



ANÁLISIS PELIGRO DE REMOCIÓN EN MASA, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
GOBIERNO REGIONAL DE ARICA Y PARINACOTA

INFORME FINAL

Estudio FNDR COD. BIP 40017755-0

Julio de 2024

Empresa ejecutora



Referencia bibliográfica:

SERNAGEOMIN-GORE Arica y Parinacota. 2024. Análisis peligro de remoción en masa, región de Arica y Parinacota. Servicio Nacional de Geología y Minería-Gobierno Regional de Arica y Parinacota. Informe Final. Estudio FNDR Cód. BIP 40017755-0. 180 p., 12 anexos.

Apoyo financiero:

Fondo Nacional de Desarrollo Regional FNDR Código BIP 40017755-0, Gobierno Regional de Arica y Parinacota, Chile.

Fondos sectoriales del Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile

Contraparte técnica:

Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile

Empresa ejecutora:

Xterrae Geología (contacto@xterrae.cl)

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	RESUMEN	10
1.1	<i>Descripción del informe</i>	10
1.2	<i>Metodología general del estudio</i>	11
2	INTRODUCCIÓN	13
2.1	<i>Objetivo general del estudio</i>	13
2.1.1	Objetivos específicos	13
2.1.2	Objetivos del estudio	13
2.2	<i>Ubicación del área de estudio</i>	14
2.3	<i>Alcances y limitaciones</i>	16
2.4	<i>Antecedentes</i>	17
2.5	<i>Marco conceptual</i>	21
2.5.1	Remociones en masa	21
2.5.2	Amenaza y susceptibilidad	27
2.5.3	Catastro de remociones en masa	28
2.5.4	Mapas de susceptibilidad	28
3	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	30
3.1	<i>Contexto geomorfológico regional</i>	30
3.2	<i>Contexto geológico regional</i>	37
3.2.1	Litología	37
3.2.2	Estructuras	43
3.3	<i>Clima</i>	48
3.3.1	Temperatura	48
3.3.2	Precipitaciones	49
3.3.3	Clasificación climática de la región	52
3.4	<i>Vegetación</i>	54
3.5	<i>Hidrografía</i>	57
4	CATASTRO	59
4.1	<i>Generalidades</i>	59
4.1.1	Metodología	59
4.2	<i>Trabajo de terreno</i>	60
4.3	<i>Remociones en masa identificadas en terreno</i>	62
4.3.1	Caídas	66
4.3.2	Deslizamientos	73
4.3.3	Flujos	80



4.3.4	Deformación de ladera y otros	90
5	SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA.....	92
5.1	<i>Metodología.....</i>	92
5.1.1	Análisis de colinealidad de factores condicionantes	93
5.1.2	División del catastro en entrenamiento y validación	94
5.1.3	Estimación de razón de frecuencia.....	94
5.1.4	Validación con curva de éxito.....	95
5.1.5	Clasificación de niveles de susceptibilidad	95
5.1.6	Definición de alcance.....	95
5.2	<i>Resultados.....</i>	97
5.2.1	Análisis de colinealidad.....	97
5.2.2	División del catastro en entrenamiento y validación	99
5.2.3	Estimación de razón de frecuencia y validación con curva de éxito.....	100
5.2.4	Clasificación de niveles de susceptibilidad	102
5.2.5	Alcance	107
6	MORRO DE ARICA	112
6.1	<i>Introducción y objetivos.....</i>	112
6.2	<i>Metodología y productos.....</i>	113
6.3	<i>Insumos.....</i>	116
6.4	<i>Análisis.....</i>	125
6.4.1	Definición de perfiles o secciones de análisis.....	125
6.4.2	Criterios y herramientas de análisis.....	129
6.4.3	Propiedades y escenarios de modelamientos	131
6.4.4	Resultados	137
6.5	<i>Conclusiones</i>	141
6.6	<i>Recomendaciones</i>	143
7	ZONAS CRÍTICAS	150
7.1	<i>Comuna de General Lagos</i>	150
7.2	<i>Comuna de Arica.....</i>	151
7.3	<i>Comuna de Putre</i>	153
7.4	<i>Comuna de Camarones.....</i>	154
7.5	<i>Planes de manejo para las zonas críticas.....</i>	156
7.5.1	Caídas y deslizamientos	156
7.5.2	Flujos.....	157
8	FACTORES DESENCADENANTES DE REMOCIONES EN MASA.....	158
8.1	<i>Remociones en masa desencadenadas por sismos.....</i>	159
8.2	<i>Precipitaciones.....</i>	160
8.3	<i>Actividad volcánica</i>	162

8.4	<i>Erosión y excavación al pie de laderas y taludes</i>	163
8.5	<i>Intervención antrópica</i>	163
8.6	<i>Desencadenantes identificados en el catastro</i>	165
9	TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO	167
9.1	<i>Objetivos y público</i>	167
9.2	<i>Productos</i>	168
9.3	<i>Prototipos</i>	169
10	CONCLUSIONES	172
10.1	<i>Mapas temáticos</i>	172
10.2	<i>Catastro</i>	173
10.3	<i>Susceptibilidad</i>	174
10.4	<i>Zonas críticas</i>	174
10.5	<i>Morro de Arica (Mapa 5 escala 1:1.000)</i>	175
11	BIBLIOGRAFÍA	176
	ANEXOS	186

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1	División político-administrativa de la región de Arica y Parinacota (modificado de IDE).	15
Fig. 2	Mapa geomorfológico.....	32
Fig. 3	Unidades geomorfológicas reconocibles desde vuelo dron sobre valle del río San José (Quebrada El Diablo); flechas rojas esquematizan caídas y deslizamientos, flechas cafés, flujos. (a) Fotografía original. (b) Unidades geomorfológicas delimitadas por polígonos para mejorar interpretación. Archivo de terreno. Fotografía tomada en ruta A-19, entre Poconchile y San Miguel de Azapa (coordenada 381205E; 7951959S).	34
Fig. 4	Flujos (flechas cafés) provenientes de la Cordillera Occidental y transportados por el Altiplano. (a) Fotografía original. (b) Unidades geomorfológicas delimitadas por polígonos para mejorar interpretación Archivo de terreno. (fotografía de vuelo de dron tomada en las coordenadas 483100E;7946040S).....	36
Fig. 5	Mapa litológico.	39
Fig. 6	Leyenda unidades litológicas.	40
Fig. 7	Ejemplos de caídas de rocas (flechas rocas indican posibles trayectorias) asociadas a distintos tipos litológicos y mecanismos. Archivo de terreno. Fotografía izquierda. Ruta A-31, sector Chapiquiña (coordenadas 441977E; 7968514S). Fotografía derecha: ruta 11 – sector Estación Rosario (coordenadas 379112E; 7964067S). La ubicación espacial del punto de observación de esta y las siguientes fotografías presentadas en el informe se presentan en el ANEXO K.....	41
Fig. 8	Ejemplos del rol de materiales arenosos en caídas de rocas. Archivo de terreno (las flechas rojas ejemplifican posibles trayectorias de los bloques). Fotografía izquierda: ruta A-27 Valle de Azapa (coordenadas 389432E; 7946090S). Ruta 5 norte (sector Chaca, coordenadas 377802E;7919633S).	42



Fig. 9 Reactivación de remociones en masa. Comportamiento inicial de deslizamiento rotacional (flechas moradas) secundado por caída de rocas (flechas rojas) en escarpes del deslizamiento. Archivo de terreno. Sector ruta A-23 entre Putre y Coronel Alcérreca (coordenadas 433826E;8010928S)..... 43

Fig. 10 Sistemas de fallas caracterizadas en el libro *Geology of Chile* (Moreno & Gibbons, 2007)..... 45

Fig. 11 Mapa de estructuras..... 46

Fig. 12 Talud artificial de ruta 5 norte (sector cuesta de la cultura Chinchorro, coordenadas 381954,20 E / 7887826,66 S) evidenciando un fuerte control estructural. Archivo de terreno. 47

Fig. 13 Valle del río Lluta evidenciando un fuerte control estructural (falla inversa esquematizada en línea dentada negra; flechas rocas indican zonas de remociones en masa). Archivo de terreno. Coordenada 430690E/8004038S. 48

Fig. 14 Temperatura máxima (rojo) y mínima (azul) media mensual (medida en °C) en estaciones meteorológicas de la región de Arica y Parinacota. 49

Fig. 15 Precipitación media mensual (medida en mm) en estaciones meteorológicas de la región de Arica y Parinacota..... 50

Fig. 16 Precipitaciones máximas anuales en seis estaciones meteorológicas de la DGA..... 51

Fig. 17 Mapa de clima..... 53

Fig. 18 Mapa de uso de suelos de la región de Arica y Parinacota. Elaborado a partir de información georreferenciada disponible en el Sistema de Información Territorial - CONAF 2020 en <https://sit.conaf.cl/>. 55

Fig. 19 Vegetación en laderas y quebradas de la zona Cordillera Occidental, mostrando el efecto positivo de la vegetación en la retención de bloques en laderas (fotografía izquierda) y quebradas (fotografía derecha). Sector ruta A-31, acceso a Belén (coordenadas 440423E; 7972072S). Las flechas rojas muestran posible trayectoria de bloques. Archivo de terreno. 56

Fig. 20 Vista del valle del río San José (Valle de Azapa). Fotografía tomada desde ruta A-19 mediante vuelo de dron (coordenadas 380724E; 7952581S). Archivo de terreno. 57

Fig. 21 Mapa de Hidrografía. 58

Fig. 22 Recorrido de terreno en los meses de junio, septiembre, noviembre de 2023 y abril 2024..... 61

Fig. 23 Catastro puntual de remociones en masa. 63

Fig. 24 Clasificación de los tipos de remociones en masa contenidas en el catastro. Los materiales asociados a las remociones en masa dominantes son roca y una mezcla de roca y suelo/sedimento ambos con un 38% de los registros (Fig. 25). 64

Fig. 25 Tipo de material involucrado en las remociones en masa..... 65

Fig. 26 Detonante de las remociones en masa contenidas en el catastro. 65

Fig. 27 Rasgos identificados..... 66

Fig. 28 Estado de las remociones en masa identificadas..... 66

Fig. 29 Catastro puntual de caídas. 68

Fig. 30 Ejemplo de caídas de rocas desde laderas de quebrada Vítor, en cuenca costera río San José – Q. Camarones. Archivo de terreno (las flechas rojas indican la dirección de las caídas de roca desde su zona de generación). Fotografía izquierda, ID_RM 15140189, acceso a caleta Vítor (374794E; 7921505S). Fotografía derecha: vista de quebrada Vítor en sector de Chaca, ID_RM 15140078 (388013E; 7913892S) y 1514079 (388065E; 7913799S). 69

Fig. 31 Ejemplo de caídas de rocas desde laderas de quebrada Camarones. Archivo de terreno (las flechas amarillas indican ejemplo de trayectorias seguidas en caídas de material). Fotografía izquierda, ID_RM 15150002, ladera sur valle río Camarones (374794E; 7921505S). Fotografía derecha: acceso a Cuya (ruta 5), ID_RM 15150004 (377108E; 7884180S); y 15150205 (377776E; 7884692S)..... 69

Fig. 32 Ejemplo de caídas de rocas desde laderas del valle del río Lluta y del río San José. Archivo de terreno (las flechas rojas indican ejemplos de trayectorias de bloques). Fotografía izquierda, ID_RM 15120204, ladera sur valle río Lluta, ruta 11 sector Estación Rosario (379229E; 7963843S). Fotografía derecha: laderas del valle del río San José, ID_RM 15130446 (406496E; 7944688S). 70

Fig. 33 Ejemplo de caídas de rocas desde laderas de valle del río San José. Archivo de terreno (las flechas moradas indican ejemplo de trayectoria de deslizamientos; las flechas café indican flujos y flechas rojas indican caídas). Fotografía izquierda: ID_RM 15130440 (398381E; 7945750S) e ID_RM 15130419 (399026.28E; 7947780.87S), ladera norte valle del río San José (ruta A-27). Fotografía derecha: ladera sur valle de río San José, ID_RM 15130562 (397924E; 7945592S).....	70
Fig. 34 Ejemplo de caída de rocas en ruta A-35 (esquematzada con líneas rojas). Archivo de terreno. ID_RM 15140102 (418338E, 7918113S).....	71
Fig. 35 Ejemplo de caída de rocas en ruta A-331 (esquematzada con líneas rojas). Archivo de terreno. ID_RM 15150148 (426826E, 7913492S).....	71
Fig. 36 Ejemplo de caída de rocas en ruta 11-CH (esquematzada con líneas rojas). Archivo de terreno. ID_RM 15121149 (447412E, 7990723S).....	72
Fig. 37 Clasificación del subtipo para las remociones en masa tipo Caída.....	73
Fig. 38 Catastro de deslizamientos.....	74
Fig. 39 Deslizamientos y caídas desde laderas de ruta 5, en cuenca de la quebrada Camarones. Archivo de terreno. Ruta 5 (Panamericana norte) en el acceso a Cuya (cuenca río Camarones), con evidencias de caídas destacados con flechas rojas y deslizamientos con flechas moradas. ID_RM 15150006 (378422E; 7884858S).....	75
Fig. 40 Deslizamientos que afectan infraestructura y obras antrópicas. Archivo de terreno. Fotografía izquierda: ruta 11, acceso a sector de El Tambo con evidencias de deslizamientos (flechas moradas) de materiales antrópicos sobre canal de regadío (ID_RM 15120207, 392149E; 7965106S). Fotografía derecha: ruta 5 (Panamericana norte) en el acceso a Cuya con evidencia de deslizamientos que afectan berma y calzada (indicado y flecha morada). ID_RM 15150004 (377108E; 7884180S).....	76
Fig. 41 Ejemplo de deslizamiento en la ruta A-345 (flechas moradas esquematizan dirección de movimiento del material deslizado; línea segmentada amarilla señala el escarpe). ID_RM: 15150239 (400243E, 7896315S).....	77
Fig. 42 Deslizamientos desde laderas del valle del río San José en zonas pobladas entorno a San Miguel de Azapa (las flechas moradas esquematizan dirección del material deslizado, línea segmentada amarilla indica escarpes). Archivo de terreno. Fotografía izquierda ruta A-27, sector de gruta ID_RM 15130382 (379413E; 7950582S). Fotografía derecha ID_RM 15130559 (382522E; 7949695S). Fotografía baja capturada desde mismo sector de gruta en la vertiente sur del valle.	78
Fig. 43 Deslizamientos desde laderas de microcuenca en el sector de Poconchile. Archivo de terreno (las flechas moradas esquematizan la dirección de los deslizamientos; las rojas, indican caídas; las líneas segmentadas amarillas señalan escarpes). Sector Poconchile, acceso por ruta A-143 (ID_RM 15120215, 387558E; 7956871S).....	79
Fig. 44 Clasificación del subtipo para las remociones en masa tipo Deslizamiento.....	79
Fig. 45 Clasificación del material para las remociones en masa tipo Deslizamiento.....	80
Fig. 46 Catastro de flujos.	81
Fig. 47 Flujos desde ladera norte de quebrada Vítor hacia zonas con intervención antrópica. Sector quebrada y caleta Vítor. Archivo de terreno. Fotografía izquierda: flujo destacado con flecha café (ID_RM 15140041, coordenadas 360168E; 7926807S) y deslizamientos (ID_RM 15140042 y 15140043) destacados con flechas moradas; escarpes esquematizados con líneas segmentadas amarillas. Fotografía derecha: detalle de flujo ID_RM 1514041, mostrando la dirección del flujo principal mediante flechas café.	82
Fig. 48 Flujos, caídas y deslizamientos desde ladera norte de quebrada Camarones. Archivo de terreno. Sector quebrada y caleta Camarones. Fotografía muestra varias remociones en masa. Como referencia flujo (ID_RM 15150025), coordenadas 367657E; 7879365S. Las líneas punteadas blancas destacan los límites de las remociones en masa, y con flechas rojas/moradas/café la dirección del movimiento de material.....	82
Fig. 49 Flujo desde ladera norte de quebrada Camarones. Archivo de terreno. Sector quebrada y caleta Camarones. Fotografía muestra flujo (ID_RM 15150025, coordenadas 367657E; 7879365S). Con líneas amarillas se destaca el área afectada y/o escarpes, y con flechas café la dirección del flujo.	83

Fig. 50 Archivo de terreno (con flechas cafés se destaca la dirección de los flujos). Fotografía izquierda: flujo en zona urbana en la desembocadura de la quebrada Caunire, cuenca de la quebrada de la Concordia (359821E; 7965597S). Fotografía derecha: flujo en ruta 11 (puente sector Los Molinos) ID_RM 15120216 (396831E; 7964747S) con intervención antrópica. 84

Fig. 51 Evidencias de flujos en la ruta 11 – sector planta de bórax, cuenca del río Lluta. Archivo de terreno. Se destaca con flechas cafés la dirección de los flujos. Fotografías muestran zona de flujos en zona intervenida. Coordenadas referenciales ID_RM 15120119 (408291E; 7959254S)..... 84

Fig. 52 Evidencias de flujo en la ruta 11 – cuesta sector El Tambo, cuenca del río Lluta. Archivo de terreno (se destaca con flechas cafés la dirección del flujo). Fotografía izquierda: muestra obras de canalización y disipación de energía de flujo que atraviesa ruta. Fotografía derecha, muestra continuidad del flujo hacia quebrada Lluta. Coordenadas referenciales ID_RM 15120209 (399263E; 7963727S). 85

Fig. 53 Evidencias de flujo en quebrada San José (valle de Azapa). Archivo de terreno (las flechas cafés indican la dirección de los flujos). Fotografía izquierda: flujo de detritos hacia ruta A-27 ID_RM 15131356 (401803E; 7945006S), ladera norte de valle del río San José. Fotografía derecha, muestra flujo hacia zonas pobladas, ladera sur del río San José. 85

Fig. 54 Evidencias de flujo de detritos en ruta A-31 camino a Belén. Archivo de terreno (las flechas cafés indican la dirección del flujo). Fotografía izquierda y derecha, ID_RM 15130212 (448304E; 7959021S). 86

Fig. 55 Evidencias de flujos llegando a la zona de depositación en el Altiplano. Archivo de terreno (flechas cafés esquematizan dirección de flujos). ID_RM 15100637 (coordenadas 486034E; 7948231S). 87

Fig. 56 Clasificación del subtipo para las remociones en masa tipo Flujo..... 88

Fig. 57 Clasificación del material para las remociones en masa tipo Flujo..... 89

Fig. 58 Clasificación de tipos de deformación de ladera. 90

Fig. 59 Deformación de ladera. En amarillo se destaca la zona de deformación de ladera. Archivo de terreno. ID_RM 15121159 (coordenadas 433407E; 8010268S). 91

Fig. 60 Metodología para la generación de mapas de susceptibilidad y alcance de remociones en masa..... 93

Fig. 61 Esquema de la relación de la altura de caída (ΔH), la distancia de viaje a (L), ángulo de Fahrböschung (α) (Heim, 1932) y la definición de escarpe y las zonas de generación, transporte y depositación. El área de impacto es la unión entre las zonas de generación, transporte y depositación. 97

Fig. 62 Curva de éxito del análisis de susceptibilidad para flujos..... 101

Fig. 63 Curva de éxito del análisis de susceptibilidad para caídas y deslizamientos. 102

Fig. 64 Mapa de susceptibilidad de generación de flujos..... 104

Fig. 65 Susceptibilidad de generación de caídas y deslizamientos..... 106

Fig. 66 Distribución de parámetros de calibración para *random walk* (rw) y PCM (pcm) predichos por runoptGPP. 107

Fig. 67 Área de alcance de flujos. 109

Fig. 68 Relación empírica entre $\Delta H/L$ y volumen de la muestra del catastro de caídas y deslizamientos. ... 110

Fig. 69 Área de alcance de caídas y deslizamientos. 111

Fig. 70 Fotografías del Morro de Arica y su contexto en la dinámica de la ciudad. 112

Fig. 71 Fotografía izquierda muestra uso de la zanja del Morro de Arica para pernoctar. Derecha muestra el estado de la actual señalética de la parte superior del Morro que advierte la presencia de terrenos agrietados. 113

Fig. 72 Detalle de actividades de la Etapa 1. Preparación de insumos..... 114

Fig. 73 Detalle de actividades para la etapa de Análisis del Morro de Arica escala 1:1.000. 115

Fig. 74 Detalle de actividades realizadas para la tercera etapa de conclusiones y recomendaciones..... 116

Fig. 75 Detalle catastro de remociones en masa Morro de Arica. 117

Fig. 76 Modelo geológico – geotécnico del área de estudio del mapa 5 - escala 1:1.000. 120

Fig. 77 Ventanas de caracterización del macizo rocoso en el Morro de Arica. 121

Fig. 78 Modelo de estructuras geológicas del Morro de Arica..... 123

Fig. 79 Modelo de estructuras geológicas del Morro de Arica..... 124

Fig. 80 Vista general de las secciones o perfiles de análisis del Morro de Arica.	126
Fig. 81 Ejemplo de características geométricas y ángulos de talud de secciones de análisis	128
Fig. 82 Detalle modelo geológico – geotécnico sección 4 (zona de <i>pillow</i> lavas y grietas).	128
Fig. 83 Detalle modelo geológico – geotécnico sección 6 (paseo peatonal superior y costanera en zona agrietada)	129
Fig. 84 Mecanismos de falla en taludes con y sin control de estructuras geológicas.	130
Fig. 85 Caídas y deslizamientos en el Morro de Arica el 1 de abril de 2014.....	130
Fig. 86 Comparación fallamiento plano con iguales condiciones según proyección estereográfica.....	131
Fig. 87 Ejemplos de visualización para análisis geométrico estructural.....	132
Fig. 88 Ejemplo de análisis estereográfico Sección 2 zona de antigua cantera.....	138
Fig. 89 Ejemplo de análisis de deslizamiento traslacional bloque sección 7 (sector este del Museo).	138
Fig. 90 Ejemplo de análisis de caídas de rocas y materiales.....	139
Fig. 91 Representación de las zonas de generación y alcance para caídas de rocas.....	140
Fig. 92 Resultados y definición de zonas críticas, de restricción y seguridad del área del mapa 5 escala 1:1.000.	142
Fig. 93 Matriz de riesgo para el análisis de casos de peligros del área del Mapa 5	145
Fig. 94 Recomendaciones Morro de Arica.....	146
Fig. 95 Resumen estudios Morro de Arica 1960 – 2024.....	148
Fig. 96 Resumen estudios Morro de Arica 1960 – 2024.....	149
Fig. 97 Recomendaciones Morro de Arica.....	149
Fig. 98 Fotografía que muestra el acceso a las cuevas de Anzota, con evidencias de caídas y deslizamientos que han afectado la ruta (se ejemplifica con flechas rojas la dirección del material movilizado).	151
Fig. 99 Remociones en masa que afectan zonas pobladas en el Valle de Azapa. Archivo de terreno (las flechas rojas destacan las trayectorias del material movilizado; línea segmentada amarilla señala escarpes). Fotografías tomadas en zona urbanizada en ruta A-227 ID_RM 1500047 (coordenadas 390024.36E; 7945978.65S).....	152
Fig. 100 Remociones en masas en ruta 11, cuesta dirección el Tambo-Zapahuira. Archivo de terreno (las flechas rojas indican la dirección del deslizamiento). Vista inferior de relleno de quebrada con evidencias de arrastre (flecha café) (398523.51 E; 7963305.66 S).	152
Fig. 101 Quebrada actividad en febrero 2024 en cruce a entrada a Zapahuira.	153
Fig. 102 Ubicación de zonas críticas en la región de Arica y Parinacota	155
Fig. 103 Desencadenantes identificados a partir del catastro de remociones en masa.	159
Fig. 104 Registros de prensa de remociones en masa gatilladas por lluvias el año 2019 (fuente: medio de prensa digital cooperativa.cl).	162
Fig. 105 Información de prensa del 6 de abril de 2019. (Fuente https://www.aricaldia.cl/cuatro-personas-3-adultos-y-un-nino-resultaron-afectados-tras-deslizamiento-de-piedras-en-sector-de-anzota/)	164
Fig. 106 Fotografías de remociones en masa desencadenadas por otras causas, pero relacionadas a intervención antrópica	165
Fig. 107 Modelo conceptual de transferencia de conocimiento.....	168
Fig. 108 Díptico dirigido a la ciudadanía de Arica.....	170
Fig. 109 Díptico dirigido a comunidades rurales.	170
Fig. 110 Díptico dirigido a instituciones públicas.	170
Fig. 111 Mapa geomorfológico.....	B-19
Fig. 112 Cartas geológicas utilizadas.	B-21
Fig. 113 Valores de la razón B6/B7 obtenidos a partir de imágenes satelitales Landsat 08-09.	B-25
Fig. 114 Zonas/áreas de alteración obtenidas a partir de la razón B6/B7, en laderas de cerros.	B-27
Fig. 115 Mapa de alteración. Se indica en color rojo y negro la fuente de información.....	B-29



Fig. 116 Evidencia de alteración y desarrollo de flujos (flechas cafés) que descienden de laderas y destacan en el paisaje. Sector Suriplaza, comuna de General Lagos (coordenadas 448225E;8025926S). Archivo de terreno. B-30

Fig. 117 Mapa de peligro de lahares. B-32

Fig. 118 Modelo digital de elevación..... B-34

Fig. 119 Modelo de aspecto. B-36

Fig. 120 Mapa de pendientes (*slope*). B-38

Fig. 121 Caída de rocas que afecta tramo de la ruta A-23 (coordenadas 404825E;7945112S). Bloques provienen de laderas de alta pendiente (flechas rojas esquematizan caídas de roca). Archivo de terreno..... B-39

Fig. 122 Altas pendientes del Acantilado Costero que genera caída de rocas (flechas rojas). Sector sur Cuevas de Anzota (coordenadas 359357E;7947958S). Archivo de terreno.Mapa de relieve de sombreado (Hillshade) B-40

Fig. 123 Mapa de relieve de sombreado (hillshade). B-41

Fig. 124 Factor LS B-44

Fig. 125 Modelo de cuencas B-46

Fig. 126 Razón de Melton. B-49



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de remociones en masa.....	22
Tabla 2 Síntesis del contenido del catastro presentado en este informe.	64
Tabla 3 Análisis de colinealidad para caídas y deslizamientos.	98
Tabla 4 Análisis de colinealidad para flujos.....	99
Tabla 5 Cantidad de puntos seleccionados para entrenamiento y validación.	99
Tabla 6 Factores condicionantes a utilizar en cada proceso para el análisis de susceptibilidad.....	100
Tabla 7 Categorización de susceptibilidad de flujos.....	103
Tabla 8 Categorización de susceptibilidad de caídas y deslizamientos.....	105
Tabla 9 Valores seleccionados para los parámetros de modelación calibrados para los flujos presentes en el área.....	108
Tabla 10 Valores de calidad de macizo rocoso para unidades geológicas – geotécnicas del Morro de Arica.	122
Tabla 11 Nombre y características de perfiles analizados.....	127
Tabla 12 Propiedades análisis de estabilidad Morro de Arica.....	134
Tabla 13 Valores de propiedades geotécnicas para el análisis de caídas de rocas.	137
Tabla 14 Casos analizados para definir recomendaciones del área de estudio del mapa 5 escala 1:1.000... 144	144
Tabla 15 Resumen de las zonas críticas mostradas en la Fig. 102.....	154
Tabla 16 Tipos de detonantes identificados a partir del catastro de remociones en masa.	158
Tabla 17 Sismos, magnitudes y principales eventos.....	160
Tabla 18 Desencadenantes identificados a partir del catastro FNDR.....	165
Tabla 19 Correlación numérica con el tipo de remoción que corresponde.	A-1
Tabla 20 Caracterización de unidades geomorfológicas.	B-16
Tabla 21 Detalle de las bandas de imágenes satelitales, sus longitudes de onda y resoluciones.....	B-24

1 RESUMEN

La región de Arica y Parinacota presenta sectores que habitualmente son afectados por remociones en masa. Como, por ejemplo, las áreas cercanas al Morro de Arica, poblados ubicados a lo largo de los cauces principales como los ríos San José y Lluta y las quebradas Codpa y Camarones, en estos sectores la población enfrenta con regularidad los impactos de estos fenómenos naturales. Entre los tipos más comunes de remociones en masa que afectan a estas zonas se encuentran las caídas, flujos y deslizamientos.

Es en este contexto que el Gobierno Regional de Arica y Parinacota mandató la ejecución del estudio **“Análisis peligros de remoción en masa, código BIP 40017755-0”** a escala 1:250.000 de la región de Arica y Parinacota, que busca zonificar las áreas y sectores críticos expuestos a remociones en masa.

Este estudio permitirá a la región contar con información a escala regional sobre el reconocimiento de remociones en masa e identificar las zonas susceptibles donde se generan estos procesos, con el fin de utilizarla en diversos ámbitos de la gestión del riesgo.

De esta forma, se pone a disposición de la región una herramienta que permite identificar los sectores con condiciones para ser afectadas por remociones en masa. Esto permite priorizar aquellos lugares donde se requiere contar con información de mayor detalle. De este modo, es que se busca que el Gobierno Regional pueda establecer directrices para que el desarrollo regional ocurra en condiciones más seguras, reduciendo la exposición a las remociones en masa.

El documento que se presenta a continuación corresponde al informe N°4 “Informe final y transferencia de conocimiento”, es decir, al Hito N°4 del estudio de los productos finales.

1.1 Descripción del informe

Este informe final describe las actividades desarrolladas durante el estudio. En primer lugar, se mencionan las bases conceptuales del estudio, se describe la geología, geomorfología, clima, vegetación y estructuras del área de estudio y se incluye el catastro final de remociones en masa FNDR de la región de Arica y Parinacota tanto por fotointerpretación, así como de observaciones y validaciones en terreno.

Posteriormente, se describe la metodología, modelo conceptual y los resultados del análisis de susceptibilidad de remociones en masa, cuyo producto son dos modelos de generación de remoción en masa (uno para caída y deslizamiento y otro para flujos) y dos modelos de alcance.

En cuanto al estudio del Morro de Arica y alrededores, el informe presenta los productos y resultados de la evaluación de la susceptibilidad ante remociones en masa en el área escala 1:10.000 y los resultados del análisis del Morro de Arica escala 1:1.000 que permitió concluir

la condición de sus laderas en términos de estabilidad y generar recomendaciones orientadas a la seguridad y reducción del riesgo.

Luego de haber analizado el catastro y los mapas de susceptibilidad tanto de la región como del morro, se identifican las zonas críticas por comuna haciendo una descripción y recomendaciones de estudios a realizar en cada una de ellas y se hace un análisis de los factores desencadenantes de las remociones en masa de la región.

Finalmente se hace una descripción del trabajo de transferencia de conocimiento y los productos generados de este estudio.

1.2 Metodología general del estudio

La metodología general del estudio se basa en determinar la susceptibilidad por remociones en masa de la región de Arica y Parinacota mediante la ponderación de factores condicionantes, para lo cual se elaboraron distintos productos específicos elaborados con metodologías específicas en cada caso que son explicados en el capítulo correspondiente.

Este estudio cuenta con tres productos principales: un catastro de remociones en masa regional, mapas de susceptibilidad de remociones en masa de la región para distintos procesos (1:250.000) y un estudio más detallado las remociones en masa en el Morro de Arica y sus alrededores. Si bien estos tres productos son independientes entre sí, existe relación entre ellos. En todos los casos, se hacen presente las etapas de recopilación de antecedentes, recopilación de datos con trabajo en terreno y una etapa de análisis y validación de resultados.

La primera actividad que se realizó en el contexto de este estudio consistió en una revisión y sistematización de diferentes antecedentes para definir las bases conceptuales que sostienen cada uno de los tres productos que se desarrollaron.

Para el catastro, se realizó primero un trabajo de gabinete mediante la identificación de remociones con fotointerpretación, y una segunda etapa de levantamiento y validación de catastro de terreno. Posteriormente, se desarrolló una etapa de trabajo de gabinete destinada a sistematizar los resultados que se obtuvieron durante las jornadas de trabajo de campo. Para este primer producto se realizaron 3 visitas (Fig. 22), durante las cuales se recorrieron una parte importante de las rutas existentes de la región, abarcando con ello áreas de diferentes características geológicas, geomorfológicas, climáticas, de vegetación, entre otras. Como complemento, se realizaron vuelos con dron que apoyaron a tener una visión más completa e integral de la superficie.

Para el desarrollo de los mapas de susceptibilidad, la metodología general se basa en un análisis estadístico del catastro junto con los distintos factores condicionantes, otorgando a cada una de las categorías de dichas variables un ponderador específico, tanto para caídas y deslizamientos como para flujos. Una vez obtenido estos valores, se eligieron los factores



condicionantes a utilizar para la generación de cada modelo de susceptibilidad para luego hacer una sumatoria de cada una de las capas. El producto final es un mapa de susceptibilidad de generación de remociones en masa, el cual fue calibrado y validado con una cuarta visita a terreno.

Una vez obtenidos los mapas de susceptibilidad de generación de remociones en masa, se generó un mapa de alcance utilizando la herramienta *Gravitational Process Path model* (GPP) (Wichmann, 2017) del software SAGA GIS.

En el caso del estudio del área Morro de Arica y alrededores, se aplicó una metodología orientada a evaluar susceptibilidad por remociones en masa en áreas urbanas, y que incluye etapas de recopilación antecedentes, trabajo de terreno y un levantamiento aerofotogramétrico detallado del área. La metodología que pondera factores condicionantes para distintos tipos de remociones en masa presentes en el área, permitiendo identificar zonas altamente susceptibles o críticas. Además, para el caso específico del Morro de Arica, se generó un modelo detallado de estructuras geológicas que permite identificar zonas críticas o potencialmente inestables.

La metodología específica utilizada en cada caso se desarrolla en los capítulos correspondientes.

2 INTRODUCCIÓN

2.1 Objetivo general del estudio

El estudio **“Análisis peligros de remoción en masa, código BIP 40017755-0” a escala 1:250.000 de la región de Arica y Parinacota** tiene por objetivo general dotar a la región de Arica y Parinacota de información y conocimiento científico-técnico oportuno y confiable, para su utilización efectiva en los diferentes ámbitos de la gestión del riesgo:

- a) Prevención: planificación del uso del territorio, planes de protección civil, monitoreo y alertas tempranas, educación.
- b) Mitigación: obras civiles, normas de diseños constructivos.
- c) Atención de emergencias: respuesta inmediata al evento, distribución de recursos, rehabilitación y reconstrucción.

2.1.1 Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. Elaborar un catastro de remociones en masa que consista en identificar y cartografiar remociones en masa de toda la región de Arica y Parinacota, desencadenadas por procesos hidrometeorológicos, sísmicos, antrópicos u otros, para su utilización efectiva en los procesos de planificación territorial, monitoreo y alerta temprana y otras medidas preventivas y mitigadoras del riesgo. Entregar un mapa escala 1:250.000 en catastro de remociones en masa y su informe asociado.
2. Identificar mediante mapas regionales a escala 1:250.000, que muestre las zonas susceptibles de ser afectadas por remociones en masa, y una zonificación de los grados de susceptibilidad. En las zonas de alta susceptibilidad se propondrán recomendaciones para el uso del territorio.
3. Identificar sectores críticos y proponer un diseño y recomendaciones para la ejecución de mapas de peligro a las remociones en masa a mayor detalle a fin de ser utilizados a escala comunal o de anteproyecto de obras civiles.
4. Transferir el conocimiento generado en el proyecto a las autoridades, servicios públicos y las comunidades, que permitan a la ciudadanía asumir un rol activo en las iniciativas de reducción del riesgo y el aumento de la resiliencia frente a los desastres, manteniendo el principio de que una comunidad preparada e informada es una comunidad más segura.
5. Elaborar un mapa de susceptibilidad escala 1:10.000, en el sector del Morro de Arica.

2.1.2 Objetivos del estudio

Los objetivos específicos del presente trabajo en el contexto del estudio de remociones en masa a escala regional son:

- Seleccionar los factores condicionantes con mayor favorabilidad a la generación de remociones en masa a partir del análisis de los mapas temáticos y aplicación de la metodología de análisis jerárquico.
- Evaluar la susceptibilidad de generación y alcance de remociones en masa en la región de Arica y Parinacota para procesos de caídas, deslizamientos y flujos.
- Validar los resultados haciendo una comparación estadística con el catastro y con los mapas temáticos, obteniendo curvas de éxito en cada caso.
- Identificar y proponer zonas críticas definidas a partir de las distintas etapas y productos del estudio.
- Definir las bases conceptuales y productos específicos para realizar la transferencia de los resultados y conocimiento aportado por el estudio a distintas instancias de la comunidad.

Para el estudio en el Morro de Arica 1:1.000, el objetivo general del Hito 4 es identificar las áreas críticas que puedan ser afectadas por remociones en masa, incluyendo objetivos específicos para el Hito 4 definidos como:

- Generar insumos que permitan realizar el análisis de estabilidad de las laderas del Morro de Arica 1:1.000.
- Evaluar el peligro por remociones en masa en el Morro de Arica mediante el análisis de estabilidad de laderas en secciones representativas escala 1:1.000.
- Identificar las áreas críticas en el Morro de Arica 1:1.000 en términos del peligro por remociones en masa y emitir recomendaciones asociadas con estabilidad y seguridad.

2.2 Ubicación del área de estudio

El área de estudio corresponde a la totalidad de la región de Arica y Parinacota, que se ubica entre los 17°30' y los 19°13' de latitud Sur y entre los 68°55' y los 70°22' de longitud Oeste.

Esta región se ubica en el extremo norte del país limitando al norte con Perú, al sur con la región de Tarapacá, al oeste con el Océano Pacífico y al este con Bolivia.

Administrativamente, la región está compuesta por dos provincias: Arica y Parinacota y cuatro comunas: Arica, Camarones, General Lagos y Putre (Fig. 1).

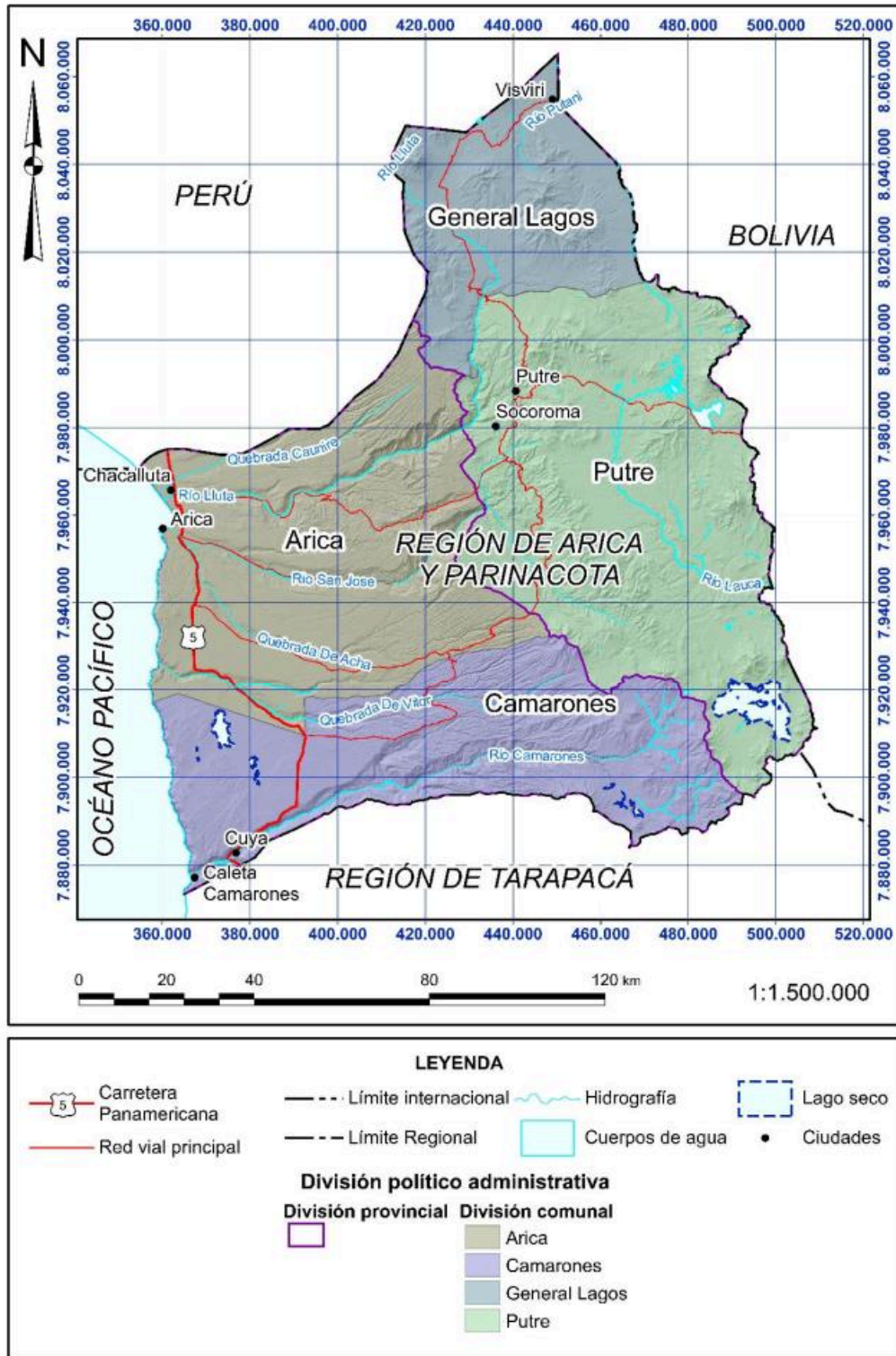


Fig. 1 División político-administrativa de la región de Arica y Parinacota (modificado de IDE).

2.3 Alcances y limitaciones

En este estudio se construyó un catastro de remociones en masa a partir de información bibliográfica, imágenes satelitales (fotointerpretación) y trabajo en terreno. Las remociones en masa se levantaron a una escala 1:5.000, lo que representa un nivel de detalle lo suficientemente profundo como para ser considerado un insumo para la elaboración de estudios de distinta índole (ordenamiento territorial, vialidad, infraestructura pública y privada, investigación, entre otros).

La elaboración de este catastro no tiene por objetivo identificar todas y cada una de las remociones en masa existentes en la región. Aunque se buscó recopilar la mayor cantidad posible de información, es importante tener en cuenta que el catastro no incluye todas las remociones presentes en la región. En este contexto, se puso especial atención en zonas pobladas o de interés particular (como carreteras o zonas donde se desarrollan actividades económicas) para el levantamiento de remociones en masa.

En el caso de eventos levantados mediante fotointerpretación, en ocasiones la calidad de la imagen es una limitante para la caracterización de cada evento, especialmente para identificar el tipo de material y subtipo de remoción en masa. En el caso del catastro de terreno, las limitantes se asocian principalmente a accesos restringidos a cada área y condiciones climáticas adversas.

En relación con la edad de ocurrencia de las remociones, una limitación es que no siempre es posible determinar específicamente la temporalidad de estas. Si bien, *Google Earth* cuenta con imágenes satelitales de distintos años que permiten, en ciertos casos, determinar una edad relativa, estas son escasas y están limitadas a unos 30 años atrás, siendo las más antiguas de una resolución que no permite identificar las remociones a la escala solicitada. Sumado a lo anterior, es complejo determinar el factor gatillante de las remociones, sobre todo para caídas de rocas que son procesos activos dentro de la región.

En el caso del estudio del área del Morro de Arica, cuyos resultados varían entre las escalas 1:1.000 y 1:10.000, pueden ser usados a la misma escala que fueron levantados y se sugiere seguir las recomendaciones plasmadas en el presente estudio.

