en las últimas décadas y pudiesen tener directa relación con el cambio climático y la degradación del permafrost.

Como un primer acercamiento a integrar el permafrost en evaluaciones de susceptibilidad se determinó que con datos de probabilidad de existencia de permafrost es posible obtener resultados similares a los usados con exposición al sol, sin embargo los datos disponibles

actualmente no son suficientes para medir de manera directa la degradación del permafrost (ya que no se cuenta con datos de evolución temporal del permafrost, ni un inventario de remociones en masa con antigüedad de tan solo algunas décadas), por lo cual es de gran importancia el monitoreo de los suelos congelados y remociones en masa en las altas montañas de los Andes para determinar las zonas con degradación de permafrost que condicionan la ocurrencia de remociones en masa.

Se sugiere la integración de este factor condicionante para zonas con posible existencia de permafrost en un futuro con mayor disponibilidad de datos en torno a este. En un futuro más cercano donde no está cuantificada la degradación del permafrost se sugiere al menos considerar diferencias en la susceptibilidad aportada por la exposición al sol a medida que cambia la temperatura o la altura ya que estos parámetros podrían afectar su influencia y subestimar estas diferencias podría conducir a errores en evaluaciones que incluyan zonas con MAAT cercano a 0°C.

Por último, se sugiere incrementar los esfuerzos y estudios que vinculen la degradación del permafrost y las remociones en masa, pues los incrementos en la temperatura debido al cambio climático podrían generar consecuencias considerables para zonas con ambiente periglacial y su al rededor, por ejemplo, con grandes flujos de detritos que alcancen zonas pobladas o sectores industriales, por lo que es necesario tomar las medidas necesarias para prevenir estos desastres.

## **Bibliografía**

Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 58, p. 21-44.

Atacama Ambiente E.I.R.L. 2021. ESTADO ACTUAL DE LOS SUELOS CONGELADOS. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves Volumen 1. 1-21 p.

Azócar, G. (2013). Modeling of permafrost distribution in the semiarid Chilean Andes. Faculty of Environment, Geography Department. Waterloo, Canada: University of Waterloo.

Azócar, G. F., Brenning, A., and Bodin, X. 2017.: Permafrost distribution modelling in the semi-arid Chilean Andes, *The Cryosphere*, 11, 877–890, <https://doi.org/10.5194/tc-11-877-2017>.

Baeza, C. and J., Corominas. 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* 26(12), pp. 1251-1263. DOI: 10.1002/esp.263.

Barry, R. G.: *Mountain weather and climate*, Routledge, New York, 1992.

Barsch, D. (1978). Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps. *Third International Conference on Permafrost*, 1, págs. 349-353. Ottawa.

Barsch, R. H. (1992). Perspectives on learning disabilities: The vectors of a new convergence. *Journal of Learning Disabilities*, 25(1), 6–16. <https://doi.org/10.1177/002221949202500102>

Barsch, D. (1996). *Rockglaciers: Indicators for the present and former geocology in high mountain environments*. Berlin, Germany: Springer.

Becerra, F. (2022). Susceptibilidad a la remoción en masa y factores condicionantes en el borde costero de Concón y Viña del Mar. *Memoria para optar al título de geólogo*, pp.12-14

Berthling, I. (2011). Beyond confusion: rock glaciers as cryo-conditioned landforms. *Geomorphology*, 131, 98-106.

Bianchini, S., Del Soldato, M., Solari, L., Nolesini, T., Pratesi, F. and Moretti, S., Badland susceptibility assessment in Volterra municipality (Tuscany, Italy) by means of GIS and

statistical analysis. *Environmental Earth Sciences*. 75(889), pp. 1-14, 2016. DOI: 10.1007/s12665-016-5586-5.

Birkeland, P. W. (1973). Use of relative age-dating methods in a stratigraphic study of rock glacier deposits, Mt. Sopris, Colorado. *Arctic and Alpine Research*, 5(4), 401- 416.

Bommer, C., Phillips, M., Arenson, L.U., 2010. Practical recommendations for planning, constructing and maintaining infrastructure in mountain permafrost. *Permafrost Periglacial Processes* 21, 97e104.

Borde, J., 1966. *Les Andes de Santiago et leur avant-pays*. (Ph.D.). Union Française d'Impression, Bordeaux, France.

Brenning, A. (2008). The impact of mining on rock glaciers and glaciers. In B. Orlove, E. Wiegandt, B. Luckman, B. Orlove, E. Wiegandt, & B. Luckman (Eds.), *Darkening peaks: glacier retreat, science, and society* (Vol. 14, pp. 196-205). Berkeley: University of California Press.

Brenning, A., & Azócar, G. (2010). Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista de Geografía Norte Grande*, 47, 143-158.

Bryant (2022). *The Darens: Ice Age Landslips in the Olchon Valley*. Herefordshire & Worcestershire Earth Heritage Trust

Buchli, T., Merz, K., Zhou, X., Kinzelbach, W., Springman, S., 2013. Characterization and monitoring of the Furggwanghorn rock glacier, Turtmann Valley, Switzerland: results from 2010 to 2012. *Vadose Zone J.* 12 (1). <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2012.0067>.

Burger, K., Degenhardt, J., & Giardino, J. (1999). Engineering geomorphology of rock glaciers. *Geomorphology*, 31, 93-132.

Campos Maza, F. (2014). Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en la Quebrada de Los Chanchos, Región Metropolitana, Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/130232>.

Capps Jr, S. (1910). Rock glacier in Alaska. *The journal of Geology*, 18(4), 359-375.

Carrara, A., Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15(3), pp. 403-426, 1983. DOI: 10.1007/BF01031290

Chacón, J., Irigaray, C. y Fenández, T., Metodología para la cartografía regional de movimientos de ladera y riesgos asociados mediante un sistema de información geográfica. III Simposio Nacional Sobre taludes y laderas inestables. La Coruña. 1, pp. 121-133, 1992.

Clark, D., Eric, S., Noel, P., & Alan, G. (1998). Genetic variability of rock glaciers. *Geografiska Annaler*, 80(3-4), 175-182

Corte, A., 1976. Rock glaciers. *Biul. Peryglac.* 26, 174–197.

Crozier, M. J., y Glade, T., 1999, Frequency and magnitude of landsliding: Fundamental research issues, en *International Conference on Geomorphology*, Bologna, p. 141–155.

Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996, Landslide types and processes, en Turner, K., y Schuster, R.L., ed., *Landslides investigation and mitigation: Washington D. C*, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 247, p. 36–75.

Davis, N. (2000). *Permafrost: a guide to frozen ground in transition*. Alaska, USA: University of Alaska Press.

Dai, F.C, Lee, C.F., 2002, Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* No.42, p.213–228.

Delaloye, R., Morard, S., 2011. Le glacier rocheux de´stabilise´ du Petit-ve´lan (Val d'Entremont, Valais): morphologie de surface, vitesses de de´placement et structure interne. In: Lambiel, C., Reynard, E., Scapozza, C. (Eds.), *La ge´omorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte*. Actes du colloque de la Socie´te´ Suisse de Ge´omorphologie, Olivone, Ge´ovisions 36. IGUL, Lausanne, pp. 195e210

Deline, P., Gruber, S., Delaloye, R., Fischer, L., Geertsema, M., Giardino, M., Hasler, A., Kirkbride, M.P., Krautblatter, M., Magnin, F., McColl, S.T., Ravel, L., & Schoeneich, P. (2015). *Ice Loss and Slope Stability in High-Mountain Regions*.

Dirección General de Aguas. 2004. *DIAGNOSTICO Y CLASIFICACION DE LOS CURSOS Y CUERPOS DE AGUA SEGUN OBJETIVOS DE CALIDAD. CUENCA DEL RIO HUASCO*. Gobierno de Chile. MOP. 14-15

División de planificación y desarrollo. 2013. Informe técnico. *Sistema Territorial Cuencas Hidrográficas Region de Atacama*. Plan regional de ordenamiento territorial: 15-17.



Dragičević, S., Lai, T., & Balram, S., 2015. GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments. *Habitat International*, No.45, p.114-125.

Dramis, F., Govi, M., Guglielmin, M. and Mortara, G.: Mountain permafrost and slope instability in the Italian Alps: The Val Pola Landslide, *Permafr. Periglac. Process.*, 6, 73–82, 1995.

Embleton, C., & King, C. A. (1975). *Periglacial geomorphology*. London: Edward Arnold Ltd.

Ermolin, E.M Silva, A., Glazovskiy, A. (2015). *Ambientes glaciares y periglaciares : formación y desarrollo*. Green Cross, p. 153

Etzelmüller, B., Hoelzle, M., Heggem, E., Isaksen, K., Mittaz, C., Vonder Mühl, D., . . . Sollid, J. (2001). Mapping and modelling the occurrence and distribution of mountain permafrost. *Norwegian Journal of Geography*, 55, 186-194.

Falvey, M. and R. Garreaud, 2009: Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the SE Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *J. Geophys. Res.*, 114, D04102, doi:10.1029/2008JD010519

Fischer, L., Amann, F., Moore, J., Huggel, C., 2010. Assessment of periglacial slope stability for the 1988 Tschierwa rock avalanche (Piz Morteratsch, Switzerland). *Eng. Geol.* 116, 32-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.07.005>.

Fischer, L. and Huggel, C.: Methodical design for stability assessments of permafrost affected high-mountain rock walls, in *Ninth International Conference on Permafrost*, vol. 1, edited by D. L. Kane and K. M. Hinkel, pp. 439–444, Institute of Northern Engineering, University of Alaska, Fairbanks., 2008.

Felicísimo, A. 1994. *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y Aplicaciones en las Ciencias Ambientales*. Pp.79-90

Ferrando, F., 1991. Glaciares relictuales en el marco andino del semiárido de Chile, IV Región: análisis de caso. *Primer Taller Internacional de Geoecología de Montaña y Desarrollo Sustentable del los Andes del Sur*, Viña del Mar, Chile.

French, H. M. (2007). *The Periglacial environment*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.

Garreaud, René. INIA (Chile). 2011. Cambio climático : bases físicas e impactos en Chile. Revista Tierra Adentro – INIA, (93): marzo-abril, 2011. INIA. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/29289>

Gischig, V.S., Moore, J.R., Evans, K.F., Amann, F., Loew, S., 2011. Thermomechanical forcing of deep rock slope deformation: 1. Conceptual study of a simplified slope. J. Geophys. Res. 116 (F4), F04010.

Glade, T y Crozier, M. J., 2005, A review of scale dependency in Landslide hazard and risk analysis, en Glade, T., *et al.* ed., Landslide hazard and risk: Chichester, England, John Willey Sons, p. 75–13.

Gómez Lende, M. (2016). Reseña de "Guía terminológica de la Geocriología Sudamericana. Terminological Guide of the South American Geocryology". Polígonos. Revista De Geografía, (28), 301–304. <https://doi.org/10.18002/pol.v0i28.4302>

Gruber, S. and Haeberli, W.: Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change., J. Geophys. Res., 112, 2007.

Gruber, S., & Haeberli, W. (2009). Mountain permafrost. In R. Margesin (Ed.), Permafrost Soils (pp. 33-44). Berlin: Springer-Verlag.

Haeberli, W., Brandova, D., Castelli, S., Egli, M., Frauenfelder, R., Käab, A., . . . Dickau, R. (2003). Absolute and relative age dating of rock-glacier surfaces in alpine permafrost: concept, first results and possible applications. EGS - AGU - EUG Joint Assembly, (págs. 343-348). Nice, France.

Haeberli, W. (1985). Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of alpine rock glaciers. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 77, 142.

Haeberli, W. (1992). Possible effects of climatic change on the evolution of Alpine permafrost. En M. Boer, & E. Koster (Edits.), Greenhouse-Impact on Cold Climate Ecosystems and Landscapes (págs. 23-35). Cremlingen-Destedt, Germany.

Hauser, A. 2000. Remociones en masa en Chile (versión actualizada). Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 59: 89 p. Santiago.

