



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

**EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DEL PELIGRO DE REMOCIONES EN
MASA EN RUTA G-25 CAMINO AL VOLCÁN, SAN JOSÉ DE MAIPO, REGIÓN
METROPOLITANA.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO
FRANCISCO JAVIER BÁEZ CARVAJAL**

PROFESORA GUÍA:
MARISOL LARA CASTILLO

PROFESOR CO-GUÍA:
ALEJANDRO ALFARO SOTO

COMISIÓN:
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Geólogo

POR: Francisco Javier Báez Carvajal

FECHA: 13/07/2020

PROFESORA GUÍA: Marisol Lara Castillo

EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DEL PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA EN RUTA G-25 CAMINO AL VOLCÁN, SAN JOSÉ DE MAIPO, REGIÓN METROPOLITANA

La ruta G-25 Camino al Volcán, se ubica en la comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana, Chile. Tiene una extensión aproximada de 75 kilómetros, pasando por el Valle del Río Maipo, el valle del Río El Volcán, y el valle del Estero Colina. Es una de las principales arterias de conectividad de la comuna, y una ruta muy transitada por turistas de todo el mundo.

La morfología del paisaje en donde está inmersa esta ruta ha sido dominada durante millones de años por procesos tanto endógenos como exógenos. Esta configuración en ambientes andinos hace que esta zona sea altamente susceptible a la generación de remociones en masa. Según los registros que se tienen en la comuna, existen numerosos puntos en donde han ocurrido remociones en masa, las cuales han generado un impacto en la población, como cortes de rutas, cortes del suministro de agua potable, y lo más lamentable, pérdida de vidas humanas.

En el presente estudio se evaluó y zonificó el peligro de remociones en masa, en particular, deslizamientos de suelo, caídas de rocas y flujos aluviales en la Ruta G-25. Se aplicó una metodología a escala local (1:10.000) basada principalmente en aproximaciones heurísticas, y luego se generaron los mapas de peligro respectivos para cada remoción en masa.

De manera complementaria, se desarrolló e implementó un sistema de puntuación al peligro de caídas de rocas a escala de detalle (1:1.000 o mayor). Con este se identificaron los taludes que requieren en el corto plazo, alguna medida que mitigue el riesgo para los automovilistas y peatones.

Entre los principales resultados obtenidos se destaca que la Ruta G-25 está expuesta principalmente a ser afectada por caída de rocas y flujos aluviales, sin embargo, los fenómenos que mayor recurrencia tienen en el sector son las caídas, que representan un peligro inminente para gran parte del trazado vial. Los flujos aluviales a pesar de ser menos recurrentes tienen un poder destructivo importante sobre el camino. Esto se evidenció con los últimos eventos ocurrido que ocasionaron graves cortes de ruta, como por ejemplo la destrucción del puente en el Estero San Alfonso el año 2017.

Las metodologías implementadas en la ruta permiten identificar los tramos críticos para de esta manera poder gestionar la implementación de medidas de mitigación o medidas no estructurales que adviertan sobre los peligros a los que está expuesta la ruta. Es por esto, que también se sugiere la instalación de señaléticas informativas y preventivas en distintos puntos a lo largo del trazado vial.

En memoria de Elsa Varas Rivera...

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quiero darle las gracias a mis padres, Jimena y Francisco... lo que soy y lo que llegaré a ser, se los debo a ustedes. Gracias por el amor, la confianza, las palabras de aliento en los momentos difíciles y el apoyo incondicional que siempre me brindaron. Gracias a todos los valores que me entregaron y que hoy en día me permiten ser la persona que soy. Gracias a mi hermano Alejandro, mi compañero de vida. Ten por seguro que nunca estarás solo y en mi encontraras el apañe, los concejos, el cariño y el amor que mereces.

También quiero agradecer a mi familia santiaguina... tío Edua, tía Carola y Jose. Estaré eternamente agradecido de ustedes, gracias por darme el espacio, por confiar en mí y por ser tal cuales son. Nunca olvidaré los momentos que pasamos juntos, las salidas improvisadas, los almuerzos de fin de semana, las tardes de profe con la Jose, entre muchos otros, que los atesoraré por siempre. Quiero que se sientan parte de este logro.

A mis profesores guías, Marisol y Alejandro. Gracias por la paciencia, la confianza, los concejos, el tiempo dedicado y la sabiduría entregada a lo largo de este proceso. Son grandes personas y los admiro a cada uno en lo profesional y en lo personal.

A mi compañera de alegrías y tristezas, mi confidente, mi apañe... Lisset gracias por estar presente en este camino. Tú sabes lo importante que es esto para mí. Estaré eternamente agradecido de tu compañía y del amor que me entregaste todo este tiempo.

Gracias a mis padrinos, tíos, tías, primos y primas y toda mi familia cercana que siempre confió en mí y que nunca me dejaron de apoyar, con una palabra o con un gesto pero que siempre estuvieron conmigo. También me gustaría que se sientan parte de este logro.

A mis amigos y amigas de Universidad, personas con las que compartí 6 años de mi vida y que me dieron muchos momentos que recordaré eternamente. Mención honrosa a los panah, Jorge, Nico, Caro, Chino, Choro. Gracias por apañar en tantas oportunidades y que ojalá el lazo formado en estos años sea eterno... también a los Sedex, las Gomez, los Jovuch y a todos los que hicieron que mi paso por la universidad haya sido tan grato.

Como no agradecer a mis amigos del colegio, Cristóbal, Juan, Yordan, Seba, Teté y a toda la generación 2013 del Colegio Santa Teresa de Jesús. En la misma línea quiero agradecer también a los profesores del colegio que fueron parte importante de mi proceso formativo, la base de mis conocimientos se las debo a ellos.

Quiero agradecer también a los profesionales que forman parte de la Unidad de Peligros Geológicos del Sernageomin en Santiago, Vale, Mónica, Leo, Manuel, Felipe, y todos los que me ayudaron a realizar este estudio. Gracias por su disposición a siempre colaborar y por la buena onda. También agradecer a Enrique, Antonio, Víctor, Rosita, Jovita, Mónica, Caro, y todos los que conforman la dirección regional de Magallanes. Mi paso por este lugar fue muy anecdótico, pero lo recordaré por siempre. Gracias por toda la buena onda y por lo grato que me hicieron sentir cuando estuve allí. Fue aquí en donde reafirmé mi fascinación por esta área de la geología.

En general, gracias a todas las personas que, en algún momento de mi vida, ayudaron en mi formación personal y profesional.

Este estudio fue realizado con el aporte y colaboración de la Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial del Servicio Nacional de Geología y Minería.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1 Formulación del estudio propuesto	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Metodología de trabajo	3
1.3.1 Primera Fase.....	3
1.3.2 Segunda Fase	7
2. Marco teórico	10
2.1 Remociones en Masa.	10
2.1.1 Caídas de rocas.....	10
2.1.2 Deslizamientos.....	11
2.1.3 Flujos	11
2.2 Evaluación y zonificación del peligro: Consideraciones conceptuales 15	
3. Marco Geológico	18
3.1 Unidades Morfoestructurales Regionales	18
3.2 Geología Regional	18
3.2.1 Rocas estratificadas	19
3.2.2 Rocas Intrusivas	22
3.2.3 Depósitos no consolidados	22
3.3 Geomorfología regional	23
4. Antecedentes y descripción del Área de estudio.	26
4.1 Kilometraje Ruta G-25	26
4.2 Geología local	26
4.2.1 Unidades Rocosas.....	30
4.2.2 Unidades No Consolidadas	35
4.3 Clasificación del Macizo Rocososo	40
4.4 Geomorfología local	45
4.5 Remociones en masa en ruta G-25.	50
4.5.1 Identificación y caracterización.....	50
4.5.2 Catastro.....	55
4.6 Clima	57
4.6.1 Fuente de la información.....	57

4.4.2	Caracterización climática	58
4.7	Sismicidad local	62
5.	Metodología para evaluar y zonificar el peligro de remociones en masa en Ruta G-25 a escala local.	64
5.1	Peligros de Deslizamientos de Suelo.	67
5.1.1	Identificación de Zonas de Generación.	67
5.1.2	Identificación de Zonas de Alcance.	69
5.2	Peligro de Caídas de Rocas.	72
5.2.1	Identificación de Zonas de Generación.	72
5.2.2	Identificación de Zonas de Alcance.	73
5.3	Peligro de Flujos Aluviales	75
5.3.1	Dinámica de Abanicos Aluviales y Conos Detríticos.	75
5.3.2	Identificación de Zonas de Alcance.	76
6.	Sistema de puntuación al peligro de caídas de rocas a escala en Ruta G-25.	79
6.1	Origen del <i>Rockfall Hazard Rating System</i>.	79
6.2	Modificaciones al <i>Rockfall Hazard Rating System</i>.	83
6.3	<i>Rockfall Hazard Rating System</i> propuesto para Ruta G-25.	87
6.3.1	Identificación de Taludes y Clasificación Preliminar.	89
6.3.2	Calificación Detallada.....	92
7.	Mapas de Peligro.	94
7.1	Peligro de Deslizamientos de Suelo en Ruta G-25	94
7.2	Peligro de Caídas de Rocas en Ruta G-25	101
7.3	Peligro de Flujos Aluviales en Ruta G-25	107
8.	Aplicación del <i>Rockfall Hazard Rating System</i> modificado en Ruta G-25.	115
9.	Discusiones	119
9.1	Sobre metodología a escala local 1:10.000	119
9.2	Sobre la Zonificación del Peligro de Remociones en Masa en la Ruta G-25.	120
9.3	Sobre el Catastro	122
9.4	Sobre Tramos Mitigados	125
9.5	Sobre RHRS Modificado	127
9.6	Sobre Ambas Metodologías	128
9.7	Sobre los Factores Desencadenantes	130
10.	Conclusiones	136
11.	Recomendaciones	139
12.	Bibliografía	142

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: MAPA COMUNAL DE LA REGIÓN METROPOLITANA. EN ROSADO SE DESTACA LA COMUNA DE SAN JOSÉ DE MAIPO Y EN LÍNEA ROJA LA RUTA EN ESTUDIO.....	2
FIGURA 2: DIAGRAMA DE FLUJO CON LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES METODOLÓGICAS A DESARROLLAR EN EL PRESENTE ESTUDIO. ELABORACIÓN PROPIA.....	5
FIGURA 3: DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SEGUNDA FASE METODOLÓGICA.....	8
FIGURA 4: ESQUEMA DE MODOS DE CAÍDAS DE ROCAS (PMA, 2008).....	11
FIGURA 5: A LA DERECHA UN ESQUEMA DE UN DESLIZAMIENTO TRASLACIONAL EN CUÑA. A LA IZQUIERDA UN ESQUEMA DE UN DESLIZAMIENTO ROTACIONAL MOSTRANDO LOS RASGOS MORFOLÓGICOS CARACTERÍSTICOS (PMA, 2008).....	11
FIGURA 6: ESQUEMA DE FLUJOS CANALIZADOS Y NO CANALIZADOS (PMA, 2008).....	12
FIGURA 7: CORTE ESQUEMÁTICO TÍPICO DE UN FLUJO DE DETRITOS. FRENTE CON BLOQUES DE UN PULSO DE FLUJO DE DETRITOS (PMA, 2008).....	12
FIGURA 8: AVALANCHA DE ROCAS DE LAS CUEVAS, MENDOZA, ARGENTINA (WILSON ET AL., 2008).	13
FIGURA 9: CLASIFICACIÓN DE ALUVIONES MEDIANTE CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA (C_v) Y GRANULOMETRÍA (MUÑOZ ET AL., 2018).	14
FIGURA 10: ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE CAÍDAS DE ROCAS POR AYALA ET AL. (2003). LAS ZONAS MÁS OSCURAS REPRESENTAN LOS SECTORES CON SUSCEPTIBILIDAD ALTA, EL GRIS OSCURO LA SUSCEPTIBILIDAD MEDIA Y EL GRIS CLARO LA SUSCEPTIBILIDAD BAJA.	16
FIGURA 11: SEGMENTACIÓN MORFOESTRUCTURAL EN CHILE CENTRAL (QUIROGA, 2013). DENTRO DEL CUADRO NEGRO, CON UN SEGMENTO ROJO, SE DESTACA LA RUTA G-25..	18
FIGURA 12: MAPA GEOLÓGICO REGIONAL ENTRE LOS 33°30' S Y LOS 34°00' S (FOCK, 2005). LEYENDA Y SIMBOLOGÍA EN PÁGINA SIGUIENTE.....	20
FIGURA 13: MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO MAIPO (ESPINOZA ET AL., 2019).....	25
FIGURA 14: AFLORAMIENTO ROCOSO DE LA FORMACIÓN RÍO COLINA EN EL KILÓMETRO 85 APROXIMADAMENTE.	30
FIGURA 15: CONGLOMERADOS ROJIZOS PERTENECIENTES AL MIEMBRO MCK DE LA FM. RÍO DAMAS. BLOQUE PERTENECIENTE A LA AVALANCHA DE ROCA EN EL CERRO CATEDRAL. FOTOGRAFÍA TOMADA POR GABRIELA TALA EN CURSO “GEOLOGÍA DE CAMPO I”, DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, UNIVERSIDAD DE CHILE.....	31
FIGURA 16: ESTRATIFICACIÓN VERTICAL PERTENECIENTE A LA FM. LO VALDÉS. FOTOGRAFÍA TOMADA POR GABRIELA TALA EN CURSO “GEOLOGÍA DE CAMPO I”, DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, UNIVERSIDAD DE CHILE.....	32
FIGURA 17: ESTRATOS PLEGADOS PERTENECIENTES A LA FM. COLIMAPU. FOTOGRAFÍA TOMADA POR GABRIELA TALA EN CURSO “GEOLOGÍA DE CAMPO I”, DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, UNIVERSIDAD DE CHILE.....	33
FIGURA 18: AFLORAMIENTO ROCOSO ESTRATIFICADO PERTENECIENTE A LA FM. FARELLONES EN LAS CERCANÍAS DE EL BOYENAR.	34
FIGURA 19: AFLORAMIENTO ROCOSO PERTENECIENTE EL PLUTÓN SAN GABRIEL, APROXIMADAMENTE EN EL KILÓMETRO 60.	35
FIGURA 20: DEPÓSITOS DE TALUD EN LA BASE DE UN AFLORAMIENTO ROCOSO PERTENECIENTE A LA FM. FARELLONES. SE PUEDE VER LA PREDOMINANCIA DE	

GRANULOMETRÍA GRUESA QUE PRESENTA EL DEPÓSITO. ESTE DEPÓSITO EN PARTICULAR SE ENCUENTRA APROXIMADAMENTE EN EL KILÓMETRO 54.	36
FIGURA 21: EN AMBAS IMÁGENES SE PUEDE OBSERVAR LOS DEPÓSITOS COLUVIALES DE LADERA CON ABUNDANTE MATRIZ, DESARROLLO DE SUELO Y BLOQUES ANGULOSOS A SUB-ANGULOSOS EN SU INTERIOR. LA FIGURA INFERIOR CORRESPONDE AL DEPÓSITO COLUVIAL DE LADERA QUE CUBRE LA LADERA ESTE DE SAN JOSÉ DE MAIPO, LA CUAL PRESENTA UN DESLIZAMIENTO ROTACIONAL ACTIVO.	37
FIGURA 22: CORTE TRANSVERSAL A DEPÓSITO TALUVIAL A LA ALTURA DEL KILÓMETRO 80 APROXIMADAMENTE.	38
FIGURA 23: DEPÓSITO FLUVIOGLACIAL ATERRAZADO EN EL POBLADO DE SAN GABRIEL.	39
FIGURA 24: AFLORAMIENTO ROCOSO PERTENECIENTE A LA FM. FARELLONES JUNTO A SU RESPECTIVA ESTIMACIÓN DE GSI.	41
FIGURA 25: AFLORAMIENTO ROCOSO PERTENECIENTE A LA FM. LO VALDÉS JUNTO A SU RESPECTIVA ESTIMACIÓN DE GSI.	42
FIGURA 26: AFLORAMIENTO ROCOSO PERTENECIENTE A LA FM. RÍO COLINA JUNTO A SU RESPECTIVA ESTIMACIÓN DE GSI.	42
FIGURA 27: AFLORAMIENTO ROCOSO PERTENECIENTE A LA FM. FARELLONES JUNTO A SU RESPECTIVA ESTIMACIÓN DE GSI.	43
FIGURA 28: MODELO DE NUEVE UNIDADES DE LADERA PROPUESTO POR DALRYMPLE (1968).	45
FIGURA 29: MODELO DE NUEVE UNIDADES CORRELACIONADAS AL PERFIL TOPOGRÁFICO ESQUEMÁTICO DE LA ZONA DE ESTUDIO.	46
FIGURA 30: PERFIL DE ELEVACIÓN DE RUTA G-25 JUNTO A LOS RESPECTIVOS DOMINIOS GEOMORFOLÓGICOS A LO LARGO DE ESTA. ELABORACIÓN PROPIA.	47
FIGURA 31: CONO DETRÍTICO. EN ROJO SE DESTACA UN LÓBULO FORMADO POR UN FLUJO DETRÍTICO QUE DESCIENDE LADERA ABAJO POR EL CANAL DESTACADO CON LA FLECHA AMARILLA. TAMBIÉN SE DESTACAN EN AZUL BLOQUES QUE HAN SIDO DESPRENDIDOS DESDE EL AFLORAMIENTO ROCOSO QUE SUBYACE AL DEPÓSITO, PERTENECIENTE A LA FM. RÍO DAMAS.	49
FIGURA 32: CONOS DETRÍTICOS EN SAN GABRIEL.	50
FIGURA 33: DEPÓSITO DE DESLIZAMIENTO ROTACIONAL, UBICADO AL NORTE DE SAN JOSÉ DE MAIPO, KILÓMETRO 33 APROXIMADAMENTE. (COORE:374686; COORN:6278517; WGS 84 ZONA 19S)	51
FIGURA 34: PLANOS DE DESLIZAMIENTO EN CERRO CATEDRAL, JUNTO AL CONSECUENTE DEPÓSITO GENERADO POR ESTE. DEPÓSITO UBICADO EN EL KILÓMETRO 80 APROXIMADAMENTE. FOTOGRAFÍA ORIGINAL TOMADA POR GABRIELA TALA EN CURSO “GEOLOGÍA DE CAMPO I”, DEPTO. DE GEOLOGÍA, UNIVERSIDAD DE CHILE. (COORE:405783; COORN:6257460; WGS 84 ZONA 19S)	52
FIGURA 35: ESCARPE OBSERVADO EN DEPÓSITOS TALUVIALES EN EL KILÓMETRO 79 APROXIMADAMENTE. SE OBSERVA QUE ACTUALMENTE SE ENCUENTRA ACTIVO (COORE:404384; COORN:6256772; WGS 84 ZONA 19S)	52
FIGURA 36: ACUMULACIÓN DE BLOQUES A ORILLAS DEL CAMINO EN EL KILÓMETRO 49 APROXIMADAMENTE (COORE:380816; COORN:6265384; WGS 84 ZONA 19S).	53
FIGURA 37: BLOQUES MÉTRICOS A ORILLAS DE LA RUTA, EN EL KILÓMETRO 78 APROXIMADAMENTE. MISMA LITOLOGÍA QUE PARED ROCOSA A AL SUR DEL CAMINO. (COORE:403467; COORN:6256403; WGS 84 ZONA 19S)	54
FIGURA 38: DEPÓSITO DE FLUJO DETRÍTICO REACTIVADO EL AÑO 2017, VALLE DEL RÍO VOLCÁN (COORE:404229; COORN:6257037; WGS 84 ZONA 19S)	54

FIGURA 39: A LA IZQUIERDA CAUCE ACTIVO EN LAS AMARILLAS. A LA DERECHA DEPÓSITOS DETRÍTICOS RE-MOVILIZADOS POR ACTIVIDAD RECIENTE (COORE: 400615; COORN: 6256301; WGS 84 ZONA 19S).	55
FIGURA 40: MAPA CON LA REPRESENTACIÓN VISUAL DE LA UBICACIÓN ESPACIAL DE LOS DISTINTOS FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA IDENTIFICADOS EN LA RUTA G-25. ELABORACIÓN PROPIA.	56
FIGURA 41: ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSULTADAS EN EL PRESENTE TRABAJO. ELABORACIÓN PROPIA.	57
FIGURA 42: PRECIPITACIÓN ACUMULADA MENSUAL EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA LA OBRA (796 M.S.N.M.) DESDE EL AÑO 2011 HASTA EL AÑO 2019. ELABORACIÓN PROPIA.	59
FIGURA 43: TEMPERATURAS DIARIAS EXTREMAS (MÍNIMAS Y MÁXIMAS) MEDIDAS EN LAS ESTACIONES GUAYACÁN (900 M.S.N.M.) Y EMBALSE EL YESO (2.478 M.S.N.M.) PARA LOS AÑOS 2018 Y 2015, RESPECTIVAMENTE. ELABORACIÓN PROPIA.	61
FIGURA 44: EPICENTROS DE SISMOS SUPERFICIALES (<20 KM DE PROFUNDIDAD) EN CHILE CENTRAL DURANTE 1986 – 2001. DESDE LA A A LA G SE INDICAN LAS DISTINTAS FUENTES SÍSMICAS. EN ROJO SE DESTACA LA RUTA EN ESTUDIO (MODIFICADO DE BARRIENTOS ET AL., 2004).....	63
FIGURA 45: ESQUEMA QUE RESUME LOS PRINCIPALES PASOS PARA IMPLEMENTAR LA METODOLOGÍA PROPUESTA. ELABORACIÓN PROPIA.	66
FIGURA 46: FRECUENCIA DE DESLIZAMIENTOS VERSUS PENDIENTE DEL TERRENO (ESAKI ET AL., 2005).	67
FIGURA 47: ZONAS EXPUESTAS A SER AFECTADAS POR DESLIZAMIENTOS DE SUELO EN BASE A LAS UNIDADES MORFOLÓGICAS DE LADERA. ELABORACIÓN PROPIA.	70
FIGURA 48: ZONAS EXPUESTAS A SER AFECTADAS POR CAÍDAS DE ROCAS EN BASE A LAS UNIDADES MORFOLÓGICAS DE LADERA. ELABORACIÓN PROPIA.....	73
FIGURA 49: PARTES DE UN FLUJO CANALIZADO SEGÚN NHUCHHEN (2017)	75
FIGURA 50: MODELO CONCEPTUAL PROPUESTO POR HARVEY (2012) PARA LA EVOLUCIÓN DE ABANICOS/CONOS EN FUNCIÓN DEL APORTE SEDIMENTARIO Y EL PODER DEL FLUJO. ..	76
FIGURA 51: A) ZONAS IDENTIFICADAS EN UN ABANICO ALUVIAL. B) ALTIMETRÍA RELATIVA DE LAS DISTINTAS ZONAS EXPUESTAS EN A). MODIFICADO DE BENITO (2013).	77
FIGURA 52: TALUDES DE DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS UBICADOS A LO LARGO DE LA RUTA G-25.....	79
FIGURA 53: RELACIÓN ENTRE LA ALTURA DE TALUD Y EL PUNTAJE ASIGNADO A ESTE PARÁMETRO. PIERSON ET AL. (1990).....	83
FIGURA 54: TALUD FORTIFICADO COMPLETAMENTE, EN EL KILÓMETRO 75 APROXIMADAMENTE.	90
FIGURA 55: TALUD FORTIFICADO PARCIALMENTE. TODO EL TRAMO SUPERIOR QUEDA EXPUESTO.	90
FIGURA 56: CONO DETRÍTICO PROGRADANTE EN EL VALLE DEL RÍO VOLCÁN.	107
FIGURA 57: ABANICO DEPOSICIONAL EN EL VALLE DEL RÍO VOLCÁN.	108
FIGURA 58: ABANICO PROGRADANTE DISECTADO EN EL VALLE DEL ESTERO COLINA.	109
FIGURA 59: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS TALUDES EVALUADOS MEDIANTE EL RHRS. EN VERDE SE DESTACAN LOS TALUDES DE DEPÓSITOS CLÁSTICOS Y EN AMARILLO LOS TALUDES CRISTALINOS. ELABORACIÓN PROPIA.	115
FIGURA 60: TALUD 10	117
FIGURA 61: TALUD 7	118
FIGURA 62: TALUD 12	118

FIGURA 63: PORCENTAJE ZONIFICADO EN LA RUTA G-25 PARA CAÍDAS DE ROCAS. ELABORACIÓN PROPIA	121
FIGURA 64: PORCENTAJE ZONIFICADO EN LA RUTA G-25 PARA DESLIZAMIENTOS DE SUELO. ELABORACIÓN PROPIA.	121
FIGURA 65: PORCENTAJE ZONIFICADO EN LA RUTA G-25 PARA FLUJOS ALUVIONALES. ELABORACIÓN PROPIA.	122
FIGURA 66: BLOQUES IDENTIFICADOS EN RUTA G-25. A) NUMEROSOS BLOQUES QUE REPOSAN EN BERMA CONTRARIA AL TALUD QUE SE IDENTIFICA COMO LA FUENTE, KILÓMETRO 52 APROXIMADAMENTE, B) BLOQUES EN BERMA A ORILLAS DEL CAMINO, KILÓMETRO 57 APROXIMADAMENTE, C) BLOQUE DE GRAN TAMAÑO EN BERMA CONTRARIA AL TALUD CLÁSTICO, KILÓMETRO 58 APROXIMADAMENTE.	123
FIGURA 67: A) ESCARPES Y ALTO DESARROLLO ANTRÓPICO EN LADERA ORIENTAL DEL VALLE DEL ESTERO COLINA. B) ESTRATIFICACIÓN EN DEPÓSITO CUATERNARIO A LA ALTURA DEL KILÓMETRO 51 APROXIMADAMENTE. C) EVIDENCIA DE MOVIMIENTO DE LADERA EN EL KILÓMETRO 40 APROXIMADAMENTE.	124
FIGURA 68: MEDIDAS PARA MITIGAR EL PELIGRO DE CAÍDAS DE ROCAS EN LA RUTA G-25. A) HORMIGÓN PROYECTADO O SHOTCRETE, B) MALLA ESTABILIZADORA Y C) BARRERAS.	125
FIGURA 69: TRAMOS CON OBRAS DE MITIGACIÓN ACTIVAS. A) SHOTCRETE EN TALUD ROCOSO PERTENECIENTE EL PLUTÓN LA OBRA. B) MALLA ESTABILIZADORA EN TALUD ROCOSO PERTENECIENTE A LA FM. FARELLONES. C) MALLA ESTABILIZADORA EN TALUD ROCOSO PERTENECIENTE A LA FM. FARELLONES. D) MALLA ESTABILIZADORA Y BARRERAS EN TALUD ROCOSO PERTENECIENTE A LA FM. FARELLONES. E) MALLA ESTABILIZADORA EN TALUD DE DEPÓSITOS FLUVIOGLACIALES. F) MALLA ESTABILIZADORA EN TALUD DE DEPÓSITOS DE REMOCIÓN EN MASA.	126
FIGURA 70: TRAMO ANTES DE LLEGAR AL PUENTE EL YESO. A) TRAMO MITIGADO CON MALLA. B) TRAMO SIN MEDIDA DE MITIGACIÓN, CONTIGUO AL TRAMO EXPUESTO EN A.	127
FIGURA 71: TALUD 7 CALIFICADO MEDIANTE RHRS.	129
FIGURA 72: TALUD 22 CALIFICADO MEDIANTE EL RHRS.	129
FIGURA 73: CAÍDA DE ROCAS EN SECTOR TÚNEL EL TINOCO. FUENTE: MUNICIPALIDAD DE SAN JOSÉ DE MAIPO (2015).....	131
FIGURA 74: CAÍDAS DE ROCAS REGISTRADAS (A) EL DÍA 12 DE JUNIO EN EL SECTOR DE LOS ALMENDROS Y (B) EL 29 DE JUNIO EN EL PUENTE EL YESO. FUENTE: @MOP_RM, TWITTER OFICIAL DE LA SECRETARÍA REGIONAL MINISTERIAL DE OBRAS PÚBLICAS.	132
FIGURA 75: SISMOS CON EPICENTRO EN LA COMUNA DE SAN JOSÉ DE MAIPO DESDE EL 2015. SE CONSIDERAN AQUELLOS QUE TENGAN UNA MAGNITUD SOBE LOS 2,5 MW. FUENTE DE LA INFORMACIÓN CENTRO SISMOLÓGICO DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE. ELABORACIÓN PROPIA.....	134
FIGURA 76: A LA IZQUIERDA SEÑALÉTICA PARA CAÍDAS DE ROCAS QUE ACTUALMENTE ESTÁ EN RUTA G-25. A LA DERECHA, SEÑALÉTICA PROPUESTA PARA FLUJOS ALUVIALES. ELABORACIÓN PROPIA	139
FIGURA 77: SEÑALÉTICA PREVENTIVA PARA FLUJOS ALUVIALES. ELABORACIÓN PROPIA ...	140
FIGURA 78: SEÑALÉTICA INFORMATIVA/PREVENTIVA PROPUESTA PARA EL INICIO DE RUTA G- 25, EN SAN JOSÉ DE MAIPO. ELABORACIÓN PROPIA.	141

Índice de Mapas.

MAPA 1: MAPA GEOLÓGICO/GEOMORFOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO, ASOCIADO A LA RUTA G-25. TRAMO 1 DESDE LA OBRA HASTA SAN JOSÉ DE MAIPO. ELABORACIÓN PROPIA.	27
MAPA 2: MAPA GEOLÓGICO/GEOMORFOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO, ASOCIADO A LA RUTA G-25. TRAMO 2 DESDE SAN JOSÉ DE MAIPO HASTA EL VOLCÁN. ELABORACIÓN PROPIA	28
MAPA 3: MAPA GEOLÓGICO/GEOMORFOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO, ASOCIADO A LA RUTA G-25. TRAMO 3 DESDE EL VOLCÁN HASTA BAÑOS COLINA. ELABORACIÓN PROPIA.....	29
MAPA 4: MAPA DE PELIGROSIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE SUELO EN RUTA G-25. TRAMO 1. ELABORACIÓN PROPIA.	96
MAPA 5: MAPA DE PELIGROSIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE SUELO EN RUTA G-25. TRAMO 2. ELABORACIÓN PROPIA.	97
MAPA 6: MAPA DE PELIGROSIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE SUELO EN RUTA G-25. TRAMO 3. ELABORACIÓN PROPIA.	98
MAPA 7: MAPA DE PELIGROSIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE SUELO EN RUTA G-25. TRAMO 4. ELABORACIÓN PROPIA.	99
MAPA 8: MAPA DE PELIGROSIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE SUELO EN RUTA G-25. TRAMO 5. ELABORACIÓN PROPIA.	100
MAPA 9: MAPA DE PELIGROSIDAD DE CAÍDAS DE ROCAS EN RUTA G-25. TRAMO 1. ELABORACIÓN PROPIA.....	102
MAPA 10: MAPA DE PELIGROSIDAD DE CAÍDAS DE ROCAS EN RUTA G-25. TRAMO 2- ELABORACIÓN PROPIA.....	103
MAPA 11: MAPA DE PELIGROSIDAD DE CAÍDAS DE ROCAS EN RUTA G-25. TRAMO 3. ELABORACIÓN PROPIA.....	104
MAPA 12: MAPA DE PELIGROSIDAD DE CAÍDAS DE ROCAS EN RUTA G-25. TRAMO 4. ELABORACIÓN PROPIA.....	105
MAPA 13: MAPA DE PELIGROSIDAD DE CAÍDAS DE ROCAS EN RUTA G-25. TRAMO 5. ELABORACIÓN PROPIA.....	106
MAPA 14: MAPA DE PELIGROSIDAD DE FLUJOS ALUVIONALES EN RUTA G-25. TRAMO 1. ELABORACIÓN PROPIA.	110
MAPA 15: MAPA DE PELIGROSIDAD DE FLUJOS ALUVIONALES EN RUTA G-25. TRAMO 2. ELABORACIÓN PROPIA.	111
MAPA 16: MAPA DE PELIGROSIDAD DE FLUJOS ALUVIONALES EN RUTA G-25. TRAMO 3. ELABORACIÓN PROPIA.	112
MAPA 17: MAPA DE PELIGROSIDAD DE FLUJOS ALUVIONALES EN RUTA G-25. TRAMO 4. ELABORACIÓN PROPIA.	113
MAPA 18: MAPA DE PELIGROSIDAD DE FLUJOS ALUVIONALES EN RUTA G-25. TRAMO 5. ELABORACIÓN PROPIA.	114

Índice de Tablas.

TABLA 1: CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE REMOCIONES EN MASA (MODIFICADO DE VARNES, 1978)	10
TABLA 2: DESCARGA MÁXIMA CON RESPECTO A UNA INUNDACIÓN (Q_{PF}) Y CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA TÍPICA (C_v) PARA LOS DISTINTOS TIPOS DE FLUJOS, DESTACANDO EL CASO DE LOS ALUVIONES (MUÑOZ ET AL., 2018).	15
TABLA 3: TABLA RESUMEN DE TODOS LOS PUNTOS A LO LARGO DE LA RUTA EN DONDE SE ESTIMA EL GSI. ELABORACIÓN PROPIA.	44
TABLA 4: UNIDADES MORFOLÓGICAS DE LADERA. ELABORACIÓN PROPIA.	46
TABLA 5: MORFOLOGÍAS IDENTIFICADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO JUNTO A SU DESCRIPCIÓN Y MORFOGÉNESIS. ELABORACIÓN PROPIA.	48
TABLA 6: MODELO PARA ABANICOS Y CONOS PROPUESTO POR BRAZIER (1988).	49
TABLA 7: DETALLE DE LA INFORMACIÓN EXTRAÍDA DE CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA. ELABORACIÓN PROPIA.	58
TABLA 8: PRECIPITACIÓN ACUMULADA ANUAL (MM) DESDE EL AÑO 2011 AL AÑO 2019.	59
TABLA 9: ESTABILIDAD DE UNIDADES GEOLÓGICAS EN FUNCIÓN DE LA PENDIENTE DEL TERRENO Y DE LA SUSCEPTIBILIDAD/ACTIVIDAD DE LA UNIDAD, EN CONDICIONES ESTÁTICAS. ELABORACIÓN PROPIA.	69
TABLA 10: GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD SEGÚN PENDIENTE DEL TERRENO Y SUSCEPTIBILIDAD/ACTIVIDAD DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS DE SUELO. ELABORACIÓN PROPIA.	69
TABLA 11: DESCRIPCIÓN DE LOS DISTINTOS GRADOS DE PELIGRO PARA DESLIZAMIENTOS DE SUELO. (A) CORRESPONDE A LAS ZONAS DE GENERACIÓN Y (B) A LAS ZONAS EXPUESTAS O DE ALCANCE. ELABORACIÓN PROPIA.	71
TABLA 12: SUSCEPTIBILIDAD DE GENERACIÓN DE CAÍDAS DE ROCAS. ELABORACIÓN PROPIA.	72
TABLA 13: DESCRIPCIÓN DE LOS DISTINTOS GRADOS DE PELIGRO PARA CAÍDAS DE ROCAS. (A) CORRESPONDE A LAS ZONAS DE GENERACIÓN Y (B) A LAS ZONAS EXPUESTAS O DE ALCANCE. ELABORACIÓN PROPIA.	74
TABLA 14: DESCRIPCIÓN DE LOS DISTINTOS GRADOS DE PELIGRO PARA FLUJOS ALUVIALES. (B) CORRESPONDE A LAS ZONAS EXPUESTAS O DE ALCANCE. ELABORACIÓN PROPIA.	78
TABLA 15: TABLA RESUMEN DEL RHRS DE PIERSON ET AL., (1990). NÓTESE QUE LAS UNIDADES ESTÁN BAJO EL SISTEMA ESTADOUNIDENSE EN DONDE “FT” = PIES Y “CY” = YARDAS CUBICAS.	81
TABLA 16: FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE PUNTAJES EN EL RHRS PROPUESTO POR PIERSON ET AL., (1990).	82
TABLA 17: TABLA RESUMEN DEL RHRS DE COLORADO (RUSSELL ET AL., 2008)	86
TABLA 18: CRITERIOS Y CLASES DE CLASIFICACIÓN PRELIMINAR (PIERSON ET AL., 1990).	91
TABLA 19: RHRS MODIFICADO PROPUESTO PARA LA RUTA G-25. ELABORACIÓN PROPIA.	93
TABLA 20: SIMBOLOGÍA DE LOS DIFERENTES GRADOS DE PELIGRO EN RUTA G-25. ELABORACIÓN PROPIA.	94
TABLA 21: CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS IDENTIFICADAS EN LA ZONA EN BASE A LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS PREVIAMENTE. ELABORACIÓN PROPIA.	95
TABLA 22: GRADOS DE PELIGRO (GENERACIÓN) DE DESLIZAMIENTOS DE SUELO PARA LAS DISTINTAS UNIDADES GEOLÓGICAS RECONOCIDAS EN LA ZONA DE ESTUDIO. ELABORACIÓN PROPIA.	95
TABLA 23: TABLA RESUMEN CON LA UBICACIÓN ESPACIAL DE LOS TALUDES, EL TIPO Y EL PUNTAJE DE PELIGRO TOTAL ASIGNADO A CADA UNO. ELABORACIÓN PROPIA (DATUM WGS 84 ZONA 19S).	116

TABLA 24: JUSTIFICACIÓN DE LOS DISTINTOS PONDERADORES USADOS PARA TALUDES CON DEPÓSITOS CLÁSTICOS. ELABORACIÓN PROPIA.	128
TABLA 25: TIPO DE REMOCIONES EN MASAS GENERADAS POR SISMOS.	133

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del estudio propuesto

A lo largo de la historia de Chile, los desastres originados por fenómenos de remoción en masa han provocado numerosas pérdidas de vidas humanas (Marín *et al.* 2018), infraestructura, cortes de rutas y un notable deterioro en la calidad de vida de la población involucrada (Muñoz *et al.* 2018). Aluviones en distintas zonas del país, caídas de rocas en rutas montañosas, deslizamientos cercanos a poblados, son solo algunos ejemplos de cómo estos eventos pueden ser una gran amenaza para la vida humana y para la infraestructura circundante.

La comuna de San José de Maipo se encuentra inmersa en la parte alta de la cuenca del Río Maipo a solo 48 km al oriente de Santiago. Se trata de un lugar muy visitado durante todo el año debido a sus atractivos naturales, siendo declarada Zona de Interés Turístico en el año 2001 (Información Turística de San José de Maipo, *s.f.*). Lo anterior, hace que esta zona en particular sea muy transitada, sobre todo en temporadas estivales.

La morfología del paisaje ha sido dominada durante millones de años por procesos tectónicos, fluviales, aluviales, modelado glacial, actividad volcánica y remociones en masa. Todo esto ha configurado el paisaje de tal manera que lo hace altamente susceptible a la generación de remociones en masa, debido a su marcado relieve, laderas de alta pendiente, macizos rocosos muy desgastados, cuencas con una importante carga de sedimentos, entre otros. A la configuración antes descrita, se le agrega la ocurrencia de tormentas que generan precipitaciones de altas intensidades como las ocurridas los años 2013 y 2017 (Muñoz, 2018).

Según los registros que se tienen en esta comuna, existen numerosos puntos en donde han ocurrido remociones en masa que han generado un gran impacto en la población, como cortes de rutas viales, cortes del suministro de agua potable y lo más lamentable, la pérdida de vidas humanas. Relacionado al turismo, y a las altas demandas de visitantes que experimenta esta zona, se destaca el más reciente e impactante evento, que resultó con la muerte de dos turistas brasileñas de tres y siete años producto de la caída de bloques en el sector del Embalse El Yeso (Biobiochile, 2019).

Las rutas viales son el principal medio de conectividad de los habitantes de la comuna, como también de los turistas que suelen visitarla. A lo largo de la historia reciente, estas se han visto altamente afectadas debido a la ocurrencia de estos fenómenos. Solo para la Ruta G-25, la Dirección de Vialidad identificó cerca de 86 eventos de remoción en masa entre los años 1953 y 2015 (Muñoz, 2016). Es por esta razón que resulta fundamental detectar los tramos que han sido afectados por estos procesos y evaluar el peligro al que están expuestas.

El presente estudio se enfoca en evaluar el peligro de tres fenómenos en particular: flujos aluviales, deslizamientos de suelo y caídas de rocas, procesos que debido a su recurrencia, intensidad y magnitud han ocasionado severos daños en la ruta. Para ello, se trabaja a una escala local (1:10.000) tal que todos estos procesos sean identificables y zonificables. Además, se propone el uso de una segunda metodología suplementaria, a escala de detalle (1:1000 o mayor), diseñada para caídas de rocas. Esto se hace mediante un sistema de puntuación, que califica características que inciden directa o indirectamente en el peligro de caídas de rocas en los taludes adyacentes a la ruta.

El enfoque de este estudio es elaborar instrumentos de ordenamiento territorial que sean útiles para la toma de decisiones en etapas de gestión de riesgos, de esta manera reducir los daños tanto materiales como humanos que estos eventos puedan causar.

La zona de estudio se encuentra en la comuna de San José de Maipo y se enfoca principalmente en la Ruta G-25, principal vía de conectividad del sector (Figura 1). Esta tiene una extensión aproximada de 75 kilómetros dentro de la comuna, desde Las Vizcachas hasta Baños Colina.

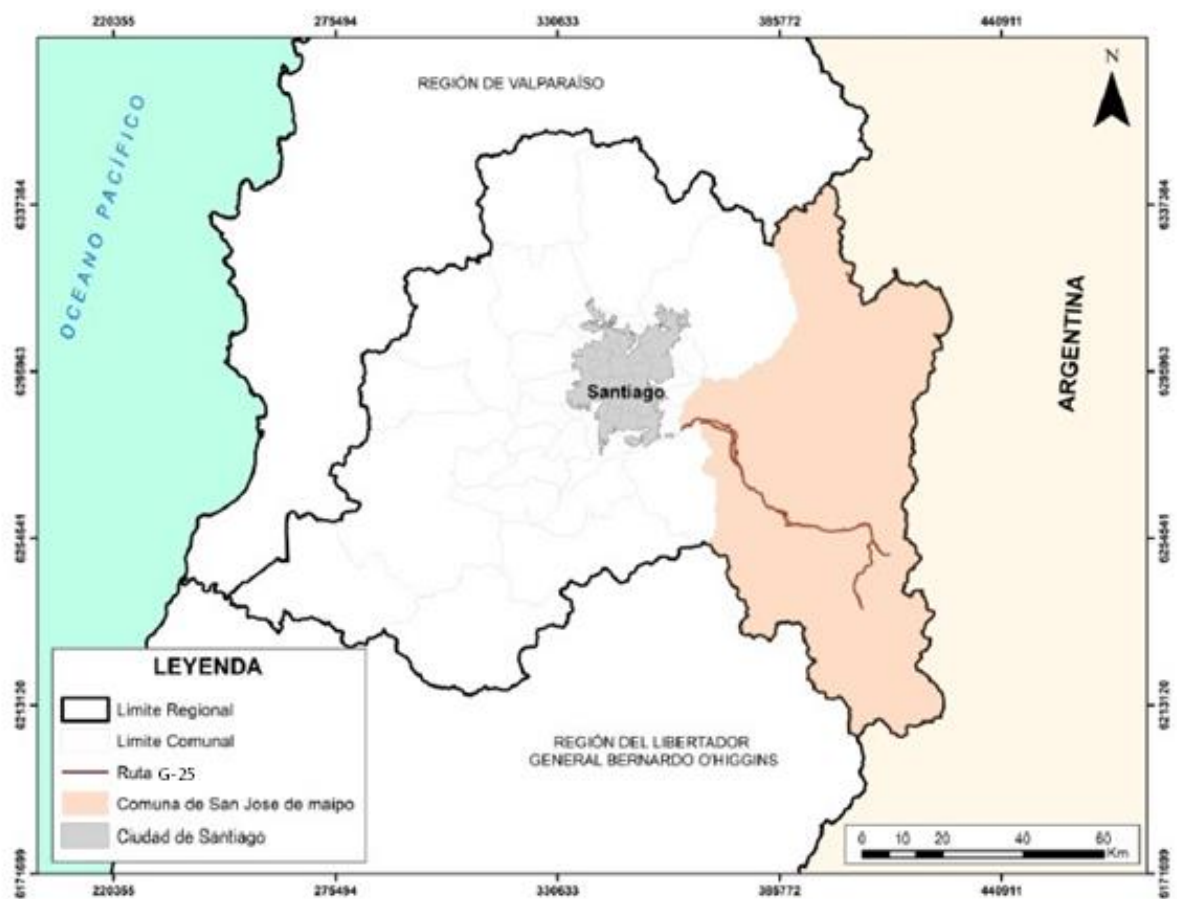


Figura 1: Mapa comunal de la Región Metropolitana. En Rosado se destaca la comuna de San José de Maipo y en línea roja la ruta en estudio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Evaluar y zonificar el peligro de remociones en masa en la Ruta G-25, San José de Maipo, Región Metropolitana.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar y caracterizar los procesos de remociones en masa presentes a lo largo de la Ruta G-25 en San José de Maipo.
- Caracterizar y cartografiar la geología/geomorfología de la zona de estudio a escala 1:10.000.

- Estudiar los factores condicionantes y desencadenantes de los deslizamientos de suelo, caídas de rocas y flujos aluviales en la zona de estudio.
- Evaluar el peligro de remociones en masa a escala 1:10.000 en la ruta G-25 y elaborar la cartografía temática respectiva.
- Implementar un sistema de puntuación al peligro de caídas de rocas a escala de detalle (1:1000 o mayor).

1.3 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo se puede separar en dos fases:

- **Primera Fase:** Zonificación del peligro de remociones en masa en la Ruta G-25.
- **Segunda Fase:** Evaluación del peligro de caídas de rocas en taludes adyacentes a la Ruta G-25 mediante un sistema de puntuación.

1.3.1 Primera Fase

Esta fase consiste básicamente en la propuesta metodológica para la evaluación y zonificación del peligro de remociones en masa y posterior generación de mapas de peligro a escala local (1:10.000) en la ruta G-25, San José de Maipo.

Las principales tareas que se llevan a cabo en esta fase son:

- Definición del estudio.
- Recopilación y revisión de antecedentes.
- Elaboración de catastro de remociones en masa.
- Elaboración de base cartográfica.
- Estudio de factores desencadenantes.
- Trabajo de campo.
- Evaluación del peligro de remociones en masa a lo largo del trazado de la ruta G-25.
- Elaboración de mapas de peligro de remociones en masa en la ruta a escala 1:10.000.

En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo (o flujo de trabajo) con las principales actividades realizadas durante el desarrollo del estudio. A partir de lo expuesto, a continuación, se detalla cada una de las tareas mencionadas.

Definición del estudio.

En esta etapa se define el área de estudio junto a la escala de trabajo.

La ruta en estudio se puede ver afectada por procesos de remoción en masa ya sea, por su cercanía a laderas con una orientación a favor del trazado vial, o bien cuando existen cuencas o subcuencas con su exutorio cercano al camino. Para definir el área a evaluar es muy importante reconocer el Área de Influencia alrededor de la ruta, en donde pueden ocurrir fenómenos de remoción en masa que eventualmente afecten al camino. Para definir esta área se utilizan los siguientes criterios:

- Todas aquellas laderas que tengan una orientación a favor del trazado vial. En estas zonas eventualmente podrían generarse deslizamientos de suelo y/o caídas de rocas, que podrían afectar el camino.
- Todas aquellas cuencas o subcuencas con su exutorio cercano a la ruta. Estas zonas son definidas para evaluar la ocurrencia de flujos que podrían transportarse y

depositar su carga sedimentaria en el camino. Sin embargo, en ocasiones, estas cuencas tienen una gran extensión superficial. Para este caso, se decide cortar por sus hoyas hidrológicas secundarias, o bien delimitarla en base al tercer criterio.

- Zona de influencia o *buffer* de 500 metros alrededor de la ruta. Esta zona está pensada para aquellos sectores que están alejados de laderas o en zonas llanas (como por ejemplo cuando el trazado de la ruta está emplazado en depósitos aterrazados).

El límite topográficamente inferior de esta Área de Influencia corresponde al cauce principal del valle en donde se encuentra ubicada la ruta. En la zona de estudio corresponde principalmente al Río Maipo y el Río Volcán. Dicho esto, el Área de Estudio corresponde al Área de influencia alrededor de la Ruta G-25.

La escala de trabajo utilizada en este estudio es de 1:10.000.

Primera sub-fase



Segunda sub-fase

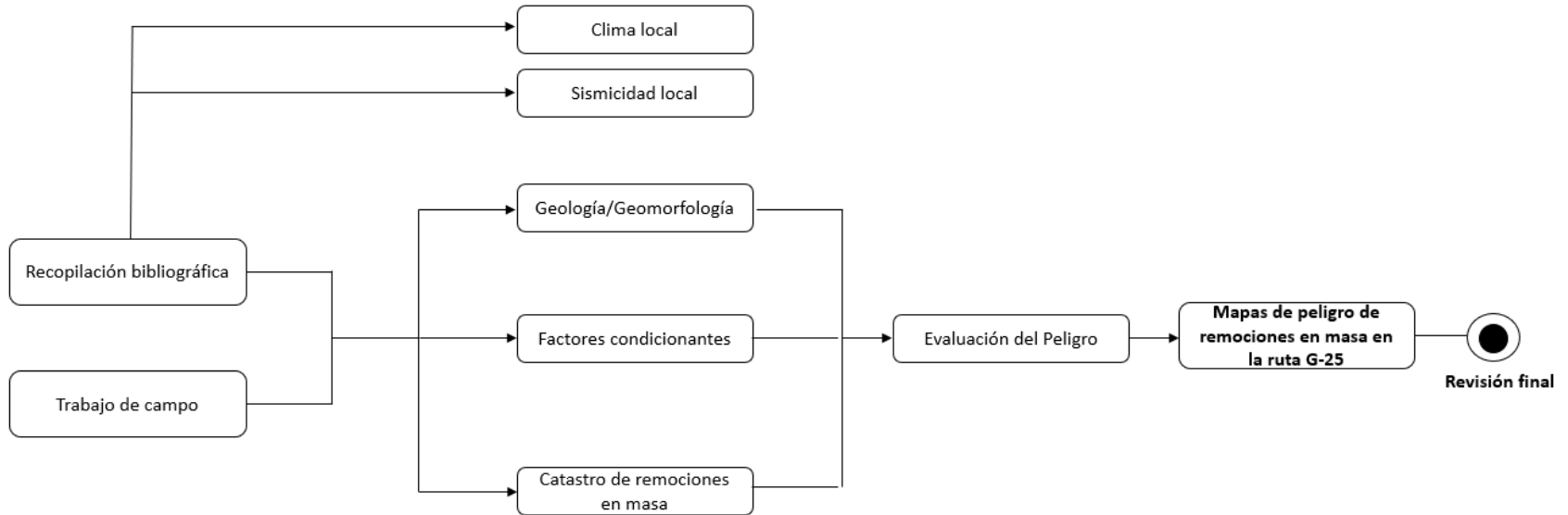


Figura 2: Diagrama de flujo con las principales actividades metodológicas a desarrollar en el presente estudio. Elaboración propia.

Recopilación bibliográfica.

Esta etapa consiste en la recopilación de los antecedentes disponibles de la zona de estudio y se realiza utilizando las siguientes fuentes de información:

- Antecedentes internos del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN) y otras entidades públicas (Ministerio de Obras Públicas, Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior, entre otras).
- Publicaciones científicas, memorias de título y tesis de acceso público.

Lo que se busca en esta etapa es recopilar la mayor cantidad de información, teniendo como mínima exigencia lo siguiente:

- Cartografía geológica de la zona de estudio a distintas escalas.
- Fotografías aéreas o imágenes satelitales.
- Modelos de elevación.
- Eventos de remociones en masa declarados en el área de estudio.

En el presente estudio se cuenta con imágenes satelitales y modelos de elevación entregados por la Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial del SERNAGEOMIN.

Elaboración de catastro de remociones en masa.

En esta etapa se caracterizan e identifican espacialmente los procesos de remoción en masa que afectan a la ruta en estudio. Esto culmina con la elaboración de un catastro de remociones en masa a lo largo del trazado. Este último se realiza en base a la recopilación de antecedentes, fotointerpretación de imágenes satelitales y observación directa en terreno.

Elaboración de Base cartográfica.

En esta etapa se elabora la base cartográfica para la evaluación del peligro. Esta consiste en el mapeo geológico/geomorfológico a escala local (1:10.000), el cual incluye también estimaciones del *Geological Strength Index* (GSI) en los macizos rocosos cercanos a la ruta. La base cartográfica se realiza a partir de trabajos previos en la zona de estudio, fotointerpretación de imágenes satelitales y trabajo de campo. Esta abarca en su totalidad toda el área de estudio definida previamente.

Los diferentes elementos geológicos/geomorfológicos reconocidos en la zona son:

- Depósitos cuaternarios (aluviales, coluviales, glaciales, volcánicos y de remociones en masa).
- Elementos geomorfológicos tales como abanicos aluviales, conos detríticos, terrazas, levees, escarpes, canales, entre otros.
- Unidades rocosas.

Estudio de factores desencadenantes

Se caracteriza de manera general el clima y la sismicidad local a partir de una recopilación bibliográfica previa.

Dentro de la caracterización climática se revisa la información pluviométrica disponible en las estaciones meteorológicas presentes a lo largo de la ruta. En base a esta información se obtienen las precipitaciones acumuladas anuales para cada estación, junto a los ciclos anuales de temperatura.

Trabajo de campo.

Estas visitas al área tienen como objetivo principal la validación de toda la información recopilada y generada. No obstante, a pesar de tener un carácter verificativo, de igual manera se realizan toma de datos que puedan ser útiles para la evaluación del peligro.

Entre las principales tareas llevadas a cabo en las campañas de terreno se tienen:

- Caracterización geológica/geomorfológica de unidades cuaternarias.
- Estimación *in situ* de GSI.
- Identificación de zonas críticas para la ocurrencia de remociones en masa.

Evaluación del peligro de remociones en masa.

Teniendo toda la información compilada, se evalúa el peligro de remociones en masa en la Ruta G-25. Se realiza una propuesta metodológica para la evaluación y zonificación del peligro a lo largo del trazado. La metodología propuesta en el presente estudio se basa en el trabajo realizado por Intrat Consultores S.A. (2014) en la Ruta 115-Ch, VII Región.

Generación de Mapas de Peligro.

Finalmente se elaboran los mapas temáticos respectivos. Estos mapas presentan una zonificación del peligro de manera lineal a lo largo de la ruta, con la simbología respectiva. Se generan mapas para cada tipo de remoción en masa (Deslizamientos de suelo, caídas de rocas y flujos aluviales).

1.3.2 Segunda Fase

Gran parte de las rutas viales presentan taludes (naturales y/o artificiales) adyacentes al trazado, que resultan ser una potencial fuente de caídas de rocas. Esta fase metodológica busca evaluar el peligro de caídas de rocas en la Ruta G-25 a escala de detalle (1:1.000 o mayor) mediante un sistema de puntuación de parámetros que influyen en el peligro de caídas de bloques desde taludes. Esto tiene como objetivo complementar la zonificación con un trabajo de detalle de aquellos taludes que más peligro impliquen en la ruta, permitiendo priorizar de alguna manera, la implementación de medidas de control, protección o mitigación que estén dirigidas a minimizar o eliminar el riesgo.

Las tareas que se realizan en esta segunda fase son:

- Revisión de antecedentes metodológicos.
- Elaboración de metodología de puntuación al peligro de caídas de rocas.
- Recopilación de antecedentes.
- Trabajo de campo.
- Compilación de puntajes resultantes.

En la Figura 3 se presenta el diagrama de flujo (o flujo de trabajo) de la segunda fase, con las principales actividades desarrolladas. A continuación, se describe en detalle cada tarea mencionada.

Revisión de antecedentes metodológicos.

Esta etapa tiene como objetivo una revisión de las distintas metodologías de puntuación al peligro de caídas de rocas y su aplicación en distintas partes del mundo. Se indaga principalmente en artículos científicos y reportes dedicados a esta temática.

Esta etapa permite tener un escenario global de los parámetros que se evalúan, su aplicabilidad en distintos escenarios, su eficacia y su factibilidad.

Entre los parámetros que más destacan, se pueden mencionar los siguientes:

- Altura y ángulo del talud.
- Características geológicas del talud.
- Precipitaciones locales.
- Eventos previos declarados en el talud.