Otro producto de este estudio son los mapas temáticos, que se relacionan con factores potencialmente condicionantes de las remociones en masa en la región de Arica y Parinacota. Los mapas temáticos resultantes del estudio (1:250.000) entregan información robusta y confiable a escala regional, por lo que, para estudios y análisis de mayor detalle, se deberá contar con estudios específicos.

Las limitaciones de los mapas temáticos y mapas susceptibilidad se asocian a la escala de los insumos base usados en su construcción. En los mapas temáticos se utilizó información de carácter regional, en consecuencia, los mapas de susceptibilidad también son de carácter regional. En caso de requerir estudios de mayor escala, se deberá considerar la utilización



de información más detallada, que, eventualmente, se deba levantar específicamente para los estudios a realizar.

Los alcances de la transferencia de conocimiento se orientan a diseñar los productos que definen las bases técnicas de licitación y que serán presentados en las instancias definidas en el estudio. Las limitaciones estarán dadas por la forma en que estos productos serán finalmente distribuidos en la región.

2.4 Antecedentes

La ocurrencia de procesos de remociones en masa es frecuente en Chile. En tiempos históricos han ocurrido eventos de remociones en masa en distintas zonas del país, con diferentes magnitudes y con variadas consecuencias, asociadas tanto a intensas precipitaciones como a sismos. El registro y caracterización de estos eventos resulta fundamental para entender la evolución del paisaje y evaluar la amenaza que representan. En particular en la región de Arica y Parinacota, las remociones ocurren principalmente en las zonas cordilleranas y en las grandes quebradas. Complementando lo anterior, en la capital regional, en el Morro de Arica han ocurrido numerosos eventos de remociones en masa que afectan y podrían afectar directamente a la población.

Para un mejor entendimiento del estudio, en el ANEXO D “Datos digitales, cartografías temáticas y catastro.

En forma adjunta a este documento se entregan como anexos digitales 3 bases de datos y 2 carpetas que contienen proyectos ArcMap:

Carpetas contenidas:

- **Figuras informes** Corresponden a todos los archivos MXD correspondientes a las figuras incluidas en el informe.
- **Vi-Cart.** Corresponden a todos los proyectos MXD de los Mapas 1 a 5 del FNDR Arica y Parinacota.

Bases de datos:

- **Catastro_RM_Arica.gdb**
- **Complementos_FNDR_Arica.gdb**
- **FNDR_PG_Arica.gdb**

A continuación, se detalla lo incluido en cada una de las bases de datos:

- **Catastro_RM_Arica.gdb**

Tipo de archivo	Nombre	Capas contenidas
		Descripción

Feature Dataset	Catastro_RM_PG	PG_RM_CATALOGO. Catastro puntual de remociones en masa región Arica y Parinacota. PG_RM_CATALOGO_P. Catastro poligonal de remociones en masa región Arica y Parinacota.
------------------------	----------------	--

- **Complementos_FNDR_Arica.gdb**

La gdb contiene los elementos que componen las figuras complementarias para la construcción de los MXD contenidos en la carpeta Vi-Cart, correspondientes a los siguientes DataFrame: Chile Mapa de Ubicación, Antártica Mapa de Ubicación, Mapa de ubicación, Trabajos anteriores, Fuente y Valor de la Información, Viñeta.

- **FNDR_PG_Arica.gdb**

Tipo de archivo	Nombre	Capas contenidas Descripción
Feature Dataset	Base_Topografia_TO	Corresponde a la base topográfica IGM entregada por la contraparte para el área de la Región de Arica y Parinacota.
Feature Dataset	ElementosCartograficos	Anotaciones, Alteración, Crioclastia, CuencasBNA, Escarpes_Morro_y_alrededores, Estructuras_geologicas_Morro_y_alrededores, InventarioGlaciaresDGA, MD_MAPA_P, MD_MAPA_P1, MD_MAPA_P_2, Modelo_geologico_geotecnico_Morro_y_alrededores, Océano, Países_vecinos, PeligroAltoVolcanico, Recomendaciones_Morro_1_1000, Susceptibilidad_FL, Toponimia_Morro_y_alrededores,

		TracksTerreno_XTERRAE, Unidades_susceptibilidad_IS_Morro_y_alrededores, UsoSuelo, Volcanes, Zona_seguridad_costanera, Zonas_criticas, Zonas_criticas_Morro_1_1000.
Feature Dataset	Peligro_Remocion_Masa	PG_AREA_PROYECTO, PG_CLIMA_L, PG_CLIMA_P, PG_CUENCA_L, PG_CUENCA_P, PG_DRENAJE_L, PG_FALLA_L, PG_GEOMORFOLOGIA_L, PG_GEOMORFOLOGIA_P, PG_HIDRO_L, PG_SINTESIS GEO_L, PG_SINTESIS_GEO_P
Raster	Alteraciones. Capa ráster correspondiente a mapa temático de alteraciones.	
Raster	Arica_ortofotomosaico. Capa ráster correspondiente a ortofotomosaico generado a partir de levantamiento con dron para el área del Morro y alrededores.	
Raster	Aspecto. Capa ráster correspondiente a mapa temático de aspecto.	
Raster	B6b7_values. Análisis de bandas para cálculo de alteraciones de rocas. B6b7_x_rocas. Análisis de bandas para cálculo de alteraciones de rocas, por rocas.	
Raster	Curvatura. Capa ráster correspondiente a mapa temático de curvatura.	
Raster	Curvatura_perfil. Capa ráster correspondiente a mapa temático de curvatura de perfil.	
Raster	Curvatura_plana. Capa ráster correspondiente a mapa temático de curvatura plana.	
Raster	FABDEM. Capa ráster correspondiente a DEM FABDEM Copernicus para la región de Arica y Parinacota.	

Raster	FC_CD_Fallas. Factor condicionante “Estructuras” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.
Raster	FC_CD_Geomorfología. Factor condicionante “Geomorfología” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.
Raster	FC_CD_Litología. Factor condicionante “Litología” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.
Raster	FC_CD_Pendiente. Factor condicionante “Pendiente” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.
Raster	FC_FL_Alteracion. Factor condicionante “Alteración” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	FC_FL_FactorLS. Factor condicionante “FactorLS” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	FC_FL_Geomorfologia. Factor condicionante “Geomorfología” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	FC_FL_Litología. Factor condicionante “Litología” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	FC_FL_Pendiente. Factor condicionante “Pendiente” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	Hillshade. Capa ráster correspondiente a mapa temático de sombreado de relieve / hillshade.
Raster	LSFactor_Moore. Capa ráster correspondiente a mapa temático de Factor LS.
Raster	Melton_pixel. Capa ráster correspondiente a mapa temático de Razón de Melton calculado a escala de píxel.
Raster	Pendiente. Capa ráster correspondiente a mapa temático de pendientes.
Raster	Susceptibilidad_CD. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.
Raster	Susceptibilidad_CD_reclass. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos, reclasificado en “Baja”, “Moderada”, “Alta” y “Muy Alta”.

Raster	Susceptibilidad_FL. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	Susceptibilidad_FL_reclass. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por flujos, reclasificado en “Baja”, “Moderada”, “Alta” y “Muy Alta”.

- Las coberturas se encuentran cargadas en archivos ArcGis 10.5 que llevan el nombre del mapa temático respectivo para facilitar su lectura y resguardar las simbologías (Estructura_GBD_Proyecto\Figuras informe).

Glosario” se presenta un glosario de términos relacionados con las temáticas abordadas. Este glosario contiene definiciones propias de este estudio, definiciones provenientes de diferentes fuentes bibliográficas, y definiciones que son una combinación de ambas. Las definiciones contenidas en el glosario abordan conceptos presentes directamente en el estudio, así como otros relacionados a la temática que no necesariamente aparecen explícitamente en el texto. Lo anterior se orienta a la comprensión del contenido del estudio por parte de organismos técnicos y no técnicos, apuntando a que este conocimiento se traspase a la población a modo de reducir el riesgo.

2.5 Marco conceptual

2.5.1 Remociones en masa

Las **remociones en masa** son procesos naturales asociados a la dinámica externa del sistema terrestre y a la evolución del paisaje. Estos procesos incluyen todos los movimientos ladera abajo de una masa de roca y/o suelo/sedimento por acción de la gravedad, los que pueden, además, incorporar la cobertura vegetal y elementos antrópicos a su paso. Estos procesos pueden ser de movilización lenta o rápida, de dimensiones variables y son el resultado de la interacción entre una serie de factores condicionantes y otros que actúan como detonantes (PMA, 2007; Arenas & Opazo, 2017; Brantt, et al., 2021). Entre los primeros se puede destacar, por ejemplo, la geología y las pendientes, y entre los segundos las lluvias o sismicidad. Dado que las remociones en masa son frecuentes en la naturaleza, en ocasiones pueden generar daño a la población, infraestructuras y obras de ingeniería.

Existen varios tipos de remociones en masa, que se clasifican según el tipo de movimiento, la naturaleza y tipo de los materiales involucrados, siendo importante también el volumen de material involucrado. Estas y otras características de las remociones en masa influyen en la factibilidad de implementar medidas de mitigación.

Para la elaboración del catastro se usaron las definiciones propuestas por Hungr *et al.* (2013) y Muñoz *et al.* (2021) las cuales son utilizadas en el Catastro Nacional de Remociones en Masa del Servicio Nacional de Geología y Minería. En la Tabla 1 se presentan dichas categorías.

Tabla 1 Tipos de remociones en masa.

Tipo de remoción en masa	Roca	Suelo	Material o clasificación indeterminada
Caídas	Caídas de roca	Caídas de bloque, detrito y/o limo	Caída indeterminada
Volcamiento	Volcamiento de bloque de roca Volcamiento flexural de roca	Volcamiento de bloque de grava, arena y/o limo	
Deslizamiento	Deslizamiento rotacional de roca Deslizamiento plano o traslacional de roca Deslizamiento en cuña de roca Deslizamiento compuesto de roca Deslizamiento irregular de roca	Deslizamiento rotacional de arcilla y/o limo Deslizamiento plano o traslacional de arcilla y/o limo Deslizamiento de grava, arena y/o detritos Deslizamiento compuesto de arcilla y/o limo	Deslizamiento indeterminado
Flujo	Avalancha de roca	Flujo seco de arena, limo y/o detritos Deslizamiento-flujo de arena, limo y/o detritos Deslizamiento-flujo de arcillas sensibles Flujo de detritos Flujo de lodo o barro Crecida de detritos Avalancha de detritos Flujo de tierra Flujo de turba	Flujo indeterminado
Deformaciones de ladera	Deformación de ladera de montaña Deformación de laderas de roca	Deformación de laderas de suelo Reptación de suelos Soliflucción	
Propagación	Propagación de roca en Pendiente	Propagación por licuefacción de arena y/o limo Propagación de arcilla sensible	

Fuente: Modificado de Muñoz *et al.* (2021) y basada en Hungr *et al.* (2013).

Para un mejor entendimiento del informe, a continuación, se describen las categorías de las remociones en masa.

2.5.1.1 Caída

La caída es un tipo de remoción en masa en el cual uno o varios bloques de roca o suelo (bloque, detrito, limo y/o arcilla) se desprenden de una ladera, con un desplazamiento cortante leve o nulo (Muñoz, et al., 2021).

El material desprendido desciende de forma no cohesiva, principalmente mediante el aire a través de golpes, rebotes y rodamientos (Varnes, 1978 en Muñoz, *et al.*, 2021). Suele ocurrir con velocidades muy rápidas a extremadamente rápidas, muchas veces en caída libre (Highland y Bobrowsky, 2008 en Muñoz, *et al.*, 2021). Se describen a continuación las clasificaciones de caídas según Hungr, *et al.* (2013):

- **Caída de rocas:** desprendimiento, caída, rodamiento y rebote de fragmentos de roca. Pueden ocurrir solas o en grupo, con poca o nula interacción entre los fragmentos, pero interactuando con el sustrato (impactos).
- **Caída de bloque, detrito y/o limo:** desprendimiento, caída, rodamiento y rebote de fragmentos de suelo. Los mecanismos de propagación son similares a los de caída de roca, pero el impacto puede ser reducido por la debilidad de las partículas en movimiento.

2.5.1.2 Volcamiento

- **Volcamiento de bloque de roca** (Hungr, et al., 2013): desprendimiento y rotación hacia adelante de bloques de roca, delimitados por fracturas de buzamiento pronunciado. La rotación ocurre en discontinuidades basales bien definidas. El movimiento puede iniciar lento, pero la última etapa de falla puede ser extremadamente rápida.
- **Volcamiento flexural de roca** (Hungr, et al., 2013): Flexión y rotación hacia delante de un macizo rocoso con fracturas poco espaciadas y de alto manteo o con foliación esquistosa perpendicular al talud. La roca suele ser débil y disgregable. En la base no suelen haber fracturas bien definidas por lo que la rotación es facilitada por la flexión. El movimiento suele ser lento y tiende a estabilizarse en el tiempo, aunque se puede desarrollar un deslizamiento rotacional secundario en la zona de bisagra del volcamiento. Ocurren a gran escala.
- **Volcamiento de bloque de grava, arena y/o limo** (Hungr, et al., 2013): volcamiento de columnas de suelo cohesivo (cementado) separado por fracturas verticales.

2.5.1.3 Deslizamiento

Un deslizamiento es un tipo de remoción en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie en la cual se desarrolla una gran

deformación cortante (Muñoz, et al., 2021). Se describen a continuación las clasificaciones de deslizamientos según Hungr, *et al.* (2013):

- **Deslizamiento rotacional de roca:** deslizamiento de una masa de roca débil sobre una superficie de ruptura cilíndrica o rotacional sin control estructural. La morfología se caracteriza por un escarpe principal prominente y un banco inclinado hacia atrás en la cabeza del deslizamiento. Por lo general son lentos a moderadamente lentos, en parte porque el mecanismo se estabiliza a sí mismo (las fuerzas gravitacionales tienden a disminuir al aumentar el desplazamiento).
- **Deslizamiento plano o traslacional de roca:** deslizamiento de una masa de roca sobre una superficie de ruptura planar. Posee poca o nula deformación interna. La cabeza del deslizamiento se puede separar de una roca estable a lo largo de una profunda fisura de tensión vertical. Suelen ser extremadamente rápidos.
- **Deslizamiento de cuña de roca:** deslizamiento de una masa de roca sobre una superficie de ruptura definida por dos planos con una intersección orientada pendiente abajo. No posee deformación interna y suelen ser extremadamente rápidos.
- **Deslizamiento compuesto de roca:** deslizamiento de una masa de roca sobre una superficie de ruptura consistente en varios planos, o en una superficie de curvatura irregular. El movimiento es posible solo si es acompañado de deformación interna significativa. Se pueden reconocer estructuras de horst y graben en la cabeza del deslizamiento, además de varias estructuras de cizalle secundarias. Pueden ser lentos o rápidos.
- **Deslizamiento irregular de roca:** deslizamiento de una masa de roca sobre una superficie de ruptura irregular, formada por varias fracturas con diversas orientaciones, separadas por fragmentos de roca intacta (como “puentes” de roca). El mecanismo de falla es complejo, y puede incluir volcamiento. A menudo son repentinos y extremadamente rápidos.
- **Deslizamiento rotacional de arcilla y/o limo:** deslizamiento de una masa homogénea y usualmente cohesiva de suelo, sobre una superficie de ruptura rotacional. Posee poca deformación interna. Se caracterizan por un escarpe principal y una cabeza inclinada hacia atrás. Normalmente son lentos a rápidos, pero pueden llegar a ser extremadamente rápidos.
- **Deslizamiento plano o traslacional de arcilla y/o limo:** deslizamiento de un bloque de suelo cohesivo sobre un plano inclinado conformado por una capa más débil. La cabecera del deslizamiento se separa del suelo estable por una grieta de tensión (no una cuña activa). Pueden ser lentos o rápidos.
- **Deslizamiento de grava, arena y/o detritos:** deslizamiento de una masa de material granular sobre una superficie planar, paralela al suelo (sustrato).
- **Deslizamiento compuesto de arcilla y/o limo:** deslizamiento de una masa de suelo sobre una superficie de ruptura formada por varios planos, o sobre una superficie de curvatura irregular, en que el movimiento solo es posible si se produce

deformación interna de la masa a desplazar. Se pueden reconocer rasgos tipo horst-graben en la cabecera y superficies de cizalle secundarias. El segmento basal de la superficie de ruptura suele relacionarse con planos de debilidad en la estratigrafía del suelo.

2.5.1.4 Flujo

Un flujo es un tipo de remoción en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento mecánico semejante al de un fluido; puede ser extremadamente rápido o lento, saturado o seco (Muñoz, et al., 2021). Se describen a continuación las clasificaciones de flujos según Hungr, *et al.* (2013):

- **Avalancha de rocas:** movimiento extremadamente rápido, masivo y tipo flujo, de fragmentos de roca, a partir de un deslizamiento o caída de rocas.
- **Flujo seco de arena, limo y/o detritos:** movimiento lento o rápido, similar a un flujo, de material granular suelto, seco, húmedo o subacuático, bien o mal seleccionado, sin exceso de presión de poros.
- **Deslizamiento-flujo de arena, limo y/o detritos:** flujo rápido a extremadamente rápido de material granular saturado, bien o mal seleccionado, en pendientes moderadas. Involucra alta presión de poros o licuefacción del material originado en la fuente del deslizamiento. Generalmente se origina como una falla regresiva múltiple. Pueden ocurrir en superficie o bajo el agua.
- **Deslizamiento-flujo de arcillas sensibles:** flujo rápido a muy rápido de arcillas sensibles licuadas, debido al remodelado durante una falla por deslizamiento regresivo múltiple en o cerca del contenido de agua original.
- **Flujo de detritos:** flujo creciente muy rápido a extremadamente rápido, de material detrítico saturado por canales empinados. Fuerte arrastre de material y agua presentes en la trayectoria del flujo.
- **Flujo de lodo o barro:** flujo creciente, muy rápido a extremadamente rápido, de suelos saturados y con comportamiento plástico, en canales empinados. Involucran contenido de agua significativamente mayor respecto del material de origen. Fuerte arrastre de material y agua presentes en la trayectoria del flujo.
- **Crecida de detritos:** flujo de agua muy rápido con alto contenido de detritos, en un canal empinado. La descarga máxima es comparable con la de una inundación.
- **Avalancha de detritos:** flujo superficial de detritos parcial o totalmente saturados, muy rápido a extremadamente rápido, en pendientes empinadas, sin confinamiento en un canal establecido.
- **Flujo de tierra:** movimiento rápido o lento, similar a un flujo, de suelo arcilloso con comportamiento plástico, facilitado por una combinación de deslizamiento a lo largo de superficies de cizalle múltiples y discretas, y deformaciones de cizalle internas. Se alternan largos períodos de latencia con “oleadas” rápidas.
- **Flujo de turba:** Flujo rápido de turba licuada causado por una falla no drenada.

Conviene precisar que el término “**aluvión**” o “**huayco**” (frecuentemente usado en Chile y en la región, respectivamente) puede hacer referencia a un flujo de detritos, flujo de lodo o flujos hiperconcentrados de **alta descarga** (Muñoz, et al., 2018). En este sentido, ejemplo de aluviones serían las descargas súbitas de agua (*flash flood*), o la liberación repentina de agua de lagos glaciares (también conocidos como GLOF o *glacial lake outburst flood*) o descarga súbita de lagos subglaciales (*jökulhlaups*), o descargas producidas por rotura de presas (naturales o artificiales) también conocidos como *outburst* o los flujos de origen volcánico (lahares). Muñoz *et al.* (2018) destaca que pueden existir flujos de lodo, hiperconcentrados o de detritos que no cumplan con la condición de **alta descarga**, por lo que no serían aluviones en estricto rigor. Las definiciones propuestas por Muñoz, *et al.* (2018) se basan en la actualización de la clasificación de Varnes (1978) que realizó Hungr, *et al.* (2013). Los aluviones pueden además incluir material antrópico como basuras, casas y escombros, así como troncos de árboles y material vegetal. Existen otros términos locales para definir remociones en masa tipo flujo. En Perú y el norte de Chile (en particular en la región de Arica y Parinacota), a los aluviones o “corrimiento de tierra” también se les conoce localmente como *huacos*, que proviene del *quechua wayqu* que significa quebrada.

2.5.1.5 Deformaciones de ladera

Las deformaciones de ladera (*slope deformations*) corresponden a un tipo de remoción en masa que presentan rasgos de deslizamiento, pero sin una superficie de cizalle distinguible; son movimientos lentos a extremadamente lentos y no alcanzan grandes desplazamientos en comparación con las demás remociones en masa ya descritas (Muñoz, et al., 2021). Se describen a continuación las clasificaciones de deformaciones de ladera según Hungr, *et al.* (2013):

- **Deformación de ladera de montaña:** deformación gravitacional de gran escala de laderas de montaña empinadas, manifestado por escarpes, bancos, grietas, trincheras y protuberancias, pero sin una superficie de ruptura completamente definida. Tasas de movimiento extremadamente lentas o no medibles.
- **Deformación de ladera de rocas:** Deformación profunda lenta a extremadamente lenta de las laderas de valles o colinas. Desplome de las crestas de los taludes y desarrollo de grietas o fallas, sin una superficie de ruptura bien definida, con tasas de movimiento extremadamente lentas. Algunas deformaciones de laderas deben ser consideradas como precursoras de deslizamientos a gran escala (PMA, 2007).
- **Deformación de ladera de suelo:** movimiento profundo lento a extremadamente lento de suelo generalmente cohesivo, y que ocurre en valles y/o laderas.
- **Reptación de suelos:** movimiento superficial extremadamente lento de capas de suelo en una pendiente y que se ve favorecido por cambios cíclicos de volumen del suelo producto del clima (humedad, sequía y congelamiento). De acuerdo con el PMA (2007) dentro de la reptación de suelos se incluyen la **soliflujión** y la

gelifluxión, ambos causados por cambios de volumen de carácter estacional en capas superficiales de 1 a 2 metros de profundidad.

- **Solifluxión**: reptación de suelo intensa y muy lenta que involucra la capa activa de permafrost en zonas Alpinas o polares. Forma lóbulos de solifluxión característicos.

2.5.1.6 Propagación

Corresponde a la deformación de roca, suelo o arcillas producto de la presencia de capas más débiles subyacentes. Pueden ser lentos o extremadamente rápidos (Hungr, et al., 2013). Se describen a continuación las clasificaciones de propagación según Hungr, et al. (2013):

- **Propagación de roca en pendiente**: extensión o elongación casi horizontal de una masa de bloques coherentes de roca, como resultado de deformación intensa de un material débil subyacente o por deslizamiento regresivo controlado por una superficie basal débil. Usualmente el desplazamiento total es bien limitado y lento.
- **Propagación de arena o arcilla por licuefacción**: propagación lateral extremadamente rápida de una serie de bloques de suelo que flotan sobre una capa saturada de suelo granular, licuadas de forma espontánea o producto de movimientos sísmicos.
- **Propagación de arcillas sensibles**: propagación lateral extremadamente rápida de una serie de bloques coherentes de arcilla, que flotan sobre una capa de arcillas sensibles remodelada.

2.5.2 Amenaza y susceptibilidad

Uno de los objetivos primordiales del presente estudio es aportar en la gestión del riesgo de desastres apuntando a su reducción, entendiendo ambos conceptos según lo que se establece en la ley 21.364. Uno de los pilares para la reducción del riesgo de desastre es la comprensión de la **amenaza**, es decir, el fenómeno natural que puede ocasionar daños o trastornos a las personas, infraestructura, servicios, modos de vida o medio ambiente, que, en este caso, serían los procesos de remoción en masa (artículo 2 de la ley 21.364).

Para el estudio de la amenaza que representan las remociones en masa, se pueden determinar grados de **peligro** a partir de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno. En caso de no poder definir la probabilidad (debido a limitantes de información, procesamiento u otras), una forma muy utilizada para la determinación de niveles de amenaza es el análisis de **susceptibilidad**. Esta dice relación con la propensión de un área determinada a ser afectada por la ocurrencia de un cierto tipo de remoción en masa, ya sea en el lugar que se generan o las áreas en que estas se propagan, o zonas de alcance (Arenas y Opazo, 2017), y que dependerá de los factores que controlan o condicionan su ocurrencia denominados como **factores condicionantes**. El conocimiento de estos factores y la caracterización de su comportamiento en el presente estudio es fundamental. La susceptibilidad se puede estimar mediante el análisis del catastro y de los factores

condicionantes, sin considerar la variable temporal ni el cálculo de la probabilidad de ocurrencia, sino que mediante, por ejemplo, de una sumatoria de los factores favorables a la generación del fenómeno (González de Vallejo, *et al.*, 2002).

Así como existen factores en el medio físico que favorecen la ocurrencia de remociones en masa, existen también los llamados **factores desencadenantes** que son los agentes o estímulos externos que, tras su actividad, desencadenan o gatillan una o varias remociones en masa.

2.5.3 Catastro de remociones en masa

Como se menciona en Opazo *et al.* (2021), el catastro de remociones en masa es un registro ordenado de reconocimiento de estos fenómenos en un área determinada, combinado con información sobre las características individuales de cada registro, que además resulta ser una herramienta de comunicación muy efectiva y de fácil entendimiento, tanto para profesionales de las geociencias como para usuarios no expertos.

Existen diferentes metodologías para realizar catastros de remociones en masa, que dependerán de los objetivos, escala de trabajo, extensión del área estudiada, imágenes y recursos disponibles, accesibilidad en terreno, entre otros. Según Guzzetti *et al.* (2012), los principales métodos de elaboración debiesen tener un enfoque de “**archivo**” y “**geomorfológico**”. El enfoque de **archivo** es aquel que se elabora sobre la base de información publicada: artículos científicos, trabajos técnicos, prensa, archivos históricos, información pública de redes sociales, o proveniente de cuestionarios y talleres realizados directamente a las comunidades afectadas para elaborar catastros preliminares, los que deben validarse con posterioridad. Por su parte, un enfoque **geomorfológico** es aquel que se realiza en trabajo de campo y por medio de la interpretación de imágenes satelitales.

Para la elaboración del catastro que se presenta en este estudio, se tomaron como base los principios señalados por Guzzetti *et al.* (2012) y Arenas y Opazo (2017), que indican que:

- Las remociones en masa dejan marcas en el terreno (morfológicas, sobre todo) lo que permite identificarlas, clasificarlas y mapearlas.
- La marca o señal morfológica depende del tipo de remoción en masa y de la tasa de movimiento.
- Las remociones en masa son el resultado de la interacción de procesos físicos y leyes mecánicas que controlan la estabilidad de las laderas.
- “El pasado y el presente son la clave del futuro”. Convierte al mapeo de las remociones pasadas y las condiciones actuales en elementos fundamentales para la evaluación de posibles nuevos eventos.

2.5.4 Mapas de susceptibilidad

El análisis de susceptibilidad a las remociones en masa se basa en el supuesto que zonas que tienen un contexto medioambiental similar o que han sido afectadas por remociones



en masa de forma similar en el pasado presentan condiciones similares para ser afectadas por remociones en masa (Arenas & Opazo, 2017). De esta forma, el análisis de las remociones en masa debe basarse en variables o parámetros que caracterizan el contexto medioambiental y en el catastro o inventario de remociones en masa.

Las metodologías para asignar un nivel de susceptibilidad se pueden dividir en dos enfoques principales. Por un lado, están aquellas que se basan en aspectos cualitativos a semicuantitativos, donde la experiencia de los profesionales desempeña un papel fundamental en la clasificación. Por otro lado, están los métodos cuantitativos, que emplean relaciones numérico-estadísticas o modelos físicos para zonificar y estimar un factor de seguridad específico para la ladera en cuestión (Arenas & Opazo, 2017).

A escala regional, como es el caso de este estudio, y dado la alta cantidad de puntos catastrados, se utilizó un método cuantitativo llamado razón de frecuencia., que analiza cada una de las categorías de cada mapa temático de acuerdo con los puntos del catastro contenido en cada una de ellas. Con este método se asigna un peso a los diferentes factores que condicionan las remociones en masa los cuales son ponderados para obtener un resultado final.

3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Contexto geomorfológico regional

Chile se ubica en un margen convergente activo de placas oceánica-continental, donde la placa oceánica de Nazca subducta bajo el margen occidental de la placa continental Sudamericana dando origen a Los Andes. Este proceso de subducción se reconoce activo, al menos, desde el Jurásico temprano (Mpodozis y Ramos, 1989) o, según algunos autores, desde el Pérmico (Coloma, *et al.*, 2017; Oliveros, *et al.*, 2020). A partir del Eoceno, la tasa de convergencia ha variado entre 5 y 15 cm/año (Somoza, 1998), siendo actualmente de 7,5 cm/año (DeMets, *et al.*, 1994). Estos procesos endógenos de la Tierra, junto con los procesos exógenos (o superficiales) han dado origen la geomorfología actual de la región.

La geomorfología definida para la región de Arica y Parinacota comprende 8 macrounidades, las cuales corresponden a: Acantilado Costero, Cordillera de la Costa (subdividida en sierras y llanuras), Quebradas del piedemonte, Planicies fluvioaluviales, Depresión Central, Precordillera, Cordillera Occidental (incluye arco volcánico y sierras) y Altiplano.

A continuación, se describen brevemente las unidades geomorfológicas que se presenta el mapa geomorfológico elaborado para este estudio Fig. 2. El detalle de cada una de ellas junto con la metodología bajo la cual se definieron se presenta en el ANEXO A (capítulo B.1)

- *Acantilado Costero*: Franja norte-sur disectada por quebradas, que limita por el oeste a la Cordillera de la Costa. Tiene un ancho variable pero estrecho entre 1 y 2 km, con altas pendientes (mayor a 35°) y altitudes que van entre los 100 y 1.000 m s.n.m.
- *Cordillera de la Costa*: unidad con orientación norte-sur de ancho variable entre 10 y 15 km, con alturas que varían entre los 500 y 1.200 m s.n.m. Se limita al oeste por el Acantilado costero y hacia el este la Depresión Central. Se subdivide en dos según características morfológicas en Sierras y Llanuras, que corresponden a cordones montañosos y zonas relativamente planas respectivamente.
- *Quebradas de Piedemonte*: Quebradas de orientación este-oeste de gran extensión que van pueden ir desde la precordillera hasta el océano. Sus elevaciones van desde el nivel hasta los 4.000 m s.n.m y con pendientes de hasta 45°.
- *Planicies fluvioaluviales*: fondos de las Quebradas de Piedemonte y planicies donde convergen formando extensos valles de orientación este-oeste con altitudes que van desde el nivel del mal hasta los 1.000 m s.n.m.
- *Depresión Central*: zonas de menores pendientes (menor a 5°) con orientación norte sur y elevaciones que van entre los 600 y 2.500 m s.n.m, limitada al este por la Cordillera de la Costa y al oeste por Precordillera.



- *Precordillera*: zona de orientación noreste-sureste que forma el piedemonte de la Cordillera Occidental con altitudes que varían entre los 3.000 y 3.700 m s.n.m. Posee un ancho de alrededor de 30 km y pendientes de hasta 15°.
- *Cordillera Occidental*: cordones montañosos donde se concentran los centros volcánicos del acto volcánico actual con alturas que van desde los 4.500 hasta los 6.325 m s.n.m. con altas pendientes Limita el occidente con la Precordillera y al oriente con el Altiplano.
- *Altiplano*: ubicado en el límite oriental de la región. Se caracteriza por poseer bajas pendientes (menores a 10°) a alturas mayores a 4.000 m s.n.m. formando una gran meseta interrumpida por cordones montañosos y volcanes de la Cordillera Occidental.

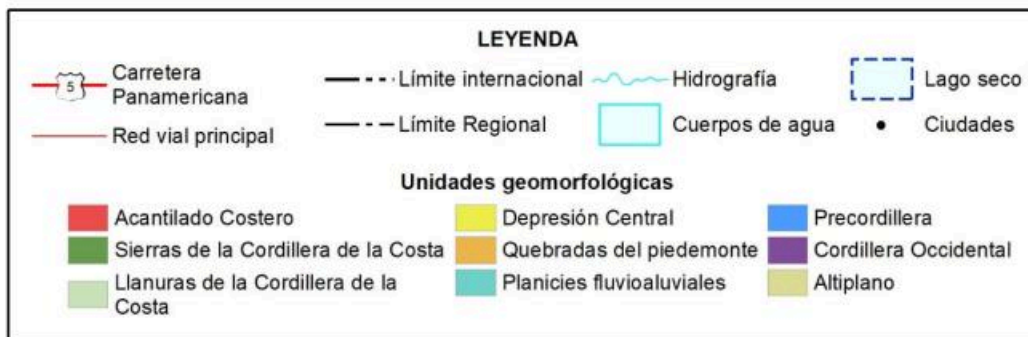
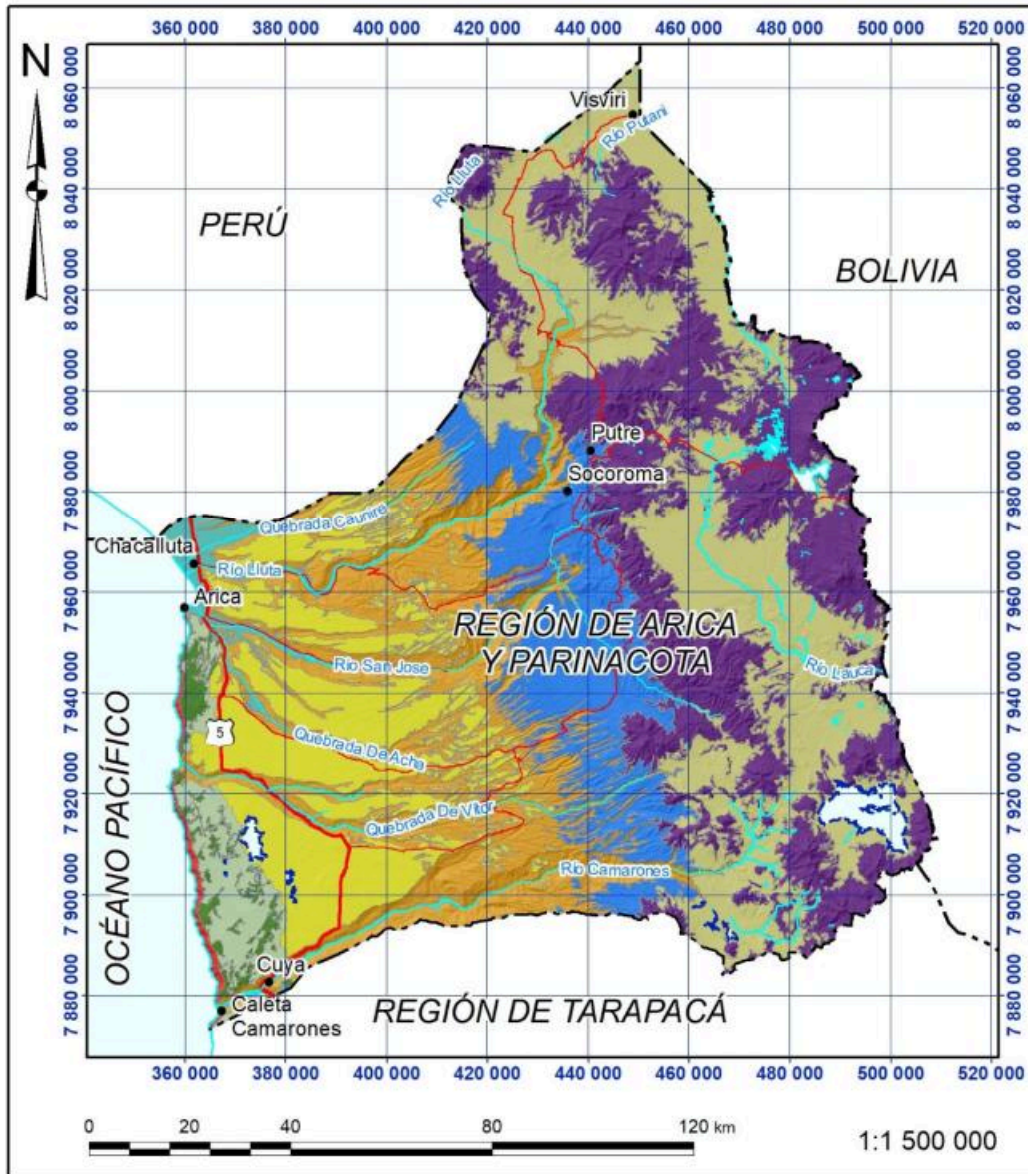


Fig. 2 Mapa geomorfológico.



El trabajo en terreno permitió identificar que ciertas unidades geomorfológicas son más propensas a la presencia de remociones en masa. Por ejemplo, las laderas de las profundas quebradas de la región suelen exhibir un comportamiento similar en términos de remociones en masa. Estas laderas, inclinadas y de gran altura, normalmente contribuyen con materiales proveniente de caídas, deslizamientos y flujos. La Fig. 3 muestra una fotografía tomada con dron desde la ruta A-19 (valle del río San José) hacia el este, destacando las unidades geomorfológicas de la región.

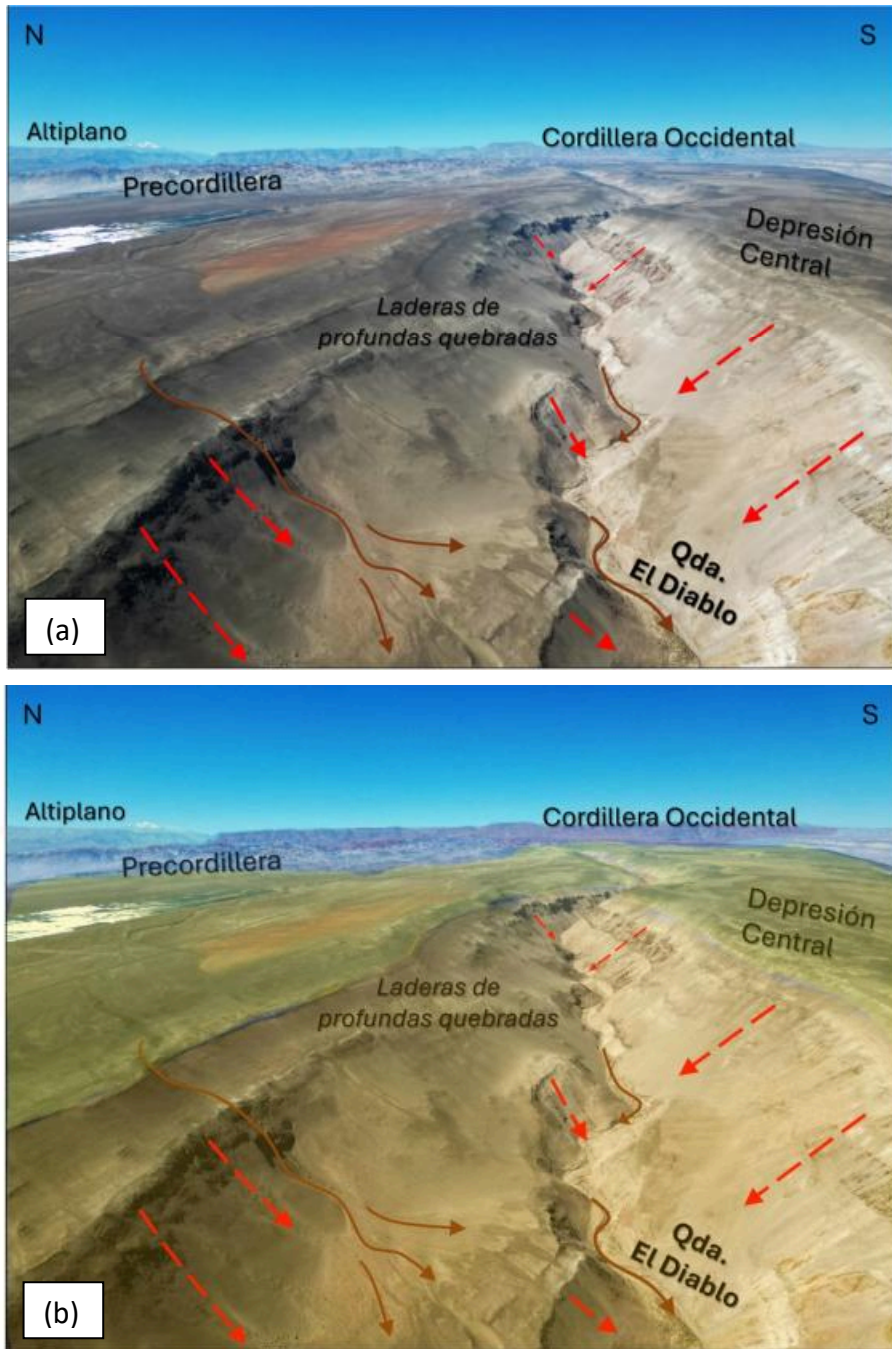


Fig. 3 Unidades geomorfológicas reconocibles desde vuelo dron sobre valle del río San José (Quebrada El Diablo); flechas rojas esquematizan caídas y deslizamientos, flechas café, flujos. (a) Fotografía original. (b) Unidades geomorfológicas delimitadas por polígonos para mejorar interpretación. Archivo de terreno. Fotografía tomada en ruta A-19, entre Poconchile y San Miguel de Azapa (coordenada 381205E; 7951959S).



En el caso de los flujos, los materiales involucrados en las zonas cordilleranas son de mayor tamaño que aquellos flujos que ocurren desde laderas de las quebradas en la zona costera. Como muestra de lo anterior, en la Fig. 4 se reconocen escurrimientos aluviales en el Altiplano, provenientes de la Cordillera Principal, donde el alcance de estos se diferencia de las Quebradas de Piedemonte por el alcance de estos, pues los últimos suelen desarrollarse en los quiebres de pendientes al momento que se insertan en la unidad geomorfológica mencionada con una capacidad de incisión relevante, dejando registro aquello en las laderas.