Herr, L. 2021. Los glaciares y Pascua Lama: auge y declive del primer proyecto desarrollado bajo el Tratado de Integración y Complementación Minera entre Chile y Argentina. Justicia Ambiental y Climática N° 13 Revista de Derecho Ambiental de la ONG FIMA. p.172

Hiebl, J., Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., Maugeri, M., Lentini, G., Spinoni, J., Brunetti, M., Nanni, T., Tadic, M., Perćec Bihari, Ž., Dolinar, M., and Müller-Westermeier, G.: A high-resolution 1961–1990 monthly temperature climatology for the greater Alpine region, *Meteorol. Z.*, 18, 507–530, doi:10.1127/0941-2948/2009/0403, 2009.

Hilbich, C., Hauck, C., Mollaret, C., Wainstein, P., & Arenson, L.U. (2022). Towards accurate quantification of ice content in permafrost of the Central Andes – Part 1: Geophysics-based estimates from three different regions. *The Cryosphere*.

Hoelzle, M., Wegmann, M., & Krummenacher, B. (1999). Miniature temperature dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas: First experience from the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10(2), 113-124.

Hoelzle, M., Mittaz, C., Etzelmüller, B., & Haeberli, W. (2001). Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European mountain areas: An overview of current developments. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(1), 53-68. doi:DOI: 10.1002/ppp 385

Huggel, C.: Recent extreme slope failures in glacial environments: effects of thermal perturbation, *Quat. Sci. Rev.*, 28, 1119–1130, 2009.

Hutchinson, J.N., 1988, Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, en *Memorias, 5th International Conference on Landslides*, Lausanne, p. 3–35.

Hutchinson, J.N., 1968, Mass Movements, en Fairbridge, R.W., ed., 1968, *The Encyclopedia of Geomorphology*: New York, Reinhold Book Corporation, p. 688– 695.

Hungr, O., 2005, Classification and terminology, en Jakob, M., y Hungr, O., ed., *Debris flow hazard and related phenomena*: Chichester, Springer-Praxis, p. 9–23.

Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M., y Hutchinson, J.N., 2001, Review of the classification of landslides of the flow type: *Environmental and Engineering Geoscience*, v. 7, p. 22–238.

Humlum, O. (2000) The geomorphic significance of rock glaciers: estimates of rock glacier debris volumes and headwall recession rates in West Greenland. *Geomorphology* 35, 41–67

Iriarte, S.;Arévalo, C.; Mpodozis, C. 1999. Hoja La Guardia, Región deAtacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 13, escala 1:100.000. Santiago.

Iribarren P., Bodin X (2010). Geomorphic consequences of two large glacier and rock glacier destabilizations in the central and northern Chilean Andes. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-7162-5.

Jacoby, D. (2001). Vulnerabilidad del sector urbano de La Reina frente a desbordes de la Quebrada de San Ramón. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Janke, J.R., Bellisario, A., & Ferrando, F. (2014). Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile. *Geomorphology*, 241, 98-121. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/133833>

Jensen, O. 1976. Geología de las nacientes del río Copiapó, entre los 27°53" y 28°20" de latitud sur, Provincia de Atacama, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 299 p.

Johnson, P. (1984). Rock glacier formation by high-magnitude low-frequency slope processes in the Southwest Yukon. *Annals of the association of American Geographers*, 74(3), 408-419.

Jones, F.O., Embody, D.R. and Peterson, W.L., Landslide along the Columbia river valley, Northeastern Washington. *Geological Survey Professional Paper*, 367, pp. 1-94, 1961.

Kääb, R. Frauenfelder, I. Roer (2007b) On the response of rockglacier creep to surface temperature increase *Global Planet Change*, 56. pp. 172-187

Kleinberg, R.L., Griffin, D.D., 2005. NMR measurements of permafrost: unfrozen water assay, pore-scale distribution of ice, and hydraulic permeability of sediments. *Cold Reg. Sci. Technol.* 42, 63e77.

Krysiecki, J.-M., 2009. Rupture du glacier rocheux du Be´rard (Alpes de Haute Provence): analyses géomorphologiques et premiers résultats du suivi mis en place sur le site. *Environnements Périglaciaires* 16, 65e78.

Lambe, W., Whitman, R. (1972). *Mecánica de suelos*. Instituto Tecnológico de Massachusetts, Editorial Limusa–Wiley S.A., p. 583.

Lara, M. 2007. Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar el Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología y Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, 212 p

Lee, H. & Hogsett, W. 2001. Interpolation of temperature and non-urban ozone exposure at high spatial resolution over the western United States. *Climate Research*. Vol. 18: 163–179

Londoño-Linares, Juan Pablo. (2017). Cálculo de susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis discriminante. Aplicación a escala regional. DYNA, 84(201), 278-289. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.61385>

Mahaney, W., Miyamoto, H., Dohm, J., Baker, V., Cabrol, N., Grin, E., y otros. (2007). Rock glaciers on Mars: Earth-based clues to Mars' recent paleoclimatic history. *Planetary and space science*(55), 181-192.

Maksaev, V.; Moscoso, R.; Mpodozis, C.; Nasi, C. 1984. Las unidades volcánicas y plutónicas del Cenozoico Superior entre la Alta Cordillera del Norte Chico (29°-31°S): Geología, alteración hidrotermal y mineralización. *Revista Geológica de Chile* 21: 11-51. doi: 10.5027/andgeoV11n1-a02.

Maksaev, V.; Munizaga, F.; Tassinari, C. 2014. Timing of the magmatism of the paleo-Pacific border of Gondwana: U-Pb geochronology of Late Paleozoic to Early Mesozoic igneous rocks of the north Chilean Andes between 20° and 31°S. *Andean Geology* 41 (3): 447-506. doi: 10.5027/andgeoV41n3-a01.

Martin, M.; Clavero, J.; Mpodozis, C.; Cuitiño, L. 1995. Estudio geológico regional de la franja El Indio, Cordillera de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado, IR-95-06: 2 Vols. Santiago.

Martin, M.; Clavero, J.; Mpodozis, C. 1997. Eocene to late Miocene magmatic development of El Indio belt, 30°S, NorthCentral Chile. In *Congreso Geológico Chileno*, No. 8, Actas 1: 149-153. Antofagasta.

Matsuoka, N., Murton, J., 2008. Frost weathering: recent advances and future directions. *Permafrost Periglacial Processes* 19 (2), 195e210.

Mergili, Martin, Carla I. Marchant Santiago y Stella M. Moreiras. 2015. "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. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50211

Milana, J.P.; Schmok, J. 2015. El modelo de Glaciar Reservorio indicado por Georadar, Glaciar Guanaco, III Región de Chile y Argentina. In *Congreso Geológico Chileno*, No. 14, Actas electrónicas.

Molina Perea, C. (2016). Análisis de susceptibilidad de remociones en masa en las Costas del Fiordo Comau, X Región, Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144086>

Mpodozis, C.; Cornejo, P. 1988. Hoja Pisco Elqui, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 68: 164 p., 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.

Muñoz, E. 2013. Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del mar, V región. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias mención Geología. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, 164 p.

Muñoz, A., Marín, M., Galecio, J. E., Osorio, C. 2018. Diseño de un sistema de monitoreo piloto de remociones en masa en la cuenca del estero San Alfonso, comuna San José de Maipo, región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería en colaboración con el Instituto Nacional de Hidráulica (INH). Informe Registrado IR-18-69-131 p.

Muñoz Muñoz, A. (2018). Metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos utilizando un análisis jerárquico de procesos y el software RAMMS, con aplicación en la cuenca del estero San Alfonso, Región Metropolitana. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152982>

Murton, J.B., Peterson, R., Ozouf, J.-C., 2006. Bedrock fracture by ice segregation in cold regions. *Science* 314, 1127e1129. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1132127>.

Naquira, M., (2009). Susceptibilidad de movimientos en masa en las costas de fiordos cercanos a Hornopirén, X Región. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Santiago.

Naranjo, J.A.; Olea, P. 2015. Descargas aluviales durante la tormenta del desierto de Atacama en marzo de 2015, Chile. In Congreso Geológico Chileno, No. 14, Actas electrónicas. Coquimbo.

Nasi, C.; Moscoso, R.; Makshev, V. 1990. Hoja Guanta, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 67: 141 p., 1 mapa escala 1:250.000. Santiago

Neuland, H., A prediction model of landslips. *Catena*, 3, pp. 215-230, 1976.

Nicholson, L., Marín, J., López, D., Rabatel, A., Bown, F., and Rivera, A.: Glacier inventory of the upper Huasco valley, Norte Chico, Chile: Glacier characteristics, glacier change and comparison with central Chile, *Ann. Glaciol.*, 50, 111–118, 2009.



Noetzi, J., Gruber, S., 2009. Transient thermal effects in Alpine permafrost. *Cryosphere* 3 (1), 85e99. <http://dx.doi.org/10.5194/tc-3-85-2009>.

Olea, P.; Quevedo, D. 2015 Distribución espacio-temporal de la precipitación durante el evento meteorológico del 24 a 26 de marzo de 2015 y sus efectos sobre la generación de flujos aluviales. In Congreso Geológico Chileno, No. 14, Actas electrónicas. Coquimbo.

Ortiz, M., Merino, R.N. 2015. Geología de las áreas Río Chollay-Matancilla y Cajón del Encierro, regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 175-176: 234 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Paskoff, R., 1970. Recherches Géomorphologiques dans le Chili Semi-Aride. Biscaye Frères, Bordeaux, France

Permanet. (2013). Guide lines for monitoring BTS, Bottom temperature of snow cover. Recuperado el 16 de June de 2013, de permanet-alpinespace: <http://www.permanet-alpinespace.eu/archive/pdf/BTS.pdf>.

Pogrebiskiy, M.I., Chernyshev, S.N., 1977. Determination of the permeability of the frozen fissured rock massif in the vicinity of the Kolyma Hydroelectric Power Station. *Cold Reg. Res. Eng. Lab. e Draft Translation* 634, 1e13.

Popescu, M.E., 2002. Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture, Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore, p. 61-81.

Potter, N. J. (1972). Ice-cored rock glacier, Galena creek Northern Absaroka mountains. Wyoming. *Geological Society of America Bulletin*, 83(10), 3025-3028

Publicación ocasional del Museo Nacional de Historia Natural 59: 7-486. Santiago.

Rabatel, A., Castebrunet, H., Favier, V., Nicholson, L., and Kinnard, C.: Glacier changes in the Pascua-Lama region, Chilean Andes (29° S): recent mass balance and 50 yr surface area variations, *The Cryosphere*, 5, 1029–1041, doi:10.5194/tc-5-1029- 2011, 2011

Rioseco, R.; Tesser, C. 2008. Cartografía Interactiva de los climas de Chile . Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía. [www.uc.cl/sw\\_educ/geografia/cartografiainteractiva](http://www.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva) (última visita 10-04-2015)

Rodríguez Valdivia, Alan, Tapia Tosetti, Alejandro, & Albornoz Espinoza, Cristián. (2014). SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIMIENTOS EN MASA EN EL VALLE DE SOCOROMA,

PRECORDILLERA ANDINA DE ARICA Y PARINACOTA. *Diálogo andino*, (44), 25-39.  
<https://dx.doi.org/10.4067/S0719-26812014000200004>

Romero, H.; Rovira, A.; Véliz, G. 1988. *Geografía IV Región de Coquimbo*. Instituto Geográfico Militar: 425 p. Santiago. Rossel, P.; Oliveros, V.; Ducea, M.; Charrier, R.; Scaillef, S.; Retamal, L.; Figueroa, O. 2013. The Early Andean Subduction.

Rutllant, J.; Fuenzalida, H.; Torres, R.; Figueroa, D. 1998. Interacción océano-atmósfera-tierra en la Región de Antofagasta (Chile, 23°S): Experimento DICLIMA. *Revista Chilena de Historia Natural* 71: 405-427.

Salazar, E.; Coloma, F.; Creixell, C. 2013a. Geología del área El Tránsito-Lagunillas, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 149: 121 p., 1 mapa escala 1:100.000.

Salinas Riveros, E. (2018). Análisis de propiedades geotécnicas de algunas rocas comunes en Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/169948>

Santacana, N., Baeza, C., Corominas, J., de Paz, A. y Marturià, J., Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica. Aplicación a La Pobla de Lillet (Pirineo Oriental). En: F.J. Ayala y J. Corominas (eds). *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España*. IGME. Madrid, pp. 55-82, 2003.

Scapozza C., Lambiel C., Baron L., Marescot L., Reynard E. (2011) – Internal structure and permafrost distribution in two Alpine periglacial talus slopes, Valais, Swiss Alps. *Geomorphology* 132, 208-221.