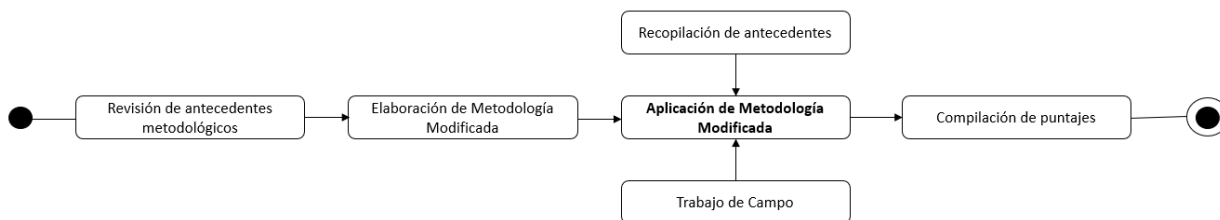


Figura 3: Diagrama de flujo para la Segunda Fase Metodológica. Elaboración propia.

Elaboración de metodología de puntuación al peligro de caídas de rocas.

Luego de tener un panorama amplio de estudios en donde se apliquen estas metodologías de puntuación, se elabora una metodología a partir de las distintas referencias. Esto se hace escogiendo parámetros en base a ciertos criterios y compilándolos en una única metodología modificada. Los criterios para elegir estos parámetros son los siguientes:

- Parámetros universales, que puedan usarse en cualquier proyecto lineal independiente de su ubicación geográfica.
- Parámetros de fácil y rápida medición, para optimizar el trabajo en terreno.

Finalmente se tiene como resultado una metodología modificada en base a ciertos parámetros que inciden en el grado de peligro que pueda presentar un talud adyacente a la ruta.

Recopilación de antecedentes.

En esta etapa se recopilan todos aquellos antecedentes que se requieren para poder llevar a cabo la implementación de la metodología modificada. Estos corresponden principalmente a:

- Eventos declarados en la ruta.
- Precipitación acumulada anual de las distintas estaciones meteorológicas cercanas al camino.
- Ciclos anuales de temperaturas (congelamiento y/o descongelamiento).

Trabajo de campo

Esta etapa consiste en la aplicación de la metodología modificada en el área de estudio. La asignación de puntajes debe seguir los criterios y condiciones expuestas en la metodología.

Compilación de puntajes resultantes.

Finalmente, teniendo la calificación para cada talud a lo largo de la ruta, se realiza una compilación de los puntajes resultantes indicando lo siguiente:

- Ubicación geográfica de cada talud en UTM.
- Puntaje asignado a cada talud.

Teniendo esta información ordenada y clara, queda a disposición de quien se haga cargo de implementar medidas de mitigación para aquellos taludes con mayor puntaje, los cuales representan mayor peligro.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Remociones en Masa.

Los términos movimientos en masa o remociones en masa se entienden como un movimiento gravitatorio ladera abajo de una masa de roca, suelo o ambos (Cruden, 1991). Existen variadas clasificaciones para este tipo de procesos, pero la clasificación de movimiento en masa de Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988) son hoy en día, los sistemas más ampliamente aceptados en el mundo de habla inglés e hispana (PMA, 2008).

Varnes (1958, 1978) se basa en el tipo de movimiento y el tipo de material involucrado. De esta manera los movimientos se dividen en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos. Además, se dividen los materiales involucrados en suelo y roca. A su vez los suelos son subdivididos en detritos y tierra. De esta manera, existe una amplia gama de tipo de remociones en masa junto al material involucrado, como, por ejemplo, flujo de detritos, deslizamiento de suelo, caídas de rocas, etc. En la tabla 1 se muestra la clasificación antes mencionada.

Tabla 1: Clasificación de tipos de remociones en masa (Modificado de Varnes, 1978)

Tipo de movimiento		Tipo de material		
Caída		Roca	Suelo	
Toppling				
Deslizamiento	Rotacional			
	Traslacional			
Propagaciones			Grano grueso (detritos, <80% partículas <2mm)	Grano fino (barro, >80% partículas <2mm)
Flujos				

En el presente estudio se evalúa el peligro solo para caídas de rocas, deslizamientos de suelo, flujos de detritos, flujos de lodo y flujos hiperconcentrados. Esta distinción se hace básicamente porque estos procesos son los más recurrentes a lo largo de la ruta y los que en tiempos históricos, han causado más daño.

2.1.1 Caídas de rocas

La caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable (PMA, 2008). Una vez que el material se desprende, cae desplazándose principalmente por el aire, pudiendo efectuar golpes, rebotes o rodamientos como se muestra en la Figura 4 (Varnes, 1978). Estudios asociados han mostrado que este tipo de evento pueden exceder los 100 m/s de velocidad (equivalente a 360 km/h) (PMA, 2008). Los bloques suelen ser angulosos y con poca esfericidad, lo cual evidencia el poco transporte que estos tienen. El tamaño de los bloques dependerá netamente del grado de fracturamiento del macizo rocoso y de la distancia que estos recorran.

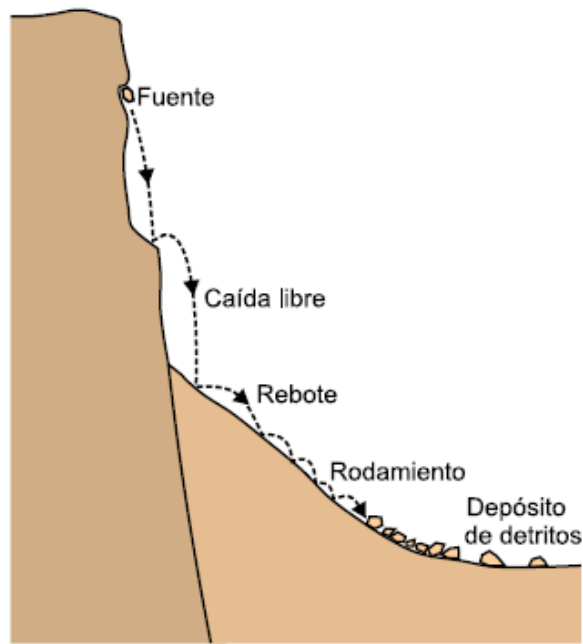


Figura 4: Esquema de modos de caídas de rocas (PMA, 2008)

2.1.2 Deslizamientos

Es un movimiento de 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 (PMA, 2008).

Varnes (1978) clasifica los deslizamientos según la forma que pueda tener la superficie de falla. Los agrupa en deslizamientos traslacionales y deslizamientos rotacionales. A su vez los primeros, los subdivide en planares y en cuña (ver Figura 5).

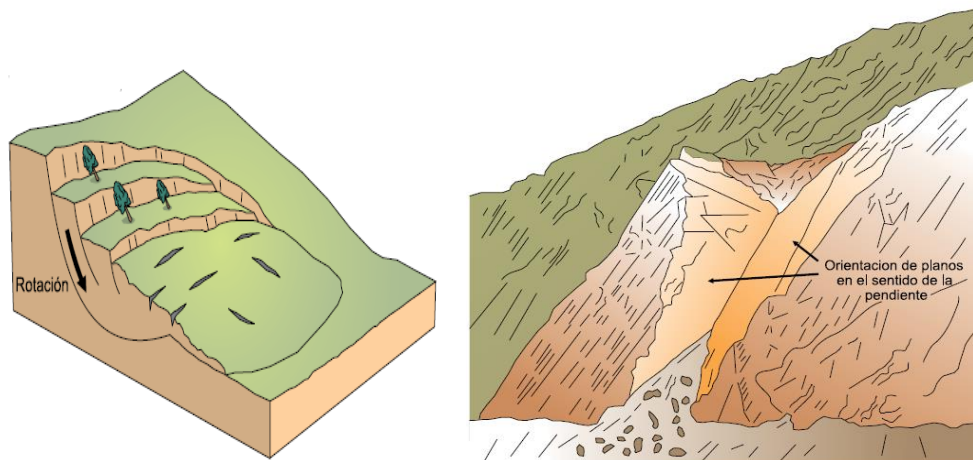


Figura 5: A la derecha un esquema de un deslizamiento traslacional en cuña. A la izquierda un esquema de un deslizamiento rotacional mostrando los rasgos morfológicos característicos (PMA, 2008)

2.1.3 Flujos

Es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco,

canalizado o no (ver Figura 6) (PMA, 2008). En muchos casos se originan a partir de otro movimiento precedente, el cual puede ser un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978).

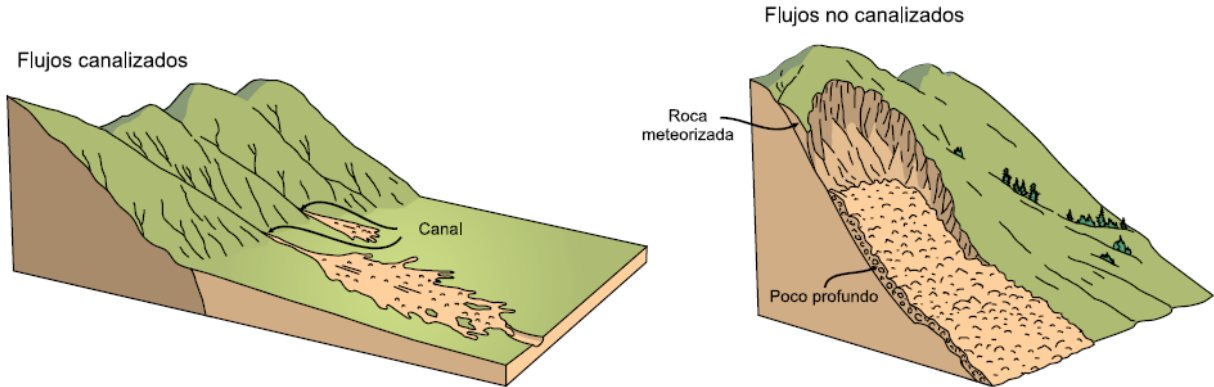


Figura 6: Esquema de flujos canalizados y no canalizados (PMA, 2008).

Hungr *et al.* (2001), clasifica los flujos por el tipo y propiedades del material involucrado, junto a la humedad, la velocidad, el confinamiento lateral y entre otras características (PMA, 2008).

Flujos de detritos: Es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (más del 20% de las partículas superan los 2 mm) que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce en canales con pendientes fuertes (PMA, 2008).

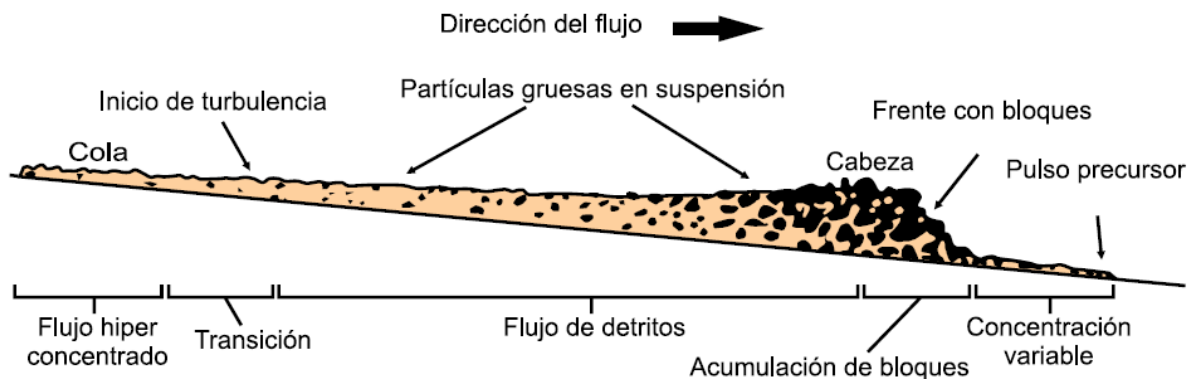


Figura 7: Corte esquemático típico de un flujo de detritos. Frente con bloques de un pulso de flujo de detritos (PMA, 2008).

Estos flujos incorporan gran cantidad de sedimentos saturados en su trayectoria en el canal, hasta que finalmente depositan en morfologías típicas de abanicos. Los flujos de detritos tienen la particularidad de acumular bloques en el frente de avance (Figura 7), esto hace que los flujos de detritos tengan un alto potencial destructivo (PMA, 2008).

Flujos hiperconcentrados: Llamados también crecidas de detritos, al igual que los flujos de detritos, estos son del tipo canalizado. Se originan por crecidas de agua muy rápidas que transportan una gran carga de detritos a lo largo del canal. Resulta difícil distinguir entre un flujo de detritos y una crecida de detritos con base a la concentración de sedimentos, por los que deben diferenciarse según el caudal pico observado o potencial. Los flujos hiperconcentrados se caracterizan por caudales pico 2 o 3 veces mayores que el de una crecida de agua o inundación (PMA, 2008). Sin embargo, pueden ocurrir eventos excepcionales por descargas de agua inusualmente altas, tales como las producidas por rompimientos de presas naturales o artificiales (*outburst*), entre otros.

Flujos de lodo: Flujo canalizado, turbulento, muy rápido a extremadamente rápido de sedimentos plásticos saturados, cuyo contenido de agua es significativamente mayor al del material fuente. El carácter de este tipo de movimiento es similar al del flujo de detritos, pero la fracción arcillosa modifica la reología del material (PMA, 2008). Según Varnes (1978) más del 80% de las partículas son menores a 2 mm.

Avalancha de roca: Las avalanchas de rocas son flujos de gran longitud extremadamente rápidos, de roca fracturada que resulta de uno o varios deslizamientos de rocas de magnitud considerable (Hungry *et al.*, 2001). Sus depósitos suelen estar cubiertos por bloques de gran dimensión, como se muestra en la Figura 8, aun cuando se puede encontrar bajo la superficie del depósito material fino derivado parcialmente de roca fragmentada e incorporada en la trayectoria. Algunos depósitos de avalanchas pueden alcanzar volúmenes del orden de kilómetros cúbicos y pueden recorrer grandes distancias (PMA, 2008). Estas son frecuentes en zonas de alta montaña, principalmente.

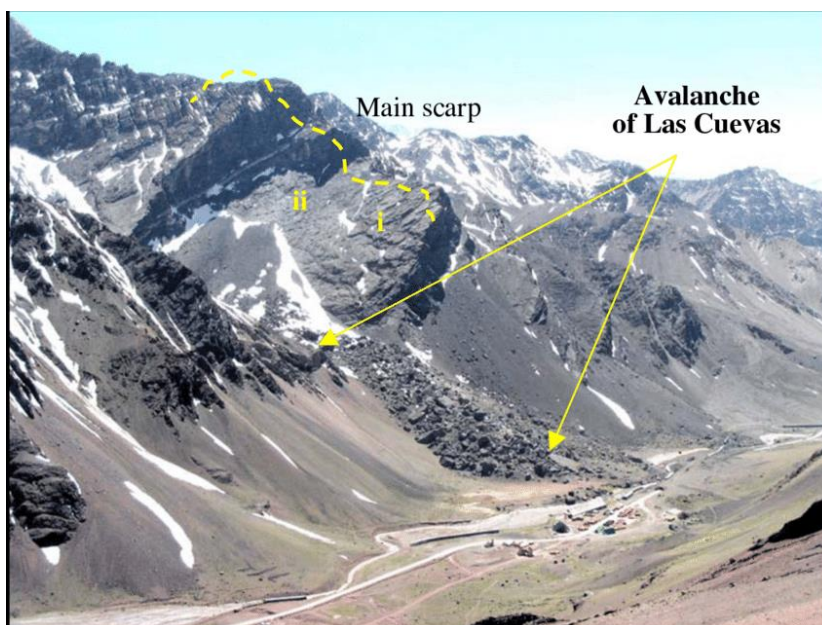


Figura 8: Avalancha de Rocas de Las Cuevas, Mendoza, Argentina (Wilson *et al.*, 2008).

En Chile es muy común el uso del término aluvión para referirse a ciertos tipos de flujos canalizados con un alto poder destructivo. Muñoz *et al.* (2018) define un **aluvión** como un flujo rápido a extremadamente rápido que contiene agua y sedimentos de variado tamaño, composición y origen, el cual fluye confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. Las concentraciones volumétricas del material sólido con

respecto al volumen total de la mezcla normalmente superan los 20% y puede incluir rocas, material antrópico (casas, automóviles, basura, etc) y troncos de árboles, entre otros. Lo que caracteriza a un aluvión y que lo diferencia de otros flujos saturados como las inundaciones, es la notoria e inusualmente alta descarga máxima (frente de flujo), lo que se traduce en una mayor energía de impacto. En la Figura 9 se expone la clasificación de los aluviones en base su concentración volumétrica (C_v) y granulometría. Con la flecha roja se grafica la energía de impacto que tienen estos eventos.

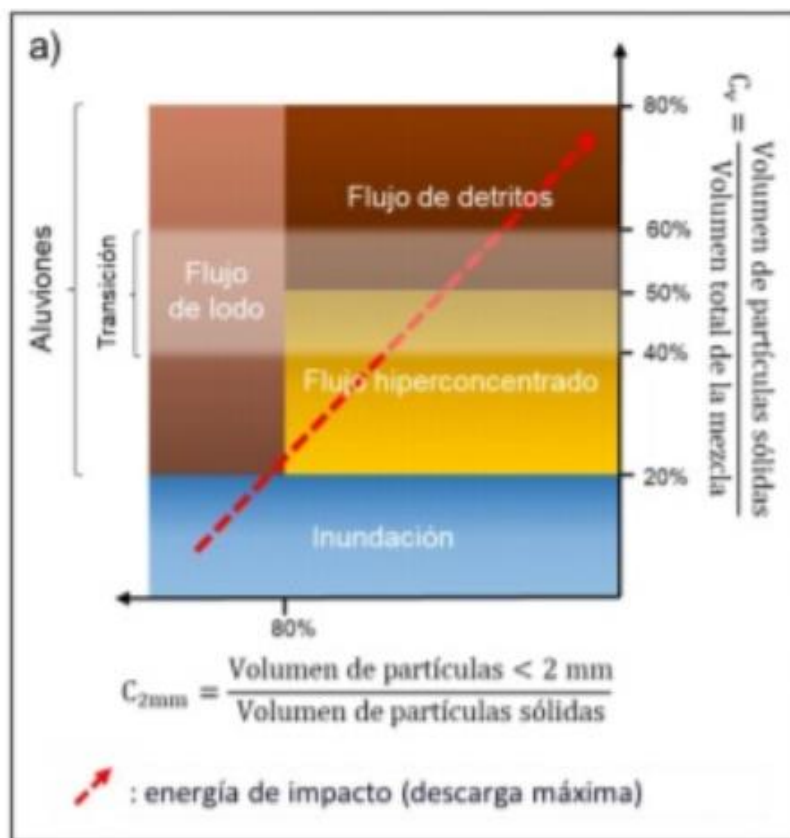


Figura 9: Clasificación de aluviones mediante concentración volumétrica (C_v) y granulometría (Muñoz *et al.*, 2018).

Muñoz *et al.* (2018) relaciona la descarga máxima que tienen estos flujos con respecto a una inundación (Q_{pf}) y su concentración volumétrica de sólidos (C_v). Estos parámetros son los factores más importantes que se deben considerar a la hora de estudiar el comportamiento mecánico de los aluviones.

Tabla 2: Descarga máxima con respecto a una inundación (Q_{pf}) y concentración volumétrica típica (C_v) para los distintos tipos de flujos, destacando el caso de los aluviones (Muñoz *et al.*, 2018).

Tipos de Flujos		Q_{pf}	C_v
Aluviones	Flujos de detritos (<i>Debris Flow</i>)	>10 veces	>50%
	Flujos de Lodo (<i>Mudflow</i>)	>2 veces	>20%
	Flujos hiperconcentrados (<i>Debris Floods</i>)	2 a 3 veces	20% - 50%
Inundaciones (<i>Flood</i>)		1 vez	<20%

Sin embargo, existen flujos canalizados como los que se mencionan en la Tabla 2 que no cumplen con la condición de alta descarga, por lo que no pueden ser llamados aluviones, en estricto rigor (Muñoz *et al.*, 2018). Es por esto, que en el presente estudio se propone un término general independiente de la energía de impacto que presente el flujo, pero dependiente de la concentración volumétrica, para diferenciarlos de esta manera de las inundaciones, las cuales no son consideradas remociones en masa.

Se define un **flujo aluvial** como un flujo canalizado rápido a extremadamente rápido (Cruden & Varnes, 1996) compuesto por agua y sedimentos de variado tamaño, composición y origen. Su concentración volumétrica de sólidos con respecto a la mezcla total puede ser variable, normalmente superando el 20%. De esta manera, un aluvión es considerado una particularidad de un flujo aluvial. De igual manera, se incluyen en esta definición aquellos flujos que no cumplan con la condición de alta descarga máxima requerida para ser categorizados como aluviones.

2.2 Evaluación y zonificación del peligro: Consideraciones conceptuales

Son muchos los términos y definiciones que giran en torno al estudio de peligros geológicos y planificación territorial. La generalidad de los trabajos dedicadas a esta área toma como referencia las definiciones propuestas por Varnes (1984), sin embargo, diversos autores han redefinido estos conceptos teniendo en consideración diversos enfoques y usos. A continuación, se definen los términos más comunes usados en esta área.

- **Susceptibilidad de remociones en masa:** La susceptibilidad expresa la posibilidad que ocurra o no una remoción en masa, en un área determinada, en función de las condiciones locales del terreno (Brabb *et al.*, 1984). En palabras simples expresa la mayor o menor tendencia del terreno a la generación de estos procesos y se puede aproximar a la condición general de estabilidad (Brabb *et al.*, 1972; Chacón *et al.*, 1993; Irigaray, 1995).
- **Peligro (también llamado amenaza o peligrosidad):** Corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un proceso, con una magnitud determinada, dentro de cierto periodo de tiempo y en un área específica (Varnes, 1984). A su vez, y

relacionado con la magnitud del evento, es preciso conocer también aspectos sobre el volumen, velocidad y alcance real de la masa desplazada.

- **Elementos expuestos:** Personas, bienes, propiedades, infraestructura, servicios, etc., que pueden sufrir las consecuencias directas o indirectas de un proceso geológico en una determinada zona (González de Vallejo *et al.*, 2002).
- **Vulnerabilidad:** corresponde al grado de pérdidas o daños potenciales de un elemento o conjunto de elementos dados, como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de magnitud determinada. Se expresa en una escala de 0 (sin daños) a 1 (pérdida o destrucción total del elemento) o entre 0% y 100% (Varnes, 1984; González de Vallejo *et al.*, 2002).
- **Riesgo:** este concepto incorpora consideraciones socioeconómicas, y se define como las potenciales pérdidas debidas a un fenómeno natural determinado, por ejemplo, vidas humanas, pérdidas económicas directas o indirectas, daños en infraestructura, etc (González de Vallejo, *et al.*, 2002).

Como se menciona al inicio de este apartado, se ha visto cómo las distintas definiciones han sido adaptadas, y en ocasiones tergiversadas, según la utilidad y el enfoque que le da el autor a cargo del estudio. Por ejemplo, la susceptibilidad en estricto rigor solo apunta a zonas de generación de remociones en masa, sin embargo, Fell *et al.* (2008) propone considerar en la zonificación de la susceptibilidad el alcance de los procesos (o distancia de viaje). Esto consiste en zonificar la susceptibilidad según una metodología propuesta previamente, y luego mostrar las distancias de viaje o alcance de los procesos en estudio. Esto puede estar expresado en el mismo mapa de la zonificación, o bien en mapas separados. Sin embargo, autores como Ayala *et al.* (2003) han combinado el concepto de generación y alcance para definir la susceptibilidad en un área (Figura 10).

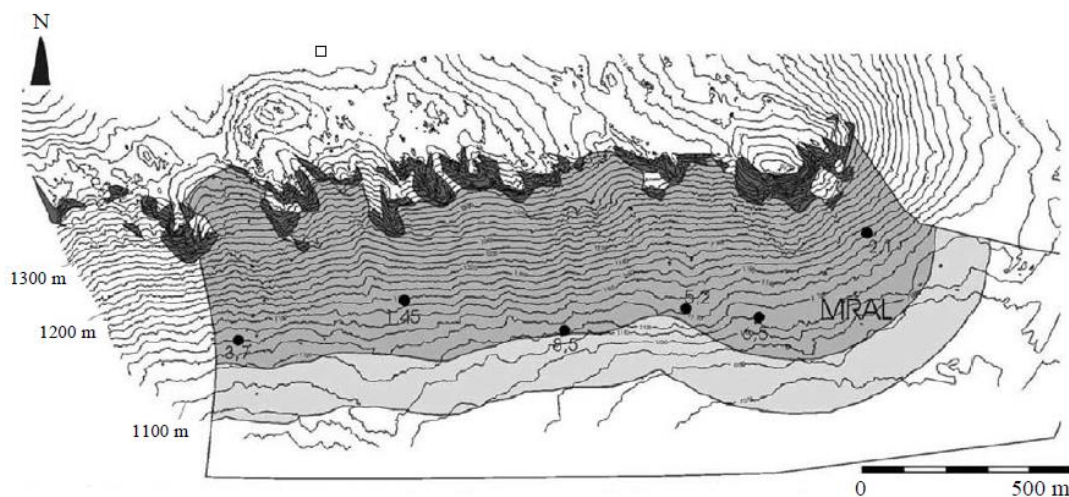


Figura 10: Zonificación de la susceptibilidad de caídas de rocas por Ayala *et al.* (2003). Las zonas más oscuras representan los sectores con susceptibilidad alta, el gris oscuro la susceptibilidad media y el gris claro la susceptibilidad baja.

Los criterios de zonificación usados por Ayala *et al.* (2003) distinguen entre susceptibilidad alta (zonas escarpadas como fuentes de caídas de rocas), susceptibilidad media (zona de alcance) y susceptibilidad baja (una franja de 100 metros de ancho definida por seguridad). Con respecto a esto último, hay múltiples puntos de vista al

considerar el alcance en la zonificación de la susceptibilidad. Algunos autores consideran que esto solo debería considerarse en la evaluación del peligro (Fell *et al.*, 2008b).

Relacionado al alcance, Chacón & Irigaray (1999) usan el término “Zonas Expuestas” para indicar aquellas zonas que pueden ser afectadas por procesos de ladera. Algunos autores consideran importante mapear también los distintos niveles de alcance junto a la zonificación de la susceptibilidad, esto como un paso intermedio entre los mapas de susceptibilidad y los mapas de peligros (Chacón & Irigaray 1992, 1999; Chacón *et al.*, 1992, 1993, 1994, 1996).

Por otra parte, los mapas de peligros están en un nivel de complejidad mayor a los mapas de susceptibilidad. Según Hartlen & Víberg (en Soeters & Van Westen, 1996), un mapa ideal de peligro debería entregar información sobre la probabilidad espacial y temporal de la ocurrencia, el tipo, la magnitud, velocidad, alcance (o distancia de viaje) y el límite de avance de las remociones en masa, pero en la práctica, todo esto muy difícilmente se puede llevar a cabo, ya sea por la falta de recursos en el estudio o bien, por las dificultades técnicas para obtener toda esta información. Es por esto que es bastante usual la representación del peligro de forma similar a la susceptibilidad (Chacón & Irigaray, 1999). Algunos autores (Eisntein, 1988; Hartlen & Víberg, 1988) han considerado la susceptibilidad de remociones en masa como una expresión de peligrosidad relativa.

Einstein (1988) sugirió la proyección temporal del mapeo de susceptibilidad basado en que en zonas con mayor susceptibilidad existen mayores probabilidades de que ocurran remociones en masa. Este postulado fue validado años más tarde, gracias al trabajo realizado por Irigaray (1995) en Granada, España. Este consistió en un Mapa de Susceptibilidad, en donde posterior a su publicación un evento de precipitación extrema azotó la zona estudiada por Irigaray. Luego de realizar un inventario de todas las remociones en masa desencadenadas en aquel evento, se constató que el 61,9% de las remociones ocurridas en la zona, fueron identificadas en las zonas de Muy Alta Susceptibilidad y el 23,1% en zonas de Alta Susceptibilidad. Esto evidencia la relación existente entre la probabilidad de ocurrencia y la estabilidad del terreno. Validaciones similares han sido obtenidas para mapas de susceptibilidad al sur de Sierra Nevada (España) por El Hamdouni (2001) o en Torre Vedras (Portugal) por García & Zezere (2004). Es aquí donde el término peligro pierde su significado probabilístico y se vuelca a una estimación de la posibilidad de ocurrencia (Chacón & Irigaray, 1999). Este enfoque se ha utilizado en numerosos mapas de susceptibilidad publicados y elaborados por diferentes autores (Brabb *et al.*, 1992; Nilsen *et al.*, 1979; Chacón *et al.*, 1992; Irigaray, 1995).

Siguiendo con este enfoque, en donde se propone una aproximación de la susceptibilidad con el peligro, es que Chacón & Irigaray (1999) proponen combinar la susceptibilidad (generación) y las zonas expuestas (alcance) para aproximar la zonificación de susceptibilidad a la zonificación del peligro.

En el presente estudio, se utiliza el termino de peligro como una **estimación de la posibilidad de ocurrencia**, la cual estará en función de la susceptibilidad (por su definición en las zonas de generación) y las zonas de alcance (o zonas expuestas).

3. MARCO GEOLÓGICO.

3.1 Unidades Morfoestructurales Regionales

A lo largo del borde occidental chileno, existe una segmentación morfoestructural, la que sería el resultado de una serie de procesos geotectónicos debido a la interacción de la placa de Nazca y la placa continental Sudamericana. En particular en Chile Central, entre los 33°S y los 35°S, el relieve andino presenta cinco unidades morfoestructurales que se distribuyen en orientación aproximada Norte-Sur (ver Figura 11). Estos dominios corresponden, desde oeste a este a: Cordillera de la costa, Depresión Central, Cordillera Principal, Cordillera Frontal y Precordillera (Quiroga, 2013).

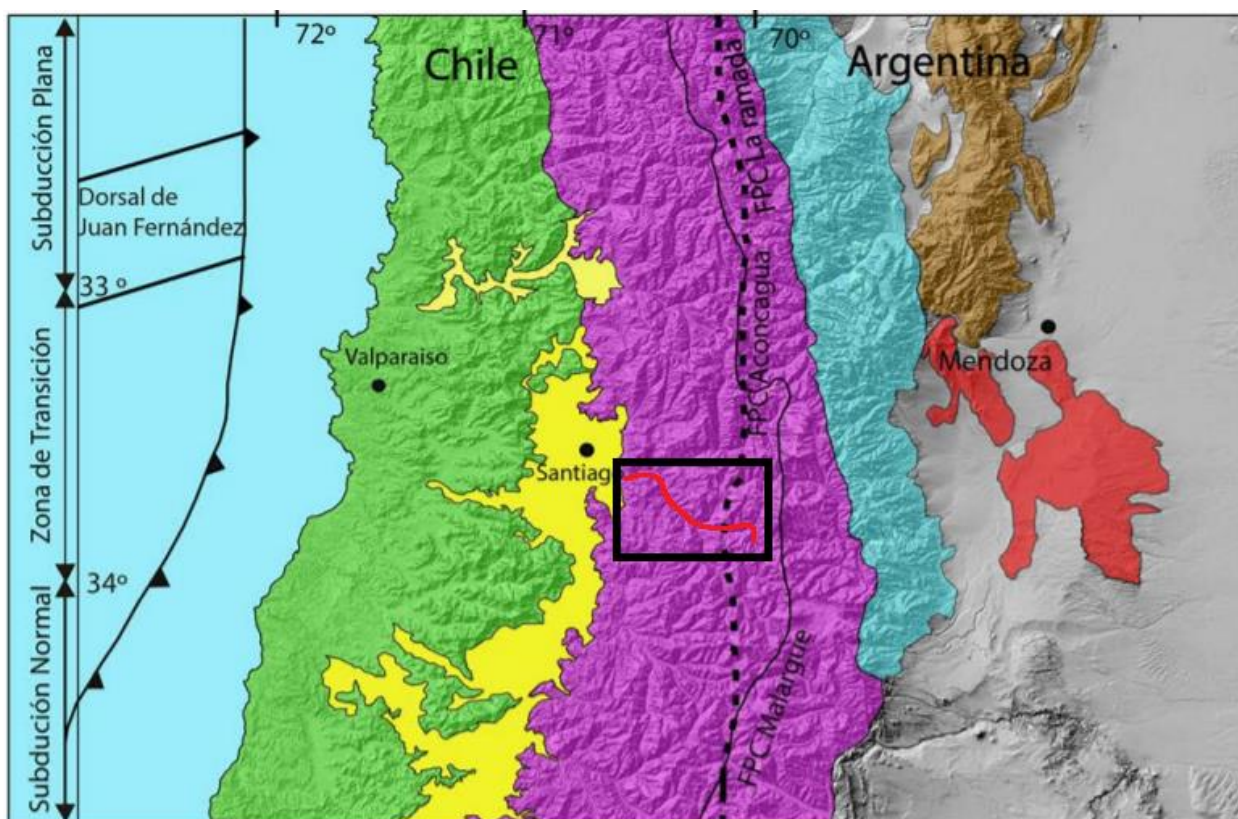


Figura 11: Segmentación morfoestructural en Chile Central (Quiroga, 2013). Dentro del cuadro negro, con un segmento rojo, se destaca la Ruta G-25.

La cordillera principal, que es donde se encuentra la ruta en estudio, presenta importantes elevaciones en comparación con las otras unidades, alcanzando en ocasiones altitudes de 6.500 m.s.n.m. Este segmento de la Cordillera Andina se puede dividir en dos franjas: la Cordillera Principal Occidental, conformada por rocas de edad cenozoica, que constituyen las formaciones Abanico y Farellones, y la Cordillera Principal Oriental, que además de contener las rocas antes mencionados, también exhibe rocas mesozoicas fuertemente deformadas (Quiroga, 2013).

3.2 Geología Regional

Los antecedentes geológicos regionales del área de estudio se basan principalmente en la recopilación bibliográfica realizada por Herrera (2016), la cual se fundamenta en los

trabajos de Thiele (1980) y en las modificaciones que Fock (2005) hace de la hoja de Santiago (Figura 12).

Como la ruta G-25 se emplaza a lo largo de los valles de los ríos Maipo, Volcán y del Estero Colina, se realiza la descripción de todas las unidades rocosas que afloran en estos valles, junto a los depósitos de relleno sedimentario.

3.2.1 Rocas estratificadas

Formación Río Colina

González (1963) define esta formación en el valle homónimo ubicado en el extremo suroriental de la Hoja de Santiago. Está formada por una secuencia de sedimentitas marinas compuestas principalmente de calizas y lutitas calcáreas, grises oscuros; lutitas fisibles, finamente estratificadas; areniscas y conglomerados finos, con intercalación de rocas volcánicas andesíticas. Una característica importante de esta formación es la presencia de yeso interestratificado y en forma de domos diapíricos que intruyen y cortan la serie. La secuencia posee un espesor visible no superior a 800 metros. Se le asigna una edad Caloviana-Oxfordiana (Thiele, 1980).

En cuanto a las relaciones de contacto su techo se presenta concordante con la Fm. Río Damas (Thiele, 1980).

Formación Río Damas

Originalmente fue definida por Klohn (1960) fuera de la zona de estudio, en el valle del río Damas en la provincia de Colchagua. Esta se compone de una sucesión de conglomerados y brechas conglomerádicas, gruesas a medianas, de colores rojizos y verdosos, con intercalaciones potentes de areniscas y limonitas, con colores, que varían de púrpura claro a marrón; se intercalan en la secuencia abundantes niveles de rocas volcánicas andesíticas y pequeños lentes de yeso. Según Thiele (1980) esta unidad tiene un espesor aproximado de 3.000 metros. Además, se le asigna una edad Kimmeridgiana.

En cuanto a las relaciones de contacto, esta se dispone concordantemente sobre la Fm. Río Colina y subyace de la misma manera a la Formación Lo Valdés (Thiele, 1980).

Esta formación se distribuye en la parte oriental de la Hoja de Santiago, a lo largo de dos franjas paralelas de dirección aproximada norte-sur (Herrera, 2016).

Formación Lo Valdés

Definida por González (1963) en el sector de Lo Valdés en el valle del río El Volcán. Está formada por rocas sedimentarias marinas, compuestas por calizas, calcilutitas lutitas y areniscas calcáreas, conglomerados y brechas. Estas calizas se presentan con coloraciones grises-azuladas en estratos compactos. Las calcilutitas se presentan en colores negruzcos y aparecen finamente laminadas. Las lutitas y areniscas tienen colores que varían desde gris claro a púrpura. Además, se presentan intercalaciones de rocas volcánicas basálticas y andesíticas en su parte central. Esta unidad presenta un espesor aproximado de 1.350 metros (Thiele, 1980).

El rango de edad que se le asigna a esta formación es Tithoniano superior- Hauteriviano (Thiele, 1980).

Su base se encuentra sobreyaciendo concordantemente a la Fm. Río Damas y su techo se presenta concordante a la Formación Colimapu (Thiele, 1980).

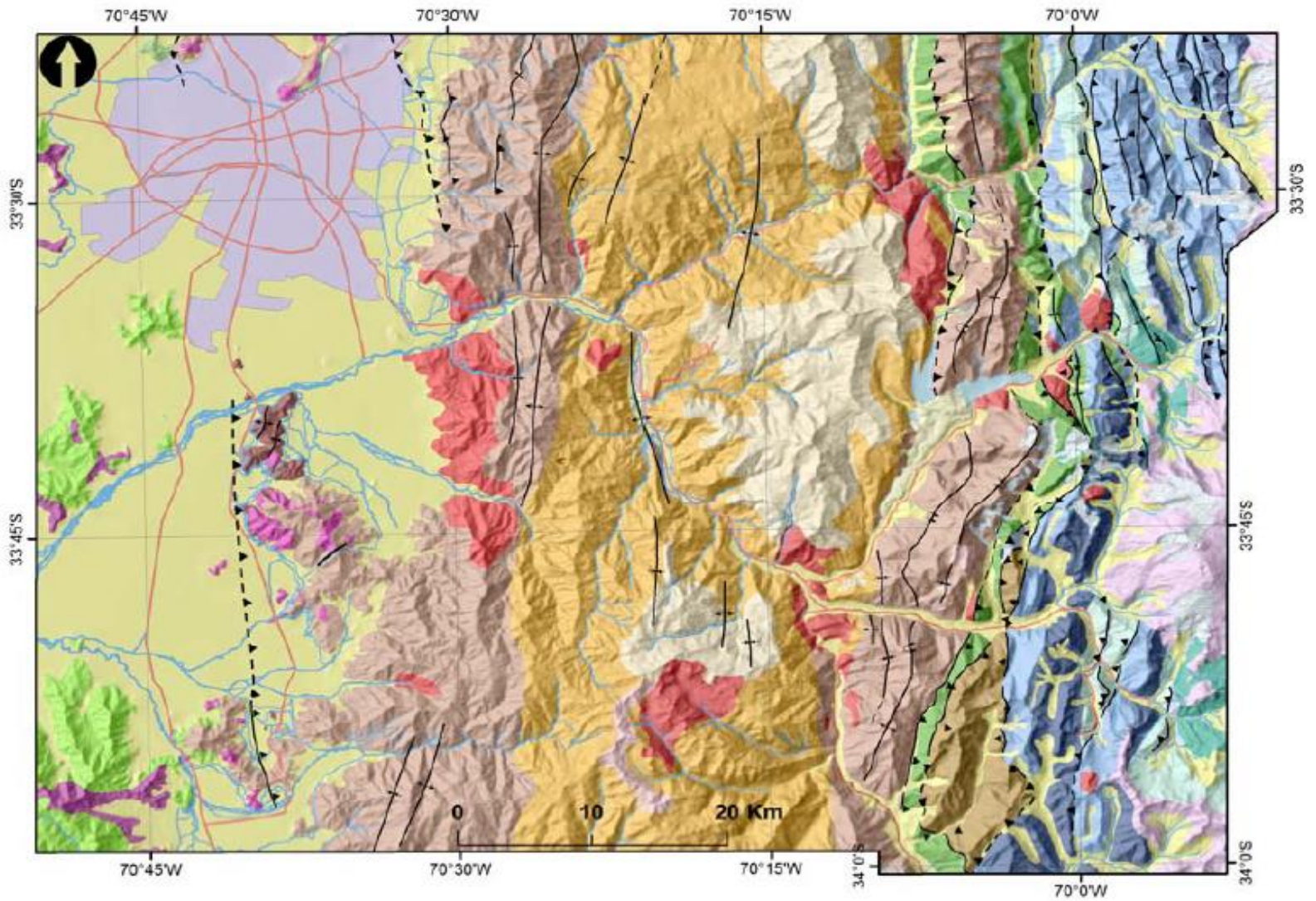








Figura 12: Mapa Geológico Regional entre los 33°30' S y los 34°00' S (Fock, 2005). Leyenda y simbología en página siguiente.

Legenda






Rocas Estratificadas

	Formación Lo Valle
	Formación Colimapu
	Formación Las Chilcas
	Formación Lo Valdés
	Formación Rio Damas
	Yeso
	Formación Rio Colina
	Formación Nieves Negras
	Formación Farellones (Miembro Superior)
	Formación Farellones (Miembro Inferior)
	Formación Abanico
	Unidad Cerro Retumbadero
	Estratos del Cordón de los Ratones

Depósitos

	Depósitos Aluviales y Fluviales Recientes
	Depósitos de Ceniza Pleistocenos
	Depósitos de Remociones en Masa
	Volcanismo Pleistoceno - Holoceno
	Glaciares
	Lagunas

Rocas Intrusivas

	Intrusivos Pliocenos-Pleistocenos
	Intrusivos del Mioceno Medio - Superior
	Intrusivos del Mioceno Inferior
	Intrusivos Hipoabisales del Eoceno - Mioceno Inferior
	Intrusivos del Cretácico Superior

Estructuras

	Anticlinal
	Sinclinal
	Homoclinical
	Sinclinal Volcado
	Anticlinal Volcado
	Traza de Eje
	Falla Inversa
	Falla Inversa Invertida
	Traza de Falla

Simbología

	Camino
	Hidrografia
	Santiago

Formación Colimapu

Esta fue definida por Klohn (1960) en la quebrada Colimapu, afluente del río Maipo al sureste de Santiago (Herrera, 2016). Se compone de rocas sedimentarias continentales correspondientes a secuencias de areniscas y lutitas rojas, conglomerados de matriz arenosa gris rojiza, lutitas rojas con niveles de rocas piroclásticas aéreas y algunas lavas basálticas y andesíticas (Thiele, 1980; Vergara & Nyström, 1996). Esta secuencia según Thiele (1980) se habría depositado en un ambiente altamente oxidante con una potencia estimada de 2.000 metros.

Sobreyace concordantemente a la Fm. Lo Valdés y subyace de forma concordante a la Formación Abanico en la parte oriental de la Hoja de Santiago (Thiele, 1980).

Los estratos de la Fm. Colimapu se distribuyen a lo largo de una franja de dirección Norte-Sur, que se prolonga desde el sur del río El Volcán hasta el norte del río Colorado (Herrera, 2016).

Formación Abanico

Fue definida por Aguirre (1960) en la provincia del Aconcagua. Está caracterizada como una formación continental, compuesta por tobas y brechas volcánicas con intercalaciones de lavas andesíticas y riolíticas, y rocas piroclásticas, desarrolladas principalmente en los niveles superiores de la secuencia (Thiele, 1980). Además, presentan intercalaciones sedimentarias continentales (fluviales, aluviales y lacustres), las que generan lentes que alcanzan los 500 metros de espesor (Charrier et al., 2002a; Nyström et al., 2003). Su espesor se estima en 3.000 metros (Thiele, 1980).

Esta unidad sobreyace a la Fm. Colimapu en un contacto que ha sido descrito como concordante en el sector cordillerano de la Hoja de Santiago (Thiele, 1980). El contacto con la Formación Farellones, que lo sobreyace, es de carácter transicional y con amplias

variaciones, desde discordante a concordante por falla, pasando por pseudo-concordante (Herrera, 2016).

Según dataciones radiométricas y fauna fósil, se le asigna una edad Eoceno Superior-Mioceno (Herrera, 2016).

Formación Farellones

Esta formación fue definida inicialmente por Klohn (1960), en Chile central, entre los 32°S y los 35°S. La secuencia está compuesta por lavas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas. Existe una predominancia de las lavas por sobre las tobas y brechas. Además, se presenta alternancia de rocas volcanoclásticas, lo que le da una marcada estratificación a la secuencia (Thiele, 1980). El espesor de la serie se estima en 2.500 metros.

Esta Formación sobreyace a la Fm. Abanico con un contacto descrito como transicional con amplias variaciones, reportándose contactos discordantes o pseudo-concordantes (Godoy *et al.*, 1999; Charrier *et al.*, 2002a).

La formación no presenta registro de fauna fósil que permita asignar una edad, sin embargo, existen dataciones radiométricas que la asignan al Mioceno (Fock, 2005).

3.2.2 Rocas Intrusivas

Estas rocas han sido asociadas al Mioceno-Plioceno y se expresan en cuerpos de poca extensión correspondiente a franjas de dirección Norte-Sur, las cuales se vuelven progresivamente más jóvenes hacia el este (Thiele, 1980; Skewes, 1991).

Intrusivos del Mioceno Inferior

Están constituidos por plutones que intruyen a la Fm. Abanico, y su litología principal corresponde a granodioritas (Herrera, 2016). Entre estos destacan el Plutón La Obra y el Plutón del Salto del Soldado (Thiele, 1980; Kurtz *et al.*, 1997)

Intrusivos del Mioceno Superior

Se ubican al oriente de la franja de intrusivos del Mioceno Inferior (Herrera, 2016). Destacan el pluton San Gabriel (en la confluencia de los ríos Volcán, Yeso y Maipo), Plutón La Gloria, Cerro mesón Alto, Intrusivo Lago Yeso e Intrusivo Colina. Litologicamente son cuerpos granodioríticos, monzograníticos y monzonitas cuarcíferas (Thiele, 1980; Kurtz *et al.*, 1997; Deckart *et al.*, 2005; Deckart & Godoy, 2006).

3.2.3 Depósitos no consolidados

Depósitos fluviales, fluvioglaciales y aluviales

Su composición es de material de variados tamaños, que pueden ir desde clastos con granulometría de bloques a grava, arenas, limos y arcillas. La petrografía de estos materiales se relaciona con las distintas unidades litológicas definidas anteriormente (Thiele, 1980; Chiu, 1991). Se destaca el relleno del valle del Río Maipo, los cuales forman importantes niveles aterrizados. El límite superior de esta unidad de depósitos esta aproximada a los 1500 m.s.n.m., sobre la cual los depósitos fluviales gradan a glaciofluviales (Thiele, 1980; Ormeño, 2007).

Depósitos lacustres

Estos corresponden a depósitos menores en la zona de estudio, de reducidas dimensiones. Su formación se explica por acumulación de agua detrás de algunas morrenas frontales o de depósitos producidos por desmoronamiento en los valles del río Colina, Colorado,

Maipo y Yeso. Se caracterizan por su granulometría, comúnmente limos y arcillas con laminaciones finas (Thiele, 1980).

Depósitos de remoción en masa

Estos depósitos presentan gran distribución espacial. Los materiales de los depósitos más jóvenes están completamente sueltos y se presentan estabilizados, sin embargo, ciertos niveles de inestabilidad podrían generar movimientos de volúmenes importantes. Importantes depósitos de este tipo se encuentran en el valle de la Quebrada Arrayán y río Colorado, y en particular deslizamientos de las Cortaderas y Mesón Alto en el río Yeso, El Manzanito y el Ingenio en el río Maipo, y la Engorda en el río Colina, entre otros de menor tamaño (Thiele, 1980; Chiu, 1991; Sepúlveda *et al.*, 2008; Antinao & Gosse, 2009).

Depósitos coluviales

Estos depósitos están ampliamente distribuidos en la zona cordillerana. En ciertos lugares su extensión y potencia es mayor, ejemplos de ellos son la ladera norte del valle del río Maipo en el sector de San Alfonso, en ambas laderas del valle del río Volcán, en el trayecto entre su confluencia con el río Maipo y la confluencia con los esteros Colina y Engorda (Herrera, 2016).

Entre sus características principales, se puede mencionar la estratificación interna poco definida y en muchas ocasiones solo insinuada, predominando los depósitos del tipo masivo. Estos depósitos con formas laminares se disponen en las laderas desarrollando fuertes pendientes de unos 20° a 25°, o bien, se ubican al pie de laderas constituyendo gruesos apilamientos de formas cónicas y con varias decenas de metros de espesor en algunos casos. Su génesis se asocia a meteorización mecánica y química vinculada a los cambios de temperatura a los que están expuestas las rocas del sector. Los materiales producidos forman un manto in situ como coberturas de suelo o escombros de falda o eventualmente caen en fragmentos individuales desde los puntos altos del relieve al pie de los faldeos de las zonas, por efecto de la gravedad, pero ayudados por aguas, ya sea de deshielo o de precipitaciones líquidas.

Depósitos glaciales

Predominantemente compuestos de depósitos de till, conformando morrenas ya sea, terminales, laterales o de fondo, asociadas a glaciares en retroceso (Herrera, 2016).

3.3 Geomorfología regional

La ruta en estudio se emplaza en la Cuenca Alta del Río Maipo, por alrededor de 75 kilómetros a lo largo de los valles de los ríos Maipo y Volcán, principalmente. A nivel regional, el valle principal del Río Maipo obedece al dominio de la acción fluvial/aluvial con un valle encajonado en forma de “V”. Más hacia el este, en el valle del Río Volcán comienza el dominio de la acción glacial con un valle amplio en forma de “U”, con laderas rocosas empinadas en las partes altas del valle.

El relieve de la zona posee un rango de elevaciones que varía desde los 800 m.s.n.m. hasta más de 6000 m.s.n.m. (Moreno *et al.* 1991). El punto más bajo de la ruta está en torno a los 800 m.s.n.m. mientras el punto más alto está alrededor de los 2.500 m.s.n.m.

La caracterización de macro-unidades morfológicas y sus definiciones fueron extraídas del trabajo de Espinoza *et al.* (2019); donde se distinguieron 5 macro-unidades que se definen a continuación (ver Figura 13).

- **Fondo de valle.** Corresponde a áreas donde ocurren dinámicas cíclicas de depositación-erosión, como en los lechos de los ríos principales, abanicos aluviales, rellenos aluviales y depósitos de remoción en masa de fondo de valle, materiales que pueden ser erosionados por flujos circulantes, aportando sedimentos.
- **Terrazas y llanuras aluviales.** Áreas caracterizadas por ambientes deposicionales producto de su baja pendiente. Incluye las terrazas aluviales del río Maipo y sus afluentes, y llanuras aluviales en la parte alta de los mismos cursos, que funcionan como trampa de sedimentos para flujos detríticos circulantes.
- **Zonas de acción aluvial.** Área bajo la cota 2900 m s.n.m., caracterizada por ambientes erosivos de ladera producto de la acción de las precipitaciones líquidas y la escorrentía superficial permanente o estacionaria, si bien la crioclastía tiene fuerte presencia en las partes más altas (particularmente entre los 2300 y los 2900m s.n.m.). Destacan los valles en forma de V, laderas con cubierta de regolito, farellones rocosos, desarrollo de suelo y depósitos coluviales.
- **Plateau de Farellones.** Armijo *et al.* (2010) denominan así al área ubicada entre la Sierra de Ramón por el oeste y el Cordón del Quempo por el este, que corresponde a una zona de pendientes suaves controlada estructuralmente por la disposición subhorizontal de los estratos de la Formación Farellones, y que se encuentra a una altura aproximada de 2300 m s.n.m. Sus límites están definidos por quiebres importantes de pendiente y escarpes, que dan paso a los valles de los ríos Molina, Colorado y Maipo, que seccionan profundamente esta unidad. Dominan los procesos crioclasticos, observándose cubiertas de regolito, depósitos de till y numerosos mallines o vegas cordilleranas.
- **Zonas de acción glaciaria y/o criogénica.** Corresponde al área ubicada por sobre los 2900m s.n.m., caracterizada por ambientes periglaciales y glaciales, con depósitos de till, glaciares de hielo y roca, depósitos fluvioglaciares, valles en U de laderas cubiertas con extensos mantos coluviales.
- **Macizo con estratificación semivertical a vertical.** Corresponde principalmente a una subdivisión de las zonas afectadas por acción glaciaria y/o criogénica, definida por la orientación de la estratificación de las unidades litológicas dentro de esta área, la cual se presenta vertical a sub-vertical, o bien cuyo ángulo y dirección de manteo es similar a la orientación de las laderas, características que otorgan una particular inestabilidad y susceptibilidad a generar remociones en masa, como la ocurrida en 1987 en el estero Parraguirre.

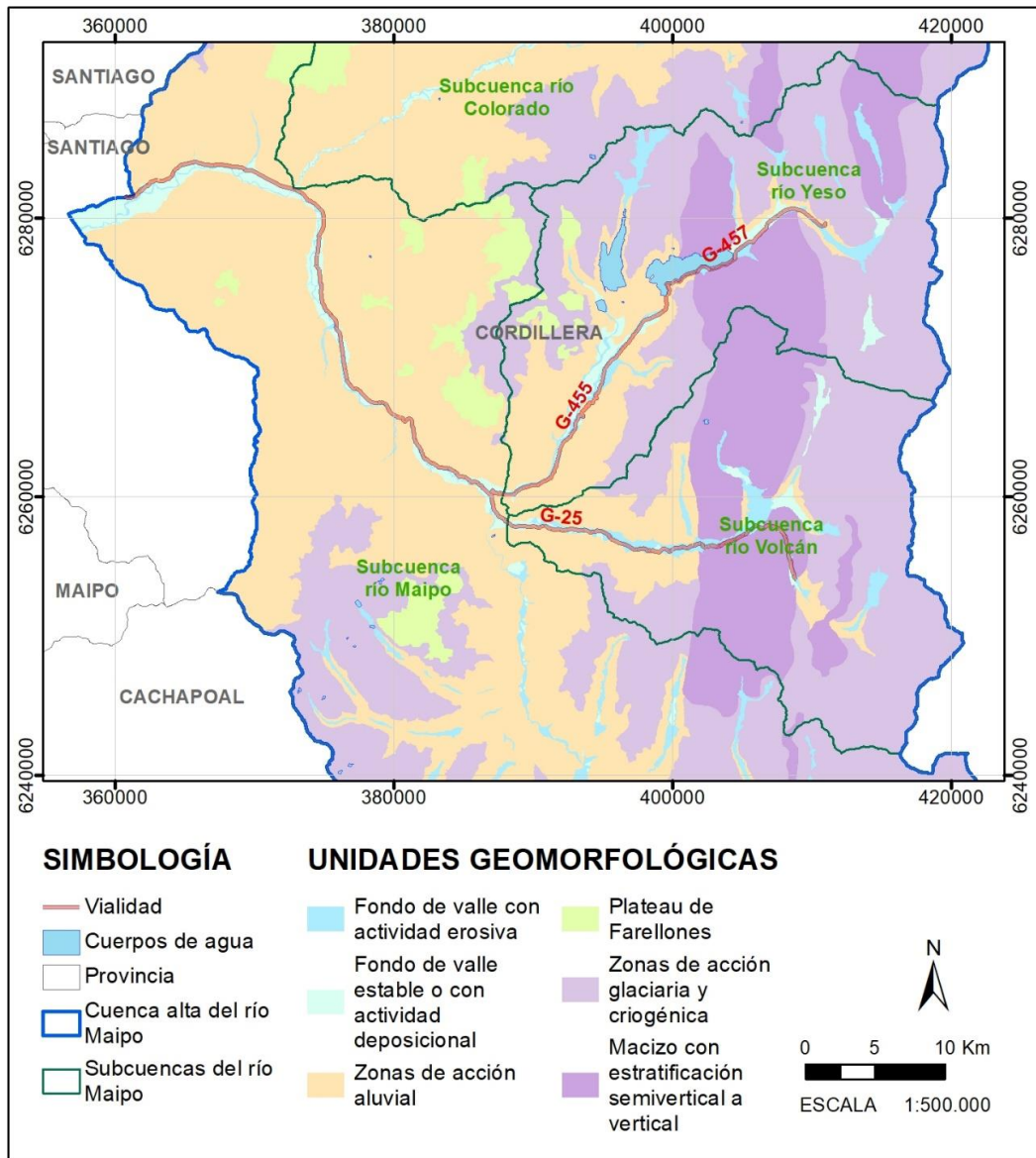


Figura 13: Mapa Geomorfológico de la Cuenca Alta del Río Maipo (Espinoza *et al.*, 2019).

4. ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

4.1 Kilometraje Ruta G-25

La Ruta G-25 conecta el área metropolitana de Santiago con la comuna de San José de Maipo. Los primeros 14 kilómetros están ubicados principalmente entre las comunas de La Florida y Puente Alto.

El balizado del kilometraje de la Ruta G-25 es extraído del trabajo realizado por Muñoz (2016) el cual corresponde al balizado oficial hasta dicha fecha.

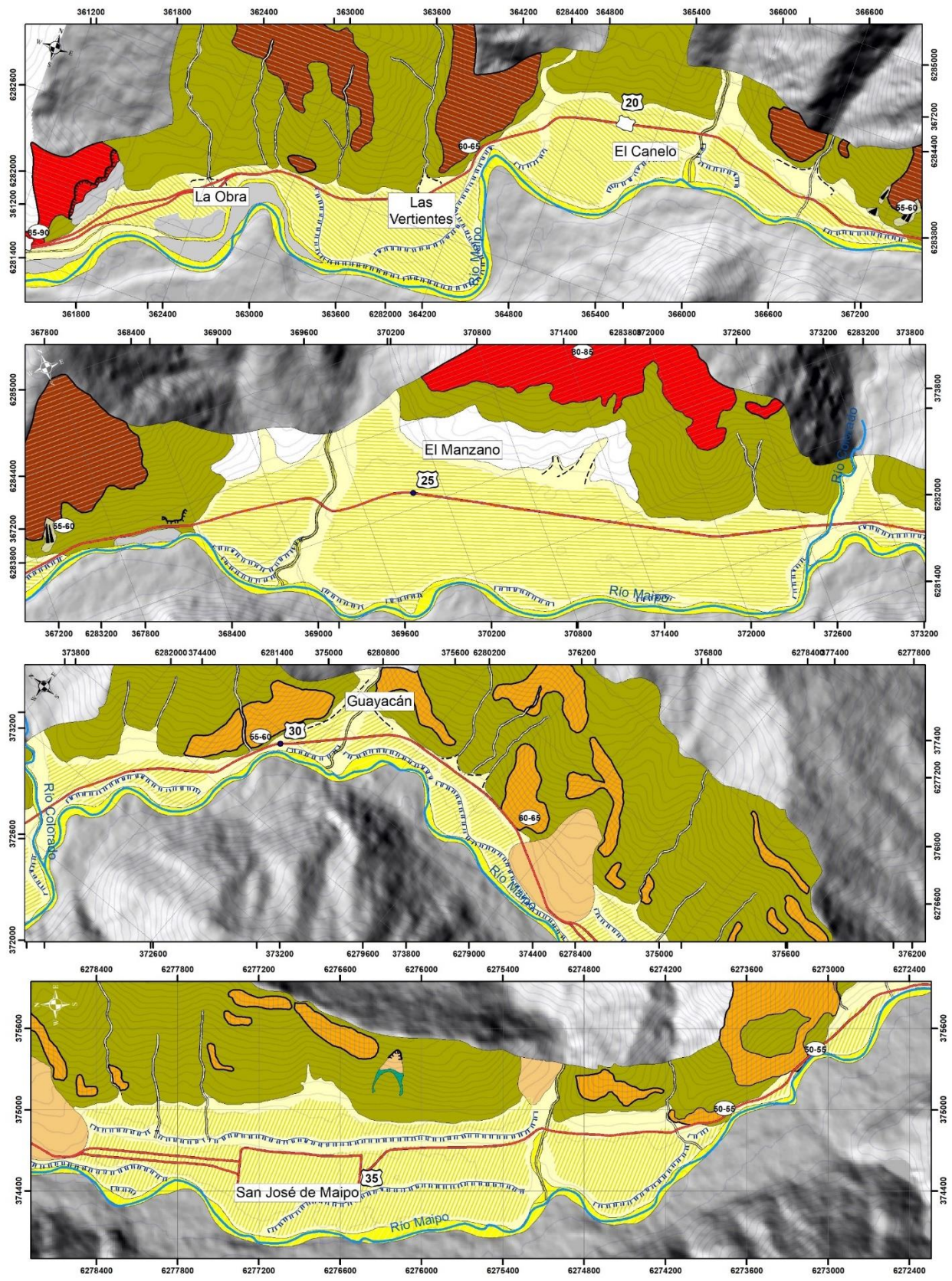
A continuación, se muestran los principales puntos de referencia acorde al balizado de la Ruta G-25 utilizado en este informe.

- **Kilómetro 15** La Obra
- **Kilómetro 20** El Canelo
- **Kilómetro 25** El Manzano
- **Kilómetro 30** Guayacán
- **Kilómetro 35** San José de Maipo
- **Kilómetro 40** Quebrada Las Cucas
- **Kilómetro 45** San Alfonso
- **Kilómetro 50** Puente El Jaboncillo
- **Kilómetro 55** San Gabriel
- **Kilómetro 60** Queltehues
- **Kilómetro 65** El Volcán
- **Kilómetro 75** Las Amarillas
- **Kilómetro 80** Puente Colina
- **Kilómetro 85** Baños Colina

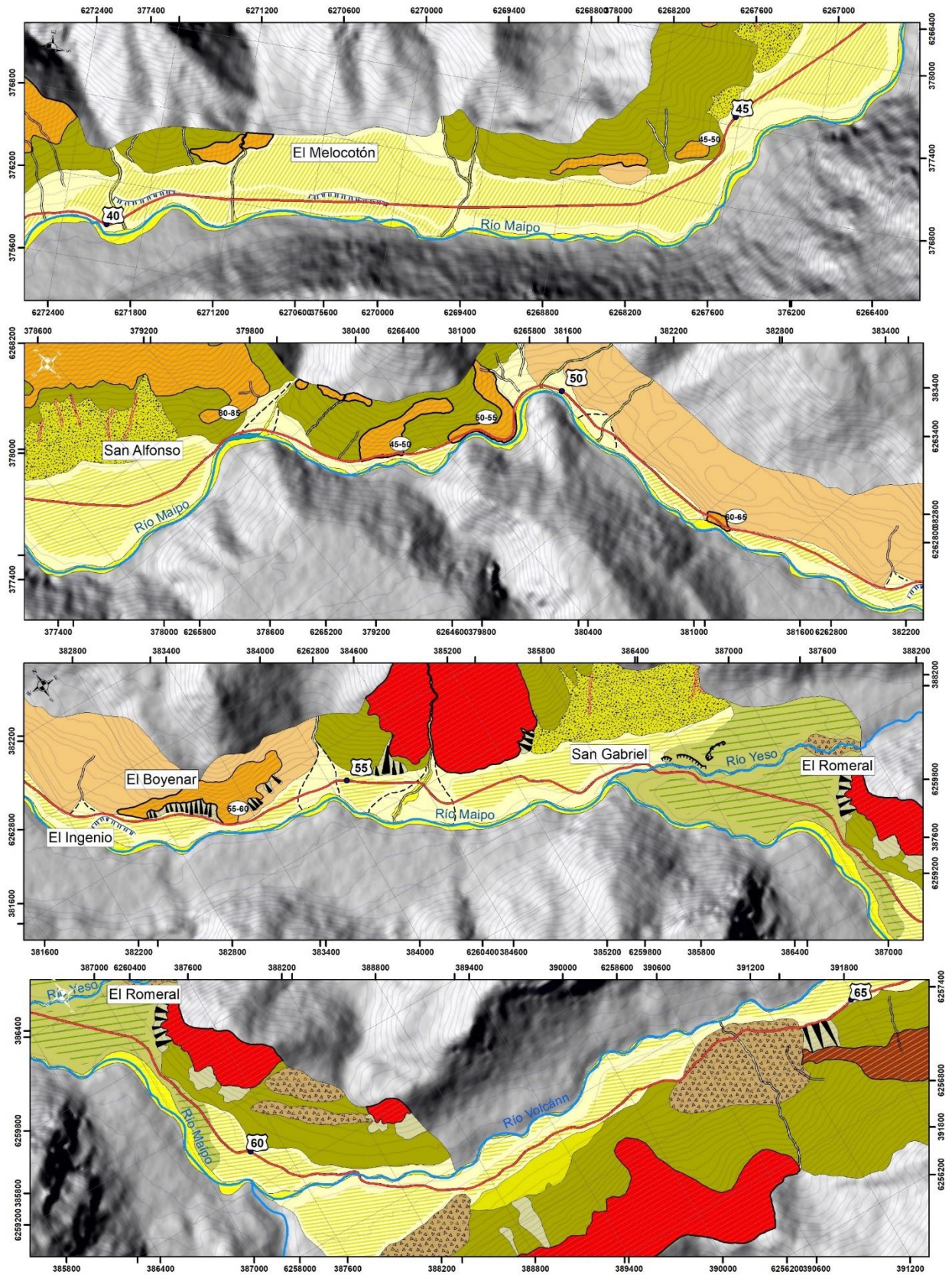
4.2 Geología local

Las unidades geológicas reconocidas en la zona de estudio se pueden agrupar en: Unidades Rocosas y Unidades No Consolidadas. Las primeras corresponden principalmente a rocas Jurásicas, Cretácicas y Paleógenas. Estas han sido descritas y caracterizadas por diversos autores en el área de estudio. El segundo grupo corresponden principalmente a depósitos cuaternarios, no consolidados que han sido depositados por la interacción de procesos exógenos que han modelado el paisaje.

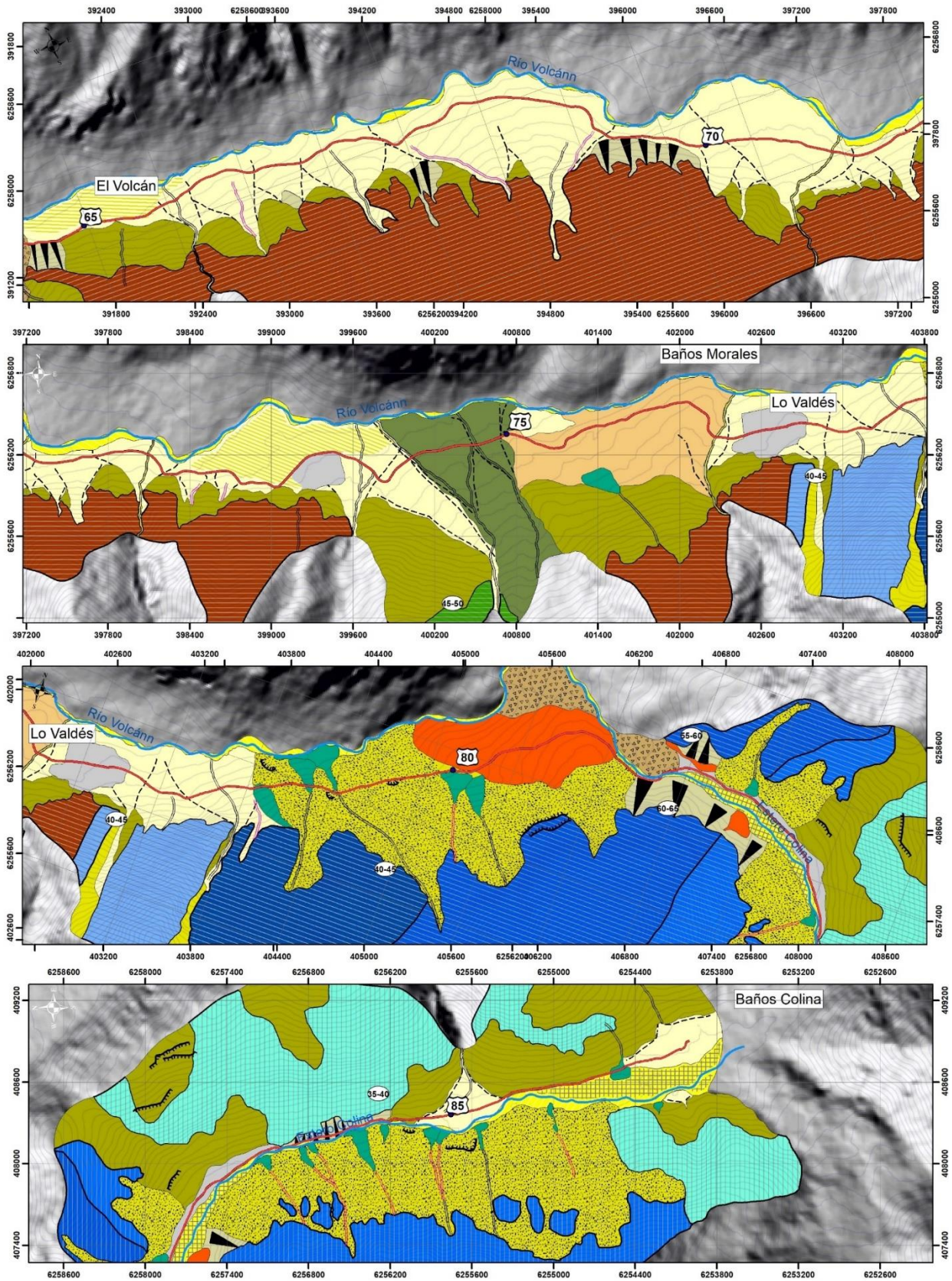
Esta caracterización está acompañada de la cartografía correspondiente, la cual originalmente se realiza a una escala 1:10.000. En el presente informe y por motivos prácticos, los mapas resultantes se visualizan a una escala 1:35.000 en los Mapas 1,2 y 3. La simbología, leyenda y descripción de las distintas unidades se encuentra en las siguientes páginas.



Mapa 1: Mapa Geológico/geomorfológico del área de estudio, asociado a la Ruta G-25. Tramo 1 desde La Obra hasta San José de Maipo. Elaboración propia.

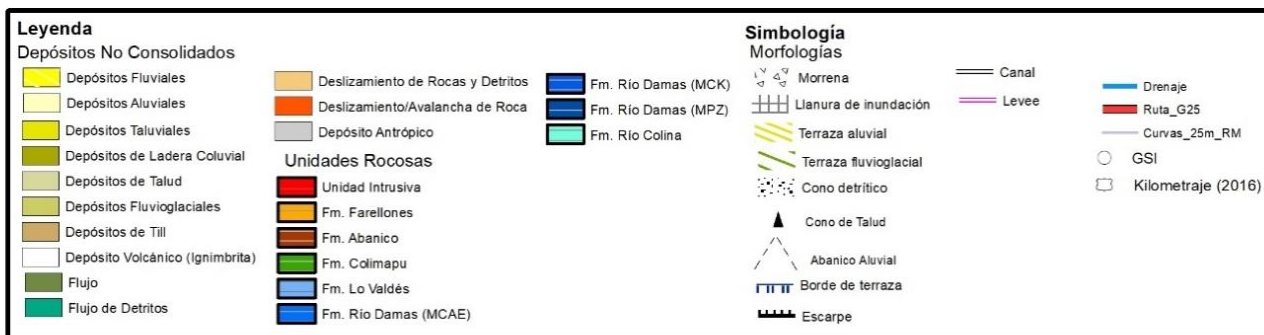


Mapa 2: Mapa Geológico/geomorfológico del área de estudio, asociado a la Ruta G-25. Tramo 2 desde San José de Maipo hasta El Volcán. Elaboración propia.



Mapa 3: Mapa Geológico/geomorfológico del área de estudio, asociado a la Ruta G-25. Tramo 3 desde El Volcán hasta Baños Colina. Elaboración propia.

La leyenda y simbología que acompaña a los mapas 1,2 y 3 se resume a continuación.



En Anexos A se encuentra el Mapa Geológico/Geomorfológico a escala 1:25.000.

4.2.1 Unidades Rocosas

Formación Río Colina

Esta formación agrupa las rocas más antiguas de la zona de estudio. Se puede ver aflorar desde el kilómetro 83 aproximadamente, hasta el final de la ruta, a la altura de Baños Colina. Se distribuye principalmente a lo largo del valle del Estero Colina. Los afloramientos próximos al camino se ven muy fracturados, como se observa en la Figura 14.



Figura 14: Afloramiento rocoso de la Formación Río Colina en el Kilómetro 85 aproximadamente.

La presencia abundante de yeso en esta unidad convierte a sus afloramientos en una zona de potencial generación de remociones en masa por efecto de reptación (Moreno *et al.*, 1991).

Formación Río Damas

Calderón (2008) describe tres miembros en esta formación: Cerro Aguja Escondida (MCAE), Cerro Catedral (MCK) y Punta Zanzi (MPZ).

El MCAE aflora principalmente en la ladera occidental del valle del Estero Colina. Este miembro corresponde principalmente a una secuencia volcánica y volcanoclásticas de carácter continental (Calderón, 2008).

El MCK se puede ver aflorar desde el kilómetro 80 hasta el kilómetro 82 aproximadamente. En este tramo corresponde principalmente a conglomerados/brechas conglomerádicas de tonos rojizos y pardos con alteración clorítica (García, 2016). En la Figura 15 se puede ver un conglomerado rojizo perteneciente a este miembro. Las extensas fracturas planas que cortan los conglomerados y brechas, las cuales tienen una orientación oblicua al fuerte manteo de los estratos y a la abrupta pendiente del terreno, convierten esta área en una zona de potencial generación de remociones en masa del tipo caídas de rocas (Moreno *et al.* 1991).



Figura 15: Conglomerados rojizos pertenecientes al miembro MCK de la Fm. Río Damas. Bloque perteneciente a la avalancha de roca en el Cerro Catedral. Fotografía tomada por Gabriela Tala en curso “Geología de Campo I”, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Finalmente, el MPZ se puede ver aflorar desde el kilómetro 78 hasta el kilómetro 80 aproximadamente. Este miembro está compuesto principalmente por conglomerados, areniscas y areniscas calcáreas.

La actitud estructural de toda la formación es constante en el área de estudio, manteniéndose la verticalidad de sus estratos, variando entre los 70°W hasta alcanzar la verticalidad en algunos sectores.

Formación Lo Valdés

Esta formación se puede ver aflorar desde el kilómetro 77 al 78 aproximadamente, teniendo poca influencia a lo largo de la ruta. La peculiaridad de esta formación rocosa es la verticalidad en los estratos que la conforman, como se muestra en la Figura 16. Esta formación está compuesta principalmente por una secuencia de calizas, calcilitas, areniscas, areniscas calcáreas, conglomerados y brechas (Thiele, 1980).

Según Moreno *et al.* (1991), las calizas tienen en general un buen comportamiento geomecánico, pero las intercalaciones de materiales arcillosos y/o clásticos finos convierten estos afloramientos en zonas inestables, particularmente en este tramo en donde la condición estructural de los estratos es vertical.



Figura 16: Estratificación vertical perteneciente a la Fm. Lo Valdés. Fotografía tomada por Gabriela Tala en curso “Geología de Campo I”, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Formación Colimapu

Esta formación se puede ver aflorar bastante alejada del camino, desde el kilómetro 74 hasta el 75 aproximadamente. Desde la ruta se aprecia un marcado plegamiento, con una estratificación casi vertical (ver Figura 17).

Calderón (2008) describe las rocas que afloran en el área de estudio, las que corresponden principalmente a areniscas rojas de estratificación fina con abundantes diques máficos que cortan la secuencia en diferentes direcciones. Además, se pueden ver intercalaciones de rocas pelíticas de tonos rojizos.

Según Moreno *et al.* (1991) las zonas en donde existen rocas de granulometría fina, como lutitas o areniscas, pueden ser deleznable y pueden deslizarse fácilmente por efectos de la gravedad. Esto se dan sobre todo en aquellas zonas en donde el manto se vuelve repentinamente abrupto



Figura 17: Estratos plegados pertenecientes a la Fm. Colimapu. Fotografía tomada por Gabriela Tala en curso “Geología de Campo I”, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Formación Abanico

Estas rocas se pueden ver aflorar a lo largo de la ruta en tres tramos específicos: el primero desde el kilómetro 15 hasta el kilómetro 24, el segundo desde el kilómetro 63 hasta el kilómetro 74 y el tercero desde el kilómetro 76 hasta el kilómetro 77.

Corresponden principalmente a rocas de origen volcánico de tobas, brechas con intercalaciones de lavas andesíticas y riolíticas, además de presentar niveles de rocas volcanosedimentarias (Moreno *et al.*, 1991). Esta formación en el área de estudio se observa fuertemente plegada. Además, presenta una alta densidad de fracturamiento, lo que convierte a sus afloramientos en zonas bastante inestables.

Formación Farellones

Esta formación se puede ver aflorar a lo largo de la Ruta G-25 desde el kilómetro 26 hasta el kilómetro 55 aproximadamente, cubriendo gran parte del trazado. Junto con las rocas de la Formación Abanico son las que más influencia tienen en la ruta. En la Figura 18 se observa como parte de esta formación aflora muy cerca del camino. Esta unidad está compuesta principalmente por rocas volcánicas del tipo brechas, tobas y lavas, con

presencia de rocas sedimentarias como lutitas y areniscas (Villela, 2015). Esta formación, según Fock (2005) se puede diferenciar de la Fm. Abanico, solo por criterios cronológicos o descripciones detalladas de las litologías correspondientes.



Figura 18: Afloramiento rocoso estratificado perteneciente a la Fm. Farellones en las cercanías de El Boyenar.

A lo largo de la zona de estudio se observa un leve plegamiento de esta unidad. Este se observa muy bien a la altura del puente El Tinoco. Aquí el manteo no suele sobrepasar los 40°.

Unidades Intrusivas

Esta unidad corresponde principalmente a rocas granitoides. Fundamentalmente son rocas granodioríticas y monzograníticas, existiendo también facies dioríticas y gábricas en algunos casos (Moreno *et al.*, 1991). El primero de estos cuerpos plutónicos se encuentra en el poblado La Obra, correspondiente el Plutón homónimo. Luego a la altura de El Manzano, aflora otro cuerpo intrusivo. Finalmente se tiene el Plutón San Gabriel (Figura 19), que tiene la mayor extensión dentro de la zona de estudio. Se puede ver aflorar desde el kilómetro 55 hasta el kilómetro 64 aproximadamente.



Figura 19: Afloramiento rocoso perteneciente el Plutón San Gabriel, aproximadamente en el kilómetro 60.

4.2.2 Unidades No Consolidadas

Según González de Vallejo *et al.* (2002) los depósitos no consolidados están íntimamente relacionado a los procesos de formación, por lo que, identificando su naturaleza formativa, se puede proveer la disposición y geometría del depósito, junto a sus características físicas internas. En la zona de estudio se han reconocido las siguientes unidades no consolidadas:

Depósitos de Talud

Depósito compuesto principalmente por fragmentos de rocas angulosos a sub-angulosos, usualmente mono-litológicos, ubicados espacialmente en la base de laderas rocosas (Figura 20). Poseen escasa matriz, masivos sin estratificación y su granulometría predominante es la arena gruesa, grava o bloques. Se observa cierta gradación desde granulometría más fina en zonas proximales al afloramiento rocoso, hasta partículas más gruesas en zonas más distales. Morfológicamente estos depósitos se pueden presentar como conos de talud.



Figura 20: Depósitos de talud en la base de un afloramiento rocoso perteneciente a la Fm. Farellones. Se puede ver la predominancia de granulometría gruesa que presenta el depósito. Este depósito en particular se encuentra aproximadamente en el kilómetro 54.

Depósitos de ladera coluvial

Esta terminología es nueva en la zona de estudio e incluye a los depósitos coluviales con abundante matriz fina junto a algunas capas de regolito que recubren la matriz rocosa. Esta unidad agrupa los depósitos definidos en la literatura como *colluvium* (Turner, 1996) y unidades de suelo residual.

Estos depósitos generalmente se observan como una masa heterogénea con abundante matriz y bloques angulosos a sub-redondeados inmersos en ella (Figura 21). Se puede presentar con una leve estratificación, aunque según las descripciones hechas por Moreno *et al.* (1991) en la zona de estudio, estos generalmente se disponen de manera masiva. La deposición de esta unidad corresponde principalmente a procesos hidrológicos, gravitacionales y meteóricos.



Figura 21: En ambas imágenes se puede observar los depósitos coluviales de ladera con abundante matriz, desarrollo de suelo y bloques angulosos a sub-angulosos en su interior. La figura inferior corresponde al depósito coluvial de ladera que cubre la ladera este de San José de Maipo, la cual presenta un deslizamiento rotacional activo.

Depósitos Taluviales

Esta terminología es nueva en la zona, y corresponde a un híbrido entre *talus* y *alluvial*. Ha sido usada en otros trabajos para referirse a depósitos coluviales con una importante componente aluvial, principalmente con un aporte de flujos detríticos (Hearn, 2011; Hearn *et al.*, 2012).

Son depósitos mal seleccionados con abundante matriz areno-limosa y en ocasiones limo-arcillosas (Figura 22). Sus clastos son sub-angulosos a sub-redondeados. Se disponen masivamente en las faldas de laderas rocosas. La característica principal de estos

depósitos es su importante componente hidrológico, que genera que el material sea transportado por flujos detríticos a las faldas de las laderas.



Figura 22: Corte transversal a depósito taluvial a la altura del kilómetro 80 aproximadamente.

Depósitos Aluviales

Estos depósitos están ampliamente distribuidos en el área de estudio. Corresponden principalmente a materiales transportados por el agua. Su granulometría es variada, pasando desde arcillas, hasta grandes bloques redondeados. Internamente pueden variar desde facies matriz soportada a clasto soportada. Estos se distribuyen en superficies topográficamente amplias en los fondos del valle principal, como también en quebradas tributarias.

Internamente pueden presentar estructuras sedimentarias acorde a flujos más acuosos y turbulentos, mientras que aquellas facies asociadas a flujos laminares no presentan estructuras sedimentarias, y se observan masivos. Esto último sobre todo se da en la confluencia de quebradas tributarias y valles principales.

Morfológicamente en el área de estudio se presentan como terrazas y abanicos aluviales.

Depósitos Fluviales

Esta unidad corresponde a los depósitos de los ríos principales o esteros tributarios. Estos depósitos se observan bien gradados, con una importante componente areno-gravosa. Presentan escasa matriz. Los esteros pueden presentar flujos aluviales, que aportan una importante cantidad de material fino a los depósitos fluviales recientes.

Depósitos Fluvioglaciales

Estos depósitos fueron descritos por Herrera (2016) en San Gabriel y corresponden a depósitos de regular a mala selección, estratificados con gradación granulométrica

inversa-normal, asociada principalmente a flujos hiperconcentrados proveniente de la fusión glacial (Figura 23). Esta unidad presenta clastos poli-litológicos bien redondeados inmersos en una matriz de arena gruesa a fina.



Figura 23: Depósito fluvio-glacial aterrazado en el poblado de San Gabriel.

Depósitos de Till

Esta unidad está constituida por depósitos diamícticos de clastos angulosos a redondeados, algunos de ellos estriados o con cicatrices, inmersos en una matriz que va desde arenosa a limo-arcillosa (Moreno *et al.*, 1991). La génesis de estos depósitos corresponde principalmente a la erosión y posterior depositación de las lenguas glaciales que avanzaron por los valles en el Pleistoceno.

Depósitos de Ignimbrita

Esta unidad está constituida por cenizas riolíticas de colores claros, principalmente crema, amarillentos ocre, hasta colores prácticamente blancos. Su consistencia es por lo general polvorienta y suelta. Los depósitos más importantes de esta unidad se ubican en ambos flancos de la desembocadura del Estero El Manzano en el valle del Río Maipo (Moreno *et al.*, 1991).

Depósitos de Remoción en Masa

En la zona de estudio, Moreno *et al.* (1991) realizó una caracterización de los principales depósitos de remoción en masa. Se sigue usando la misma subclasificación propuesta por este autor.

- **Deslizamiento de rocas y detritos**

Estos depósitos están constituidos por sedimentos diamícticos, integrado por clastos angulosos de diámetros variados, incluyendo incluso mega-bloques. Estos están inmersos en una matriz predominantemente compuesta por una mezcla de arena-limo-arcilla. Internamente estos depósitos no presentan muestras de estratificación, por lo que se ven masivos. La superficie de estos depósitos suele ser monticulada y/o acordonada. El origen de estos depósitos corresponde a

fenómenos gravitacionales de deslizamientos de grandes masas de rocas y detritos en terrenos de alta pendiente.

En esta categoría también se incluye el depósito activo de deslizamiento rotacional en El Cerro Divisadero.

- **Flujos**

Esta unidad está constituida principalmente por depósitos diamícticos con clastos angulosos a sub-redondeados, de granulometría muy variada. Estos clastos están en una matriz predominantemente areno-limo-arcillosa. El mayor representante de este tipo de depósito está ubicado en la Quebrada Las Amarillas. Debido a la alteración hidrotermal que presenta la fuente, el depósito tiene una importante componente limo-arcillosa, con tonos amarillentos, debido a la alteración argílica penetrativa que sufrió la roca. Este depósito en particular bajó por el flanco sur del valle del Río El Volcán hasta depositarse al fondo el valle.

También en la zona de estudio se destacan pequeños depósitos asociados a flujos detríticos recientes.

- **Deslizamiento o avalancha de rocas.**

Esta unidad está compuesta principalmente por bloques de roca fundamental, los cuales han sufrido solo desplazamientos verticales y rotacionales sin experimentar cambios importantes en su integridad. Estos generalmente son mono-litológicos, mal seleccionados, clasto soportado y con un volumen deposicional variable.

Depósitos Antrópicos

Depósitos acumulados por la intervención humana. Corresponden principalmente a depósitos mal seleccionados, poco cohesivos debido al retrabajo que han sufrido. Presentan granulometría desde bloques a limo-arcilla, con un importante contenido de arena. Los más grandes depósitos de este tipo se encuentran al inicio de la Ruta G-25, en La Obra, en la Yesera al sur del poblado Baños Morales y en el valle del Estero Colina.

4.3 Clasificación del Macizo Rocosos

En distintos tramos a lo largo de la Ruta G-25 afloran unidades rocosas pertenecientes a las formaciones Mesozoicas y Cenozoicas que están presentes en la zona de estudio. Estas unidades mediante estimaciones cualitativas pueden clasificarse por su Índice de Resistencia Geológica o GSI (del inglés *Geological Strength Index*), evaluando las características de fracturación, el tamaño de bloques y las condiciones de las discontinuidades. La Tabla de clasificación e información complementaria de este sistema se pueden encontrar en Anexos B.

La evaluación del GSI puede tomar valores entre 1 y 100, esto permite definir 5 clases de macizos rocosos:

- Macizos de calidad Muy Mala ($1 \leq \text{GSI} \leq 20$)
- Macizos de calidad Mala ($21 \leq \text{GSI} \leq 40$)
- Macizos de calidad Regular ($41 \leq \text{GSI} \leq 60$)
- Macizos de calidad Buena ($61 \leq \text{GSI} \leq 80$)
- Macizos de calidad Muy Buena ($81 \leq \text{GSI} \leq 100$)

Esta clasificación se realiza principalmente para las unidades rocosas que afloran directamente en el trazado de la ruta, o bien aquellas que se encuentren cercanas a esta, con una influencia directa sobre el camino.

En general las unidades intrusivas poseen una calidad que va desde Buena a Muy Buena con GSI que en su mayoría superan los 80. También la Fm. Farellones se expone con una calidad Buena a Muy Buena en algunos tramos, como se ve en la Figura 24.



Figura 24: Afloramiento rocoso perteneciente a la Fm. Farellones junto a su respectiva estimación de GSI.

A la altura del Kilómetro 77 aproximadamente, se observa la estratificación vertical y plegada de la Formación Lo Valdés. A diferencia de las unidades intrusivas, estas rocas sedimentarias presentan una calidad de Regular a Mala, como se ve en la Figura 25. Esto se debe principalmente a la estructura que presenta el macizo rocoso. Se observa plegado y perturbado, con una alta frecuencia de fracturas, aunque conservando los planos de estratificación.

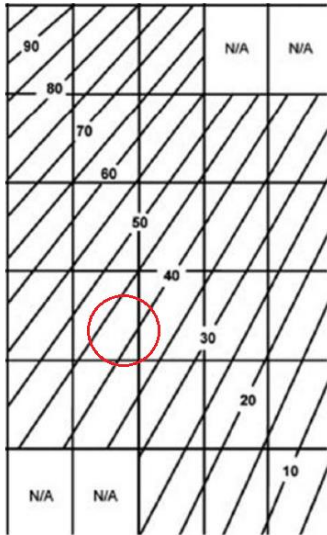


Figura 25: Afloramiento rocoso perteneciente a la Fm. Lo Valdés junto a su respectiva estimación de GSI.

Llegando al Kilómetro 85 aflora muy cerca del camino rocas pertenecientes a la Formación Río Colina, la cual presenta una calidad de Mala a Regular, con una alta frecuencia de fracturas, dándole una estructura desintegrada (ver Figura 26).

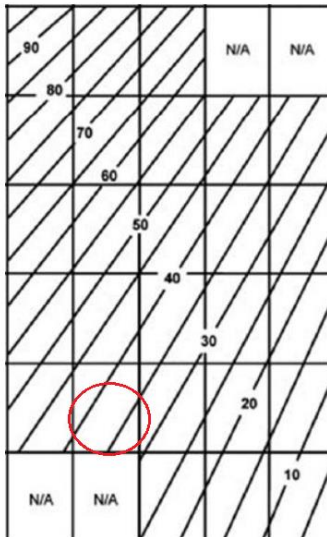


Figura 26: Afloramiento rocoso perteneciente a la Fm. Río Colina junto a su respectiva estimación de GSI.

En el túnel el Tinoco, llegando al kilómetro 50 aproximadamente, afloran rocas pertenecientes a la Formación Farellones, con una calidad Regular a Buena, con una estructura que varía desde fracturada a muy fracturada y con discontinuidades ligeramente meteorizadas y alteradas (ver Figura 27). Esta calidad se ve en casi toda la Formación Farellones, a lo largo del trazado de la ruta.

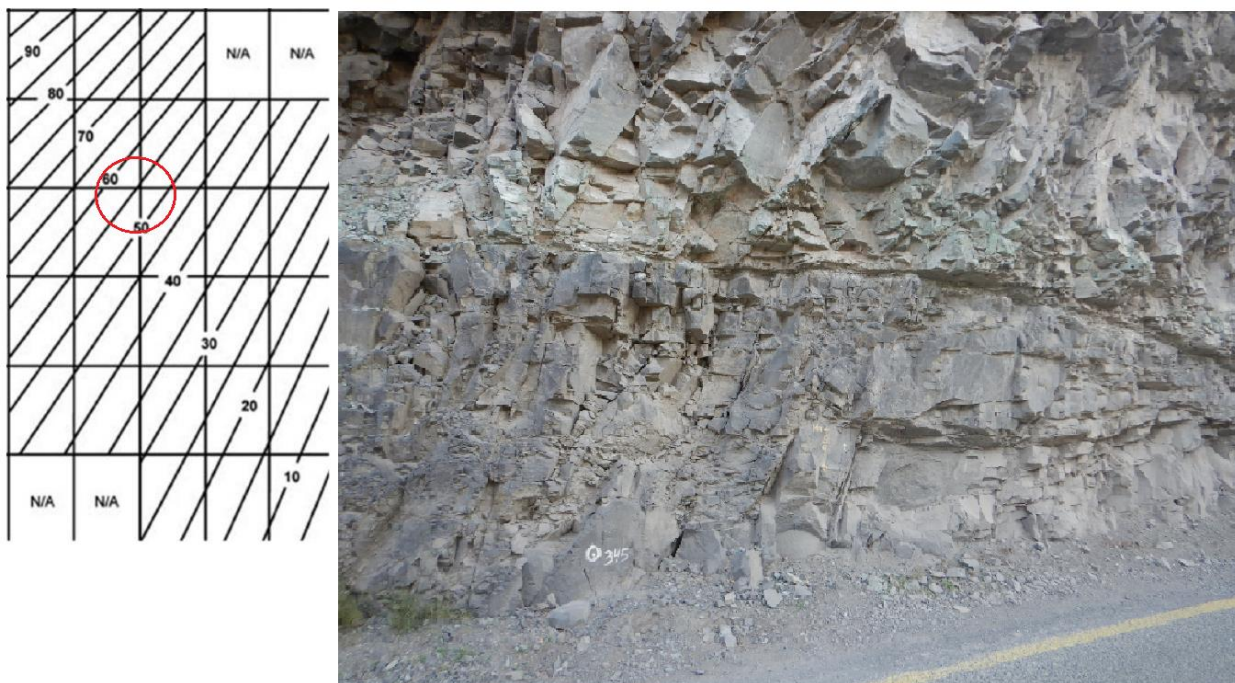


Figura 27: Afloramiento rocoso perteneciente a la Fm. Farellones junto a su respectiva estimación de GSI.

En total se estima el GSI en 20 puntos a lo largo del trazado de la Ruta G-25. Los valores correspondientes y la ubicación geográfica de estos puntos se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 3: Tabla resumen de todos los puntos a lo largo de la ruta en donde se estima el GSI. Elaboración propia.

ID	CoorE	CoorN	Kilómetro	GSI	Unidad
1	361310	6281527	15	85-90	Intrusivo
2	367379	6283931	19	55-60	Fm. Abanico
3	364078	6283211	22	60-65	Fm. Abanico
4	371420	6283837	26	80-85	Intrusivo
5	379252	6266837	30	80-85	Fm. Farellones
6	374990	6279269	31	60-65	Fm. Farellones
7	374174	6281175	37	55-60	Fm. Farellones
8	374950	6273844	38	50-55	Fm. Farellones
9	375388	6273172	45	50-55	Fm. Farellones
10	377197	6267857	47	45-50	Fm. Farellones
11	380073	6265848	48	45-50	Fm. Farellones
12	380685	6265590	49	50-55	Fm. Farellones
13	381628	6263842	51	60-65	Fm. Farellones
14	383223	6262134	54	55-60	Fm. Farellones
15	400252	6255048	75	45-50	Fm. Colimapu
16	402921	6255985	77	40-45	Fm. Lo Valdés
17	404903	6256318	79	40-45	Fm. Río Damas (MPZ)
18	406700	6257447	82	60-65	Fm. Río Damas (MCK)
19	406680	6258011	82	55-60	Fm. Río Damas (MCK)
20	408455	6256366	85	35-40	Fm. Río Colina

4.4 Geomorfología local

A escala de ladera (1:25.000 o mayor) ocurren diversos procesos de meteorización, erosión y transporte de material que como producto final entregan las variadas y diversas geoformas que se observan actualmente en el paisaje. Basándose en estos procesos, Dalrymple (1968) define un modelo del paisaje en nueve unidades (Nine Unit Landscape Model; ver Figura 28). Estas unidades quedan definidas por el proceso que la domina y por un intervalo de pendientes. Gran parte de este modelo define y caracteriza los procesos que se dan en la ladera.

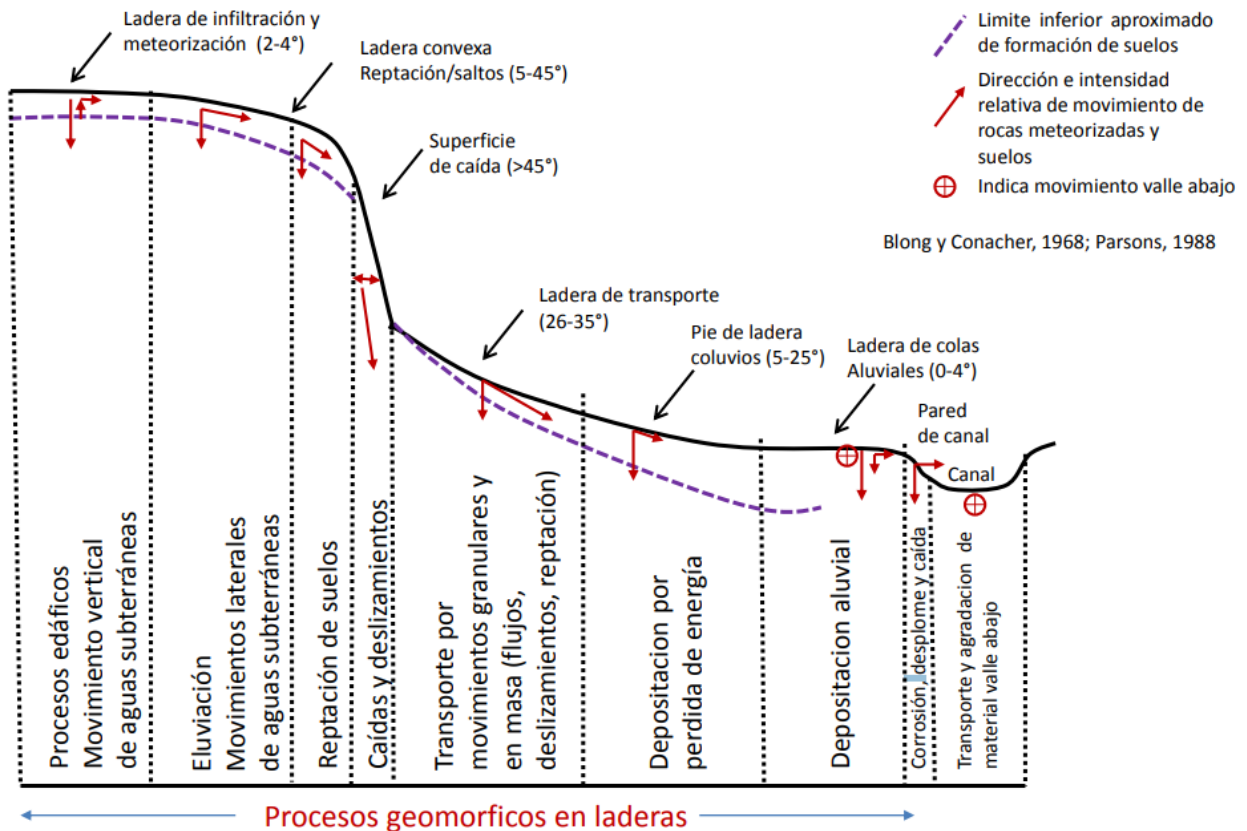


Figura 28: Modelo de Nueve Unidades de Ladera propuesto por Dalrymple (1968).

Tomando este modelo, se realiza un ajuste de los intervalos de pendientes propuesto según los principales procesos observados en el área de influencia alrededor de la Ruta G-25. En la Figura 29 se observa un perfil topográfico esquemático tomando las unidades de ladera que tienen una influencia directa sobre la ruta, junto a los intervalos propuestos en este trabajo.

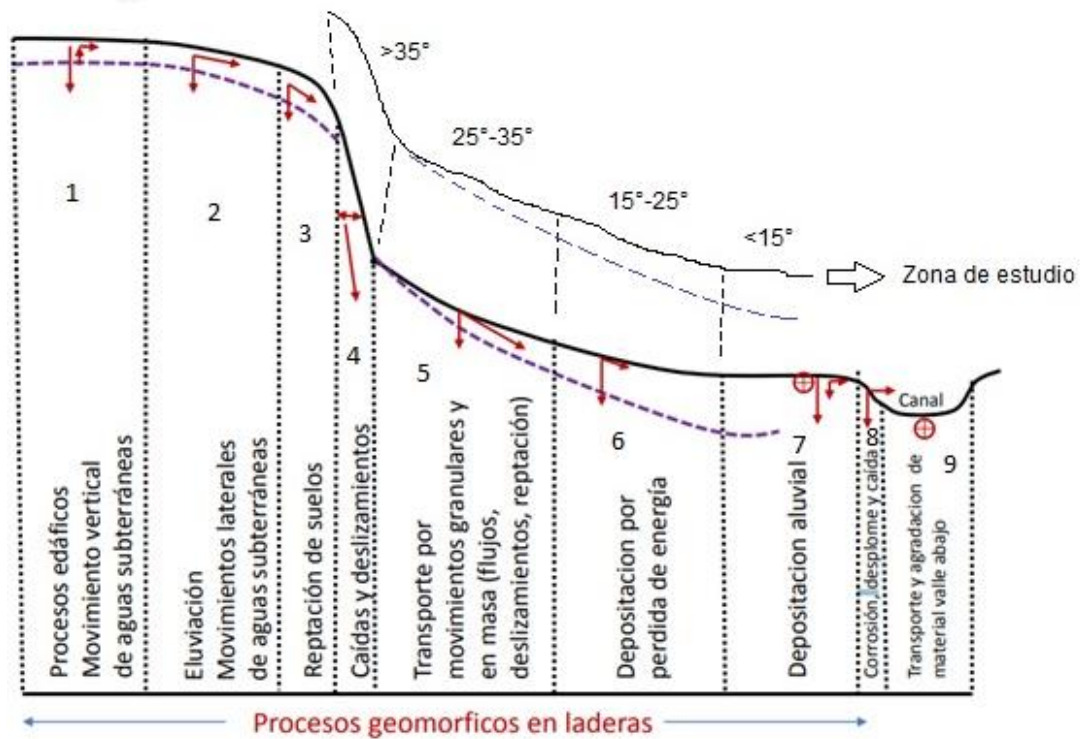


Figura 29: Modelo de Nueve Unidades correlacionadas al perfil topográfico esquemático de la zona de estudio.

Michoud *et al.* (2012) trabajó en Los Alpes evaluando el peligro de caídas de rocas. En este estudio define 4 Unidades Morfológicas de Ladera en base a la pendiente del terreno: Planicie, Pie de ladera, Pendiente Empinada y Acantilado.

Usando los intervalos de pendientes propuestos en la Figura 29, junto a los procesos geomorfológicos correspondiente, se definen 4 Unidades Morfológicas de Ladera, basados en el trabajo realizado por Michoud *et al.* (2012), las cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4: Unidades Morfológicas de Ladera. Elaboración propia.

Unidades Morfológicas	Michoud et al. (2012)	Este trabajo
Planicie	0°-10°	0°-15°
Pie de ladera	10°-23°	15°-25°
Pendiente empinada	23°-46°	25°-35°
Acantilado	46°-90°	35°-90°

El trazado de la Ruta G-25 principalmente se encuentra en las unidades Planicie y Pie de ladera, que están en los niveles topográficos más bajos. Aquí la deposición por pérdida de energía y la deposición aluvial son los procesos dominantes.

En cuanto a las principales geformas observadas a lo largo del trazado se tiene la siguiente figura que ilustra mediante un perfil topográfico de la ruta, los principales dominios geomorfológicos a lo largo de esta.

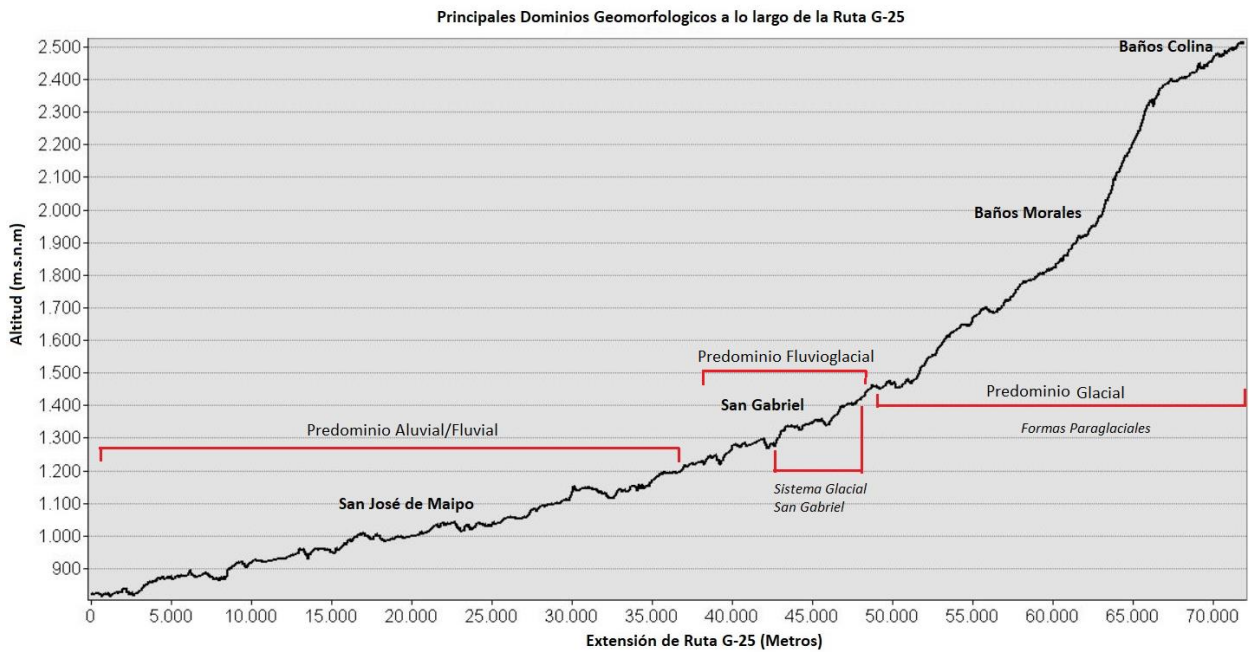


Figura 30: Perfil de elevación de Ruta G-25 junto a los respectivos dominios geomorfológicos a lo largo de esta. Elaboración propia.

Desde el inicio de la ruta en la comuna de San José de Maipo, se reconoce un valle fluvial con amplias terrazas aluviales en las riveras del valle principal. Este se dispone inicialmente con una orientación aproximada Este-Oeste, para luego cambiar su dirección a Norte-Sur. En el tramo comprendido entre San Alfonso y San Gabriel, el valle adquiere una dirección aproximada Noroeste-Sureste. En las laderas de este valle fluvial, se observa una amplia cubierta vegetal con un importante desarrollo de suelo. Otras formas reconocidas en este tramo son las remociones en masa, destacando el deslizamiento en Guayacán, el deslizamiento activo en el Cerro Divisadero y el gran deslizamiento entre San Alfonso y San Gabriel.

Este dominio se observa hasta la conjunción del Río Yeso y el Río Maipo, a la altura de San Gabriel. Aquí Herrera (2016) describe el Sistema Glacial San Gabriel, el que es considerado como el sistema glacial más bajo encontrado en la zona, localizándose a una altitud aproximada de 1.300 m.s.n.m. Esta zona puede considerarse como transicional entre el dominio glacial y el aluvial/fluvial. Aquí coexisten geomorfologías fluvioglaciales, fluviales y aluviales. El rasgo geomorfológico principal del dominio fluvioglacial es la presencia de depósitos de *outwash plain* o planicie de lavado que sigue el flujo del río y se proyecta aguas abajo en la confluencia de los ríos Maipo, Volcán y Yeso.

Río Arriba desde la confluencia del Río Maipo y el Río Volcán, existe un dominio glacial, en donde predominan formas coluviales, glaciales y aluviales. Aquí el valle adopta la típica forma en “U” con laderas rocosas de alta pendiente. Las principales geoformas observadas en esta zona son los conos de detritos, conos coluviales, abanicos aluviales y morrenas, junto a depósitos de remociones en masa.

En la Tabla 5 se resumen las principales morfologías observadas en el área de estudio, junto a sus características principales y su proceso formativo.

Tabla 5: Morfologías identificadas en la zona de estudio junto a su descripción y morfogénesis. Elaboración propia.

Morfología	Descripción	Morfogénesis
Abanico Aluvial	Depósito en forma de abanico. Su superficie es generalmente de baja pendiente (menor a 15°) de perfil plano a cóncavo.	Génesis asociada a procesos aluviales de canales tributarios. Se forman por el desconfinamiento de un flujo. Esta morfología puede estar dominada por la acción de flujos de detritos, flujos de barro o flujos de agua (fluvial). Estos dos últimos generalmente son los que menor pendiente presentan (<10°). Por el contrario, los abanicos dominados por flujos de detritos, presentan mayor pendiente (>10°).
Terraza Aluvial	Superficie plana con pendientes menores a 10° ubicadas en los costados (o riveras) de cursos de agua en valles principalmente fluviales. Se encuentran topográficamente en niveles superiores al curso actual de agua.	Dependiendo del tipo de terraza, tendrán una génesis distinta. Están las terrazas agradacionales construidas debido al relleno del cauce y las degradacionales debido a la erosión en el lecho del río.
Canales Incisos	Superficie cóncava alargada bien confinada.	Se forman producto de la erosión de un flujo.
Planicie de Lavado (aterrazada)	Superficie plana con pendiente menor a 10° ubicadas en los costados de los cursos de aguas actuales.	Formadas por procesos fluvio-glaciales, es decir, ambientes en donde predominan la acción fluvial sobre la glacial, sin embargo, esta acción fluvial está directamente relacionada a la fusión glacial, aumentando los flujos de descargas y los caudales de los ríos principales.
Llanura de Inundación	Superficies planas con pendientes menores a 5° ubicadas inmediatamente al costado de los cursos de aguas actuales.	Se forman producto de la depositación fluvial, pero que debido a una baja del caudal o el aumento del poder erosivo, han quedado levemente alzadas. Sin embargo, estas superficies pueden ser inundadas durante la crecida del río.

Morfología	Descripción	Morfogénesis
Morrena	Superficies monticuladas o alargadas, de perfil convexo.	Formados por la depositación de la carga sedimentaria que arrastra un glaciar.
Cono de Talud (<i>talus cone</i>)	Depósito en forma de cono con un perfil rectilíneo a cóncavo en su superficie. Ubicados al pie de laderas rocosas. Se forman con pendientes entre 25° y 35° aproximadamente.	Se forman principalmente producto de la caída de rocas desde un afloramiento rocoso que los subyace.
Cono Detrítico (<i>debris cone</i>)	Depósito en forma de cono con un perfil irregular a convexo en su superficie. Se forman con pendientes entre 15° y 35° aproximadamente.	El principal proceso generador de esta morfología son los flujos detríticos, aunque en zonas de alta montaña, pueden tener una importante influencia de avalanchas de nieve y caídas de rocas. Estos conos se forman generalmente al pie de quebradas o canales tributarios de alta pendiente.
Levee	Acumulación de sedimentos en forma de crestas o lomas adyacentes a un canal.	Se forman por el avance de un flujo, el cual colmata su canal de transporte y deposita parte de su carga, fuera de este.
Escarpe	Quiebre abrupto de la pendiente del terreno.	La génesis puede ser muy variada. En particular se destacan los escarpes asociados a bordes de terrazas y los escarpes de deslizamientos.

Las morfologías que predominan en el valle del Río Volcán son principalmente paraglaciales, en particular abanicos aluviales, conos detríticos y conos de talud. Brazier (1988) estudió en las *Highlands* de Escocia, las características principales de estas morfologías, relacionándolos evolutivamente en el modelo que se expone en la Tabla 6.

Tabla 6: Modelo para abanicos y conos propuesto por Brazier (1988).

	Cono de Talud	Flujos detríticos modifican el Cono de talud	Cono Detrítico	La acción aluvial/fluvial modifica el Cono Detrítico	Abanico Aluvial
Proceso Dominante	Caidas de Rocas		Flujos de Detritos		Fluvial
Pendiente promedio	25°-35°		12°-35°		1°-10°

Desde el kilómetro 65 hasta el kilómetro 79 aproximadamente existe un predominio de abanicos aluviales. Estos por lo general presentan pendiente suave, menor a 15°. Luego, desde el kilómetro 79 hasta el final de la ruta existe un predominio de conos detríticos y conos de talud. En la Figura 31 se puede ver un cono detrítico en la ladera sur del valle del río El Volcán, a la altura del kilómetro 80. En rojo se destaca un lóbulo activo, perteneciente a un flujo detrítico. En azul también se destaca la existencia de bloques, producto de caídas de rocas desde el talud rocoso que sobreyace al cono detrítico.



Figura 31: Cono detrítico. En rojo se destaca un lóbulo formado por un flujo detrítico que desciende ladera abajo por el canal destacado con la flecha amarilla. También se destacan en azul bloques que han sido desprendidos desde el afloramiento rocoso que subyace al depósito, perteneciente a la Fm. Río Damas.

En la Figura 32 se observan múltiples conos detríticos ubicados en la ladera norte del poblado San Gabriel. Se puede observar cómo los canales tributarios que alimentan los conos presentan una pendiente mayor, en particular el cono que se destaca al extremo derecho de la figura, en donde sus canales fácilmente superan los 60°.