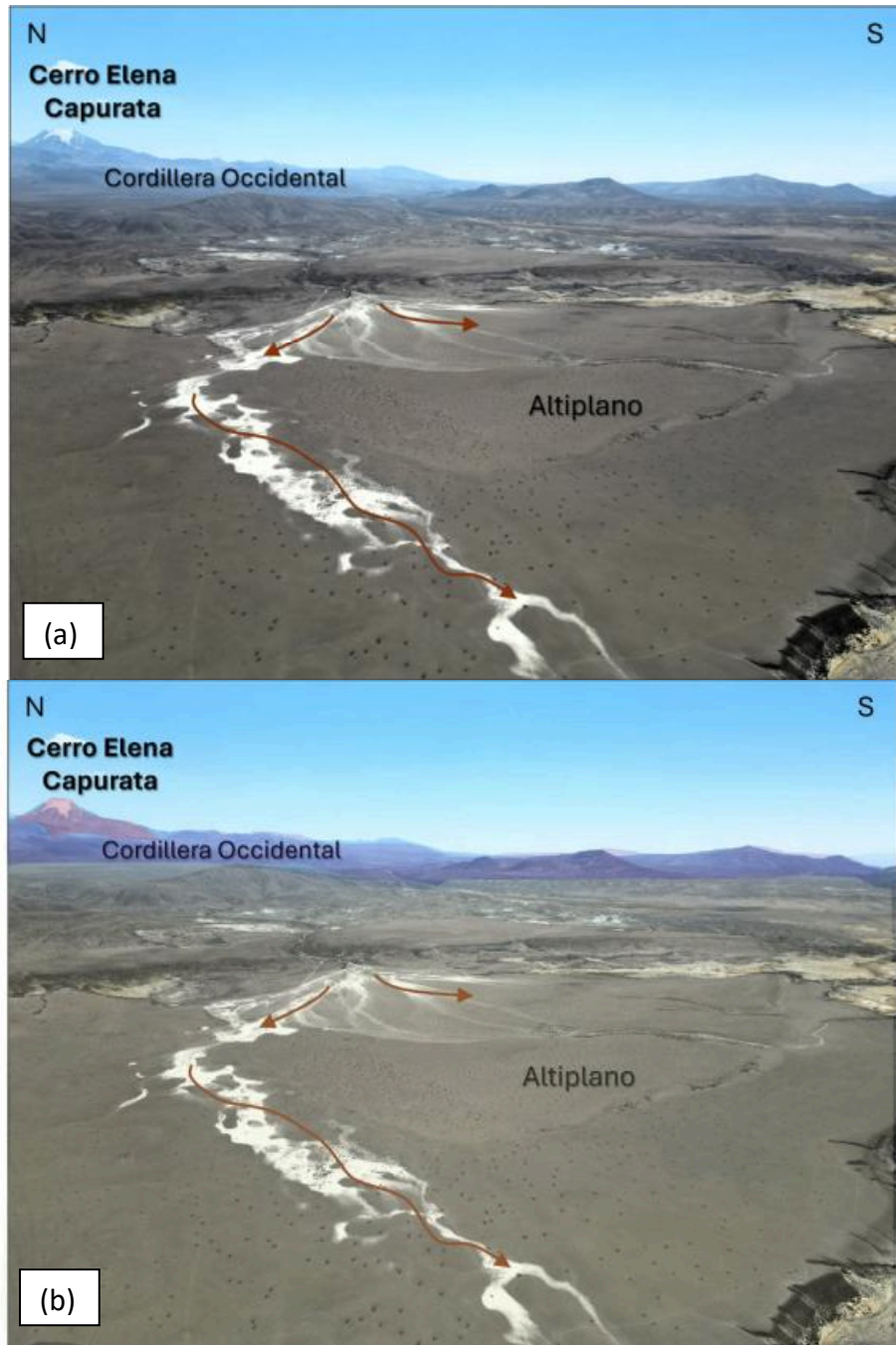


Fig. 4 Flujos (flechas café) provenientes de la Cordillera Occidental y transportados por el Altiplano. (a) Fotografía original. (b) Unidades geomorfológicas delimitadas por polígonos para mejorar interpretación Archivo de terreno. (fotografía de vuelo de dron tomada en las coordenadas 483100E;7946040S).

3.2 Contexto geológico regional

3.2.1 Litología

Dentro de la región existen rocas desde el Precámbrico, ubicadas en la zona occidente de la Precordillera, hasta unidades actuales del Cuaternario distribuidos dentro de todo el territorio regional, llegando a un total de 106 unidades litológicas.

Las rocas más antiguas en la región corresponden a rocas metamórficas del Precámbrico-Ordovícico que afloran en el extremo oeste de la Precordillera Altiplánica ubicada en la zona centro este de la región correspondiente al Complejo Metamórfico de Belén. Esta unidad la sobreyace una unidad carbonífera denominada Estratos de Quichoco.

Las rocas jurásicas en la región se ubican a lo largo de toda la Cordillera de la Costa al occidente de la región, donde se reconocen algunas rocas sedimentarias y volcánicas marinas como las formaciones Longacho, Chiza, Cuya y Los Tarros, unidades volcánicas-sedimentarias como la Formación Camaraca y algunos intrusivos como los del complejo volcánico Cuya y Chuquichambe, entre otros.

Las rocas cretácicas se concentran en la zona centro-oeste de la región principalmente en áreas menor pendiente, entre ellas destacan unidades sedimentarias marinas como las formaciones Livilcar y Blanco, sedimentarias continentales como la Formación Atajaña, volcánicas sedimentarias como las formaciones Punta Barranco, Suca, Sausine y Cerro Empexa y algunos intrusivos correspondientes a dicho periodo.

Las unidades del Paleógeno se encuentran distribuidas por toda la región. Existen unos pocos intrusivos y dentro de las unidades estratificadas solo de origen continental. Entre ellas destacan algunas volcanosedimentarias los estratos de Quebrada Ancache y Quitariti y formaciones Azapa, Oxaya y Lupica, algunas volcánicas como las Tobas de Paucata, Andesita Chapiquiña y unidades de origen aluvial como los depósitos aluviales del Oligoceno Inferior, de la Cordillera de la Costa y las Gravas de Alto Hospicio, además de varias ignimbritas.

En el Neógeno hubo una gran actividad volcánica dejando como evidencia una serie remanentes volcánicos, volcanes y complejos volcánicos distribuidos principalmente al este de la región en la zona cordillerana y altiplánica, junto con varias ignimbritas y unidades volcánicas como las ignimbritas Nama, Moquella, Guiaillane, Pumire, Putoyane, Bisluri y Lauca y la Andesita Camiña junto con la Formación Puchuldiza. Además, existen algunas unidades volcanosedimentarias como las formaciones Putani, Macusa, Lupe y Visviri y los estratos de Huamachuco y Condorini y unidades asociadas a procesos continentales como las formaciones Joracane, El Diablo, Chucal, Huaylas, Lauca, Estratos de Copaquilla-Tignámar y depósitos aluviales, fluviales, lacustres, de remociones en masa, yesíferos, de avalancha, entre otros. Finalmente existen algunos intrusivos del Mioceno Inferior – Medio ubicados cerca de los centros volcánicos.



Por último, dentro de las unidades cuaternarias existen volcanes y complejos volcánicos ubicados en la zona oriental. Además, se presentan depósitos aluviales, coluviales, de remociones en masa, salinos, lacustres, glaciales, marinos, entre otros, distribuidos en toda la región.

En la Fig. 5 se muestra de manera representativa, a escala 1:1.500.000, el mapa geológico final que se obtuvo como resultado de la compilación de todas las cartas geológicas proporcionadas por el Servicio Nacional de Geología y Minería. En la tabla del ANEXO C “Correlación Unidades litológicas” se presenta el código y nombre de cada unidad geológica. Además, el proceso para lograr la clasificación se expone en el ANEXO A (capítulo B.2).

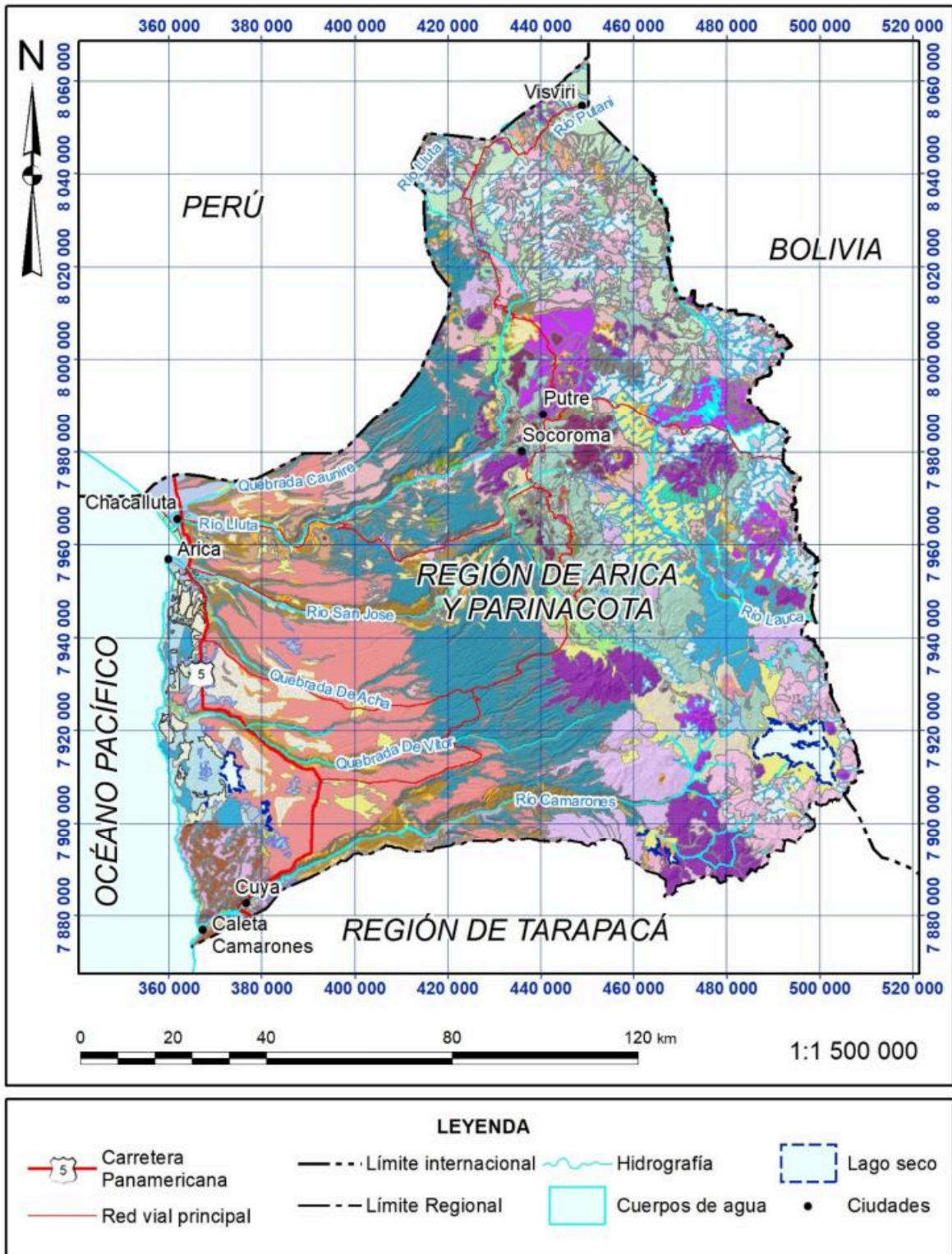


Fig. 5 Mapa litológico.



Fig. 6 Leyenda unidades litológicas.

La influencia de la litología o el control que pueden ejercer distintos tipos de roca en las remociones en masa en la región se discute más adelante a partir de los resultados de la visita a terreno.

El análisis de la información obtenida en terreno, como parte del proceso de validación, da cuenta de patrones relacionados con el control litológico en algunos tipos de remociones en masa.

En el caso de las caídas, la litología influye significativamente en la forma y tamaño de los bloques. Por ejemplo, se pueden encontrar bloques preformados por diaclasas asociadas a rocas unidades de rocas volcánicas, como la Formación Oxaya, Formación Cuya, andesita Chapiquiña e intrusivos del Lluta. También se observan desprendimientos de bloques que rompieron por matriz en rocas sedimentarias, las formaciones El Diablo y Azapa. Lo anterior se ilustra en la Fig. 7, donde además existe un rol importante de las “cornisas” de roca, que son resultado de la erosión diferencial de afloramientos y que favorecen la caída de rocas (fotografía derecha).



Fig. 7 Ejemplos de caídas de rocas (flechas rocas indican posibles trayectorias) asociadas a distintos tipos litológicos y mecanismos. Archivo de terreno. Fotografía izquierda. Ruta A-31, sector Chapiquiña (coordenadas 441977E; 7968514S). Fotografía derecha: ruta 11 – sector Estación Rosario (coordenadas 379112E; 7964067S). La ubicación espacial del punto de observación de esta y las siguientes fotografías presentadas en el informe se presentan en el ANEXO F.

En ciertos casos, la presencia de materiales “arenosos” que cubren la ladera o que están dispuestos en su base puede influir en la trayectoria de los bloques, lo que puede reducir su alcance y/o hacer que se asienten con más facilidad. Esto se debe a que estos materiales aumentan la fricción y el coeficiente de restitución de los bloques, especialmente en la base ($R = \text{velocidad de impacto} / \text{velocidad de rebote}$), como lo muestra la Fig. 8. En la mayoría de los casos, los bloques caen directamente sobre infraestructura (ej. bermas de rutas) representando alto riesgo y dificulta el acceso.

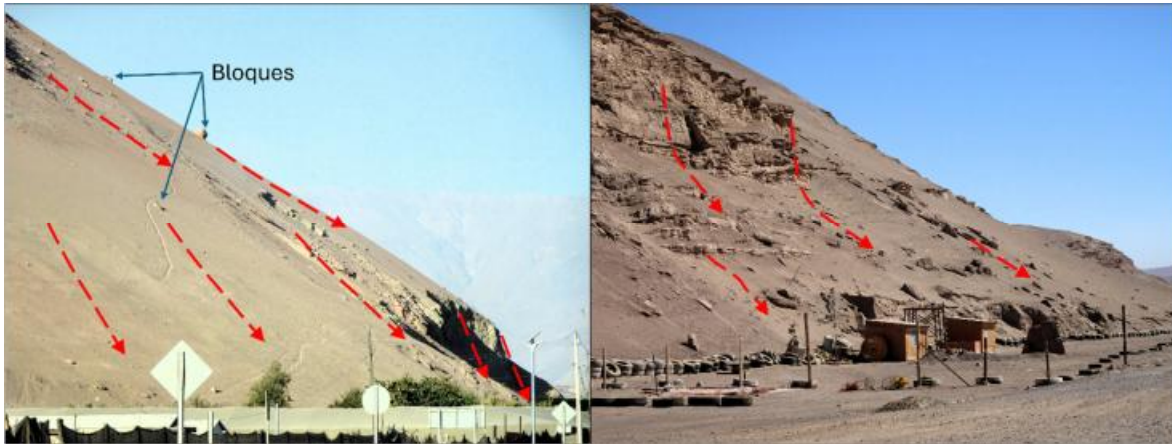


Fig. 8 Ejemplos del rol de materiales arenosos en caídas de rocas. Archivo de terreno (las flechas rojas ejemplifican posibles trayectorias de los bloques). Fotografía izquierda: ruta A-27 Valle de Azapa (coordenadas 389432E; 7946090S). Ruta 5 norte (sector Chaca, coordenadas 377802E;7919633S).

También se identificaron numerosas remociones en masa que se dan como resultado de reactivaciones de fenómenos antiguos. Además, en numerosas ocasiones, estas remociones responden como fenómenos compuestos, en el entendido que, como resultado de la reactivación de un tipo de remoción, esta se puede manifestar con otra tipología. Un ejemplo de aquello se presenta en la Fig. 9 donde sucesivos deslizamientos rotacionales presentan caídas de rocas en sus cabeceras o escarpes secundarios generado por el alta pendiente producto de los movimientos del deslizamiento.



Fig. 9 Reactivación de remociones en masa. Comportamiento inicial de deslizamiento rotacional (flechas moradas) secundado por caída de rocas (flechas rojas) en escarpes del deslizamiento. Archivo de terreno. Sector ruta A-23 entre Putre y Coronel Alcérreca (coordenadas 433826E;8010928S).

3.2.2 Estructuras

Los rasgos tectónicos más importantes de la región corresponden a tres sistemas de fallas que se describen a continuación.

Sistema de fallas NW-SE y NE-SW (Madella, et al., 2016)

Al sur de Arica, un segmento de cerca de 90 km de la Cordillera de la Costa está cortado por un arreglo de fallas de rumbos NW-SE y NE-SW. Aunque estas fallas presentan relaciones de corte, sus múltiples reactivaciones complejizan la determinación de sus direcciones de deslizamiento y cronologías relativas, ocasionando un patrón que es difícil de descifrar y que no ha sido investigado hasta el momento.

Sistema de Fallas Alejo (García & Fuentes, 2012)

Al sur-oeste de la región, al oeste de la pampa de Camarones, se identifican fallas subparalelas de rumbo N20°E a N50°E que forman parte de un sistema de hasta 5km de

ancho, constituido por al menos 15 fallas individuales de hasta 20 km de largo cada una. En el flanco norte de la quebrada Camarones, los manteos son subverticales, donde se observan brechas de falla de ancho métrico y estrías subhorizontales y subverticales.

Sistema de Cabalgamientos de Vergencia Oeste (SCVO) (*West Vergent Thrust System – WTS* en (Muñoz & Sepúlveda , 1992; Muñoz & Charrier, 1996)

Es un sistema de escala regional, que se extiende desde el suroeste del Perú (Sierra de Huaylillas) (~18° S), y en Chile, hasta la localidad de Pica (~20°30' S). Se extiende a lo largo de la Precordillera, con orientación NNO-SSE (Fig. 10). Corresponde a un sistema estructural de alto ángulo, que incluye estructuras de vergencia oeste, deformación de escama gruesa y delgada. El SCVO genera muy poco acortamiento, pero un aporte de al menos 4.000 m al alzamiento del Altiplano (Muñoz & Charrier, 1996). Su actividad comienza desde el Oligoceno-Mioceno, y el desarrollo de sistemas de pliegues y flexuras estaría asociado a la propagación de antiguas estructuras inversas ciegas de alto ángulo, reactivadas desde este período (García, et al., 2011; Charrier, et al., 2012). Su desarrollo ha generado depósitos sintectónicos a la deformación, que han rellenado la zona de la Depresión Central y la zona de transición con la Precordillera (por ejemplo, formaciones Huaylas y El Diablo). El registro de sismicidad somera en la localidad de Aroma, indica que este sistema se encuentra aún activo (Fariás, et al., 2005).

Este sistema de fallas se subdivide en la región en dos sets de cabalgamientos: Falla Ausipar la cual define el límite entre la Depresión Central y la Precordillera, y el Sistema de Falla Belén en el lado oriental de la Precordillera.

Sistema de Cabalgamientos de Vergencia Este (SCVE) (*East Vergent Thrust System – ETS* por ejemplo, (Cortés, 2011)

Se extiende a lo largo de la Cordillera Occidental (Fig. 10), al este de la SCVO. Se caracteriza por pliegues y fallas de doble vergencia (Charrier, et al., 2005; García, et al., 2011; Cortés, 2011; Cortés, et al., 2012a) y que muestra sistemas de faja corrida y plegada, de escama delgada y de vergencia este. En esta región este sistema de fallas se conoce como Sistema de Cabalgamiento Chucal.

Como los dos sistemas de fallas tienen vergencias opuestas, la actividad tectónica desarrolló un bloque elevado entre ellos, la cadena montañosa Chapiquiña-Belén (Charrier, et al., 1999; Charrier, et al., 2000).

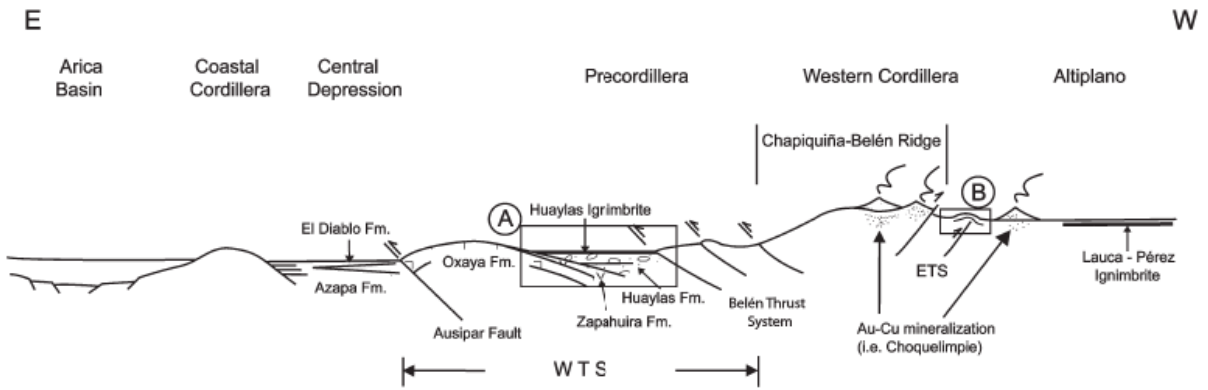


Fig. 10 Sistemas de fallas caracterizadas en el libro *Geology of Chile* (Moreno & Gibbons, 2007).

En la Fig. 11 se presenta de manera representativa el mapa de estructuras de la región a una escala 1:1.500.000.

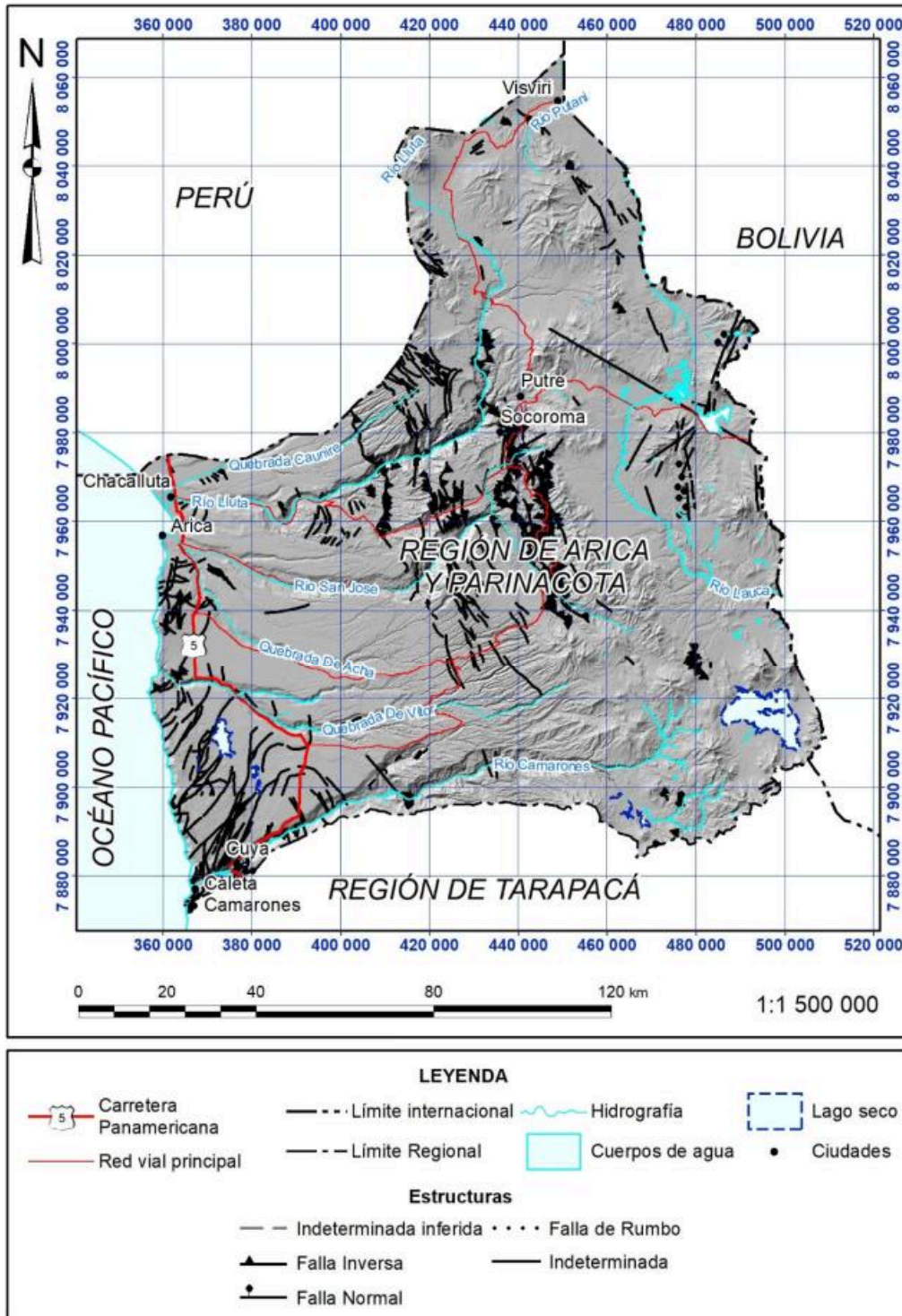


Fig. 11 Mapa de estructuras.

En los taludes de la ruta 5 norte (acceso a Cuya), en lugares donde se han descrito variadas remociones en masa, se puede apreciar un complejo arreglo de estructuras geológicas que afectan el sector, como lo muestra la Fig. 12.



Fig. 12 Talud artificial de ruta 5 norte (sector cuesta de la cultura Chinchorro, coordenadas 381954,20 E / 7887826,66 S) evidenciando un fuerte control estructural. Archivo de terreno.

Otro ejemplo donde se pudo validar presencia de fallas que se relaciona con puntos catastrados es al este del río Lluta y sur de Coronel Alcérreca (Fig. 13) donde pasa un sistema de fallas (representado con una línea negra en Fig. 13), cuya forma coincide con la quebrada y por ende con una zona de generación de remociones en masa (flechas rojas en Fig. 13).

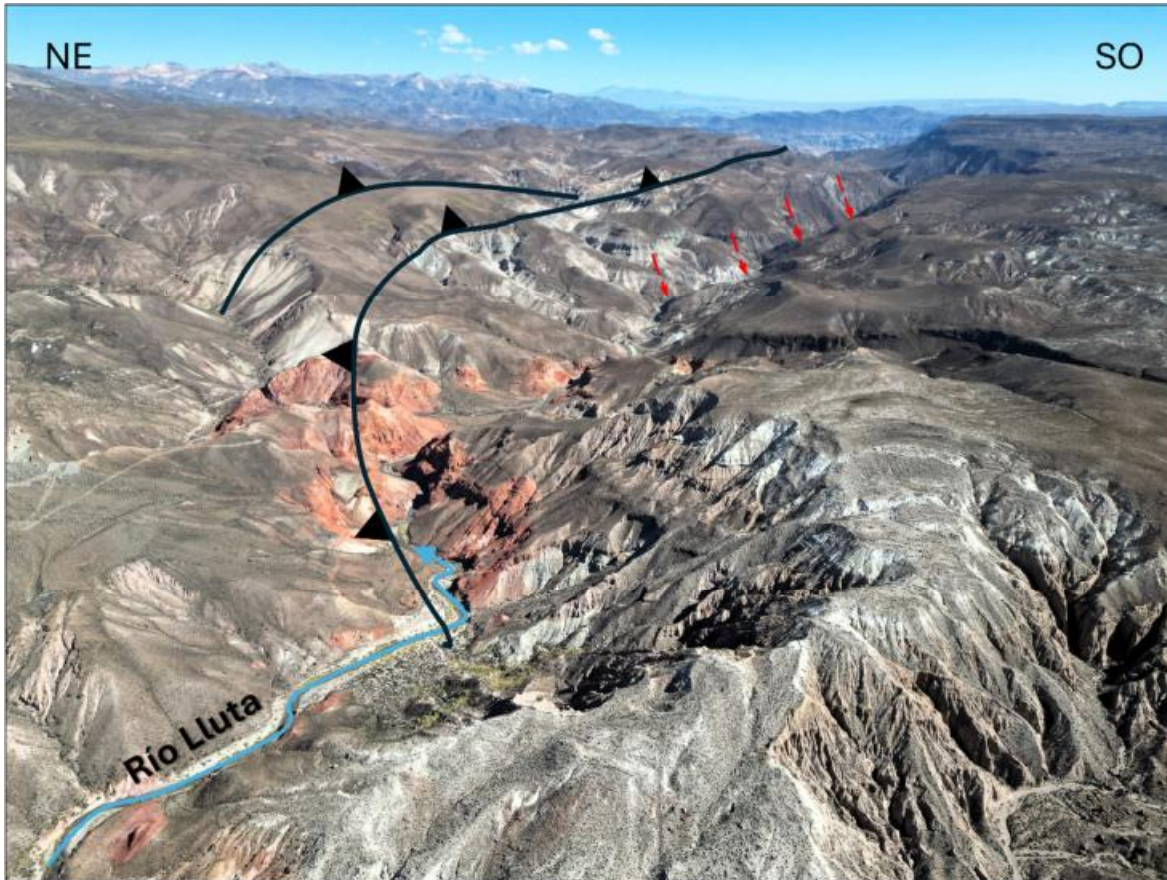


Fig. 13 Valle del río Lluta evidenciando un fuerte control estructural (falla inversa esquematizada en línea dentada negra; flechas rocas indican zonas de remociones en masa). Archivo de terreno. Coordenada 430690E/8004038S.

3.3 Clima

3.3.1 Temperatura

La temperatura de la región fue caracterizada usando el registro de temperaturas máximas y mínimas medias mensuales de. La estación Chacalluta pertenece a la Dirección Meteorológica de Chile y las estaciones Putre y Chungará Ajata pertenecen a la Dirección General de Aguas. Estas estaciones se sitúan a una latitud similar, pero a distintas distancias de la costa y altitudes. Se han recopilado tres estaciones registros desde 1980 hasta la fecha para llevar a cabo este análisis (Fig. 14).

A partir de este registro, se identifican dos rasgos principales en la variación de la temperatura: (1) el principal factor que controla la temperatura en la región es la altitud, y (2) la estación Chacalluta, muestra una diferencia entre el mínimo y el máximo menor que las otras dos estaciones, que se puede atribuir a la cercanía al mar.

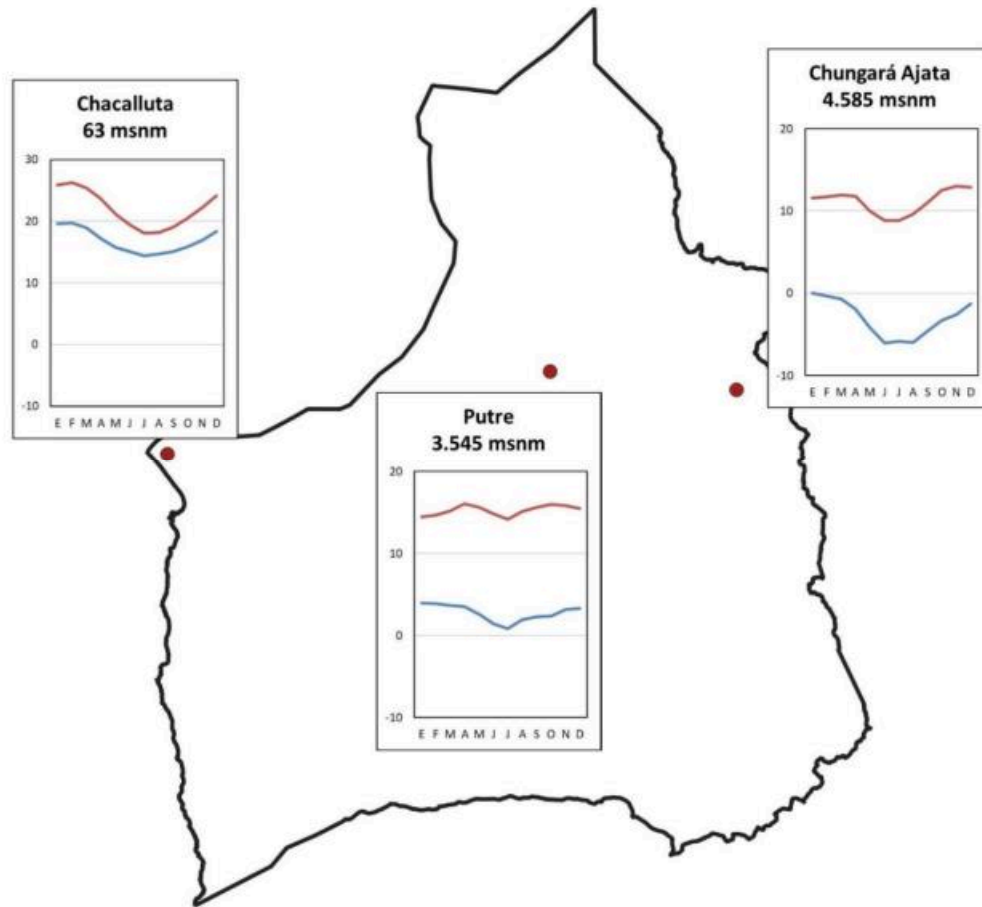


Fig. 14 Temperatura máxima (rojo) y mínima (azul) media mensual (medida en °C) en estaciones meteorológicas de la región de Arica y Parinacota.

3.3.2 Precipitaciones

3.3.2.1 Precipitación media mensual

Para caracterizar las precipitaciones en la región, se utilizaron los registros de precipitación media mensual en estaciones meteorológicas de la región (Fig. 15). Todas las estaciones utilizadas pertenecen a la Dirección General de Aguas, excepto la estación Chacalluta, que pertenece a la Dirección Meteorológica de Chile.

Se reconocen dos dominios: uno occidental, con precipitaciones prácticamente nulas, debido al dominio de las condiciones desérticas que predominan en gran parte de la zona norte de Chile, y otro oriental, con precipitaciones estivales que alcanzan valores máximos mensuales cercanos a 100 mm en los meses de verano. Estas precipitaciones son de tipo convectivas y se asocian al fenómeno conocido como invierno boliviano o altiplánico, que

se relaciona con masas de aire provenientes desde la Amazonía durante los meses de verano.

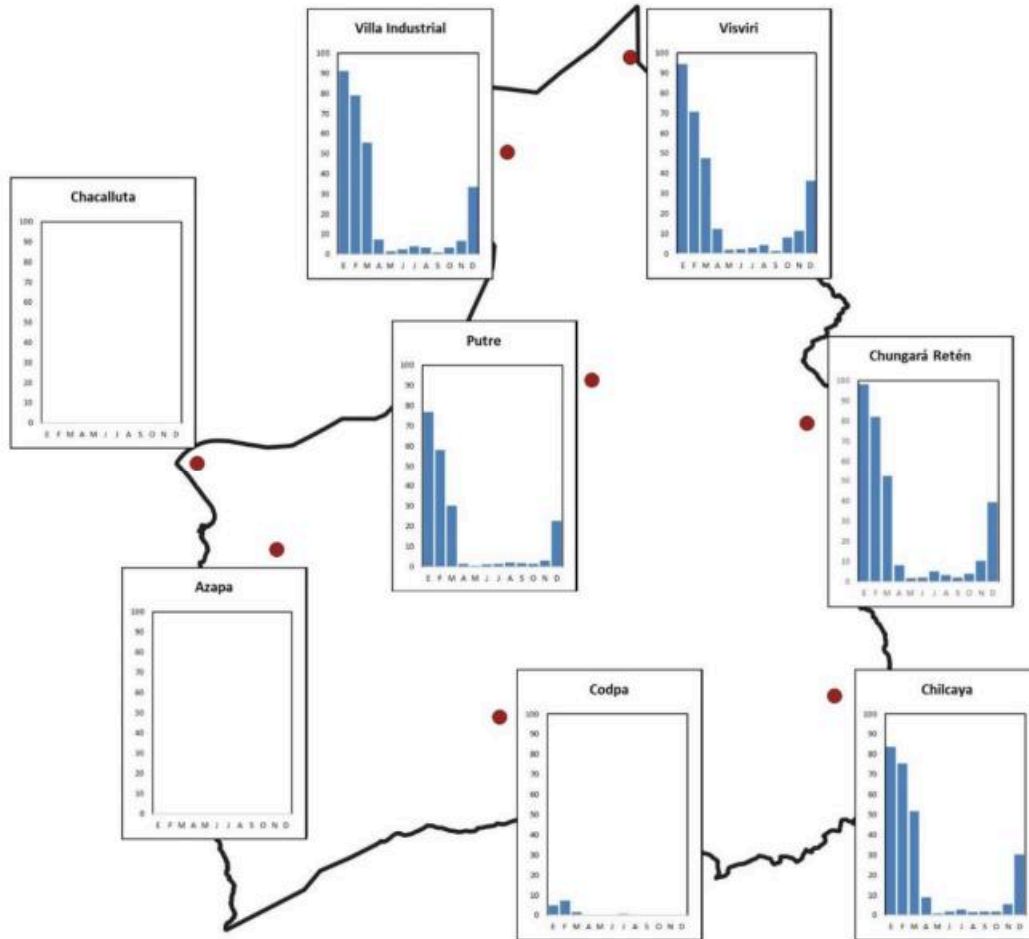


Fig. 15 Precipitación media mensual (medida en mm) en estaciones meteorológicas de la región de Arica y Parinacota.

3.3.2.2 Precipitación máxima anual

Para las mismas estaciones meteorológicas de precipitaciones mostradas en la Fig. 15, se graficaron las temperaturas máximas anuales (Fig. 16). Donde las mayores precipitaciones se registraron en las de estaciones de mayor altura (sobre los 4.000 m s.n.m.), correspondiente a las de Villa Industrial y Chicaya, superando los 70 mm, mientras que las menores precipitaciones se registraron hacia la costa en la estación Azapa llegando a un máximo de 8,2 mm.



Fig. 16 Precipitaciones máximas anuales en seis estaciones meteorológicas de la DGA.

3.3.3 Clasificación climática de la región

Según la clasificación de *Köppen*, en la región de Arica y Parinacota se identifican 5 climas diferentes, distribuidos en franjas de orientación principal norte-sur (Fig. 17). A continuación, se describen estas franjas de oeste a este:

En las zonas más bajas de la región, como Arica, sus alrededores y las principales quebradas, el clima se clasifica como desértico cálido (BWh), caracterizado por precipitaciones prácticamente nulas y temperaturas relativamente altas. Presenta abundantes nieblas matinales, conocidas también como “camanchaca”, originada principalmente por la influencia de la corriente fría de Humboldt.

Hacia el este de la zona anterior, a mayores altitudes, se registra una disminución de la temperatura. Aquí, el clima de esta zona se clasifica como desértico frío (BWk), que es similar al anterior, pero más frío. Los nublados matinales desaparecen rápidamente con el aumento de la altitud, debido a que existe una menor influencia del océano.

Si se continua hacia el este la influencia de las precipitaciones estivales comienza a manifestarse al acercarse a la Precordillera. En esta zona, el clima se clasifica como desértico frío de lluvia estival (BWk(w)). Luego, en la Precordillera domina el clima semiárido de lluvia estival (BSk(w)) y en el Altiplano el clima de tundra de lluvia estival (ET(w)). A medida que la altitud aumenta progresivamente de oeste a este, la temperatura disminuye.

Finalmente, en las mayores cumbres de la Cordillera Occidental el clima se clasifica como glacial de lluvia estival (EF(w)).

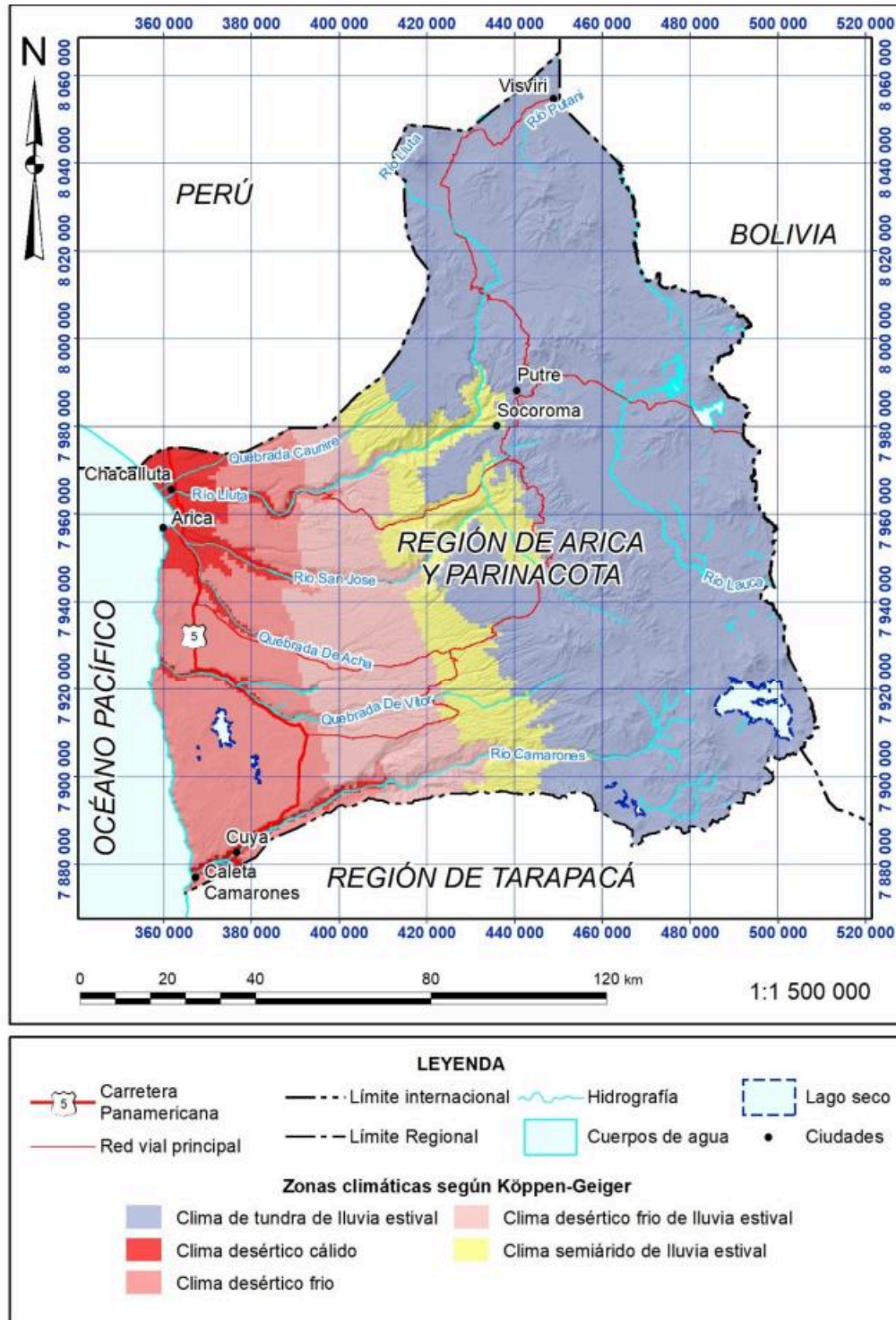


Fig. 17 Mapa de clima.

3.4 Vegetación

La región de Arica y Parinacota se emplaza en una zona clasificada climáticamente como desértica con escasez de precipitaciones, lo que determina un paisaje de extrema aridez y vegetación exigua. No obstante, en los valles de los grandes ríos y en la zona oriental presenta una cobertura de vegetación importante, tanto en las laderas como en las quebradas que acarrean agua desde la cordillera. Además, la región se caracteriza por presentar valles fértiles los cuales producen una gran cantidad de cultivos que se exportan a todo Chile, como es el caso del Valle de Azapa, en el que los frutos y hortalizas, como tomate, choclo, y frutales como aceitunas, entre otros (Ministerio de Agricultura (minagri.gob.cl)).

La Fig. 18 muestra un mapa obtenido del estudio de la actualización de recursos vegetacionales de la región del año 2015 para la región de Arica y Parinacota (Biota. Gestión y Consultorías Ambientales Ltda., 2015). En el estudio, se definen 3 “zonas ambientales” a partir de las características bióticas y abióticas del territorio, las cuales son: zona ambiental desértica (desde los 0 a los 2.000 m s.n.m., y que incluye las unidades geomorfológicas Cordillera de la Costa y Depresión Central); zona ambiental de la Precordillera (desde los 2.000 a los 3.500 m s.n.m.), y la zona ambiental del Altiplano desde los 3.500 m s.n.m. hasta el límite internacional. En el citado estudio, se entrega una clasificación por uso de suelos, con las siguientes unidades descritas de oeste a este:

- Áreas desprovistas de vegetación, situadas en la costa y en la Depresión Central.
- Áreas urbanas e industriales, entre las que destacan Arica y alrededores.
- Terrenos agrícolas, principalmente en los valles de Lluta, San José, Vitor y Camarones.
- Praderas y matorrales, distribuidas ampliamente en la Precordillera y en la Cordillera Occidental.
- Bosques, en zonas puntuales de la Cordillera Occidental y el Altiplano.
- Cuerpos de agua, asociados principalmente a las quebradas principales y lagunas en el Altiplano.
- Nieves eternas y glaciares, en el Altiplano.
- Humedales, los cuales se encuentran en sectores puntuales tanto de la Cordillera Occidental y al Altiplano.