Schrott, L., 1991. Global solar radiation, soil temperature and permafrost in the Central Andes, Argentina. *Permafr. Periglac. Process.* 2, 59–66.

Schrott, L., 1996. Some geomorphological–hydrological aspects of rock glaciers in the Andes (San Juan, Argentina). *Z. Geomorphol.* 104, 161–173

Segerstrom, K. 1959. Cuadrángulo Los Loros, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 1: 33 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.

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

Sepúlveda, S.A., 2000. Metodología de Evaluación del Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos. Revista Comunicaciones, Departamento de Geología, Universidad de Chile, No.51, p. 3-28.

Sepúlveda, S., Lara, M., 2008. Remociones en masa, Apunte Curso Remociones en Masa, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Tapia Molina, Guillermo. Chile. Dirección General de Aguas. 2014. Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile. DGA. División de Estudios y Planificación. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32709>

Thiele, R. 1964. Reconocimiento geológico de la alta cordillera del Elqui. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 69 p. Santiago.

Trombotto, D. 2000. Survey of cryogenic processes, periglacial forms and permafrost conditions in South America. Revista Do Instituto Geológico, 21(1/2), 33–55.

Trombotto Liaudat, D., Wainstein, P., & Arenson, L. U. (2014). Guía terminológica de la geocriología sudamericana. Luján de Cuyo, San Juan, Argentina: Vazquez Mazzini Editores

Unidad de Gestión de Proyectos del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile (UGP UC): Dinámica de glaciares rocosos, Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, 2010.

Universidad de Atacama. 2016. Inventario de glaciares, ambiente periglacial y otras reservas hídricas criosféricas de la III Región de Atacama y áreas binacionales, para determinar nuevas fuentes de agua. Informe final fondo de innovación para la competitividad (FIC.FNDR 2014)

Varnes, D. J., 1958, Landslides types and processes, en Eckel, E.B., ed., Landslides and engineering practice, Special Report 28: Washington, DC, Highway Research Board, National Academy of Sciences, p. 20–47. Varnes, D. J., 1978, Slope movements types and processes, en Schuster R.L., y Krizek R.J., ed, Landslides analysis and control: Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 176, p. 9–33

Veit, H. 1996. Southern Westerlies during the Holocene deduced from geomorphological and pedological studies in the Norte Chico, Northern Chile (27-33°S). Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology 123:107 119.

Villagrán, C.; León, A.; Roig, F.A. 2004. Paleodistribución del alerce y ciprés de las Guaitecas durante períodos interestadiales de la Glaciación Llanquihue: Provincia de Llanquihue y Chiloé, Región de los Lagos, Chile. Revista Geológica de Chile 31 (1): 133-151. doi: 10.5027/andgeoV31n1-a08.

Villarroel, Claudia & Vásquez Yañez, Ricardo & Aravena, Carolina & Vilches, Carolina. (2022). REPORTE ANUAL DE LA EVOLUCIÓN DEL CLIMA EN CHILE 2021. 10.13140/RG.2.2.13883.49442.

Villarroel, Cristian & Forte, Ana. (2019) Spatial distribution of active and inactive rock glaciers and protalus ramparts in a sector of the Central Andes of Argentina. Cuadernos de Investigacion Geografica. 10.18172/cig.4272

Wahrhaftig, C., & Cox, A. (1959). Rock glacier in the Alaska range. Geological society of America Bulletin, 70(4), 383-436.

Whalley, B., & Azizi, F. (2003). Rock glaciers and protalus landsforms: Analogous forms and ice sources on Earth and Mars. Journal of Geophysical Research, 108(E4), 1-17. doi:10.1029/2002JE001864.

Whiteman, D. C.: Mountain meteorology fundamental and applications, New York, USA, Oxford University Press, 2000.

Winkler, H.G.F. 1967. Petrogenesis of Metamorphic Rocks. Springer-Verlag, 2° edition. New York-Berlin. 339 p.

Youssef, A. M., Pradhan, B., Jebur, M. N., & El-Harbi, H. M., 2015. Landslide susceptibility mapping using ensemble bivariate and multivariate statistical models in Fayfa area, Saudi Arabia. Environmental Earth Sciences, No.73 (7), p. 3745-3761.

Zech, R.; Kull, C.; Veit, H. 2006. Late Quaternary glacial history in the Encierro Valley, northern Chile (29°S), deduced from 10Be surface exposure dating. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 234: 277-286.

Zimmermann, M., & Haeberli, W. (1992). Climatic change and debris flow activity in highmountain areas- A case study in the Swiss Alps. En M. Boer, & E. Koster (Edits.). Cremlingen-Destedt, Germany: Catena.

## ANEXOS

### ANEXO A - Ejemplo metodología AHP

#### Obtención de ponderaciones para factores condicionantes

A continuación, se hace un desglose de la metodología AHP utilizada donde se hacen comparaciones a pares para determinar el valor de ponderación de los factores condicionantes y el IS<sub>n</sub> correspondiente a cada clase de los factores condicionantes utilizados.

Se presenta el caso de los deslizamientos de suelo donde a través de una ponderación a pares según la escala de Saaty (véase Tabla 2) se asignan valores dependiendo de la relevancia en la susceptibilidad que tiene un factor condicionante sobre otro. A continuación, se deja parte del análisis para el escenario A en el caso de los deslizamientos de suelo:

<b>Justificación de comparación a pares deslizamientos de suelo</b>	
<b>Factor</b>	<b>Pendientes</b>
Pendiente	Al compararse consigo mismo se obtiene el valor 1 en la escala de Saaty.
Distancia a fallas	Debido a la importancia de las pendientes en términos energéticos asociados a superar la resistencia al corte, frente al deterioro que pudiese generar la distancia a las fallas en las rocas y el suelo, se les asigna una importancia moderada a las pendientes por sobre la distancia a fallas, representado con un valor en escala de Saaty=3.
Probabilidad de existencia de permafrost	Si bien la degradación del permafrost se relaciona con una mayor saturación en las rocas y suelo además de afectar los campos de tensión de estos, tiene una influencia de segundo orden comparado con la pendiente que es altamente relevante en términos energéticos por lo que las pendientes son moderadamente importantes sobre el factor de probabilidad de permafrost representado con un valor en escala de Saaty=3.
Geología	La geología suele tener ponderaciones altas en las evaluaciones de susceptibilidad, ya que se asocia principalmente a la disponibilidad del material a ser removido, sin embargo, no se ve representado de una manera tan clara en la distribución de los deslizamientos de suelo. Las pendientes debido a lo relevante desde un punto de vista energético se consideran al menos levemente más importante que la geología, por lo que se le asigna un valor en escala de Saaty=2.
Acumulación de nieve	La acumulación de nieve a pesar de ser relevante en términos de humedad y saturación no tiene el mismo grado de importancia que la pendiente en un sentido energético, por lo que se le asigna a esta relación un valor=3 en la escala de Saaty.

Tabla 23: Justificación de la comparación a pares con respecto a las pendientes para deslizamientos de suelo. Elaboración propia.

<b>Justificación de comparación a pares deslizamientos de suelo</b>	
Factor	Distancia a fallas
Distancia a fallas	Al compararse consigo mismo se obtiene el valor 1 en la escala de Saaty.
Probabilidad de existencia de permafrost	La influencia de la degradación del permafrost en los campos de tensión y en la saturación de la roca se consideran más importantes que la distancia a las fallas, las cuales también pueden deteriorar la calidad de la roca y el suelo, sin embargo, no tienen asociado saturación y no hay estudios de geotecnia en la zona para evaluar el impacto que han generado en el área de estudio. Por lo anteriormente dicho se le asigna un valor de 0,5 en la escala de Saaty a esta relación.
Geología	La geología al tener relevancia directa con la generación de material removible suele ser ponderada con altos porcentajes en las evaluaciones de susceptibilidad, por otro lado, la distancia a fallas está incluida en un menor porcentaje de evaluaciones, además la influencia de las fallas en la zona de estudio no está clara. Por esto se le asigna un valor de 0,5 de acuerdo con la escala de Saaty.
Acumulación de nieve	La acumulación de nieve si bien aporta a la inestabilidad de las rocas y el suelo por su aporte en humedad y saturación suele tener bajas ponderaciones en otras evaluaciones de susceptibilidad ya que es un factor de segundo orden al igual que la distancia a fallas. De esta forma por la abundancia de fallas en el área de estudio se le asigna un valor de 1,5 en la escala de Saaty.

Tabla 24: Justificación de la comparación a pares con respecto al factor distancia a fallas para deslizamientos de suelo. Elaboración propia.

<b>Justificación de comparación a pares deslizamientos de suelo</b>	
Factor	Probabilidad de existencia de permafrost
Probabilidad de existencia de permafrost	Al compararse consigo mismo se obtiene el valor 1 en la escala de Saaty
Geología	La geología es un factor de primer orden al estar directamente relacionado con la generación de material disponible para ser removido, sin embargo, la degradación del permafrost puede influir de manera significativa en los campos de tensión y por lo tanto en la geotecnia de las rocas y el suelo además de influir en la saturación generando inestabilidad. Por estas razones la geología se considera levemente más importante llevándose esta relación un 0,67 en la escala de Saaty.
Acumulación de nieve	La acumulación de nieve y la degradación del permafrost son factores de segundo orden que tienen en común la pérdida de estabilidad cuando se produce saturación en las rocas y el suelo. Sin embargo, los cambios de temperatura que afectan los campos de tensión cuando se degrada el permafrost tienen influencia además en la geotecnia de las rocas siendo esta más importante que la acumulación de nieve. Por estas razones esta relación tiene un valor de 2 en la escala de Saaty.

Tabla 25: Justificación de la comparación a pares con respecto al factor probabilidad de existencia de permafrost para deslizamientos de suelo. Elaboración propia.

Justificación de comparación a pares deslizamientos de suelo	
Factor	Geología
Geología	Al compararse consigo mismo se obtiene el valor 1 en la escala de Saaty
Acumulación de nieve	La geología es un factor de primer orden al estar directamente relacionado con la generación de material disponible para ser removido, en contraparte la acumulación de nieve es un factor de segundo orden que suele tener menores ponderaciones en las evaluaciones de susceptibilidad por lo que se le asigna un valor de 3 a esta relación en la escala de Saaty.

Tabla 26: Justificación de la comparación a pares con respecto al factor geología para deslizamientos de suelo. Elaboración propia.

De esta forma los valores obtenidos del análisis se ingresan en la tabla, recordando que la relación inversa entre los parámetros corresponde al inverso multiplicativo del valor asignado (véase tabla 7) y se calcula una suma de los valores por columna.

Comparación a pares					
Atributo	Pendientes	Distancia a fallas	PFI	Geología	Acumulación de nieve
Pendientes	1,00	3,00	3,00	2,00	3,00
Distancia a fallas	0,33	1,00	0,50	0,50	1,50
PFI	0,33	2,00	1,00	0,67	2,00
Geología	0,50	2,00	1,50	1,00	3,00
Acumulación de nieve	0,33	0,67	0,50	0,33	1,00
Suma	2,50	8,67	6,50	4,50	10,50

Tabla 27: Primera matriz de la metodología. Elaboración propia.

A continuación, se procede a normalizar los valores de la matriz dividiendo cada uno de los datos de las celdas por la suma calculada anteriormente. Por último, se calculó un promedio de los datos de cada fila de la matriz normalizada, obteniendo así el valor de ponderación de cada factor condicionante.

Matriz normalizada						
Atributo	Pendientes	Distancia a fallas	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Ponderación
Pendientes	0,40	0,35	0,46	0,44	0,29	<b>39%</b>
Distancia a fallas	0,13	0,12	0,08	0,11	0,14	<b>12%</b>
PFI	0,13	0,23	0,15	0,15	0,19	<b>17%</b>
Geología	0,20	0,23	0,23	0,22	0,29	<b>23%</b>
Acumulación de nieve	0,13	0,08	0,08	0,07	0,10	<b>9%</b>
Suma	1,00	1	1	1	1	<b>100%</b>

Tabla 28: Matriz normalizada y obtención de las ponderaciones de los factores condicionantes para el escenario A de los deslizamientos de suelo. Elaboración propia.