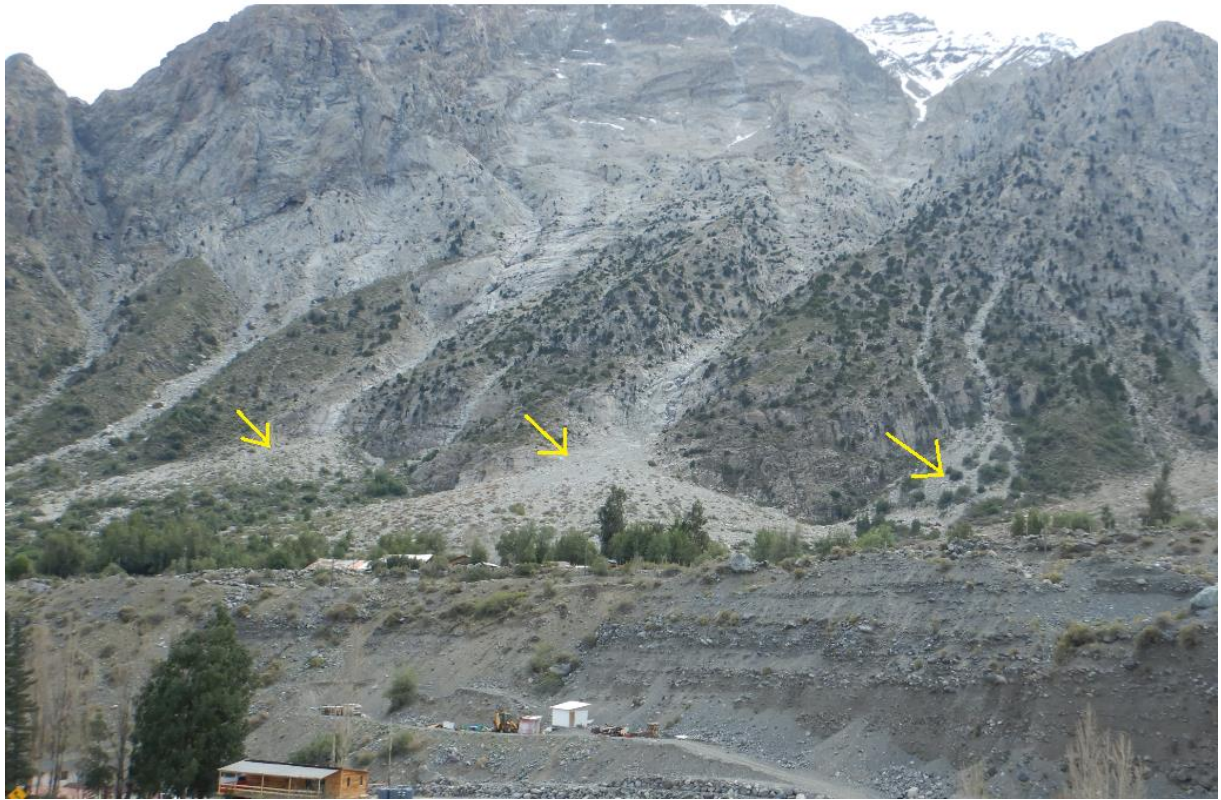


Figura 32: Conos detríticos en San Gabriel.

4.5 Remociones en masa en ruta G-25.

4.5.1 Identificación y caracterización

A lo largo de la ruta, se identifican y caracterizan los diferentes tipos de remociones en masa presentes en el área y que puedan afectar al trazado vial. Estos son los siguientes:

- Deslizamientos de suelo
- Caídas de rocas
- Flujos aluviales

Deslizamientos de suelo

En el área de estudio se identifican deslizamientos traslacionales de roca y suelo, y rotacionales de suelo.

En la Figura 33 se observa un corte de ruta, construido sobre el depósito de un deslizamiento ubicado al Norte de San José de Maipo. Este depósito fue descrito por Rebolledo *et al.* (2000) asignándole un área de 0,5 km². Actualmente, este deslizamiento se encuentra inactivo y estabilizado (Rebolledo *et al.*, 2000), sin embargo, el depósito se presenta como una potencial fuente de desprendimientos de bloques a la ruta.



Figura 33: Depósito de deslizamiento rotacional, ubicado al Norte de San José de Maipo, kilómetro 33 aproximadamente. (CoorE:374686; CoorN:6278517; WGS 84 Zona 19S)

Pasado el kilómetro 80 de la ruta, se observan grandes bloques métricos provenientes de un deslizamiento traslacional de roca en el Cerro Catedral (Figura 34) probablemente desencadenado por un sismo cortical (González, 2010; García, 2016; Saavedra, 2018). Con los criterios aplicados en el presente estudio, se considera este tipo de remoción en masa, como un proceso de avalancha rocosa, el cual fue desencadenado por un deslizamiento traslacional en el Cerro Catedral. Esta zona es altamente susceptible a la generación de este tipo de procesos.



Figura 34: Planos de deslizamiento en Cerro Catedral, junto al consecuente depósito generado por este. Depósito ubicado en el kilómetro 80 aproximadamente. Fotografía original tomada por Gabriela Tala en curso “Geología de Campo I”, Depto. de Geología, Universidad de Chile. (CoorE:405783; CoorN:6257460; WGS 84 Zona 19S)

En este mismo sector, también se observan escarpes de deslizamientos en los depósitos taluviales colindantes a la ruta (Figura 35). Estos pueden ser una fuente de material que eventualmente podrían obstaculizar el paso normal de automovilistas y peatones, y en el peor de los escenarios, afectar directamente a la vida de estos.



Figura 35: Escarpe observado en depósitos taluviales en el kilómetro 79 aproximadamente. Se observa que actualmente se encuentra activo (CoorE:404384; CoorN:6256772; WGS 84 Zona 19S)

Caídas de rocas

Con una inspección visual de la ruta, se identifican diversos puntos en donde existen caídas activas de rocas, como lo muestra la Figura 36. Estos se reconocen básicamente con la presencia de bloques de distintos tamaños en la base de taludes rocosos o bien, de depósitos clásticos. Como característica general, se identifican bloques angulosos, principalmente mono-litológicos, asociados a la fuente y con evidencia de poco transporte.



Figura 36: Acumulación de bloques a orillas del camino en el kilómetro 49 aproximadamente (CoorE:380816; CoorN:6265384; WGS 84 Zona 19S).

En algunos casos, la fuente se encuentra alejada del camino, pero existen bloques muy cercanos a la ruta, con la misma litología que la fuente. Esto evidencia una zona altamente susceptible al alcance de estos procesos, como lo muestra la Figura 37. Esto se da especialmente pasado el kilómetro 65, en donde el valle se ensancha y las laderas rocosas se observan más distantes al camino, debido a la acción glaciario previa.



Figura 37: Bloques métricos a orillas de la ruta, en el kilómetro 78 aproximadamente. Misma litología que pared rocosa a al sur del camino. (CoorE:403467; CoorN:6256403; WGS 84 Zona 19S).

Flujos aluviales

Dentro de la zona de estudio se identifican numerosos depósitos asociados a procesos del tipo flujo aluvial, principalmente flujos de barro y/o detritos, como el que se observa en la Figura 38 a la altura del kilómetro 79 aproximadamente. Este flujo proviene de quebradas tributarias al sur del valle del Río Volcán y atraviesa la ruta en el punto antes mencionado.

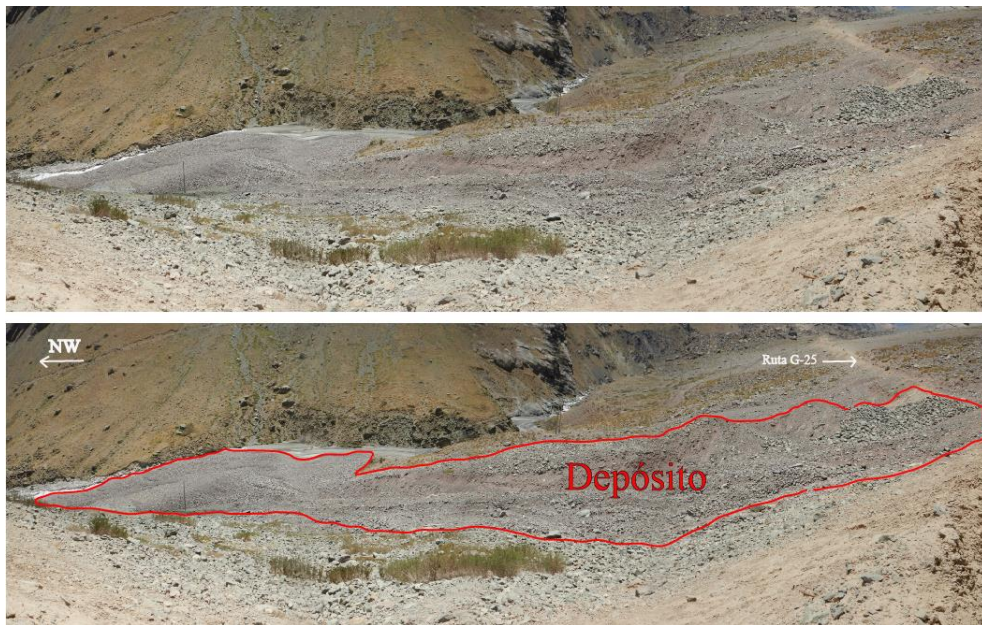


Figura 38: Depósito de flujo detrítico reactivado el año 2017, Valle del Río Volcán (CoorE:404229; CoorN:6257037; WGS 84 Zona 19S).

Otro punto en donde se identifican depósitos de flujos aluviales recientes es en Las Amarillas, a la altura del kilómetro 75 aproximadamente. En este sector existe un constante retrabajo del material movilizado por una antigua remoción en masa. En la Figura 39 se observa un cauce activo que baja desde las zonas altas, hasta llegar al Río

Volcán. Se observan también depósitos correspondientes a flujos detríticos que han afectado a este sector.



Figura 39: A la izquierda cauce activo en Las Amarillas. A la derecha depósitos detríticos re-movilizados por actividad reciente (CoorE: 400615; CoorN: 6256301; WGS 84 Zona 19S).

Son diversos los puntos en donde se tiene el registro geológico de la ocurrencia de flujos aluviales, dentro de los que se pueden mencionar el Estero El Manzano, en El Manzano, Estero Las Cucas, en El Melocotón, el Estero San Alfonso, al sur de San Alfonso, y gran parte de las quebradas tributarias en el valle del Río Volcán, entre otros.

4.5.2 Catastro

El catastro de remociones en masa se realiza principalmente en base a una recopilación de antecedentes con una posterior validación en terreno. Los eventos que se incluyen en este catastro pueden dividirse en dos grupos:

- Eventos cuya fecha de ocurrencia se tiene identificada.
- Eventos cuya fecha de ocurrencia no se tiene identificada.

Para el primer grupo se cuenta con el trabajo realizado por Muñoz (2016) a lo largo de la ruta G-25. Este incluye un catastro que se realiza con la colaboración del Ministerio de Obras Públicas (MOP) en el que se identifican distintos puntos, en donde han ocurrido remociones en masa, con la fecha aproximada de su ocurrencia. Además, esta información se ve complementada con la investigación en prensa, en donde diversos medios de comunicación han documentado la ocurrencia de remociones en masa que han afectado a la ruta G-25.

Para el segundo grupo, se tienen los eventos reconocidos mediante fotointerpretación de imágenes satelitales y/o observaciones de terreno.

Los campos utilizados para realizar el catastro son los siguientes:

- Fecha
- Coordenada X
- Coordenada Y
- Punto de referencia

- Kilómetro (perteneciente a la ruta)
- Tipo de remoción en masa (caída, deslizamiento o flujo)
- Remoción en masa específica (caída de bloques, deslizamiento de suelo, flujo de detritos, etc)
- Agente desencadenante
- Observaciones
- Fuente (de la información)

En la Figura 40 se puede observar la distribución espacial que tienen los eventos catastrados a lo largo de la Ruta G-25, indicando también el tipo de remoción en masa caracterizado. En el Anexo C se puede encontrar el detalle de todos los puntos registrados en el catastro.

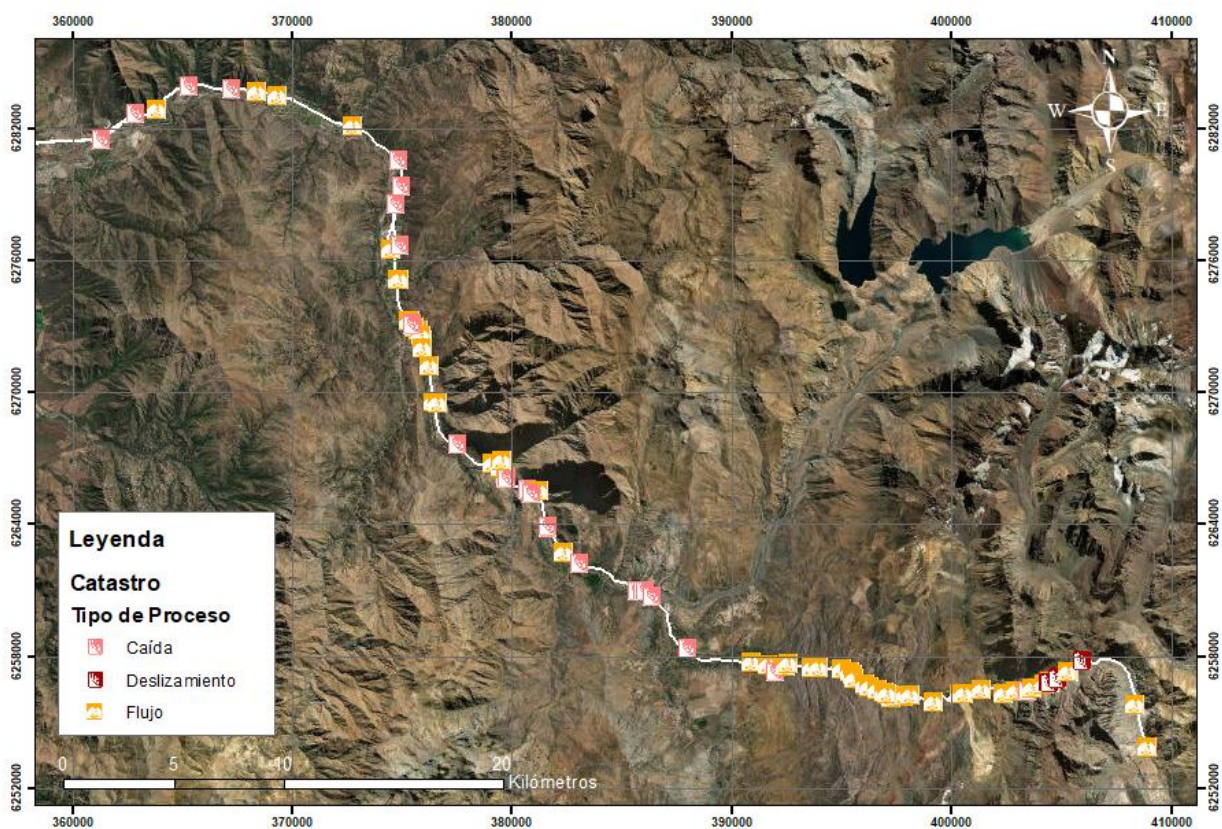


Figura 40: Mapa con la representación visual de la ubicación espacial de los distintos fenómenos de remoción en masa identificados en la Ruta G-25. Elaboración propia.

4.6 Clima

4.6.1 Fuente de la información

Para poder caracterizar el clima de una región se deben identificar las distintas fuentes de información cercanas al área de estudio. A lo largo de la ruta G-25, se tienen distintas estaciones meteorológicas, pertenecientes a entidades públicas. En la Figura 41 se puede apreciar la distribución espacial de estas estaciones, con respecto al área de estudio.

Estas estaciones pertenecen en su mayoría a la Dirección General de Aguas (DGA) y solo una pertenece a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Las estaciones cuentan con acceso público a gran parte de su base de datos. De ellas se busca extraer datos históricos de la última década tanto de precipitaciones como de temperaturas (ver Tabla 7).

Los datos que se analizan corresponden a un horizonte temporal de aproximadamente 9 años a partir del 2011.

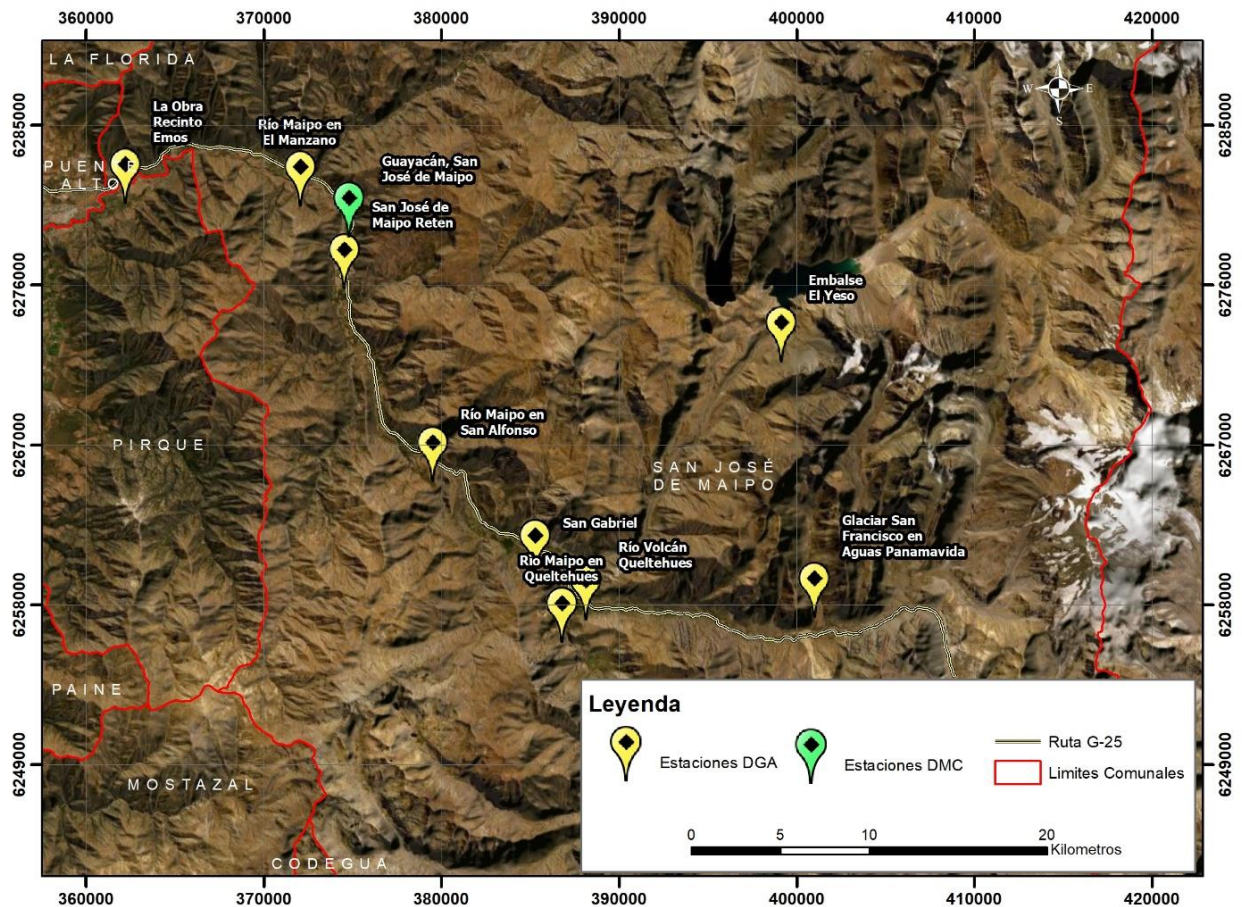


Figura 41: Estaciones meteorológicas consultadas en el presente trabajo. Elaboración propia.

Tabla 7: Detalle de la información extraída de cada estación meteorológica. Elaboración propia.

Estación Meteorológica	UTM		Entidad a cargo	Información útil
	CoorE	CoorN		
La Obra Recinto Emos	362190	6282161	DGA	Precipitación acumulada mensual (2011-2019)
Río Maipo en el Manzano	312019	6281633	DGA	Precipitación acumulada mensual (2011-2019)
Guayacán	374759	6280268	DMC	Temperaturas Diarias Extremas (2018)*
Reten San José de Maipo	374166	6277328	DGA	Precipitación acumulada mensual (2011-2019)
Río Maipo en San Alfonso	379470	6266472	DGA	Precipitación acumulada mensual (2011-2019)
San Gabriel	385248	6261273	DGA	Precipitación acumulada mensual (2011-2019)
Río Volcán en Queltehues	387971	6258289	DGA	Precipitación acumulada mensual (2014-2019)
Glaciar San Francisco	400956	6258861	DGA	Precipitación acumulada mensual (2015-2019)
Embalse El Yeso	399081	6273246	DGA	Precipitación acumulada mensual (2011-2019) y Temperatura Diarias Extremas (2015)*

Las estaciones meteorológicas que miden la temperatura del ambiente son escasas en la zona. Solo se cuenta con un registro continuo de la estación Guayacán de la DMC para el año 2018. Mientras que, en la parte alta de la cuenca, se tiene el registro continuo de temperaturas mínimas y máximas en la estación El Yeso (DGA) para el año 2015. Por otro lado, la medición de precipitaciones se hace de manera continua, y se cuenta con un amplio registro histórico.

4.4.2 Caracterización climática

La siguiente caracterización climática tiene por objetivo conocer los parámetros meteorológicos que pueden llegar a favorecer la ocurrencia de algún proceso de remoción en masa. Estos parámetros en su mayoría son las precipitaciones y las oscilaciones térmicas en el ambiente.

La Ruta G-25 se encuentra ubicada en la Cuenca Alta del Río Maipo en Chile central. Esta zona en particular se caracteriza por un clima del tipo templado. En esta parte del territorio nacional, las condiciones climáticas se presentan más moderadas, combinando un monto considerable de precipitaciones con una mayor amplitud de distribución de estas. Las lluvias tienden a concentrarse en los meses de inviernos fundamentalmente (Biblioteca del Congreso Nacional.SIIT, s.f.) como se puede apreciar en la Figura 42, en donde se observa que las precipitaciones en la última década se han concentrado entre los meses de mayo y agosto, principalmente.

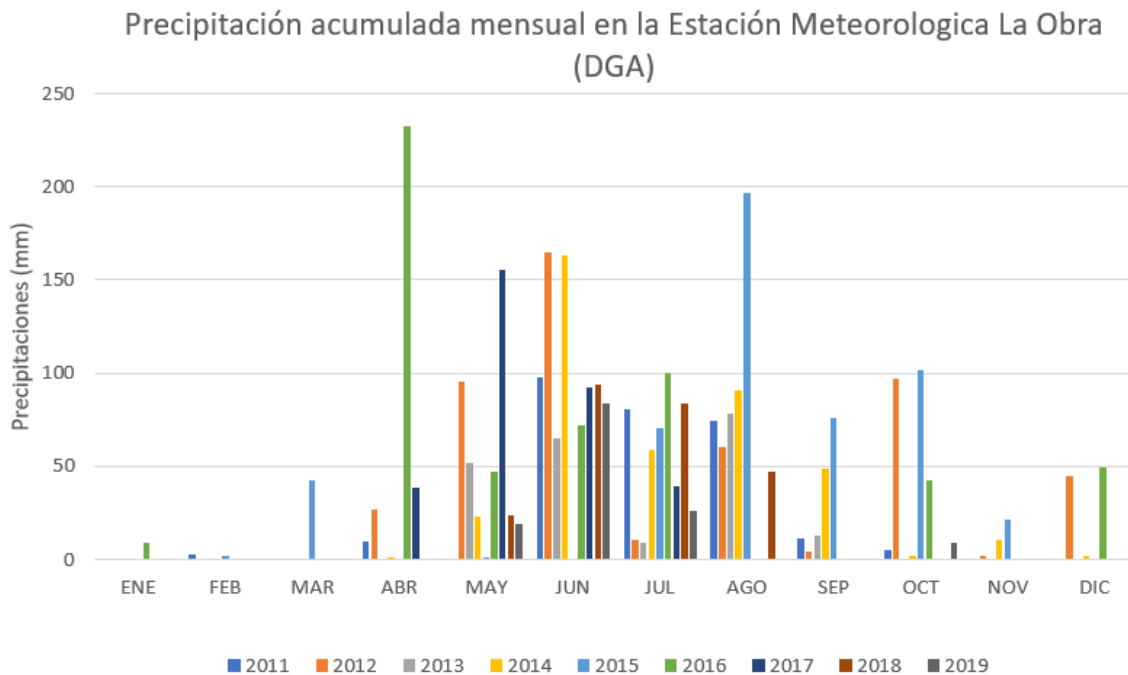


Figura 42: Precipitación acumulada mensual en la Estación Meteorológica La Obra (796 m.s.n.m.) desde el año 2011 hasta el año 2019. Elaboración propia.

Complementando lo dicho anteriormente, se incluye la siguiente tabla mostrando la precipitación acumulada mensual para cada estación meteorológica cercana al área de estudio.

Tabla 8: Precipitación acumulada anual (mm) desde el año 2011 al año 2019.

Estación Meteorológica	Altitud (m.s.n.m)	Precipitaciones (mm)								
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
La Obra Recinto Emos	796	282	505,3	216,7	399,3	510,8	553,3	325,5	248,8	140,1
Río Maipo en el Manzano	850	208,8	386,8	317,9	259,6	388,6	470,1	106,2	121,8	90,2
Reten San José de Maipo	943	224,5	480,5	346,7	260,8	391,4	373,2	245,9	141,5	82,2
Río Maipo en San Alfonso	1092	118	415,7	642	227,6	406,2	270,7			
San Gabriel	1266	304,5	437	357,3	277,1	391,2	387,9	157,3		72
Río Volcán en Queltehues	1365				336,8	681,8	672	366,6	157,4	71,6
Glaciar San Francisco	2220					200,7		36,8	19,8	80,2
Embalse El Yeso	2478	323,1	501,5	484,6	302,3	515,8	402,3	237,1	201,7	110,9

En ocasiones, como ocurrió el año 2013, se dan casos excepcionales de lluvias estivales, conocidas como tormentas de verano. Estos eventos climáticos, son el desencadenante perfecto para fenómenos de remoción en masa. La mayoría de las precipitaciones de este estilo se dan de manera limitada, atribuidas a celdas convectivas que causan precipitaciones de corta duración, pero de alta intensidad, las cuales son tan puntuales, que en ocasiones no son captadas por las estaciones meteorológicas (Sepúlveda, 2014). Estos fenómenos en su mayoría generan flujos de detritos y/o de barro, aunque también se producen fenómenos del tipo derrumbe y avalancha de escombros.

Durante el desarrollo de tormentas, la altitud de la isoterma 0°C delimita las zonas que recibirán lluvia (bajo la isoterma) o nieve (sobre la isoterma). Garreaud (2017) analizó la altitud de la isoterma 0°C durante el desarrollo de estos eventos climáticos. En promedio se encuentra a una altitud de 2.200 m.s.n.m., pero la distribución es amplia: en algunos casos fríos esta llega a una altitud de los 1.500 m.s.n.m. y en otros casos más cálidos se

posiciona por encima de los 3.500 m.s.n.m. En los últimos eventos de precipitación extrema, como por ejemplo el año 2017 en Chile central, la isoterma 0°C llegó a una altitud de 3.400 m.s.n.m. triplicando el área pluvial promedio, y desencadenando una serie de flujos que bajaron hacia el fondo del valle, generando un gran impacto en la ruta.

En cuanto al desarrollo de estos procesos de remoción en masa, varios de ellos se asocian a precipitaciones ocurridas en un periodo relativamente breve, de no más de tres días o en ocasiones incluso en 24 horas. Si se analizan las precipitaciones acumuladas mensuales, estos eventos de rápida ocurrencia no quedan registrados idóneamente.

En las zonas cordilleranas se presentan oscilaciones térmicas importantes. Ocurre que durante el día la temperatura se mantiene por sobre los 0°C, pero al caer la noche, el termómetro baja considerablemente, alcanzando valores negativos. Estas fluctuaciones de temperatura se ven reflejadas como ciclos de congelamiento y descongelamiento los cuales se dan principalmente en épocas invernales. Este fenómeno conlleva a una meteorización mecánica de las unidades rocosas, principalmente. Las altas variaciones de temperatura entre el día y la noche conllevan a que la roca presente fuertes contracciones (bajas temperaturas) y dilataciones (altas temperatura). Este comportamiento provoca que se desarrollen grietas, implicando un deterioro en la calidad del macizo rocoso. Estos mismos cambios de temperatura, pueden propiciar fenómenos tales como la crioclastia o la gelifracción.

La Figura 43 muestra las oscilaciones térmicas que se generan en Guayacán y en El Yeso. Se observa claramente que, en los meses invernales, estas fluctuaciones termales se acentúan, sobre todo en cotas de mayor altitud, como es el caso del Embalse El Yeso.

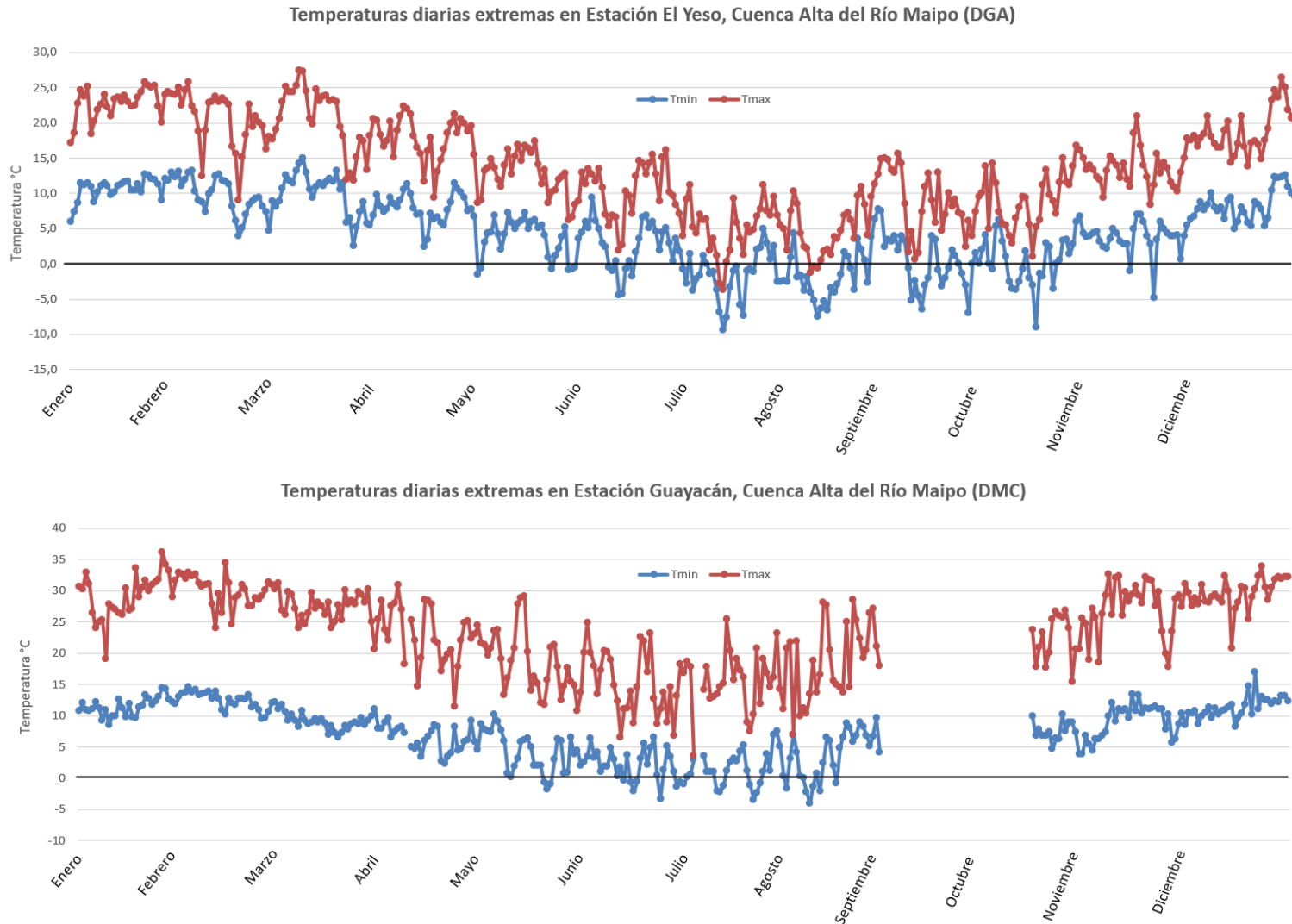


Figura 43: Temperaturas diarias extremas (mínimas y máximas) medidas en las Estaciones Guayacán (900 m.s.n.m.) y Embalse El Yeso (2.478 m.s.n.m.) para los años 2018 y 2015, respectivamente. Elaboración propia.

4.7 Sismicidad local

Chile se ubica a lo largo de una zona tectónicamente activa. En particular en un margen convergente entre la Placa de Nazca con la Placa Sudamericana. Esta configuración, hace que Chile sea una zona sísmicamente activa. Esto queda demostrado en la historia reciente, en donde se reconocen sismos de gran magnitud como el de Valdivia 1960, Maule 2010 e Iquique 2014, entre muchos otros más.

En particular la zona de estudio se encuentra en lo que se conoce como Chile Central. Esta zona es afectada principalmente por sismos corticales, caracterizados por ocurrir alejados del margen subductivo, a baja profundidad (0-20 km) (García, 2016). Estos sismos son un importante factor desencadenante para los procesos de remoción en masa, en particular para las caídas de rocas.

Barrientos *et al.* (2004) distinguió 7 fuentes sísmica en Chile Central (Figura 44):

- Región A – Falla Pucuro
- Región B – Río Olivares
- Región C – Las Melosas
- Región D – Volcán San José
- Región E – Alto Maipo
- Región F – Alto Cachapoal
- Región G – Norte del Volcán Tupungato

De estas zonas se puede destacar Las Melosas, la cual presentó actividad el año 1958 con un sismo cortical de magnitud 6.9 M_L . Además, la zona E (Alto Maipo), presenta la mayor concentración de sismos.

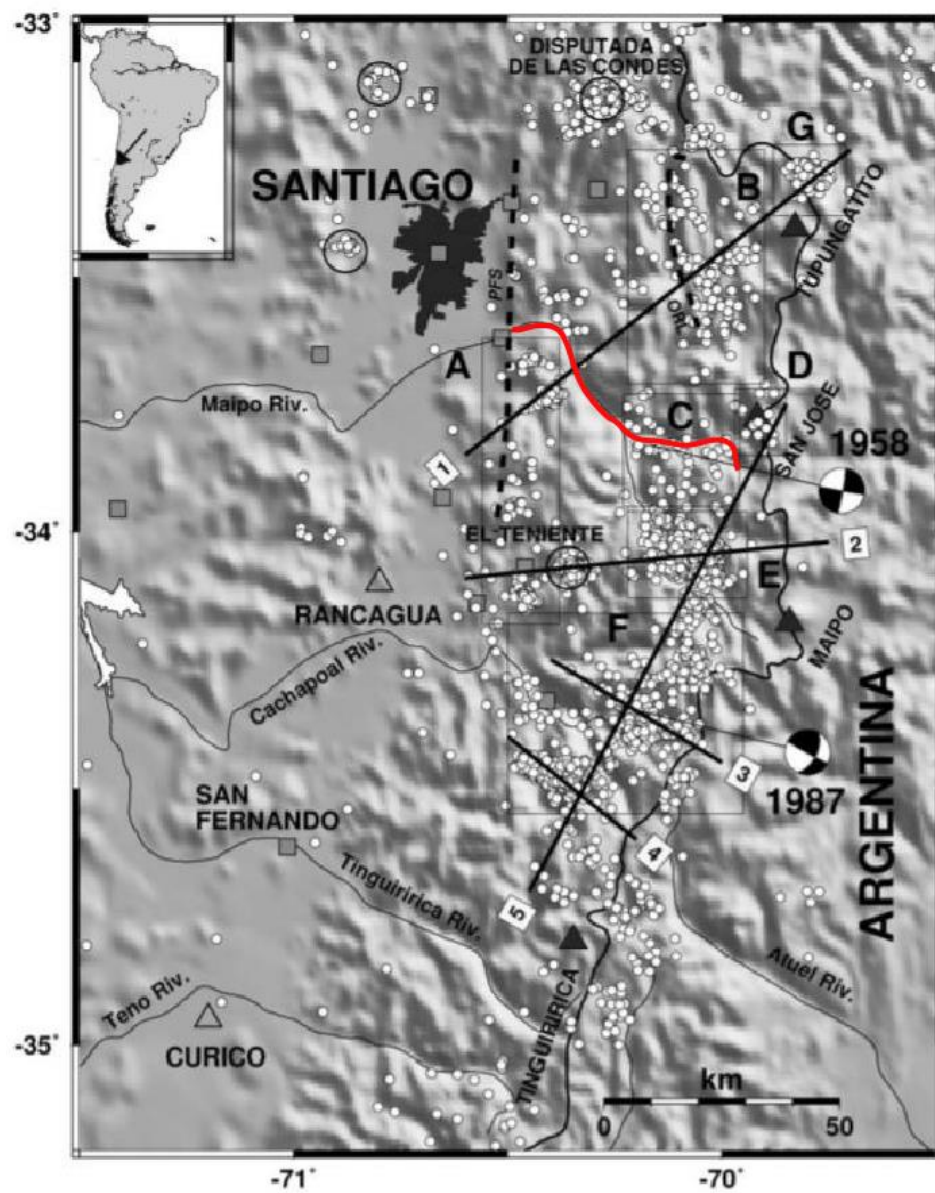


Figura 44: Epicentros de sismos superficiales (<20 km de profundidad) en Chile Central durante 1986 – 2001. Desde la A a la G se indican las distintas fuentes sísmicas. En Rojo se destaca la ruta en estudio (Modificado de Barrientos *et al.*, 2004)

5. METODOLOGÍA PARA EVALUAR Y ZONIFICAR EL PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA EN RUTA G-25 A ESCALA LOCAL.

La metodología propuesta en el presente estudio sigue el procedimiento sugerido en la Guía para la evaluación de amenazas del Proyecto Multinacional Andino (PMA-GCA, 2007), la cual se divide en 6 etapas:

1. Términos de Referencias

En esta etapa se incluye la definición del objetivo de la investigación y la escala de trabajo.

2. Estudio básico (revisión y análisis de información temática existente).

Aquí se recopila toda la información que pueda aportar al desarrollo del estudio. En resumidas cuentas, consiste en recopilación de información temática (mapas y publicaciones geológicas, artículos en periódicos o en revistas, informes geológicos/geotécnicos/geomorfológicos, base de datos, etc.), entrevista a testigos (obtención de información de terceras personas) y si es posible, obtención de información a través de productos de sensores remotos.

3. Análisis de terreno y Cartografía preliminar.

Es importante establecer el marco geomorfológico de cada lugar, identificando las características y origen de las distintas geoformas en el área, los tipos de materiales que se pueden esperar, y los procesos geomorfológicos que ocurren o puedan ocurrir.

Los mapas se elaboran primordialmente basándose en cartografía existente y fotografías aéreas, pero a continuación deben verificarse a través del trabajo preliminar de terreno.

4. Inventario de movimientos en masa.

Todas las ocurrencias de movimientos en masa deben ser registradas en un mapa de inventario (o catastro). No todo inventario necesita el detalle completo del formulario estándar propuesto, se deben realizar las simplificaciones adecuadas para cada caso y acorde a la escala de trabajo. El inventario debe incorporar inicialmente los datos obtenidos del desarrollo de las tareas 1 a 3. Luego, debe actualizarse con la información recogida en terreno.

5. Investigaciones preliminares en terreno.

Esta visita a terreno tiene el objetivo de identificar los tipos de suelos y rocas, y los sitios con movimientos en masa, con el fin de validar la información recopilada en las etapas anteriores, y cubrir los espacios vacíos de información.

6. Análisis

Esta actividad se realiza una vez se tiene recopilada toda la información citada en las etapas anteriores. Esta etapa depende del tipo de análisis y/o metodología que se use para cada trabajo en particular.

En esta última etapa es donde se desarrolla la metodología para evaluar y zonificar el peligro de remociones en masa en la Ruta G-25. La metodología se puede resumir en los siguientes pasos (ver Figura 45):

1. Identificación y caracterización de los factores condicionantes de la generación de remociones en masa. Estos son principalmente la pendiente del terreno y las características geológicas/geotécnicas que puedan presentar las unidades geológicas.
2. Se ponderan los distintos factores condicionantes para cada remoción en masa, de esta manera se pueden identificar y zonificar las potenciales zonas de generación asignándole distintos grados de susceptibilidad.
3. Evaluación y zonificación cualitativa del alcance que pueda tener el proceso de remoción en masa, para determinar así las zonas que están expuestas a ser afectadas.
4. Evaluación y zonificación del peligro a partir de las zonas susceptibles y los alcances.
5. Finalmente se evalúa y zonifica el peligro de remociones en masa a lo largo del trazado de la Ruta G-25, interceptando el trazado con la zonificación realizada en el punto 4.

Cabe destacar que el trazado de una ruta se puede aproximar a un elemento unidimensional determinado por su largo, por lo que la zonificación, en este caso, será lineal y no zonal.

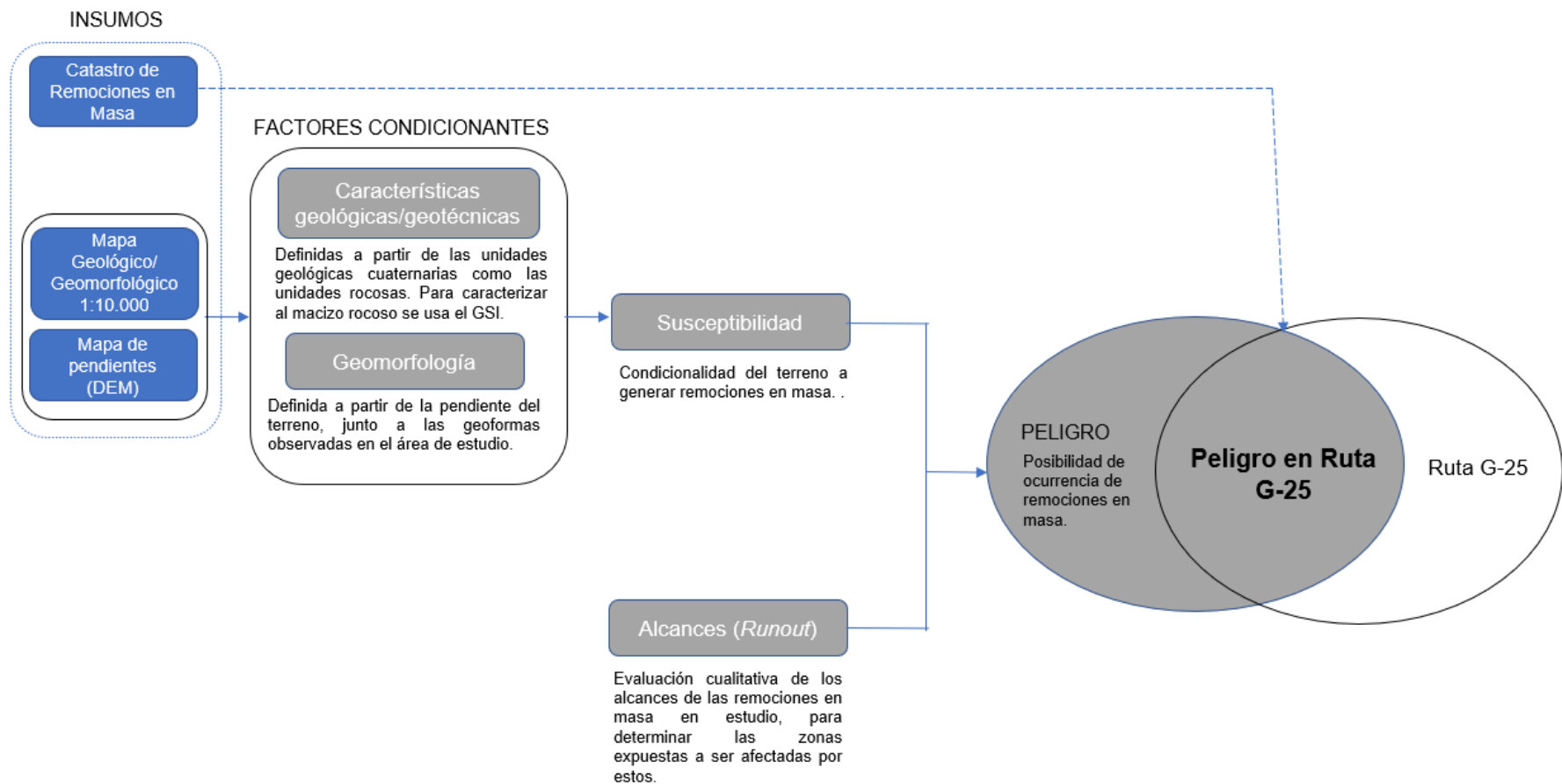


Figura 45: Esquema que resume los principales pasos para implementar la metodología propuesta. Elaboración propia.

5.1 Peligros de Deslizamientos de Suelo.

La determinación del peligro de deslizamientos de suelo se realiza mediante la identificación y análisis de las zonas de generación y de las zonas de alcance.

5.1.1 Identificación de Zonas de Generación.

Para identificar las zonas de generación se utilizan los siguientes criterios:

- Pendiente del terreno
- Características geológicas/geotécnicas de las unidades de cuaternarias
- Existencia de eventos previos

Esaki *et al.* (2005) identificó las pendientes del terreno en donde ocurren con mayor frecuencia deslizamientos (ver Figura 46).

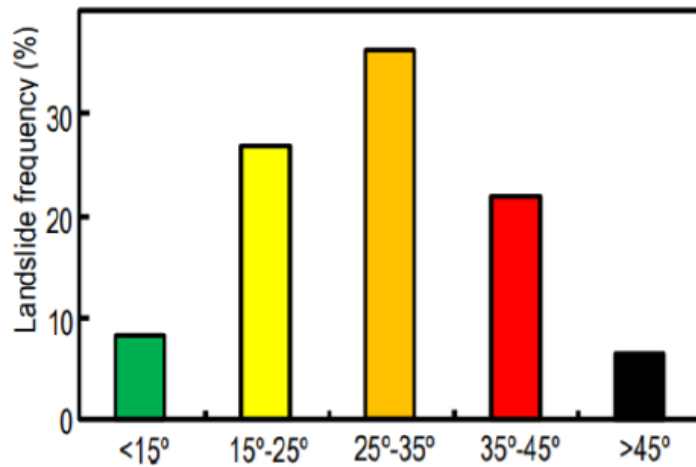


Figura 46: Frecuencia de deslizamientos versus pendiente del terreno (Esaki *et al.*, 2005).

De acuerdo con la Figura 46 bajo los 15° la frecuencia de ocurrencia de deslizamientos es muy baja (<10%), por lo que se elimina este intervalo del análisis posterior. En particular en la zona de estudio, este intervalo de pendientes se ve representado por unidades no consolidadas aterrazadas, en las que se asume la no generación de estos procesos. Según esto, la zonificación por pendientes para condiciones estáticas queda de la siguiente manera:

- 15° - 25°
- 25° - 35°
- >35°

Realizar esta zonificación da cuenta de la condicionalidad del terreno a generar o no deslizamientos de suelo.

Por otro lado, para determinar la estabilidad de las unidades geológicas identificadas en la zona se definen las siguientes unidades:

- Unidades susceptibles sin movimientos antiguos: Aquellas unidades que, a pesar de no registrar movimientos actuales ni antiguos a la escala de trabajo, reúnen las condiciones geológicas/geotécnicas para generar deslizamientos.
- Unidades susceptibles con movimientos antiguos: Aquellas unidades que presentan movimientos antiguos identificables a la escala de trabajo.
- Unidades susceptibles con movimientos actuales y/o activos: Aquellas unidades que presentan movimientos actuales y/o activos identificables a la escala de trabajo.

Las unidades geológicas están determinadas por el mapeo geológico realizado en la zona de estudio, las que corresponden principalmente a las unidades de depósitos no consolidados.

La susceptibilidad de las unidades queda definida por las características geológicas/geotécnicas presentes en cada una de ellas. Según Lara (2007), para deslizamientos de suelo, dentro de estas características se consideran: baja densidad, baja resistencia, estructuras y estratificación que posea la unidad, entre otras características. Gran parte de estas propiedades fueron incluidas en la descripción de las unidades en el mapeo geológico previo. Estas se obtuvieron mediante una observación general en terreno de la unidad en estudio.

Para la temporalidad de los procesos, se toma como referencia lo propuesto por González de Vallejo *et al.* (2002) en donde se define lo siguiente:

- Movimientos actuales o activos: Se mueve actualmente (dentro de los últimos 100 años). Puede corresponder a una reactivación. Entre los rasgos característicos, se encuentran: (1) Topografía irregular y lobulada; (2) Escarpe principal bien definido y sin vegetación; (3) Depresiones encharcadas; (4) Arroyos en los flancos; y (5) Depósitos a pie de ladera, con posibles desvíos de cauces.
- Movimientos antiguos: No presenta movimientos actualmente (100-5000 años) o está inactivo desde hace miles de años (5.000 a 10.000 años). Entre los rasgos característicos, se encuentra: (1) Relieve lobulado a suave, vegetación en el escarpe; (2) Drenaje modificado; (3) Vegetación diferente en las zonas adyacentes; (4) Terrazas fluviales cubiertas por la masa deslizada; (5) Cauces actuales sobre la masa deslizada; y (6) Llanuras de inundación más ancha, aguas arriba.

Los métodos y técnicas para identificar movimientos de laderas activos o antiguos y para el reconocimiento de zonas inestables consisten, básicamente, en la identificación de rasgos propios de estos procesos, evidencias de movimientos y otros signos asociados a su aparición, mediante observaciones de terreno e imágenes satelitales. Estos rasgos pueden ser los siguientes (González de Vallejo *et al.* 2002):

- Formas erosivas y de acumulación (anomalías en la pendiente de las laderas).
- Depósitos deslizados
- Grietas y escarpes
- Daños en construcciones o estructuras, conducciones, obras lineales, etc.
- Tipos y características de la vegetación
- Modelos de drenaje, zonas encharcadas, surgencias
- Desvío de cauces, depósitos de masas deslizadas en llanuras de inundación, etc.

En base a los criterios mencionados anteriormente, se define la estabilidad de las unidades en la siguiente tabla.

Tabla 9: Estabilidad de unidades geológicas en función de la pendiente del terreno y de la susceptibilidad/actividad de la unidad, en condiciones estáticas. Elaboración propia.

Unidades \ Pendientes	15° - 25°	25° - 35°	>35°
Unidades susceptibles sin movimientos antiguos	Estable	Generalmente estable	Moderadamente estable
Unidades susceptibles con movimientos antiguos	Generalmente estable	Moderadamente estable	Moderadamente inestable
Unidades susceptibles con movimientos actuales y/o activos	Moderadamente estable	Moderadamente inestable	inestable

La estabilidad de las unidades se puede correlacionar a un grado de susceptibilidad de la siguiente manera:

- Unidad Estable con Susceptibilidad Muy Baja
- Unidad Generalmente estable con Susceptibilidad Baja
- Unidad Moderadamente estable con Susceptibilidad Moderada
- Unidad Moderadamente inestable con Susceptibilidad Alta
- Unidad Inestable con Susceptibilidad Muy Alta

De lo anterior se desprende la siguiente matriz, propuesta por esta metodología:

Tabla 10: Grado de susceptibilidad según pendiente del terreno y susceptibilidad/actividad de las unidades geológicas de suelo. Elaboración propia.

Unidades \ Pendientes	15° - 25°	25° - 35°	>35°
Unidades susceptibles sin movimientos antiguos	Muy Baja	Baja	Moderada
Unidades susceptibles con movimientos antiguos	Baja	Moderada	Alta
Unidades susceptibles con movimientos actuales y/o activos	Moderada	Alta	Muy Alta

5.1.2 Identificación de Zonas de Alcance.

Determinar el alcance real de los deslizamientos de suelo es una tarea muy compleja. En particular en este estudio la evaluación del alcance se hace de manera cualitativa y queda determinada por criterios morfológicos. Para esto, se deben tener en cuenta las unidades morfológicas de ladera definidas previamente (ver Tabla 4, en cap. 4.4). En la Figura 47 se muestra esquemáticamente la identificación de las zonas expuestas a ser afectadas por deslizamientos de suelo.

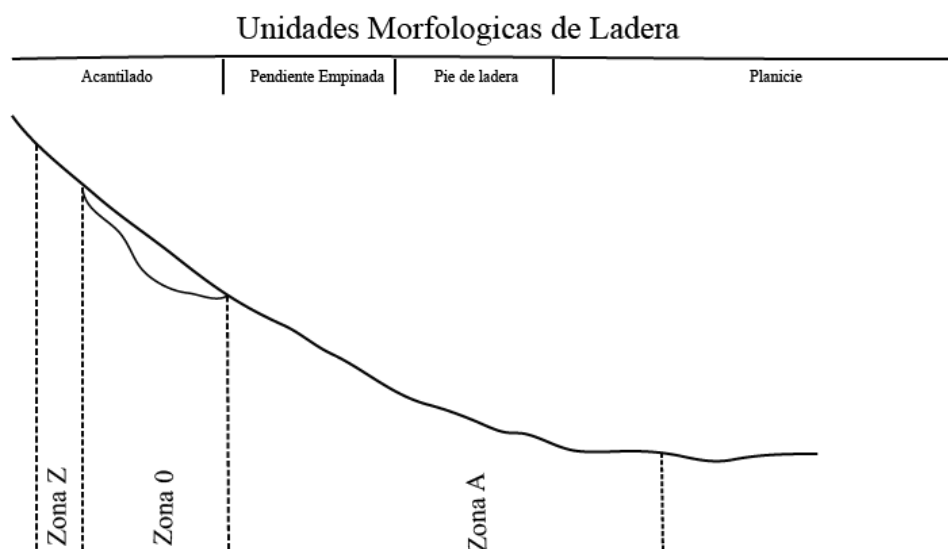


Figura 47: Zonas expuestas a ser afectadas por deslizamientos de suelo en base a las Unidades Morfológicas de Ladera. Elaboración propia.

Las zonas se detallan a continuación:

Zona 0: Corresponde a la potencial zona de generación de deslizamiento de suelo.

Zona A: Es la zona inmediatamente por debajo de la zona de generación. Esta se caracteriza por ser el área en donde el material removido se transporta y deposita, asumiendo el peor escenario. Su límite inferior se ubica entrando a la *Planicie*.

Zona Z: Es la zona que está justo por detrás de la zona de generación. Esta área puede ser afectada por la retrogresión del deslizamiento. Su límite superior queda a criterio del evaluador.

Una vez teniendo identificadas las zonas de generación y las zonas de alcance, se puede evaluar y zonificar el peligro de deslizamientos de suelo. En la siguiente tabla, se muestra la descripción de cada grado de peligro.

Tabla 11: Descripción de los distintos grados de peligro para deslizamientos de suelo. (A) corresponde a las zonas de generación y (B) a las zonas expuestas o de alcance.
Elaboración propia.

PELIGRO		DESCRIPCIÓN
MUY ALTO (A)	MUY ALTO (B)	(A) Corresponden a zonas con Muy Alta Susceptibilidad, por lo general unidades susceptibles con movimientos actuales y/o activos por sobre los 35° de pendiente. (B) Las zonas de alcance se localizan inmediatamente bajo la ladera susceptible, delimitada con la unidad morfológica <i>Planicie</i> , además se consideran las zonas inmediatamente detrás de unidades susceptibles, por potenciales deslizamientos retrogresivos.
ALTO (A)	ALTO (B)	(A) Corresponden a zonas con Alta Susceptibilidad por lo general unidades susceptibles con movimientos antiguos en pendientes por sobre los 35° y unidades susceptibles con movimientos actuales y/o activos entre los 25° y 35° de pendiente. (B) Las zonas de alcance se localizan inmediatamente bajo la ladera susceptible, delimitada con la unidad morfológica <i>Planicie</i> , además se consideran las zonas inmediatamente detrás de unidades susceptibles, por potenciales deslizamientos retrogresivos.
MODERADO (A)	MODERADO (B)	(A) Corresponden a zonas con Moderada Susceptibilidad por lo general unidades susceptibles sin movimientos antiguos por sobre los 35° de pendiente, unidades susceptibles con movimientos antiguos entre los 25° y 35° de pendiente, y unidades susceptibles con movimientos actuales y/o activos en pendientes entre 15° y 25°. (B) Las zonas de alcance se localizan inmediatamente bajo la ladera susceptible, delimitada con la unidad morfológica <i>Planicie</i> , además se consideran las zonas inmediatamente detrás de unidades susceptibles, por potenciales deslizamientos retrogresivos.
BAJO (A)	BAJO (B)	(A) Corresponden a zonas con Baja Susceptibilidad por lo general unidades susceptibles sin movimientos antiguos entre los 25° y 35° de pendiente, y unidades susceptibles con movimientos antiguos en pendientes entre los 15° y 25°. (B) Las zonas de alcance se localizan inmediatamente bajo la ladera susceptible, delimitada con la unidad morfológica <i>Planicie</i> , además se consideran las zonas inmediatamente detrás de unidades susceptibles, por potenciales deslizamientos retrogresivos.
MUY BAJO (A)	MUY BAJO (B)	(A) Corresponden a zonas con Muy Baja Susceptibilidad por lo general unidades susceptibles sin movimientos antiguos en pendientes entre 15° y 25°. (B) Las zonas de alcance se localizan inmediatamente bajo la ladera susceptible, delimitada con la unidad morfológica <i>Planicie</i> , además se consideran las zonas inmediatamente detrás de unidades susceptibles, por potenciales deslizamientos retrogresivos. Además se incluyen aquellas zonas con muy baja a nula posibilidad de ser alcanzadas por deslizamientos de suelo, ubicadas bajo laderas susceptibles en la unidad morfológica <i>Planicie</i> .