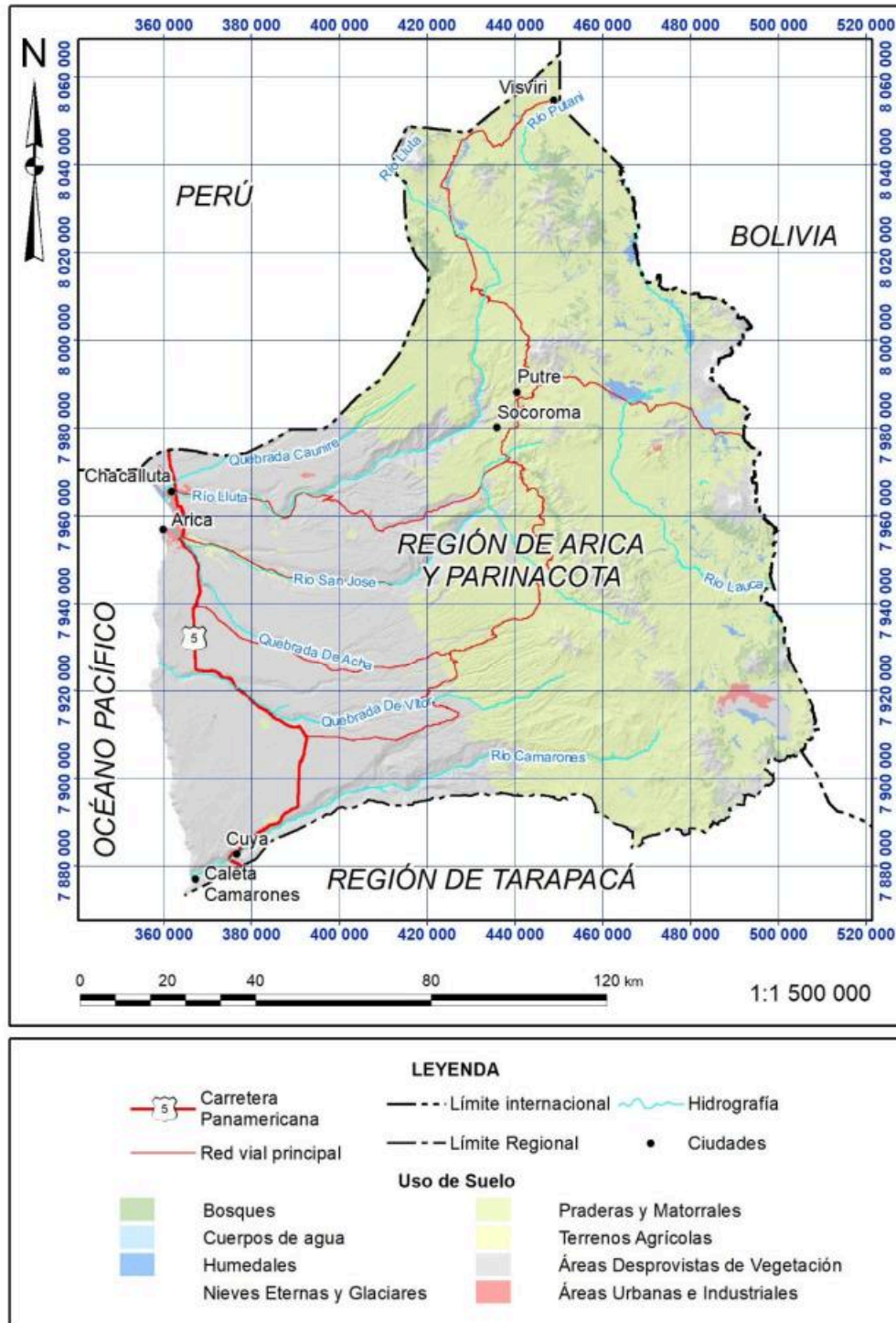


Fig. 18 Mapa de uso de suelos de la región de Arica y Parinacota. Elaborado a partir de información georreferenciada disponible en el Sistema de Información Territorial - CONAF 2020 en <https://sit.conaf.cl/>.

Dentro de las especies vegetacionales que predominan y caracterizan la región, se encuentran las llaretas, variadas especies de cactus, entre otras (Ministerio de Medio Ambiente (mma.gob.cl)).

La presencia de vegetación, especialmente en la Precordillera y Cordillera Occidental, que, en ocasiones en bastante densa, influye de manera positiva al contener algunos procesos de remoción de masa (Fig. 19), tanto de caídas (por el asentamiento de los bloques) o de flujos en quebradas.



Fig. 19 Vegetación en laderas y quebradas de la zona Cordillera Occidental, mostrando el efecto positivo de la vegetación en la retención de bloques en laderas (fotografía izquierda) y quebradas (fotografía derecha). Sector ruta A-31, acceso a Belén (coordenadas 440423E; 7972072S). Las flechas rojas muestran posible trayectoria de bloques. Archivo de terreno.

El uso de suelos también es un factor relevante para el caso de los flujos, dado que (como lo muestra la Fig. 20), el uso de las quebradas para cultivos es frecuente en los valles con propósitos productivos. En la fotografía se destaca además la unidad geomorfológica Planicies fluvioaluviales en los fondos de las principales quebradas.



Fig. 20 Vista del valle del río San José (Valle de Azapa). Fotografía tomada desde ruta A-19 mediante vuelo de dron (coordenadas 380724E; 7952581S). Archivo de terreno.

3.5 Hidrografía

La red de drenaje cuenta con dos patrones en la región, uno oriental y otro occidental, siendo la precordillera la división entre ambos.

La zona oriental está dominada por los volcanes que forman parte de la Cordillera Occidental, en el Altiplano, desde donde nacen los cauces que drenan la zona.

La zona occidental está controlada por la pendiente general hacia el oeste que existe en esta zona. Como resultado, algunas quebradas generan una incisión de hasta 1.000 m de profundidad, dando forma a una red compuesta por quebradas que convergen entre ellas y que nacen en la Precordillera con la misma orientación que la pendiente preexistente. El resto de las quebradas, que no generan tanta incisión, tienen una orientación similar a las quebradas anteriores, pero nacen más hacia el oeste.

En el Anexo C.6.5 Modelo de cuencas, se especifica el procedimiento de generación de la red y del modelo de cuencas asociado.

En la Fig. 21 se presenta la red de drenaje para la región.

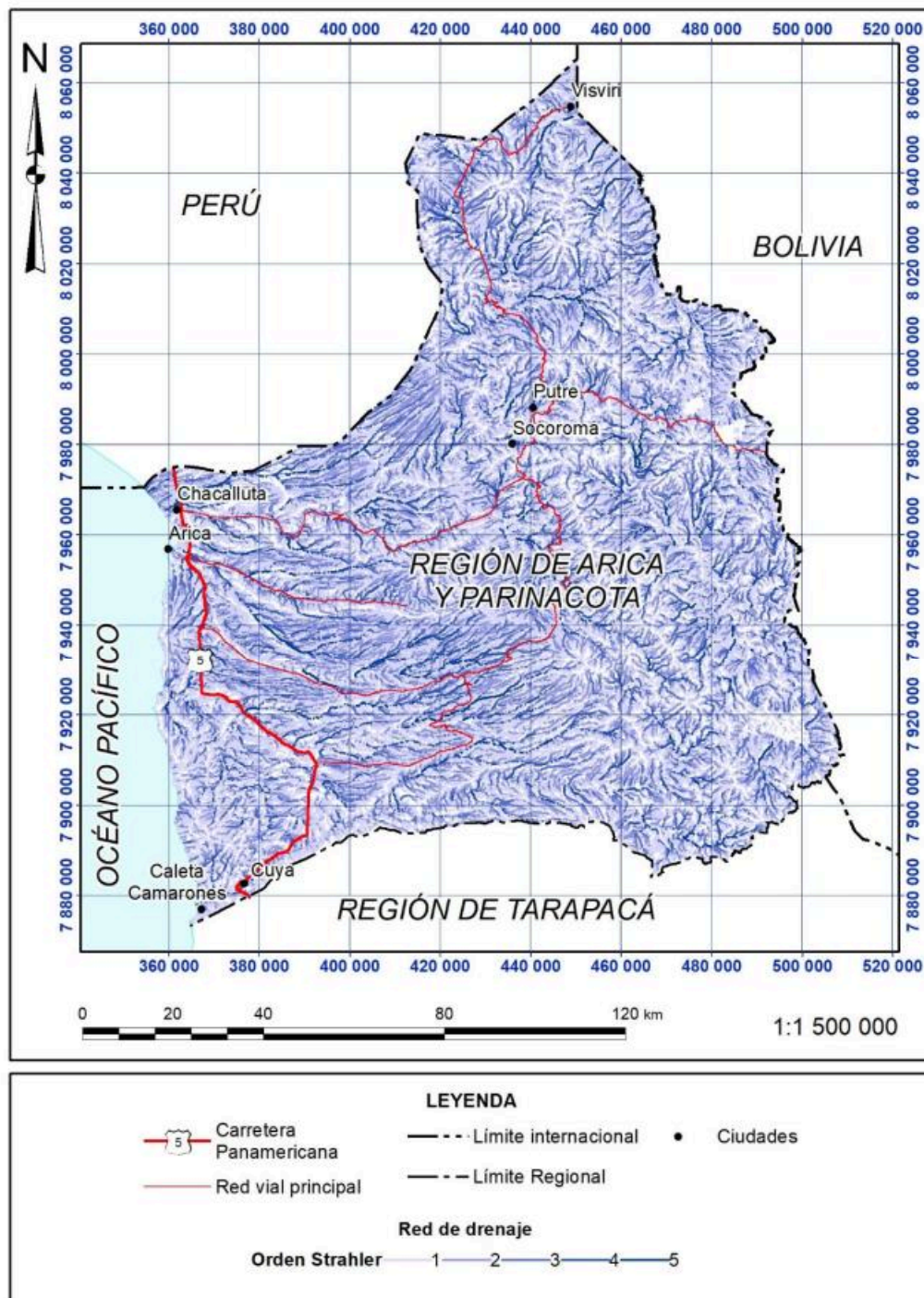


Fig. 21 Mapa de Hidrografía.

4 CATASTRO

4.1 Generalidades

El catastro corresponde a una muestra homogénea y representativa de las remociones en masa que han ocurrido en toda región de Arica y Parinacota. Este catastro se desarrolló de manera que incluyera remociones en masa en todo el territorio regional, pero con especial énfasis en aquellas zonas que se pueden considerar como más relevantes, debido a que se desarrollan actividades humanas en ellas.

Dentro de este trabajo, el catastro corresponde a una representación espacial de una base de datos. Esta representación espacial georeferenciada puede ser de geometría puntual o poligonal. Los puntos se ubican preferentemente en la zona de generación. Cada uno cuenta con una descripción detallada en campos específicos. Por otro lado, los eventos de mayor tamaño o relevancia se han representado mediante polígonos.

4.1.1 Metodología

La metodología empleada para el levantamiento del catastro puntual se basó en tres etapas distintas. En primer lugar, se llevó a cabo una fotointerpretación mediante la observación de imágenes satelitales en la serie de tiempo disponible en el software *Google Earth Pro*. En segundo lugar, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva con el fin de identificar antecedentes de remociones en masa reconocidas en diferentes tipos de fuentes: artículos científicos, informes técnicos del Servicio Nacional de Geología y Minería, memorias o tesis de título o grado, así como también información proveniente de los medios de prensa. Estos antecedentes fueron validados mediante imágenes satelitales para asegurar su precisión. En tercer lugar, se llevaron a cabo visitas a terreno con el objetivo de validar o corregir el catastro levantado mediante fotointerpretación en los pasos previos, así como para identificar y agregar nuevos puntos al catastro observados *in situ*. Los detalles de estas visitas y los objetivos trazados se detallan en el apartado 4.2 Trabajo de terreno.

El criterio de búsqueda utilizado para la elaboración del catastro se basó en una grilla regular de 2x2 km, que permitió guiar la búsqueda de remociones en masa. Este catastro se representó mediante puntos georreferenciados contenidos en una *Geodatabase* que, a su vez, cuenta con una descripción detallada de cada una de estas remociones a través de campos estructurados de acuerdo con los estándares definidos por el Servicio Nacional de Geología y Minería para la caracterización de estos fenómenos.

Se incluyeron en el catastro todas aquellas remociones en masa que se reconocieron a escala 1:5.000. Sin embargo, en áreas consideradas más relevantes, como zonas pobladas y carreteras, se realizó un levantamiento más detallado.

Por otro lado, el catastro poligonal se elaboró a partir de las remociones en masa identificadas en el catastro puntual y que son representables a la escala del estudio, es

decir, 1:250.000. Se delimitaron mediante polígonos las zonas de generación y depósito de las remociones con superficies que superan las 5 hectáreas. Además, en las zonas pobladas o con infraestructura vial, se elaboraron polígonos independientemente del área mínima de representación.

La construcción del catastro se llevó a cabo mediante el uso de software como ArcGis y QGIS, apoyados en mapas base y *Google Earth Pro*, utilizando el sistema de referencia SIRGAS UTM 19S¹.

En el caso específico del Morro de Arica, dada la escala de análisis de 1:10.000, se mapeó a una escala de 1:1.000 para garantizar la precisión de la representación cartográfica.

Posteriormente, el catastro se validó mediante trabajo de campo, utilizando una cartilla de validación para los casos en que esto fue posible y la validación mediante el uso de un *dron* cuando no se podía de otra forma, donde se debía llegar a un porcentaje de validación de un 15% Descripción de campos del catastro. El detalle de la información de los campos rellenados se muestra en el ANEXO A.

4.2 Trabajo de terreno

Se realizaron 3 visitas a terreno, en los meses de junio, septiembre y noviembre del año 2023. Los objetivos relativos al catastro propuestos para el levantamiento de terreno fueron:

- Proveer información para el catastro de remociones en masa.
- Identificar y caracterizar una muestra representativa de remociones en masa en la región.
- Validar remociones en masa inventariadas a partir de fotointerpretación.
- Validar mapas temáticos.

Los recorridos realizados en terreno se muestran en la Fig. 22, que fueron planificados previamente, priorizando el acceso a la mayor cantidad de sectores en la región en los días de terreno, la seguridad de los profesionales y cubrir la mayor cantidad posible de paisajes y unidades geomorfológicas a modo de identificar y caracterizar las remociones en masa presentes en los distintos ambientes.

¹ El sistema de referencia se ajusta directamente en la tabla de contenidos de ArcGis (*Table of contents/layers/Data Frame properties*), y el caso de QGIS, se debe acceder a la barra inferior de coordenadas y propiedades del proyecto.

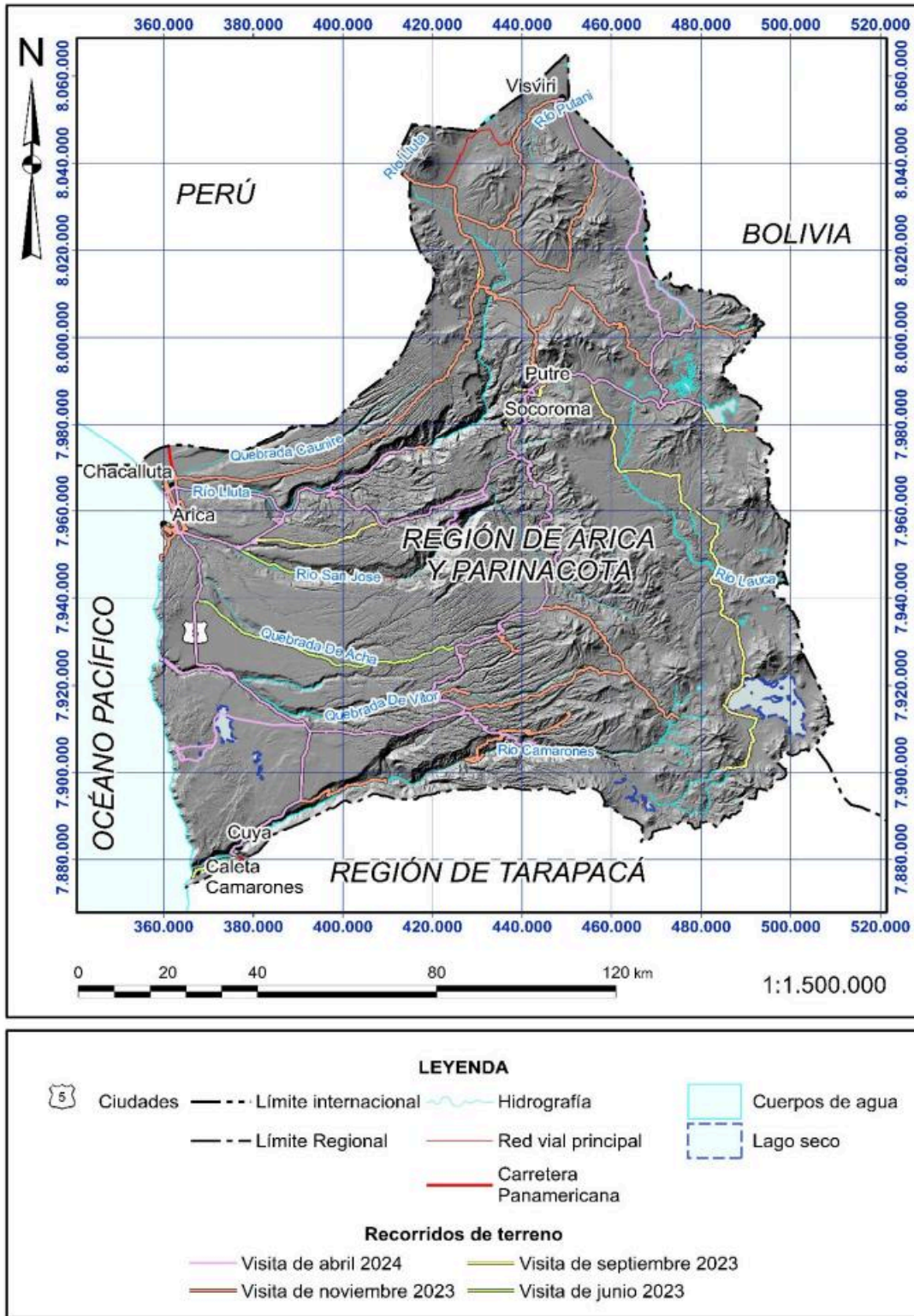


Fig. 22 Recorrido de terreno en los meses de junio, septiembre, noviembre de 2023 y abril 2024.



La visita se llevó a cabo por parte de profesionales geólogos/as de la Consultora (Felipe García-Huidobro, Matías Surijanovic, Eleonora Muñoz, Rodrigo Rauld, Carolina Geoffroy y Héredi Jara). Esta visita se realizó en compañía de profesionales del Servicio Nacional de Geología y Minería: Francisca Falcón, Enrique Opazo y Pablo Oliva, quienes acompañaron y visaron el buen desarrollo de la visita y aportaron información fundamental para el desarrollo del estudio en la región.

Durante las 3 campañas a terreno se visitaron las 6 cuencas que cubren la región según la definición de cuencas del BNA, lo que permitió recorrer prácticamente toda la región.

4.3 Remociones en masa identificadas en terreno

El catastro de remociones en masa de la región de Arica y Parinacota se presenta en la Fig. 23. El catastro total que se presenta en la geodatabase, incluyendo los puntos y polígonos con su código ID, que cuenta con un total de 5.360 puntos y 4.327 polígonos.

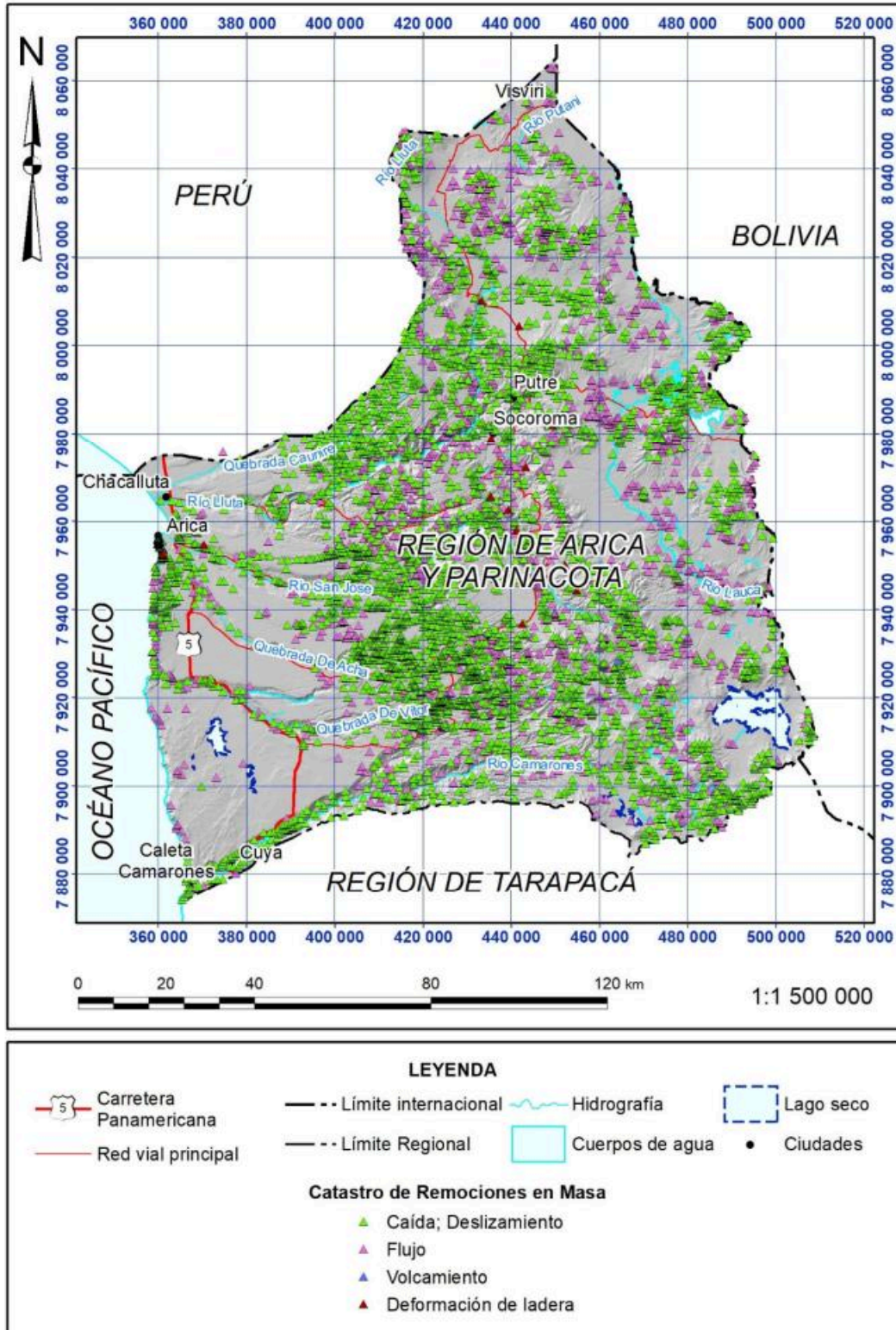


Fig. 23 Catastro puntual de remociones en masa.

El catastro puntual de remociones en masa elaborado para la región de Arica y Parinacota consta de 5.360 eventos, de los cuales 4.327 se representaron de forma poligonal (catastro poligonal). Esto equivale al 80,71% total de puntos.

Del total de las remociones en masa catastradas, 1.070 fueron validadas en terreno, lo que corresponde a un 19,95%. Para que una remoción en masa sea validada, debe haber sido observada en terreno dejando como evidencia una ficha (disponibles en el ANEXO I) y/o una fotografía (tanto las fichas como las fotografías se adjuntas a este informe).

En el catastro se identificaron cinco tipos de remociones en masa. La cantidad de remociones en masa de cada tipo, así como aquellas que se representan mediante polígono se sintetizan en la Tabla 2.

Tabla 2 Síntesis del contenido del catastro presentado en este informe.

	Caída	Flujo	Deslizamiento	Deformación de ladera	Volcamiento
Punto	3021	1737	588	13	1
Polígono	2504	1337	473	12	1
% poligonizado	82,88	76,97	80,44	92,30	100%

En cuanto a la clasificación de las remociones identificadas en el catastro, las Caídas son el tipo dominante en la región, con un 56,36% de los registros, seguida por Flujo, con un 32,41%, y Deslizamiento, con un 10,97% (Fig. 24).

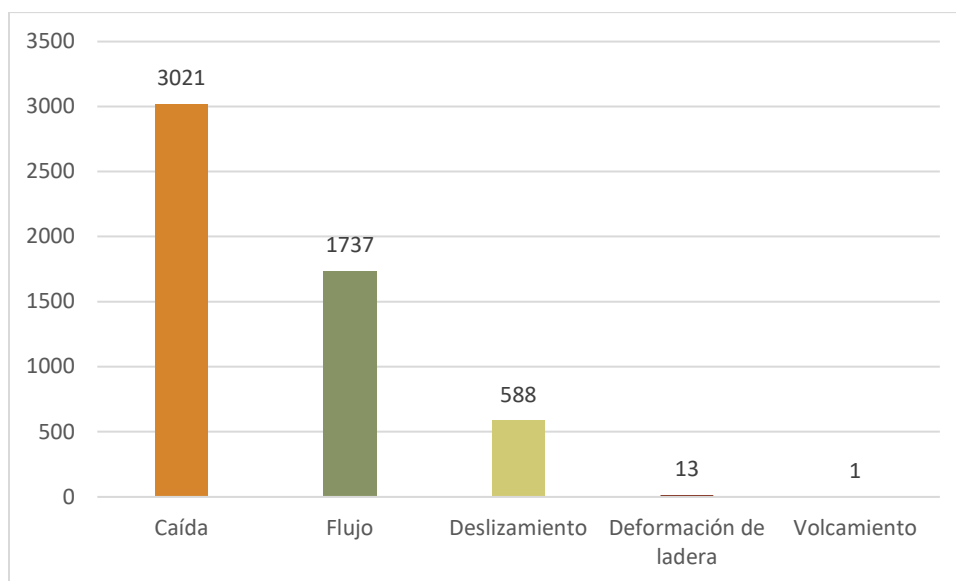


Fig. 24 Clasificación de los tipos de remociones en masa contenidas en el catastro. Los materiales asociados a las remociones en masa dominantes son roca y una mezcla de roca y suelo/sedimento ambos con un 38% de los registros (Fig. 25).

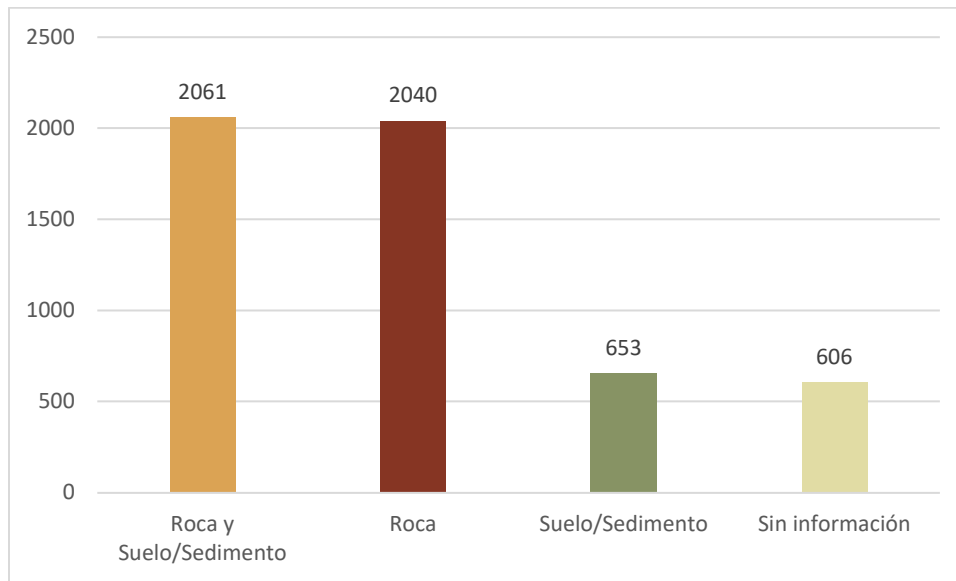


Fig. 25 Tipo de material involucrado en las remociones en masa.

Para los detonantes, en sólo un 2% de los casos se cuenta con información (Fig. 26), estos se tratan más detalladamente en la sección 8 “Factores desencadenantes de remociones en masa”.

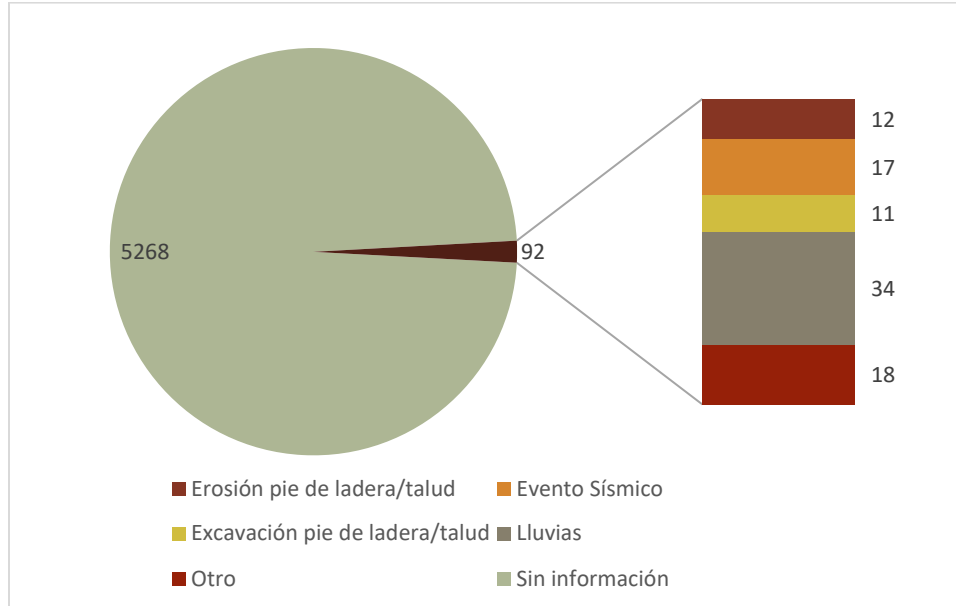


Fig. 26 Detonante de las remociones en masa contenidas en el catastro.

Los rasgos mapeados en un 83% de los registros corresponden a la zona de generación (Fig. 26). Esto responde a que se priorizó ubicar el punto del catastro en la zona de generación.

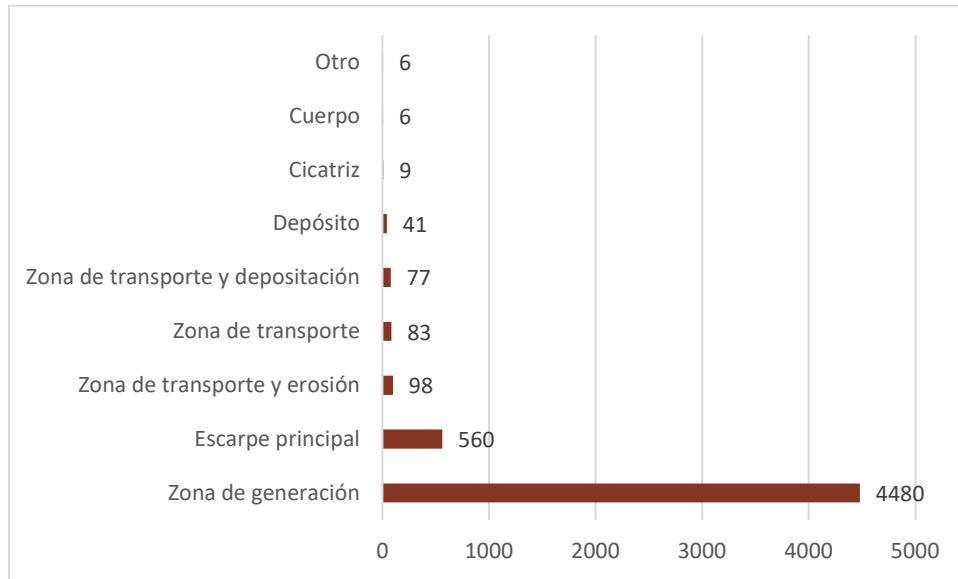


Fig. 27 Rasgos identificados.

El estado de las remociones es Activo en un 54% de los casos y Latente en un 40% de los casos (Fig. 28).

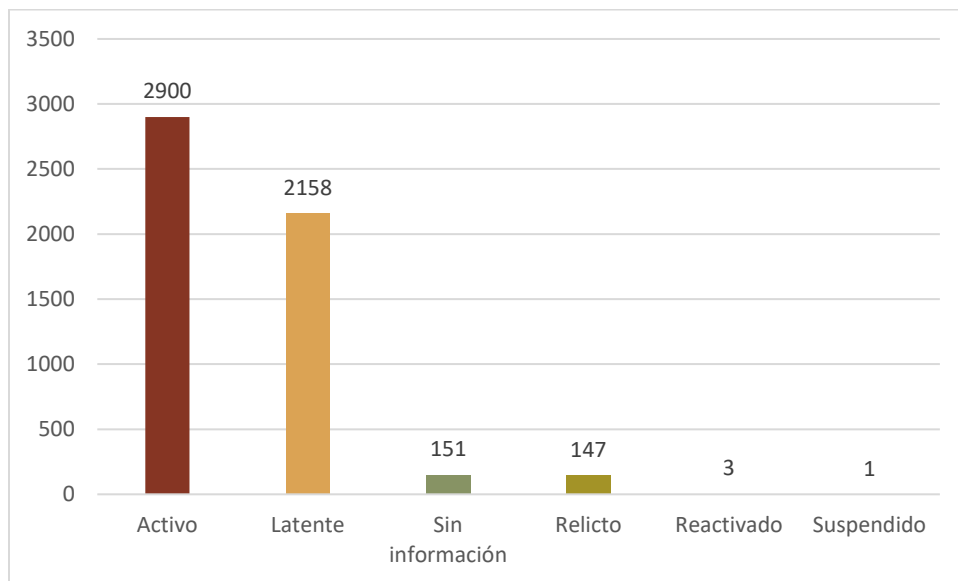


Fig. 28 Estado de las remociones en masa identificadas.

4.3.1 Caídas

Las caídas y desprendimientos son el mecanismo más frecuente identificado en la región (Fig. 29). Se concentran principalmente en la Cordillera de la Costa, Precordillera, Cordillera



Principal y Quebradas de Piedemonte. En esta última geoforma es frecuente reconocer caídas de rocas, sedimentos y detritos desde las laderas de las profundas quebradas, como por ejemplo Vítor, Lluta, San José, Camarones. Los materiales provienen, en muchas ocasiones, desde afloramientos rocosos expuestos en las laderas. También se reconocen frecuentes desprendimientos de detritos provenientes de los materiales menos consolidados dispuestos sobre las laderas.

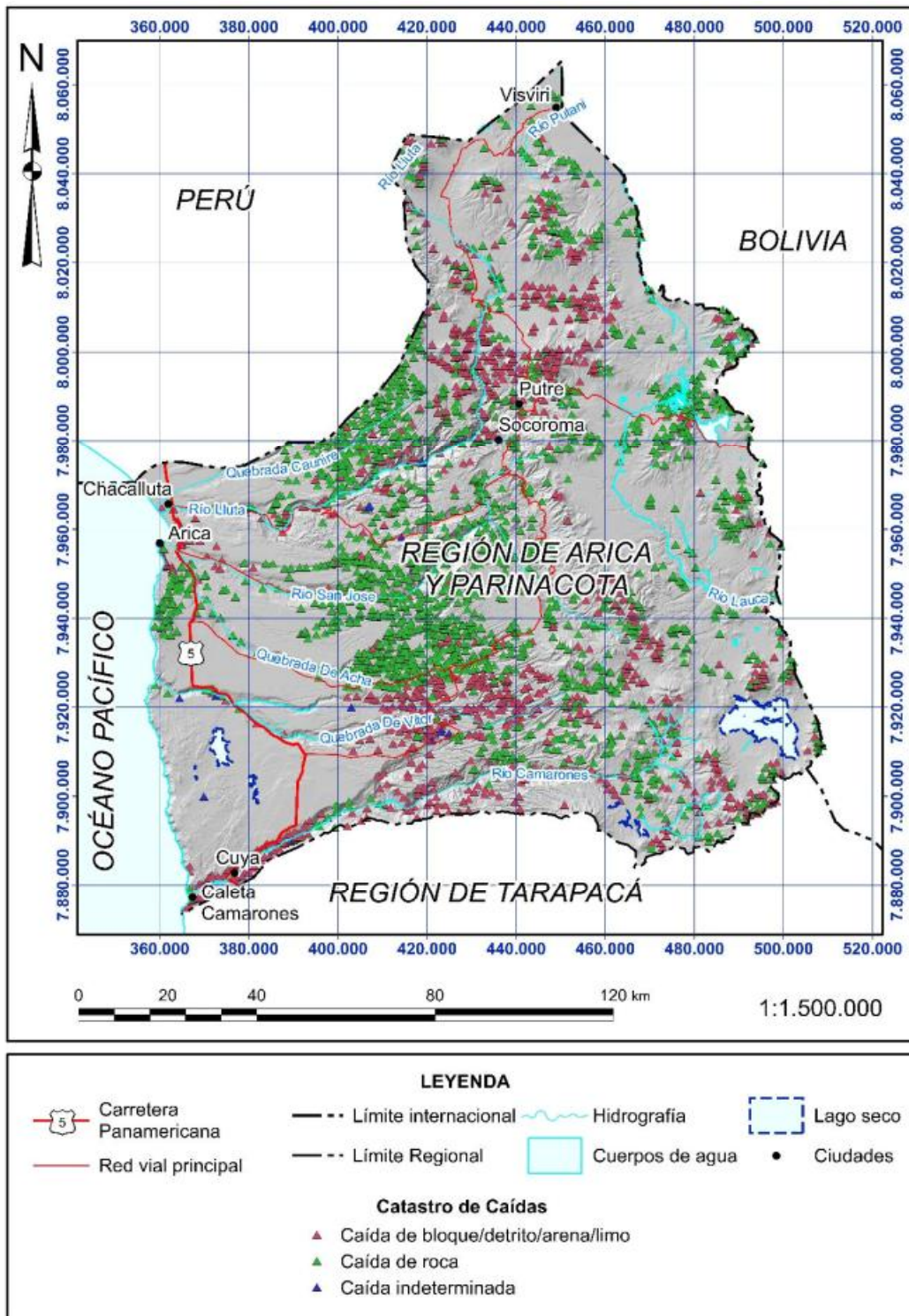


Fig. 29 Catastro puntual de caídas.

Es necesario destacar que los caminos son frecuentemente afectados por caída de bloques y/o sedimento, siendo este un mecanismo muy activo en la región. Las figuras a continuación (Fig. 30, Fig. 31, Fig. 32 y Fig. 33) muestran ejemplos de la condición descrita, afectando en algunos casos a zonas pobladas.



Fig. 30 Ejemplo de caídas de rocas desde laderas de quebrada Vítor, en cuenca costera río San José – Q. Camarones. Archivo de terreno (las flechas rojas indican la dirección de las caídas de roca desde su zona de generación). Fotografía izquierda, ID_RM 15140189, acceso a caleta Vítor (374794E; 7921505S). Fotografía derecha: vista de quebrada Vítor en sector de Chaca, ID_RM 15140078 (388013E; 7913892S) y 1514079 (388065E; 7913799S).



Fig. 31 Ejemplo de caídas de rocas desde laderas de quebrada Camarones. Archivo de terreno (las flechas amarillas indican ejemplo de trayectorias seguidas en caídas de material). Fotografía izquierda, ID_RM 15150002, ladera sur valle río Camarones (374794E; 7921505S). Fotografía derecha: acceso a Cuya (ruta 5), ID_RM 15150004 (377108E; 7884180S); y 15150205 (377776E; 7884692S).



Fig. 32 Ejemplo de caídas de rocas desde laderas del valle del río Lluta y del río San José. Archivo de terreno (las flechas rojas indican ejemplos de trayectorias de bloques). Fotografía izquierda, ID_RM 15120204, ladera sur valle río Lluta, ruta 11 sector Estación Rosario (379229E; 7963843S). Fotografía derecha: laderas del valle del río San José, ID_RM 15130446 (406496E; 7944688S).



Fig. 33 Ejemplo de caídas de rocas desde laderas de valle del río San José. Archivo de terreno (las flechas moradas indican ejemplo de trayectoria de deslizamientos; las flechas cafés indican flujos y flechas rojas indican caídas). Fotografía izquierda: ID_RM 15130440 (398381E; 7945750S) e ID_RM 15130419 (399026.28E; 7947780.87S), ladera norte valle del río San José (ruta A-27). Fotografía derecha: ladera sur valle de río San José, ID_RM 15130562 (397924E; 7945592S).



Fig. 34 Ejemplo de caída de rocas en ruta A-35 (esquemmatizada con líneas rojas). Archivo de terreno. ID_RM 15140102 (418338E, 7918113S).



Fig. 35 Ejemplo de caída de rocas en ruta A-331 (esquemmatizada con líneas rojas). Archivo de terreno. ID_RM 15150148 (426826E, 7913492S).



Fig. 36 Ejemplo de caída de rocas en ruta 11-CH (esquematzada con líneas rojas). Archivo de terreno. ID_RM 15121149 (447412E, 7990723S).

Las remociones de tipo Caída se encuentran asociadas a las zonas inclinadas que se encuentran a los costados de aquellos cauces que han generado una incisión considerable,

en zonas donde afloran rocas. En la parte oriental, de la región, también hay algunas en las laderas de los volcanes. De esta forma, la presencia de afloramientos de roca y las pendientes elevadas se pueden identificar como condicionantes relevantes para este tipo de remociones en masa.

En cuanto a su clasificación, dominan las Caídas de roca en un 64% de los casos y las Caída de bloque/detrito/arena/limo, en un 34% de los registros (Fig. 37).

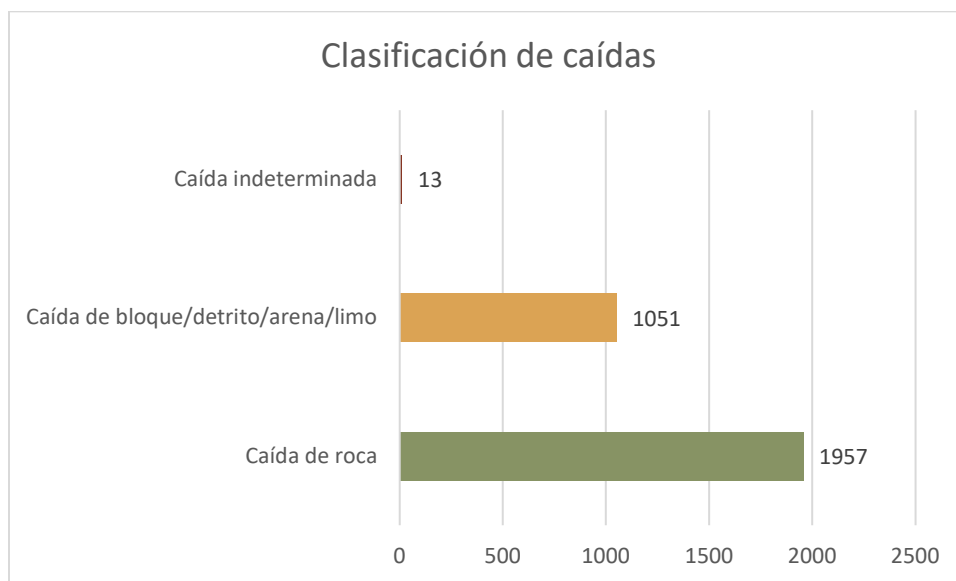


Fig. 37 Clasificación del subtipo para las remociones en masa tipo Caída.