## Ejemplos de obtención de IS<sub>n</sub> para clases de factores condicionantes

La obtención del IS<sub>n</sub> se realiza de manera análoga a la obtención de la ponderación de los factores condicionantes, con la diferencia en que el promedio obtenido se normaliza dividiendo las celdas por el promedio de mayor valor. A continuación, el desglose de la obtención de los IS<sub>n</sub> del factor probabilidad de existencia de permafrost.

<b>Justificación de comparación a pares clases de probabilidad de existencia de permafrost</b>	
Atributo	0 o “sin datos”
0 o “sin datos”	Al ser la misma clase se asigna un valor de 1 en la escala de Saaty
0-50	Ante la evidencia de aumentos de la isoterma 0°C se considera esta zona levemente más importante que las zonas que no presentan posibilidad de presentar permafrost ya que en áreas con un $0 \leq PFI \leq 0.5$ el permafrost podría estar presente en circunstancias ambientales excepcionales de manera local que pudieran estar en proceso de degradación. Así se le asigna un valor de 0,5 en la escala de Saaty.
50-75	En áreas donde $0.5 \leq PFI \leq 0.75$ el permafrost estará presente solo en condiciones térmicas favorables asociadas a las propiedades del suelo y la acumulación de nieve, las cuales se verán afectadas directamente con el alza en las temperaturas y la isoterma 0°C generando un mayor grado de degradación en estas zonas. Por estos motivos se le asigna una importancia moderada (Valor 0,3 aproximadamente en la escala de Saaty) a esta relación.
75-100	Esta clase al presentar permafrost en la gran mayoría de condiciones ambientales no es propensa a la degradación, por lo que se le asigna un valor de 1 en la escala de Saaty.

Tabla 29: Justificación de comparación a pares para la clase 0 o “sin datos”. Elaboración propia.

<b>Justificación de comparación a pares clases de probabilidad de existencia de permafrost</b>	
Atributo	0-50
0-50	Al ser la misma clase se asigna un valor de 1 en la escala de Saaty.
50-75	<p>En las zonas con <math>0.5 &lt; PFI &lt; 0.75</math> el permafrost estará presente solo en condiciones térmicas favorables asociadas a las propiedades del suelo y la acumulación de nieve, por lo que con el incremento de la altura de la isoterma <math>0^{\circ}\text{C}</math> se produce la degradación del permafrost, convirtiendo a esta clase en la que tiene mayor relevancia en términos de susceptibilidad.</p> <p>Por otro lado, las zonas con <math>0 &lt; PFI &lt; 0.5</math> solo presenta permafrost en condiciones ambientales excepcionales, por lo que la degradación solo se dará localmente y las zonas con estas características tendrán una menor susceptibilidad asociada.</p> <p>De este modo se le asigna un valor de 0,5 en la escala de Saaty.</p>
75-100	Las zonas con $0.75 < PFI < 1$ no presentan mayor riesgo de degradarse por lo que su susceptibilidad será menor a las zonas de $0 < PFI < 0.5$ que podrían tener degradación de permafrost a niveles locales, de este modo la relación en este caso corresponde a 2 en la escala de Saaty.

Tabla 30: Justificación de comparación a pares para la clase 0-50. Elaboración propia.

<b>Justificación de comparación a pares clases de probabilidad de existencia de permafrost para deslizamientos de suelo</b>	
Atributo	50-75
50-75	Al ser la misma clase se asigna un valor de 1 en la escala de Saaty.
75-100	Las zonas con $0.5 < PFI < 0.75$ son las más propensas a degradarse mientras que las zonas con $0.75 < PFI < 100$ están en condiciones climáticas en las que el permafrost estará presente independiente de las condiciones climáticas locales, por lo que esta relación es de 3 aproximadamente de acuerdo a la escala de Saaty.

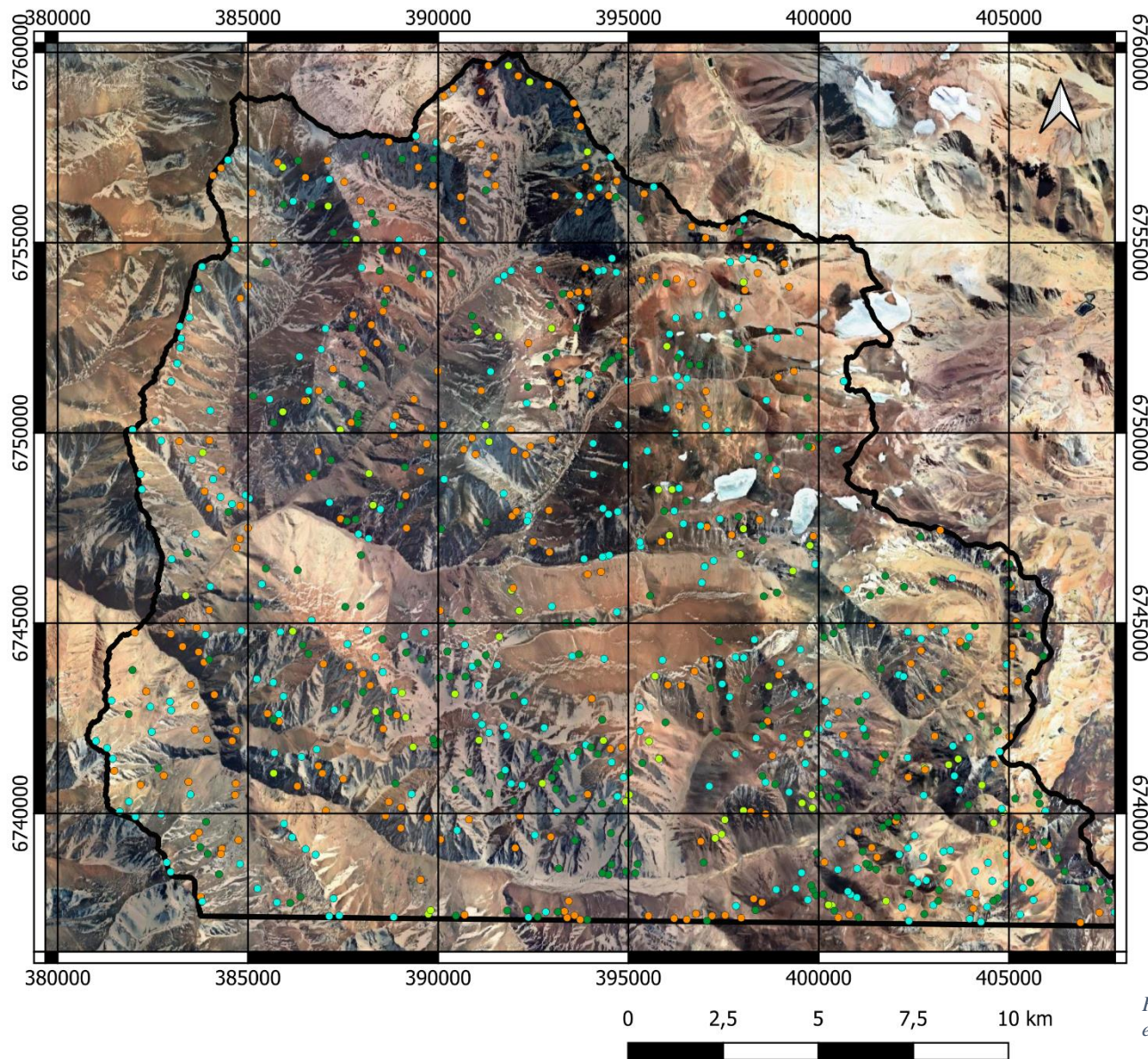
Tabla 31: Justificación de comparación a pares para la clase 50-75. Elaboración propia.

Categorías de probabilidad de existencia de permafrost										
Comparación a pares					Matriz normalizada					
Atributo	P=0	0<P<50	50<P<75	75<P<100	P=0	0<P<50	50<P<75	75<P<100	Promedio	Susceptibilidad (IS_n)
P=0	1,0	0,5	0,3	1,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	31
0<P<50	2,0	1,0	0,5	2,0	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	58
50<P<75	3,0	2,0	1,0	3,0	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	100
75<P<100	1,0	0,5	0,3	1,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	31
Suma	7,0	4,0	2,2	7,0	1	1	1	1	1	
CR	0,006									

Tabla 32: Desarrollo de la comparación a pares y obtención de índices normalizados para las diferentes clases de el factor probabilidad de existencia de permafrost. A diferencia de la obtención de las ponderaciones de factores condicionantes, para los índices normalizados (IS\_n) hay un paso extra que consiste en la normalización de los promedios por el promedio de mayor valor, multiplicado por 100. En este caso se dividen las celdas de las columna "Promedio" por 0,5 (aproximadamente) para obtener el valor del IS\_n. Elaboración propia.

## ANEXO B - Inventario de remociones en masa

En la siguiente plana se encuentra el inventario de remociones en masa.



### Leyenda

- Flujos de detritos
- Deslizamientos superficiales
- Caída de roca
- Deslizamientos no superficiales
- ▭ Area de estudio

Imagen: Google Satellite

WGS 84 / UTM 19S

Figura 42: Inventario de remociones en masa en el área de estudio. Elaboración propia.

## ANEXO C - Resultados de metodología AHP en detalle

A continuación, se presenta el desarrollo de la comparación a pares para los diferentes tipos de remoción en masa y escenarios propuestos:

Flujo de detritos													
Comparación a pares							Matriz normalizada						
Atributo	Pendientes	Distancia a red de drenaje	Curvatura	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Pendientes	Distancia a red de drenaje	Curvatura	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Ponderación
Pendientes	1,00	1,00	2,00	2,00	1,00	3,00	0,23	0,14	0,19	0,29	0,29	0,21	22%
Distancia a red de drenaje	1,00	1,00	2,00	1,00	0,33	2,00	0,23	0,14	0,19	0,14	0,10	0,14	16%
Curvatura	0,50	0,50	1,00	0,67	0,33	2,00	0,12	0,07	0,10	0,10	0,10	0,14	10%
PFI	0,50	1,00	1,50	1,00	0,50	3,00	0,12	0,14	0,14	0,14	0,14	0,21	15%
Geología	1,00	3,00	3,00	2,00	1,00	3,00	0,23	0,43	0,29	0,29	0,29	0,21	29%
Acumulación de nieve	0,33	0,50	1,00	0,33	0,33	1,00	0,08	0,07	0,10	0,05	0,10	0,07	8%
Suma	4,33	7,00	10,50	7,00	3,50	14,00	1,00	1	1	1	1	1	100%
CR	0,052												

Tabla 33: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de flujos de detritos en el escenario A. Elaboración propia.

Flujo de detritos													
Comparación a pares							Matriz normalizada						
Atributo	Pendientes	Distancia a red de drenaje	Curvatura	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Pendientes	Distancia a red de drenaje	Curvatura	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Ponderación
Pendientes	1,00	1,00	2,00	3,00	1,00	3,00	0,24	0,15	0,20	0,27	0,30	0,25	24%
Distancia a red de drenaje	1,00	1,00	2,00	2,00	0,33	2,00	0,24	0,15	0,20	0,18	0,10	0,17	17%
Curvatura	0,50	0,50	1,00	1,00	0,33	2,00	0,12	0,08	0,10	0,09	0,10	0,17	11%
PFI	0,33	0,50	1,00	1,00	0,33	1,00	0,08	0,08	0,10	0,09	0,10	0,08	9%
Geología	1,00	3,00	3,00	3,00	1,00	3,00	0,24	0,46	0,30	0,27	0,30	0,25	30%
Acumulación de nieve	0,33	0,50	1,00	1,00	0,33	1,00	0,08	0,08	0,10	0,09	0,10	0,08	9%
Suma	4,16	6,50	10,00	11,00	3,33	12,00	1,00	1	1	1	1	1	100%
CR	0,050												

Tabla 34: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de flujos de detritos en el escenario B. Elaboración propia.