5.2 Peligro de Caídas de Rocas.

La determinación del peligro de caídas de rocas se realiza mediante la identificación y análisis de las zonas de generación y de las zonas de alcance. Se incluyen en los criterios de peligro aquellos eventos que se inician como deslizamientos en bloques de roca pero que luego tienen el comportamiento habitual de una caída.

5.2.1 Identificación de Zonas de Generación.

Para identificar las zonas de generación se utilizan los siguientes criterios:

- *Geological Strength Index* (GSI) en unidades rocosas.
- Pendiente del terreno

El GSI es estimado en base a una examinación visual del macizo rocoso expuesto en afloramientos, superficies de excavaciones como cortes de rutas, túneles, etc (ver Anexo B). Esta cuantificación se realiza a partir de una examinación netamente cualitativa, según Marinos *et al.* (2007) esta no funciona bien en masas rocosas muy perturbadas tectónicamente en donde la fábrica estructural ha sido destruida. Es por esto que este sistema de cuantificación es solo válido en el rango de $35 < \text{GSI} < 75$, cuando el comportamiento del macizo depende del deslizamiento y rotación de las piezas de rocas intactas, y donde el espacio y la condición de las discontinuidades que separan los bloques y no la resistencia de los bloques intactos, controlan el comportamiento del macizo. Es por este motivo que se considera que los macizos rocosos con valores de GSI menor a 75 son más susceptibles a generar caídas de rocas, que los que tienen valores sobre este.

Por otro lado, la morfología de la ladera es uno de los factores determinantes para poder evaluar si una roca puede o no, desprenderse de su fuente y caer (Dorren, 2003). Esta condición está relacionada al ángulo de fricción interna que posee cada material. Por lo que, a mayor pendiente de la ladera, mayor inestabilidad en el macizo rocoso, y se esperaría que exista una mayor posibilidad de que ocurran caídas de bloques. La Unidad Morfológica *Acantilado* y *Pendiente Empinada* son las que se encuentran a mayor pendiente en la zona de estudio, por lo que se consideran dichas unidades para evaluar la susceptibilidad de caídas de rocas, en condiciones estáticas.

En la zona de estudio, no solo las unidades rocosas son la fuente de las caídas de rocas. También los depósitos clásticos son una importante fuente de estos procesos. Sin embargo, solo se evalúa la susceptibilidad en aquellas zonas relativamente escarpadas en donde existen cortes en los depósitos que permiten el desprendimiento de los bloques inmersos en la unidad. Esto ocurre en pendientes sobre los 25° .

En base a los criterios mencionados anteriormente se elabora la siguiente tabla con los grados de susceptibilidad para cada unidad en estudio.

Tabla 12: Susceptibilidad de generación de caídas de rocas, en condiciones estáticas.
Elaboración propia.

	Pendientes	
Unidades	$25^\circ - 35^\circ$	$>35^\circ$
Unidades rocosas con GSI > 75	Baja	Moderada
Depósitos clásticos	Moderada	Alta
Unidades rocosas con GSI < 75	Alta	Muy Alta

5.2.2 Identificación de Zonas de Alcance.

El alcance se evalúa cualitativamente mediante criterios morfológicos y evidencia de terreno.

Los principales modos de movimientos una vez desprendidos los bloques desde la fuente pueden ser: Caída libre, rebotar o rodar (Dorren, 2003). La caída libre se da en taludes que están cercanos a los 90°. Estos bloques generalmente se depositan justo por debajo de la fuente. Cuando la pendiente de la zona de generación comienza a disminuir, la roca puede rebotar o rodar. Esto hace que los bloques puedan tener un mayor alcance, debido a la mayor energía cinética que estos adquieren. Esto se ve evidenciado en el área de estudio, ya que algunas rocas desprendidas llegan incluso a la *Planicie*, aunque la mayoría se deposita en las unidades morfológicas *Pendiente Empinada* o *Pie de ladera*.

Según esto, se realiza la siguiente zonificación del alcance (Figura 48).

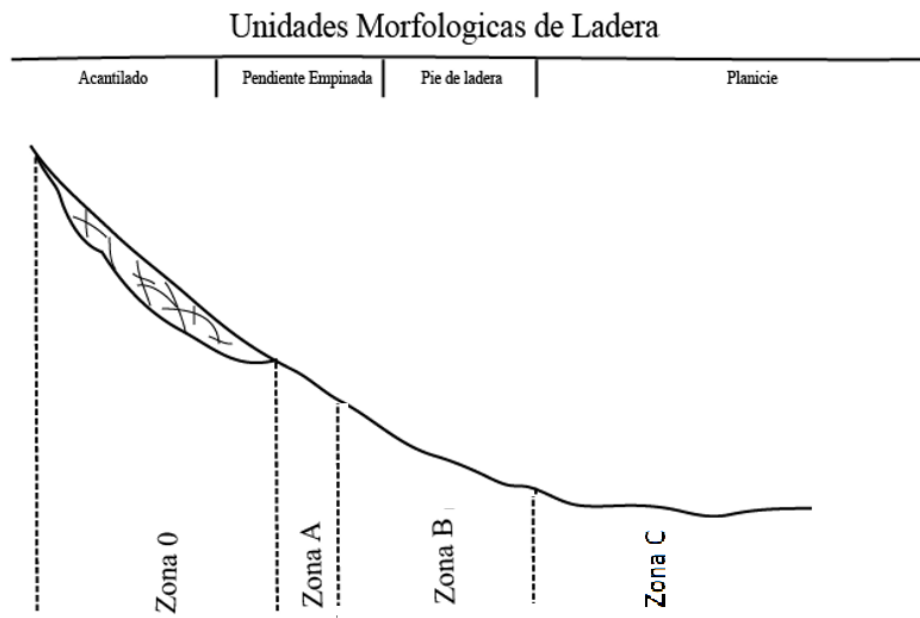


Figura 48: Zonas expuestas a ser afectadas por caídas de rocas en base a las Unidades Morfológicas de Ladera. Elaboración propia.

Las zonas se detallan a continuación:

Zona 0: Corresponde a la zona de generación.

Zona A: Corresponde a la zona inmediatamente bajo la Zona 0. Aquí por lo general las rocas caen por caída libre.

Zona B: Corresponde a la zona ubicada en las unidades *Pendiente Empinada* y/o *Pie de Ladera* por debajo de la zona de generación. Aquí pueden actuar mecanismos de caída de bloques tales como rebote y rodamiento.

Zona C: Corresponde a zonas ubicadas en *Planicie* por debajo de zonas de generación. La extensión de esta zona quedará sujeta a las observaciones de sitio y dependerá de la altura

relativa de la fuente, pendiente, etc. A esta zona los bloques llegarán rodando o rebotando desde la fuente, para finalmente depositarse.

Una vez identificadas las zonas de generación y las zonas de alcance se zonifica el peligro de caídas de rocas, mediante los criterios que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13: Descripción de los distintos grados de peligro para caídas de rocas. (A) corresponde a las zonas de generación y (B) a las zonas expuestas o de alcance.
Elaboración propia.

PELIGRO		DESCRIPCIÓN
MUY ALTO (A)	MUY ALTO (B)	(A) Corresponden a unidades rocosas con GSI menor a 75 que se encuentran en pendientes por sobre los 35°. (B) Zona A inmediatamente bajo unidades susceptibles.
ALTO (A)	ALTO (B)	(A) Corresponden a unidades rocosas con GSI menos a 75 que se encuentran en pendientes entre 25° y 35°, y depósitos clásticos en pendientes por sobre los 35°. (B) Zona A inmediatamente bajo unidades susceptibles. Zona B por debajo de unidades con susceptibilidad Muy Alta.
MODERADO (A)	MODERADO (B)	(A) Corresponden a unidades rocosas con GSI mayor a 75 en pendientes por sobre los 35° y depósitos clásticos en pendientes entre 25° y 35°. (B) Zona A inmediatamente bajo unidades susceptibles. Zona B por debajo de unidades con susceptibilidad Alta. Zona C por debajo de unidades con susceptibilidad Muy Alta.
BAJO (A)	BAJO (B)	(A) Corresponden a unidades rocosas con GSI mayor a 75 en pendientes entre 25° y 35°. (B) Zona A inmediatamente bajo unidades susceptibles. Zona B por debajo de unidades con susceptibilidad Moderada. Zona C por debajo de unidades con Susceptibilidad Alta.
MUY BAJO (B)		(B) Zona B bajo unidades con susceptibilidad Baja. También se incluyen aquellas zonas en la <i>Planicie</i> con muy baja a nula posibilidad de ser alcanzadas por algún evento debido a la lejanía de la fuente.

5.3 Peligro de Flujos Aluviales

Dentro de estos eventos, se pueden reconocer a grandes rasgos tres zonas principales (Nhuchhen, 2017): Zona de generación o fuente, canales de transporte y área deposicional (ver Figura 49).

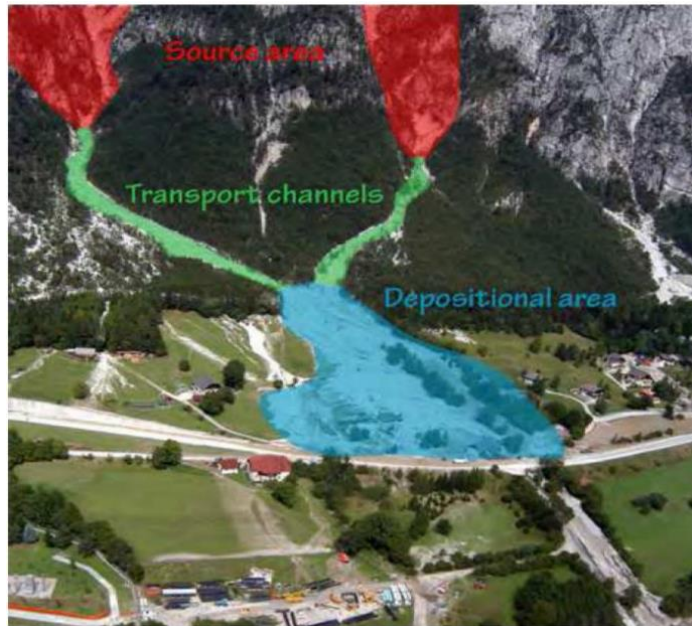


Figura 49: Partes de un flujo canalizado según Nhuchhen (2017)

En el área de estudio, la ruta solo intercepta las zonas intermedias y distales de estos procesos. Es por eso, que este análisis solo se restringirá a evaluar las zonas de alcance que corresponden a los canales de transportes y al área deposicional. Las zonas de generación quedan fuera de este análisis.

En este apartado lo que se propone es una zonificación del peligro solo en función de las zonas de alcances. Estas pueden ser zonas con eventos declarados o zonas potenciales de ser afectadas. Para identificarlas es necesario entender la dinámica de las principales morfologías de deposición que tienen estos procesos: los abanicos aluviales y los conos detríticos.

5.3.1 Dinámica de Abanicos Aluviales y Conos Detríticos.

Como se ve en el apartado 4.4 las principales morfologías involucradas en procesos de remoción en masa del tipo flujos aluviales, son los conos detríticos y los abanicos aluviales. Entender y comprender la dinámica que presentan estas formas permiten eventualmente poder determinar las zonas de alcance para los flujos canalizados que participan activamente en la evolución de dichas morfologías. Harvey (2012) realiza un modelo conceptual para abanicos/conos que consiste en relacionar el aporte de sedimento con el poder del flujo, teniendo 4 estados transitorios: Pasivo/Inactivo, Deposición, Progradación y Disección (ver Figura 50). Cambios considerables en estas variables, conllevan al paso de un estado a otro.

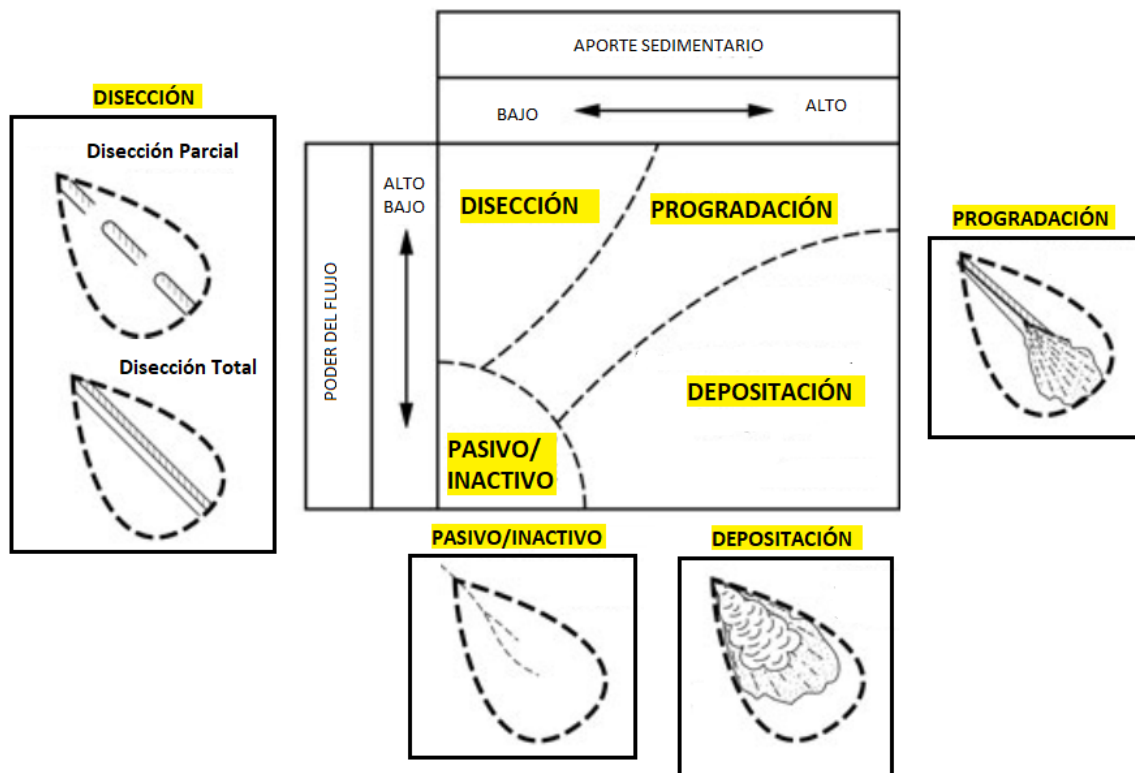


Figura 50: Modelo conceptual propuesto por Harvey (2012) para la evolución de abanicos/conos en función del aporte sedimentario y el poder del flujo.

Bowman (2019) propone a su vez caracterizar bien el estado en el que se encuentran estas morfologías, separandolos en dos: erosivos o deposicionales, de esta manera se pueden predecir futuras zonas de erosión o bien, zonas en donde existirán altas tazas de deposición de sedimentos. Esto se relaciona de muy buena manera con el modelo de Harvey (2012) ya que si, por ejemplo, el abanico se encuentra en un estado deposicional con alta carga sedimentaria y bajo poder de flujo, prácticamente toda su superficie podría ser considerada como potencial zona de alcance. Por otro lado, si el mismo abanico comienza a progradar, la superficie de deposición no sería la misma, y quedaría una superficie alzada con respecto a la superficie activa del abanico. Por lo tanto, la principal zona de potencial alcance, sería el nuevo lóbulo deposicional. Comprender esta dinámica permite predecir futuras zonas de alcance.

5.3.2 Identificación de Zonas de Alcance.

El principal criterio para identificar las zonas de alcance de flujos aluvionales fue el análisis morfológico.

Un abanico aluvial o un cono detrítico poseen diversas estructuras y morfologías en superficie que dan cuenta del grado de actividad que estos presentan. Son estos indicadores los que se utilizan para definir las eventuales zonas de alcance.

En base al trabajo realizado por Benito (2013) evaluando el peligro de inundación en abanicos aluviales, se definen las siguientes zonas o superficies (ver Figura 51):

- A) **Superficie aluvial antigua:** Superficie aluvial altamente incisionada o disectada. Esta superficie se encuentra en una altura relativa superior a todas las demás superficies o zonas. Zona estabilizada con abundante vegetación, y en ocasiones con desarrollo antrópico, sin evidencia de flujos aluviales recientes.
- B) **Abanico o superficie aluvial sub-actual:** Superficie moderadamente disectada. Presenta desarrollo de vegetación ocasional y no existe registro de flujos recientes en superficie. Presenta un menor grado de estabilidad relativa con respecto a la superficie A.
- C) **Abanico o superficie aluvial actual:** Esta superficie presenta indicios de flujos recientes. Se pueden encontrar estructuras como levees o lóbulos de flujos aluviales recientes. Puede presentar escaso desarrollo de vegetación. En esta superficie existe la migración lateral de canales.
- D) **Superficie aluvial activa:** Superficie activa dentro de la superficie actual. Se observan depósitos de flujos aluviales recientes. Presenta excasa a nula vegetación debido a la sedimentación actual que presenta este sector.
- E) **Canales menores:** Canales incisos dentro del abanico activo. Su profundidad relativa con respecto a C no es significativa, superando en ocasiones el metro. Es por esta razón que estos canales suelen migrar en la superficie aluvial actual. Se pueden mencionar los canales distributarios o canales intermitentes.
- F) **Canales mayores:** Canal activo con alto poder erosivo. Presenta una incisión importante con respecto a las otras superficies. Se encuentra estable con baja probabilidad de migración lateral.

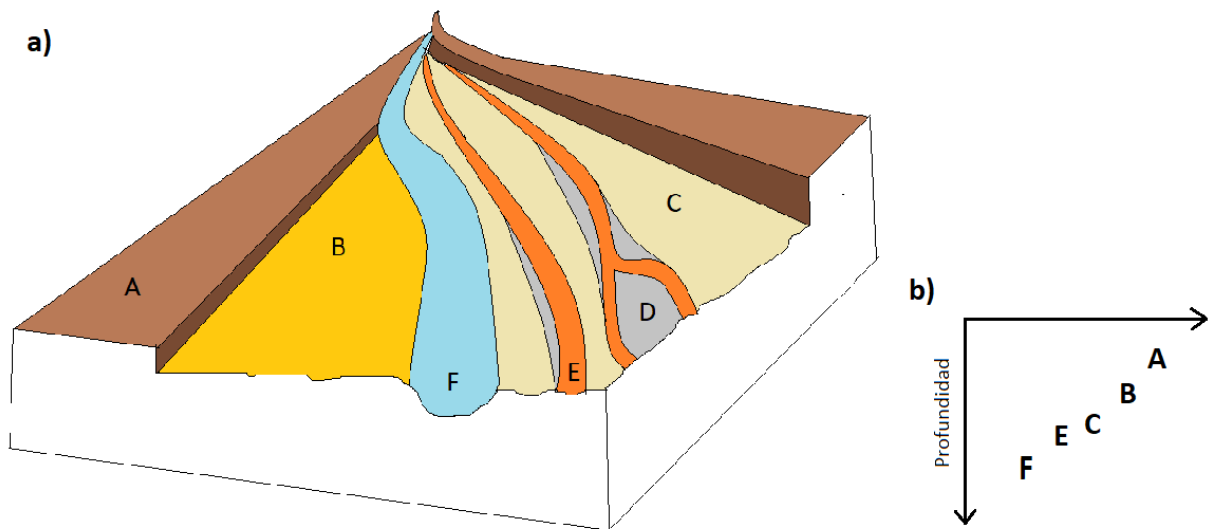


Figura 51: a) Zonas identificadas en un abanico aluvial. B) Altimetría relativa de las distintas zonas expuestas en a). Modificado de Benito (2013).

Por otro lado, en las superficies de los conos detríticos, se reconocen distintas áreas con diversos grados de estabilidad/actividad. Se pueden observar lóbulos deposicionales de flujos de detritos recientes, canales, levees y zonas con desarrollo de suelo y vegetación. Relacionado a esto último, Baroni *et al.* (2013) estudió los conos detríticos alpinos y relacionó directamente la presencia de vegetación con la actividad que presenta la

superficie del cono. Dicho esto, se definen las siguientes superficies o zonas en los conos detríticos:

- A) **Superficie inactiva del cono:** Esta superficie se caracteriza por tener presencia de vegetación que puede variar de abundante a escasa. En los casos extremos puede comenzar a desarrollar suelo en superficie, indicando el alto grado de inactividad que presenta la zona.
- B) **Superficie disectada del cono:** Será la superficie abandonada cuando el cono se encuentra en un estado progradante. Aquí los flujos posteriores, tienden a estar canalizados por la estructura que disecta parcialmente al cono.
- C) **Superficie deposicional del cono:** Es el nuevo cono deposicional en un estado progradante.
- D) **Lóbulos recientes:** Corresponde a todos los depósitos detríticos recientes.

Con la información presentada se establecen los criterios de zonificación del peligro para flujos, los cuales se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14: Descripción de los distintos grados de peligro para flujos aluviales. (B) corresponde a las zonas expuestas o de alcance. Elaboración propia.

PELIGRO	DESCRIPCIÓN
MUY ALTO (B)	(B) Corresponde a las principales estructuras o morfologías canalizadoras como canales, quebradas o levees (naturales o artificiales)
ALTO (B)	(B) Corresponde a la superficie aluvial activa en abanicos aluviales o planicies aluviales. Lobulos recientes en conos detríticos.
MODERADO (B)	(B) Corresponde a la superficie aluvial actual en abanicos aluviales y la superficie deposicional en conos detríticos.
BAJO (B)	(B) Corresponden a la superficie sub-actual en abanicos aluviales y a la superficie disectada en conos detríticos. También se incluyen zonas con escasa vegetación en conos detríticos.
MUY BAJO (B)	(B) Corresponden a la superficie aluvial antigua que por lo general presente abundante vegetación y desarrollo antrópico. También incluye a la superficie inactiva del cono con abundante vegetación y desarrollo de suelo.

6. SISTEMA DE PUNTUACIÓN AL PELIGRO DE CAÍDAS DE ROCAS EN RUTA G-25.

En la construcción de rutas viales, en ocasiones se deben realizar excavaciones en unidades geológicas (rocosas o no consolidadas), esto ocurre sobre todo en rutas montañosas, en donde el relieve impide que el trazado se realice en superficies inicialmente planas. Esta intervención en el paisaje genera taludes artificiales como los que se ven en la Figura 52.



Figura 52: Taludes de depósitos no consolidados ubicados a lo largo de la Ruta G-25.

De estos taludes artificiales (o también naturales) pueden eventualmente desprenderse bloques y afectar la ruta, los que usualmente ocurren de manera muy local. De hecho, según los antecedentes y las observaciones de terreno en el área de estudio, los eventos que se dan con mayor frecuencia son los que tienen su fuente en los taludes adyacentes al trazado del camino. Es por esto, que es necesario contar con una evaluación complementaria de la peligrosidad de caídas de rocas, a mayor detalle, con el objetivo de priorizar aquellos puntos a lo largo de la ruta, en donde se requiera en el corto plazo, la implementación de alguna medida mitigadora o preventiva.

En el presente estudio se propone de manera complementaria la implementación de un sistema de puntuación al peligro de caídas de rocas a escala del camino (1:1.000 o mayor) con el objetivo de clasificar los taludes adyacentes a la ruta según su peligro. Esto se hace a partir de la asignación de un Puntaje Total de Peligro a cada talud en estudio, considerando que los de mayor puntaje sean los que mayor peligro presenten. Esto permite priorizar los taludes más peligrosos a lo largo de la ruta, para que eventualmente se les aplique alguna medida de control, protección o mitigación.

El *Rockfall Hazard Rating System* o RHRS es un sistema de calificación y puntuación del peligro de caídas de rocas desde taludes en rutas viales, desarrollado inicialmente en Estados Unidos (Wyllie, 1987; Pierson *et al.*, 1990; National Highway Institute, 1993), para luego ser modificado y aplicado en distintas partes del mundo, según diferentes autores (Budetta, 2004; Russell *et al.*, 2008; Si-Qiao *et al.*, 2014). El propósito de este estudio es desarrollar e implementar un RHRS modificado a partir de las modificaciones que han hecho otros autores a la metodología original.

6.1 Origen del *Rockfall Hazard Rating System*.

Los inicios de este sistema se remontan a los años 80 en donde, con el fin de evaluar el riesgo de caídas de rocas a lo largo de carreteras y autopistas, y priorizar el presupuesto

asignado al mantenimiento y remediación de vías, Wyllie (1987) introduce un sistema de puntuación en donde se califican varios parámetros que contribuyen a las caídas de rocas y su impacto en el tráfico de vehículos. Trabajos posteriores se enfocaron en promover la comprensión y la aplicación consistente de este sistema (National Highway Institute, 1993), para que finalmente en 1989 el Departamento de Transporte de Oregon (ODOT por sus siglas en inglés) se adjudicara un estudio dedicado a desarrollar el *Rockfall Hazard Rating System* (Pierson *et al.*, 1990) con la ayuda financiera de algunos departamentos de carreteras estatales de Estados Unidos, entre los que se mencionan Arizona, California, Ohio y Massachussets, entre otros (National Highway Institute, 1993). La fase de prueba de este RHRS fue llevada a cabo en más de 3.000 sitios en Estados Unidos.

El RHRS es una herramienta para administrar los taludes adyacentes al camino desde donde caen bloques. El sistema consiste básicamente en calificar los taludes de acuerdo con ciertos parámetros que inciden en el peligro que este pueda presentar para los automovilistas o para la ruta misma. Entre estos parámetros se pueden mencionar la altura del talud, la frecuencia con que ocurren caídas de rocas, el tamaño de los bloques que han caído o la condición estructural que este presente. Esto quiere decir que cada talud en estudio está calificado con un puntaje equivalente a la sumatoria de cada parámetro evaluado. Esto permite ordenarlos de tal manera que los taludes con mayor puntaje sean los que más peligro presenten. Luego de tener calificado cada uno de ellos, los pasos siguientes están enfocados a realizar planes estratégicos con el fin de implementar medidas de mitigación a los taludes más críticos.

La aplicación de este sistema se puede resumir en seis pasos:

1. **Inventario de taludes:** En esta etapa se realiza una base de datos con la ubicación geográfica de todos los taludes que presenten caídas de rocas a lo largo de la ruta en estudio.
2. **Clasificación preliminar:** Se agrupan los taludes inventariados en tres categorías definidas según criterios establecidos: A, B o C. De aquí solo pasan al siguiente paso los taludes que están en las categorías A y B.
3. **Calificación detallada:** Se califican los taludes permitiendo ordenarlos desde los taludes más peligrosos a los menos peligrosos, según su puntaje.
4. **Diseño preliminar y estimación de costos:** Se realizan los diseños de las técnicas de mitigación y se estiman los costos para su implementación. Esta información se agrega a una base de datos del RHRS.
5. **Identificación y desarrollo de proyectos:** Avance de proyectos hacia la construcción de medidas de corrección y/o mitigación.
6. **Revisión anual y actualización:** Mantenimiento y actualización de la base de datos.

El núcleo de este sistema se encuentra en el paso tres. Es en esta etapa en donde se realiza la puntuación del talud para asignarle un puntaje de peligro total. En la Tabla 15 se muestra la tabla resumen con todos los parámetros que se puntúan en los taludes identificados.

Tabla 15: Tabla resumen del RHRS de Pierson *et al.*, (1990). Nótese que las unidades están bajo el sistema estadounidense en donde “ft” = pies y “cy” = yardas cúbicas.

Categoría		Puntuación				
		3 puntos	9 puntos	27 puntos	81 puntos	
Altura del talud		25 ft.	50 ft.	75 ft.	100 ft.	
Eficiencia de la cuneta		Buena captación	Captación moderada	Captación limitada	Sin captación	
Riesgo promedio del vehículo		25% de las veces	50% de las veces	75% de las veces	100% de las veces	
Porcentaje de distancia visual de decisión		Distancia de visión adecuada, 100%	Distancia de visión moderada, 80%	Distancia limitada de visión, 60%	Distancia muy limitada de visión, 40%	
Ancho de calzada		44 ft.	36 ft.	28 ft.	20 ft.	
Características geológicas	Caso 1	Condición estructural	Fracturas discontinuas, orientación favorable	Fracturas discontinuas, orientación aleatoria	Fracturas discontinuas, orientación adversa	Fracturas continuas, orientación adversa
		Fricción de la roca	Rugosa, irregular	Ondulada	Planar	Rellena con arcillas, o estriada
	Caso 2	Condición estructural	Pocas características de erosión diferencial	Características de erosión ocasional	Características de mucha erosión	Características principales de erosión
		Diferencia en tasas de erosión	Pequeñas diferencias	Diferencias moderadas	Grandes diferencias	Diferencias extremas
Tamaño de bloques		1 ft.	2 ft.	3 ft.	4 ft.	
Volumen de roca caída por evento		3 cy.	6 cy.	9 cy.	12 cy.	
Precipitación anual o periodos de congelamiento		Precipitación baja a moderada; sin periodos de congelamiento; Sin agua en ladera	Precipitación moderada o periodos de congelamiento cortos o agua intermitente en ladera	Alta precipitación o periodos de congelamiento largos o agua continua en ladera	Alta precipitación y periodos largos de congelamiento o presencia de agua continua en ladera y periodos de congelamiento largos	
Historia de caídas de rocas		Pocas caídas	Caídas ocasionales	Muchas caídas	Caídas constantes	

Como se puede observar en la Tabla 15, el peligro aumenta de izquierda a derecha relacionado a los puntajes en cada columna, que aumentan desde 3 a 81 puntos. Esta puntuación aumenta de manera exponencial, respetando la función:

$$y = 3^x$$

siendo “y” el puntaje para cada parámetro y “x” la información de entrada para cada parámetro. Este sistema de puntuación exponencial proporciona un rápido crecimiento del puntaje distinguiendo los taludes más peligrosos (National Institute Highway, 1993).

De la tabla también se desprende que algunos de estos parámetros son cuantificables mientras que otros se caracterizan en términos cualitativos. Para los primeros existen fórmulas propuestas por Pierson *et al.* (1990) para el cálculo del puntaje asociado al parámetro. Estas se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16: Fórmulas para el cálculo de puntajes en el RHRS propuesto por Pierson *et al.*, (1990).

<p>Altura de talud</p> $X = \frac{\text{Altura (ft.)}}{25}$	<p>Ancho de ruta</p> $X = \frac{52 - \text{Ancho (ft.)}}{8}$
<p>Riesgo Promedio del vehículo</p> $X = \frac{\frac{\text{Trafico promedio } \left(\frac{\text{autos}}{\text{día}}\right) \times \frac{\text{Largo de sección (millas)}}{24 \left(\frac{\text{horas}}{\text{día}}\right)}}{\frac{\text{Limite de velocidad en la sección de la ruta } \left(\frac{\text{millas}}{\text{hora}}\right)}{25}}$	<p>Tamaño de bloque</p> $X = \text{Tamaño de bloque (ft.)}$
<p>Distancia de decisión</p> $x = \frac{120 - \% \text{Distancia de decisión visual}}{20}$	<p>Volumen</p> $X = \frac{\text{Volumen (cu. ft.)}}{3}$

Cada valor “x” será evaluado en la función exponencial expuesta previamente, entregando como resultado el puntaje asignado para cada parámetro. De esta manera se pueden obtener valores continuos entre 1 y 100. Esto permite una mayor flexibilidad a la hora de evaluar el impacto de las condiciones que son extremadamente variables (National Highway Institute, 1993). Un ejemplo de esto se ve en la Figura 53, para el parámetro “altura del talud”. En este gráfico se observa como a medida que aumenta la altura, también aumenta el puntaje asociado al parámetro, siguiendo la fórmula propuesta en la Tabla 16. En el caso que el talud mida 90 pies de altura (equivalente a 27 metros aproximadamente) el puntaje asociado será de 52 puntos.

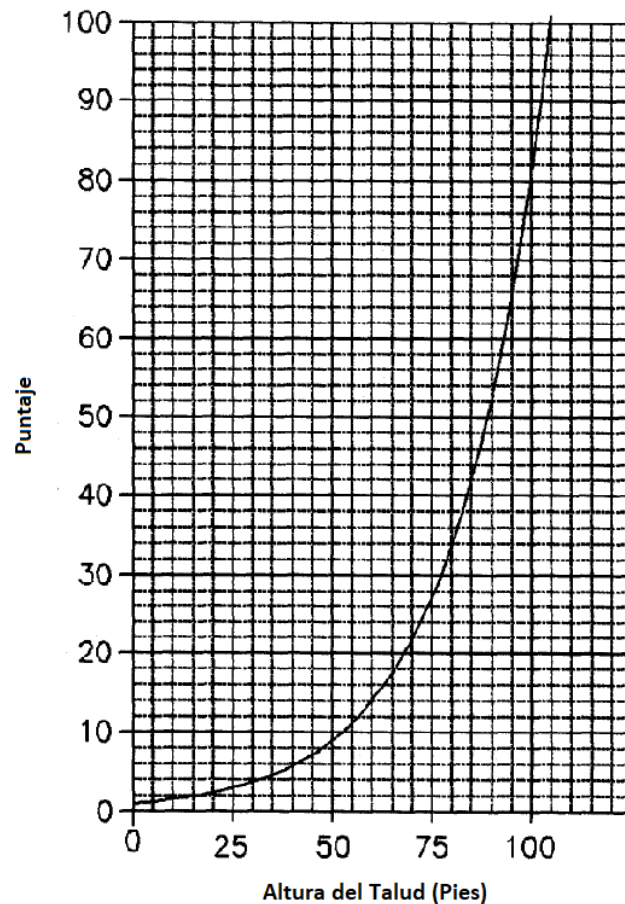


Figura 53: Relación entre la altura de talud y el puntaje asignado a este parámetro. Pierson *et al.* (1990).

Finalmente se tiene que cada talud será calificado con un puntaje de peligro total equivalente a la sumatoria de todos los puntajes de cada parámetro expuesto en la Tabla 15. Los pasos siguientes, luego de la calificación, tienen un enfoque que escapa de los objetivos de este estudio, por lo que no se detalla sobre su aplicación.

6.2 Modificaciones al *Rockfall Hazard Rating System*.

Como se menciona al inicio de este capítulo, desde que nace este sistema de puntuación, diversos autores han realizado modificaciones a la metodología original, y la han aplicado en otras latitudes alrededor del mundo (Budetta, 2004; Russell *et al.*, 2008; Si-Qiao *et al.*, 2014).

En Estados Unidos, 18 estados adoptaron el RHRS para aplicarlo en sus rutas estatales o interestatales. Varios mantuvieron el sistema como lo propuso Pierson *et al.* (1990), mientras que otros realizaron modificaciones para adaptarlo a sus condiciones locales (National Highway Institute, 1993).

En este capítulo en particular se detallan las modificaciones realizadas en el estado de Colorado por Russell *et al.* (2008). Este último identifica que hay factores que contribuyen al potencial de caídas de rocas, pero que no están incluidos en el RHRS original. Entre estos parámetros se pueden mencionar los ciclos de congelamiento y descongelamiento,

aspectos relacionados a la pendiente del talud, condiciones geológicas adicionales, como también condiciones de las discontinuidades adicionales. Además, la revisión llevada a cabo por Russell *et al.* (2008) revela que muchos parámetros propuestos en el sistema original están definidos con una terminología muy subjetiva, como “posible”, “menor”, “mayor”, “ocasional”, etc. Varias de las modificaciones se enfocan en eliminar la terminología de esta naturaleza y reemplazar los parámetros con valores numéricos o bien, con una terminología más descriptiva. Además, se incluyen aquellos parámetros que contribuyen a la inestabilidad de los taludes que no han sido calificados en el sistema original. La tabla resumen del RHRS de Colorado se muestra en la Tabla 17.

Con el RHRS original además de otros sistemas modificados, un talud con 30 metros de altura, sin berma, altos volúmenes de tráfico, distancia de visión mínima y un ángulo alto se calificaría con una puntuación muy alta. Sin embargo, el talud podría no ser un peligro debido a las condiciones geológicas que este presente, por lo que la alta puntuación podría ser engañosa (Flatland, 1993). Por lo tanto, Russell *et al.* (2008) incluye parámetros adicionales para la caracterización geológica del talud y de sus discontinuidades de tal manera que ponderen más que los otros factores que no contribuyen directamente al peligro, evitando así el caso mencionado al inicio de este párrafo. Para esto, se consideran tres tipos de condiciones geológicas:

- Talud de Rocas Sedimentarias: Donde la socavación y la erosión diferencial tienden a condicionar las caídas de rocas. Ejemplos de este tipo pueden ser areniscas o rocas pelíticas.
- Talud de Rocas Cristalinas: Donde la inhomogeneidad y las fracturas del macizo rocoso, tienden a condicionar las caídas de rocas. Ejemplos de este tipo pueden ser lavas o tobas.
- Talud con Depósitos Clásticos: Depósitos coluviales, aluviales, glaciales u otro en donde la erosión del material de la matriz y el posterior desprendimiento de los bloques inmersos, condicionan las caídas de rocas.

Además, se incluyen parámetros adicionales para calificar las discontinuidades dentro de los taludes rocosos. La estabilidad de un macizo rocoso se puede evaluar con mayor precisión si se proporciona información útil sobre el carácter y la condición de las discontinuidades dentro de un talud rocoso (Bieniawski, 1989; Barton *et al.*, 1974).

El sistema modificado de Russell *et al.* (2008) separa aquellos parámetros que contribuyen al peligro, de los que contribuyen al riesgo o a la vulnerabilidad. Es por eso, que este sistema modificado contiene cuatro categorías bien definidas:

- Características del Talud
 - Altura
 - Ángulo
 - Frecuencia de caídas
 - Caracterización de la superficie de despegue
 - Eficiencia de la berma
- Condiciones Climáticas
 - Precipitación acumulada anual
 - Ciclos de congelamiento y descongelamiento
 - Filtración y/o presencia de agua en el talud
 - Orientación del talud

- Condiciones Geológicas
 - Grado de socavamiento en rocas sedimentarias
 - Índice de *Jar Slake* en rocas sedimentarias
 - Grado de estratificación en rocas sedimentarias
 - Caracterización de la roca en rocas cristalinas
 - Grado de *overhang* en rocas cristalinas
 - Grado de meteorización en rocas cristalinas
 - Tamaño/volumen de bloques en rocas cristalinas y/o sedimentarias
 - Numero de set de discontinuidades
 - Persistencia/orientación de las discontinuidades
 - Apertura de las discontinuidades
 - Condición de meteorización en las discontinuidades
 - Fricción entre discontinuidades
 - Tamaño de bloques en taludes con depósitos clásticos
 - Forma de los bloques en taludes con depósitos clásticos
 - Presencia de vegetación en taludes con depósitos clásticos
- Tráfico de Vehículos

Las primeras tres contribuyen al peligro de caídas de rocas, mientras que la última categoría apunta al riesgo y/o vulnerabilidad.

Otro alcance importante sobre estas modificaciones es que se pierde el carácter continuo que tienen las puntuaciones a cada parámetro. En la metodología original, algunos parámetros permitían un cálculo numérico a través de una ecuación exponencial (ver Tabla 15, cap. 6.1), lo que permite obtener puntajes entre 1 y 100. Russell *et al.* (2008) se restringe a puntuar los parámetros, solo en los intervalos propuestos en la Tabla 17 (3,9,27 y 81), discretizando así la escala exponencial.

Tabla 17: Tabla resumen del RHRS de Colorado (Russell et al., 2008)

		Puntuación				
		3	9	27	81	
Talud/Ladera	Altura	25 a 50 ft.	50 a 75 ft.	75 a 100 ft.	>100 ft.	
	Ángulo de talud promedio	0 a 2	2 a 4	4 a 8	>8	
	Frecuencia de caídas	> 2 años	1 a 2 años	Anualmente, estacional	Todo el año, eventos graves	
	Características de Despegue	Ninguna	Menor	Muchas	Dominantes	
	Eficiencia de la berma	95% a 100% /Clase 1	65% a 94% /Clase 2	30% a 64% /Clase 3	<30% /Clase 4	
Clima	Precipitación anual	< 10 pulgadas	10 a 20 pulgadas	20 a 35 pulgadas	>35 pulgadas	
	Cielos de congelamiento	1 a 5	6 a 10	11 a 15	16 o más	
	Filtración/Agua	Seco	Húmedo/mojado	Goteando	Agua corriendo	
	Orientación	N	E,W,NE,NW	SE, SW	S	
Geología	Rocas Sedimentarias	Grado de socavamiento	0 a 1ft.	1 a 2 ft.	2 a 4 ft.	> 4 ft.
		Jar Slake	6	5	3 a 4	1 a 2
		Grado de estratificación	1 a 2 capas debiles; <6 pulgadas	1 a 2 capas debiles; >6 pulgadas	> a 2 capas debiles; <6 pulgadas	> a 2 capas debiles; >6 pulgadas
	Rocas Cristalinas	Característica de roca	Homogénea/Masiva	Pequeñas fallas/vetillas	Zona de esquistosidad/ Cizalle < 3m	Zona de pegmatitas débiles/ micas/cizalle > 3m
		Grado de overhang	0 a 1ft.	1 a 2 ft.	2 a 4 ft.	> 4 ft.
		Grado de meteorización	Fresca	Superficie teñida	Ligeramente alterada y suavizada	Core stone
	Discontinuidades	Tamaño de bloque/Volumen	< 1ft. / <1cy.	1 a 2ft. / 1 a 3 cy.	2 a 5 ft. / 3 a 10 cy.	> 5ft. / >10 cy.
		Numero de sets	1	1 más aleatorio	2	>2
		Persistencia / Orientación	< 10ft. ; planos entrando al talud	> 10 ft. ; planos entrando al talud	<10 ft. ; planos a favor del talud	>10 ft. ; planos a favor del talud
		Apertura	Cerrada	0,1 a 1 mm	1 a 5 mm	> 5 mm
		Condiciones de meteorización	Fresca	Superficie teñida	Relleno granular	Relleno de Arcillas
		Fricción	Rugosa	Ondulada	Planar	Slickenside
		Depósitos Clásticos	Tamaño de bloques (x3)	<1ft.	1 a 2 ft.	2 a 5 ft.
	Forma de bloques (x3)	Tabular	Blocky	Blocky a angular	Redondeada y/o suavizada	
	Vegetación (x3)	Completamente vegetada	Parches de vegetación	Plantas aisladas	Sin vegetación	
	Puntaje Total de Peligro					
	Tráfico	Distancia de desición	>80%	60% a 80%	40% a 60%	<40%
Riesgo Vehículo Promedio		0 a 25%	25 a 49%	50 a 74%	75 a 100%	
Numero de Accidentes		0 a 2	3 a 5	6 a 8	8 o más	
Puntaje total de Riesgo						

6.3 **Rockfall Hazard Rating System propuesto para Ruta G-25**

Como se menciona anteriormente, el sistema de puntuación propuesto para la ruta G-25, toma como metodología base el sistema modificado propuesto por Russell *et al.* (2008). Sin embargo, se realizan modificaciones de ciertos parámetros con el objetivo de agilizar aún más su implementación, y que sea relativamente fácil y rápido de usar en terreno.

Las principales modificaciones que se realizan sobre la metodología de Russell *et al.* (2008) son las siguientes:

- **Ángulo del talud:** Se sigue la misma lógica sobre el ángulo promedio del talud, sin embargo, se utilizan las categorías de pendientes propuestas por Si-Qiao *et al.* (2014). Este señala que las caídas de rocas en rutas ocurren principalmente en taludes con pendientes mayores a 45°. Para pendientes menores a 40°, la probabilidad de que una roca se desprenda es muy baja, todo esto en condiciones estáticas. Por lo tanto, las categorías son las siguientes:
 - Pendiente < 45°
 - Pendiente entre 45° - 60°
 - Pendiente entre 60° - 70°
 - Pendiente mayor a 70°
- **Historial de caídas de rocas:** Se mantiene a la metodología original propuesta por Pierson *et al.*, (1990) debido a la dificultad a la hora de obtener datos continuos de caídas rocosas en taludes, tal de poder entregar una frecuencia numérica de caídas. Se evalúa cualitativamente la actividad histórica que tiene el talud. Las categorías son las siguientes:
 - Pocas caídas
 - Caídas ocasionales
 - Muchas caídas
 - Caídas constantes
- **Eficiencia de la berma:** La modificación propuesta por Russell *et al.* (2008) cuantifica este parámetro a través de mediciones directas del ancho y profundidad de la berma. En términos prácticos, esto puede resultar muy demandante. En vista de esto, este parámetro queda definido como en el sistema original, en términos cualitativos. Las categorías son las siguientes:
 - Buena captación
 - Captación moderada
 - Captación limitada
 - Sin captación
- **Ciclos de congelamiento/descongelamiento:** Russell *et al.* (2008) considera el índice de congelamiento/descongelamiento propuesto por Lienhart (1988). Este último definió este índice como un ciclo de congelamiento/descongelamiento “húmedo” en donde también incluye en su cálculo, las precipitaciones diarias. En el presente estudio, se definen los ciclos de congelamiento/descongelamiento, solo basado en cambios de temperatura, sin considerar las precipitaciones. Para esto se toma el trabajo realizado por Hershfield (1974) el cual estudió la frecuencia de los ciclos de congelamiento/descongelamiento en Estados Unidos. Define intervalos acordes a la cantidad de días al año en que la temperatura diaria fluctúa por encima y por debajo del punto de congelamiento (0°C). Según esto, se definen las siguientes categorías para este parámetro:
 - Sin ciclos de congelamiento/descongelamiento

- Ciclos de congelamiento/descongelamientos cortos: La temperatura diaria fluctúa por encima y por debajo de los 0°C menos de 100 días al año.
- Ciclos de congelamiento/descongelamientos intermedios: La temperatura diaria fluctúa por encima y por debajo de los 0°C entre 100 y 250 días al año.
- Ciclos de congelamiento/descongelamientos largos: La temperatura diaria fluctúa por encima y por debajo de los 0°C más de 250 días al año.
- **Orientación del talud:** Este parámetro fue definido inicialmente por Russell *et al.* (2008) relacionando la exposición al sol que tiene el talud, con los fenómenos de meteorización que este puede presentar. Este fue categorizado para el hemisferio norte, las que en este estudio se ajustan al hemisferio sur. En este hemisferio, los taludes que tienen mayor exposición al sol son los que tienen su “cara libre” en dirección hacia el norte.

Además de las modificaciones realizadas al sistema de Russell *et al.* (2008), se propone un nuevo parámetro para caracterizar los depósitos clásticos, en particular para caracterizar la matriz.

- **Compacidad de la matriz:** La estructura del suelo o matriz, según Kennedy & Lau (1985) puede ser analizada en 2 grupos: Una estructura primaria y una secundaria. La primaria consiste en los granos que están en contacto directo entre sí, entregando una primera resistencia a la erosión, al corte y a la compresibilidad. La erosión de estos granos provoca cambios en la resistencia de la matriz y esto puede generar colapsos en el depósito. Por otro lado, la estructura secundaria está compuesta por todos los granos que se encuentran en el espacio intersticial que dejó la estructura primaria. Esta puede ser perturbada por la acción de fuerzas mecánicas (por ejemplo, las vibraciones sísmicas) o hidráulicas (flujos). La erosión de la matriz en los depósitos clásticos es un factor predominante a la hora de evaluar el peligro de caídas de rocas, debido a la desestabilización de bloques que este proceso puede generar. Es por esto, que se propone el parámetro de compactación, para caracterizar la estructuralidad de la matriz. En ingeniería de suelos, se usa este término, mientras que en geología se prefiere usar el término consolidación para definir el fortalecimiento del sedimento en la matriz. Una matriz con una buena compactación es más difícil de erodar que una matriz más “suelta”. McKenzie (2001) indica aquellos factores más relevantes a la hora de caracterizar la compactación de suelos en trabajo de campo. Entre ellos se destaca el tamaño de los terrones de suelo y la facilidad de quiebre de estos. A mayor tamaño de los terrones con mayor dificultad de quiebre, mayor grado de compactación. En base a todo lo anterior, se definen las siguientes categorías para este nuevo parámetro:
 - Muy alta compacidad: Matriz en proceso de cementación. Esta categoría se reserva para aquellos depósitos con matriz semi-consolidada, en proceso de litificación. Se puede considerar como un paso intermedio entre depósitos no consolidados y rocas sedimentarias.
 - Alta compacidad: los terrones son mayor a 50 mm y/o la matriz es muy rígida y difícil de atravesar con una navaja o cuchillo.
 - Moderada compacidad: los terrones miden entre 5 y 50 mm y/o la matriz se disgrega en pequeños terrones con realizar un pequeño estrés en una muestra de suelo (matriz firme)
 - Baja a muy baja compacidad: los terrones son menor a 5 mm y/o la matriz se disgrega al tocarla (matriz muy suelta).

La definición de todos los parámetros usados en este sistema, junto a la explicación de cada categoría se exponen en Anexo D.

A continuación, se explica paso a paso, la implementación de este sistema modificado.

6.3.1 Identificación de Taludes y Clasificación Preliminar.

El primer paso consiste en realizar una **base de datos o inventario** con la ubicación geográfica de todos los taludes que sean fuente de desprendimiento de rocas hacia la ruta. El propósito de este paso es reunir información específica e identificar los sitios en donde ocurren caídas de rocas. Este inventario puede ser acompañado de un catastro de eventos de remociones en masa, identificados en la zona de estudio.

La delimitación precisa de la sección de ladera en donde ocurren caídas de rocas es importante. Para evitar ambigüedades a la hora realizar el inventario, se utilizará la definición propuesta por Pierson *et al.* (1990) para seleccionar los taludes a evaluar:

Cualquier talud ininterrumpido a lo largo de una carretera donde el nivel (frecuencia y/o cantidad) y el modo de caída de rocas son los mismos

Los límites de esta sección se establecerán por la longitud del talud adyacente al camino. Para el presente trabajo, se identifican con puntos GPS el inicio y el final del talud en evaluación.

Aquellos taludes que ya se encuentran con alguna medida de mitigación, como el de la Figura 54, quedan descartados del inventario. Esto es, porque su peligro ha sido disminuido o mitigado con la barrera estructural que se haya implementado. Sin embargo, existen casos en que la fortificación no ha sido bien implementada, o esta cubre parcialmente el talud, dejando zonas al descubierto que pueden ser fuente de caídas de rocas, como en la Figura 55, en donde la malla solo cubre la parte inferior del talud. Para estos casos, el talud debe ser considerado en el inventario para ser evaluado posteriormente.



Figura 54: Talud fortificado completamente, en el kilómetro 75 aproximadamente.



Figura 55: Talud fortificado parcialmente. Todo el tramo superior queda expuesto.

Luego de haber identificado todos los taludes en el inventario, la siguiente etapa es la Clasificación Preliminar. El objetivo principal de esta etapa es agrupar los taludes en tres categorías. Sin esta etapa, se gastaría demasiado tiempo en realizar la calificación detallada en sitios con baja a muy baja probabilidad de generar una condición potencialmente peligrosa.

El criterio para agrupar las laderas consiste en tres categorías “A”, “B” o “C” como se muestra a continuación.

Tabla 18: Criterios y clases de clasificación preliminar (Pierson *et al.*, 1990).

Criterio \ Clase	A	B	C
Potencial estimado para caídas de rocas al camino	Alta	Moderada	Baja
Actividad histórica de caídas de rocas	Alta	Moderada	Baja

El “potencial estimado para caídas de rocas al camino” es el criterio principal a la hora de categorizar los taludes. Por ejemplo, si se tiene un talud con un alto potencial de generación de caídas de roca, esta podría ser categorizada en clase A, independiente si tuvo actividad histórica. La “actividad histórica de caídas de rocas” es un criterio suplementario, cuando se necesita aclaración. Por ejemplo, si al evaluar un talud, se tiene cierta confusión si clasificarla en clase A o B, entonces se utiliza el criterio antes mencionado para definir la clasificación. Si el caso fuese que el talud presenta alta actividad reciente, entonces este quedará clasificado en clase A, mientras que si la actividad es poco frecuente (baja), entonces el talud quedará clasificado en B.

Al calificar el Potencial estimado para caídas de rocas a la ruta, se deben considerar los siguientes factores según Pierson *et al.* (1990):

- Tamaño estimado del material
- Cantidad estimada de material por evento
- Cantidad disponible
- Eficiencia de la berma

En el presente estudio se proponen considerar también la altura del talud.

Al calificar la Actividad histórica de caídas de rocas, se deben considerar los siguientes factores según Pierson *et al.* (1990):

- Frecuencia de caídas de rocas al camino
- Cantidad de material
- Tamaño de material
- Frecuencia de limpiezas en la ruta

En base a Pack *et al.* (2006) se definen los siguientes criterios para clasificar los taludes, según los factores antes mencionados:

- Clase A: El peligro varía de Moderado a Alto. En estos casos la fuente de caídas de rocas es evidente. Existen bloques inestables en la superficie del talud, estos suelen ser de gran tamaño relativo a la altura del talud. La berma suele ser angosta o inexistente. Si a este escenario se suma la alta frecuencia de caídas de rocas desde el talud, entonces indudablemente la calificación es de Clase A.
- Clase B: El peligro varía de Bajo a Moderado. Algunos bloques inestables en la superficie del talud, junto a bloques potencialmente inestables, debido a su condición estructural. La altura del talud en relación con el ancho de la berma permite que algunos bloques puedan llegar a la ruta.

- Clase C: El peligro es nulo. Es casi imposible que una roca caiga desde el talud, y de hacerlo es muy poco probable que este alcance a llegar a la ruta.

Esta clasificación preliminar es completamente subjetiva, por lo que depende mucho del profesional que la realice. Se debe tener en cuenta que un talud clasificado en “C” implica que es poco probable que una roca caiga en aquel sitio, o de hacerlo, es poco probable que alcance la ruta.

Todos los taludes categorizados en “A” pasarán indudablemente a la siguiente etapa. Son estas las que requieren mayor atención y las que eventualmente podrían ser consideradas como peligrosos. Los taludes categorizados en “B” deben evaluarse y queda a criterio del profesional o los y las profesionales a cargo, si pasa a la siguiente etapa. Las laderas categorizadas en “C” no se evalúan, y por lo tanto no pasan a la siguiente etapa.

6.3.2 Calificación Detallada

La siguiente etapa es la **calificación detallada** de los taludes. Estas categorías presentan los elementos más importantes que contribuyen al peligro general, por lo tanto, los taludes con mayor puntaje presentarán el mayor peligro.

Esta etapa tiene como objetivo principal diferenciar numéricamente los taludes evaluados acorde a su potencial peligro. Una vez calificados, los taludes pueden ser ordenados y priorizar las medidas de acción en base a sus puntajes.

En la Tabla 19 se muestra la tabla resumen propuesta del RHRS modificado para la Ruta G-25. En esta se incluyen las modificaciones realizadas junto al nuevo parámetro incluido en la caracterización de los depósitos clásticos.

Cuando se califica la geología del talud, puede ocurrir que exista más de un tipo, ya sea sedimentario, cristalino o clástico. El sistema original propone calificar cada tipo por separado, y mantener el de mayor puntaje (mayor peligro) para la sumatoria final. Es decir, si un talud presenta en contacto una lutita calcárea (sedimentaria) con una lava andesítica (cristalina) se evalúa cada tipo por separado, calificando los parámetros correspondientes a cada tipo. Finalmente se considera solo el que haya acumulado mayor puntaje.

Como es de suponer, cuando se evalúa un talud con depósitos clásticos, no se consideran los parámetros relacionados a las discontinuidades. Esto deja como resultado una desigualdad entre los parámetros que se califican para cada tipo de talud. Los taludes rocosos (sedimentarios y cristalinos) tienen 9 parámetros de calificación incluyendo la calificación que se hace a las discontinuidades. Los taludes con depósitos clásticos solo tienen 4 parámetros de calificación. Para igualar el peso que tenga cada uno, Russell *et al.* (2008) propone incluir amplificadores en los parámetros de los depósitos clásticos. Estos se muestran entre paréntesis en la Tabla 19.