4.3.2 Deslizamientos

Existen evidencias y registros de deslizamientos en la región, de distinto tipo, dimensiones y con distintos materiales involucrados (Fig. 38). En muchos casos, los deslizamientos se generan desde depósitos recientes (eólicos, coluviales y antrópicos) dispuestos sobre las laderas. También se reconocieron deslizamientos desde taludes y/o laderas intervenidas o como reactivaciones de mega-deslizamientos prehistóricos existentes en la región.

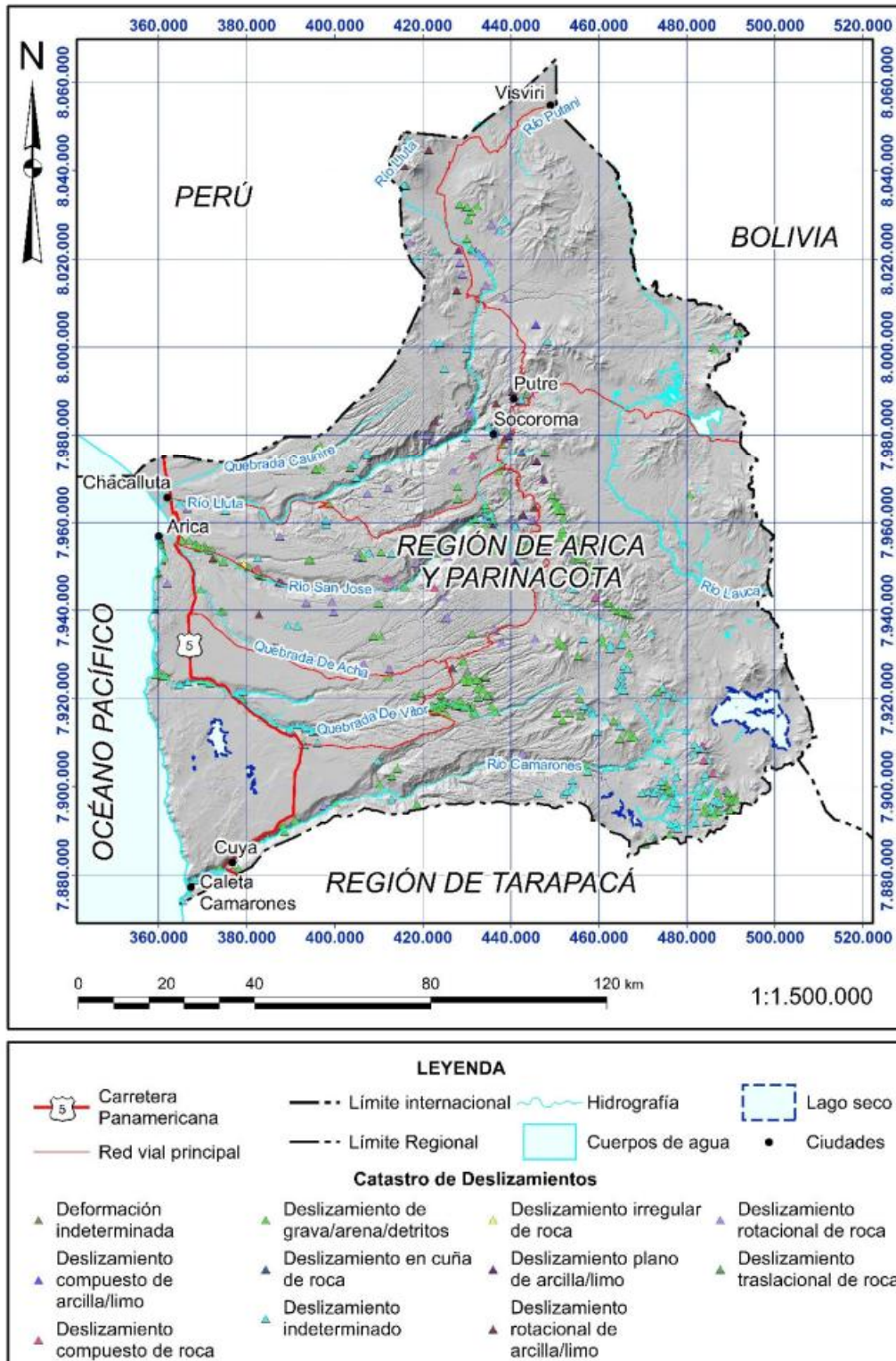


Fig. 38 Catastro de deslizamientos.

Las figuras a continuación muestran algunos ejemplos de los deslizamientos. En el primer caso (Fig. 39) se muestran deslizamientos de rocas y detritos provenientes de las laderas de la quebrada Camarones. Los materiales afectados corresponden a sedimentos de origen geológico (sedimentos coluviales y eólicos) así como materiales antrópicos depositados producto de la construcción de la ruta. En el mapeo y catastro de estas laderas, se pudo identificar más de un mecanismo (por ejemplo, deslizamientos combinados con caídas) con zonas de generación y alcance combinadas dentro de la ladera (condición descrita en el campo de notas). El mapeo poligonal en estos casos cubre la ladera a la escala definida para la toma del registro, quedando incluidos los distintos procesos en un solo polígono, diferenciando, dentro de lo posible, zonas de generación y alcance.

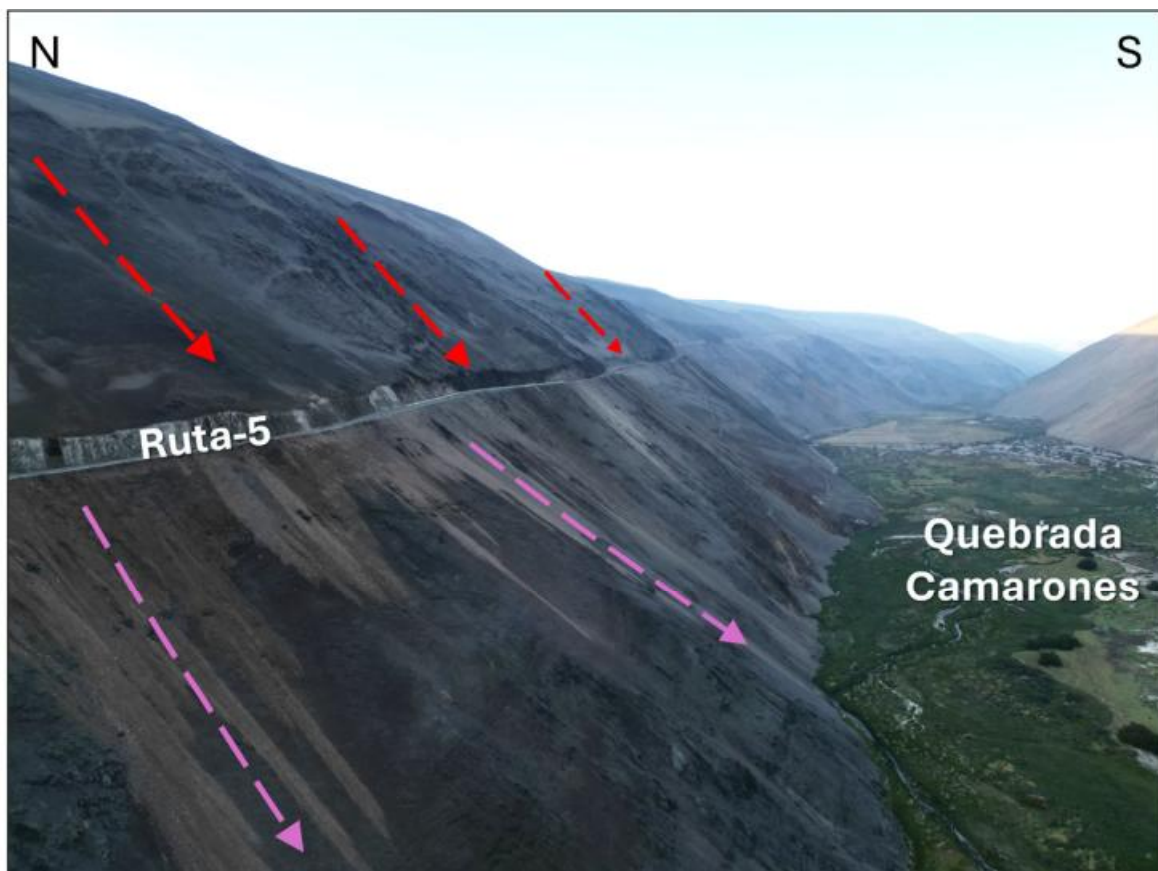


Fig. 39 Deslizamientos y caídas desde laderas de ruta 5, en cuenca de la quebrada Camarones. Archivo de terreno. Ruta 5 (Panamericana norte) en el acceso a Cuya (cuenca río Camarones), con evidencias de caídas destacados con flechas rojas y deslizamientos con flechas moradas. ID_RM 15150006 (378422E; 788485S).

Como se muestra en la Fig. 40, en algunos casos los deslizamientos afectan infraestructura y obras antrópicas, producto, por ejemplo, de la reducción de berma en las rutas o impacto en la población y sus obras. Un caso reciente de deslizamiento que afectó la ruta A-345 de

la región se muestra en la Fig. 41, donde el deslizamiento incluso destruyó las obras de mitigación, llegando hasta el otro lado del camino.



Fig. 40 Deslizamientos que afectan infraestructura y obras antrópicas. Archivo de terreno. Fotografía izquierda: ruta 11, acceso a sector de El Tambo con evidencias de deslizamientos (flechas moradas) de materiales antrópicos sobre canal de regadío (ID_RM 15120207, 392149E; 7965106S). Fotografía derecha: ruta 5 (Panamericana norte) en el acceso a Cuya con evidencia de deslizamientos que afectan berma y calzada (indicado y flecha morada). ID_RM 15150004 (377108E; 7884180S).



Fig. 41 Ejemplo de deslizamiento en la ruta A-345 (flechas moradas esquematizan dirección de movimiento del material deslizado; línea segmentada amarilla señala el escarpe). ID_RM: 15150239 (400243E, 7896315S)

Las fotografías de la Fig. 42 muestran ejemplos de deslizamientos alrededor de zonas pobladas del valle del río San José, en el sector de San Miguel de Azapa (también conocido como Valle de Azapa).



Fig. 42 Deslizamientos desde laderas del valle del río San José en zonas pobladas entorno a San Miguel de Azapa (las flechas moradas esquematizan dirección del material deslizado, línea segmentada amarilla indica escarpes). Archivo de terreno. Fotografía izquierda ruta A-27, sector de gruta ID_RM 15130382 (379413E; 7950582S). Fotografía derecha ID_RM 15130559 (382522E; 7949695S). Fotografía baja capturada desde mismo sector de gruta en la vertiente sur del valle.

Existen, además, deslizamientos de grandes dimensiones que se reconocen en el inicio de microcuencas (que combinan además con mecanismos tipo caídas y flujos) como se muestra en las fotografías de la Fig. 43 en las microcuencas que drenan hacia el sector de Poconchile, en la cuenca del río Lluta, contribuyendo con el aporte de material hacia dicha quebrada, afectando al valle y viviendas del poblado.

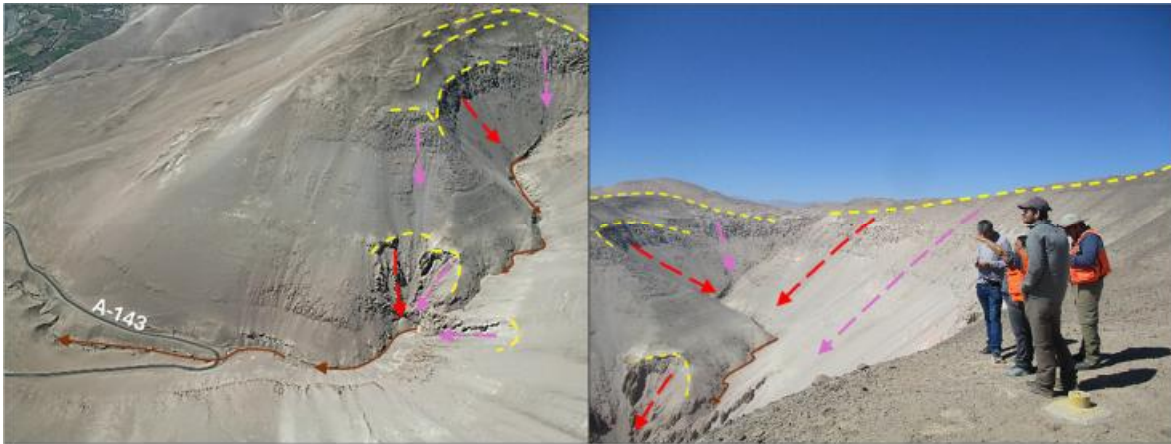


Fig. 43 Deslizamientos desde laderas de microcuenca en el sector de Poconchile. Archivo de terreno (las flechas moradas esquematizan la dirección de los deslizamientos; las rojas, indican caídas; las líneas segmentadas amarillas señalan escarpes). Sector Poconchile, acceso por ruta A-143 (ID_RM 15120215, 387558E; 7956871S).

De acuerdo con el catastro, las categorías dominantes corresponden a los deslizamientos indeterminados y los deslizamientos de grava/arena/detritos, cada uno con un 45% de los registros (Fig. 44). En cuanto al material asociado, un 54% corresponde a roca y suelo/sedimento (Fig. 45).

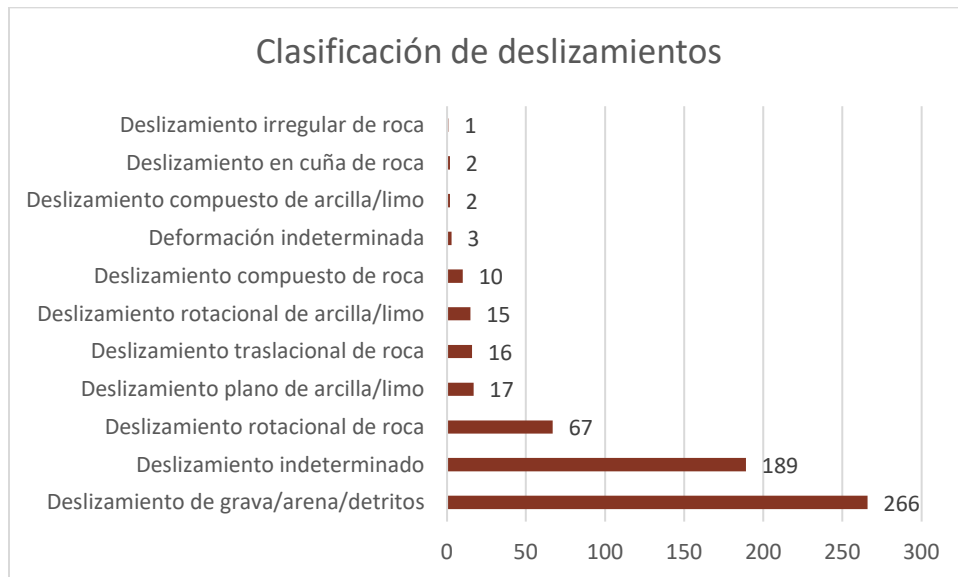


Fig. 44 Clasificación del subtipo para las remociones en masa tipo Deslizamiento.

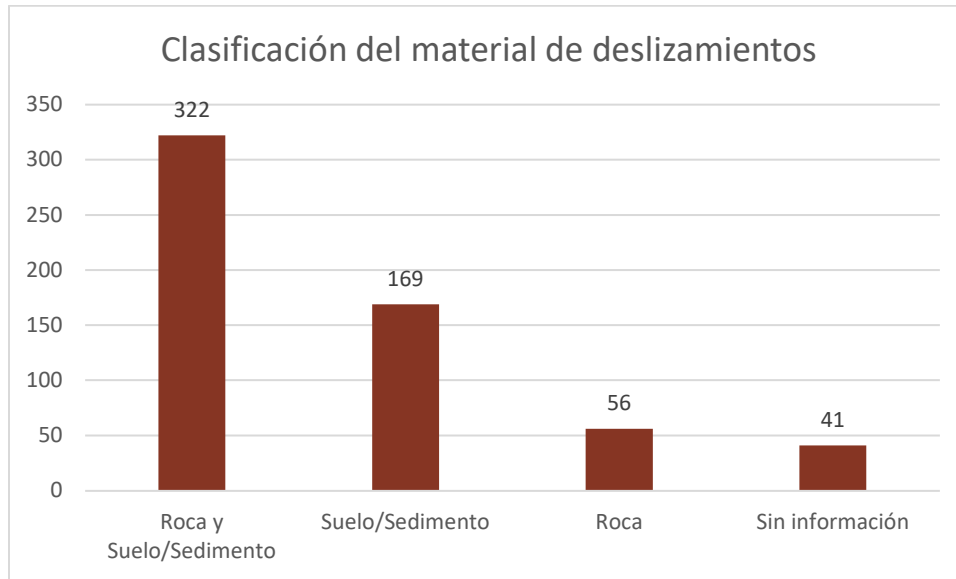


Fig. 45 Clasificación del material para las remociones en masa tipo Deslizamiento.

Los deslizamientos reconocidos en la región se asocian a condiciones de alta pendiente, ya sea en las laderas que se encuentran junto a los cauces principales o a zonas montañosas.

4.3.3 Flujos

En la región se reconocen flujos de distintos tipos y que afectan variados materiales (Fig. 46). En la zona costera, muchos flujos descienden desde las profundas laderas de las quebradas (como por ejemplo Vitor, Lluta, Acha, San José, Camarones, entre otras) que se generan especialmente en el cambio de pendiente entre las planicies superiores y el fondo del valle. En general, los flujos en las zonas costeras arrastran materiales de menor granulometría (detritos finos, arenas). También se identificaron flujos (especialmente de detritos) hacia la Precordillera y Cordillera Occidental, arrastrando materiales de mayor granulometría.

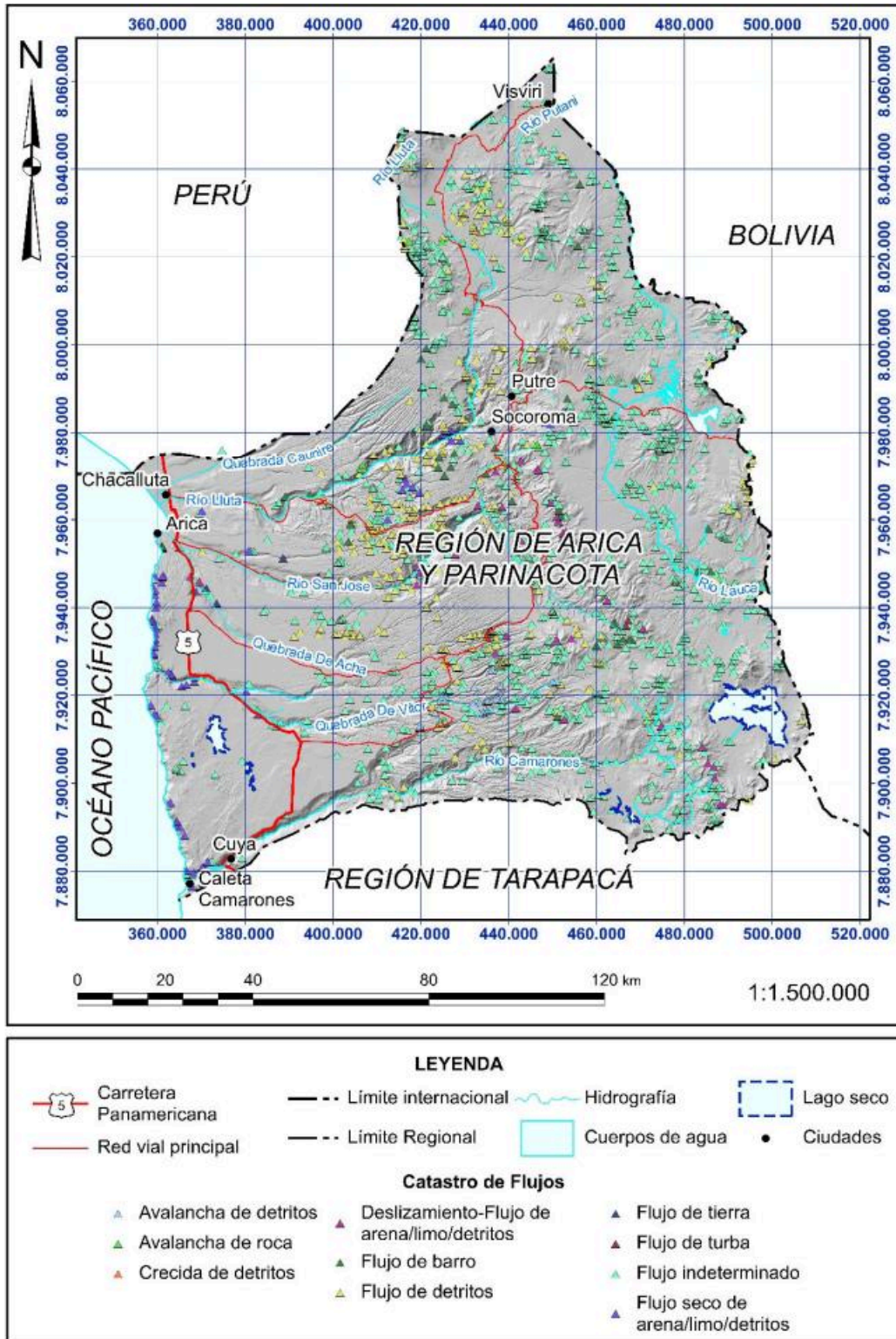


Fig. 46 Catastro de flujos.

Las fotografías de las figuras a continuación muestran ejemplos de flujos en distintos sectores de la región. En las zonas costeras, específicamente en la quebrada de Vítor (perteneciente a la cuenca costera R. San José – Q. Camarones) existen flujos que descienden desde marcadas quebradas (con forma de V) y depositan sus materiales hacia el valle, en zonas con obras humanas (Fig. 47).



Fig. 47 Flujos desde ladera norte de quebrada Vítor hacia zonas con intervención antrópica. Sector quebrada y caleta Vítor. Archivo de terreno. Fotografía izquierda: flujo destacado con flecha café (ID_RM 15140041, coordenadas 360168E; 7926807S) y deslizamientos (ID_RM 15140042 y 15140043) destacados con flechas moradas; escarpes esquematizados con líneas segmentadas amarillas. Fotografía derecha: detalle de flujo ID_RM 1514041, mostrando la dirección del flujo principal mediante flechas cafés.

En la fotografía de la Fig. 48, se muestran remociones en masa (pertenecientes al catastro) de tipo flujo, caídas y deslizamientos reconocidas y validadas en terreno en la quebrada Camarones.

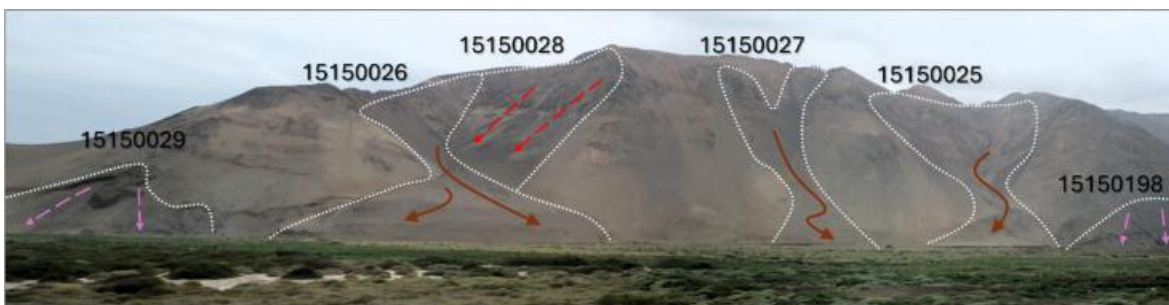


Fig. 48 Flujos, caídas y deslizamientos desde ladera norte de quebrada Camarones. Archivo de terreno. Sector quebrada y caleta Camarones. Fotografía muestra varias remociones en masa. Como referencia flujo (ID_RM 15150025), coordenadas 367657E; 7879365S. Las líneas punteadas blancas destacan los límites de las remociones en masa, y con flechas rojas/moradas/cafés la dirección del movimiento de material.

En específico, la Fig. 49 muestra un detalle del flujo asociado a la remoción en masa ID_RM 15150025, en la que la captura realizada en terreno (mediante un vuelo dron), permite caracterizar la zona de generación, así como la zona de depósito en forma de abanico.



Fig. 49 Flujo desde ladera norte de quebrada Camarones. Archivo de terreno. Sector quebrada y caleta Camarones. Fotografía muestra flujo (ID_RM 15150025, coordenadas 367657E; 7879365S). Con líneas amarillas se destaca el área afectada y/o escarpes, y con flechas cafés la dirección del flujo.

En muchas ocasiones, se identificaron flujos en zonas urbanas o intervenidas por el ser humano en las que, por ejemplo, se identifica basura en el eje del cauce, viviendas o infraestructura ubicada en la zona de alcance del flujo (Fig. 50), en algunos casos descritos como zonas críticas.

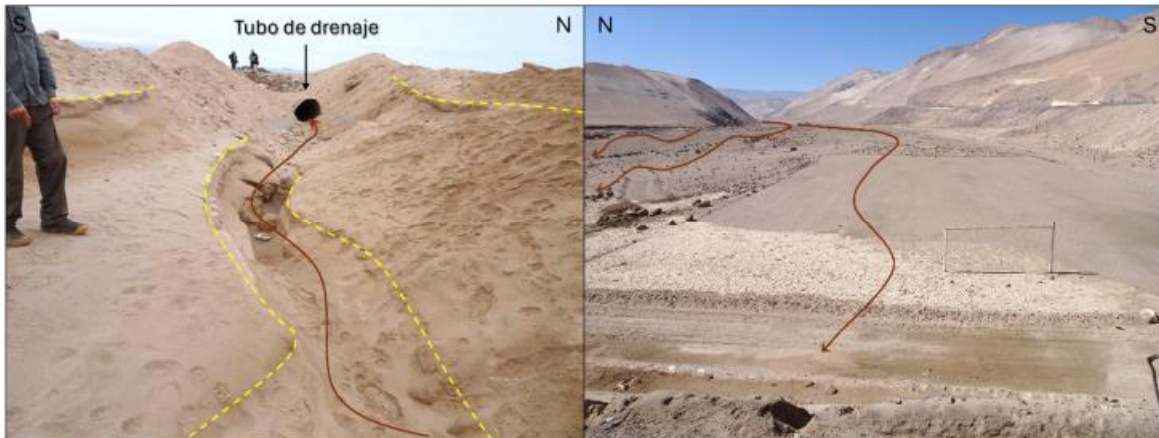


Fig. 50 Archivo de terreno (con flechas cafés se destaca la dirección de los flujos). Fotografía izquierda: flujo en zona urbana en la desembocadura de la quebrada Caunire, cuenca de la quebrada de la Concordia (359821E; 7965597S). Fotografía derecha: flujo en ruta 11 (puente sector Los Molinos) ID_RM 15120216 (396831E; 7964747S) con intervención antrópica.

Hacia el sector precordillerano, también se reconocen flujos en zonas intervenidas, como es el caso del flujo que atraviesa las instalaciones de la planta de bórax (Fig. 51), en la ruta 11. No obstante, en este sector industrial tienen construidos pretils de baja altura en los drenajes que van directamente a la planta.



Fig. 51 Evidencias de flujos en la ruta 11 – sector planta de bórax, cuenca del río Lluta. Archivo de terreno. Se destaca con flechas cafés la dirección de los flujos. Fotografías muestran zona de flujos en zona intervenida. Coordenadas referenciales ID_RM 15120119 (408291E; 7959254S).

En la cuesta del sector El Tambo (rumbo a Zapahuira) de la ruta 11, se reconocen flujos que atraviesan la ruta y cuentan con algunas obras de canalización y disipación de energía (Fig. 52).

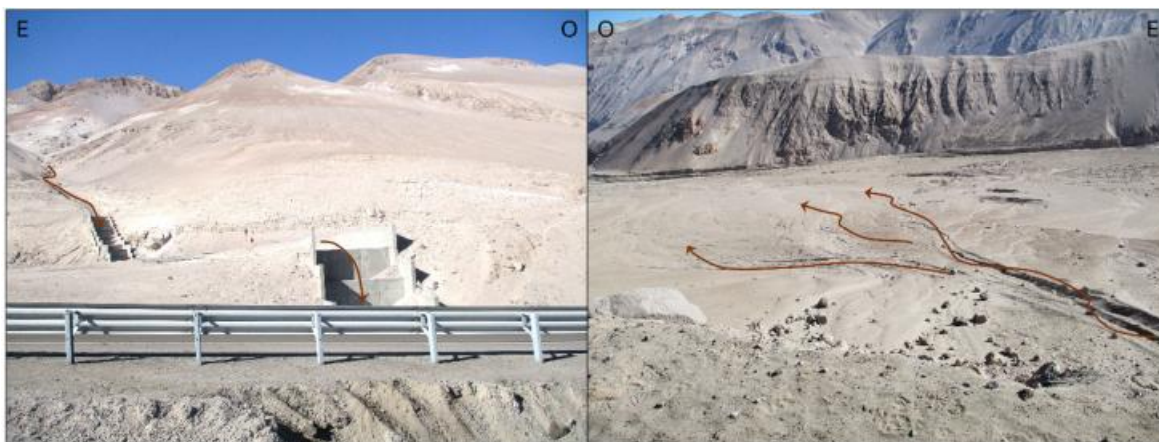


Fig. 52 Evidencias de flujo en la ruta 11 – cuesta sector El Tambo, cuenca del río Lluta. Archivo de terreno (se destaca con flechas cafés la dirección del flujo). Fotografía izquierda: muestra obras de canalización y disipación de energía de flujo que atraviesa ruta. Fotografía derecha, muestra continuidad del flujo hacia quebrada Lluta. Coordenadas referenciales ID_RM 15120209 (399263E; 7963727S).

Hacia la zona precordillerana y de la Cordillera Occidental, los flujos aumentan su granulometría, observándose principalmente flujos de detritos (Fig. 53). También se puede evidenciar que cuando los flujos pasan de la Cordillera Occidental, principalmente correspondiente a la zona de transporte y erosión, al llegar al Altiplano comienzan a depositar el material transportado.

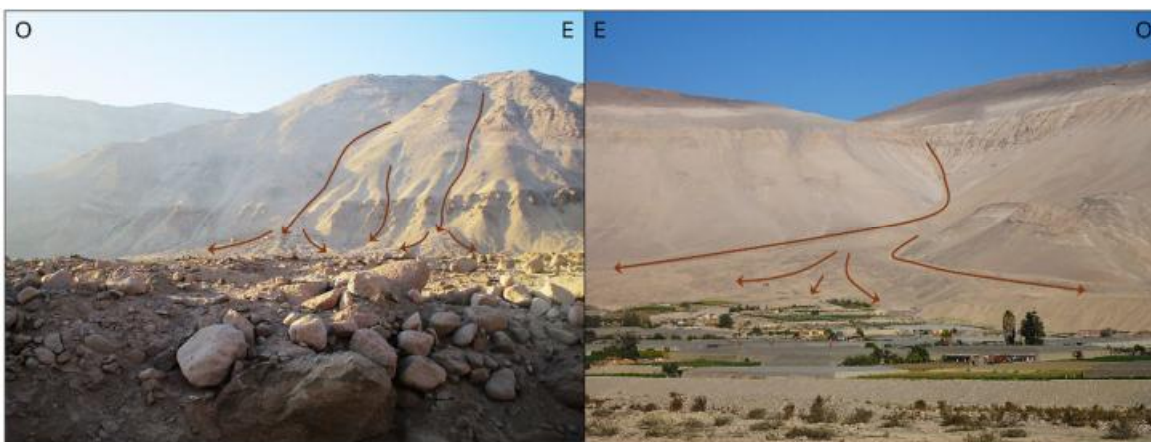


Fig. 53 Evidencias de flujo en quebrada San José (valle de Azapa). Archivo de terreno (las flechas cafés indican la dirección de los flujos). Fotografía izquierda: flujo de detritos hacia ruta A-27 ID_RM 15131356 (401803E; 7945006S), ladera norte de valle del río San José. Fotografía derecha, muestra flujo hacia zonas pobladas, ladera sur del río San José.

En la Fig. 54, se muestra otro ejemplo de flujos del sector Cordillera Occidental, específicamente atravesando la ruta A-31 que conecta los poblados cordilleranos. En una única y estrecha ruta altamente expuesta a estos procesos. Las fotografías capturadas en

terreno (mediante cámara fotográfica digital y dron) permite reconocer y dimensionar la zona de magnitud estos eventos.



Fig. 54 Evidencias de flujo de detritos en ruta A-31 camino a Belén. Archivo de terreno (las flechas cafés indican la dirección del flujo). Fotografía izquierda y derecha, ID_RM 15130212 (448304E; 7959021S).



Fig. 55 Evidencias de flujos llegando a la zona de depositación en el Altiplano. Archivo de terreno (flechas cafés esquematizan dirección de flujos). ID_RM 15100637 (coordenadas 486034E; 7948231S).

De acuerdo con el catastro, el tipo de flujo dominante corresponde a los flujos indeterminados (66%), seguidos por los flujos de detritos y los flujos secos de arena/limo/detritos, con un 21% y 4%, respectivamente (Fig. 56). En cuanto al material, roca y suelo/sedimento son los más abundantes, con un 40% (Fig. 57).

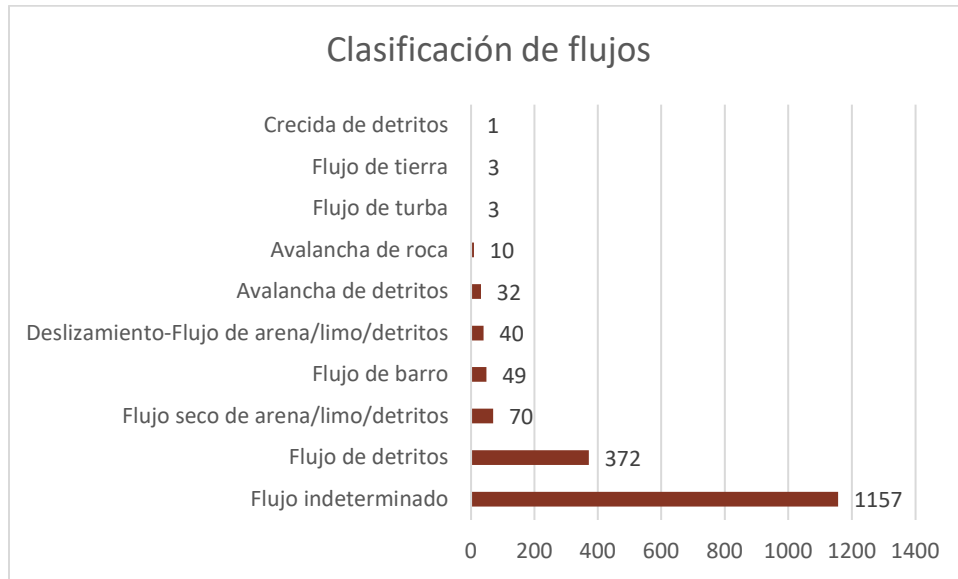


Fig. 56 Clasificación del subtipo para las remociones en masa tipo Flujo.

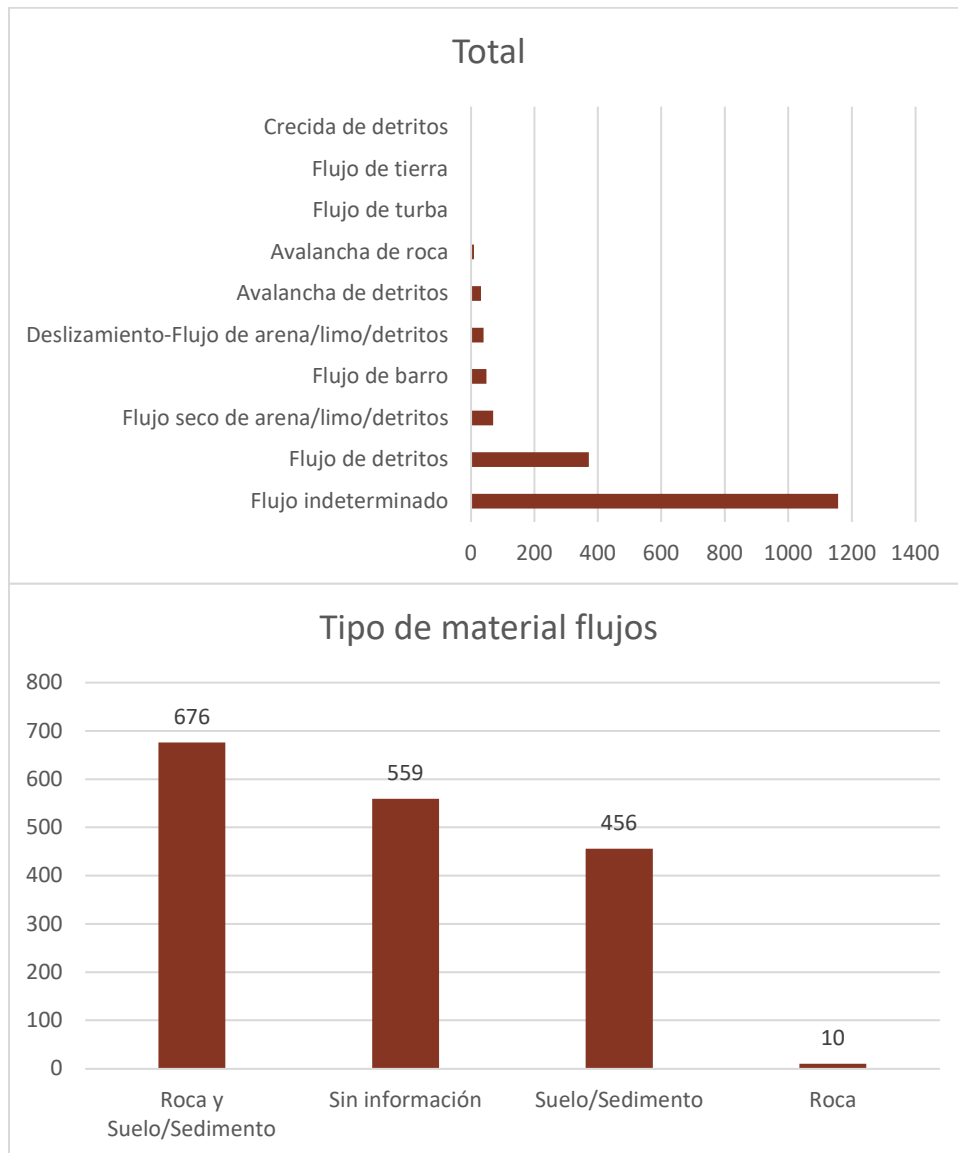


Fig. 57 Clasificación del material para las remociones en masa tipo Flujo.

En el catastro, los flujos se asocian a dos condiciones principales. El primero de ellos corresponden a los cauces propiamente tal, donde ocurren flujos que se pueden extender por decenas de kilómetros. El segundo corresponde a flujos cortos, pero en zonas de mucha pendiente. Entre estos, son frecuentes los flujos secos de arena/limo/detritos, los flujos de detritos y deslizamientos-flujo de arena /limo/detritos.

4.3.4 Deformación de ladera y otros

Por último, se reconocieron doce casos de deformación de ladera, donde en un 50% de los casos se determinó como deformación indeterminada y un volcamiento, identificado como volcamiento de roca

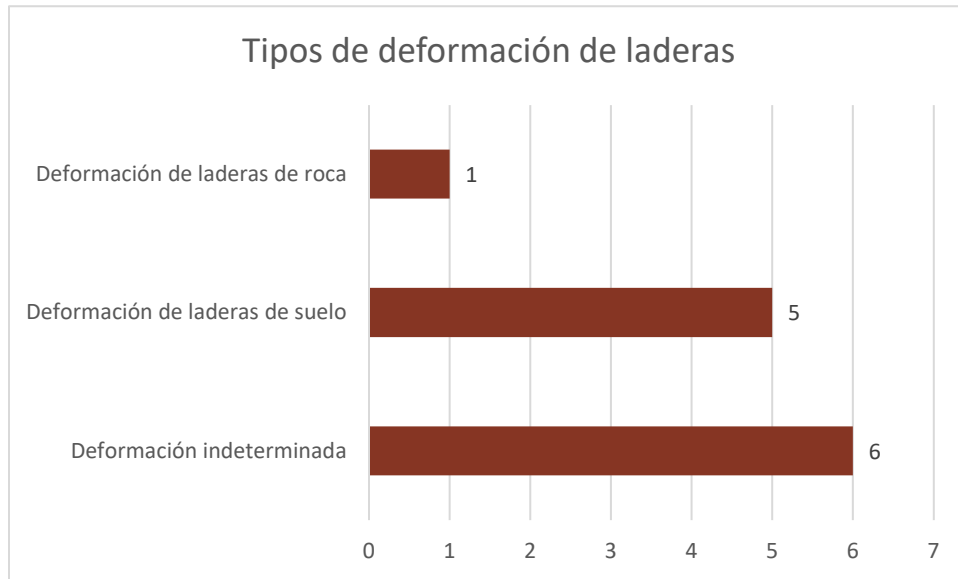


Fig. 58 Clasificación de tipos de deformación de ladera.



Fig. 59 Deformación de ladera. En amarillo se destaca la zona de deformación de ladera. Archivo de terreno. ID_RM 15121159 (coordenadas 433407E; 8010268S).

5 SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA

La evaluación de susceptibilidad de remociones en masa para la región de Arica y Parinacota está orientada a identificar las zonas con potencial de generación y alcance de procesos de remoción en masa.

Dadas las características de los procesos estudiados, se evalúa de forma independiente la susceptibilidad de remociones en masa tipo: 1) flujos (FL) y 2) deslizamientos y caídas (DC). El producto final corresponde a mapas de susceptibilidad de los tipos de remociones en masa mencionados a escala 1:250.000, además de mapas de síntesis que integran ambos tipos de remociones en masa.

A continuación, se describe la metodología utilizada para elaborar los mapas, las ponderaciones resultantes para construir los mapas y los resultados preliminares que se han obtenido hasta este momento.

5.1 Metodología

La asignación de niveles de susceptibilidad en este estudio considera que la susceptibilidad depende de determinados factores condicionantes y, por lo tanto, asigna un determinado peso o importancia a los valores que adopte cada uno de ellos. La Fig. 60 ilustra el flujo del procedimiento seguido para el desarrollo de los mapas de susceptibilidad, dividido en seis pasos y, a continuación, se describen brevemente los pasos de la metodología.