Flujo de detritos													
Comparación a pares							Matriz normalizada						
Atributo	Pendientes	Distancia a red de drenaje	Curvatura	Exposición al sol	Geología	Acumulación de nieve	Pendientes	Distancia a red de drenaje	Curvatura	Exposición al sol	Geología	Acumulación de nieve	Ponderación
Pendientes	1,00	1,00	2,00	3,00	1,00	3,00	0,24	0,15	0,20	0,25	0,30	0,25	23%
Distancia a red de drenaje	1,00	1,00	2,00	2,00	0,33	2,00	0,24	0,15	0,20	0,17	0,10	0,17	17%
Curvatura	0,50	0,50	1,00	2,00	0,33	2,00	0,12	0,08	0,10	0,17	0,10	0,17	12%
Exposición al sol	0,33	0,50	1,00	1,00	0,33	1,00	0,08	0,08	0,10	0,08	0,10	0,08	9%
Geología	1,00	3,00	3,00	3,00	1,00	3,00	0,24	0,46	0,30	0,25	0,30	0,25	30%
Acumulación de nieve	0,33	0,50	1,00	1,00	0,33	1,00	0,08	0,08	0,10	0,08	0,10	0,08	9%
Suma	4,17	6,50	10,00	12,00	3,33	12,00	1,00	1	1	1	1	1	100%
CR	0,072												

Tabla 35: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de flujos de detritos en el escenario C. Elaboración propia.

Deslizamientos de suelo												
Comparación a pares						Matriz normalizada						
Atributo	Pendientes	Distancia a fallas	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Pendientes	Distancia a fallas	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Ponderación	
Pendientes	1,00	3,00	3,00	2,00	3,00	0,40	0,35	0,46	0,44	0,29	39%	
Distancia a fallas	0,33	1,00	0,50	0,50	1,50	0,13	0,12	0,08	0,11	0,14	12%	
PFI	0,33	2,00	1,00	0,67	2,00	0,13	0,23	0,15	0,15	0,19	17%	
Geología	0,50	2,00	1,50	1,00	3,00	0,20	0,23	0,23	0,22	0,29	23%	
Acumulación de nieve	0,33	0,67	0,50	0,33	1,00	0,13	0,08	0,08	0,07	0,10	9%	
Suma	2,50	8,67	6,50	4,50	10,50	1,00	1	1	1	1	100%	
CR	0,063											

Tabla 37: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de deslizamientos de suelo en el escenario A. Elaboración propia.

Deslizamientos de suelo											
Comparación a pares						Matriz normalizada					
Atributo	Pendientes	Distancia a fallas	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Pendientes	Distancia a fallas	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Ponderación
Pendientes	1,00	3,00	3,00	2,00	3,00	0,40	0,41	0,32	0,48	0,32	38%
Distancia a fallas	0,33	1,00	1,50	0,50	1,50	0,13	0,14	0,16	0,12	0,16	14%
PFI	0,33	0,67	1,00	0,33	1,00	0,13	0,09	0,11	0,08	0,11	10%
Geología	0,50	2,00	3,00	1,00	3,00	0,20	0,27	0,32	0,24	0,32	27%
Acumulación de nieve	0,33	0,67	1,00	0,33	1,00	0,13	0,09	0,11	0,08	0,11	10%
Suma	2,50	7,33	9,50	4,17	9,50	1,00	1	1	1	1	100%
CR	0,025										

Tabla 36: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de deslizamientos de suelo en el escenario B. Elaboración propia.

Deslizamientos de suelo											
Comparación a pares						Matriz normalizada					
Atributo	Pendientes	Distancia a fallas	Exposición al sol	Geología	Acumulación de nieve	Pendientes	Distancia a fallas	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Ponderación
Pendientes	1,00	3,00	3,00	2,00	3,00	0,40	0,41	0,32	0,48	0,32	<b>38%</b>
Distancia a fallas	0,33	1,00	1,50	0,50	1,50	0,13	0,14	0,16	0,12	0,16	<b>14%</b>
Exposición al sol	0,33	0,67	1,00	0,33	1,00	0,13	0,09	0,11	0,08	0,11	<b>10%</b>
Geología	0,50	2,00	3,00	1,00	3,00	0,20	0,27	0,32	0,24	0,32	<b>27%</b>
Acumulación de nieve	0,33	0,67	1,00	0,33	1,00	0,13	0,09	0,11	0,08	0,11	<b>10%</b>
Suma	2,50	7,33	9,50	4,17	9,50	1,00	1	1	1	1	<b>100%</b>
CR	0,025										

Tabla 38: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de deslizamientos de suelo en el escenario C. Elaboración propia.

Caídas de roca											
Comparación a pares						Matriz normalizada					
Atributo	Pendientes	Distancia a fallas	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Pendientes	Distancia a fallas	PFI	Geología	Acumulación de nieve	Ponderación
Pendientes	1,00	3,00	3,00	1,00	4,00	0,34	0,35	0,33	0,34	0,33	<b>34%</b>
Distancia a fallas	0,33	1,00	1,00	0,33	2,00	0,11	0,12	0,11	0,11	0,17	<b>12%</b>
PFI	0,33	1,00	1,00	0,33	1,00	0,11	0,12	0,11	0,11	0,08	<b>11%</b>
Geología	1,00	3,00	3,00	1,00	4,00	0,34	0,35	0,33	0,34	0,33	<b>34%</b>
Acumulación de nieve	0,25	0,50	1,00	0,25	1,00	0,09	0,06	0,11	0,09	0,08	<b>8%</b>
Suma	2,92	8,50	9,00	2,92	12,00	1,00	1	1	1	1	<b>100%</b>
CR	0,011										

Tabla 39: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes caídas de roca en el escenario A. Elaboración propia.

Caídas de roca											
Comparación a pares						Matriz normalizada					
Atributo	Pendientes	Distancia a fallas	Exposición al sol	Geología	Acumulación de nieve	Pendientes	Distancia a fallas	Exposición al sol	Geología	Acumulación de nieve	Promedio
Pendientes	1,00	3,00	4,00	1,00	4,00	0,35	0,38	0,33	0,35	0,33	<b>35%</b>
Distancia a fallas	0,33	1,00	2,00	0,33	2,00	0,12	0,13	0,17	0,12	0,17	<b>14%</b>
Exposición al sol	0,25	0,50	1,00	0,25	1,00	0,09	0,06	0,08	0,09	0,08	<b>8%</b>
Geología	1,00	3,00	4,00	1,00	4,00	0,35	0,38	0,33	0,35	0,33	<b>35%</b>
Acumulación de nieve	0,25	0,50	1,00	0,25	1,00	0,09	0,06	0,08	0,09	0,08	<b>8%</b>
Suma	2,83	8,00	12,00	2,83	12,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>100%</b>
CR	0,011										

Tabla 40: Desarrollo de comparación a pares para factores condicionantes de caídas de rocas en el escenario C. Elaboración propia.



A continuación, se presenta el desarrollo de la comparación a pares para las clases determinadas para los diferentes factores condicionantes:

Categorías de pendientes para flujos de detritos												
Comparación a pares						Matriz normalizada						
Clases	<10	10-20	20-30	30-40	>40	<10	10-20	20-30	30-40	>40	Promedio	Susceptibilidad (IS <sub>n</sub> )
<10	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,07	0,05	0,05	0,06	0,09	0,06	15
10-20	2	1,00	0,50	0,33	0,25	0,13	0,10	0,07	0,08	0,11	0,10	24
20-30	3	2	1,00	0,50	0,33	0,20	0,19	0,15	0,12	0,15	0,16	39
30-40	4	3	2	1	0,50	0,27	0,29	0,29	0,24	0,22	0,26	63
>40	5	4	3	2	1,00	0,33	0,38	0,44	0,49	0,44	0,42	100
Suma	15,00	10,50	6,83	4,08	2,28	1,00	1	1	1	1	1,00	
CR	0,087											

Tabla 41: Desarrollo de comparación a pares para clases de pendientes de flujos de detritos. Elaboración propia.

Categorías de acumulación de nieve											
Comparación a pares					Matriz normalizada						
Atributo	Casi nunca	Ocasional	Estacional	Mayor parte del año	Casi nunca	Ocasional	Estacional	Mayor parte del año	Promedio	Susceptibilidad	
Casi nunca	1,00	0,33	0,25	1,00	0,11	0,07	0,14	0,125	0,11	21	
Ocasional	3,00	1,00	0,33	2,00	0,32	0,21	0,18	0,25	0,24	46	
Estacional	4,00	3,00	1,00	4,00	0,43	0,62	0,55	0,5	0,52	100	
Mayor parte del año	1,30	0,50	0,25	1,00	0,14	0,10	0,14	0,125	0,13	24	
Suma	9,30	4,83	1,83	8,00	1,00	1	1	1	1,00		
CR	0,048										

Tabla 42: Desarrollo de comparación a pares para clases de acumulación de nieve. Elaboración propia.

Categorías de curvatura para flujos de detritos								
Comparación a pares				Matriz normalizada				
Atributo	Cóncavo (<-0,005)	Plano (-0,005 a 0,005)	Convexo (>0,005)	Cóncavo (<-0,005)	Plano (-0,005 a 0,005)	Convexo (>0,005)	Promedio	Susceptibilidad
Concavo (<-0,005)	1,00	3,00	5,00	0,65	0,67	0,63	0,65	100
Plano (-0,005 a 0,005)	0,33	1,00	2,00	0,22	0,22	0,25	0,23	35
Convexo (>0,005)	0,20	0,50	1,00	0,13	0,11	0,13	0,12	19
Suma	1,53	4,50	8,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
CR	0,006							

Tabla 43: Desarrollo de comparación a pares para clases de curvatura para flujos de detritos. Elaboración propia.

Categorías de distancia a red de drenaje para flujos de detritos										
Comparación a pares					Matriz normalizada					
Atributo	<50m	50m<D<100m	100m<D<200m	>200m	<50m	50m<D<100m	100m<D<200m	>200m	Promedio	Susceptibilidad
<50m	1,00	2,00	3,00	5,00	0,49	0,53	0,47	0,38	0,47	100
50m<D<100m	0,50	1,00	2,00	4,00	0,25	0,27	0,32	0,31	0,28	60
100m<D<200m	0,33	0,50	1,00	3,00	0,16	0,13	0,16	0,23	0,17	36
>200m	0,20	0,25	0,33	1,00	0,10	0,07	0,05	0,08	0,07	16
Suma	2,03	3,75	6,33	13,00	1,00	1	1	1	1,00	
CR	0,012									

Tabla 44: Desarrollo de comparación a pares para clases de distancia a red de drenaje para flujos de detritos. Elaboración propia.

Categorías de exposición al sol								
Comparación a pares				Matriz normalizada				
Atributo	Norte	Oeste-Este	Sur	Norte	Oeste-Este	Sur	Promedio	Susceptibilidad
Norte	1,00	2,00	4,00	0,57	0,60	0,50	0,56	<b>100</b>
Oeste-Este	0,50	1,00	3,00	0,29	0,30	0,38	0,32	<b>57</b>
Sur	0,25	0,33	1,00	0,14	0,10	0,13	0,12	<b>22</b>
Suma	1,75	3,33	8,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
CR	0,026							

Tabla 45: Desarrollo de comparación a pares para clases de exposición al sol. Elaboración propia.

Categorías de pendientes para deslizamientos de suelo												
Comparación a pares						Matriz normalizada						
Atributo	15-20	20-25	25-30	30-40	>40	15-20	20-25	25-30	30-40	>40	Promedio	Susceptibilidad
15-20	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,07	0,05	0,05	0,06	0,09	0,06	<b>15</b>
20-25	2	1,00	0,50	0,33	0,25	0,13	0,10	0,07	0,08	0,11	0,10	<b>24</b>
25-30	3	2	1,00	0,50	0,33	0,20	0,19	0,15	0,12	0,15	0,16	<b>39</b>
30-40	4	3	2	1	0,50	0,27	0,29	0,29	0,24	0,22	0,26	<b>63</b>
>40	5	4	3	2	1,00	0,33	0,38	0,44	0,49	0,44	0,42	<b>100</b>
Suma	15,00	10,50	6,83	4,08	2,28	1,00	1	1	1	1	1,00	
CR	0,072											

Tabla 46: Desarrollo de comparación a pares para clases de pendientes en deslizamientos de suelo. Elaboración propia.