Finalmente, los taludes quedan caracterizados por las siguientes variables:

- Identificador numérico del talud evaluado (ID)
- Punto inicial del talud evaluado (Coordenadas GPS)
- Punto final del talud evaluado (Coordenadas GPS)
- Tipo de talud (Roca Sedimentaria, Roca Cristalina, Depósitos clásticos)
- Puntaje de Peligro Total

Tabla 19: RHRS modificado propuesto para la Ruta G-25. Elaboración propia.











		Puntuación				
		3	9	27	81	
Talud/Ladera	Altura	<15	15 a 23m	23 a 30m	>30m	
	Ángulo de talud	<50°	50° - 60°	60° - 70°	>70°	
	Historial de caídas	Pocas caídas	Caídas ocasionales	Muchas caídas	Caídas constantes	
	Despegue	Ninguna	Menor	Muchas	Dominantes	
	Eficiencia de la berma	Buena captación	Captación moderada	Captación limitada	Sin captación	
Clima	Precipitación anual	<255 mm	255 a 510 mm	510 a 890 mm	>890 mm	
	Ciclos de congelamiento	Sin ciclos	Ciclos cortos	Ciclos intermedios	Ciclos largos	
	Filtración/Agua	Seco	Húmedo/mojado	Goteando	Agua corriendo	
	Orientación	S	E, W, SE, SW	NE, NW	N	
Geología	Rocas Sedimentarias	Grado de socavamiento	0 a 30 cm	30 cm a 60 cm	60 a 120 cm	>120 cm
		IDS	6	5	3 a 4	1 a 2
		Grado de estratificación	1 a 2 capas debiles; <15cm	1 a 2 capas debiles; >15cm	> a 2 capas debiles; <15cm	> a 2 capas debiles; >15cm
	Rocas Cristalinas	Característica de roca	Homogénea/Masiva	Pequeñas fallas/vetillas	Zona de esquistosidad/ Cizalle < 3m	Zona de pegmatitas débiles/ micas/cizalle >3m
		Grado de overhang	0 a 30cm	30cm a 60 cm	60 cm a 120cm	>120cm
		Grado de meteorización	Fresca	Superficie teñida	Ligeramente alterada y suavizada	Core stone
	Discontinuidades	Tamaño de bloque/Volumen	<30 cm / <0,76 m3	30 cm a 60 cm / 0,76 a 2,3 m3	60 cm a 90 cm / 2,3 a 7,65 m3	>90 cm / >7,65 m3
		Numero de sets	1	1 más aleatorio	2	>2
		Persistencia / Orientación	<3m ; planos entrando al talud	>3m ; planos entrando al talud	<3m ; planos a favor del talud	>3m ; planos a favor del talud
		Apertura	Cerrada	0,1 a 1 mm	1 a 5 mm	> 5 mm
		Condiciones de meteorización	Fresca	Superficie teñida	Relleno granular	Relleno de Arcillas
		Fricción	Rugosa	Ondulada	Planar	Slickenside
	Depósitos Clásticos	Tamaño de bloques (x3)	<30 cm	30 a 60 cm	60 a 90 cm	>90 cm
		Forma de bloques (x1)	Tabular	Blocky	Blocky a angular	Redondeada y/o suavizada
		Vegetación (x2,5)	Completamente vegetada	Parches de vegetación	Plantas aisladas	Sin vegetación
		Compacidad de matriz (x2,5)	Muy Alta	Alta	Moderada	Baja

7. MAPAS DE PELIGRO

Los resultados de la aplicación de la metodología que se presenta en el capítulo 5 se representan en los mapas de peligro para las distintas remociones en masa en estudio. Estos mapas se realizan a una escala 1:10.000 pero por motivos prácticos, su escala de visualización es de 1:15.000.

Como se explica anteriormente, la zonificación del peligro se hace de manera unidimensional, caracterizada solo a lo largo de la ruta. La simbología usada sobre el trazado se resume en la Tabla 20, respetando la típica escala de semáforo. Se realiza la separación entre zonas de generación y zonas de alcance, discriminando así aquellos tramos que se encuentran directamente en una zona susceptible a generar remociones en masa, frente a otro tramo que se encuentra en su zona de alcance.

Tabla 20: Simbología de los diferentes grados de peligro en Ruta G-25. Elaboración propia.

SIMBOLOGÍA		GRADO
Generación	Alcance	
		Muy Alto
		Alto
		Moderado
		Bajo
		Muy Bajo

Por motivos prácticos, la ruta se ha dividido en 5 tramos, de tal manera de generar 5 mapas para cada remoción en masa. Estos tramos son los siguientes:

- Tramo 1: Desde el kilómetro 15 hasta el kilómetro 33
- Tramo 2: Desde el kilómetro 33 hasta el kilómetro 51
- Tramo 3: Desde el kilómetro 51 hasta el kilómetro 67
- Tramo 4: Desde el kilómetro 67 hasta el kilómetro 83
- Tramo 5: Desde el kilómetro 83 hasta el final de la Ruta.

A continuación, se exponen los diferentes mapas para cada remoción en masa en estudio.

7.1 Peligro de Deslizamientos de Suelo en Ruta G-25

A partir de la caracterización geológica en la zona de estudio, plasmada en el Mapa Geológico/Geomorfológico (ver cap. 4.2), se realiza la distinción entre aquellas unidades cuaternarias susceptibles y no susceptibles a generar deslizamientos de suelo. Junto con esto, se identifica también la temporalidad y actividad que presentan las unidades en la zona de estudio, definiendo si presentan movimientos antiguos y/o actuales, según los criterios de González de Vallejo *et al.* (2002), expuesto en capítulos previos. Para el área de estudio esta información se resume en la Tabla 21.

Tabla 21: Clasificación de las unidades geológicas identificadas en la zona en base a los criterios establecidos previamente. Elaboración propia.

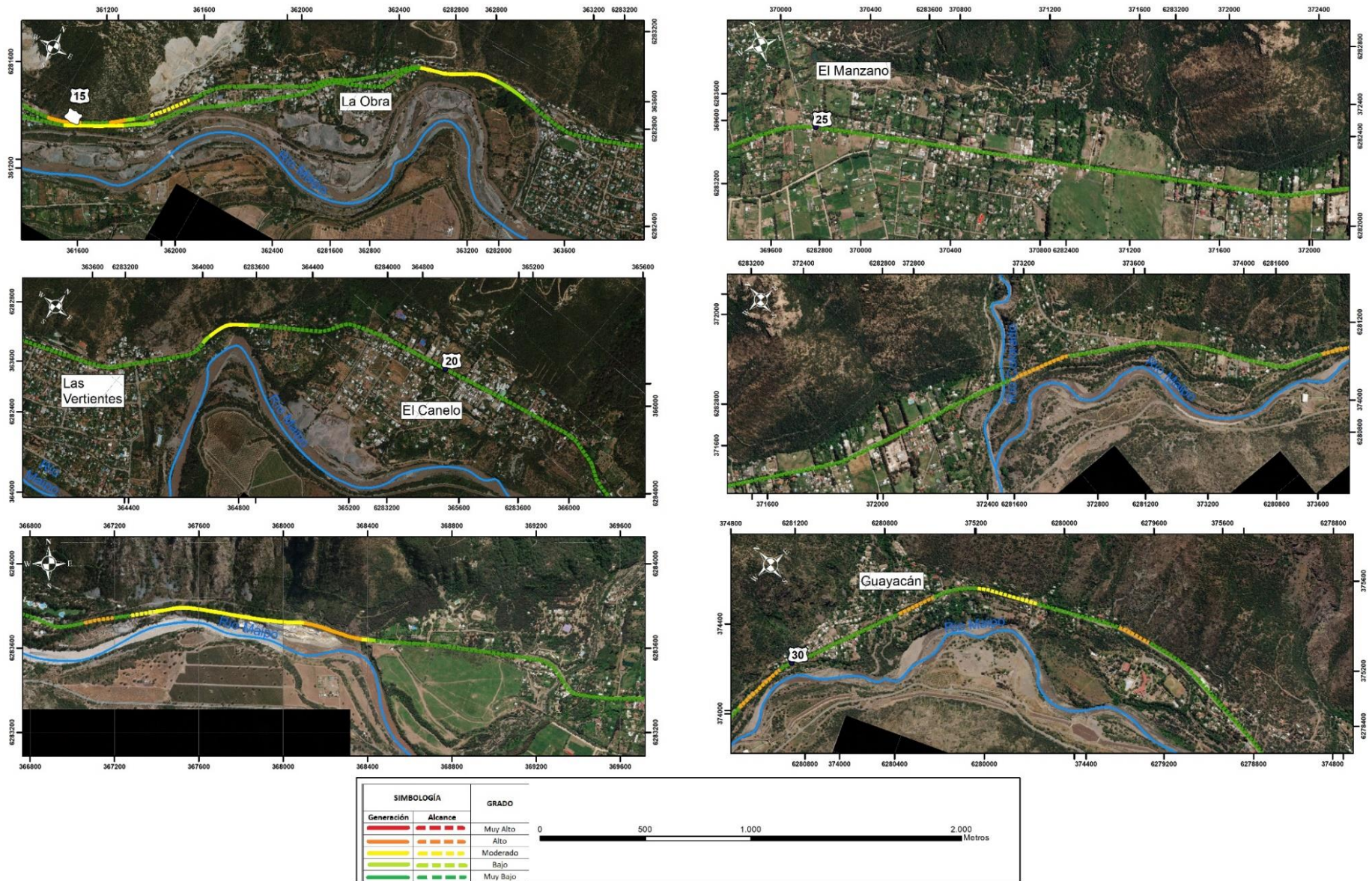
Unidades No Susceptibles	Unidades Susceptibles		
	Sin Movimientos Antiguos	Con Movimientos Antiguos	Con Movimientos Activos/Actuales
Depósitos Fluviales	Depósitos Fluvioglaciales	Depósitos Aluviales	Depósitos Taluviales
Depósitos de Talud	Depósitos de Ignimbrita	Deslizamiento de Roca y Detritos	Depósitos de Ladera Coluvial
Deslizamiento y/o Avalancha de Roca			Depósitos de Till
Depósitos Antrópicos			
Flujos Detríticos			

Según lo expuesto en la Tabla 10 (ver cap. 5.1) se realiza la asignación de los distintos grados de peligro para cada unidad de suelo, como lo muestra la siguiente tabla.

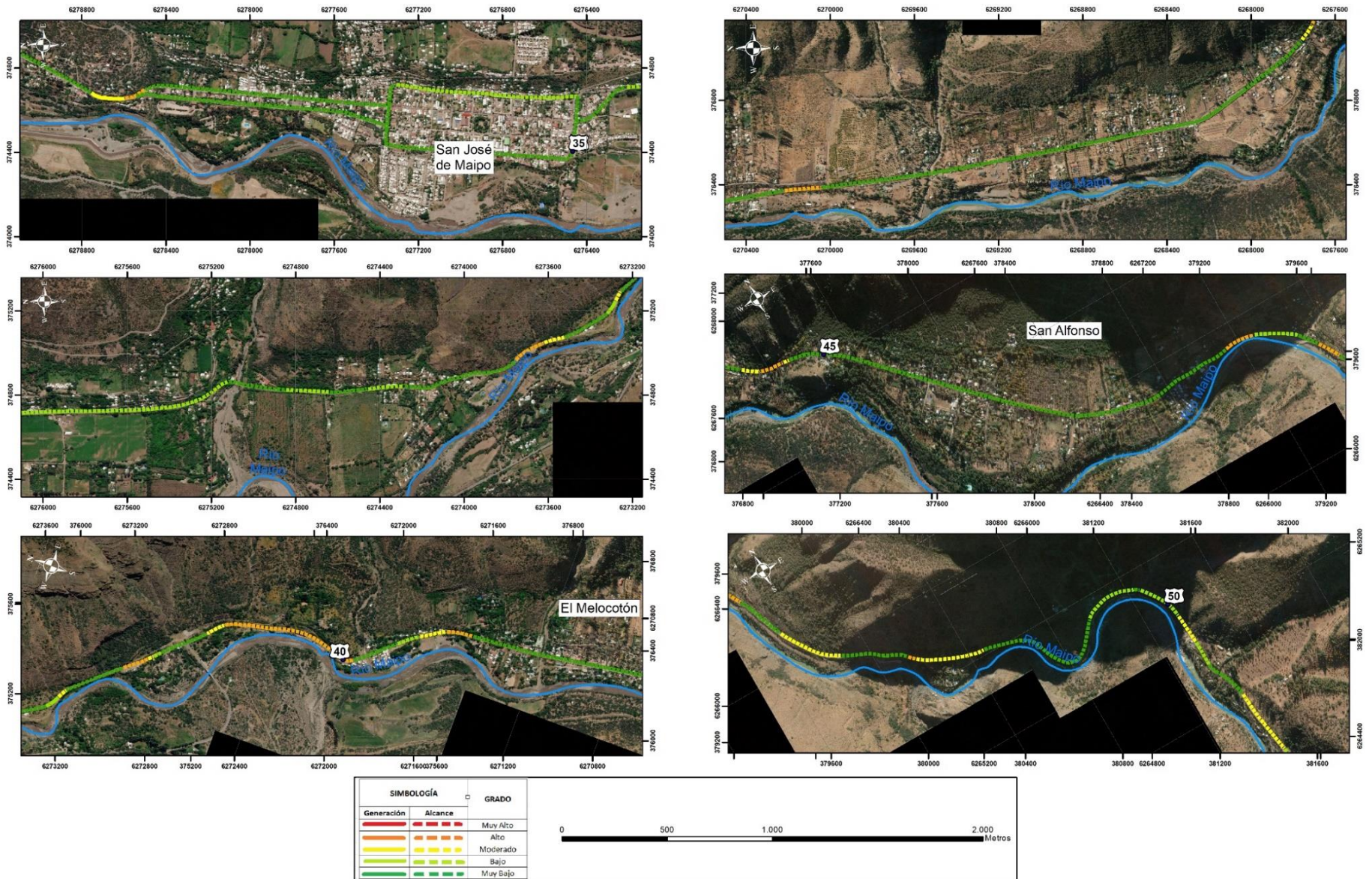
Tabla 22: Grados de peligro (generación) de deslizamientos de suelo para las distintas unidades geológicas reconocidas en la zona de estudio. Elaboración propia.

Unidades		Pendientes	15° - 25°	25° - 35°	>35°
Unidades susceptibles sin movimientos antiguos	Fluvioglaciales	Aluviales	Muy Baja	Baja	Moderada
	Ignimbrita				
Unidades susceptibles con movimientos antiguos	Aluviales	Deslizamiento de Roca y Detritos	Baja	Moderada	Alta
	Deslizamiento de Roca y Detritos				
Unidades susceptibles con movimientos actuales y/o activos	Taluviales	Ladera Coluvial	Moderada	Alta	Muy Alta
	Ladera Coluvial				
	Till				

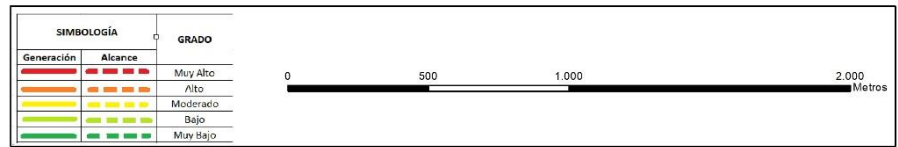
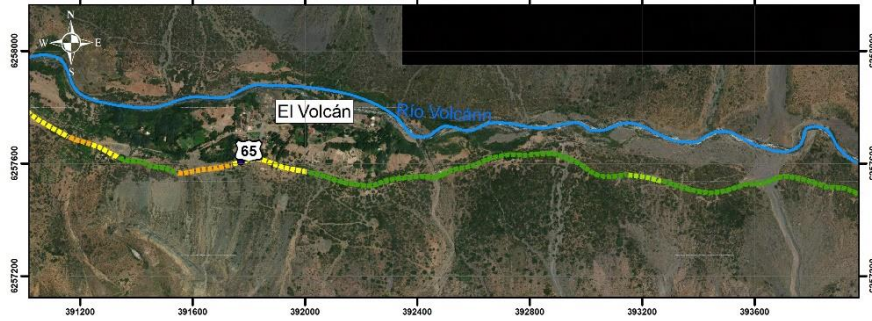
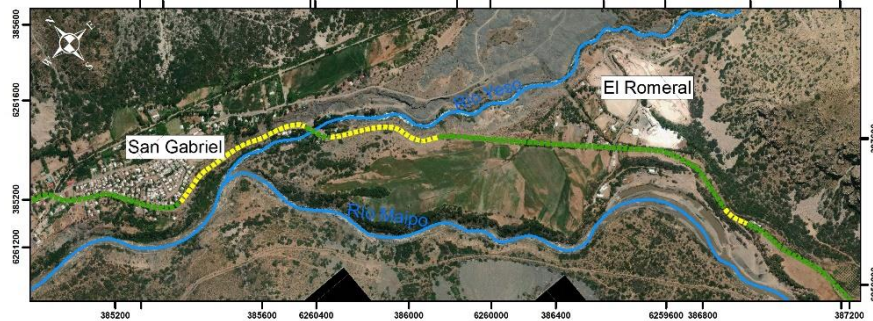
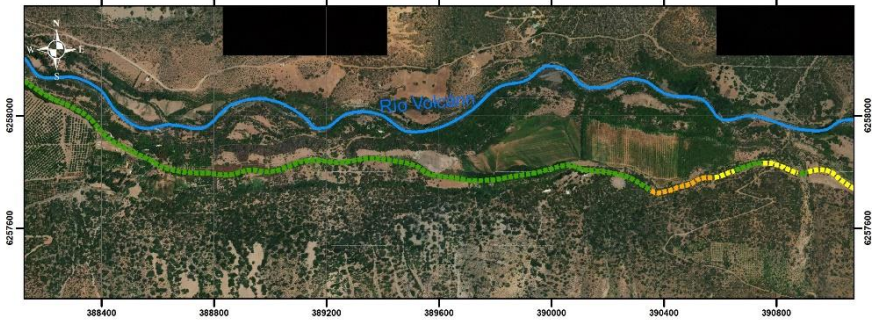
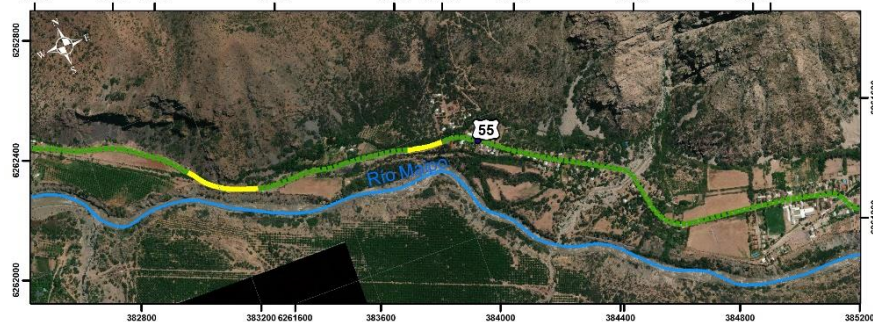
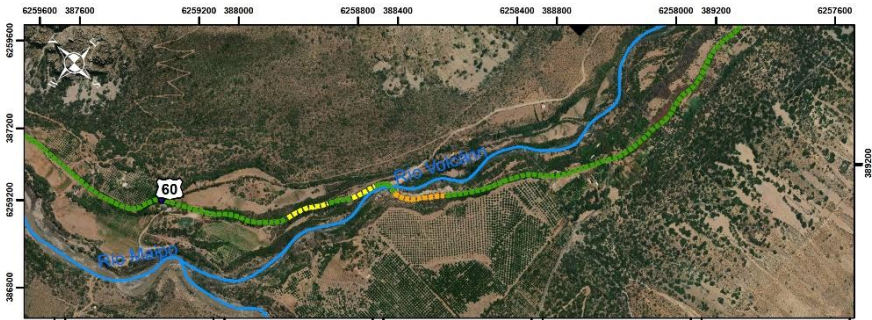
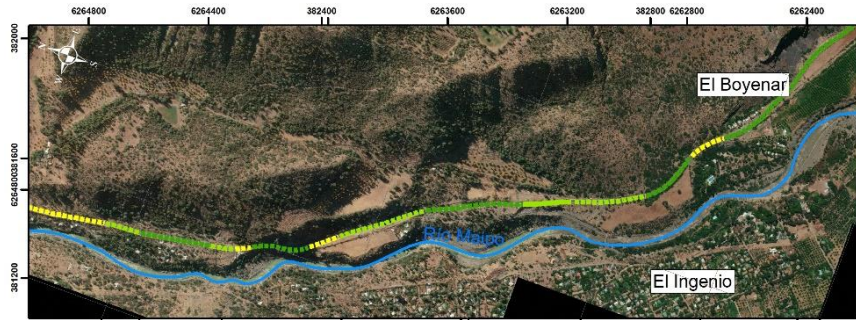
Teniendo caracterizada las zonas de generación y las consecuentes zonas de alcance, se realiza la zonificación del peligro en la Ruta G-25, la cual queda expresada en los siguientes mapas.



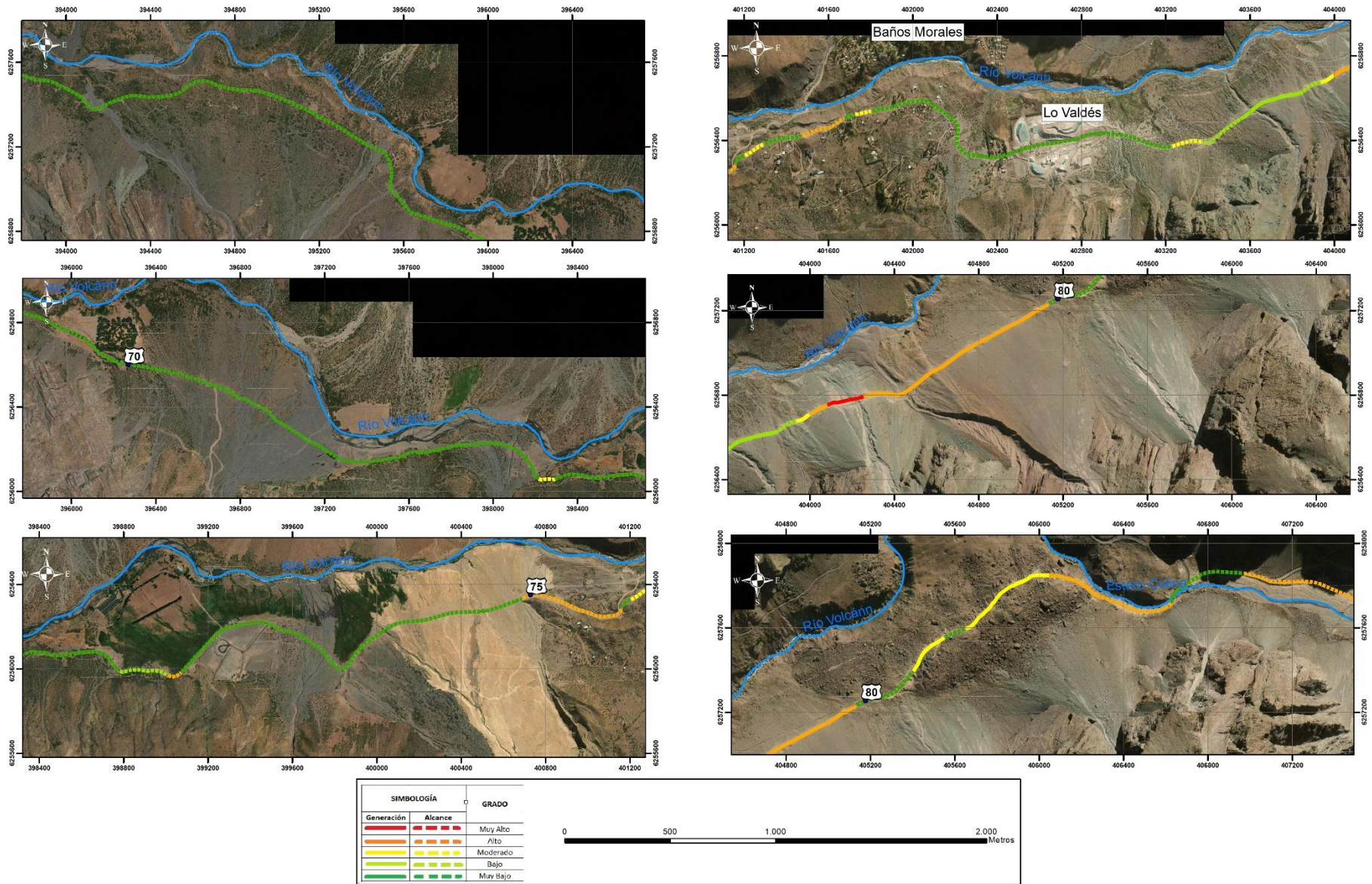
Mapa 4: Mapas de peligro de deslizamientos de suelo en Ruta G-25. Tramo 1. Elaboración propia.



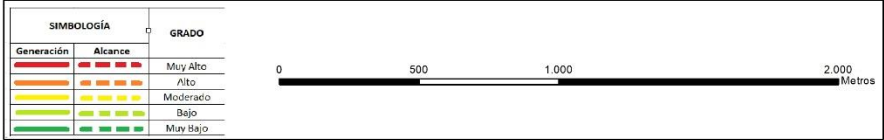
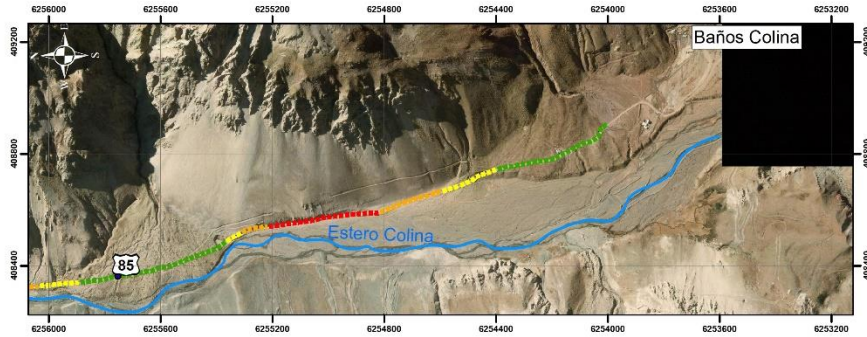
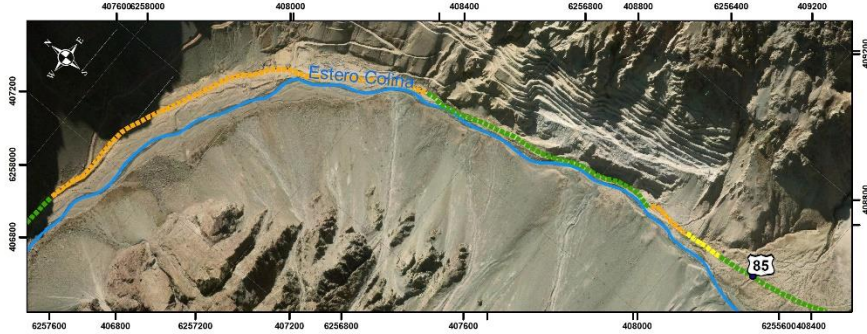
Mapa 5: Mapas de peligro de deslizamientos de suelo en Ruta G-25. Tramo 2. Elaboración propia.



Mapa 6: Mapas de peligro de deslizamientos de suelo en Ruta G-25. Tramo 3. Elaboración propia.



Mapa 7: Mapas de peligro de deslizamientos de suelo en Ruta G-25. Tramo 4. Elaboración propia.



Mapa 8: Mapas de peligro de deslizamientos de suelo en Ruta G-25. Tramo 5. Elaboración propia

7.2 Peligro de Caídas de Rocas en Ruta G-25

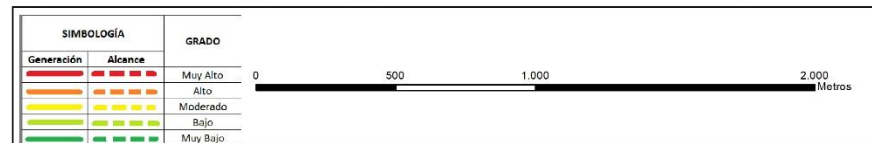
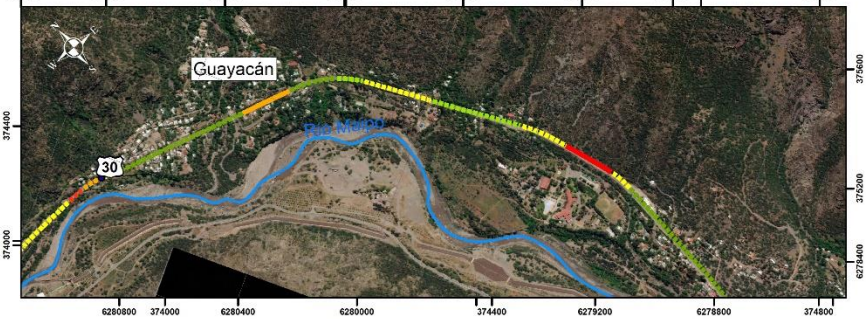
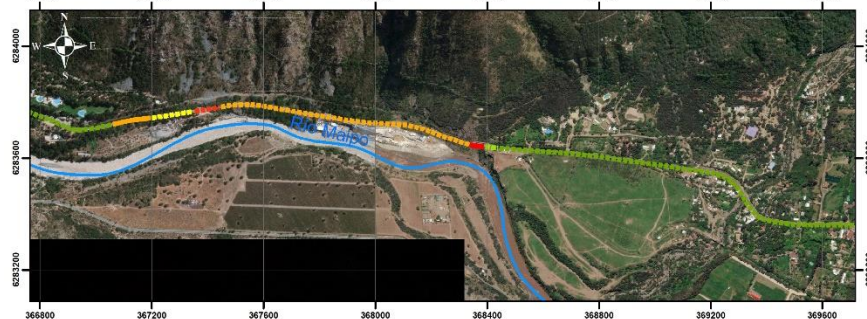
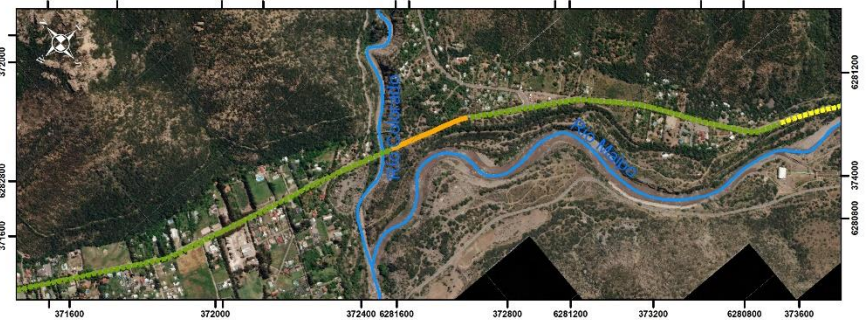
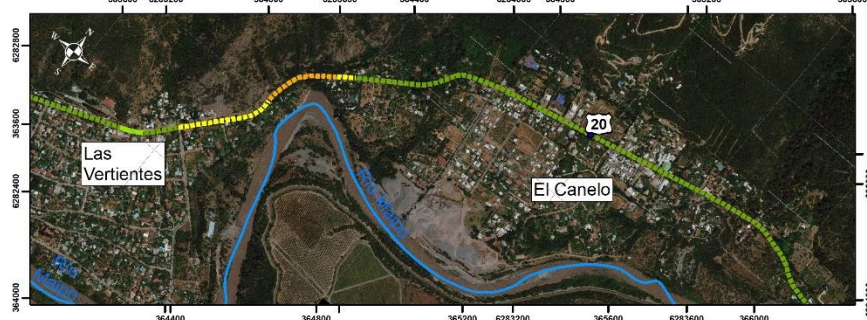
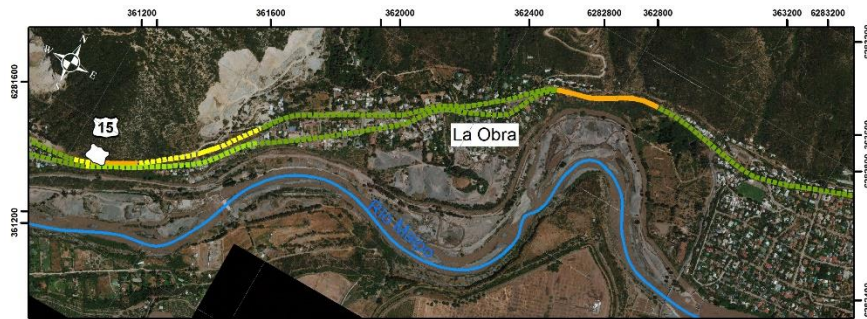
En la zona de estudio se identifican macizos rocosos fracturados que son potenciales fuentes de caídas de rocas, para los cuales se propone una evaluación del peligro basado en el GSI y en la pendiente. Una vez caracterizadas las unidades rocosas a partir del GSI, se implementa la metodología propuesta, que contempla también una evaluación cualitativa del alcance de los procesos.

Por otro lado, los depósitos clásticos identificados como potencial fuente de caídas de rocas en la zona de estudio son los siguientes:

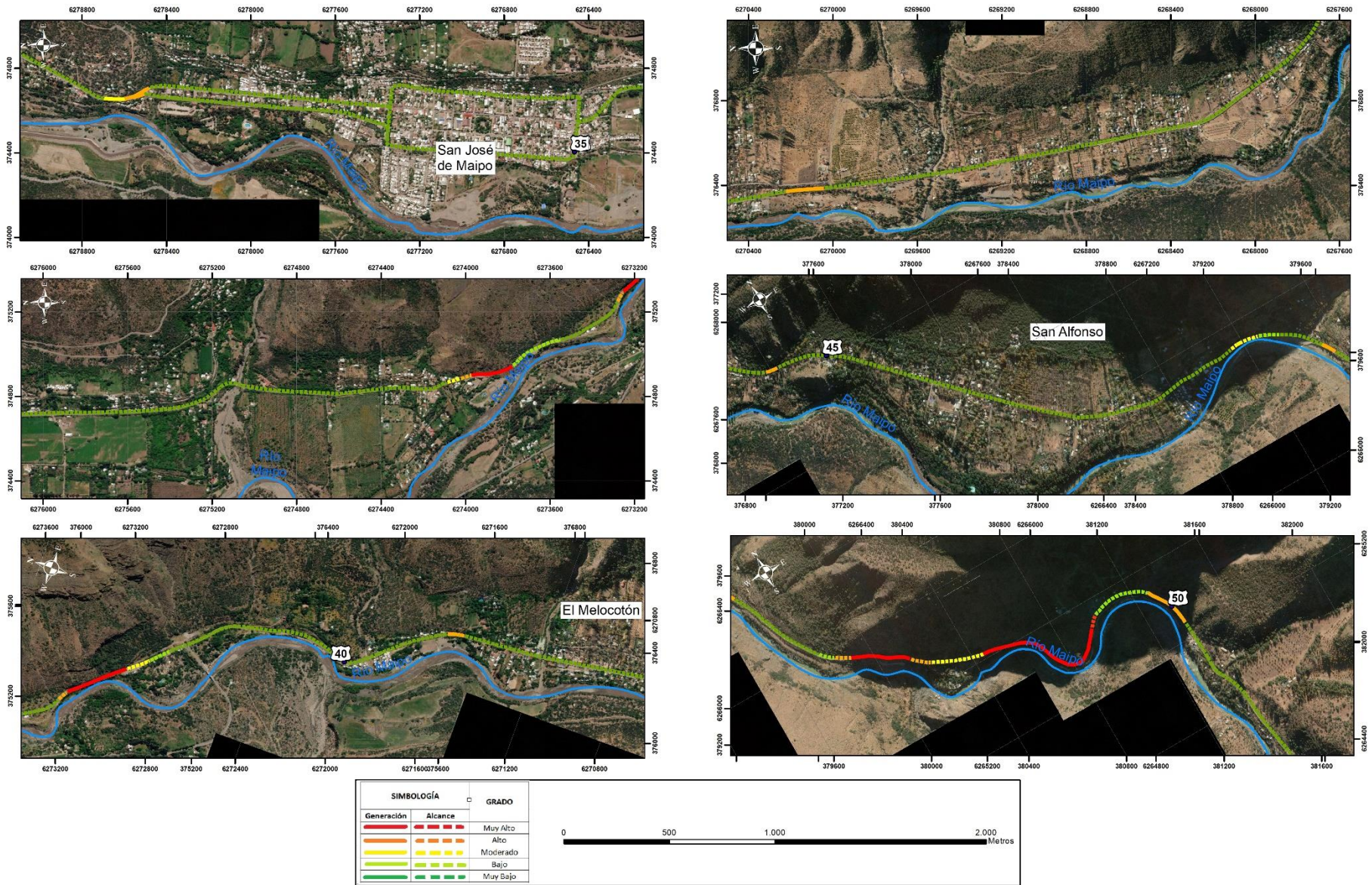
- Depósitos Aluviales
- Depósitos Taluviales
- Depósitos de Talud
- Depósitos Fluvioglaciales
- Depósitos de Till
- Depósitos de Suelo Coluvial
- Deslizamientos de rocas y detritos.

Estos depósitos reúnen las características para ser considerados como susceptibles a generar caídas de rocas, esto se debe a que presentan bloques de tamaño variables, inmersos en una matriz más fina. Estos quedan expuestos generalmente en los cortes que la ruta hace en estos depósitos. O bien, como en el caso de los depósitos de talud, que presentan escasa matriz, pero que, en superficie presentan bloques inestables que eventualmente podrían colapsar y caer.

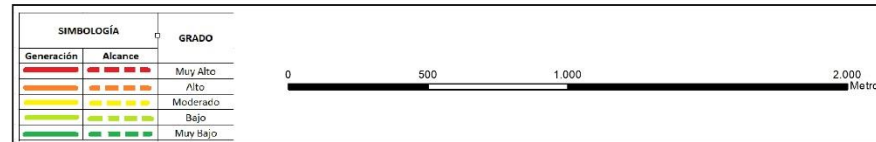
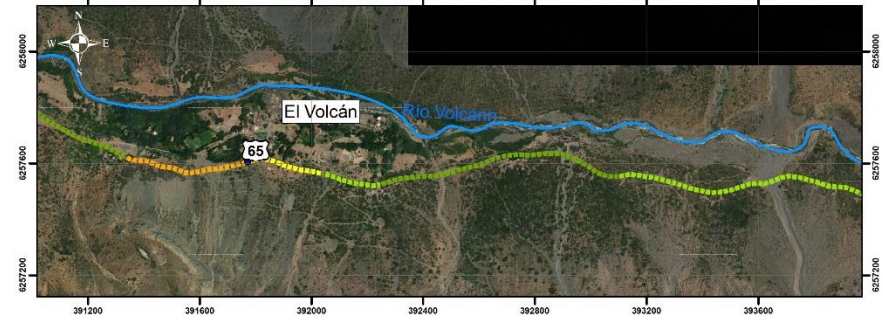
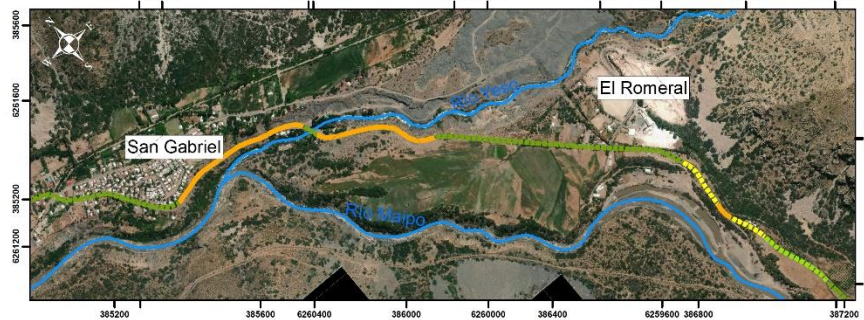
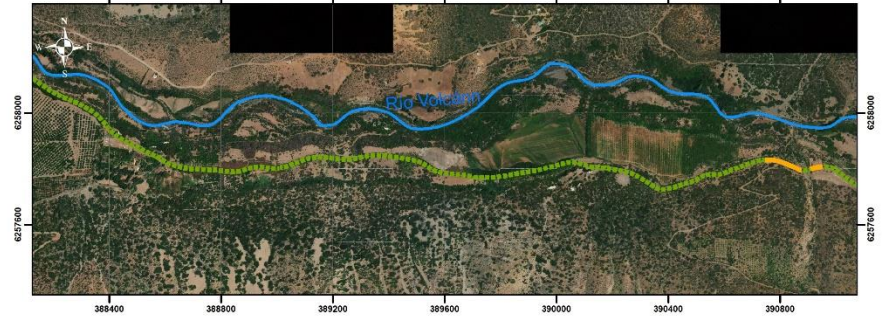
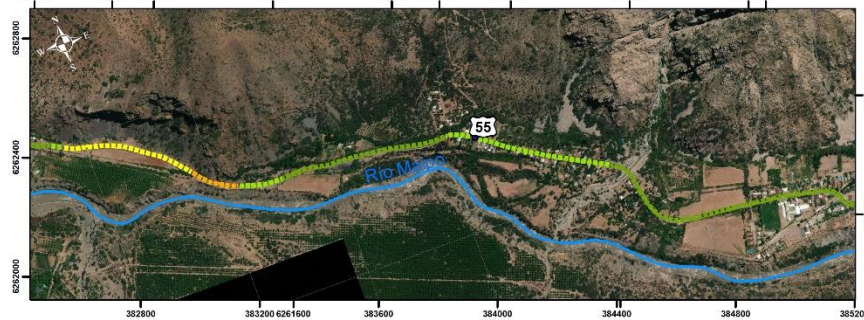
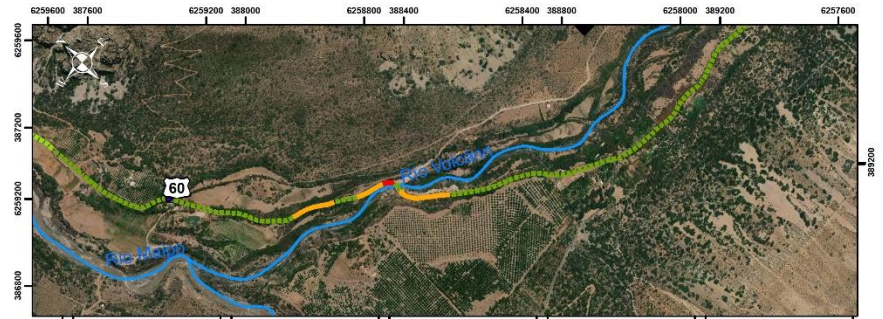
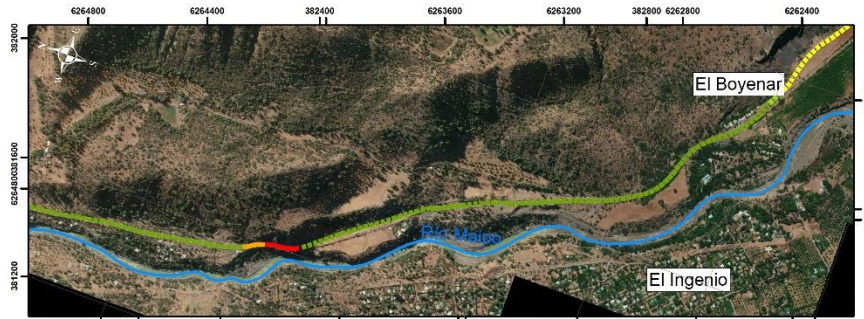
Posterior a definir las unidades susceptibles a generar caídas de rocas y evaluar su alcance, se realiza la zonificación del peligro en la Ruta G-25. Los resultados se exponen en los Mapas 9, 10, 11, 12 y 13, en las páginas siguientes.



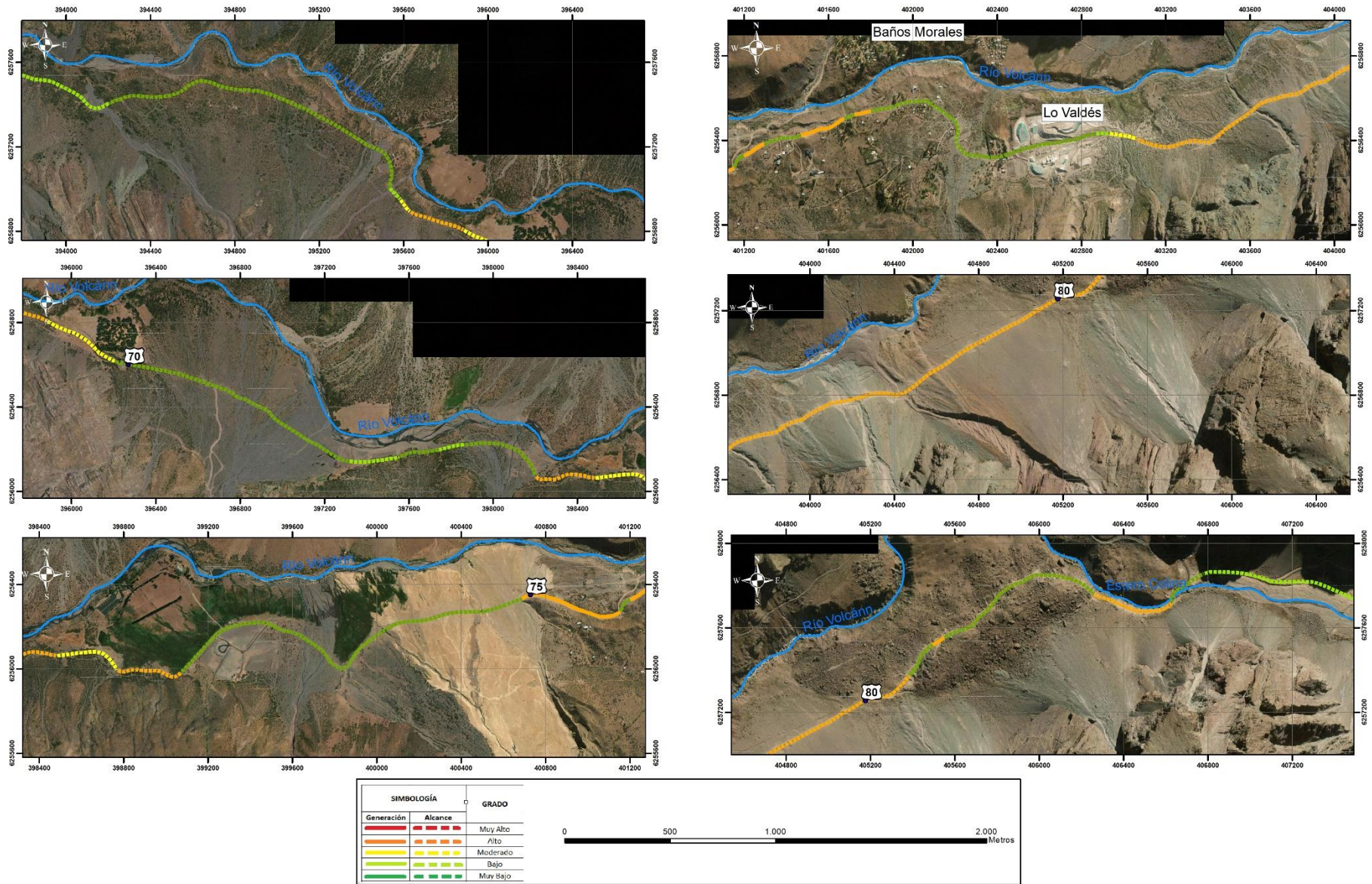
Mapa 9: Mapas de peligro de caídas de rocas en Ruta G-25. Tramo 1. Elaboración propia.



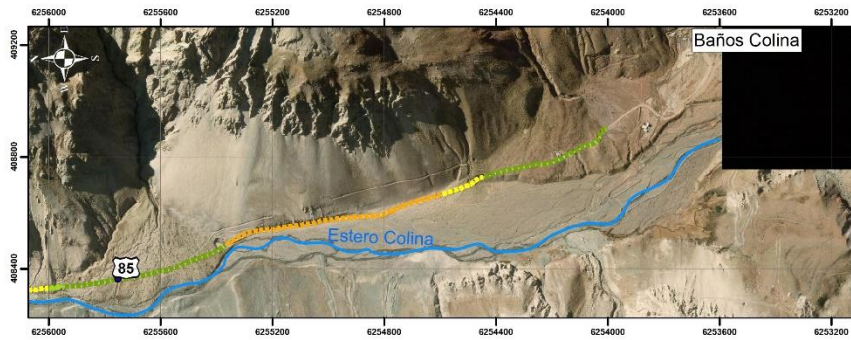
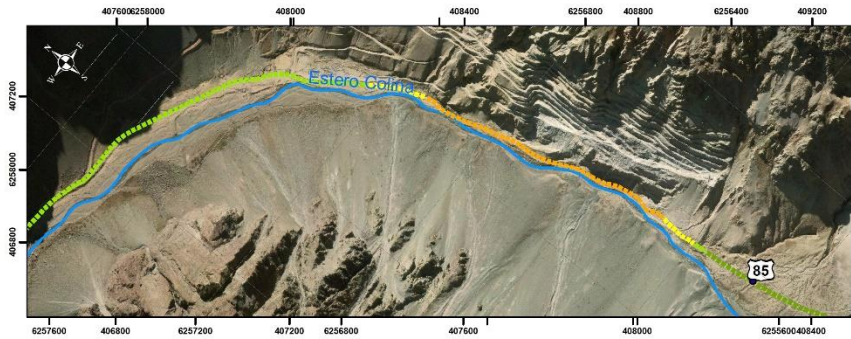
Mapa 10: Mapas de peligro de caídas de rocas en Ruta G-25. Tramo 2- Elaboración propia.



Mapa 11: Mapas de peligro de caídas de rocas en Ruta G-25. Tramo 3. Elaboración propia.



Mapa 12: Mapas de peligro de caídas de rocas en Ruta G-25. Tramo 4. Elaboración propia.



Mapa 13: Mapas de peligro de caídas de rocas en Ruta G-25. Tramo 5. Elaboración propia.

7.3 Peligro de Flujos Aluviales en Ruta G-25

La metodología para evaluar el peligro de flujos aluviales en la Ruta G-25, se basa netamente en analizar las zonas de transporte y alcance mediante observaciones de terreno o por fotointerpretación de imágenes satelitales. A continuación, se ejemplifica la evaluación realizada en tres zonas del área de estudio.

En la Figura 56 se observa un cono detrítico ubicado en el valle del Río Volcán, a la altura del kilómetro 79 aproximadamente. Este cono, según Harvey (2012) podría categorizarse como un cono progradante. Dicho esto, se tiene la zona coloreada de amarillo como la superficie disectada, a la cual se le asigna un grado de peligro bajo. Por otro lado, la zona canalizada recibe el grado de peligro máximo debido a ser la estructura principal que controla la deposición de futuros flujos detríticos. A su vez, en el extremo derecho del cono detrítico, se observa (de color rojo) un lóbulo activado recientemente, el cual tendrá un grado de peligro alto.

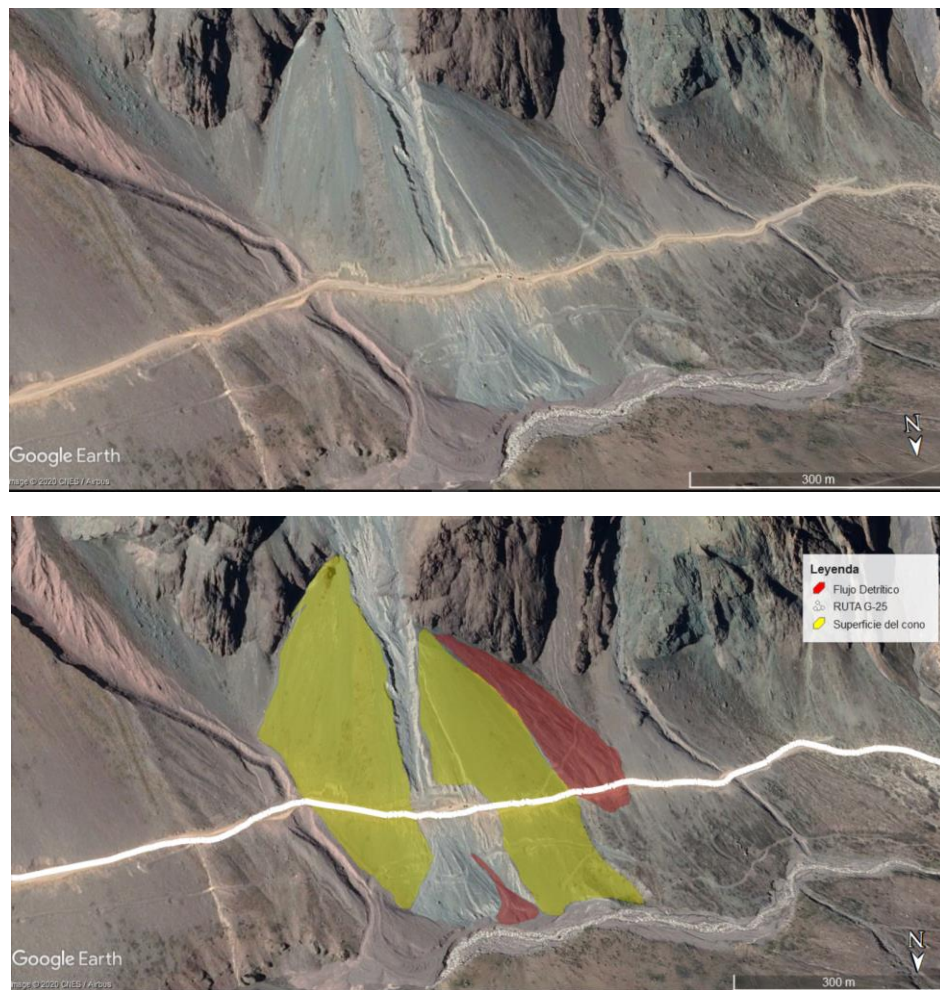


Figura 56: Cono detrítico progradante en el valle del Río Volcán.

En la Figura 57 se observa un abanico en estado deposicional, por lo tanto, cualquier zona que pertenece a este abanico, podría ser eventualmente alcanzada por un flujo aluvional. Esta superficie correspondería a la Superficie Aluvial Actual (zona amarilla). Dentro de esta zona, se encuentran depositados flujos recientes (Superficie Aluvial Activa; zona anaranjada), los cuales tendrán un grado de peligro mayor a la superficie antes mencionada, debido a la actividad reciente que presentan. Finalmente se reconoce un canal que atraviesa todo el abanico (Canales menores).



Figura 57: Abanico deposicional en el valle del Río Volcán.

En el valle del Estero Colina, llegando al final de la Ruta G-25, se encuentran el abanico de la Figura 58. Este se puede categorizar como un abanico disectado progradante, el cual tiene su lóbulo activo a la derecha de la imagen. La zona amarilla corresponde a la Superficie Aluvial Actual, y dentro de esta se encuentra la Superficie Aluvial Activa (anaranjada), con depósitos de flujos aluvionales recientes. Con una altura relativa mayor a las superficies antes mencionadas, se encuentra la Superficie Aluvial Sub-Actual (verde), con evidente cubierta vegetal y sin registro de flujos recientes. También se reconoce un canal inciso en el abanico aluvial actual, el cual disecta a todas las superficies antes mencionadas.