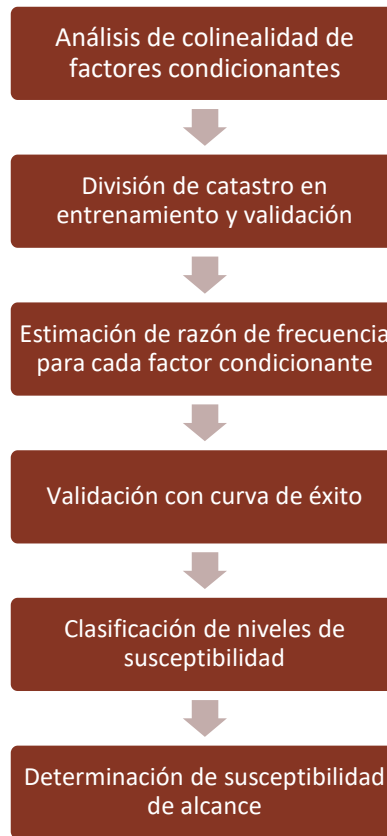


Fig. 60 Metodología para la generación de mapas de susceptibilidad y alcance de remociones en masa.

5.1.1 Análisis de colinealidad de factores condicionantes

El procedimiento para la asignación de peso a las variables se basa en la incidencia que puedan tener diferentes factores condicionantes. Sin embargo, es posible que exista dependencia entre algunos de los factores condicionantes previamente definidos. De esta forma, para evitar o disminuir la duplicación de información, el primer paso es evaluar la colinealidad entre los factores condicionantes, es decir, la correspondencia o relación recíproca entre los factores.

Para ello, se utilizó el paquete de herramientas en lenguaje R llamada ENMTools (Warren, et al., 2021). Esta herramienta fue desarrollada para elaborar modelos de nichos ambientales biológicos, sin embargo, sus algoritmos, en particular la función *raster.cor.matrix(env)* que permite la determinar el coeficiente de correlación de Pearson entre diferentes pares capas de entrada, también es aplicable para calcular la colinealidad entre los factores condicionantes de remociones en masa en una grilla geoespacial.

Luego, en función de los resultados, se definen criterios para determinar qué variables se deben utilizar y cuáles deben descartarse. Además, cabe destacar que, según la

interpretación del coeficiente de correlación de Pearson, existe una fuerte correlación entre dos variables si el valor es mayor a 0,5.

5.1.2 División del catastro en entrenamiento y validación

En este trabajo, el modelo de susceptibilidad se valida mediante curva de éxito. Para poder realizar esta verificación del modelo, es necesario dividir aleatoriamente el catastro de puntos en un porcentaje de entrenamiento y un porcentaje de validación.

Se define un 70% de catastro para entrenamiento, es decir que con este porcentaje se desarrolla el modelo, y un 30% de catastro para la validación, el cual se utiliza para la verificación de la capacidad de predicción del modelo mediante curva de éxito.

5.1.3 Estimación de razón de frecuencia

Para la construcción del mapa de susceptibilidad, se utilizó un método estadístico bivariado conocido como razón de frecuencia. Este método asume que existe una relación entre las características de las capas utilizadas, representadas por valores (cualitativos o cuantitativos) de cada una de ellas, y una variable resultante, en este caso la generación de remociones en masa. De esta forma, este método permite asignar pesos a las unidades de cada capa, con bases estadísticas, a partir del catastro.

La razón de frecuencia se ha utilizado en múltiples estudios (ej. Choi et al. (2012), Ehret et al. (2010), Lee (2014) en Silalahi et al. (2019)), el cual calcula la razón entre la ocurrencia de remociones en masa (RM) y los factores condicionantes.

La razón de frecuencia (RF) se calcula de forma independiente para cada unidad o intervalo de cada factor condicionante (Fi), a partir de la siguiente fórmula:

$$RF \text{ de } Fi = \frac{\text{cantidad de RM en } Fi / \text{cantidad de RM en el área total}}{\text{área que abarca } Fi / \text{área total}}$$

Para este cálculo, se utiliza el 70% del catastro destinado a entrenamiento.

El resultado es una serie de ponderadores que indican el grado de favorabilidad de que ocurran remociones en masa para cierto valor en un determinado mapa temático. De esta forma, mientras mayor sea el valor de la razón de frecuencia, mayor será la favorabilidad.

Luego de definir los valores de razón de frecuencia para cada factor condicionante, se suman los resultados de cada factor para obtener la razón de frecuencia total y con ello la susceptibilidad de remociones en masa:

$$\text{Susceptibilidad} = \sum RF$$

5.1.4 Validación con curva de éxito

En esta etapa se comparan los resultados de susceptibilidad de generación con el 30% del catastro separado para validación, para evaluar si el modelo utilizado es aceptable. Este procedimiento se realizó mediante curvas de éxito, técnica que se usa para evaluar si el modelo utilizado para el cálculo de la susceptibilidad es aceptable.

Para evaluar y validar el resultado obtenido para el mapa de susceptibilidad de remociones en masa, algunos autores recomiendan el método de curvas o razón de éxito (González, et al., 2022; Servicio geológico colombiano, 2017), técnica de validación formal que permite evaluar la calidad del modelo utilizado para el cálculo de la susceptibilidad mediante el análisis de la coincidencia espacial entre los valores del ráster de susceptibilidad y el catastro puntual de remociones en masa (SafeLand, (2011) en Arenas y Opazo (2017)).

De esta manera, la capa de susceptibilidad de remociones en masa de generación se categorizó en 100 percentiles con un orden decreciente tal que el percentil 1 corresponda a los índices de susceptibilidad más altos mientras que el percentil 100 a los más bajos. Luego, el 30% de las remociones en masa catastradas seleccionadas para la validación, se cotejaron y asignaron a estas categorías, obteniendo así la cantidad de remociones en masa contenidas en cada una de las categorías de susceptibilidad.

Con los datos ordenados, se graficó el porcentaje acumulado de remociones en masa en función del porcentaje acumulado del área de la zona de estudio a partir de los 100 percentiles generados. Así, se obtuvo la curva de éxito donde su área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) debía ser mayor al 70% para considerar el modelo como aceptable (González, et al., 2022).

5.1.5 Clasificación de niveles de susceptibilidad

Con la curva de éxito construida para cada mapa, se procede a hacer distintas pruebas de distribución de los datos para los niveles de susceptibilidad. Estas distribuciones son revisadas en visitas a terreno y contrastando con los sectores críticos reconocidos en la región. A partir de ello, se definieron valores de corte en la escala de favorabilidad para categorizarla de manera que esta logre representar adecuadamente los niveles de susceptibilidad en la región, que son bajo, moderado, alto y muy alto.

5.1.6 Definición de alcance

Para la definición de alcance, tanto para flujos como para caídas y deslizamientos, se utilizó la herramienta *Gravitational Process Path model* (GPP) (Wichmann, 2017) del software SAGA GIS. Sin embargo, para definir los parámetros de entrada a utilizar se usaron distintas metodologías que son descritas a continuación.

5.1.6.1 Flujos de barro y/o detritos

Para la primera componente, relacionada a la trayectoria (*process path*), se seleccionó el modelo estocástico *Random Walk*, para 100 iteraciones, que hace posible la dispersión lateral de las partículas a partir de un determinado ángulo umbral.

Para la segunda componente, relacionada a la distancia de alcance (*run-out*), se escogió el modelo de fricción de dos parámetros PCM (Perla, et al., 1980).

Convenientemente, los diferentes parámetros que determinan la trayectoria y el alcance de la modelación pudieron ser calibrados a partir de las características propias de los flujos ocurridos en el área de estudio y que se encuentran almacenados en el catastro. Para ello, se utilizó el paquete *runoptGPP* desarrollado por Goetz y otros (2021), sobre un total de 324 flujos catastrados (de área mayor a 0.1 km²) con el propósito de encontrar la combinación de los parámetros que mejor replican el área cubierta por los polígonos mapeados: Pendiente Umbral, Exponente, Factor de Persistencia, Coeficiente de Fricción (μ) y la Razón de Masa a Arrastrar (M/D).

5.1.6.2 Caída y deslizamiento

Para la primera componente relacionada a la trayectoria del proceso (*process path*), se seleccionó el modelo estocástico *Random Walk*, para 100 iteraciones, que hace posible la dispersión lateral de las partículas a partir de un determinado ángulo umbral.

Para la segunda componente, relacionada a la distancia de alcance (*run-out*), se escogió el modelo del principio de Fahrböschung (Heim, 1932). Este principio se basa en la obtención del ángulo de Fahrböschung (α) (Fig. 61), el cual se estimó aplicando un método empírico-estadístico del estilo de Brideau y otros (2021), basado en una muestra del catastro de caídas y deslizamientos construido para el estudio. De esta manera, se relaciona la razón entre la diferencia de la altura de caída (ΔH) y la distancia del alcance (L) (Fig. 61), con el volumen total de la remoción (V). Por otro lado, debido a que sólo se contaba con el área (A) de cada remoción, su volumen fue estimado por la ley de potencia que relaciona a ambos parámetros según Guzzetti y otros (2009).

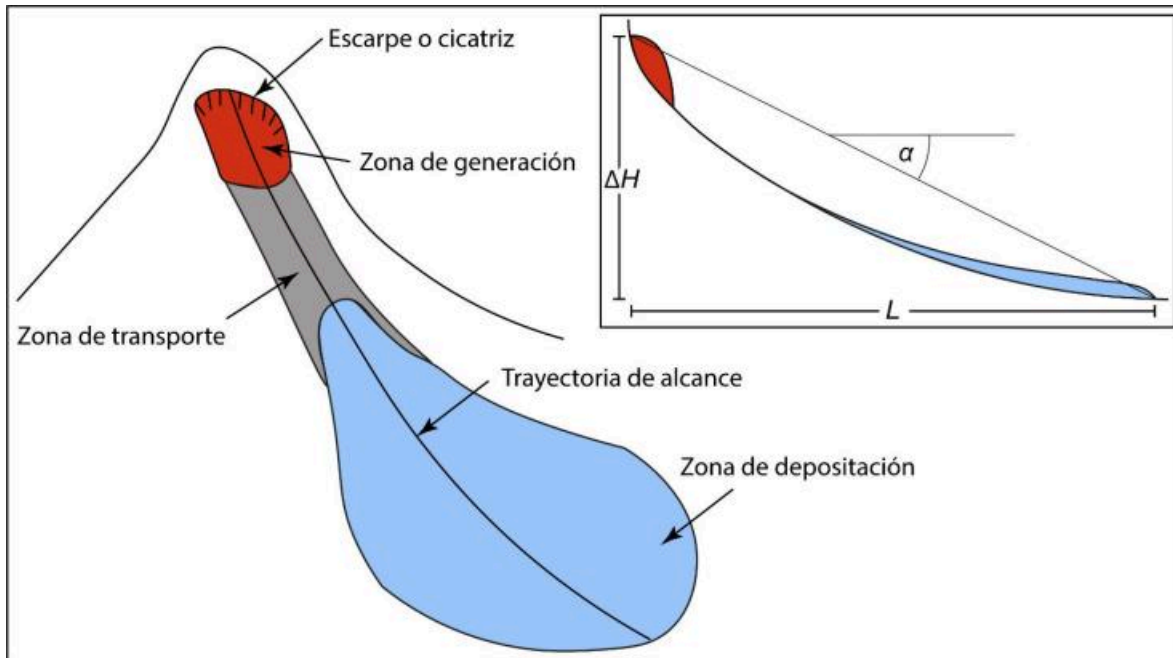


Fig. 61 Esquema de la relación de la altura de caída (ΔH), la distancia de viaje a (L), ángulo de Fahrböschung (α) (Heim, 1932) y la definición de escarpe y las zonas de generación, transporte y depositación. El área de impacto es la unión entra las zonas de generación, transporte y depositación.

5.2 Resultados

5.2.1 Análisis de colinealidad

Como criterio general, se definió que existe colinealidad entre dos parámetros cuando el valor de la correlación de Pearson es mayor o igual que 0.5.

Según los resultados que se muestran en la Tabla 3 y Tabla 4, que representan la colinealidad mediante correlación de Pearson, existiría una correlación con valores mayores a 0.5 entre los factores elevación, clima y crioclastia, a su vez, entre los factores de razón de Melton y pendiente.

Tabla 3 Análisis de colinealidad para caídas y deslizamientos.

	Alteraciones	Aspecto	Clima	Crioclastia	Curvatura	Elevación	Fallas	Geomorfología	Pendiente	Litología reagrupada
Alteraciones		-0.02	0.09	0.04	0.02	0.11	0.00	-0.05	0.06	0.00
Aspecto	-0.02		-0.11	-0.07	-0.01	-0.15	0.01	0.13	0.00	0.05
Clima	0.09	-0.11		0.33	0.02	0.65	-0.08	-0.42	-0.16	-0.14
Crioclastia	0.04	-0.07	0.33		0.01	0.58	-0.08	-0.19	0.10	-0.16
Curvatura	0.02	-0.01	0.02	0.01		0.02	0.01	-0.02	0.01	-0.02
Elevación	0.11	-0.15	0.65	0.58	0.02		-0.09	-0.45	0.05	-0.34
Fallas	0.00	0.01	-0.08	-0.08	0.01	-0.09		0.00	0.05	0.02
Geomorfología	-0.05	0.13	-0.42	-0.19	-0.02	-0.45	0.00		0.40	0.02
Pendiente	0.06	0.00	-0.16	0.10	0.01	0.05	0.05	0.40		-0.14
Litología reagrupada	0.00	0.05	-0.14	-0.16	-0.02	-0.34	0.02	0.02	-0.14	

Tabla 4 Análisis de colinealidad para flujos.

	Alteraciones	Aspecto	Clima	Curvatura	Elevación	Fallas	Geomorfología	Factor LS	Razón de Melton	Pendiente	Litología reagrupada
Alteraciones		-0.02	0.09	0.02	0.11	0.00	-0.05	0.00	0.00	0.06	0.00
Aspecto	-0.02		-0.11	-0.01	-0.15	0.01	0.13	0.02	-0.02	0.00	0.06
Clima	0.09	-0.11		0.02	0.65	-0.08	-0.42	-0.01	0.00	-0.16	-0.13
Curvatura	0.02	-0.01	0.02		0.02	0.01	-0.02	0.29	0.32	0.01	-0.02
Elevación	0.11	-0.15	0.65	0.02		-0.09	-0.45	-0.08	0.11	0.05	-0.32
Fallas	0.00	0.01	-0.08	0.01	-0.09		0.00	-0.03	0.00	0.05	-0.01
Geomorfología	-0.05	0.13	-0.42	-0.02	-0.45	0.00		-0.08	-0.17	0.40	0.05
Factor LS	0.00	0.02	-0.01	0.29	-0.08	-0.03	-0.08		0.00	-0.21	0.03
Razón de Melton	0.00	-0.02	0.00	0.32	0.11	0.00	-0.17	0.00		0.53	-0.26
Pendiente	0.06	0.00	-0.16	0.01	0.05	0.05	0.40	-0.21	0.53		-0.14
Litología reagrupada	0.00	0.06	-0.13	-0.02	-0.32	-0.01	0.05	0.03	-0.26	-0.14	

5.2.2 División del catastro en entrenamiento y validación

Del catastro primero se extrajeron todos los puntos que se encontraban en la zona se generación (según su rasgo identificado) y luego tomaron, por un lado, todas las caídas y deslizamientos y por otro lado los flujos, con un total de 3.493 y 1.473 puntos respectivamente, los cuales se separaron cada uno en un 70% de entrenamiento y 30% para validar, la cantidad de puntos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Cantidad de puntos seleccionados para entrenamiento y validación.

	Caídas y deslizamientos	Flujos
70%	2.445	1.031
30%	1.048	442
100%	3.493	1.473

5.2.3 Estimación de razón de frecuencia y validación con curva de éxito

Se probaron distintas combinaciones de mapas de factores condicionantes, descartando en cada prueba algunas de las capas que muestran correlación y, además, descartando factores condicionantes en las que sus unidades o intervalos tuvieran valores de razón de frecuencia muy similares.

Cada una de las iteraciones se validó mediante la revisión del área bajo la curva de éxito y se seleccionó para cada proceso, aquella combinación de factores que tuviera el valor más alto de área bajo la curva.

Los resultados de este proceso muestran que las combinaciones de capas con mejores resultados, definidos a partir de la validación con curva de éxito, serían las siguientes:

Tabla 6 Factores condicionantes a utilizar en cada proceso para el análisis de susceptibilidad.

	Flujos	Caídas y deslizamientos
Elevación	X	X
Alteración	X	
Aspecto		X
Clima		
Crioclastia		
Curvatura	X	X
Fallas		X
Litología	X	X
Geomorfología	X	X
Factor LS	X	
Razón de Melton	X	
Pendiente		X
Uso de suelo	X	X

5.2.3.1 Curva de éxito de flujos

La Curva de Éxito para el análisis de susceptibilidad de flujos en la región, presenta un área bajo la curva de 75% ($ABC = 0,75$), como se muestra en la Fig. 62.

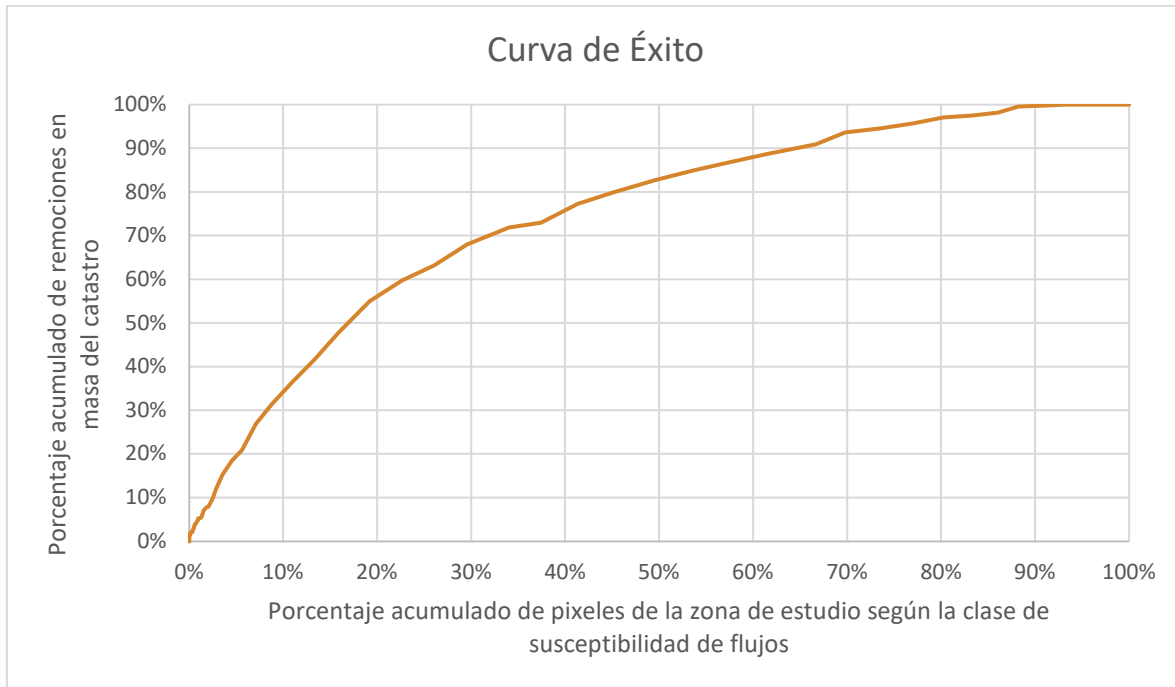


Fig. 62 Curva de éxito del análisis de susceptibilidad para flujos.

5.2.3.2 Curva de éxito para caída y deslizamientos

La Curva de Éxito para el análisis de susceptibilidad de caídas y deslizamientos en la región, presenta un área bajo la curva de 85% ($ABC = 0,85$), como se muestra en la Fig. 63.

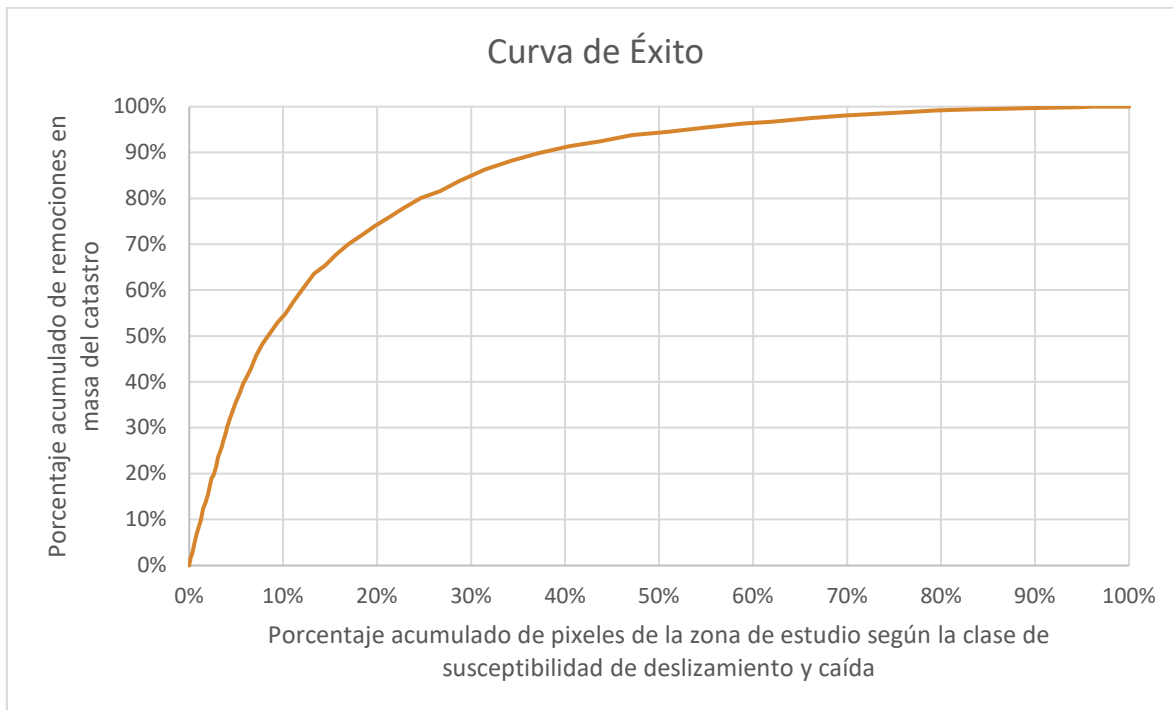


Fig. 63 Curva de éxito del análisis de susceptibilidad para caídas y deslizamientos.

5.2.4 Clasificación de niveles de susceptibilidad

5.2.4.1 Susceptibilidad de generación de flujos

El mapa de susceptibilidad de generación obtenido se evaluó según lo descrito en la metodología, haciendo distintas pruebas de distribución y calibración en terreno. Las observaciones de terreno se muestran en el ANEXO J. Finalmente, para determinar las categorías, se utilizaron como base los puntos del catastro de flujos ubicados en zonas de generación. De esta manera, los grados de susceptibilidad fueron definidos en base al porcentaje acumulado del catastro (de los ubicados en zonas de generación) y las revisiones realizadas en terreno. Estos se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7 Categorización de susceptibilidad de flujos.

	Corte	Porcentaje caídas y deslizamiento de generación catastro
Muy Alto	[9,50 - 22,57[60%
Alto	[8,50 - 9,50[17%
Moderado	[7,35 - 8,50[14%
Bajo	[2,71 - 7,35[9%

Finalmente, aplicando los criterios de categorización se susceptibilidad se obtiene el mapa de susceptibilidad de generación de flujos (Fig. 64).

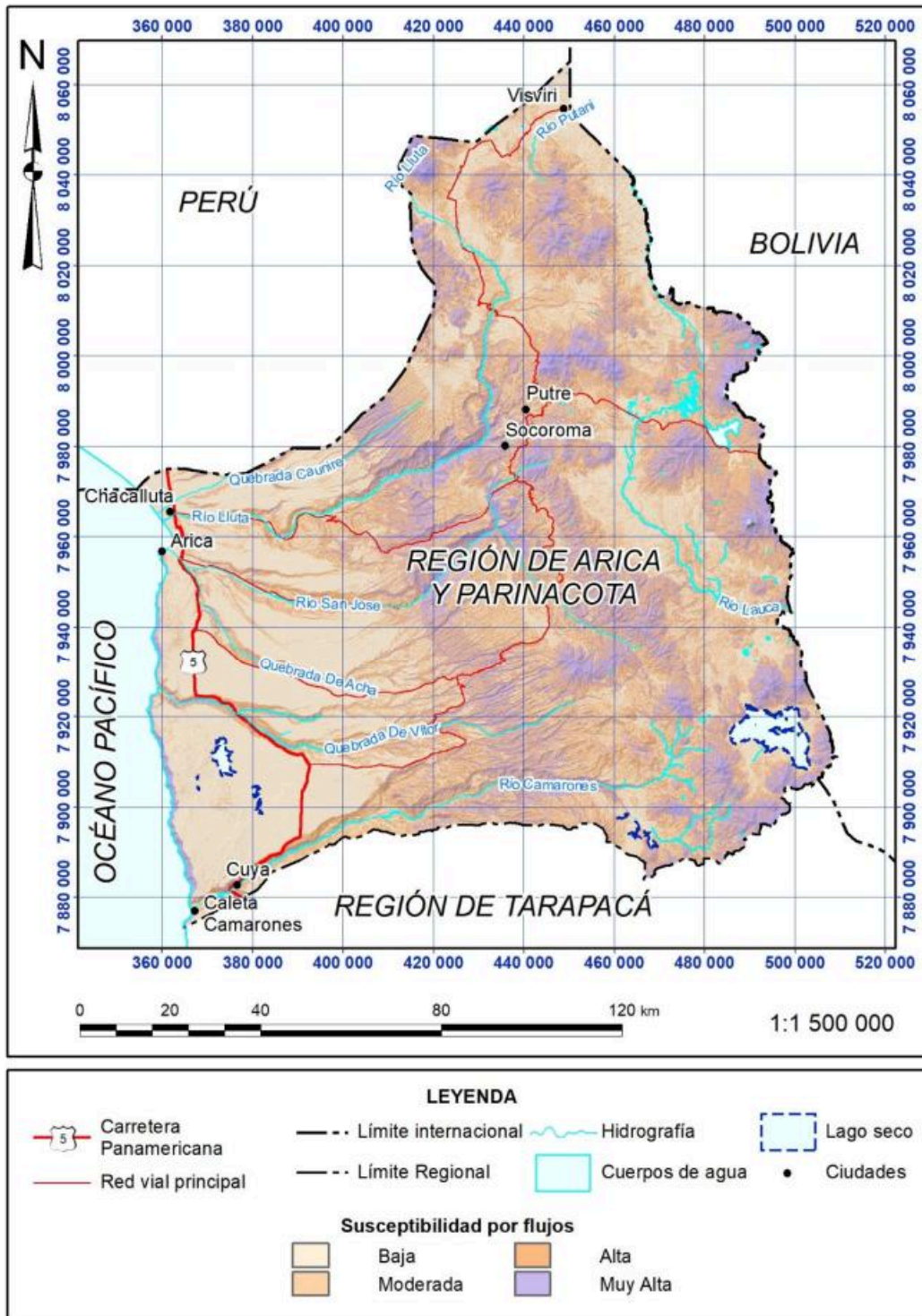


Fig. 64 Mapa de susceptibilidad de generación de flujos.

5.2.4.2 Susceptibilidad de generación de caídas y deslizamientos

El mapa de susceptibilidad de generación obtenido se evaluó según lo descrito en la metodología. Para ello se utilizaron los puntos del catastro de caídas y deslizamientos ubicados en zonas de generación, cicatrices o escarpes principales. Los grados de susceptibilidad definidos en base al porcentaje acumulado del catastro (de los ubicados en zonas de generación) y las revisiones realizadas en terreno se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8 Categorización de susceptibilidad de caídas y deslizamientos.

	Corte	Porcentaje caídas y deslizamiento de generación catastro
Muy Alto	[11,56 - 21,95[60%
Alto	[9,82 - 11,56[20%
Moderado	[7,90 - 9,82[15%
Bajo	[2,71 - 7,90[5%

Finalmente, aplicando los criterios de categorización se susceptibilidad se obtiene el mapa de susceptibilidad de generación de caídas y deslizamientos (Fig. 65).

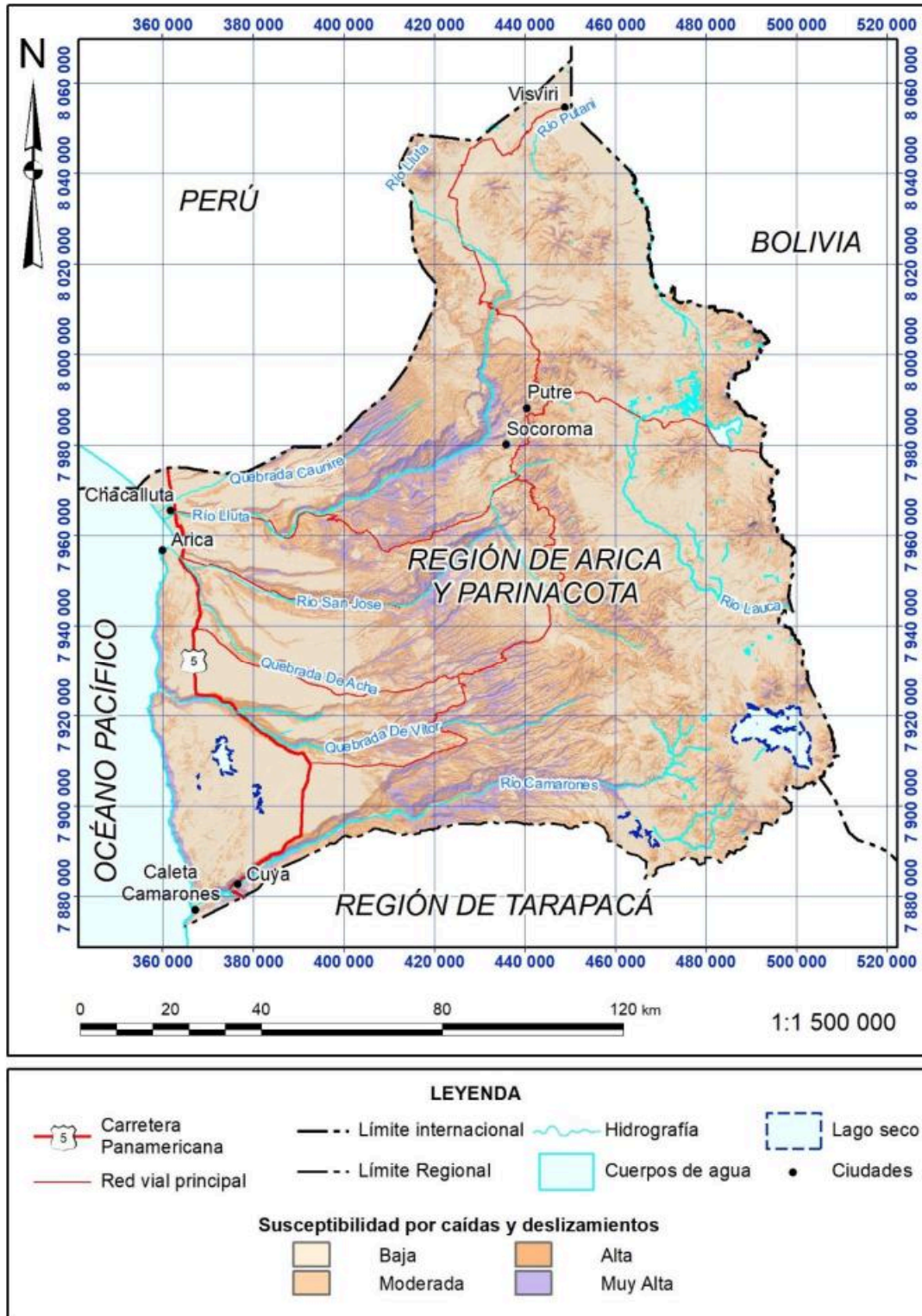


Fig. 65 Susceptibilidad de generación de caídas y deslizamientos.

5.2.5 Alcance

5.2.5.1 Alcance de Flujos

Siguiendo la metodología, para los 324 polígonos evaluados la distribución de los parámetros calibrados de Pendiente Umbral, Exponente, Factor de Persistencia, Coeficiente de Fricción (μ) y la Razón de Masa a Arrastrar (M/D), se presenta en la Fig. 66.

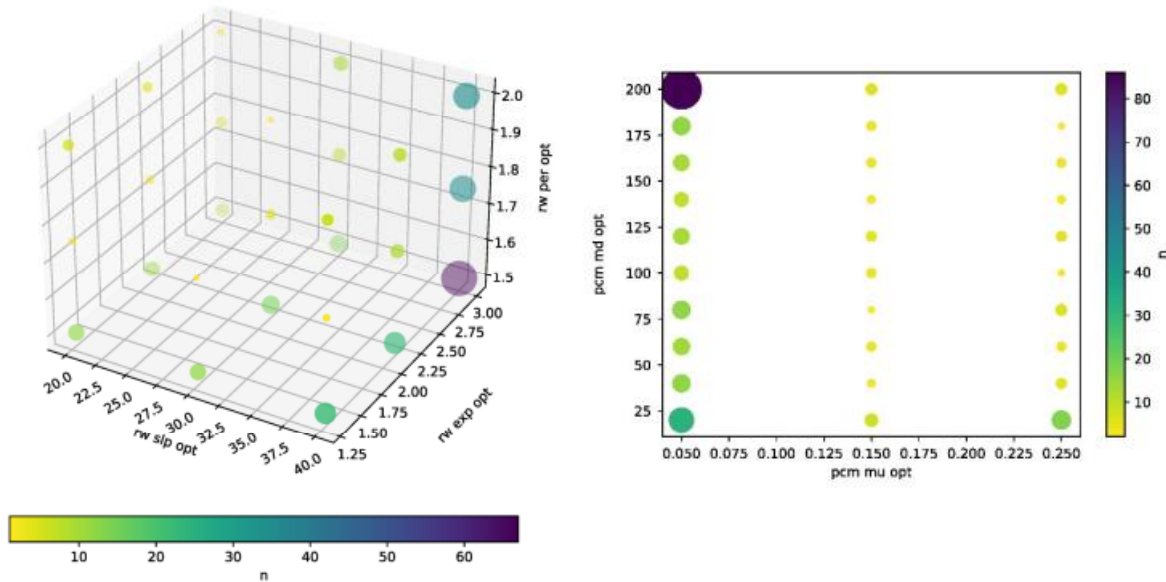


Fig. 66 Distribución de parámetros de calibración para *random walk* (rw) y PCM (pcm) predichos por runoptGPP.

Así, la modelación de alcance en GPP para flujos generalizada para el área de estudio se ejecutó considerando (1) áreas de lanzamiento igual a las zonas con susceptibilidad de generación de flujos de categorías Muy Alta y Alta, y (2) las combinaciones de parámetros más repetidos (moda) para el modelo *random walk* (del componente *process path*) y PCM (del componente *runout*) (Tabla 9). Notar que, al analizar los polígonos de flujos que predicen la combinación de mayor "n" en ambos modelos, no se observan sesgos respecto de su distribución espacial, existiendo numerosos flujos en diferentes unidades geomorfológicas que predicen la misma combinación de parámetros calibrados.

Tabla 9 Valores seleccionados para los parámetros de modelación calibrados para los flujos presentes en el área.

Parámetro	<i>Random Walk</i>			PCM	
	rw slp opt	rw exp opt	rw per opt	pcm mu opt	pcm md opt
Valor calibrado	40°	3	1.5	0.05	200

Finalmente, utilizando los parámetros calibrados en la simulación se obtiene el área de alcance de flujos (Fig. 67).

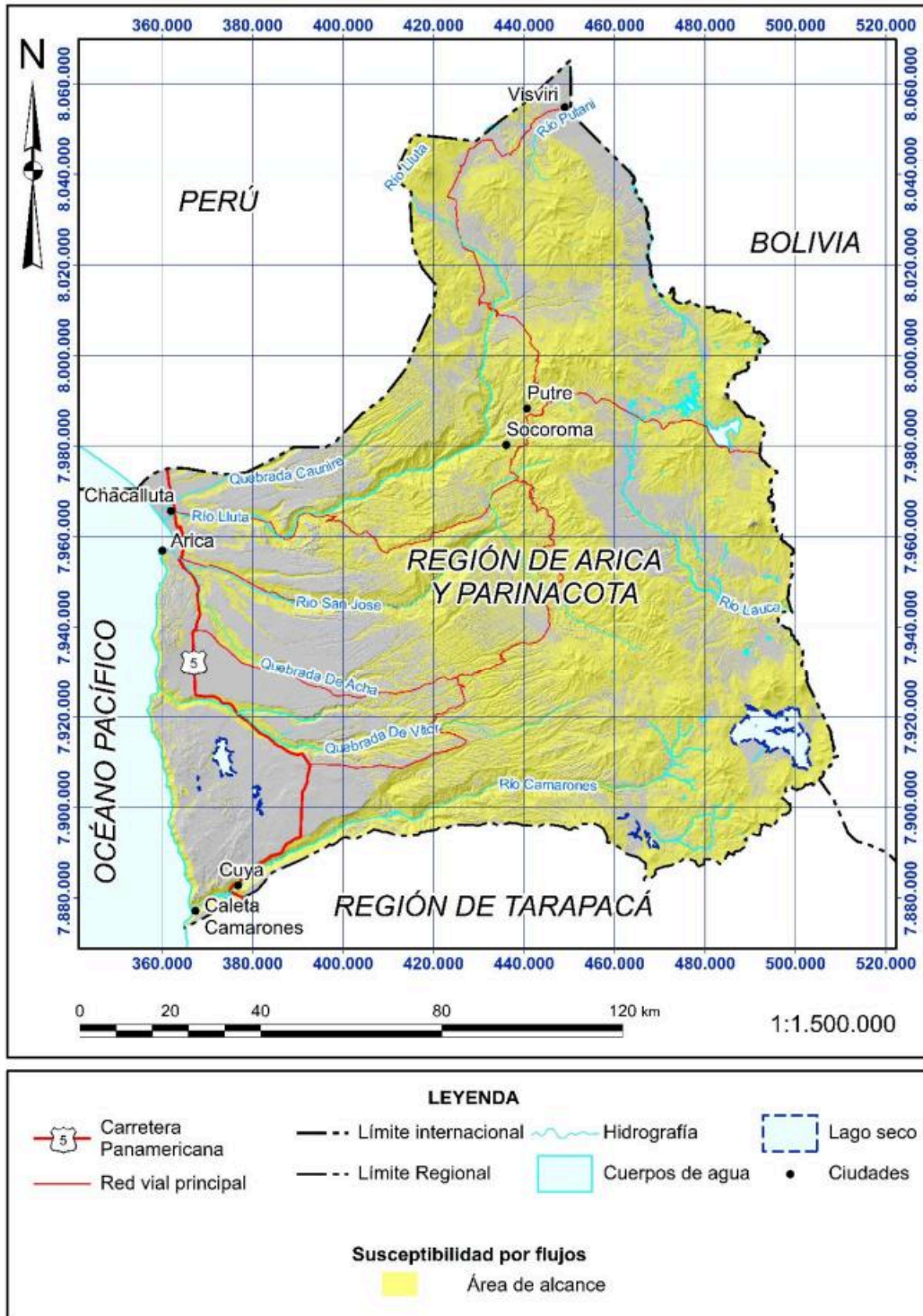


Fig. 67 Área de alcance de flujos.

5.2.5.2 Alcance de caídas y deslizamientos

Siguiendo la metodología, se obtuvieron múltiples regresiones lineales logarítmicas (es decir, leyes de potencia), a partir de las cuales se seleccionó la curva representativa del 1% de probabilidad de excedencia del alcance (Fig. 68). A través de su ecuación se calculó el valor $\Delta H/L$ para un volumen igual al promedio de los volúmenes de los puntos de la muestra ($\bar{V} = 1\,115\,745\text{ m}^3$). De esta manera, el ángulo de Fahrböschung (α) para este caso corresponde a 12.7° . Notar que, al analizar los puntos de la muestra en el espacio log-log, no se observan sesgos respecto de su distribución espacial, existiendo puntos con diversas relaciones $\Delta H/L$ y volumen que se encuentran en la misma unidad geomorfológica (Fig. 68).

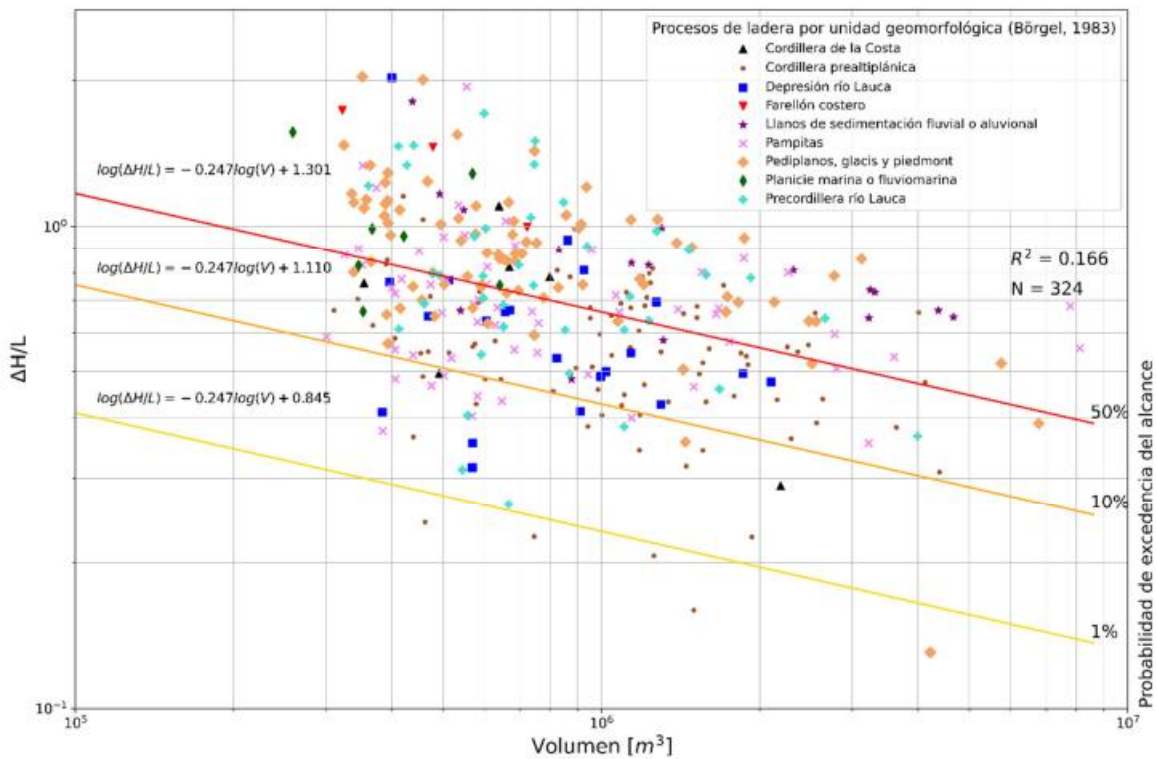


Fig. 68 Relación empírica entre $\Delta H/L$ y volumen de la muestra del catastro de caídas y deslizamientos.

Finalmente, configurando GPP con (1) áreas de lanzamiento igual a las zonas con susceptibilidad de generación de caídas y deslizamientos de categorías Muy Alta y Alta, (2) la configuración estándar para el componente de trayectoria (*process path*), y (3) un ángulo $\alpha = 12.7^\circ$ según el principio de Fahrböschung (Heim, 1932) para el componente de alcance (*runout*), se obtiene el área de alcance de caídas y deslizamientos (Fig. 69).