Categorías de distancia a fallas para deslizamientos de suelo y caídas de rocas													
Comparación a pares						Matriz normalizada							
Atributo	<500m	500m<D<1000m	1km<D<2km	2km<D<3km	>3000m	<500m	500m<D<1000m	1km<D<2km	2km<D<3km	>3000m	Promedio	Susceptibilidad	
<500m	1,00	2,00	4,00	5,00	6,00	0,47	0,53	0,45	0,40	0,35	0,44	<b>100</b>	
500m<D<1000m	0,5	1,00	3,00	4,00	5,00	0,24	0,26	0,34	0,32	0,29	0,29	<b>66</b>	
1km<D<2km	0,25	0,33	1,00	2,00	3,00	0,12	0,09	0,11	0,16	0,18	0,13	<b>30</b>	
2km<D<3km	0,2	0,25	0,5	1	2,00	0,09	0,07	0,06	0,08	0,12	0,08	<b>19</b>	
>3000m	0,17	0,2	0,33	0,50	1,00	0,08	0,05	0,04	0,04	0,06	0,05	<b>12</b>	
Suma	2,12	3,78	8,83	12,50	17,00	1,00	1	1	1	1	1,00		
CR	0,005												

Tabla 47: Desarrollo de comparación a pares para clases distancia a fallas en deslizamientos de suelo y caídas de rocas. Elaboración propia.

Clases	Trch	EOb	Trsh	Cii	Trsi(sg)	PeTro	Kihd	PeTrgs	Mct	Omda	Jsl1	Jl	Trspb	Mt	Jsl2	PIHa	PIHc	PIHrm	PIHf	PIHg	Susceptibilidad IS_n
Trch	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00	0,50	1,00	0,29	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	18
EOb	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00	0,50	1,00	0,25	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	18
Trsh	0,77	0,77	1,00	0,77	0,77	0,33	0,77	0,29	0,33	0,29	0,29	0,33	0,33	0,33	1,00	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	17
Cii	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00	0,50	1,00	0,29	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	18
Trsi(sg)	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00	0,50	1,00	0,29	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	18
PeTro	2,00	2,00	3,00	2,00	2,00	1,00	2,00	0,33	0,50	0,50	0,50	0,50	0,33	0,67	0,67	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	28
Kihd	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00	0,50	1,00	0,29	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	19
PeTrgs	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,00	3,50	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00	3,50	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	71
Mct	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	2,00	3,00	0,50	1,00	0,50	0,50	2,00	1,00	1,00	2,00	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	42
Omda	3,00	3,00	3,50	3,00	3,00	2,00	3,00	0,50	2,00	1,00	0,67	1,00	2,00	2,00	3,00	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	47
Jsl1	3,00	3,00	3,50	3,00	3,00	2,00	3,00	0,50	2,00	1,50	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	50
Jl	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	2,00	3,00	0,50	0,50	1,00	0,50	1,00	2,00	2,00	3,00	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	43
Trspb	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	0,33	1,00	0,50	0,50	0,50	1,00	2,00	3,00	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	41
Mt	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	1,50	2,00	0,50	1,00	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	3,00	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	38
Jsl2	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00	1,50	2,00	0,29	0,50	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	25
PIHa	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,50	4,00	1,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	4,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100
PIHc	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,50	4,00	1,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	4,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100
PIHrm	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,50	4,00	1,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	4,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100
PIHf	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,50	4,00	1,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	4,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100
PIHg	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,50	4,00	1,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	4,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100
Suma	51,27	51,27	54,00	51,27	51,27	38,33	50,27	13,63	30,00	27,29	25,95	29,33	31,67	32,67	45,67	9,31	9,31	9,31	9,31	9,31	
CR	<0,1																				

Tabla 48: Desarrollo de comparación a pares para clases de geología en deslizamientos de suelo y flujos de detritos. Elaboración propia.

Clases	Trch	EOb	Trsh	Cii	Trsi(sg)	PeTro	Kihd	PeTrgs	Mct	Omda	Jsl1	Jl	Trspb	Mt	Jsl2	Susceptibilidad IS_n
Trch	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00	0,50	1,00	0,20	0,33	0,33	0,33	0,33	0,25	0,33	0,50	18
EOb	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00	0,50	1,00	0,20	0,33	0,33	0,33	0,33	0,25	0,33	0,50	18
Trsh	0,77	0,77	1,00	0,77	0,77	0,33	0,77	0,25	0,33	0,25	0,25	0,33	0,33	0,33	1,00	16
Cii	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00	0,50	1,00	0,20	0,33	0,33	0,33	0,33	0,25	0,33	0,50	18
Trsi(sg)	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00	0,50	1,00	0,20	0,33	0,33	0,33	0,33	0,25	0,33	0,50	18
PeTro	2,00	2,00	3,00	2,00	2,00	1,00	2,00	0,33	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,67	0,67	31
Kihd	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00	0,50	1,00	0,20	0,33	0,33	0,33	0,33	0,25	0,50	0,50	18
PeTrgs	5,00	5,00	4,00	5,00	5,00	3,00	5,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00	4,00	100
Mct	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	2,00	3,00	0,50	1,00	0,50	0,50	2,00	1,00	1,00	2,00	53
Omda	3,00	3,00	4,00	3,00	3,00	2,00	3,00	0,50	2,00	1,00	0,67	1,00	2,00	2,00	3,00	64
Jsl1	3,00	3,00	4,00	3,00	3,00	2,00	3,00	0,50	2,00	1,50	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00	71
Jl	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	2,00	3,00	0,50	0,50	1,00	0,50	1,00	2,00	2,00	3,00	57
Trspb	4,00	4,00	3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	0,33	1,00	0,50	0,50	0,50	1,00	2,00	3,00	60
Mt	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	1,50	2,00	0,50	1,00	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	3,00	45
Jsl2	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00	1,50	2,00	0,25	0,50	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	27
CR	<0,1															

Tabla 49: Desarrollo de comparación a pares para clases de geología en caídas de roca. Elaboración propia.

## ANEXO D - Mapas de susceptibilidad

A continuación, se presentan el resto de los mapas de susceptibilidad según los diferentes escenarios planteados. Los rangos y colores fueron dispuestos de esa forma exclusivamente con el fin de facilitar la visualización de la distribución de índices de susceptibilidad.

### Flujos de detritos

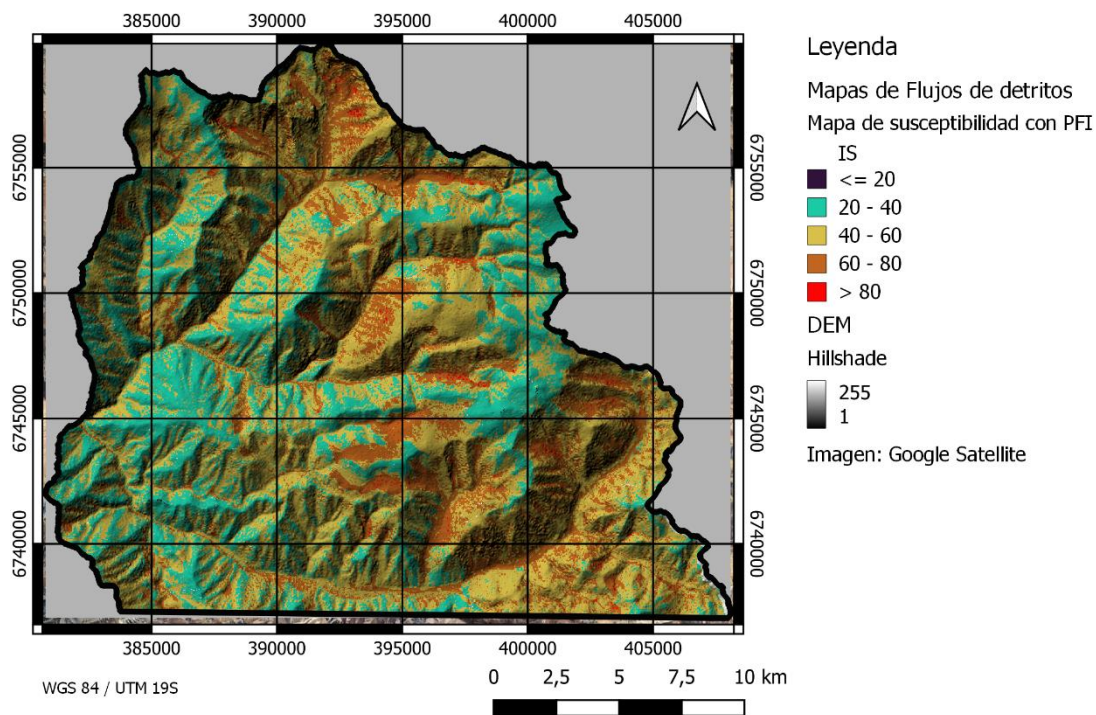


Figura 43: Mapa de susceptibilidad de flujo de detritos según escenario A (PFI ponderando 15%) en toda el área de estudio. Elaboración propia.

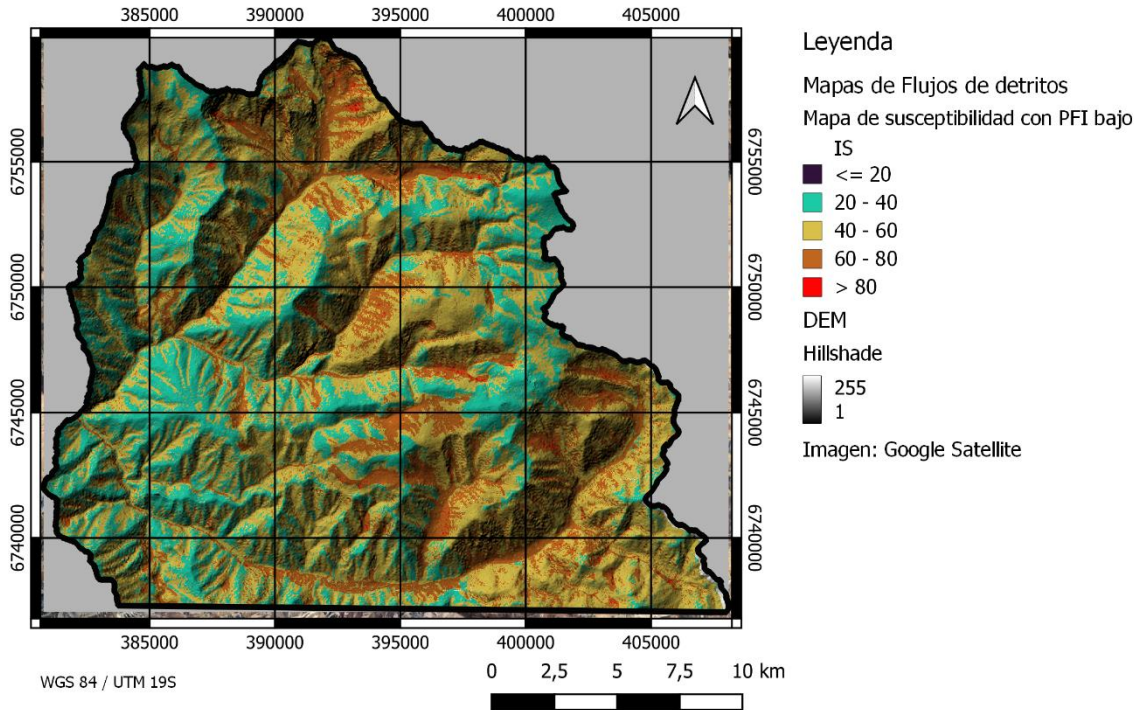


Figura 44: Mapa de susceptibilidad de flujo de detritos según escenario B (PFI ponderando 9%). Elaboración propia.