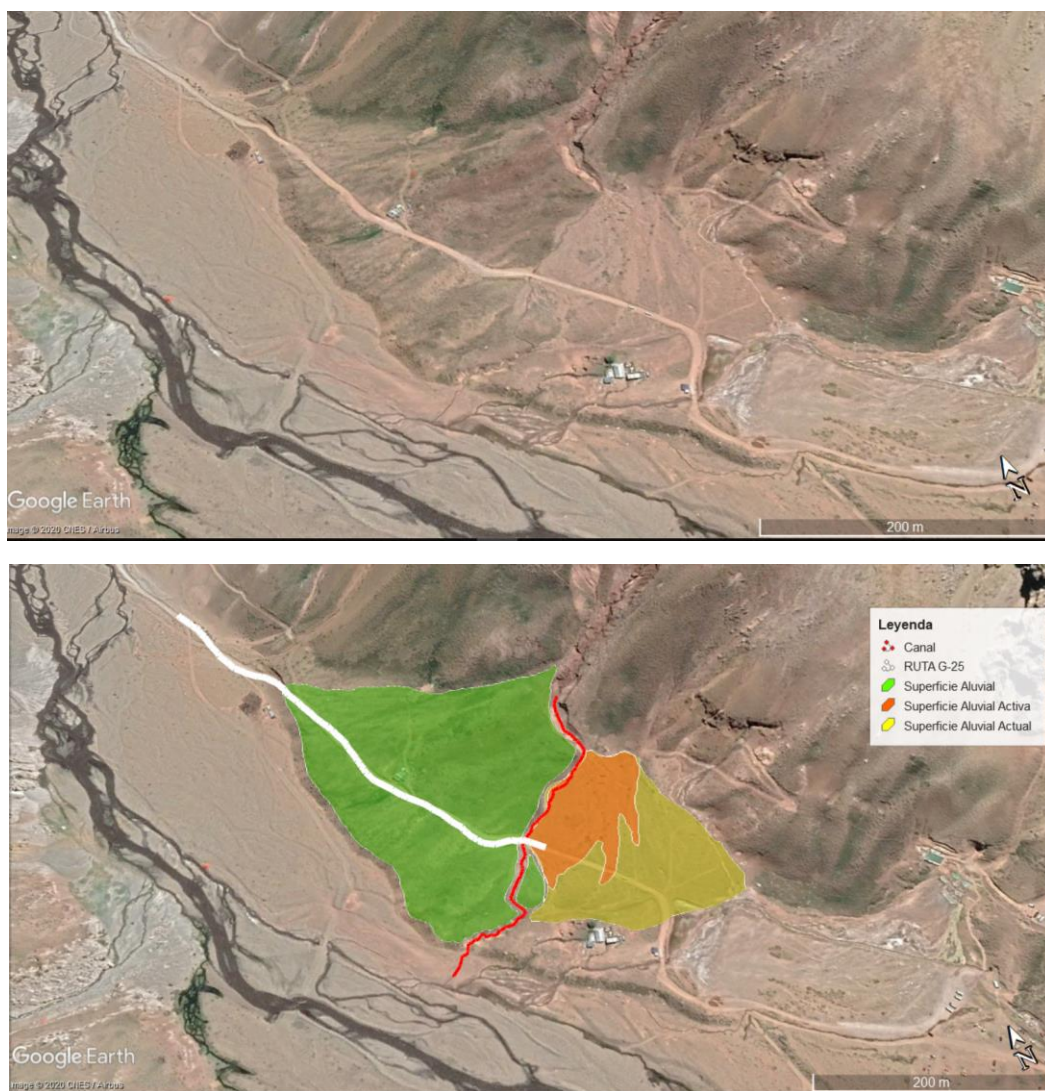
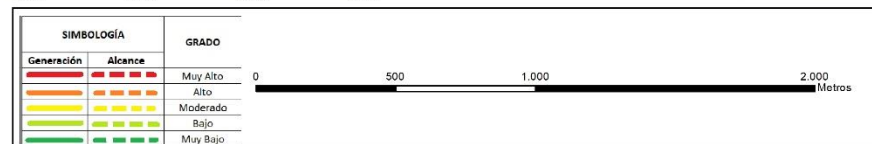
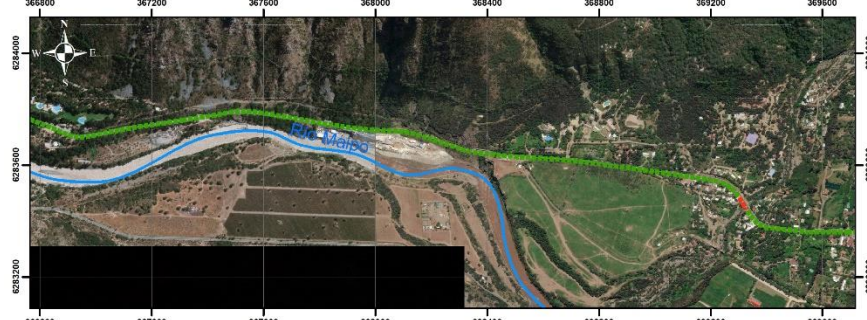
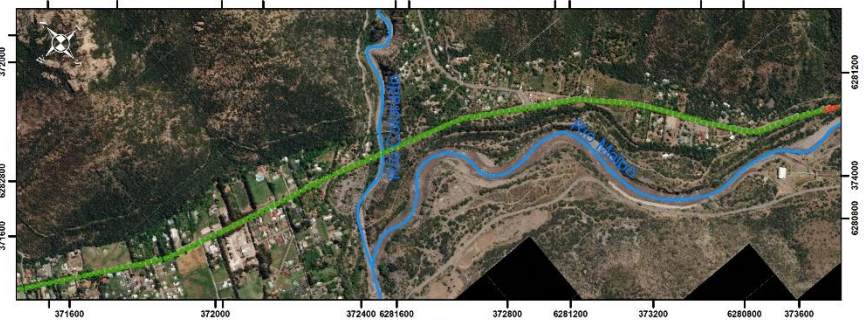
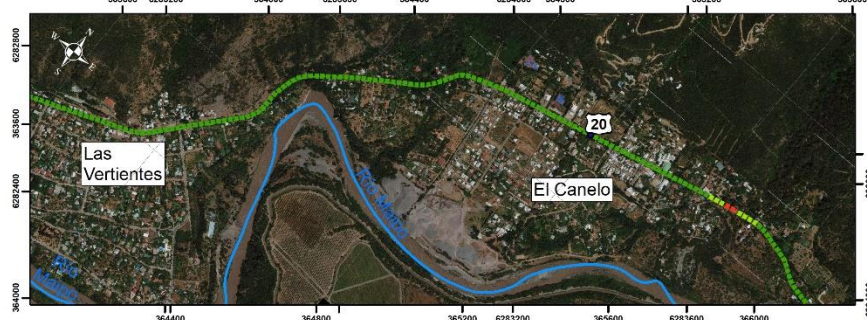
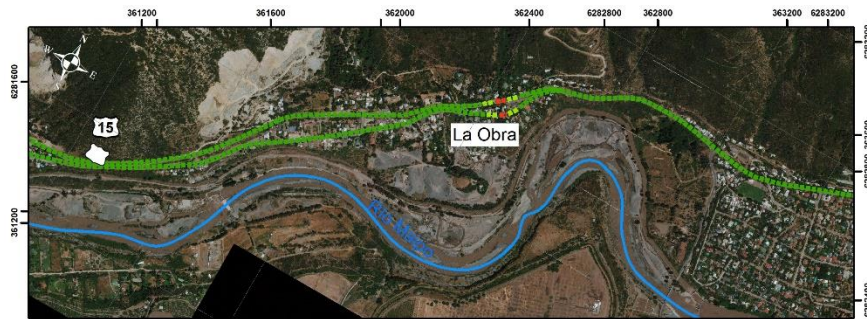
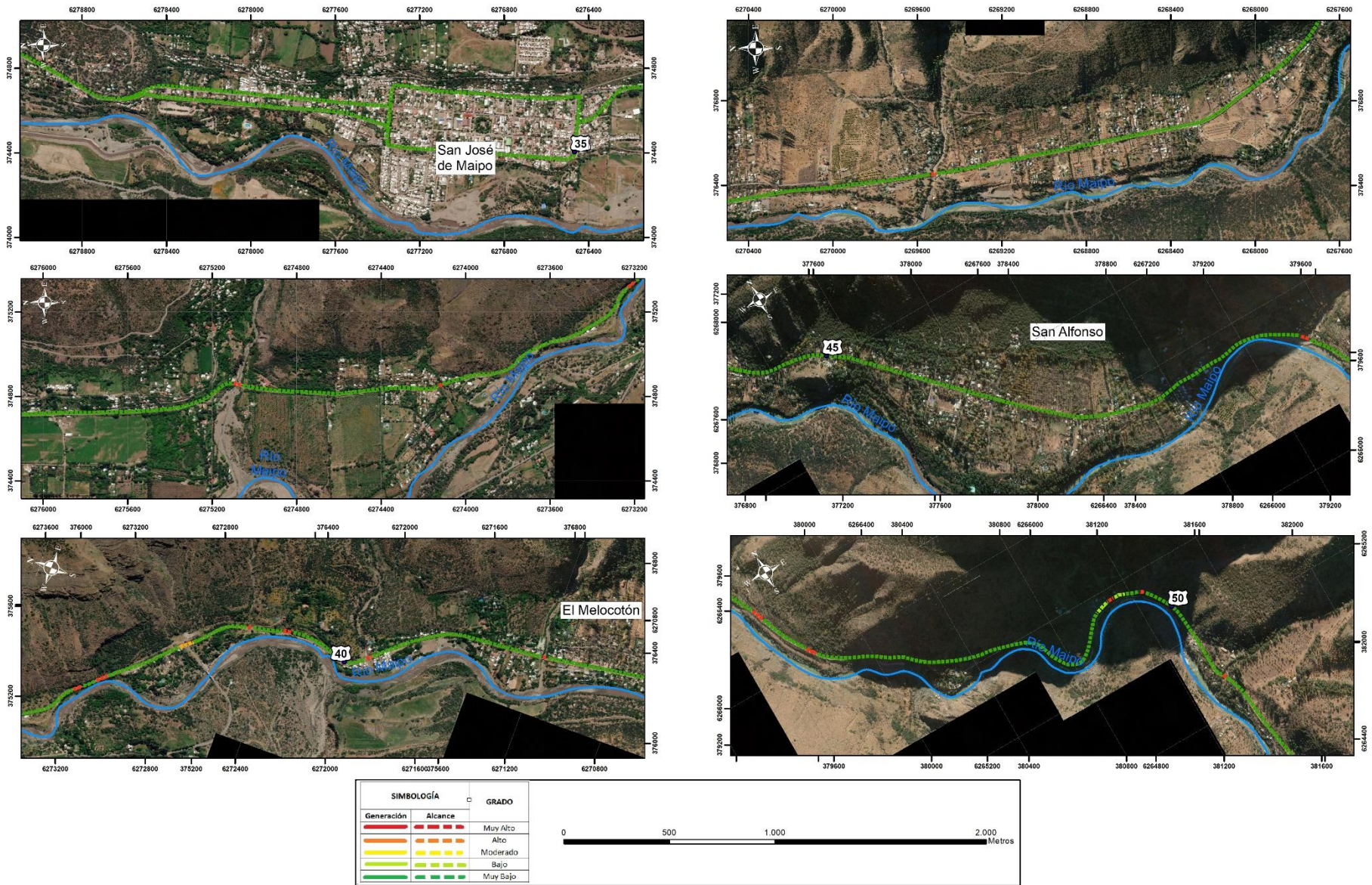


Figura 58: Abanico progradante disectado en el valle del Estero Colina.

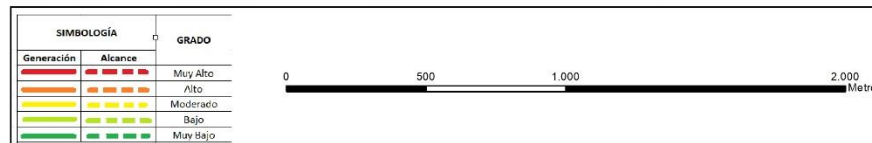
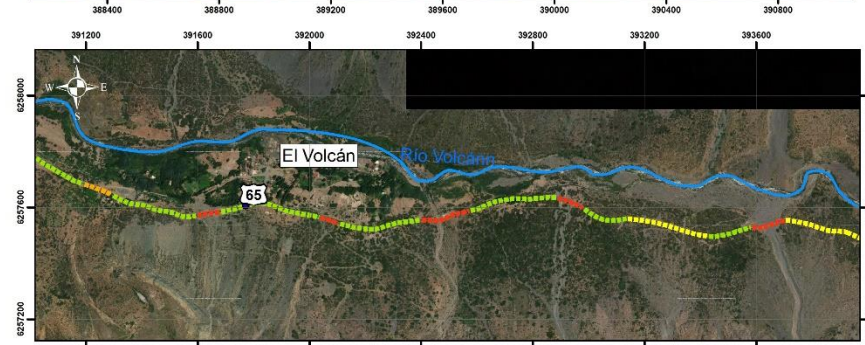
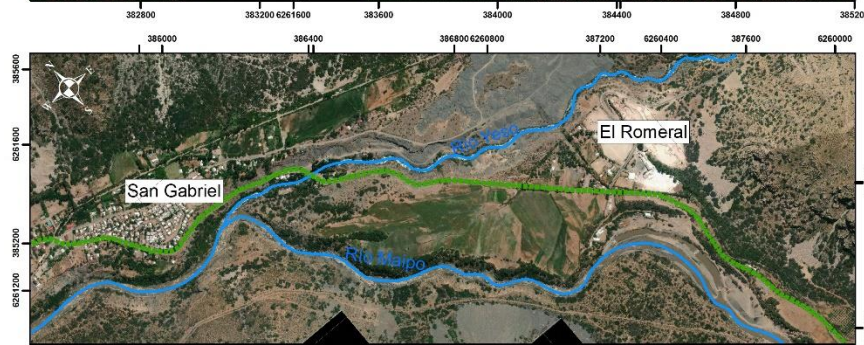
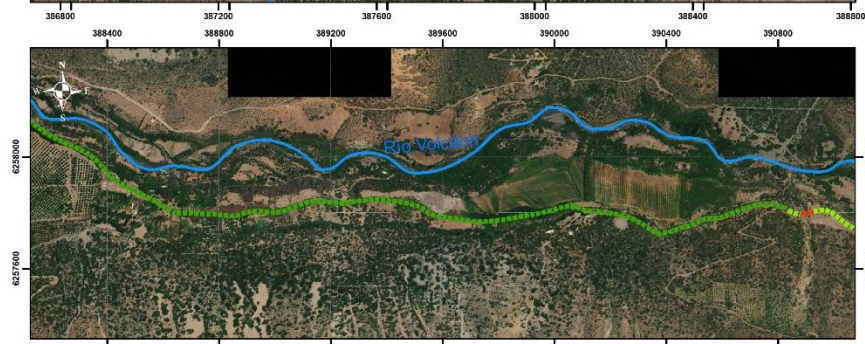
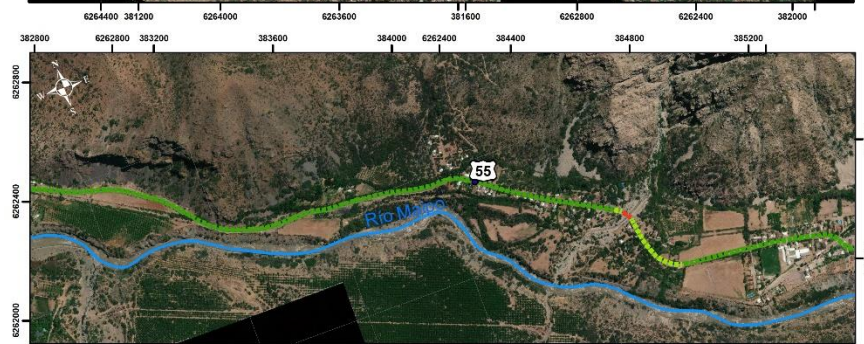
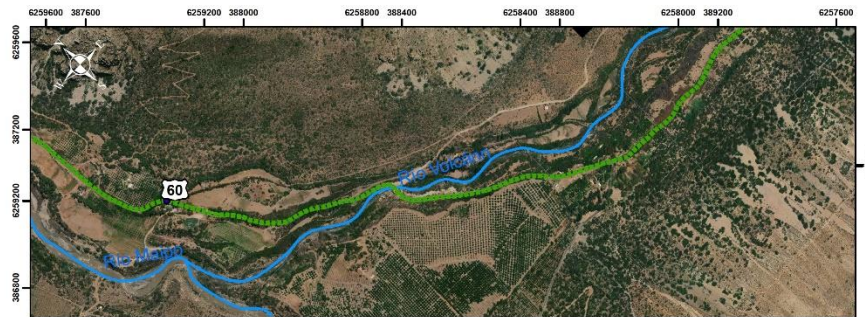
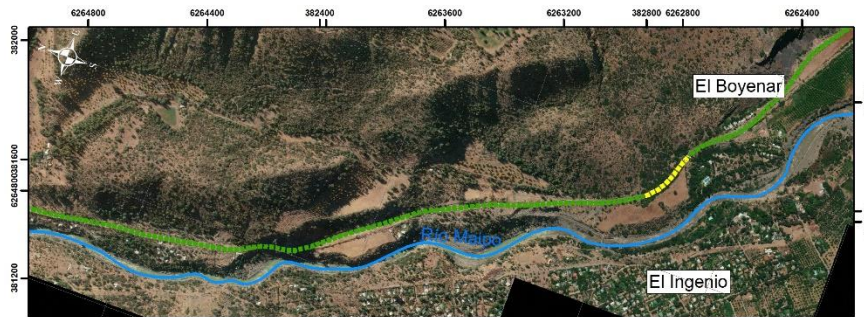
A continuación, se presentan los mapas resultantes al aplicar la metodología descrita en el capítulo 5.3.



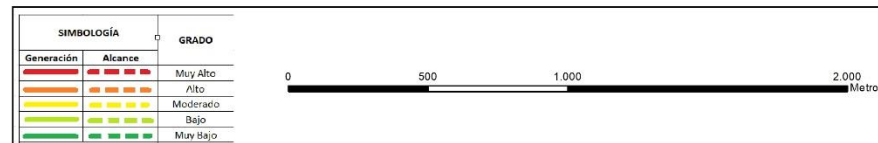
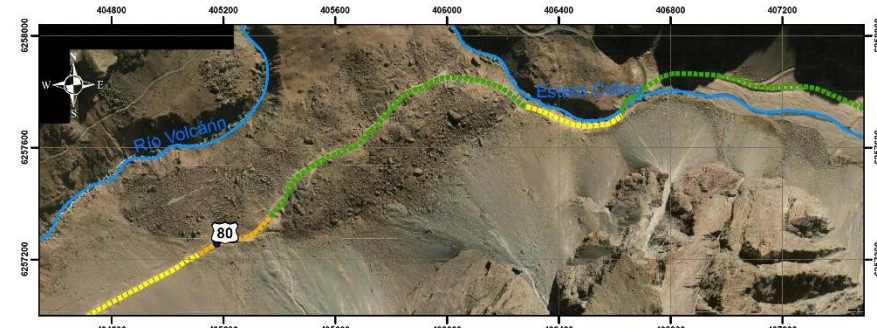
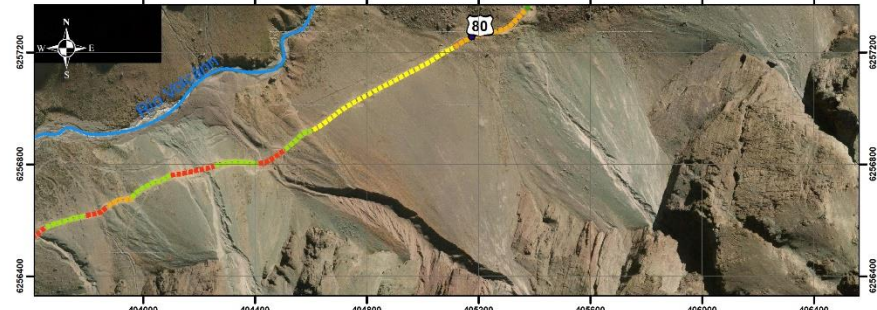
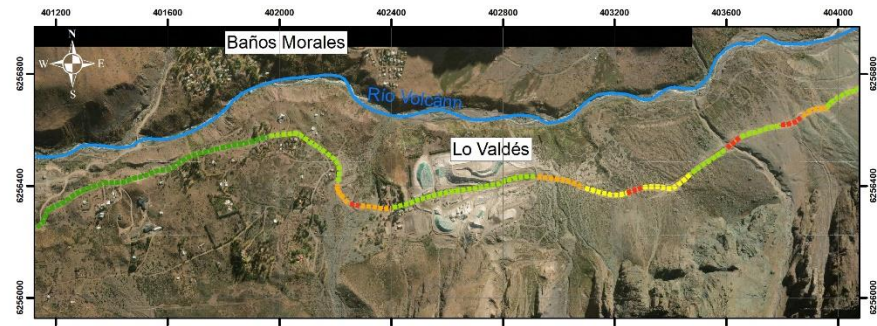
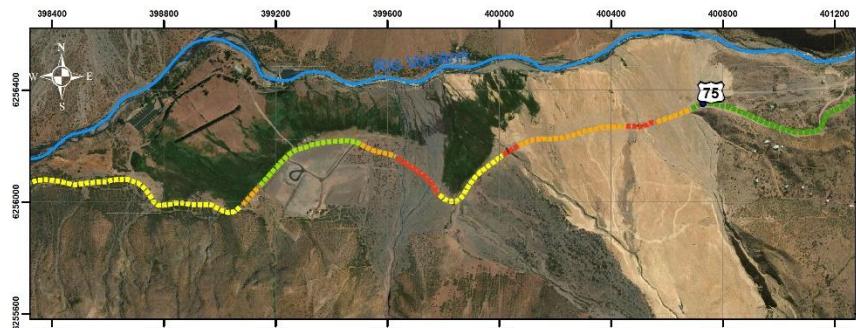
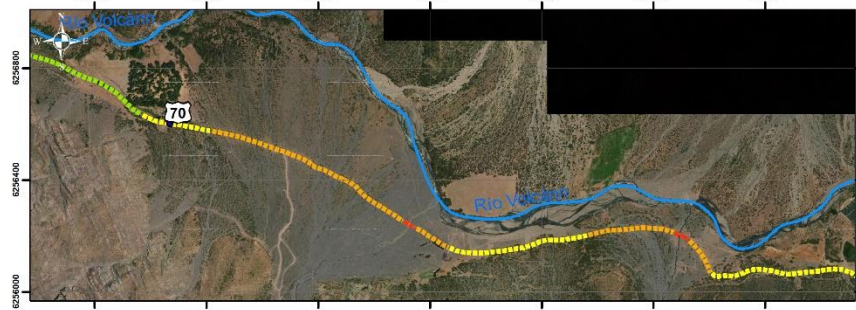
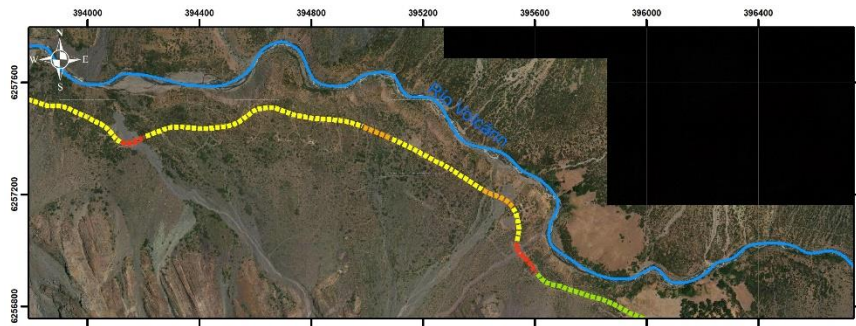
Mapa 14: Mapas de peligro de flujos aluviales en Ruta G-25. Tramo 1. Elaboración propia.



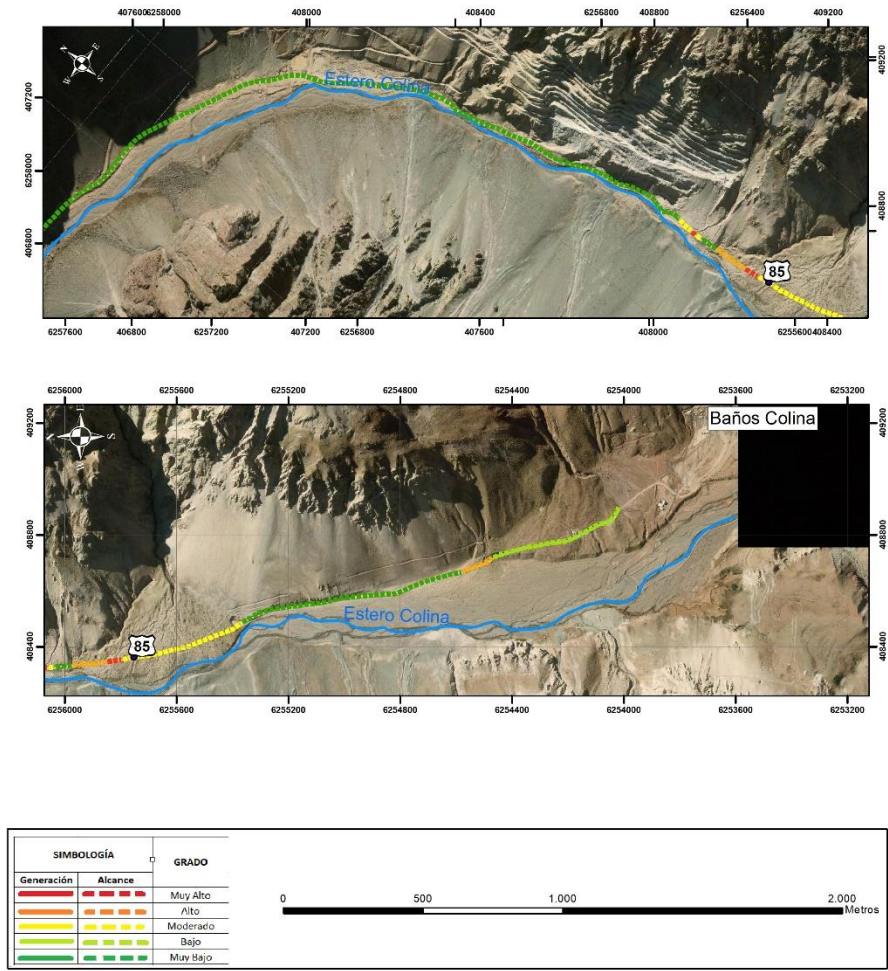
Mapa 15: Mapas de peligro de flujos aluviales en Ruta G-25. Tramo 2. Elaboración propia.



Mapa 16: Mapas de peligro de flujos aluviales en Ruta G-25. Tramo 3. Elaboración propia.



Mapa 17: Mapas de peligro de flujos aluviales en Ruta G-25. Tramo 4. Elaboración propia.



Mapa 18: Mapas de peligro de flujos aluviales en Ruta G-25. Tramo 5. Elaboración propia.

8. APLICACIÓN DEL ROCKFALL HAZARD RATING SYSTEM MODIFICADO EN RUTA G-25.

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación del RHRS modificado, el que se aplica a 22 taludes a lo largo de la Ruta G-25. En la Figura 59 se puede ver una previsualización de la ubicación espacial de cada talud evaluado. En total fueron 16 taludes compuestos por depósitos clásticos y 6 cristalinos.

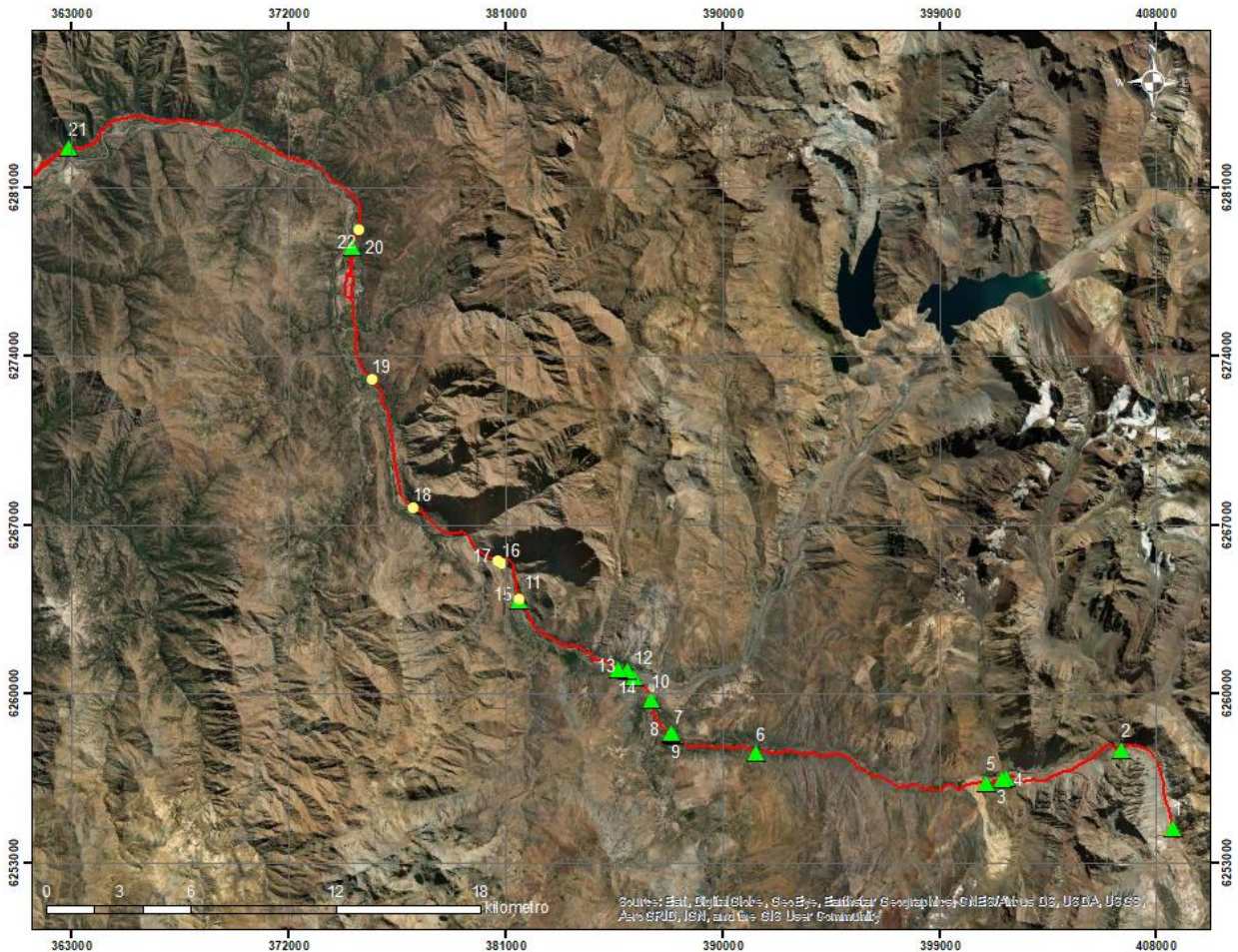


Figura 59: Distribución espacial de los taludes evaluados mediante el RHRS. En verde se destacan los taludes de depósitos clásticos y en amarillo los taludes cristalinos.
Elaboración propia.

En la Tabla 23 se expone el detalle de la ubicación de los taludes, con las coordenadas GPS UTM que delimitan el inicio y fin del tramo evaluado, junto al respectivo puntaje de peligro asociado. Se destacan los taludes con mayor puntaje.

Tabla 23: Tabla resumen con la ubicación espacial de los taludes, el tipo y el puntaje de peligro total asignado a cada uno. Elaboración propia (Datum WGS 84 Zona 19S).

ID	Inicio talud		Fin talud		Tipo	Puntaje
	CoorE	CoorN	CoorE	CoorN		
1	408733	6254437	408724	6254474	Depósito clástico	416
2	406604	6257682	406346	6257711	Depósito clástico	785
3	401781	6256529	401747	6256522	Depósito clástico	371
4	401560	6256449	401449	6256410	Depósito clástico	488
5	400962	6256276	400848	6256325	Depósito clástico	239
6	391429	6257597	391374	6257607	Depósito clástico	365
7	387990	6258222	387960	6258276	Depósito clástico	269
8	387972	6258333	387907	6258364	Depósito clástico	440
9	387907	6258364	387878	6258373	Depósito clástico	359
10	387077	6259676	387072	6259721	Depósito clástico	405
11	381909	6263881	381602	6263913	Depósito clástico	620
12	386448	6260564	386158	6260805	Depósito clástico	893
13	386108	6260916	385845	6261005	Depósito clástico	452
14	385739	6261012	385621	6260983	Depósito clástico	392
15	381596	6263941	381593	6263951	Roca Cristalina	428
16	380818	6265358	380888	6265389	Roca Cristalina	776
17	380495	6265618	380704	6265517	Roca Cristalina	830
18	376185	6267703	377153	6267716	Roca Cristalina	332
19	375494	6273028	375450	6263080	Roca Cristalina	524
20	374710	6278473	374686	6278523	Depósito clástico	452
21	362980	6282654	362891	6282648	Depósito clástico	341
22	374969	6279273	374999	6279437	Roca Cristalina	362

El máximo puntaje obtenido en la aplicación del RHRS es para el talud 12 con 893 puntos, mientras el mínimo es para el talud 5 con un RHRS = 239. El detalle del cálculo del Puntaje de Peligro Total para cada talud se encuentra en Anexo E. También se dispone de un ejemplo de su aplicabilidad en el Anexo F.

Como ejemplo de la aplicación de este método, la Figura 60 muestra el Talud 10 compuesto por depósitos clásticos. Este recibe un puntaje relativamente moderado a bajo, reflejando un peligro moderado. La altura del talud no supera los 5 metros, con una matriz bastante firme y bloques que no superan los 60 cm, aunque existen unos bloques que llegan hasta los 150 cm. Fuera de algunos bloques que sobresalen desde superficie, el perfil es bastante regular. Todo esto hace que el talud reciba un puntaje de 405 puntos, consecuente al peligro que implica.



Figura 60: Talud 10

Un talud que recibe un puntaje bajo es el número 7. Este, como se puede ver en la Figura 61 (RHRS = 269), tiene una altura de aproximadamente 8 metros. Los bloques inmersos que presentan una aparente inestabilidad no superan los 30 centímetros de diámetro. Lo que caracteriza a este talud es su abundante vegetación, lo que resta puntaje al peligro total que este pueda presentar. Otro parámetro que condiciona su peligro es la eficiencia de la berma, la cual logra capturar gran parte de las pequeñas rocas que caen hacia la ruta.

Contrario a los taludes vistos previamente, se tiene el talud número 12. Este fue calificado con un puntaje relativamente alto, llegando casi a los 900 puntos. En la Figura 62 se pueden ver bloques de hasta 1,5 metros, con una aparente inestabilidad superficial. La matriz se aprecia bastante suelta, con escaso desarrollo de vegetación, principalmente de manera aislada. La berma es inexistente por lo que todos los bloques que eventualmente se desprenden de este talud, alcanzan la ruta. Otro parámetro que suma al peligro total es el ángulo que presenta el talud, que en este caso está entre 60° y 70° , aproximadamente.



Figura 61: Talud 7



Figura 62: Talud 12

9. DISCUSIONES

Las discusiones están guiadas siguiendo las principales directrices abordadas en el presente estudio. Comenzando por un análisis crítico de la metodología para la zonificación del peligro como un análisis de la zonificación en sí. También se discute sobre los tramos mitigados de tal manera de complementar los resultados finales. Otro punto por tratar es el RHRS modificado aplicado en la Ruta G-25, el cual será analizado y conjugado con la zonificación a escala local. Finalmente se discute acerca de los factores desencadenantes que afectan la zona de estudio, y como estos repercuten en los distintos grados de peligro que presenta la Ruta G-25.

9.1 Sobre metodología a escala local 1.10.000

La metodología propuesta busca evaluar y zonificar el peligro de remociones en masa en la Ruta G-25, en particular deslizamientos de suelo, caídas de rocas y flujos aluviales, que son los fenómenos que más afectan al trazado vial.

Conceptualmente la metodología usa el término peligro como una estimación de la posibilidad de ocurrencia, la cual está en función de la susceptibilidad (entiéndase como zonas de generación) y de las zonas de alcance. Esta aproximación tiene sustento empírico en diversos trabajos realizados en España y Portugal (Irigaray, 1995; El Hamdouni, 2001; García & Zezere, 2004) en donde los mapas de susceptibilidad se relacionan con el grado de peligro en el área.

La zonificación de las zonas de generación se lleva a cabo bajo aproximaciones heurísticas mediante el análisis semicuantitativo de los factores condicionantes. Estos factores son las características geológicas/geotécnicas de la unidad y la topografía del terreno, los cuales son considerados los factores condicionantes más relevantes a la hora de evaluar la susceptibilidad de remociones en masa (Lara, 2007). Por otro lado, la zonificación de las zonas expuestas o de alcance, se realiza bajo el Método Semi-implícito de Ojeda & Muñoz (2001), el cual consiste en zonificar un área geográfica mediante criterios geomorfológicos y observaciones directas de terreno, ayudado por criterios predefinidos de manera tal de disminuir la subjetividad. Esto último lo diferencia del Método Implícito que posee un mayor nivel de subjetividad, debido a que los criterios solo los establecen el o los profesionales a cargo del estudio.

El insumo de mayor importancia para la aplicación de la metodología es la caracterización y cartografía geológica/geomorfológica de la zona de estudio. En particular, las unidades cuaternarias y las geoformas asociadas permiten conocer los procesos exógenos que han dominado la evolución del paisaje durante los últimos millones de años, permitiendo entender, comprender y eventualmente predecir, los procesos que actualmente ocurren y ocurrirán en el área de estudio. Junto con esto, la caracterización geológica/geotécnica de las unidades rocosas y no consolidadas, permiten la identificación de las zonas susceptibles a generar procesos de remociones en masa, información crucial para la aplicación de la metodología propuesta.

La evaluación del peligro para deslizamientos de suelo y caídas de rocas consta de dos etapas principales. La primera es la identificación de las potenciales zonas de generación, caracterizándolas con un grado de susceptibilidad. Esta responde a las características geológicas/geotécnicas de la fuente y a las condiciones topográficas del terreno. La segunda etapa consiste en la caracterización de las zonas de alcance. Esta se hace de manera netamente cualitativa, con criterios topográficos mediante las Unidades

Morfológicas de Ladera. Esta evaluación es apoyada con información extraída de las visitas técnicas al área de estudio.

A diferencia de los deslizamientos de suelo y las caídas de rocas, los flujos aluviales quedan exentos de la caracterización de las zonas de generación. Esto es principalmente por a) algunas de las principales cuencas generadoras de flujos aluviales, son demasiado grandes y escapan de la zona de estudio y b) la Ruta G-25 a lo largo de todo su trazado solo intercepta las zonas deposicionales de estos procesos, por lo que la evaluación de su peligro se restringe a la caracterización de las zonas de alcance. Esta se hace de manera cualitativa, mediante criterios geomorfológicos y evidencia de terreno.

También es importante destacar que la evaluación de la susceptibilidad se considera para un escenario estático, tanto para deslizamientos de suelo como para caídas de rocas.

9.2 Sobre la Zonificación del Peligro de Remociones en Masa en la Ruta G-25.

La zonificación del peligro se realiza de manera lineal, quedando determinada por el kilometraje que presenta la Ruta G-25 y no por su ancho, por lo tanto, no discrimina si el evento afecta la calzada en toda su amplitud, considerando ambas vías, o si solo afecta a una parte de esta.

La simbología incluida en los mapas de peligro generados bajo esta metodología, diferencian aquellos tramos que interceptan zonas de generación frente a los tramos que interceptan zonas de alcance.

Para aquellos tramos que interceptan directamente zonas de generación, se debe tener en consideración que algunas de estas áreas se encuentran en estado mitigado, por lo que su grado de peligro disminuye considerablemente, o en ocasiones se puede incluso anular. Esto no se considera en la metodología propuesta, por lo que se dispone de un análisis posterior en los capítulos siguientes. Además, se debe considerar que los criterios para identificar las zonas de generación o zonas susceptibles responden a los factores condicionantes que más relevancia tienen a la hora de evaluar estos procesos, sin embargo existen otros factores tales como la presencia de vegetación u orientación de las laderas o la influencia antrópica, entre otros, los cuales no son considerados por esta metodología.

Para aquellos tramos que interceptan zonas de alcance, se requiere de una evaluación visual de terreno, sobre todo para caídas de rocas, ya que existen factores, como la presencia de árboles que pueden actuar como medidas mitigadoras naturales, disminuyendo el grado de peligro del tramo zonificado. Esta consideración no se plasma en la metodología propuesta, ya que, como se explica anteriormente, para evaluar el alcance solo se realiza una caracterización topográfica en función de las pendientes del terreno.

Se debe tener cuidado al interpretar la zonificación realizada para deslizamientos de suelo, debido a que gran parte de estos procesos gradan a remociones en masa del tipo complejo. Algunos deslizamientos de suelo pueden gradar a flujos de barro, influyendo considerablemente en el alcance que tengan estos eventos. En la presente metodología, el alcance se evalúa considerando que la masa desplazada mantiene su volumen y no pierde su naturaleza original. Por lo tanto, aquellos tramos zonificados con un grado de peligro muy bajo y alejado de laderas susceptibles siguiendo el criterio antes mencionado, pueden verse afectados si es que el deslizamiento inicial gradan a una remoción compleja.

Las Figuras 63, 64 y 65 muestran de manera porcentual la zonificación de los distintos grados de peligro, sin discriminar si son de generación o de alcance. Para esto se debe tener en cuenta que la ruta tiene un largo aproximado de 75 kilómetros dentro de la comuna de San José de Maipo, desde Las Vizcachas hasta Baños Colina.

ZONIFICACIÓN PORCENTUAL DE LA PELIGROSIDAD DE CAÍDAS DE ROCAS EN RUTA G-25

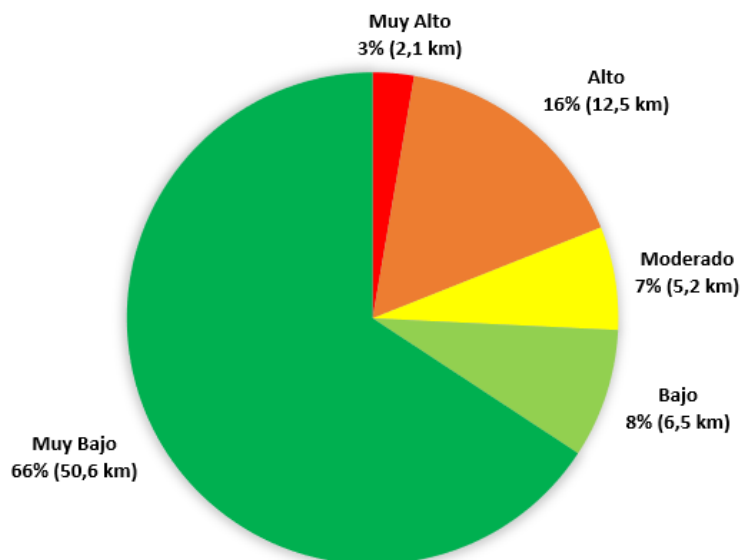


Figura 63: Porcentaje zonificado en la ruta G-25 para caídas de rocas. Elaboración propia

ZONIFICACIÓN PORCENTUAL DE LA PELIGROSIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE SUELO EN RUTA G-25.

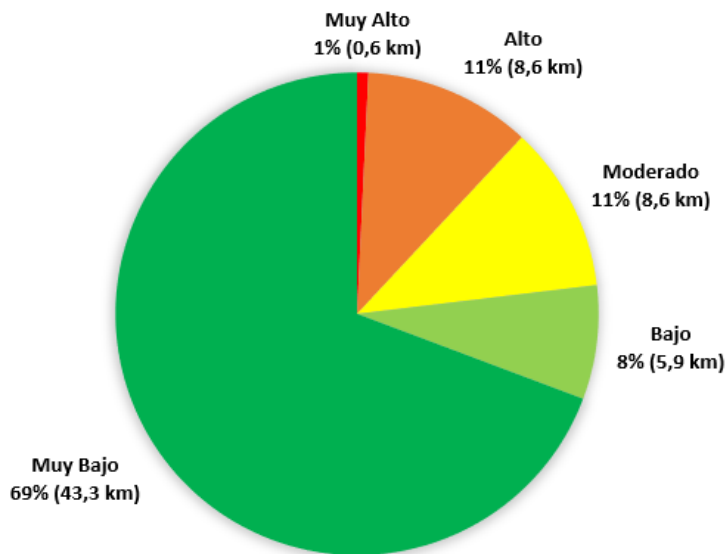


Figura 64: Porcentaje zonificado en la Ruta G-25 para deslizamientos de suelo. Elaboración propia.

ZONIFICACIÓN PORCENTUAL DE LA PELIGROSIDAD DE FLUJOS EN RUTA G-25.

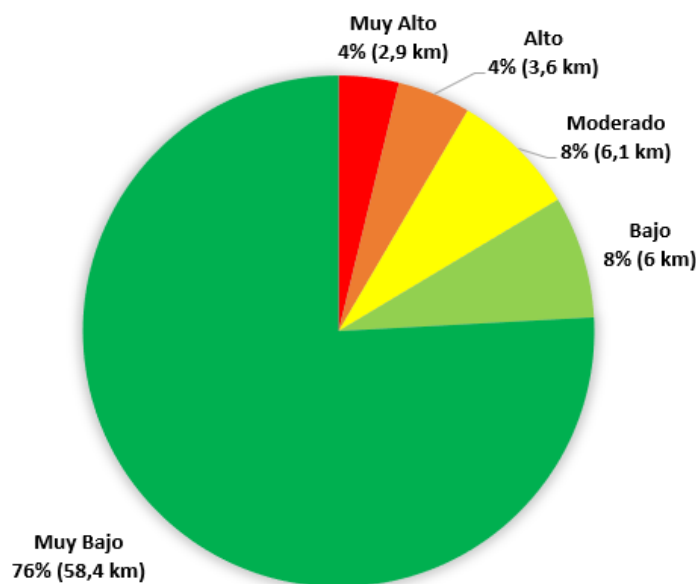


Figura 65: Porcentaje zonificado en la Ruta G-25 para flujos aluviales. Elaboración propia.

Gran parte de la ruta queda zonificada con peligro Muy Bajo para los distintos procesos evaluados. Estos tramos representan una muy baja a nula posibilidad de ser afectados por el alcance de las distintas remociones en masa estudiadas. En particular, el comportamiento de los deslizamientos de suelo y flujos aluviales depende mucho del contenido de agua que contengan las masas movilizadas, por lo que esta característica repercute directamente en la reología del material desplazado, influyendo en su eventual alcance.

9.3 Sobre el Catastro

De la recopilación de eventos declarados, fotointerpretación de imágenes satelitales y observaciones de terreno se identificaron 103 remociones en masa a lo largo de la Ruta G-25. De estos, 66 corresponden a flujos aluviales, 29 caídas de rocas y 8 deslizamientos de suelo. Los que mejor continuidad de registro tienen son los flujos aluviales, contando con numerosas asistencias técnicas realizadas por la Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial del SERNAGEOMIN. Para caídas de rocas, igualmente se contaron con registros históricos recopilados por Muñoz (2016) y por la Dirección de Vialidad de San José de Maipo. Además se tienen asistencias técnicas realizadas por el SERNAGEOMIN de eventos que han repercutido directamente a la ruta. Durante las visitas al área de estudio, se contó con evidencia de caídas de bloques recientes a la ruta. Estas por lo general se acumulan en la berma bajo la fuente (Figura 66b) mientras que otras atraviesan todo el trazado para depositarse en el lado opuesto a su fuente (Figura 66a y Figura 66c). La evidencia directa de caída de bloques en la ruta suele eliminarse debido a las constantes labores de limpieza que realiza la Dirección de Vialidad del MOP. Sin embargo, el registro de algunos eventos aún queda evidenciado en la orilla de la ruta,

ya que estas labores de limpieza por lo general consisten en arrastrar el material depositado en la ruta hacia la berma o a un lado de esta.



Figura 66: Bloques identificados en Ruta G-25. a) numerosos bloques que reposan en berma contraria al talud que se identifica como la fuente, kilómetro 52 aproximadamente, b) bloques en berma a orillas del camino, kilómetro 57 aproximadamente, c) bloque de gran tamaño en berma contraria al talud clásico, kilómetro 58 aproximadamente.

Los deslizamientos de suelo son los procesos que menor registro histórico tienen a lo largo del trazado. Los procesos catastrados de este tipo dan cuenta de un trabajo de fotointerpretación de imágenes satelitales y observaciones de terreno. Sin embargo, no se tiene la evidencia concreta de que estos eventos hayan afectado directamente a la Ruta G-25. Por otro lado, con una inspección visual de terreno se identificaron sectores que reúnen ciertas condiciones para la generación de futuros deslizamientos, como los que se exponen en la Figura 67. En el valle del Estero Colina, específicamente en su ladera oriental, existen múltiples escarpes, generados de manera natural y también por el amplio desarrollo antrópico que tiene este lugar (Figura 67A). Estas condiciones pueden

ocasionar inestabilidad local en esta ladera. En la Figura 67B se observa la clara estratificación a favor de la ladera, que posee un depósito cuaternario ubicado aproximadamente en el kilómetro 51. Esta estructura puede condicionar la generación de deslizamientos de suelo en este sector, sin embargo, la fuente se encuentra alejada de la ruta. Algo similar se observa en la Figura 67C, en donde una ladera adyacente al camino presenta evidencia superficial de movimiento reciente.

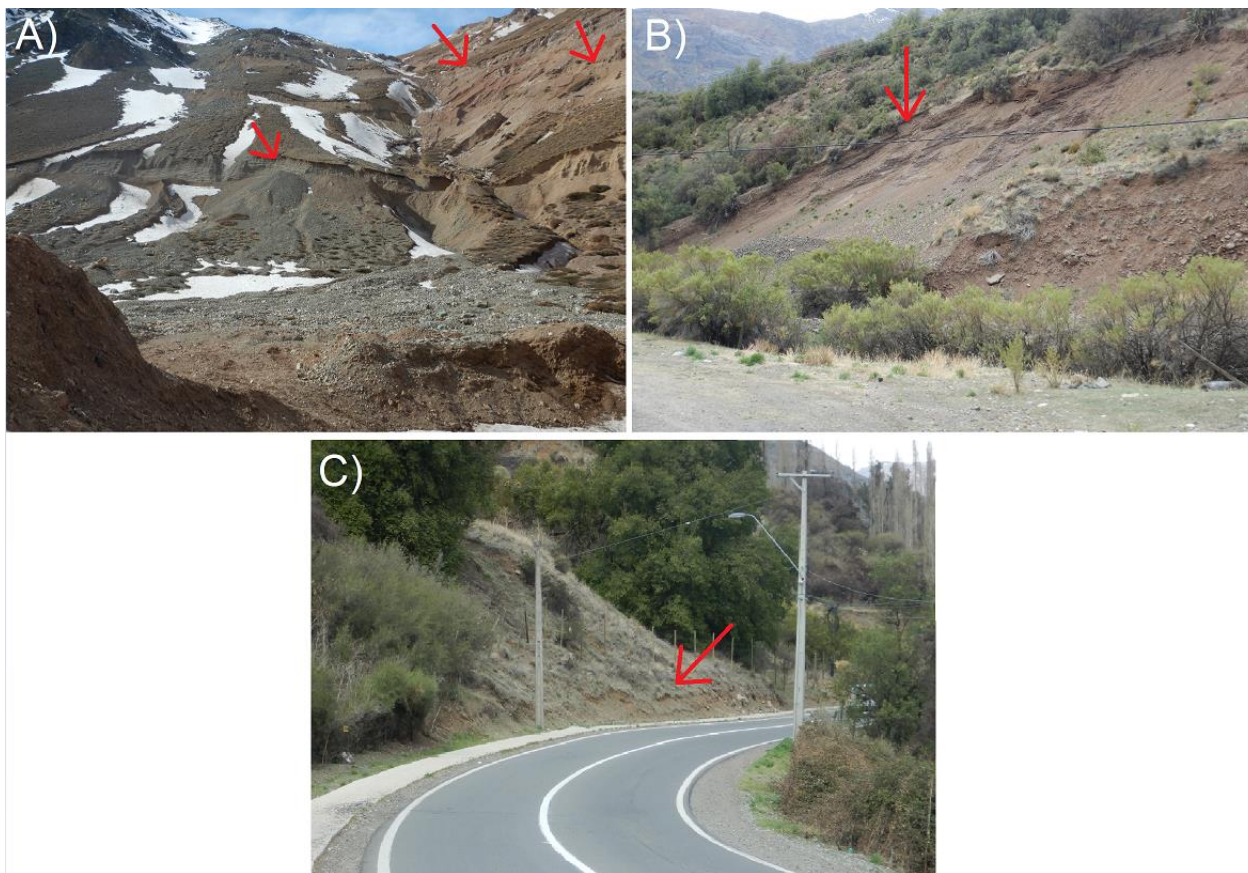


Figura 67: A) Escarpes y alto desarrollo antrópico en ladera oriental del valle del Estero Colina. B) Estratificación en depósito cuaternario a la altura del kilómetro 51 aproximadamente. C) Evidencia de movimiento de ladera en el kilómetro 40 aproximadamente.

Tomando la zonificación del peligro realizada en la Ruta G-25 y relacionándola al catastro, se tiene que, de los 66 eventos de flujos aluviales declarados, 32 se encuentran en tramos con peligro Muy Alto, 16 en tramos con peligro Alto y 7 en tramos con peligro Moderado, los 5 restantes se distribuyen entre los grados más bajos (Bajo y Muy Bajo). Para las caídas de rocas, si bien son menos los eventos declarados, se tiene que 7 están en tramos con peligro Muy Alto, 12 en tramos con peligro Alto, 1 con peligro Moderado y 1 en un tramo con peligro Bajo.

Los eventos más graves y que más daño han causado al trazado de la Ruta G-25, se encuentran en los tramos zonificados con peligro Alto o Muy Alto, lo que le da sustento a la metodología propuesta.

9.4 Sobre Tramos Mitigados

Como se menciona anteriormente, existen tramos que presentan grados de peligro que van desde Alto a Muy Alto en particular para caídas de rocas, pero que, sin embargo, actualmente se encuentran en estado mitigado, ya sea total o parcialmente, lo que no es rescatado por la metodología propuesta. Esto hace que el grado de peligro en realidad se vea disminuido respecto a lo que se presenta en los mapas respectivos.

Entre las medidas mitigadoras utilizadas a lo largo del trazado se pueden mencionar las mallas estabilizadoras de taludes, barreras y hormigón proyectado o *shotcrete* (ver Figura 68).



Figura 68: Medidas para mitigar el peligro de caídas de rocas en la Ruta G-25. a) Hormigón proyectado o shotcrete, b) Malla estabilizadora y c) Barreras.

Existen 6 puntos a lo largo de la ruta en donde existen obras de mitigación activas (ver Figura 69). Sin embargo, en la mayoría de ellos, su eficacia es cuestionable. En el sector representado por la Figura 69A, el *shotcrete* logra cubrir casi por completo el talud rocoso que amenaza la ruta (ver Figura 68a), no obstante, en algunos sectores se observa como el hormigón ha comenzado a ceder y a fracturarse, llegando incluso a quedar expuesto parte del talud.

En otras ocasiones, como en los sectores representados por la Figura 69B y 69E, solo parte del tramo es mitigado. En la Figura 70 se observa el sector representado en la Figura 69E, antes de llegar al Puente El Yeso. Aquí se puede observar cómo solo una parte de este tramo es mitigado, dejando completamente expuesto el talud contiguo.

Es importante considerar esta información a la hora de interpretar los mapas resultantes.