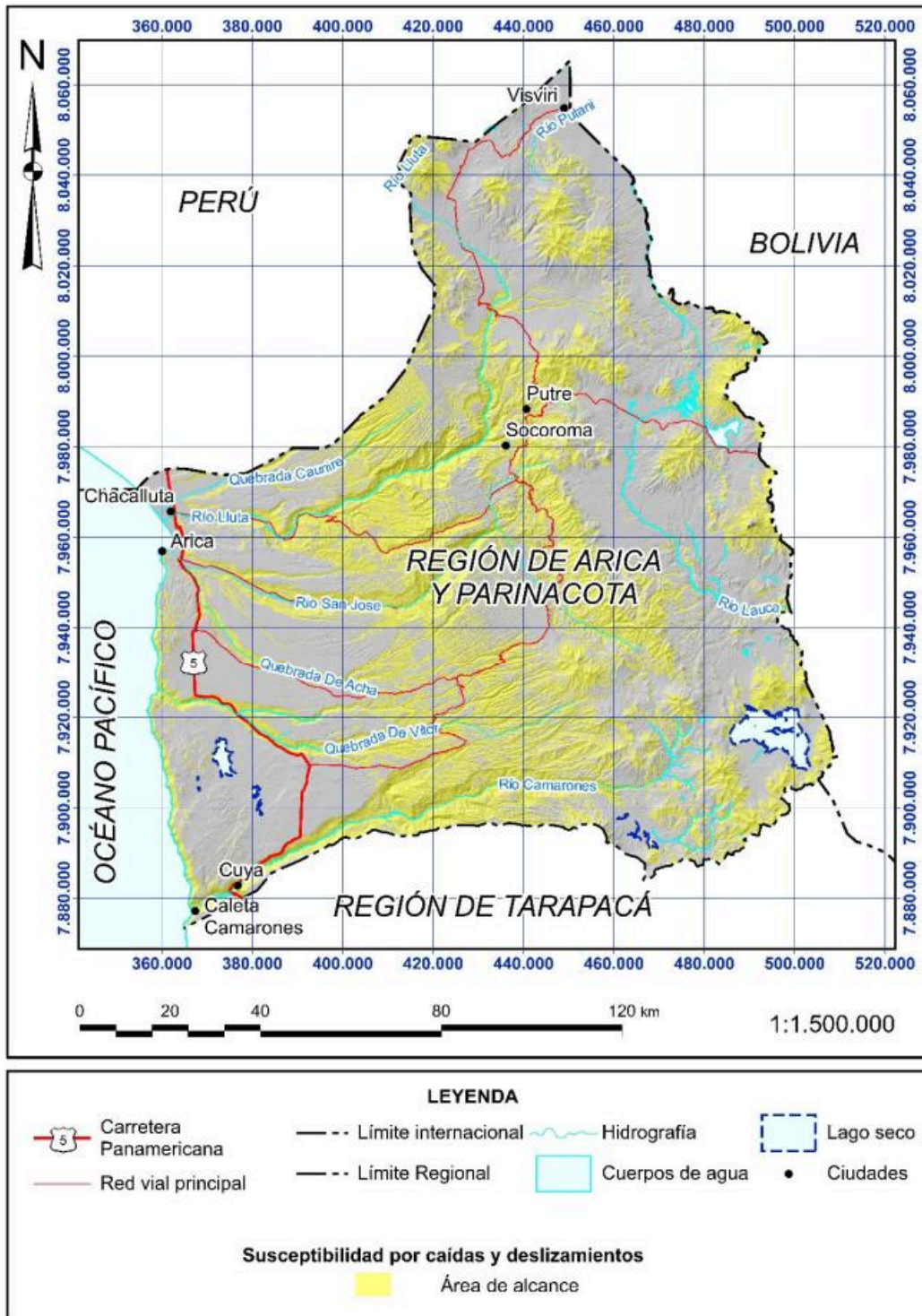


Fig. 69 Área de alcance de caídas y deslizamientos.

6 MORRO DE ARICA

6.1 Introducción y objetivos

El Morro de Arica es un macizo rocoso que se alza en dentro del área urbana de la ciudad de Arica, y cuyas laderas fuertemente inclinadas de más de 100 metros de altura han sido una fuente de generación de remociones en masa a lo largo de la historia de Arica. Además de ser Monumento Histórico, este macizo ha estado presente en muchas batallas, desastres naturales y dinámica de la ciudad, como lo muestran las fotografías de la Fig. 70, en que se muestra la cara oeste del Morro del día en la zona de la costanera, y el Monumento del Cristo de la Concordia de Arica iluminado en la noche.



Fig. 70 Fotografías del Morro de Arica y su contexto en la dinámica de la ciudad.

El Morro de Arica también ha sido utilizado por el hombre a lo largo de la historia, tanto en la década de los años 60 en que fue usado como cantera, o como fuente de extracción de guano en la parte posterior del condominio Ayllu. También fue afectado y removido parte de su material con la apertura de la ruta hacia el borde costero sur (zona industrial). Actualmente es parte de zonas habitadas (como el condominio Ayllu y las casas en Av. Héroes del Morro por la ladera noreste. Además, ha sido usado para la instalación de infraestructura industrial, de telecomunicaciones, militar, patrimonial y es usado de manera ilegal como basural o como zona para pernoctar, como lo muestra la fotografía de la Fig. 71. En la fotografía derecha, se muestra el actual estado de la señalética instalada en la parte superior del Morro que advierte la presencia de zonas agrietadas.



Fig. 71 Fotografía izquierda muestra uso de la zanja del Morro de Arica para pernoctar. Derecha muestra el estado de la actual señalética de la parte superior del Morro que advierte la presencia de terrenos agrietados.

El estudio FNDR de remociones en masa en la región de Arica y Parinacota incluye un producto denominado Mapa 5: Análisis e identificación de áreas críticas de Morro escala 1:1.000, para el cual se desarrollaron una serie de actividades y aplicación de metodologías para dar cumplimiento al producto final, siendo el Hito 4 la actual entrega.

Los objetivos específicos son:

- Recopilar, analizar y sistematizar estudios anteriores en el Morro de Arica relacionados con remociones en masa.
- Definir el área de estudio, metodología y herramientas de análisis.
- Generar insumos que permitan realizar el análisis de estabilidad de las laderas del Morro de Arica 1:1.000, como un modelo geológico – geotécnico, un catastro de remociones en masa del Morro, un modelo de estructuras geológicas e identificar los tipos de remociones en masa y mecanismos de falla presentes.
- Evaluar el peligro por remociones en masa en el Morro de Arica mediante el análisis de estabilidad de laderas en secciones (perfiles) representativos escala 1:1.000.
- Identificar las áreas críticas en el Morro de Arica 1:1.000 en términos del peligro por remociones en masa y emitir recomendaciones asociadas con estabilidad y seguridad.

6.2 Metodología y productos

El estudio en su totalidad incluyó una etapa inicial de la **evaluación de la susceptibilidad a escala 1:10.000 del área Morro de Arica y alrededores**, que equivale al área levantada topográficamente en el presente estudio, en la que se evaluó la susceptibilidad por remociones en masa en zonas urbanas mediante el cálculo de un índice de susceptibilidad (IS) para unidades de análisis escala 1:10.000. Los resultados permitieron identificar algunos

sectores críticos hacia el área sur industrial de la ciudad y fueron presentados en el Hito 3, Informe de avance Etapa 3 – Revisión 2, Anexo F: Estudio Morro de Arica y alrededores.

Para el estudio del área del Morro de Arica escala 1:1.000, se consideraron 3 etapas específicas:

Etapa 1. Preparación de insumos, e incluye la recopilación y sistematización de todos los antecedentes.

Etapa 2. Análisis, la incluye la definición y evaluación de distintos escenarios mediante la exploración y aplicación de técnicas de análisis de estabilidad de taludes.

Etapa 3. Conclusiones y recomendaciones, incluye una síntesis y agrupación de zonas críticas a partir de las cuales se emiten recomendaciones para reducir el riesgo.

El detalle para cada una de las etapas se muestra esquemáticamente en la imagen de la Fig. 72.

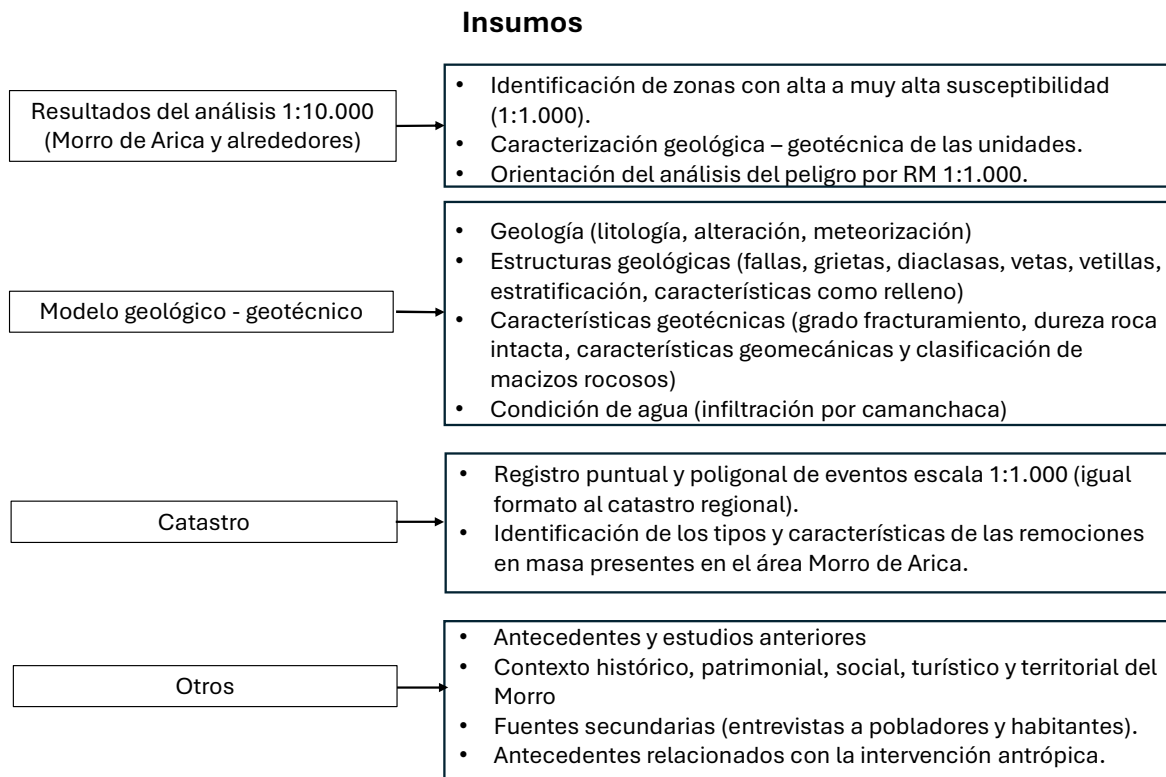


Fig. 72 Detalle de actividades de la Etapa 1. Preparación de insumos.

Para la etapa de Análisis (Etapa 2) se realizaron una serie de actividades detalladas en la Fig. 73.

Análisis

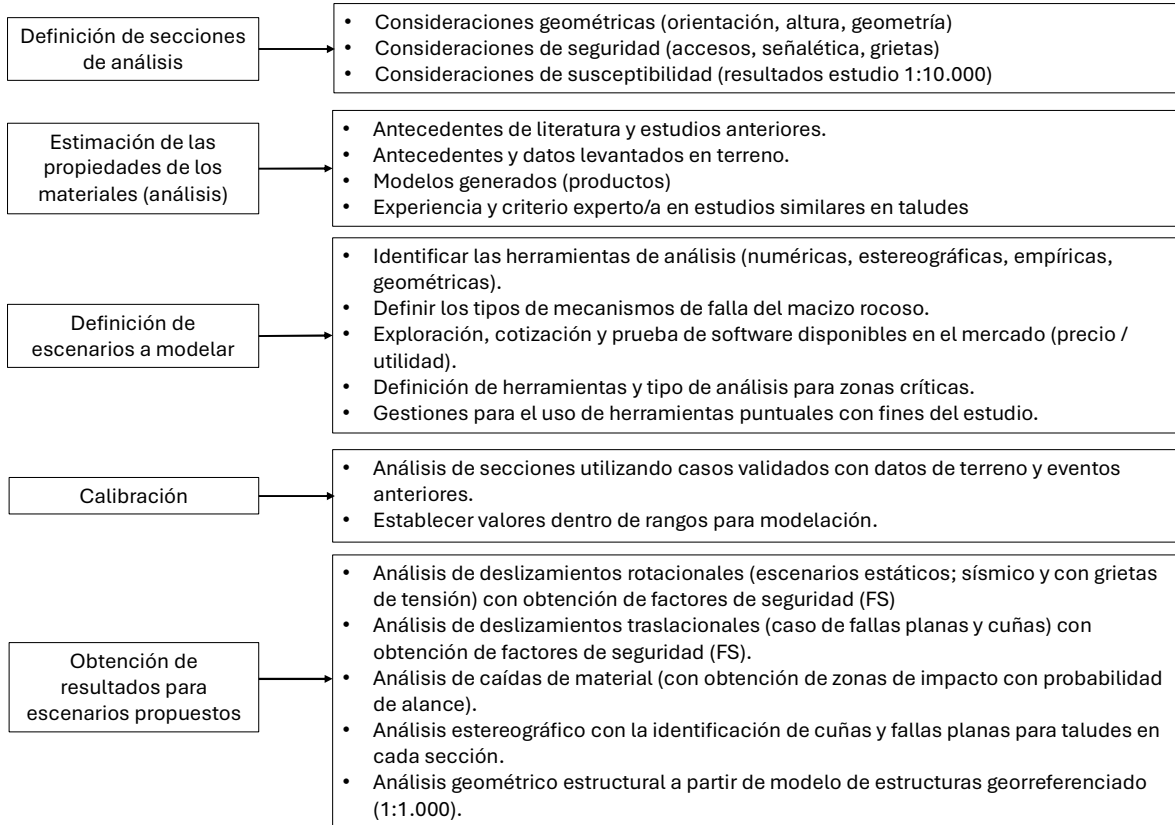


Fig. 73 Detalle de actividades para la etapa de Análisis del Morro de Arica escala 1:1.000.

Para la tercera etapa de conclusiones y recomendaciones (Etapa 3) se desarrollaron una serie de actividades mostradas en la Fig. 74.

Recomendaciones

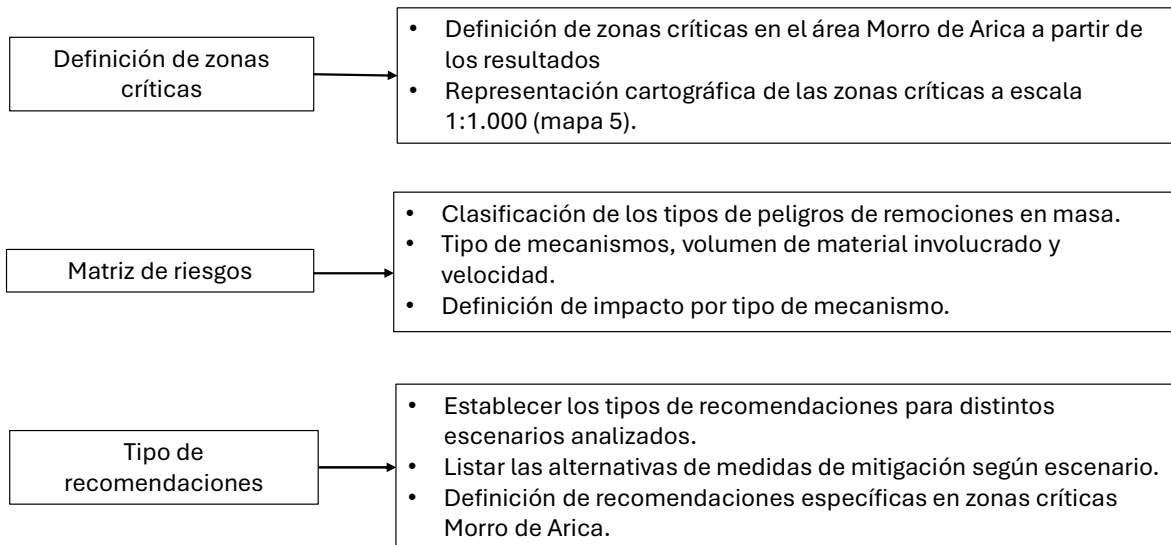


Fig. 74 Detalle de actividades realizadas para la tercera etapa de conclusiones y recomendaciones.

A continuación, se presenta un resumen de las actividades realizadas y resultados obtenidos. En el ANEXO F se entregan todos los detalles del estudio.

6.3 Insumos

Dentro de los insumos generados y considerados para el análisis, se destacan:

- Levantamiento topográfico mediante aerofotogrametría de alta resolución (4cm por píxel)
- Índices de susceptibilidad** e identificación de zonas críticas para el área Morro de Arica y alrededores escala 1:10.000 (Informe y Anexos Hito 3).
- Modelo **geológico-geotécnico** del área Morro de Arica escala 1:1.000.
- Catastro de remociones en masa** puntuales y poligonales del Morro de Arica escala 1:1.000.
- Modelo de **estructuras geológicas** 1:1.000 del área Morro de Arica.
- Otros antecedentes, como estudios geológicos y geotécnicos anteriores, antecedentes históricos del Morro, información provista por pobladores y habitantes del alrededor.

El detalle de cada uno de estos insumos y su aporte en el proceso de análisis del Morro de Arica escala 1:1.000 se presenta en el ANEXO F.

Como ejemplos del trabajo realizado y resultados obtenidos, se muestra una imagen del Catastro del área del del mapa 5 (ver Fig. 75).

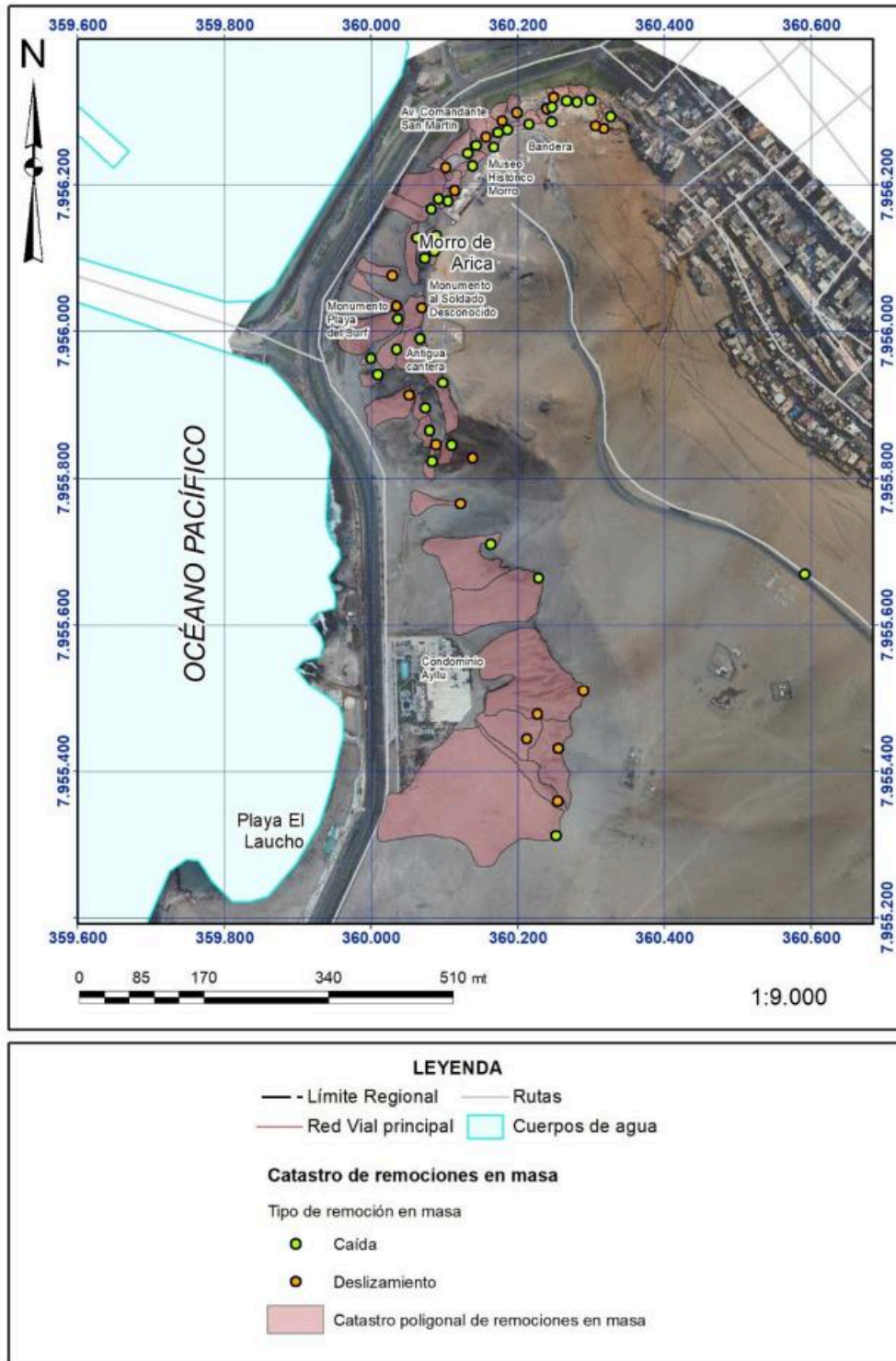


Fig. 75 Detalle catastro de remociones en masa Morro de Arica.

Este catastro del área específica del Morro de Arica (puntual y poligonal) contiene eventos asociados a caídas y/o deslizamientos, tanto de rocas como suelos y sedimentos. Específicamente se reconocen caídas de rocas y deslizamientos traslacionales de rocas de tipo cuña y fallas planas, los cuales se concentran en la zona turística y rocosa de Morro de Arica. Esto subraya la importancia de desarrollar un modelo de estructuras geológicas adecuado a la escala de este análisis. Este catastro se elaboró integrando toda la información recopilada, y cuyos detalles se presentan en el informe en ANEXO F.

Para el estudio se generó además un “modelo geológico – geotécnico”, entendida como una representación simplificada que agrupa las características geológicas y geotécnicas de los materiales presentes en un determinado sector de análisis y, que entregará información importante respecto al comportamiento geomecánico que tendrá al momento de su intervención o cambio en alguna de sus condiciones. Esta conceptualización incluye variables geológicas (como la litología, alteración, fracturamiento, meteorización, presencia de vetas, fallas, mineralización, o cualquier otro rasgo geológico que influya en su comportamiento); presencia de suelos o materiales menos consolidados, (su composición, espesores, características y propiedades) y variables geotécnicas (como dureza o resistencia de los materiales, condición de discontinuidades, presencia de agua, índices de fracturamiento, resistencia, valores de calidad de macizo rocoso, entre otros). También se pueden incluir áreas asociadas a obras antrópicas, rellenos antrópicos u otras que pueden tener características propias para el estudio.

La Fig. 76 muestra un detalle del modelo geológico – geotécnico para el área de estudio del mapa 5. En este sector cobran relevancias las unidades:

- Antrópico
- Depósitos al pie del talud
- Zona de falla
- Infraestructura
- Ladera arenosa
- Ladera arenosa con costra salina



- Lutitas
- Muro roca
- Material antigua remoción
- Roca cubierta con regolito
- Roca fracturada
- Rocas sedimentarias
- Rocas volcánicas
- Zanja.

El rumbo global de la secuencia es N50°E mientras que el manteo de la secuencia es 20°E a sub horizontal. Esto sumado a las altas pendientes de las laderas del Morro dificulta la representación en planta, siendo la representación en perfiles más representativa como se presenta más adelante.

Para obtener más detalles en la definición y características de cada unidad, se sugiere consultar el ANEXO F.

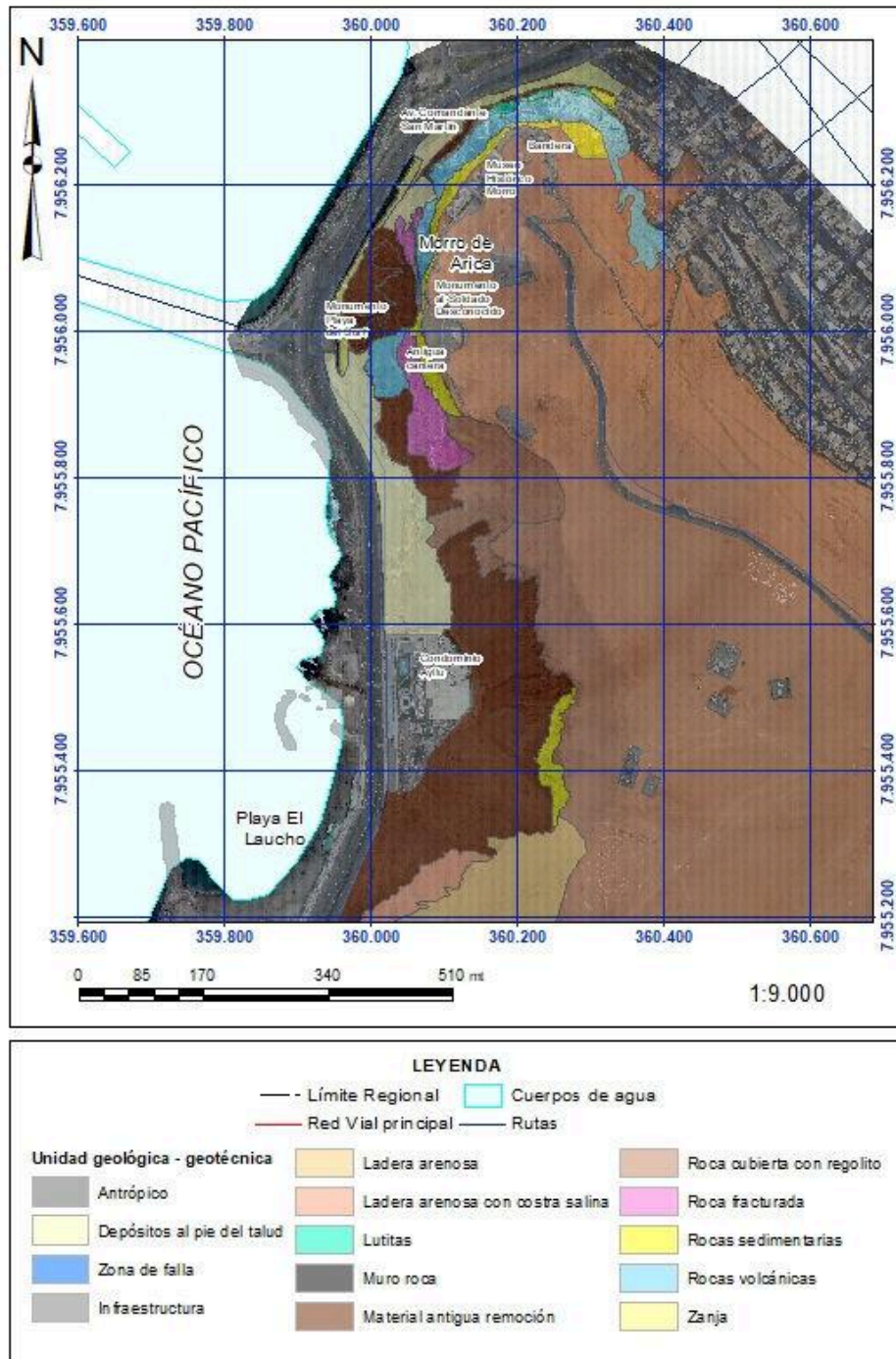


Fig. 76 Modelo geológico – geotécnico del área de estudio del mapa 5 - escala 1:1.000.

Este modelo incluye además valores de calidad de macizo rocoso obtenidos a partir de estudios anteriores, datos obtenidos en terreno (mapeo de los índices GSI y RMR) e información de literatura especialista. Ver Fig. 77. En la Tabla 10 se resumen las características y propiedades de las unidades que componen el modelo en el área del mapa 5.

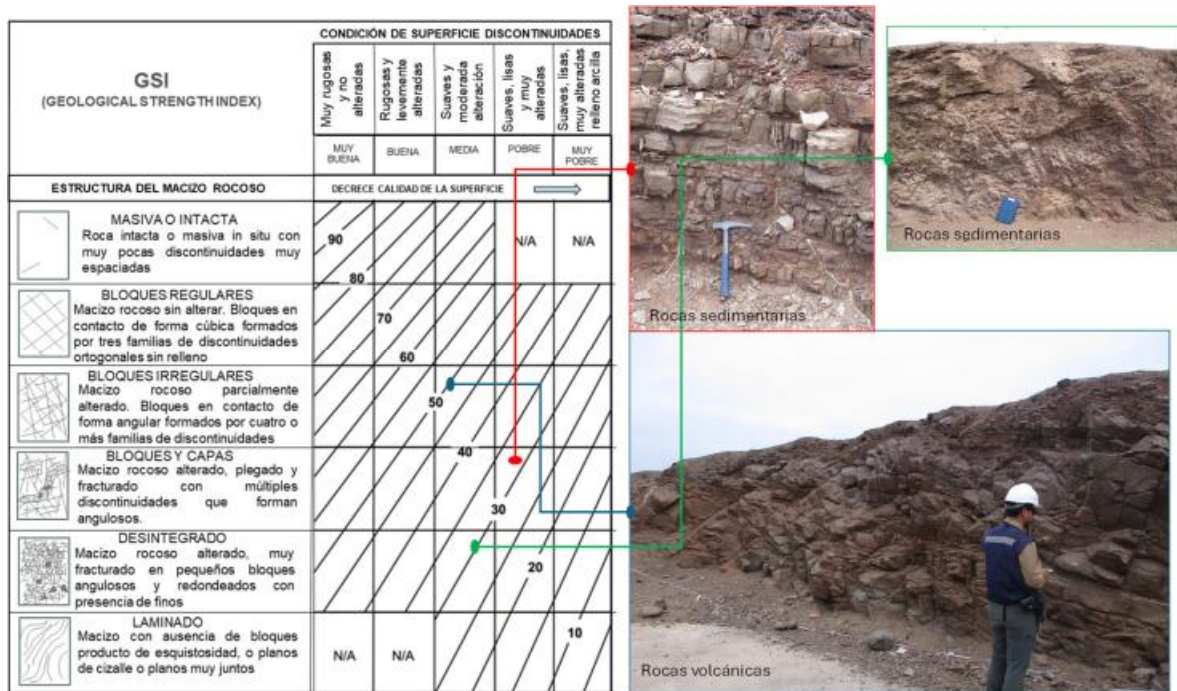







Fig. 77 Ventanas de caracterización del macizo rocoso en el Morro de Arica.

Tabla 10 Valores de calidad de macizo rocoso para unidades geológicas – geotécnicas del Morro de Arica.

Material	Descripción	Geological Strength Index GSI (*)	Clasificación geomecánica RMR = GSI + 5 (Hoek y Brown)	Clase	Fotografía
Lutitas	Rocas sedimentarias estratificadas en la base y centro de la secuencia. Se presentan fracturadas por sistemas de diaclasas y planos de estratificación. La secuencia manteea sub horizontal y presenta un espesor de 20 m. Diaclasas cerradas o rellenas con sales solubles y cortas (1-3m) y espaciamentos < 50 cm. La resistencia al cizalle y calidad que presenta esta unidad es baja.	30	35	Clase IV (mala calidad geotécnica)	
Rocas volcánicas	Rocas volcánicas en la parte central y superior del Morro. Incluye pillow lavas, andesitas, brechas volcánicas. La secuencia alcanza potencias de 80m. Las rocas tienen alta dureza. Presentan diaclasas y fallas que atraviesan la secuencia, que incluyen largos métricos. Están abiertas o con rellenos de sales solubles.	50 – 65	55 - 70	Clase III a II (regular a buena calidad geotécnica)	
Rocas sedimentarias	Secuencia que agrupa a las rocas sedimentarias (indiferenciadas) en la parte superior del Morro, alcanzando 40m de potencia. Incluye areniscas, limolitas, lutitas de colores claros, con dureza media y poca presencia de estructuras geológicas, dispuestas con maneto sub horizontal bajo la roca cubierta con regolito.	20 - 40	25 - 45	Clase IV a III (mala a regular calidad geotécnica)	
Zona de falla	Zona o área que incluye una zona asociada a una o varias trazas de fallas con espesor importante para la escala del mapeo (1:1.000) determinadas a partir del modelo estructural del estudio.	30	35	Clase IV a III (mala a regular calidad geotécnica)	
Roca fracturada	Unidad particular de litología no determinada (posiblemente volcánica) pero que se diferencia del resto por el grado de fracturas y agrietamiento que presenta. Se caracteriza por su mala calidad geotécnica	30	35	Clase IV (mala calidad geotécnica)	

(*) valores estimados a partir de terreno, fotogrametría y fotografías dron.

El área rocosa del Morro de Arica, que coincide con la zona turística y patrimonial, está influenciada por la presencia de diversas estructuras geológicas, como fallas, diaclasas, grietas, fracturas, vetas y vetillas. La combinación de estas estructuras genera cuñas, fallas planas y bloques de roca. Por este motivo se generó un modelo de trazas de estructuras geológicas en superficie 1:1.000 del área del Mapa 5 (Fig. 78). Este modelo se desarrolló a partir del mapeo y caracterización de fallas, grietas, diaclasas, fracturas, vetas, vetillas, planos de estratificación presentes en el área obtenidos del levantamiento de información en terreno y el uso del levantamiento fotogramétrico. También se realizaron celdas o ventanas geotécnicas en las cuales se mapearon y caracterizaron las estructuras de acuerdo

con los estándares geotécnicos definidos por la literatura (*cellmapping*). El producto es una base de datos georreferenciada de estructuras geológicas. La proyección de la traza de las estructuras en superficie consideró topográfico generado por el manto en las laderas.

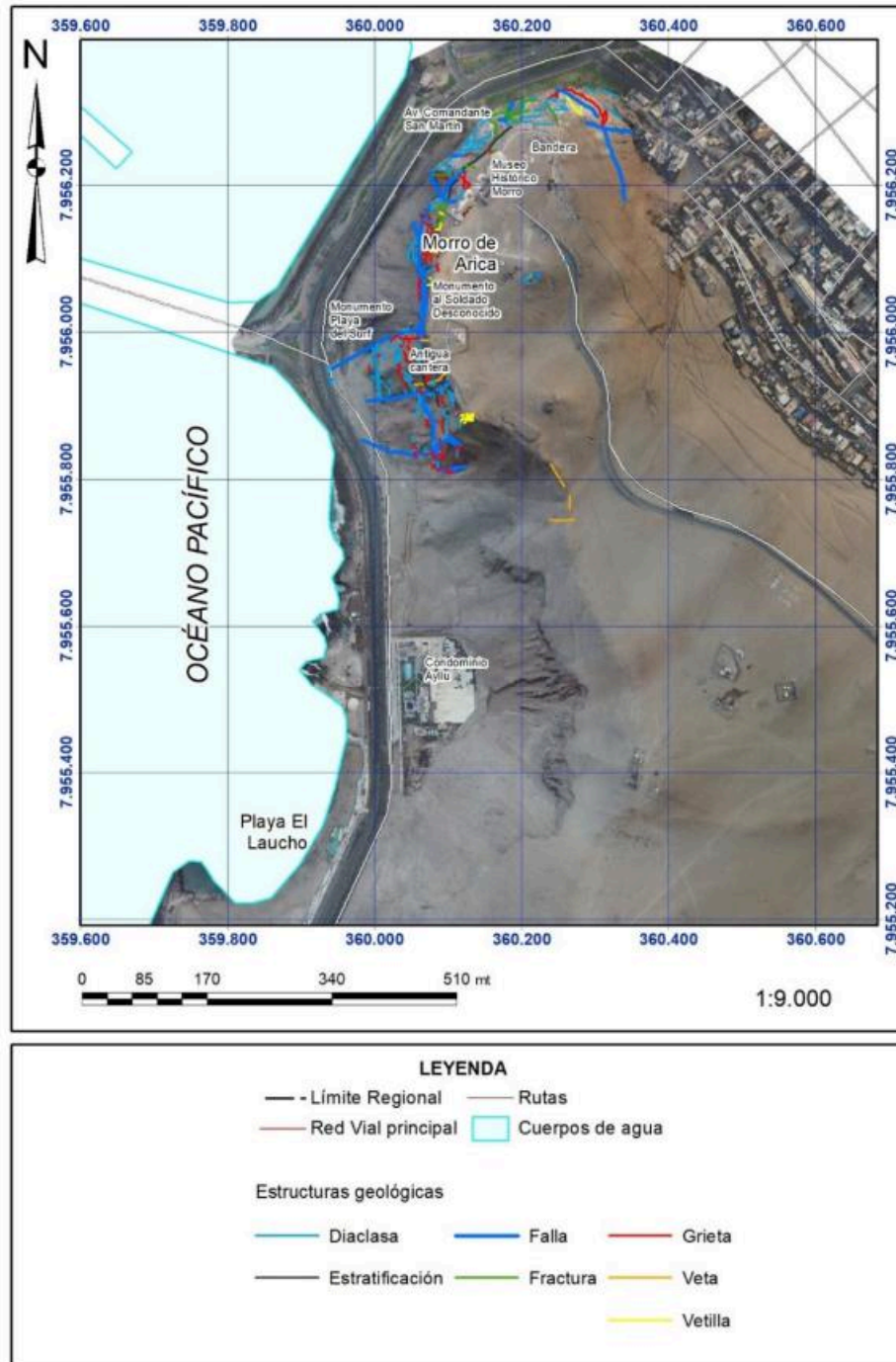


Fig. 78 Modelo de estructuras geológicas del Morro de Arica.

En la figura a continuación se muestra un detalle del modelo de estructuras geológicas para las laderas rocosas oeste y norte del Morro, en el área patrimonial y turística.

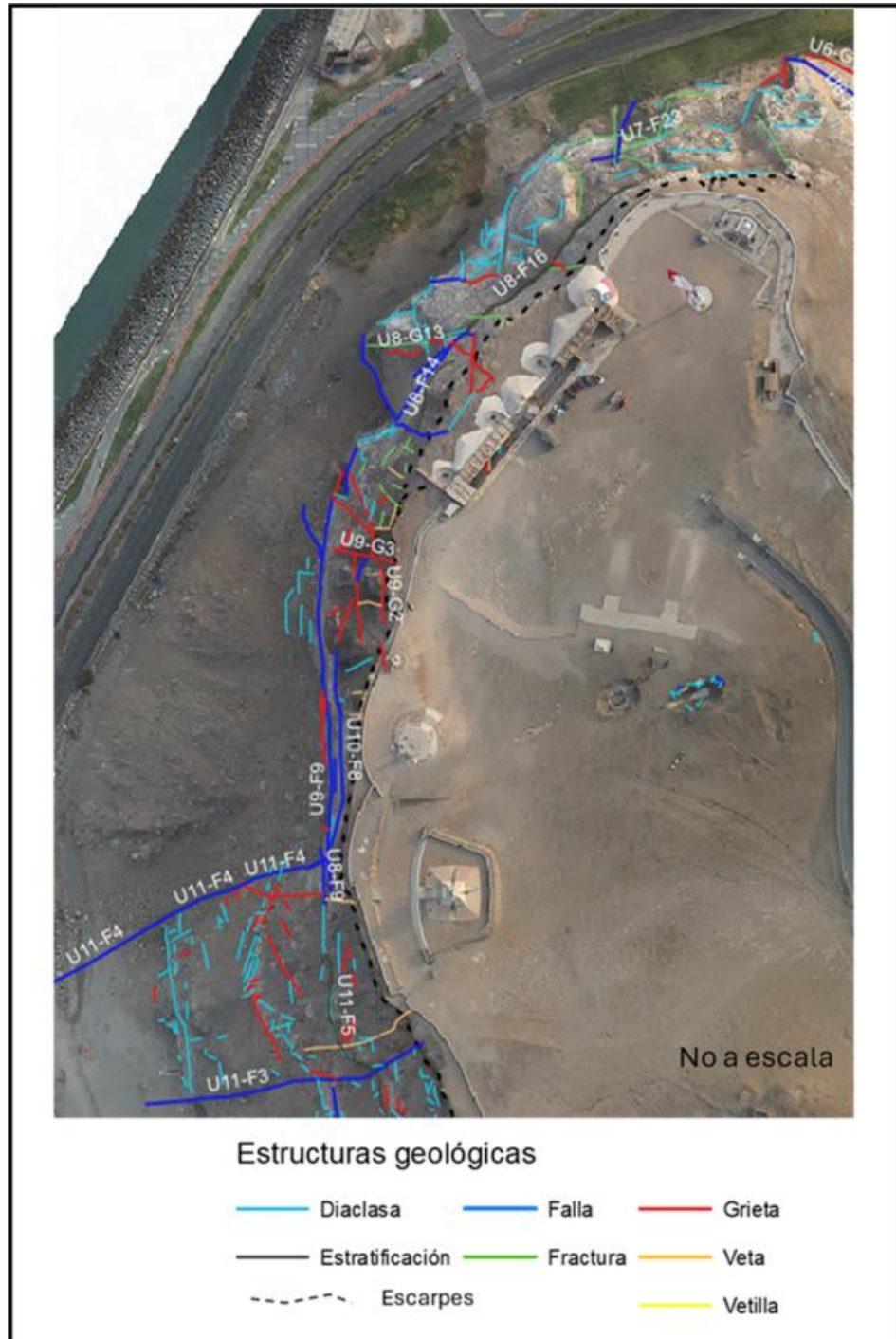


Fig. 79 Modelo de estructuras geológicas del Morro de Arica.



6.4 Análisis

6.4.1 Definición de perfiles o secciones de análisis

Para realizar el análisis e identificación de zonas críticas en el Morro de Arica, hizo un análisis de estabilidad basado en perfiles o secciones de análisis representativas de las distintas condiciones observadas. Esto facilita además el poder incorporar las características y variaciones geológicas – geotécnicas en sentido vertical. La Fig. 80 muestra una vista de las 10 secciones de análisis definidas. La sección 1 representando la ladera del condominio Ayllu y las secciones 2 a 10 las distintas laderas y condiciones del Morro.