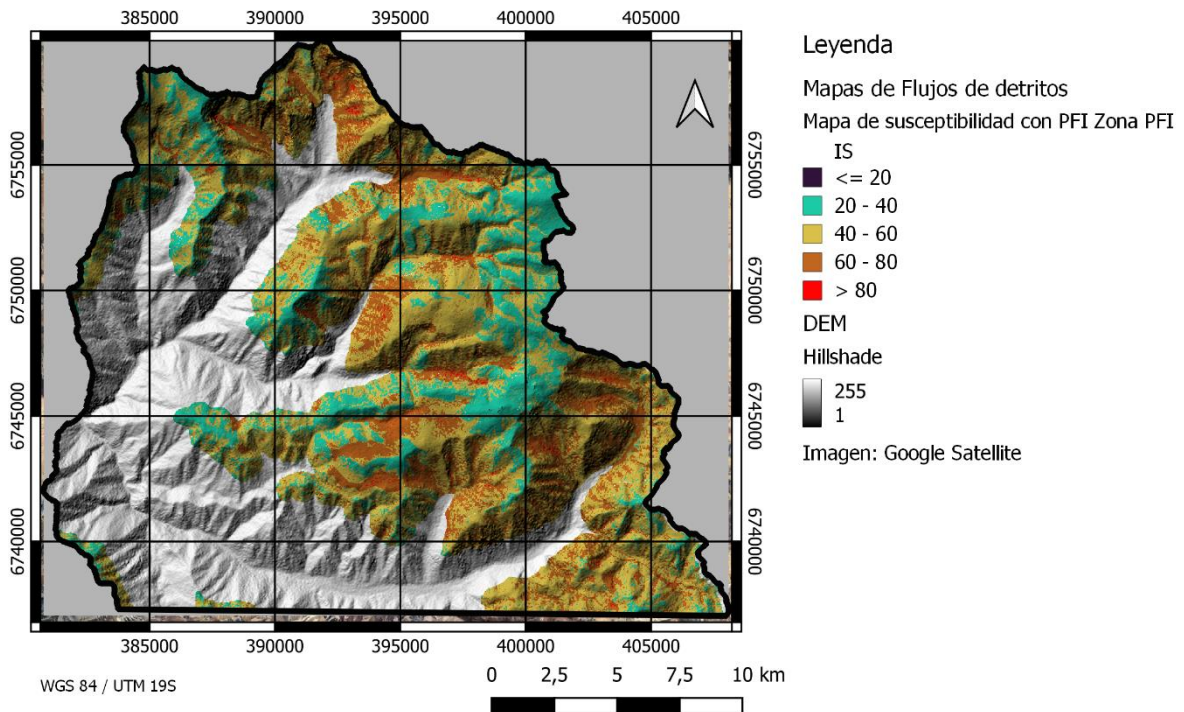


Figura 45: Mapa de susceptibilidad de flujo de detritos según escenario A (PFI ponderando 15%) limitado a zonas con datos de probabilidad de permafrost. Elaboración propia.



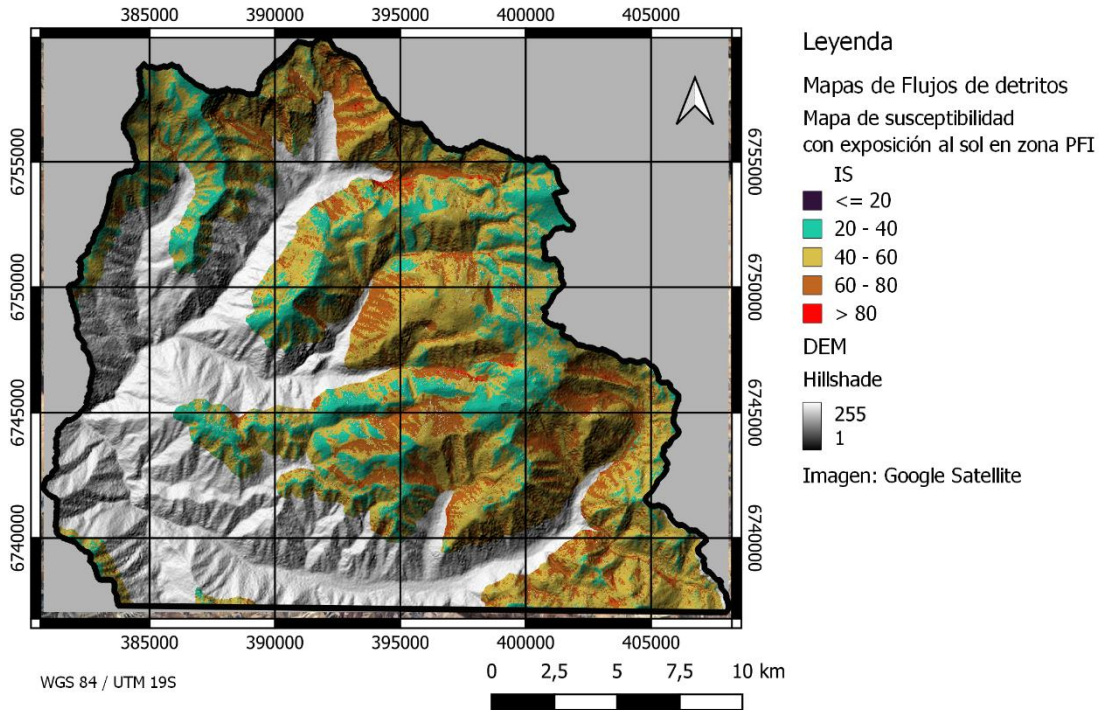


Figura 46: Mapa de susceptibilidad de flujo de detritos según escenario C (Con exposición al sol) limitado a zonas con datos de probabilidad de permafrost. Elaboración propia.

### Deslizamientos de suelo

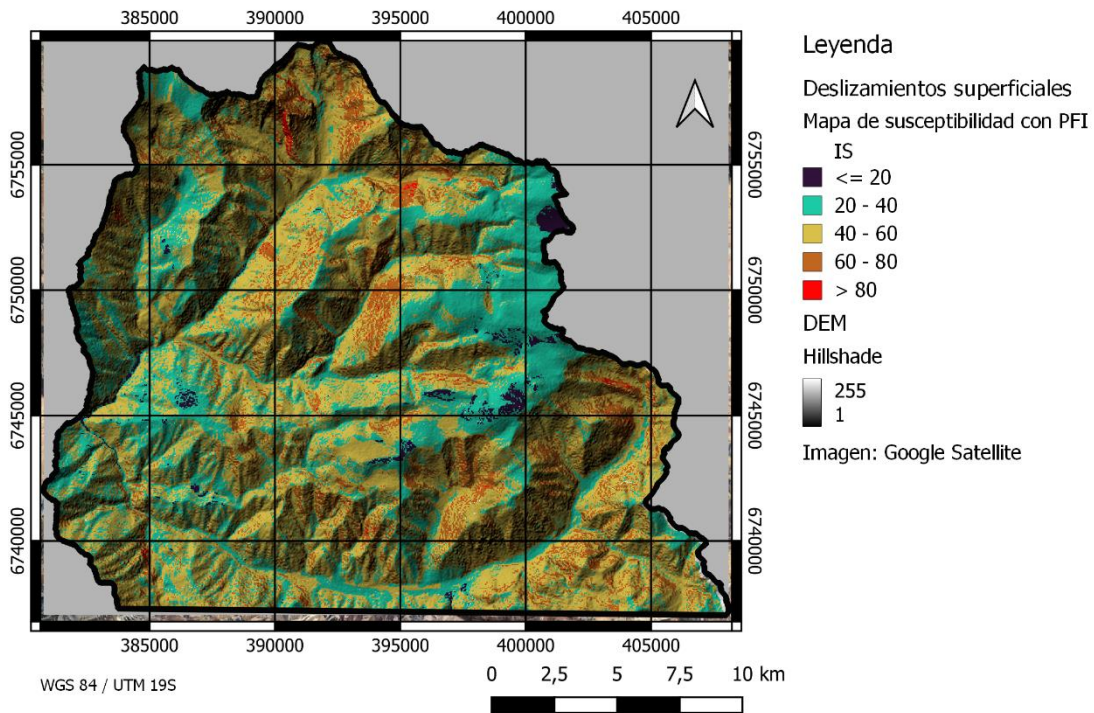


Figura 47: Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo según escenario A (con PFI ponderando 17%) en el área total. Elaboración propia.

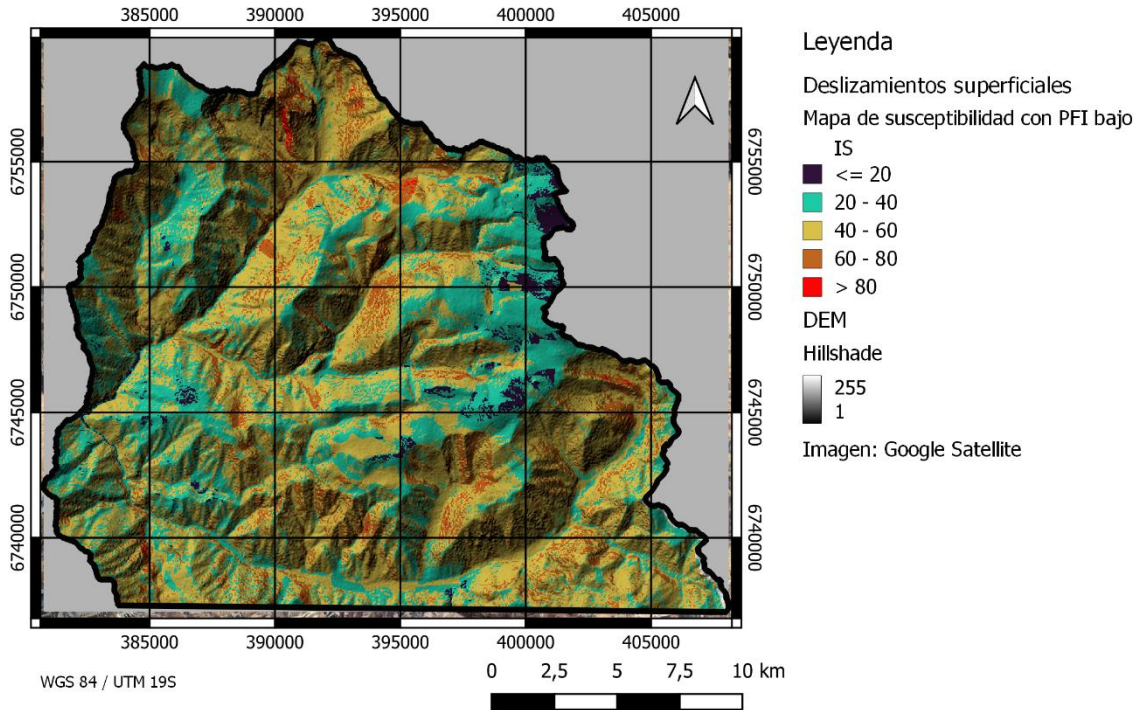


Figura 48: Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo según escenario B (con PFI ponderando 10%) en el área total. Elaboración propia.

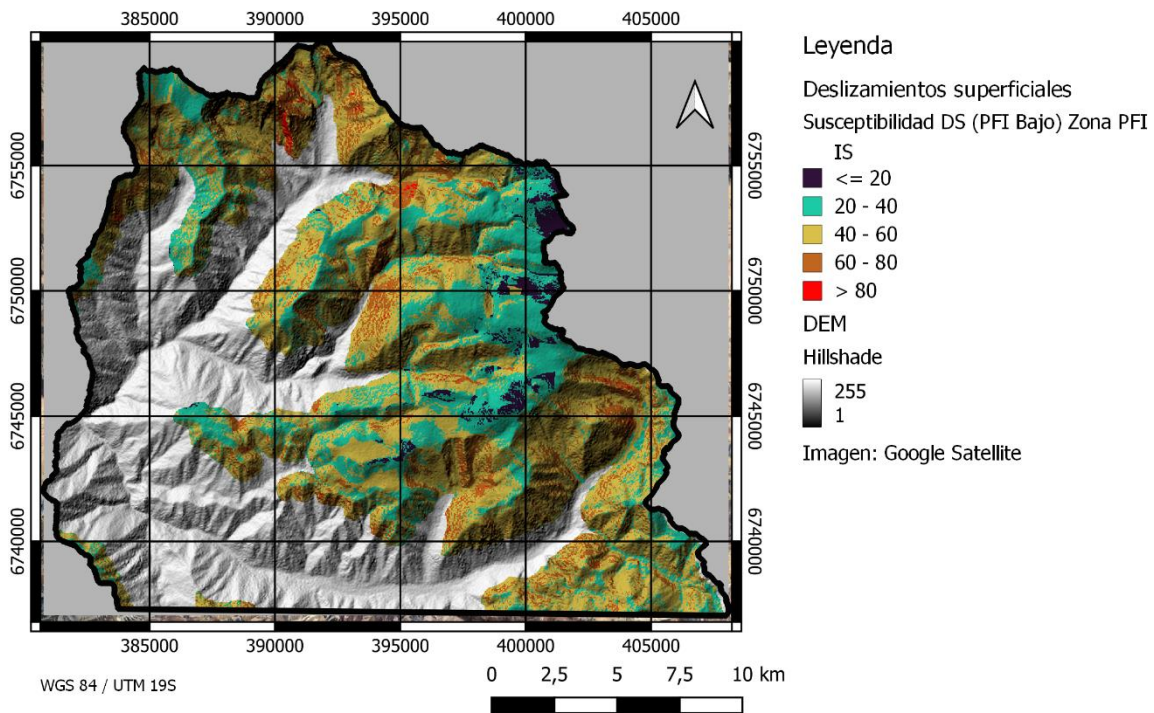


Figura 49: Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo según escenario B (Con PFI ponderando 10%) limitado a zonas con datos de probabilidad de permafrost. Elaboración propia.