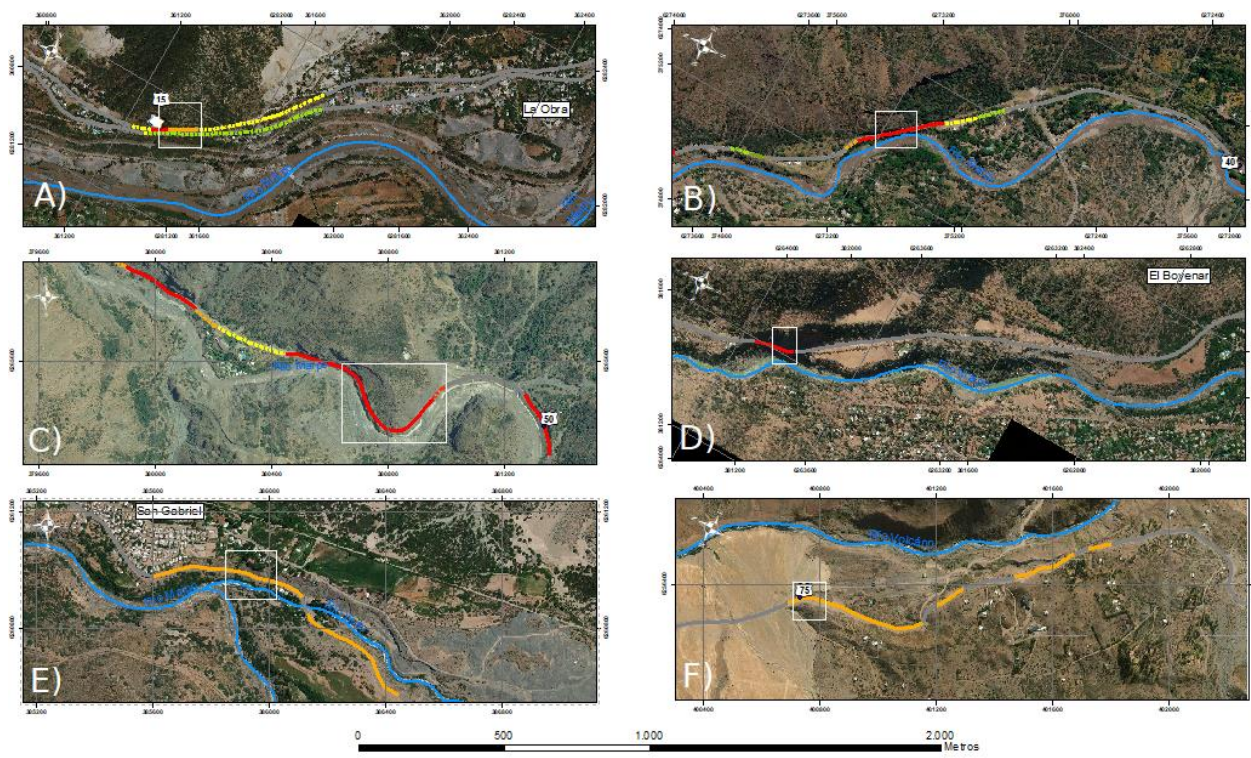


Figura 69: Tramos con obras de mitigación activas. A) Shotcrete en talud rocoso perteneciente al Plutón La Obra. B) Malla estabilizadora en talud rocoso perteneciente a la Fm. Farellones. C) Malla estabilizadora en talud rocoso perteneciente a la Fm. Farellones. D) Malla estabilizadora y barreras en talud rocoso perteneciente a la Fm. Farellones. E) Malla estabilizadora en talud de depósitos fluvioglaciales. F) Malla estabilizadora en talud de depósitos de remoción en masa.

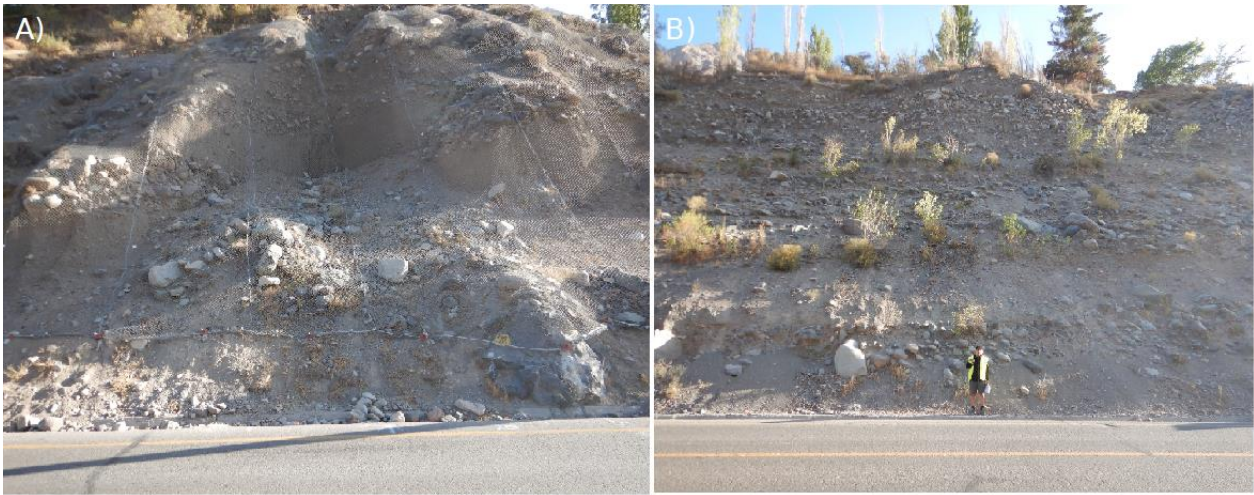


Figura 70: Tramo antes de llegar al puente El Yeso. A) Tramo mitigado con malla. B) Tramo sin medida de mitigación, contiguo al tramo expuesto en A.

9.5 Sobre RHRS Modificado

El RHRS modificado aplicado en este trabajo está basado en gran parte del sistema de Colorado, Estados Unidos, modificado y aplicado por Russell *et al.* (2008).

Las modificaciones que se realizan a este sistema tienen como objetivo principal agilizar su implementación en terreno. Esto conlleva a cierto grado de subjetividad al momento de calificar algunos parámetros, como la eficiencia de la berma o el historial de caídas, dependiendo de las observaciones que el profesional haga en terreno, o de la frecuencia en la que se haga la limpieza en las rutas. Sin embargo, a pesar de esto, el sistema responde bien al peligro que refleja el talud evaluado, ya que son varios los parámetros que se califican, evitando que algunos tengan más prioridad sobre otros.

Como el principal objetivo de este sistema es permitir gestionar medidas de mitigación para los taludes que presenten mayor peligro de caídas de rocas, aquellos taludes que están mitigados actualmente no son calificados por el sistema de puntuación. Sin embargo, como ocurre a lo largo de la ruta, existen tramos mitigados en los que la eficiencia de la medida es cuestionable. Como, por ejemplo, en el túnel El Tinoco, hay tramos en que la malla estabilizadora solo cubre la sección inferior del talud, dejando expuesto toda la sección superior, por lo que de igual manera es calificado y se le asigna un puntaje de peligro total.

La erosión diferencial en los taludes con depósitos clásticos es uno de los principales agentes externos condicionantes de caídas de rocas. La erosión afecta principalmente a la matriz, ya que, en estos taludes es el componente que menor resistencia presenta. Esto permite que los bloques inmersos queden sobresalidos, generando inestabilidad en ellos, lo que eventualmente puede desencadenar su colapso. El nuevo parámetro sugerido en el presente estudio se enfoca en calificar la compacidad de la matriz, evaluando así el grado de exposición frente a la erosión diferencial. Aquellos taludes con una matriz bien compacta son más resistentes frente a los agentes erosivos como el viento o la lluvia. Mientras que un talud con una matriz menos compacta (más suelta) se ve más afectado y el material es fácilmente removible, generando la inestabilidad de los bloques inmersos, que quedan expuestos en superficie.

Los parámetros que se califican independiente del tipo de talud (Sedimentarios, Cristalino o Clástico) son 9 en total: los primeros 5 indicando las características generales del talud y los segundos 4 indicando las condiciones climáticas del entorno. Luego se debe discriminar el tipo de talud que se está calificando. Para taludes sedimentarios y cristalinos son 9 los parámetros que deben ser calificados: 3 asociados a las características geológicas de la roca y 6 asociados a caracterizar las discontinuidades. Sin embargo, para los taludes con depósitos clásticos, son sólo 4 los parámetros que se califican, generando una diferencia notoria en el peso de cada parámetro. Dicho esto, un talud sedimentario está calificado bajo 18 parámetros, mientras que un talud clástico solo está calificado con 13 parámetros. Para evitar esta diferencia, Russell *et al.* (2008) sugiere la inclusión de ponderadores en los parámetros de taludes clásticos. En la Tabla 24 se expone la justificación de los distintos ponderadores usados en el RHRS modificado para los parámetros de taludes clásticos. De esta manera, la calificación de los distintos tipos de talud, tienen el mismo peso relativo y pueden ser comparables.

Por lo demás, el RHRS es usado en distintos departamentos de transporte en Estados Unidos, como Colorado, Nevada, Kentucky, California, entre otros. Es un sistema ampliamente testeado y permite la correcta gestión de recursos para implementar medidas de mitigación. Sin embargo, en este estudio, se implementa una particularidad de este sistema, ya que solo se considera el peligro del talud, excluyendo el análisis de riesgo que se propone originalmente en el sistema (Pierson *et al.*, 1990).

Tabla 24: Justificación de los distintos ponderadores usados para taludes con depósitos clásticos. Elaboración propia.

Parámetro	Ponderador	Justificación
Tamaño de Bloques	x3	Se mantiene la ponderación otorgada por Russell <i>et al.</i> (2008) Este parámetro da cuenta de la intensidad que puede tener el evento y en la zona de estudio, se observa que tiene una relación directa con el peligro que puede significar para la Ruta.
Forma de los Bloques	x1	Se resta peso a este parámetro, ya que se considera que si bien puede influir en el alcance que tenga el bloque, no repercute de mayor manera en el grado de peligro que presente el talud.
Vegetación	x2,5	Ambos parámetros miden la resistencia que puede tener el talud frente a los agentes erosivos externos y caracterizan de cierta forma el grado de estabilidad que tiene la matriz en estos taludes. Es por esta razón que se les ha asignado el mismo ponderador.
Estructura de la Matriz	x2,5	

9.6 Sobre Ambas Metodologías

La zonificación del peligro y el RHRS funcionan de manera complementaria, sin embargo, son excluyentes el uno del otro, esto quiere decir que pueden ser usadas de manera independiente.

Los taludes calificados mediante el RHRS, independiente del puntaje obtenido, están ubicados en tramos zonificados con grados de peligro que van desde Alto a Muy Alto. Sin embargo, con una rápida inspección visual de algunos de ellos, es claro notar que su grado de peligro está sobre valorado. Esto se debe principalmente a los criterios utilizados en la zonificación. Por ejemplo, en la Figura 71 se observa el Talud #7 calificado mediante el RHRS. A la izquierda se puede ver que el tramo esta zonificado con peligro Alto, consistente a las características geológicas del talud (depósito clástico) y a la pendiente de

este (sobre los 35°). Sin embargo, cuando se consideran otros factores, como la vegetación, el tamaño de los bloques o la altura del talud este tramo queda con una calificación relativamente baja (RHRS = 269). Esta diferencia se debe a la disimilitud de escalas en las que se trabaja con ambas metodologías y a los diferentes criterios utilizados para evaluar el peligro.



Figura 71: Talud 7 calificado mediante RHRS.

Un caso similar se da en el kilómetro 33 aproximadamente, como se ve en la Figura 72, en donde el talud adyacente a la ruta está en un tramo zonificado con peligro Muy Alto, debido al GSI asignado a esta unidad rocosa (GSI < 75) y a la pendiente del terreno (sobre los 35°). No obstante, cuando a la evaluación del peligro se le incluyen otros parámetros tales como apertura de fracturas, condiciones topográficas del talud o la eficiencia de la berma en capturar los bloques que caen, el talud queda con un puntaje relativamente bajo (RHRS = 362).



Figura 72: Talud 22 calificado mediante el RHRS.

A pesar de estas diferencias en la zonificación y en los puntajes relativos al peligro, el RHRS sirve como una herramienta para gestionar la prioridad en la que se debe actuar frente a los taludes que representen mayor peligro. Los agentes tomadores de decisiones deben comenzar gestionando obras de mitigación para aquellos taludes que tengan los puntajes más altos, que son lo que se destacan en la Tabla 23 (ver cap. 8).

9.7 Sobre los Factores Desencadenantes

Las lluvias de gran intensidad y los sismos son conocidos como los agentes desencadenantes de remociones en masa más comunes, en particular en Chile Central, el repentino desarrollo de intensas precipitaciones en un corto periodo de tiempo (sobre los 60 mm en 24 hrs) han desarrollado históricamente flujos de detritos y/o barro que han afectado importantes centros poblados en las zonas andinas y preandinas (Hauser, 2000).

La información climática disponible en la zona de estudio es bastante completa. Se tienen diversas estaciones meteorológicas pertenecientes a la DGA y a la DMC a lo largo de la Ruta G-25. La información es de acceso público y se actualiza constantemente.

La isoterma 0°C en la zona de estudio, en promedio se encuentra a una altura de 2.200 m.s.n.m (Garreaud, 2017). Los últimos eventos meteorológicos que han desencadenado la ocurrencia de flujos aluviales en la zona se han caracterizado por presentar una isoterma 0°C muy por sobre el promedio, llegando incluso a los 4.540 m.s.n.m. (Marín *et al.*, 2017). En la última década se pueden reconocer al menos 3 eventos climatológicos importantes que afectaron el área de estudio:

- 21 de enero y 08 de febrero del 2013
- 14-18 de abril del 2016
- 25-26 de febrero del 2017

Los tres tienen como factor en común, precipitaciones intensas en un corto periodo de tiempo, acompañado por una isoterma 0°C sobre los 3500 m.s.n.m. (Gajardo *et al.*, 2013; Sepúlveda & Jara, 2016; Marín *et al.*, 2017) favoreciendo la generación de flujos aluviales.

Esta relación entre la altitud de la isoterma 0°C, las precipitaciones intensas y la generación de flujos aluviales, se debe básicamente a un aumento del área drenada, en zonas donde generalmente nieva, ahora cae agua lluvia, ocasionando el arrastre del material acumulado. Los agentes meteóricos que actúan en altura son diferentes a lo que actúan en los fondos de valle, a lo largo de la Ruta G-25. En particular dominan los procesos crioclásticos, fracturando los macizos rocosos y generando material poco cohesivo, con alto potencial de saturación. Un ejemplo reciente de este comportamiento, fueron los flujos aluviales generados en la cuenca del Estero San José, al sur del poblado San José de Maipo, el 25 de febrero del 2017. La cota máxima de esta cuenca bordea los 4.000 m.s.n.m. y para este evento meteorológico, la isoterma llegó a los 4.540 m.s.n.m. (Marín *et al.*, 2017) provocando que toda la cuenca recibiera precipitación líquida, generando el arrastre masivo de material poco cohesivo, encausando de esta manera flujos aluviales del tipo aluvión, por el Estero San José, interceptando directamente la Ruta G-25.

Las intensas lluvias de igual manera han sido el factor desencadenante de numerosas caídas de rocas acontecidas a lo largo de la ruta. El 18 de junio del año 2012 se registra una caída de bloques de gran magnitud cubriendo ambas calzadas de la Ruta G-25 a la altura del kilómetro 51, ocasionando el corte transitorio del camino (Ramírez *et al.*, 2012).

Días previos al evento, se registran precipitaciones intensas en el sector. Al consultar la Estación Meteorológica San Alfonso de la DGA, se constata el registro de 32,4 mm de lluvia acumulada el día 16 de junio y 20,1 mm el 17 de junio.

Un caso similar se da el 6 de agosto del 2015 en el Túnel El Tinoco, en donde se desprenden bloques desde la parte superior del talud, para impactar un automóvil y lesionar a dos de sus ocupantes (Municipalidad de San José de Maipo, 2015; ver Figura 73). De igual manera se consulta la Estación Meteorológica San Alfonso, para corroborar que el día anterior al evento se registraron 71 mm acumulados, mientras que el mismo día del evento se tienen 73,1 mm.



Figura 73: Caída de rocas en sector Túnel El Tinoco. Fuente: Municipalidad de San José de Maipo (2015).

El mes de junio del 2020 ocurrieron en Chile central y en varios puntos del país varios eventos climáticos asociados a precipitaciones intensas en cortos periodos de tiempo (24 horas aproximadamente). En particular en la zona de estudio se registraron caídas de rocas menores en el sector de Los Almendros (Figura 74a) el día 12 de junio aproximadamente y en el Puente El Yeso (Figura 74b) el 29 de junio. La zonificación en estas zonas fue con peligro Alto. La estación meteorológica a la que se tuvo acceso fue Guayacán (DMC) la cual registró el 12 de junio un total de 32,7 mm y el 29 de junio 26,8 mm.

a)



b)



Figura 74: Caídas de rocas registradas (a) el día 12 de junio en el sector de Los Almendros y (b) el 29 de junio en el Puente El Yeso. Fuente: @mop_rm, Twitter Oficial de la Secretaría Regional Ministerial de Obras Públicas.

Por otro lado, la sismicidad es otro de los otros factores desencadenantes de remociones en masa en diversos escenarios geológicos y topográficos. Las aceleraciones sísmicas son capaces de generar cambios temporales en el régimen de esfuerzos al que está sometido la ladera pudiendo producir inestabilidad (Lara, 2007).

Como antecedente se tiene el trabajo realizado por Keefer (1984) en los Ángeles, Estados Unidos, que establece que los tipos de remociones en masa más abundantes generados por terremotos son las caídas de rocas, deslizamientos disgregados de suelo y deslizamientos de roca. En sus estudios también estableció magnitudes mínimas aproximadas para la generación de ciertos tipos de remociones en masa (Tabla 25), en base a observaciones de eventos de remoción en masa generados por sismos de magnitud menores o iguales a 5.3, estableciendo distancias máximas de 50km entre el foco del sismo y zonas de ocurrencia de caídas de rocas y deslizamientos disgregados de suelo, para un evento sísmico de magnitud cercana a 5,5 y de 10 km para flujos de detritos y deslizamientos masivos, ante similares eventos sísmico.

Rodríguez *et al.* (1999) actualizó el umbral mediante la ampliación de la fuente de datos de remociones en masa por sismos que manejaba Keefer (1984).

Tabla 25: Tipo de remociones en masas generadas por sismos.

Magnitudes mínimas aproximadas (M _L) según Keefer (1984)	Magnitudes mínimas aproximadas (M _L) según Rodríguez <i>et al.</i> (1999)	Tipo de remoción en masa
4,0	5,5	Caídas de rocas, deslizamientos de roca, caídas de suelo, deslizamientos desmembrados de suelo
4,5	5,5	Subsidencias de suelo, deslizamiento de suelo en bloques
5,0	6,5	Subsidencias de roca, deslizamientos de roca en bloque, flujos lentos de tierra, extensiones laterales de suelo, flujos rápidos de suelo, deslizamientos submarinos
6,0	6,5	Avalanchas de roca
6,5	6,0	Avalanchas de suelo

Como se vio en el apartado 4.7 el área de estudio presenta varias fuentes de sismicidad cortical (Barrientos *et al.*, 2004). De estas destaca en particular, la Zona C, fuente de uno de los terremotos de mayor intensidad que ha afectado a la zona cordillerana de Chile central el último siglo. El 4 de septiembre del año 1958, un terremoto de 6,9 M_L ocasionó múltiples daños tanto materiales como humanos en diversas localidades. Urrutia & Lanza (1993) destacan tres hechos graves de caídas de rocas:

- “Grandes rodados de piedra dejaron intransitable el camino entre San Alfonso y San Gabriel ...”
- “... se evacuó el pueblo El Volcán, en prevención de cualquier desastre... hubo destrucción de viviendas provocadas por derrumbes y rodados...”
- “... un minero quedo aplastado por un rodado en el sector El Volcán.”

El primer relato hace clara alusión al daño que se provocó en las vías de conectividad entre San Alfonso y San Gabriel. En este tramo actualmente existen varios puntos con grados de peligro Muy Alto, que podrían verse gravemente afectados por algún evento sísmico.

El segundo relato da cuenta del daño ocasionado por los bloques que fueron desprendidos desde la ladera Sur del poblado El Volcán. Estas rocas se desplazaron ladera abajo, atravesando lo que es hoy en día la Ruta G-25, para depositarse finalmente en la terraza aluvial en la que está construido el poblado El Volcán. Esta misma ladera, presentó desprendimientos de bloques y rodados menores como efecto directo del Terremoto del Maule el 2010 (Ortiz *et al.*, 2010).

El tercer relato sigue relacionado a la ladera Sur del pueblo El Volcán, ya que en este lugar se encuentra la mina Mercedita, ahora inactiva. Lo más probable es que se trate del mismo evento de desprendimiento rocoso que afectó al pueblo. Esto evidencia la clara inestabilidad que posee este sitio frente a eventos sísmicos.

Un evento reciente que destacar, es el Terremoto del Maule el año 2010. Como se mencionó anteriormente, este sismo generó la caída de bloques al sur del poblado El Volcán, sin generar daños importantes. Serey *et al.* (2019) identificó diversos puntos en las cercanías de la Ruta G-25 en donde se desarrollaron remociones en masa desencadenadas por el terremoto, en particular deslizamientos desmembrados de suelo.

Se destaca también la ocurrencia de remociones en masa en unidades cuaternarias en terrenos bajo los 20°. Esto puede indicar que, bajo condiciones sísmicas, en particular, para deslizamientos de suelo y caídas de rocas, los tramos zonificados con los grados de peligro más bajos presenten actividad local. En particular aquellas zonas de generación que se ubiquen en sectores de baja pendiente pero que reúnan las condiciones geológicas/geotécnicas para la ocurrencia de estos procesos.

Los últimos 5 años se han registrado al menos 6 sismos con su epicentro cerca de la Ruta G-25 (ver Figura 75). Empero estos no son de naturaleza cortical como el ocurrido en Las Melozas, tienen su hipocentro ubicado sobre los 100 kilómetros de profundidad. Uno de los más importantes ocurrió el 14 de abril de este año, con una magnitud de 5,1 Mw. Según el radio de 50 kilómetro propuesto por Keefer (1984) deben haber ocurrido caídas de rocas en la ruta o cercanas a esta, que aparentemente no fueron registradas. En la Figura 74 se observa también que existen epicentros sísmicos bastantes cercanos al camino, como el ocurrido el día 13 de enero del 2015 o el 19 de mayo del 2019. Sin embargo, tampoco se tiene registro de la ocurrencia de caídas de rocas en la ruta. No obstante, esto no implica que no hayan ocurrido. Esta falta de registro puede deberse a la constante limpieza que hace la Dirección de Vialidad en las rutas, en particular la G-25 que es una de las más transitadas en la comuna de San José de Maipo.

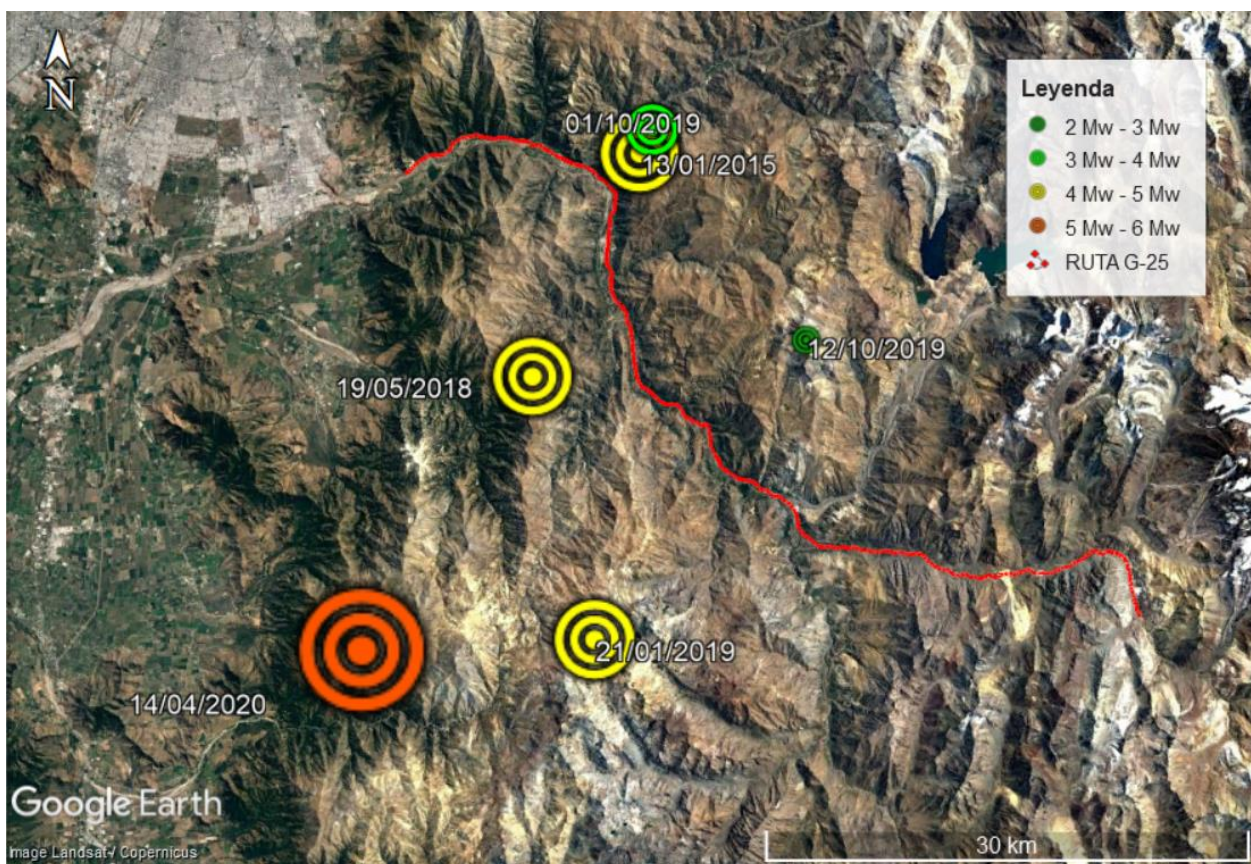


Figura 75: Sismos con epicentro en la Comuna de San José de Maipo desde el 2015. Se consideran aquellos que tengan una magnitud sobre los 2,5 Mw. Fuente de la información Centro Sismológico de la Universidad de Chile. Elaboración propia.

Otros factores que se consideran a lo largo de la Ruta G-25 es la micro sismicidad que producen los camiones que transitan desde La Yesera. Estos se mueven constantemente durante el día, lo que puede conllevar a una desestabilización sostenida en el tiempo de algunos tramos. Otras fuentes sísmicas, pueden ser los centros eruptivos que se encuentran en el sector, como es el caso del Volcán Tupungato o el San José. También en la parte alta del camino, es importante considerar las vibraciones en el terreno producidas por tronadura de labores mineras.

10. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este estudio fue evaluar y zonificar el peligro de deslizamientos de suelo, caídas de rocas y flujos aluviales en la Ruta G-25. Para esto, se desarrollaron e implementaron dos metodologías, una a escala local (1:10.000) y la otra a escala de detalle (1:1.000 o superior) solo para caídas de rocas. Ambas fueron aplicadas a lo largo de la Ruta G-25, dentro de la Comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana.

La ruta en estudio está inmersa en la Cordillera Principal Andina en Chile central, zona que se caracteriza por su topografía empinada con rocas mesozoicas fuertemente plegadas y fracturadas. Diversos agentes exógenos interactúan entre sí en una dinámica muy compleja, modelando el paisaje que se observa en la actualidad. Este dinamismo justificado por la interacción de una serie de factores hidrológicos, sísmicos, climáticos, geológicos, antrópicos entre otros, condicionan el ambiente propicio para la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa. En particular en el área de estudio procesos tales como caídas de rocas, flujos aluviales, deslizamientos traslacionales y rotacionales de suelo, deslizamientos de roca, avalanchas rocosas, son alguno de los procesos que han prevalecido durante parte del cuaternario. En las últimas décadas, la Ruta G-25 se ha visto afectada en particular por procesos de caídas de rocas y flujos aluviales, que son lo que presentan mayor recurrencia en el sector.

Con respecto a la metodología a escala local de zonificación del peligro de remoción en masa, se puede concluir lo siguiente:

- La zonificación del peligro es llevada a cabo mediante una combinación de aproximaciones heurísticas y análisis geomorfológico mediante el método Semi-implícito. Los resultados se observan en mapas de peligro para cada tipo de remoción en masa, en un formato lineal a lo largo de la ruta.
- Para deslizamientos de suelo los principales criterios utilizados corresponden a pendiente del terreno, características geológicas/geotécnicas de las unidades cuaternarias y existencia de eventos previos, que permita además determinar una temporalidad relativa de procesos.
- Para caídas de rocas, los principales criterios para zonificar el peligro responden a factores geológicos/geotécnicos y topográficos. En este caso se consideran como fuente de caídas de rocas tanto los macizos rocosos fracturados como algunos depósitos clásticos.
- Para flujos aluviales, los criterios de zonificación responden principalmente a la geomorfología de las zonas de transporte y de deposición en estos procesos, evaluando en las zonas de alcance la temporalidad relativa de los procesos en función de características geomorfológicas.
- La metodología fue aplicada con éxito en toda la Ruta G-25 dentro de la comuna de San José de Maipo. Su eficacia se ve sustentada en particular para flujos aluviales y caídas de rocas, ya que aquellas zonas que presentan eventos de mayor recurrencia, magnitud e intensidad fueron zonificadas con peligro Alto a Muy Alto. Por el contrario, aquellos tramos que han registrado eventos aislados y con menor magnitud e intensidad están zonificados con los menores grados de peligro.

Con respecto al *Rockfall Hazard Rating System* modificado, se puede concluir lo siguiente:

- Corresponde a un sistema de puntuación, donde los factores considerados apuntan a las características del talud (altura, ángulo, etc.), a las condiciones climáticas locales (precipitaciones acumuladas, ciclos de congelamiento y/o descongelamiento, etc.) y las características geológicas del talud.
- Con las modificaciones realizadas, se logró el objetivo de agilizar su uso en terreno, permitiendo una relativa rápida toma de datos, reduciendo la exposición al riesgo que se tiene al trabajar con taludes de gran peligro.
- La inclusión de un nuevo parámetro junto a las nuevas ponderaciones permitió caracterizar de mejor manera los taludes con depósitos clásticos, respetando la premisa de que los taludes con mayor puntaje representan un mayor grado de peligro.
- Se evaluaron un total de 22 taludes a lo largo de la ruta, 16 compuestos por depósitos clásticos y 6 cristalinos. No se identificaron taludes con rocas sedimentarias.
- Los resultados arrojan puntajes finales entre 239 y 891.
- Los taludes con mayor puntaje representan mayor peligro para la ruta.
- Mediante la aplicación del RHRS modificado para la Ruta G-25, se lograron identificar al menos 6 taludes que requieren la implementación de alguna medida de mitigación en el corto plazo.

Con respecto a ambas metodologías, se concluye lo siguiente:

- Como los taludes con mayor puntaje asociados a caídas de rocas se encuentran en tramos con peligro Alto a Muy Alto, el uso combinado de ambos sistemas permite gestionar la prioridad en que se implementaría alguna medida mitigadora de peligro para los taludes calificados.

Con respecto a la zonificación del peligro se puede concluir lo siguiente:

- La Ruta G-25 está expuesta a ser afectada principalmente por caídas de rocas y flujos aluviales.
- El 4% de la Ruta G-25, lo que corresponde aproximadamente a 2,9 kilómetros, esta zonificada con peligro Muy Alto para flujos aluviales.
- El 3% de la Ruta G-25, lo que corresponde aproximadamente a 2,1 kilómetros, está zonificada con peligro Muy Alto para caídas de rocas.
- El 1% de la Ruta G-25, lo que corresponde aproximadamente a 0,6 kilómetros, está zonificada con peligro Muy Alto para deslizamientos de suelo.
- Las principales dos fuentes de caídas de rocas a lo largo de la Ruta G-25 son los afloramientos rocosos, pertenecientes a las unidades Jurásicas, Cretácicas y Paleógenas que se encuentran en el área, y los depósitos clásticos cuaternarios. Sin embargo, los que mayor daño causan al trazado de la ruta, son las caídas provenientes de unidades rocosas.
- Las morfologías canalizadoras, son las zonas con mayor recurrencia para flujos aluviales y representan un peligro inminente para la Ruta G-25.

Con respecto a los factores desencadenantes se puede concluir lo siguiente:

- Sin duda, las precipitaciones son los desencadenantes más recurrentes en la zona de estudio, tanto para caídas de rocas como para flujos aluviales. Sin embargo, no se debe descuidar el factor sísmico, ya que se tienen bastantes centros de sismicidad

cortical cerca de la Ruta G-25. Los sismos profundos (>100 km) tienen una recurrencia relativamente alta, aunque su intensidad y magnitud suele ser baja (<5,5 ML).

- Los fenómenos que se dan con mayor recurrencia a lo largo de la Ruta G-25 son las caídas de rocas con diferentes magnitudes e intensidades. Sin embargo, en la última década los eventos graves con mayor recurrencia han sido los flujos aluviales, que en múltiples ocasiones han resultado con el corte de la ruta y destrucción de infraestructura vial.

En resumen, se puede afirmar que se cumplieron a cabalidad todos los objetivos propuestos inicialmente.

11. RECOMENDACIONES

- Se identificaron diferentes tramos con peligro Alto a Muy Alto tanto para flujos aluviales, caídas de rocas y deslizamientos de suelo. Esta zonificación resulta de mucha utilidad para en un futuro proponer soluciones frente a estas amenazas. Estas pueden ser soluciones estructurales o soluciones mixtas, que incluyan advertir a los pobladores y sobre todo a los visitantes sobre las amenazas a las que se ve expuesta la ruta.
- A lo largo de la ruta se identificaron diversos tramos con peligrosidad Muy Alta de flujos aluviales. En particular para aquellos en los que es más recurrente la ocurrencia de estos fenómenos se propone la siguiente señalética:

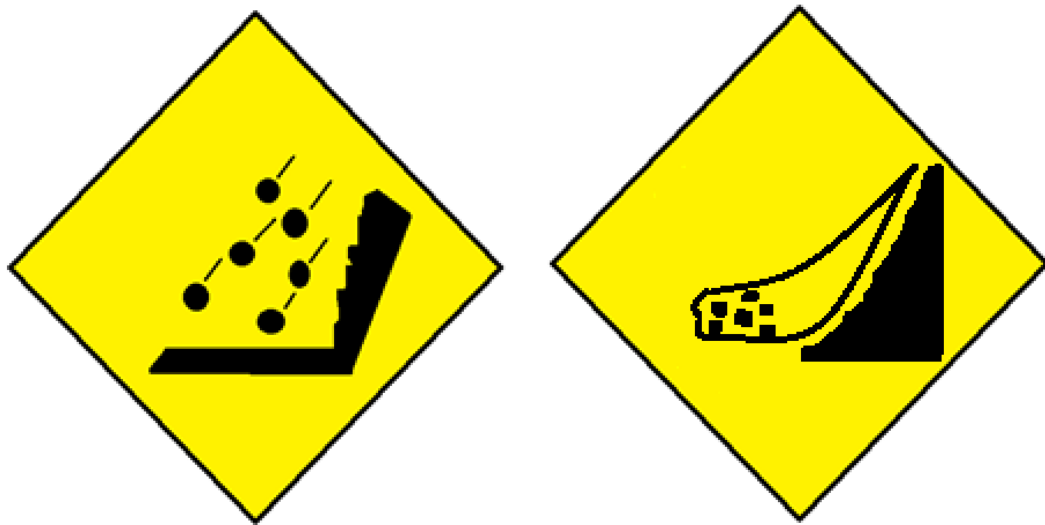


Figura 76: A la izquierda señalética para caídas de rocas que actualmente está en Ruta G-25. A la derecha, señalética propuesta para flujos aluviales. Elaboración propia

Los sectores más recurrentes y que presentan mayor peligro para flujos aluviales son los siguientes:

- Estero El Manzano, El Manzano
- Estero San José, San José de Maipo
- Estero sin nombre identificado, a la altura del kilómetro 40
- Quebrada Melocotón, El Melocotón
- Estero Las Cucas, El Melocotón
- Quebrada La Calchona, El Melocotón
- Estero San Alfonso, San Alfonso

Desde el kilómetro 60 se considera una zona en extremo crítica para la ocurrencia de flujos aluviales. Varios eventos en la última década se han concentrado en este sector, causando graves pérdidas materiales y cortes de ruta. Es por esto que se sugiere el uso de una señalética general que advierta sobre el peligro de aluviones en este tramo, como el que se expone en la Figura 77.



Figura 77: Señalética preventiva para flujos aluviales. Elaboración propia

- Junto con el uso de señaléticas se sugiere la instalación de una señalética de carácter informativo al inicio de la Ruta G-25 en San José de Maipo, como la Figura 78. Esto con el objetivo de alertar a los turistas sobre los peligros que afectan la ruta.
- Se sugiere la implementación de medidas de mitigación al peligro, para aquellos taludes calificados con mayor puntaje mediante el RHRS modificado en la Ruta G-25.
- Los tramos con mayor recurrencia de eventos y que representan mayor peligro de caídas de rocas son los siguientes:
 - Sector El Toyo
 - Túnel El Tinoco
 - Los Almendros, frente a El Ingenio
 - Puente El Yeso
 - Tramos de Moderado a Muy Alto desde el kilómetro 76 en adelante.
- Precaución extrema en los tramos zonificados con peligro Moderado, Alto y Muy Alto para caídas de rocas y flujos aluviales durante eventos de intensa precipitación. Como gran parte de estos procesos ocurren en un periodo relativamente corto, se sugiere especial atención en eventos meteorológicos con máximas intensidad en periodos de 24, 48 o 72 horas.

- Precaución extrema en los tramos zonificados con peligro Alto a Muy Alto para flujos aluviales ante eventos de moderada a intensa precipitación con isoterma 0°C por sobre el promedio.
- Precaución extrema en tramos zonificados con peligro Bajo, Moderado, Alto y Muy Alto para deslizamientos de suelo y caídas de rocas, ante sismos con epicentro cercano a la Ruta G-25, o en su defecto sismos de gran magnitud que presenten una intensidad moderada o superior (en la escala de Mercalli), en el área de estudio.



Figura 78: Señalética informativa/preventiva propuesta para el inicio de Ruta G-25, en San José de Maipo. Elaboración propia.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, S.M. & Kowetzky, H. 2017. Rock Mass Classification System. En *Introduction to Geomechanics*. Germany: Heinz Kowetzky.
- Ayala, F.J., Cubillo, S., Álvarez, A., Domínguez, M.J., Laín, L., Laín, R. & Ortíz, G. 2003. Large scale rockfall reach susceptibility maps in La Cabrera Sierra (Madrid) performed with GIS and dynamic analysis at 1:5,000. *Natural Hazards*, 30: 325-340.
- Baroni, C., Gentili, R., & Armiraglio, S. 2013. Vegetation Analysis on Composite Debris Cone. En *Dating Torrential Processes on Fans and Cones*.
- Barrientos, S., Vera, E., Alvarado, P. & Monfret, T. 2004. Crustal seismicity in Central Chile. *Journal of South American Earth Science*, 16(8), 759-768.
- Barton, N.R., Lien, R. & Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the desing of tunnel suport: *Rock Mechanics*, Vol 6, no.4, pp. 189-239.
- Benito, G. 2013. Hazardous Processes: Flooding. *Treatise en Geomorphology*, 243—261.
- Biblioteca del Congreso Nacional. SIIT. (s.f.). Clima y vegetación. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/clima.htm>
- Bieniawski, Z.T. 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologist in mining, civil and petroleum engineering, Wiley: New York.
- Biobiochile. 2019. Dos niñas brasileñas, de tres y siete años, mueren por derrumbe en Cajón del Maipo. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/región-metropolitana/2019/06/04/dos-ninas-brasilenas-de-tres-y-siete-anos-mueren-por-derrumbe-en-cajon-del-maipo.shtml>
- Brabb EE. 1984. Innovative approaches to lanslide hazard and risk mapping. In: *Proceeding of the IVth ISL, Toronto*, vol 1, pp. 307-324.
- Brabb, EE., Pampeyan, EH. & Bonilla, MG. 1972. Lanslide susceptibility in San Mateo Country, California. US Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF-360, scale 1:62.500
- Brazier, V. 1988. Late quaternary alluvial fans Debis Cone and Talud Cone in the Grampian Highlands, Scotland. A Thesis submitted for the degreee of PhD at the University of St. Andrews.
- Budetta,P., Santo, A. & Vivenzio, F. (2008) Landslide Hazard mapping along the coastline of the Cilento región (Italy) by means of a GIS-based paraemter rating approach. *Geomorphology*. V.98, pp. 343
- Chacón, J. & Irigaray, C. 1992. Metodología para la elaboración de mapas de riesgos de movimientos de ladera. In: *III Congreso Geológico de España. Simposios*, tomo Salamanca (Spain). Vol.2, pp. 620-627
- Chacón, J. & Irigaray, C. 1999. Previsión espacial de movimientos de ladera mediante SIG. Los Luis Laín Huerta (ed) *Sistema de Información Geográfica en los Riegos Naturales y en el Medio Ambiente*. ITGE, Madrid, pp. 111-123
- Chacón, J., Irigaray, C. & Fernandez, T. 1992. Metodología para la cartografía regional de movimientos de ladera y riesgos asociados mediante un SIG. *III Simp. Nac. Laderas y Taludes inestables*, vol.2, pp.121-133

- Chacón, J., Irigaray, C. & Fernandez, T. 1994. Large to middle scale landslide inventory, análisis and mapping with modelling assessment of derived susceptibility, hazard and risk in a GIS. 7th International IAEG Congress. Lisboa, Vol.4, pp.4669-4678. Balkema (Rotterdam)
- Chacón, J., Irigaray, C., El Hamdouni, R. & Fernandez, T. 1996. From the inventory to the risk análisis: improvements to a large scale GIS method. In: Landslide, Proc. 8th ICFL, Granada, vol.1, pp. 335-342.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J.J., Gans, P., Kay, S.M., Muñoz, N., Wyss, A.R., Zurita, E. 2002a. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 117 - 139.
- Chen, C-Y., & Yu, F-C. 2011. Morphometric analysis of debris flows and their source áreas using GIS. *Geomorphology* 129, 387-397.
- Conoscenti, C., Maggio, C.D., Rotigliano, E. 2008. GIS analysis to asses landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy). *Geomorphology* 94, 325-339.
- Cruden, D., 1991. A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No. 43, p. 27-29.
- Deckart, K., Godoy, E. 2006. Barren Igneous Intrusives in The Central Andes: U-Pb y Nd-Hf Isotope Geochemistry. *Short Papers, V-SSAGI*, 349-351. Punta del Este, Uruguay.
- Dorren, L. 2002. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography* 27, pp.69-87
- Einstein, H. 1988. Special Lecture: lanslide risk assesment procedure. In: *proceedings of the Vth ISL*. Lausanne, vol 2, pp. 1075-1090
- El Hamdouni, R. 2001. Estudio de movimientos de ladera en la cuenca del río Ízbor mediante un SIG: contribución al conocimiento de la relación entre tectónica activa e inestabilidad de vertientes. Pp. 429 and 10 maps 1:25.000, Unpublished PhD tesis. Department of Civil Engineering University of Granda, Spain.
- Espinoza L; Marín M.; Pantoja G. 2019. Peligros de remociones en masa tipo flujo de la Cuenca Alta del Río Maipo, Región Metropolitana de Santiago. Informe Registrado N°72, SERNAGEOMIN. 2 mapas pleg. (Informe)
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. & Savage, W. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, Hazard and risk zoning for land-use planing. *Engineering Geology* 102 (3-4), pp. 85-98
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. & Savage, W. 2008b. *Commentary*: Guidelines for landslide susceptibility, Hazard and risk zoning for land-use planing. *Engineering Geology* 102 (3-4) pp. 99-111
- Flatland, R. 1993. Application of the Rockfall Hazard Rating System to the rock slopes adjacent to U.S. 50 and state Route 28 on the east side of Lake Tahoe, Nevada. University of Nevada, Renom Ms Thesis, 318p.
- Fock, A. 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de Los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°S: Tesis de Magíster. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 235.
- Gajardo, A., Garrido, N. & Falcón, F. 2013. Reconocimiento geológico de los eventos de remoción en masa ocurridos el 21 de enero de 2013 en el Cajón del Río Maipo, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería.

- Gajardo, A., Garrido, N., Falcón, F. 2013. Reconocimiento geológico de los eventos de remoción en masa ocurridos el 21 de enero de 2013 en el Cajón del Río Maipo, Región Metropolitana. Departamento de Geología Aplicada, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- García, M. 2016. Análisis dinámico de un deslizamiento traslacional de roca, provocado por acción sísmica mediante el uso de elementos discretos. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, Mención Geología. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Garcia, RAC. & Zêzere, JL. 2004. Abadia Basin (Torres Vedras, Portugal) a case of study of landslide susceptibility assesment and validation. In: Lacerda WA, Ehrlich M, Fontoura SAB, Sayao ASF (eds) Landslides: evaluation and stabilization Balkema, Taylor & Francis Group, London, pp. 137-146
- Garreaud, R. (2017) La altura de la isoterma 0°C durante tormentas en Chile central. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
- Godoy, E., Yañez, G., Vera, E. 1999. Inversion of an Oligocene volcano-tectonic basin y uplifting of its superimposed Miocene magmatic arc in the Chilean Central Andes: first seismic and gravity evidences. Tectonophysics, 306, 117-136.
- Gonzalez de Vallejo, L., Freire, M., Ortuño, L. & Oteo, C., 2002. Ingeniería Geológica. Segunda ed. Madrid: Pearson Educación.
- Gonzalez, P. 2010. Geología y geomorfología del complejo de remoción en masa La Engorda, Chile Central. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Gorum, T., Gonencgil, B., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A. 2008. Implementation of reconstructed geomorphologic units in landslide susceptibility mapping: the Melen George (NW Turkey). Natural Hazards 46, 323-351.
- Hartlen, J. & Viberg, L. 1988. General report: evaluation of lanslide hazard. In: Proceeding of the Vth ISL, Lausanne vol 2, pp. 1037-1057
- Hearn, G. 2011. Slope Engineering for Mountain Roads. Geological Society, London. Engineering Geology Special Publication, 24.
- Hearn, G., Wise, D., Hart, A., Morgan, C. & O'Donnell, N. 2012. Assesing the potential for the future first time Slope failures to impact the oil and gas pipeline corridor through the Makarov Mountains, Sakhalin Island, Russia. Quaternary Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 45, 79-88.
- Herrera, M. (2016). Estimación de las altitudes de las líneas de equilibrio en glaciares de montaña para el último ciclo glaciar-interglaciar en los Andes de Santiago, Chile central (Tesis Doctoral). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Hershfield, D.M. 1974. The frequency of freeze-thaw cycles. The Journal of Applied Meterology. Vol.13, 348-354.
- Hosmer, D.W., & Lemeshow, S. 2000. Applied Logistic Regression Second Edition, John Wiley & Sons Inc., NY, pp.260-308
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M., y Hutchinson, J.N., 2001, Review of the classification of landslide of the Flow type: Environmental and Engineering Geoscience, v. 7, p. 22-238.
- Información Turística de San José de Maipo (s.f.). TurismoenChile. <https://www.turismoenchile.cl/attractivo-turistico/93/san-jose-de-maipo>

- Intrat Consultores S.A. 2014. Estudio de Sendas de Avalanchas, Flujos de Detritos y Otros, en la Ruta 115-Ch, Sector La Mina – Límite Fronterizo. Volumen 1: Línea de Base de Geología, Geomorfología y Peligros. Informe N°5. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad VII Región.
- Irigaray, C. 1995. Movimientos de ladera: inventario, análisis y cartografía de susceptibilidad mediante un Sistema de Información Geográfica. Aplicación a las zonas de Colmenar (Málaga), Rute (Córdoba) y Montefrío (Granada). Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Granada, pp. 578
- Keefer, D.K. 1984. Landslides caused by earthquake. Geological Society of America Bulletin, vol. 95, p. 406-421.
- Kenney, T.C.; Lau, D. 1985. Internal stability of granular filters. Canadian Geotechnical Journal, 22, 215-225
- Klohn, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Boletín 8, 95.
- Lara, M. 2007. Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana (Tesis para optar al grado de Magister en ciencias mención Geología). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Lienhart DA. 1988. The geographic distribution of intensity and frequency of freeze/thaw cycles. Bull Assoc Eng Geol.
- Marín, M., Contreras, J.P., & Olea, P. 2017. Efectos geológicos del sistema frontal en la zona central del país, el 25 y 26 de febrero del 2017. Región Metropolitana, comuna de San José de Maipo. Servicio Nacional de Geología y Minería (INF-METROPOLITANA-01.2017)
- Marín, M., Muñoz, A. & Naranjo, J.A. 2018. Víctimas fatales causadas por remociones en masa en Chile (1928-2017). Servicio Nacional de Geología y Minería. Universidad de Concepción. Congreso Geológico chileno, Geociencias hacia la comunidad, No.15: 2p.
- McKenzie, D.C. 2001. Rapid assesment of soil compaction damage I. The SOILpak score, a semi-quantitative measure of soil structural form. Australian Journal of Soil Research. Vol39, 117-125.
- Municipalidad San Jose de Maipo (2015) *Dos personas lesionadas en el sector "Tunel El Tinoco" por caída de rocas sobre automovil*. San José de Maipo. <https://sanjosedemaipo.cl/avisos/dos-personas-lesionadas-en-el-sector-tunel-el-tinoco-por-caida-de-rocas-sobre-automovil/>
- Muñoz, A. 2016. Catastro y reconocimiento de zonas susceptibles de remociones en masa, inundaciones y socavones en la ruta G-25, Provincia Cordillera, Región Metropolitana. Informe de Proyecto II, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Muñoz, A. 2018. Metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos utilizando un análisis jerarquico de procesos y el software RAMMS, con aplicación en la cuenca del estero San Alfonso, Región Metropolitana. Memoria de Título (inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago. 105.
- Muñoz, A.; Marín M.; Galecio, J.; 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, Informe registrado IR-18-69: 130 p. Santiago.
- Nhuchhen, D. R., 2017. Physical Modeling of Debris Flow by Varying Sediment Concentration. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Science and Technology. Norway.
 - Nilsen, T. & Wright, R. 1979. Relative slope stability and land-use planning in the San Francisco Bay región, California, US Geological Survey Professional Paper 944, US Department of Interior, Washington, pp. 103
 - Nyström, J.O., Vergara, M., Morata, D., Levi, B. 2003. Tertiary volcanism during extension in the Andean foothills of central Chile (33°15'-33°45' S). GSA Bulletin, 115 (12), 1523 - 1537.
 - Ojeda, J. & Muñoz, F. 2001. Elementos conceptuales generales. In Evaluación del Riesgo por fenómenos de remoción en masa. Escuela Colombiana de Ingeniería-INGEOMINAS, pp.15-28
 - Ortiz, M. & Fernández, J. 2010. Inestabilidad de laderas frente al poblado El Volcán, comuna San José de Maipo, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería (INF-RM-03)
 - Ormeño, A. 2007. Geodinámica de la hoya hidrográfica del río Maipo en la zona cordillerana de la Región Metropolitana: Implicancias neotectónicas. Tesis (Magister en Ciencias, mención geología). Santiago. Universidad de Chile, Departamento de Geología, 177.
 - Pack, R., Boie, K., Mather, S. & Farrell, J. 2006. UDOT Rockfall Hazard Rating System: Final report and User's Manual. Research Report: Utah State University.
 - Pierson, L., Davis, S. A., and Van Vickle, R. 1990. Rockfall Hazard Rating System – Implementation Manual, Federal Highway Administration (FHWA), Report FHWA-OR-EG-90-01. FHWA U.S. Dep. of Transp.
 - Pierson, T.C. 1982. Classification and hydrological characteristics of scree deposits in the northern Craigieburn Range, New Zealand, Journal of Hidrology (New Zealand) 21(1), 34-60.
 - PMA, 2008. Proyecto Multinacional Andino. Geociencias para las Comunidades Andinas. Atlas de Deformaciones Cuaternarias de los Andes. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, no. 7, 320
 - Quiroga, R. 2013. Análisis estructural de los depósitos cenozoicos de la cordillera principal entre el Cerro Provincia y el Cordón El Quempe, Región Metropolitana, Chile (33°18' y 33°25'S). Memoria para optar al título de geóloga, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
 - Ramírez, P. & Garrido, N. 2012. Inspección técnica a la localidad de San José de Maipo, Región Metropolitana, por derrumbe en Ruta G-25, Km 51 e inestabilidad del macizo rocoso. Servicio Nacional de Geología y Minería.
 - Rebolledo, S., Elgueta, S., Carrasco, N., Perignon, N. & Kieffer, G. 2000. Zonificación del peligro de remoción en masa en San José de Maipo, Valle del Río Maipo, Región Metropolitana. IX Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, Chile. Actas, Vol 1, pp. 102-106
 - Rodríguez, C.E., Bommer, J.J. & Chandler, R.J.,1999. Earthquake-induced landslides: 1980-1997. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 18, p.325-346.

- Russell, C., Santi, P., Higgins, J. 2008. Modification and statistical analysis of the Colorado Rockfall Hazard Rating System. Departamento de Transporte de Colorado. Reporte CDOT-2008-7
- Saavedra, G. 2018. Análisis de deslizamientos de laderas en roca en el Cajón del Maipo a través de modelamiento 3D. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Santi, P.M. 2006. Field method for characterizing weak rock for engineering. *Environmental and Engineering Geoscience*, Vol(12), pp. 1-11.
- Sepúlveda, N. & Jara, C. 2016. Efectos geológicos del sistema frontal en la zona central del país, 14-18 de abril de 2016. Servicio Nacional de Geología y Minería (INF-SAN JOSÉ DE MAIPO-01).
- Sepulveda, S., Moreiras, S., Lara, M., & Alfaro A. 2014. Debris flows in the Andean ranges of central Chile and Argentina triggered by 2013 summer storms: characteristics and consequences. *Landslides* (2015) 12:115–133
- Serey, A., Piñera-Feliciangeli, L., Sepúlveda, S.A., Poblete, F., Petley, D.N. & Murphy, W. 2019. Landslide induced by the 2010 Chile megathrust earthquake: a comprehensive inventory and correlations with geological and seismic factors. *Landslide*.
- Shelton, David C., and Prouty, Dick, 1979, Nature's building codes, geology and construction in Colorado: Department of Natural Resources, Colorado Geological Survey Special Publication No. 48, 72 p
- Si-Qiao, Y., Gong, S., Zhuan-Yun, Y. & Hui, L., 2014. A Rating System for Road Slope Rockfall Hazards. Report EJGE, v.19.
- Soeters, R., & van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation. In A. K. Turner, & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides, investigation and mitigation (Transportation Research Board, National Research Council, Special Report ; 247)* (pp. 129 - 177). Washington D.C., USA: National Academy Press.
- Steijn, H., Boelhouwers, J., Harris, S., Héту, B. 2002. Recent research on the nature, origin and climatic relations of blocky and stratified slope deposits. *Progress in Physical Geography*, 26(4), 551-575.
- Suarez, J. 2009. Resistencia al cortante. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Universidad Industrial de Santander UIS, pp.75-125.
- Skewes, A., Stern, C., Holmgren, C., Contreras, A., Godoy, I., Rivano, S. 1991. Evolución Magmática cerca del borde sur del segmento de bajo ángulo de subducción en Chile Central (32°-34° S). Resúmenes ampliados del Congreso Geológico Chileno, 146 - 148.
- Thiele, R. 1980. Carta Geológica de Chile 1:250.000. Hoja de Santiago, Región Metropolitana. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, 39, 51.
- Tonnizam, E., Saad, R. & Alavi, S. 2011. Durability Assessment of Weak Rock by Using Jar Slaking Test. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol (16), pp. 1319-1335.
- Trombotto, D., Wainstein, P. & Arenson, L. 2014. Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana, 1ra edición.

- Turner, A.K. 1996. Colluvium and Talud. En *Landslides: Investigation and Mitigation*, National Academy Press.
- Urrutia, R. & Lanza, C. 1993. Catástrofes en Chile, 1541-1992, Santiago Chile. Editorial La Noria.
- Vandewater, C.J.; Dunne, W.M.; Mauldon, M.; Drumm, E.C.; Batemann, V.; 2005. Classifying and assessing the geologic contribution to rockfall hazard: *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol XI, no. 2, pp. 141-154.
- Varnes, D. J., 1978, Slope movement types and processes, en Schuster R.L., y Krizek R.J., ed, *Landslide análisis and control*: Washington D.D, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 176, p.9-33
- Varnes, D., 1984. Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of landslide of IAEG, UNESCO. Natural Hazards, Volume 3.
- Vergara, M. y Nyström, J.O. 1996. Geochemical features of Lower cretaceous back-arc lavas in the Andean Cordillera, Central Chile (31°-34°S). *Revista Geológica Chilena*, 23 (1), 97 - 106.
- Villela, D. 2015. Desarrollo estructural de la cordillera principal al suroeste del Río Maipo, sector de El Ingenio, Región Metropolitana, Chile. Memoria para optar al título de Geóloga. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- Wilson, C.G.J., Hermanns, R., Fauqué, L., Rosas, M., Baumann, V. & Hewitt, K. 2008. Upper Pleistocene deglaciation as a conditioning factor for catastrophic mass redistribution in Las Cuevas basin, Mendoza, Argentina. 7th International Symposium on Andean Geodynamics. Pp. 583-586.
- Wyllie, D.C. 1987. Rock Slope Inventory. Proceedings, Federal Highway Administration Rockfall Mitigation seminar, IHWA, Portland Oregon, 25p.