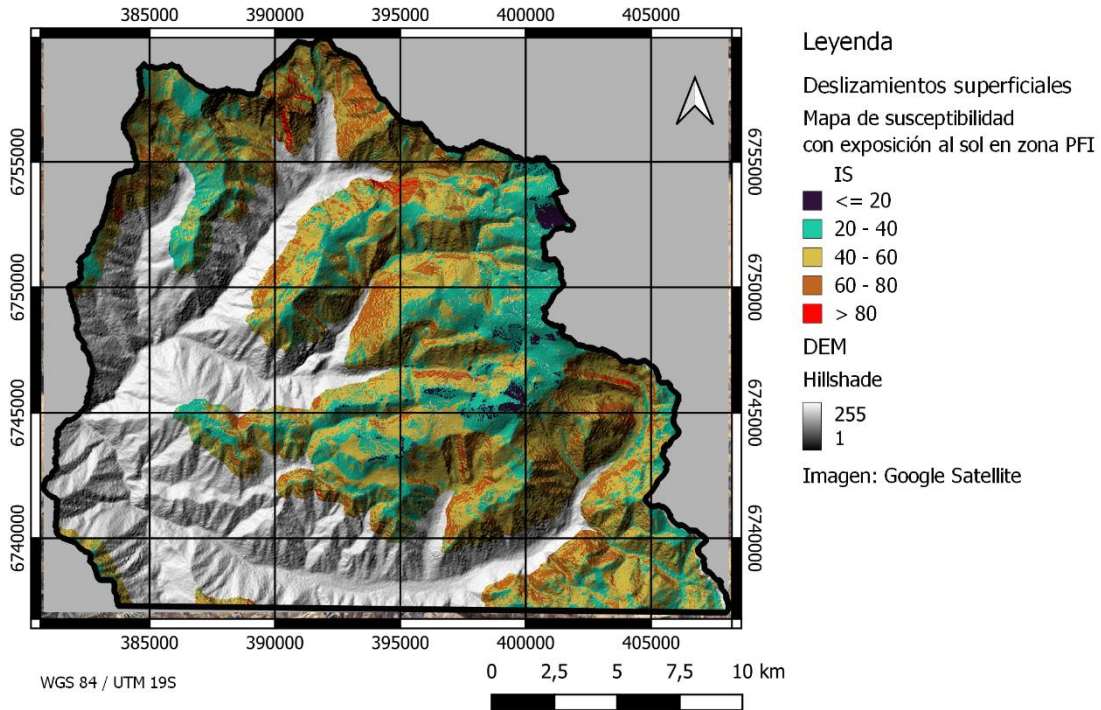


Figura 50: Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de suelo según escenario C (Exposición al sol). Limitado a zonas con datos de probabilidad de existencia de permafrost. Elaboración propia.

## Caída de rocas

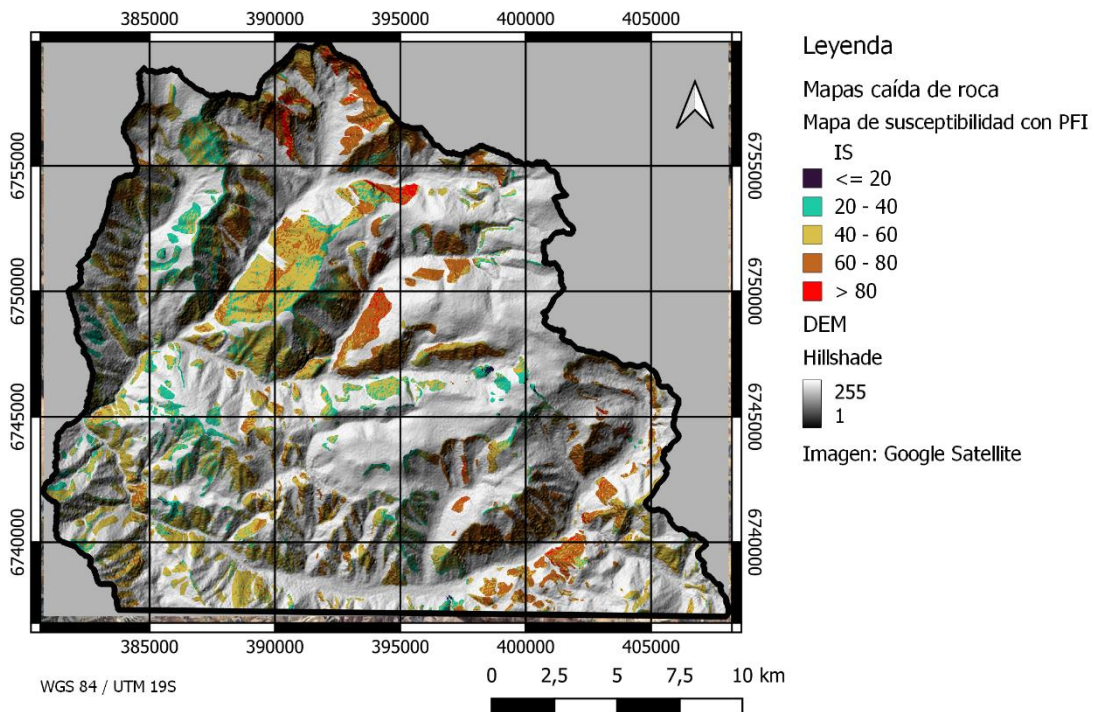


Figura 51: Mapa de susceptibilidad de rocas según escenario A. En el total del área de estudio. Elaboración propia.

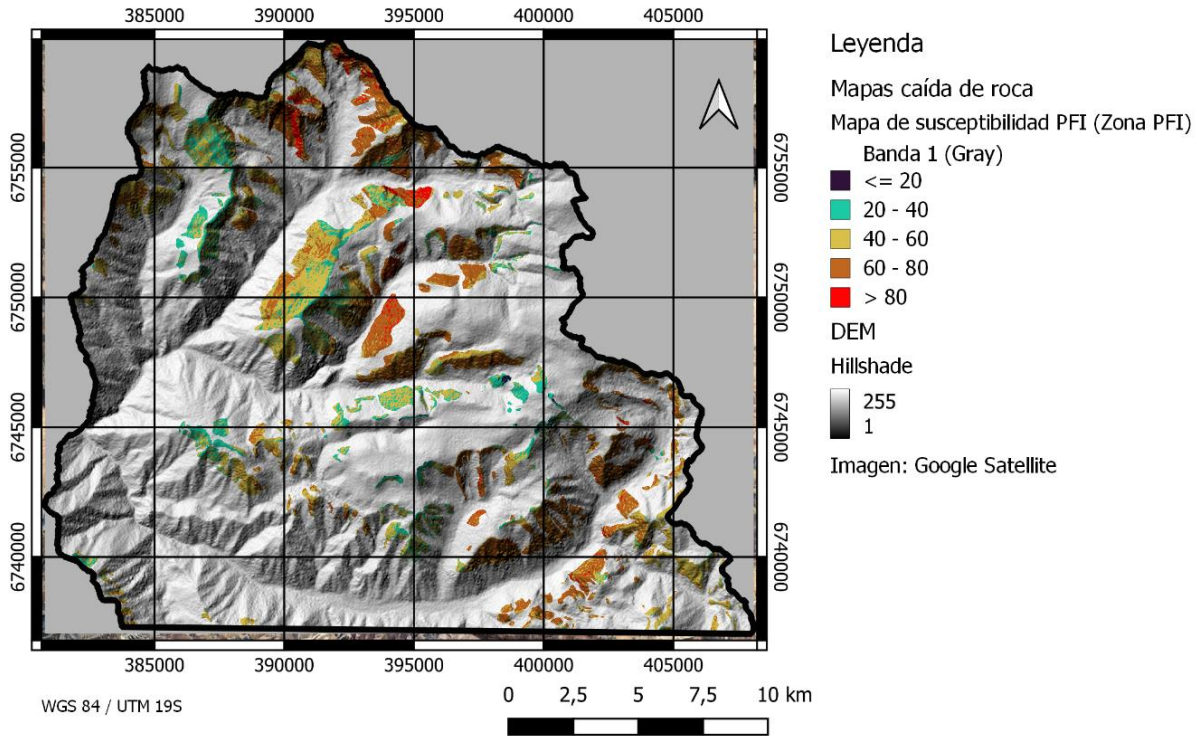


Figura 52: Mapa de susceptibilidad de rocas según escenario A. Limitado a zonas con datos de probabilidad de permafrost. Elaboración propia.

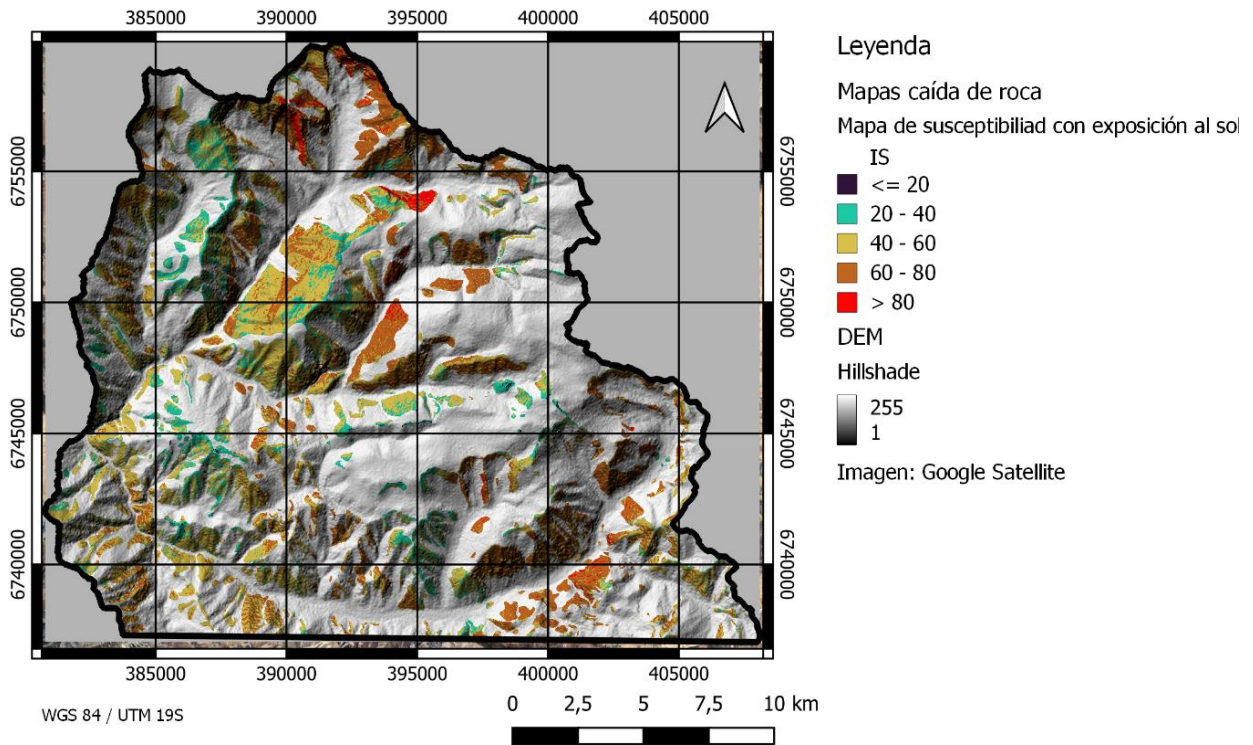


Figura 53: Mapa de susceptibilidad de caída de rocas en el escenario C (Con exposición al sol) en el área total. Elaboración propia.