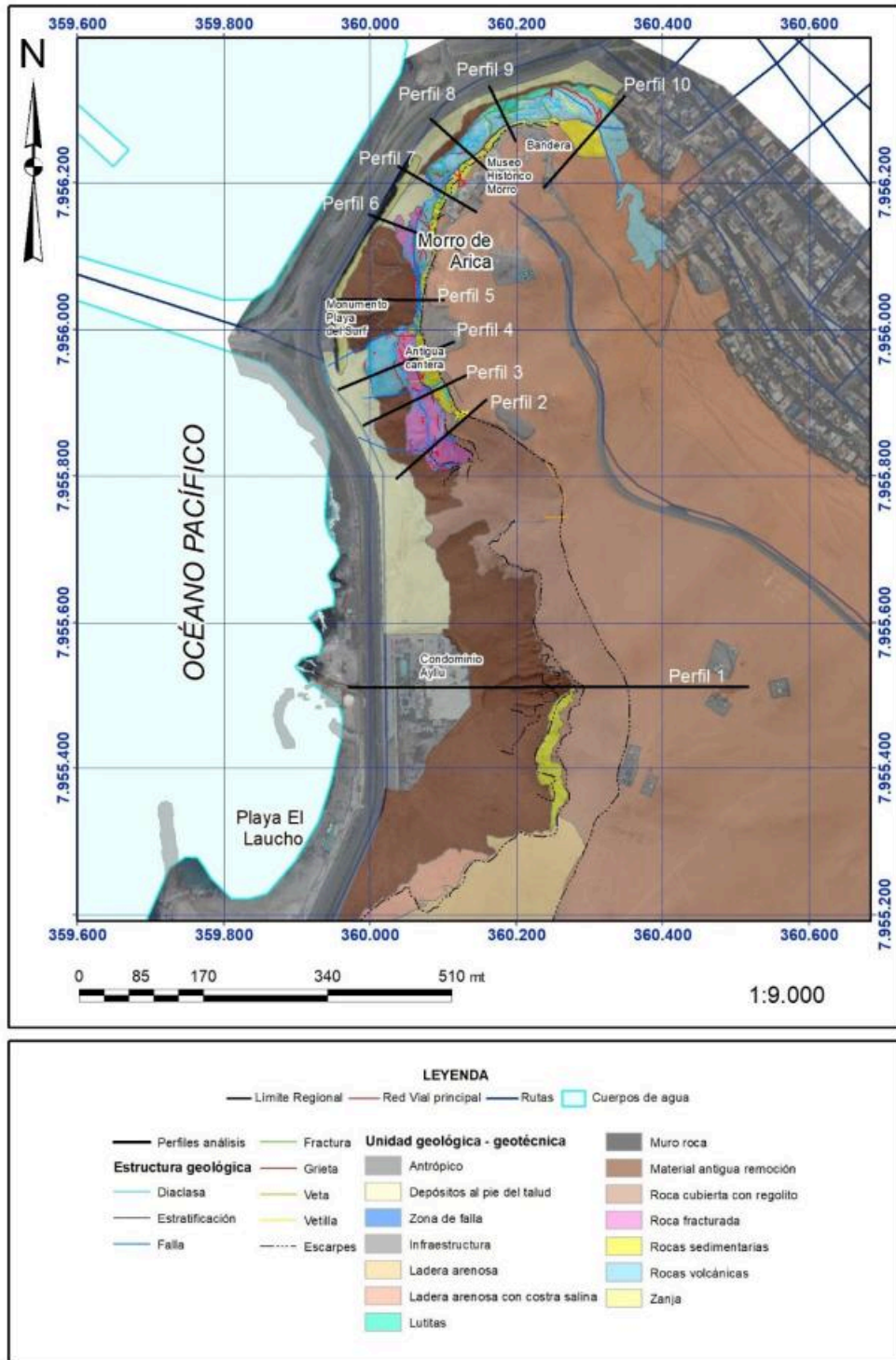


Fig. 80 Vista general de las secciones o perfiles de análisis del Morro de Arica.

La Tabla 11 muestra el detalle de los nombres, justificación y características de cada uno de los perfiles analizados.

Tabla 11 Nombre y características de perfiles analizados.

Sección	Nombre	Justificación y características
1	Perfil U14_Ayllu	Sección definida para evaluar la zona crítica asociada al talud posterior del condominio Ayllu (unidad 15) con muy alta susceptibilidad a caídas, deslizamientos rotacionales y superficiales. Materiales no rocosos en su mayoría. Se elabora modelo geotécnico local que incluye planchones de gravas y roca meteorizada con guano (a partir de antecedentes de terreno e históricos).
2	Perfil U11_U12_antigua cantera	Sección definida en la transición entre cubierta de regolito y roca fracturada por antigua cantera (entre unidades 12 y 11). También existen cuevas en el talud. Es una zona de acceso libre y sin protección, en la que además habitan personas en situación de calle y se usa como basural. Presenta fallas y grietas abiertas que limitan un bloque descendido sin soporte basal , definiendo una zona crítica. Presenta muy alta susceptibilidad para caídas, deslizamientos traslacionales y superficiales. Importante control de estructuras geológicas.
3	Perfil_U11_roca fracturada	Zona con muro y señalética deficiente en la parte superior . Alto tránsito - área de paseos y Monumentos. Ladera presenta antecedentes de ser una zona de antigua cantera , con presencia de roca fracturada. Además, el material de remoción en masa en la parte inferior tiene evidencias de reactivación . Zona inferior sin protección, con acceso permanente de personas en tránsito y/o pernoctando . La zanja y enrocado de roca no llegan a este sector.
4	Perfil_U11_pillow y grietas	Sección definida principalmente por la zona superior, con grietas abiertas y activas . La parte inferior son rocas macizas, pero con libre acceso hacia el talud. Evidencias de animitas con acceso de personas.
5	Perfil_U9_remoción en masa y zanja	Sección definida por reactivación de remociones en masa en el 2014 (Playa Surf) sumado a la presencia de personas habitando en la zanja. Zona superior agrietada y con señalética deficiente (plano y zona de falla, con presencia de grietas). Extensión importante en la zona de costanera (300m).
6	Perfil_U9_zona grietas y paseo	Sección definida principalmente por la zona superior, con grietas abiertas y activas . Zona con acceso parcialmente restringido. La parte inferior son rocas fracturadas, con presencia de zanja y muro, pero con libre acceso hacia el talud . Presencia de personas habitando y con acceso permanente.
7	Perfil_U8_bloque museo	Sección definida por la presencia de un bloque limitado por estructuras en la parte posterior del Museo volumen 10000m ³ estimadas in situ. Falla importante, relleno sal. Bloque abierto (grietas recientes) y limita con infraestructura . Si desliza, sería un movimiento a gran escala, con la posibilidad que queden taludes con geometrías inestables.
8	Perfil U8_zona cuñas costanera	Sección definida por la presencia de geometrías de cuñas con algunos bloques limitados por estructuras . Presencia de algunas grietas. Perfil de Morro irregular . Existe pasto y reja perimetral. Zona postal turística del Morro .
9	Perfil_U7_postal Morro	Sección definida por la representar una de las caras turísticas del Morro, con fuerte pendiente y bloques con estructuras. Parte inferior pasto y reja.
10	Perfil_U5_MorroNE_casas	Sección definida por la representar una de las caras turísticas del Morro, con zona de casas . Bloques de menor tamaño. Se define por el potencial de caídas en casas.

La Fig. 43 muestra un ejemplo de la geometría de los perfiles de análisis, dando cuenta la variabilidad en su geometría, fuerte pendiente en laderas que superan los 100 metros de altura.

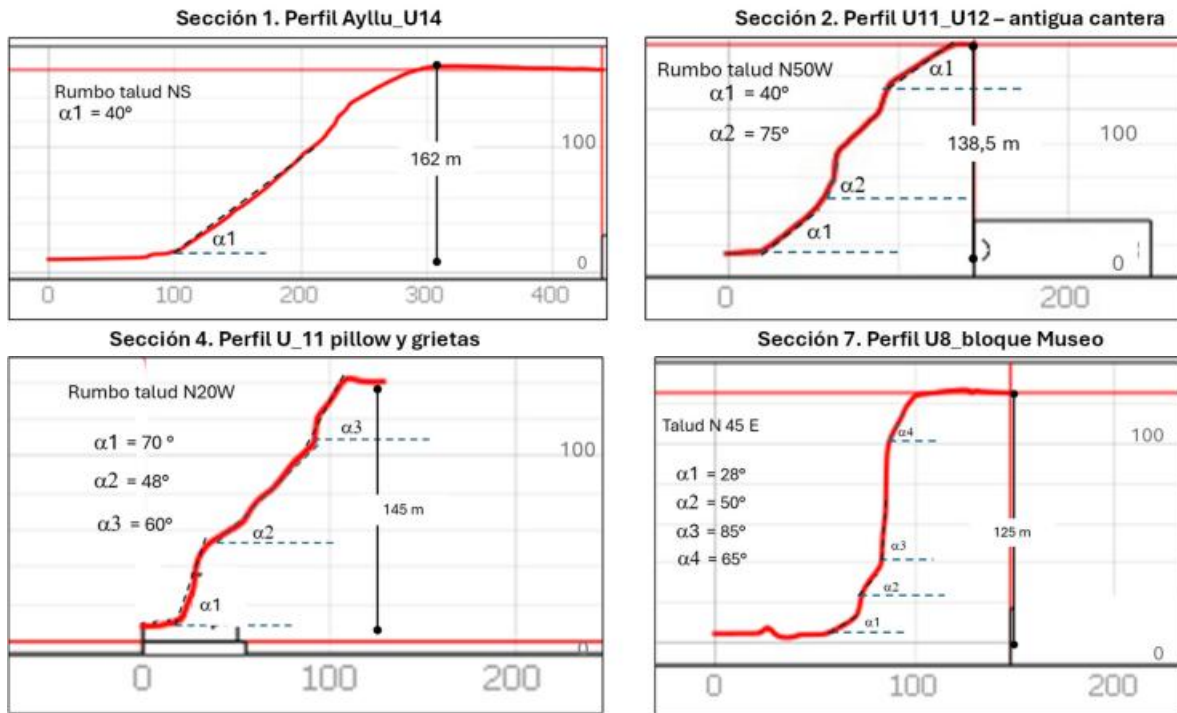


Fig. 81 Ejemplo de características geométricas y ángulos de talud de secciones de análisis

En las Fig. 82 y Fig. 83 se muestran a modo de ejemplo dos secciones de análisis y sus respectivos modelos geológicos – geotécnicos. Esto se replicó para las 10 secciones de análisis y cuyos resultados están en el ANEXO F.

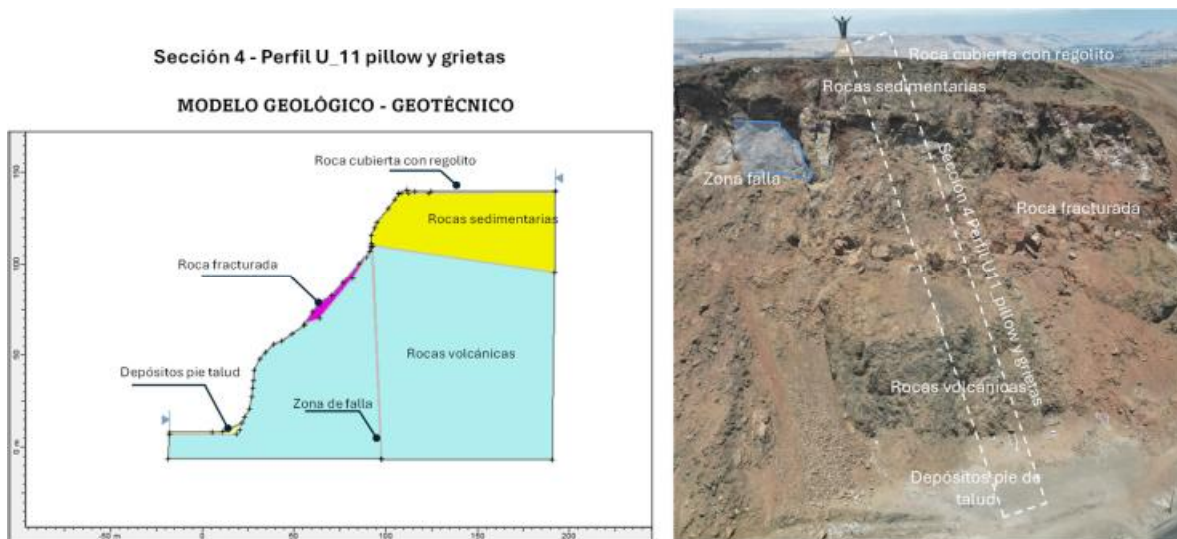


Fig. 82 Detalle modelo geológico – geotécnico sección 4 (zona de *pillow* lavas y grietas).

Sección 6 - Perfil U9 - zonas grietas y paseo

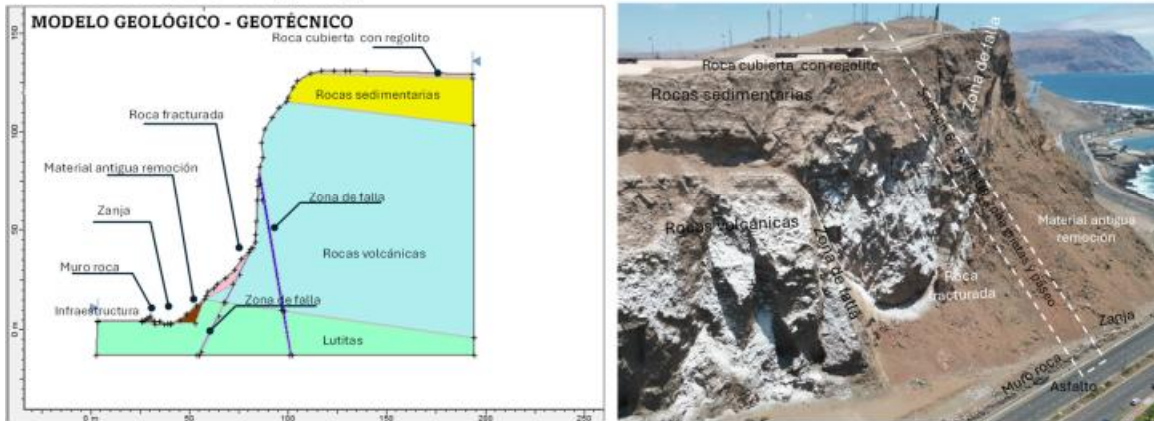


Fig. 83 Detalle modelo geológico – geotécnico sección 6 (paseo peatonal superior y costanera en zona agrietada)

6.4.2 Criterios y herramientas de análisis

El análisis e identificación de áreas críticas de Morro de Arica a escala 1:1.000 se llevó a cabo a partir de los insumos obtenidos y resultados esperados. De acuerdo con los tipos de remociones en masa presentes en el área de estudio se identificaron criterios de falla de los materiales, diferenciando mecanismos con control de estructuras geológicas (como cuñas, fallas planas y deslizamientos traslacionales de bloques de roca) y mecanismos asociados a macizos rocosos menos competentes, cuya tendencia será a fallar de forma rotacional como lo muestra esquemáticamente la Fig. 84.

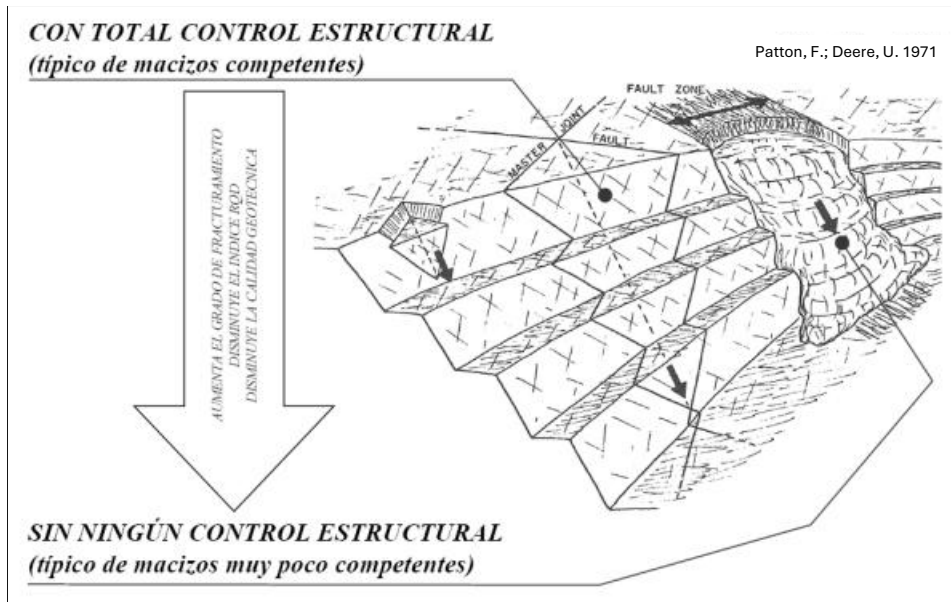


Fig. 84 Mecanismos de falla en taludes con y sin control de estructuras geológicas.

Se evaluó la estabilidad de los perfiles o secciones de análisis a partir de los mecanismos presentes en cada sección, considerando: un análisis geométrico – estructural con apoyo de proyección estereográfica de estructuras; un análisis para deslizamientos (rotacionales o traslacionales según el caso) y un análisis para caídas de rocas. Para el análisis, se utilizaron los softwares Dips, Slide y Rocfall de Rocscience (www.rocscience.com), cuyas licencias fueron facilitadas por la empresa E-Mining Techology S.A. para fines del presente estudio. La validación de los resultados se llevó a cabo a partir de casos de remociones en masa declaradas en el Morro y de las cuales se tiene antecedentes sobre su generación, alcance y material involucrado (por ejemplo Fig. 85).

Fecha: 1 de abril de 2014

Lugar: Morro de Arica

Fenómeno: Caídas y deslizamientos de rocas

Áreas afectadas: costanera (sólo daños materiales)

Desencadenante: Sismo Mw 8,2

<https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/sismos/desprendimiento-de-rocas-en-el-morro-de-arica/2014-04-02/140921.html>



Fig. 85 Caídas y deslizamientos en el Morro de Arica el 1 de abril de 2014.

6.4.3 Propiedades y escenarios de modelamientos

Para el estudio se realizó un análisis de estabilidad para las 10 secciones definidas considerando los mecanismos presentes en cada sección, realizando los siguientes análisis:

Análisis geométrico estructural con proyección estereográfica.

Una de las herramientas que existen para evaluar la estabilidad de bloques de rocas limitados por estructuras geológicas (como fallas planas y cuñas) son las proyecciones estereográficas para el análisis cinemático de laderas, en los cuales se proyectan los sistemas de estructuras principales o dominantes, se proyectan las laderas y parámetros del ángulo de fricción de la superficie de las estructuras. Una de las grandes falencias del análisis cinemático utilizando proyecciones estereográficas, es que las estructuras no están georreferenciadas o ubicadas espacialmente con respecto al talud, por lo tanto, no existirán nociones de las dimensiones o volumen del bloque analizado independiente del resultado obtenido. En la Fig. 48 se asumen iguales condiciones de talud, iguales condiciones en el rumbo y manto e iguales propiedades de las estructuras. Al utilizar herramientas estereográficas para el análisis cinemático en este caso, no nos orientará sobre el volumen inestable con iguales Factores de Seguridad (FS).

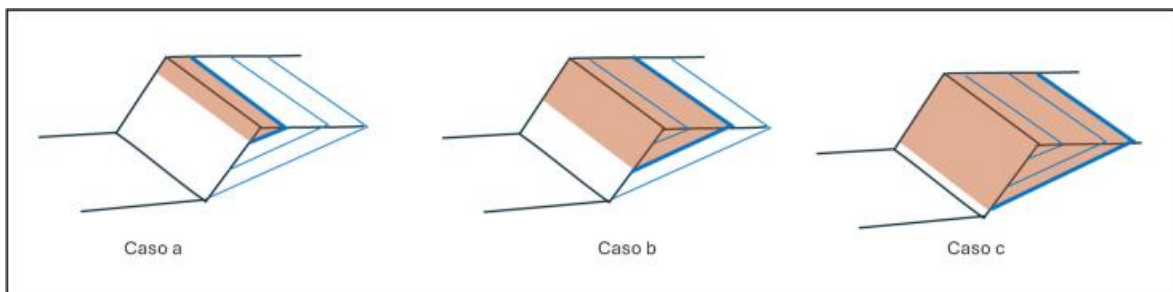


Fig. 86 Comparación fallamiento plano con iguales condiciones según proyección estereográfica

Para subsanar lo anterior, se realiza un análisis geométrico estructural de una ladera, y que consiste en visualizar las estructuras geológicas interceptadas con la ladera haciendo uso de vistas en plantas, perfiles y analizando en detalle el modelo de estructuras geológicas. En el diseño y estudio de estabilidad de taludes mineros, este análisis resulta fundamental pues dimensiona en términos de volumen y FS las zonas inestables. Hay softwares que lo generan de manera automática a partir del DEM y el modelo de estructuras geológicas en superficie (Tangram de Timing) pero su costo supera los alcances del estudio.

En el caso del Morro, se hizo un análisis geométrico estructural que incluyó la visualización de las geometrías tipo cuñas, fallas planas y bloques de roca limitados por estructuras que están en una condición geométrica favorable a caer o deslizar. Este se hizo a partir de datos de terreno, proyección del modelo de estructuras en superficie y construcción de secciones de análisis. La Fig. 87 muestra a modo de ejemplo cómo se visualizan geometrías en

condiciones geométricas favorables para cuñas (el caso a, en la antigua cantera) y en la ladera que limita al este el Museo (caso b).

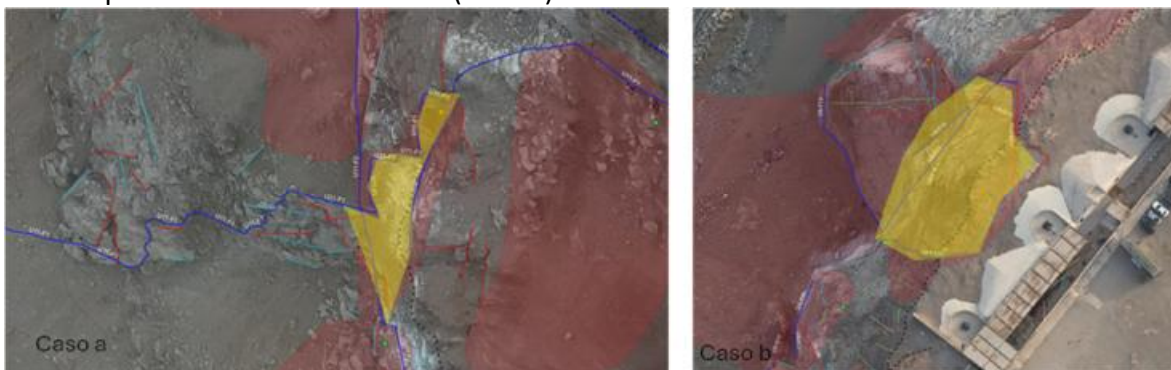


Fig. 87 Ejemplos de visualización para análisis geométrico estructural

Este análisis se complementó con la proyección estereográfica de las estructuras, sin hacer el análisis cinemático de forma estereográfica. Esta proyección permitirá ver cuáles sistemas están en condición de falla plana o cuña cuando se combinan entre sí, indicando la posibilidad de existencia para cada perfil. Para proyectar estereográficamente los sistemas, en una primera etapa se prepararon las bases de datos de estructuras geológicas para su proyección, generando la conversión de los datos de rumbo/manteo a dip/dipdir (manteo/dirección de manteo) y de esta forma trabajar con la proyección de los polos de las estructuras (utilizando el software Dips de Rocscience).

Se seleccionaron y proyectaron estereográficamente los sistemas de estructuras dominantes para cada sección o perfil de análisis considerando un halo de 20 metros a ambos lados del perfil. Esto fue posible gracias a que los sistemas se encuentran georreferenciados. También se proyectaron los taludes (con sus distintos ángulos) en cada caso obtenidos de la caracterización geométrica de cada sección mostrada anteriormente. En algunos casos en los cuales se tenían antecedentes de las propiedades de las estructuras se proyectó estereográficamente el ángulo de fricción. Es importante señalar que la densidad de estructuras para cada perfil será variable, dado que se seleccionaron las estructuras presentes para cada perfil lo que va de la mano con el nivel de fracturamiento del macizo rocoso.

Los bloques identificados en condición geométrica favorable fueron analizados como casos particulares de deslizamientos traslacionales mediante el método de las tajadas estimando Factores de Seguridad (mostrado más adelante).

Los detalles y respaldos se pueden ver en detalle en el ANEXO F.

Análisis para deslizamientos (rotacionales y traslacionales).

Este análisis la evaluación de la estabilidad de los distintos perfiles considerando la estimación de un FS (Factor de Seguridad) evaluado según se muestra en la Tabla 12, es decir evaluando las fuerzas que favorecen la desestabilización del material versus las fuerzas que se oponen al movimiento o retienen la masa.

Para cada sección de análisis se evaluaron condiciones de estabilidad mediante el método de las tajadas (*slides*) el cuál calcula FS mínimos para distintas condiciones utilizando software Slide Rocscience. En el caso de deslizamientos **rotacionales**, se definió una superficie de falla curva y se generaron grillas de búsqueda de superficies con FS min automáticamente para cada perfil. En el caso de **deslizamientos traslacionales**, también se evaluó la estabilidad utilizando el método de las tajadas, pero considerando una superficie de falla no curva generada para el bloque que se está analizando (identificado a partir del análisis geométrico – estructural). En el ANEXO F se muestra el detalle de los criterios y escenarios modelados. El análisis de estabilidad incluyó un caso estático, un caso sísmico y un caso sísmico incluyendo la presencia de grietas de tensión. En el caso del caso sísmico, se consideraron informes y estudios anteriores referidos a sismos en Arica, el comportamiento de los suelos y remociones en masa (Tapia, et al., 2002). También se consideraron resultados del trabajo de (Becerra, 2014) y la microzonificación de los suelos de Arica y las clases de suelo y sus factores de amplificación según la NEHRP (1997). Para incluir las grietas, se utilizó la información del modelo de estructuras geológicas del área.

Para el análisis de los deslizamientos (**rotacionales y traslacionales**) se utilizaron las propiedades presentadas Tabla 12.

Tabla 12 Propiedades análisis de estabilidad Morro de Arica.

Tipo de material	Características	Propiedades
Roca cubierta con regolito	Unidad compuesta por sedimentos y detritos semi compactados que se encuentran en la cima del Morro cubriendo las rocas. Los fragmentos son angulosos y su composición varía entre rocas sedimentarias y volcánicas, con tamaños de bloques menores a 20 cm. Espesor 2 m con geometría paralela a la topografía.	Dureza baja a media (compresión simple: 27,7 a 55 MPa) Cohesión C (kN/m ²) < 100. Se usa 90 kN/m ² . Ángulo de fricción Phi (°) 25°-30°. Se usa 30°. Peso Unitario de 18 kN/m ³ .
Roca fracturada	Unidad particular de litología no determinada (posiblemente volcánica) pero que se diferencia del resto por el grado de fracturas y agrietamiento que presenta. Se caracteriza por su mala calidad geotécnica (GSI 30 según datos de terreno)	Cohesión C (kN/m ²) entre 100 y 200. Se usa 150 kN/m ² Ángulo de fricción e15° - 25°. Se usa Phi (°) 25°. Peso Unitario de 18 kN/m ³ Geological Strength Index (GSI) 30 según datos de terreno (mala calidad geotécnica)
Rocas sedimentarias	Secuencia que agrupa a las rocas sedimentarias (indiferenciadas) en la parte superior del Morro, alcanzando 40m de potencia. Incluye areniscas, limolitas, lutitas de colores claros, con dureza media y poca presencia de estructuras geológicas, dispuestas con maneto sub horizontal bajo la roca cubierta con regolito.	Dureza media (compresión simple 55 MPa) Cohesión C (kN/m ²) 200-300. Se usa 300 kN/m ² Ángulo de fricción Phi (°) 25°-35°. Se usa 32°. Peso Unitario de 20 kN/m ³ . Geological Strength Index (GSI) 20-40 según datos de terreno (mala a regular calidad geotécnica)
Rocas volcánicas	Unidad que agrupan todas las rocas volcánicas en la parte central y superior del Morro. Incluye pillow lavas, andesitas, brechas volcánicas. La secuencia alcanza potencias de 80m. Las rocas tienen alta dureza. Presentan diaclasas y fallas que atraviesan la secuencia, que incluyen largos métricos. Están abiertas o con rellenos de sales solubles.	Dureza alta a muy alta. Resistencia a la compresión simple: 100 MPa. Cohesión C (kN/m ²) entre 300 y 400. Se usa 350 kN/m ² . Ángulo de fricción Phi (°) 35° - 45°. Se usa 40°. Peso Unitario de 20 kN/m ³ Geological Strength Index (GSI) 50-65 según datos de terreno (regular a buena calidad geotécnica)
Material antigua remoción	Unidad que agrupa depósitos de remoción en masa antiguos indiferenciados, incluyendo los grandes volúmenes en ladera posterior a Ayllu y depósito en la en la ladera del Morro en la actual zona de zanja. Compuesto por gravas (bloques centímetros a métricos) con granulometría y composición variable.	Cohesión C (kN/m ²) entre 90 y 200. Se usa 90 kN/m ² . Ángulo de fricción Phi (°) 30° - 32°. Se usa 30°. Peso Unitario de 18 kN/m ³
Zanja	Incluye zona de zanja artificial generada para contención de rocas. Actualmente se usa como basural y habitación personas en situación de calle.	Cohesión C (kN/m ²) entre 90 y 200. Se usa 100 kN/m ² . Ángulo de fricción Phi (°) 20°. Peso Unitario de 18 kN/m ³
Muro de roca	Enrocado artificial compuesto de bloques de rocas métricos trenzados con cables de acero y anclajes fijos a las rocas. Alcanza una altura de hasta 5 metros y se construyó para retener rocas a continuación de la zanja y al borde de la calzada.	Cohesión C (kN/m ²) entre 200 y 300. Se usa 300 kN/m ² . Ángulo de fricción Phi (°) 35° - 38°. Se usa 35°. Peso Unitario de 20 kN/m ³
Infraestructura	Cubierta de asfalto asociada a estacionamientos de condominio Ayllu, espesor 50 cm	Cohesión C (kN/m ²) 250 kN/m ² Ángulo de fricción Phi (°) 40°. Peso Unitario de 20 kN/m ³
Zona de falla	Zona o área que incluye una zona asociada a una o varias trazas de fallas con espesor importante para la escala del mapeo (1:1.000) determinadas a partir del modelo estructural del estudio.	Cohesión C (kN/m ²) < 100 kN/m ² . Valor usado 90 kN/m ² . Ángulo de fricción Phi (°) ≤15° (se usa 15°) Peso Unitario de 15 kN/m ³
Depósitos al pie de talud	Unidad que agrupa a depósitos al pie del Morro cuyo origen no es determinado, incluye sedimentos removidos y arrastrados por viento.	Cohesión C (kN/m ²) < 100 kN/m ² Ángulo de fricción Phi (°) 20°. Peso Unitario de 20 kN/m ³
Lutitas	Rocas sedimentarias de grano fino estratificadas en la base de la secuencia. Manteo sub horizontal y presenta un espesor máximo de 20 m. Presencia de diaclasas cerradas o rellenas con sales solubles y cortas (1-3m) y espaciamentos < 50 cm que ocasionan que se rompan en bloques pequeños a través de estructuras. La resistencia al cizalle y calidad que presenta esta unidad es baja.	Dureza media a baja. 27,7 a 55 MPa. Cohesión C (kN/m ²) entre 100 y 200. Se usa mínimo del rango. Ángulo de fricción Phi (°) 15° - 25°. Se usa 18°. Peso Unitario de 18 kN/m ³ Geological Strength Index (GSI) 30 según datos de terreno (mala calidad geotécnica)

Análisis para caídas de rocas.

Para modelar y evaluar el alcance de las caídas de rocas o materiales desprendidos desde las laderas del Morro de Arica, se definieron distintos escenarios para cada perfil de análisis. En cada caso, se definieron las zonas desde dónde se pueden desprender material, especialmente desde zonas fracturadas, agrietadas o de zonas afectadas por estructuras geológicas. También existen registros de caídas y desprendimientos de sedimentos y rocas desde laderas con presencia de materiales menos consolidados, principalmente al sur del Morro de Arica, hacia el condominio Ayllu. Por lo general, los bloques provienen desde las zonas rocosas de la ladera con mayores pendientes y altura (generalmente desde las partes altas con pendientes entre 45° y 85°) y desde zonas con materiales sedimentarios (como depósitos de antiguas remociones en masa) en los cuáles existen zonas con ángulos mayores a la estabilidad natural del depósito (superiores a 35°) o geometrías irregulares desde las cuales se desprende material.

Considerando todos los antecedentes, especialmente los levantados de terreno, se definieron tres escenarios, desprendiendo bloques desde laderas con diámetros entre 40cm y 2m de diámetro. El peso de los bloques se determinó considerando valores de la densidad media de las rocas entre 2,32 y 2,7 g/cm³. Los valores para rocas varían según su composición y propiedades. En el enlace de la plataforma Geovirtual.cl se presenta una tabla con valores para rocas (<https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/06003grav.htm>). A partir de los pesos de los bloques calculados, se definieron los escenarios a modelar en términos de tamaño de bloques, considerando rocas entre 890 kg; 1,4 ton y 12 ton. Para cada sección de análisis, se definió entre una y tres zonas de lanzamiento incluyendo la proyección de 20 a 50 bloques. Los lugares de lanzamiento se definieron como zonas, es decir, se lanzan las rocas desde sectores y no de zonas puntuales, las cuales se definieron usando los antecedentes de eventos ocurridos, el modelo geológico geotécnico, el modelo estructural, las condiciones de terreno y el levantamiento fotogramétrico. Las secciones se modelaron haciendo uso del software *Rocfall* de *Rocscience* facilitado para fines del presente estudio por la empresa E-Mining Technology S.A.

La trayectoria de los bloques dependerá principalmente de la geometría del talud, zona de lanzamiento, propiedades de los materiales, tamaño y forma de los bloques. La definición de las zonas de lanzamiento de bloques se hizo a partir de antecedentes de terreno, el catastro y el uso del levantamiento fotogramétrico. Para la velocidad de lanzamiento de los bloques, se utilizaron tres escenarios. Uno considerando el lanzamiento de los bloques desde el reposo (velocidad horizontal y vertical 0m/s). Este valor se basa en los estándares de diseño de rajos en minería chilena, en los que los bloques se lanzan desde el reposo. Un segundo escenario consideró el lanzamiento de los bloques con una velocidad de 0,2m/s estimada a partir de antecedentes de las remociones en masa ocurridas en las laderas del Morro, como la del 2014 en la Playa del Surf, en la que se tiene un área de generación y alcance (punto de inicio, término y distancia) y el mecanismo de rodamiento (ejemplo Sección 5 – perfil ubicado en la actual zanja).



En Tabla 13 se muestra los valores considerados para el análisis, los cuales fueron obtenidos de literatura, estudios anteriores como en los modelos de calibración. En el ANEXO F se muestran los detalles y respaldos teóricos.

Tabla 13 Valores de propiedades geotécnicas para el análisis de caídas de rocas.

Tipo de material	Propiedades modelo caída de rocas
Roca cubierta con regolito	Ángulo de fricción Phi (°) 25°-30°. Se usa 30°. Coeficiente de restitución normal (Rn) 0,33 Coeficiente de restitución tangencial (Rt) 0,87
Rocas sedimentarias	Ángulo de fricción Phi (°) 25°-35°. Se usa 30°. Coeficiente de restitución normal (Rn) 0,35 Coeficiente de restitución tangencial (Rt) 0,40
Roca fracturada	Ángulo de fricción Phi (°) 15 – 25°. Se usa 25°, Coeficiente de restitución normal (Rn) 0,35 Coeficiente de restitución tangencial (Rt) 0,85
Material antigua remoción	Ángulo de fricción Phi (°) 25°-30°. Se usa 30°. Coeficiente de restitución normal (Rn) 0,32 Coeficiente de restitución tangencial (Rt) 0,72
Infraestructura (asfalto)	Ángulo de fricción Phi (°) 19°-59°. Se usa 30°. Coeficiente de restitución normal (Rn) 0,4 Coeficiente de restitución tangencial (Rt) 0,9
Rocas volcánicas	Ángulo de fricción Phi (°) 35°-45°. Se usa 40°. Coeficiente de restitución normal (Rn) 0,45 Coeficiente de restitución tangencial (Rt) 0,9
Zanja	Ángulo de fricción Phi (°) 20°. Coeficiente de restitución normal (Rn) 0,39 Coeficiente de restitución tangencial (Rt) 0,56
Muro roca	Ángulo de fricción Phi (°) 35°-38°. Se usa 35°. Coeficiente de restitución normal (Rn) 0,35 Coeficiente de restitución tangencial (Rt) 0,85
Depósitos pie de talud	Ángulo de fricción Phi (°) 20° Coeficiente de restitución normal (Rn) 0,35 Coeficiente de restitución tangencial (Rt) 0,85
Zona de falla	Ángulo de fricción Phi (°) 15° Coeficiente de restitución normal (Rn) 0,30 Coeficiente de restitución tangencial (Rt) 0,23
Lutitas	Ángulo de fricción Phi (°) 15° - 25°. Se usa 20° Coeficiente de restitución normal (Rn) 0,25 Coeficiente de restitución tangencial (Rt) 0,50

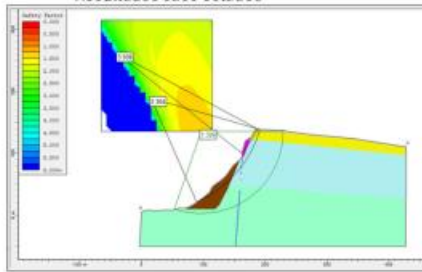
6.4.4 Resultados

El detalle de los resultados obtenidos para las 10 secciones de análisis en sus distintos escenarios se muestra en detalle en el ANEXO F. Anteriormente en la Fig. 87, se presentó un ejemplo de las geometrías reconocidas mediante el análisis geométrico – estructural. Para al análisis de deslizamientos rotacionales, se muestra a modo de ejemplo en la Fig. 88 los resultados para la Sección 3 en la zona de roca fracturada (asociada a la antigua cantera), presentándose los valores de FS mínimos en cada escenario.

Sección 3

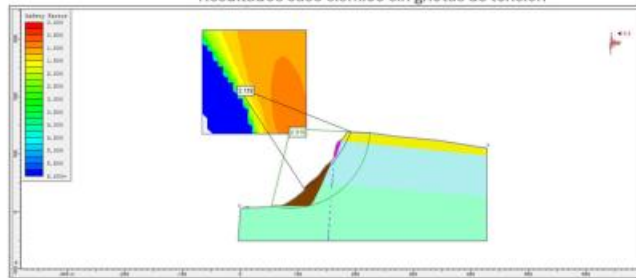
Perfil U11_ roca fracturada

Resultados caso estático



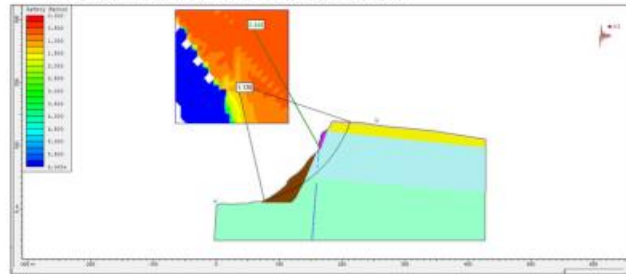
Análisis deslizamientos rotacionales

Resultados caso sísmico sin grietas de tensión



Caso	Factores de seguridad (mínimo)
Estático	1,326
Sísmico	0,916
Sísmico con grietas de tensión	0,448

Resultados caso sísmico con grietas de tensión



- Zona crítica en caso de sismos ($FS < 1.0$) falla rotacional profunda que reduce plataforma hasta 50 metros.
- Con grietas, las zonas inestables ($FS < 1.0$) en el caso de sismos son los remanentes de roca fracturada por cantera.

Fig. 88 Ejemplo de análisis estereográfico Sección 2 zona de antigua cantera.

Como ejemplo del análisis de deslizamientos traslacionales, se muestra el caso del bloque agrietado en la parte posterior el Museo (Sección 7). Ver Fig. 89. En este y otros casos identificados, también se realiza definiendo Factores de Seguridad mediante el método de las tajadas. Pero en estos casos, la superficie de análisis del deslizamiento se define como no circular y la superficie de evaluación pasa justo por la falla que limita el bloque (por la zona de falla definida).

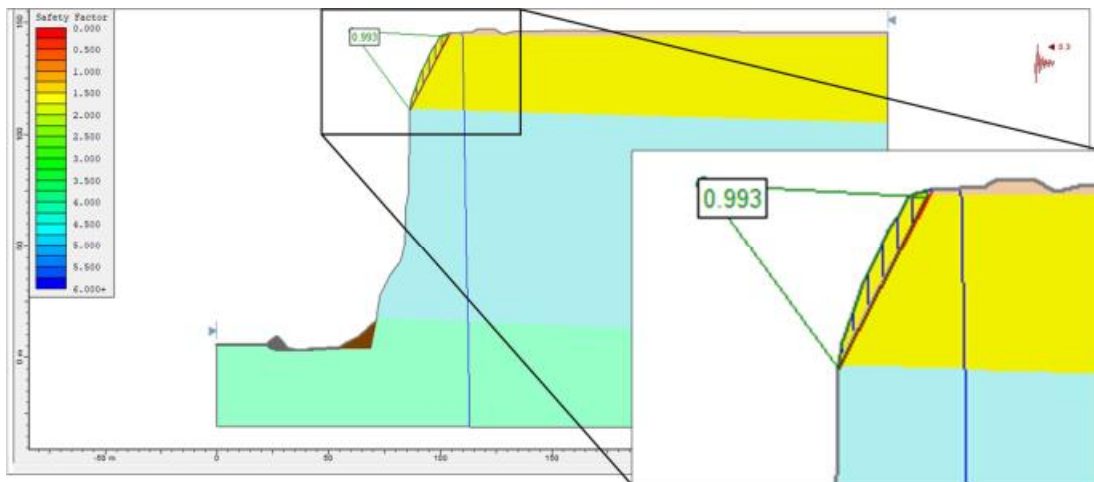


Fig. 89 Ejemplo de análisis de deslizamiento traslacional bloque sección 7 (sector este del Museo).

Para el análisis de las caídas de rocas y materiales, se muestra a modo de ejemplo en la Fig. 90 los resultados para la Sección 2, también definida en zona de roca fracturada por la antigua cantera.

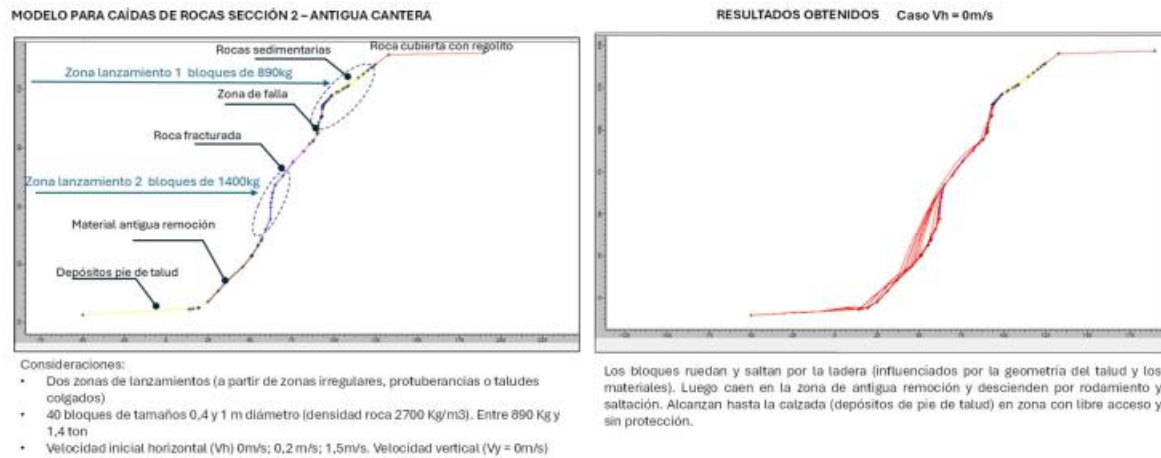


Fig. 90 Ejemplo de análisis de caídas de rocas y materiales.

A partir de los resultados de alcance obtenidos para todas las secciones, se definen las recomendaciones, zonas de restricción y zonas de seguridad para el área de estudio. La Fig. 91 muestra una imagen que representa todas las zonas de lanzamiento y alcance para caídas de rocas de las 10 secciones definidas.

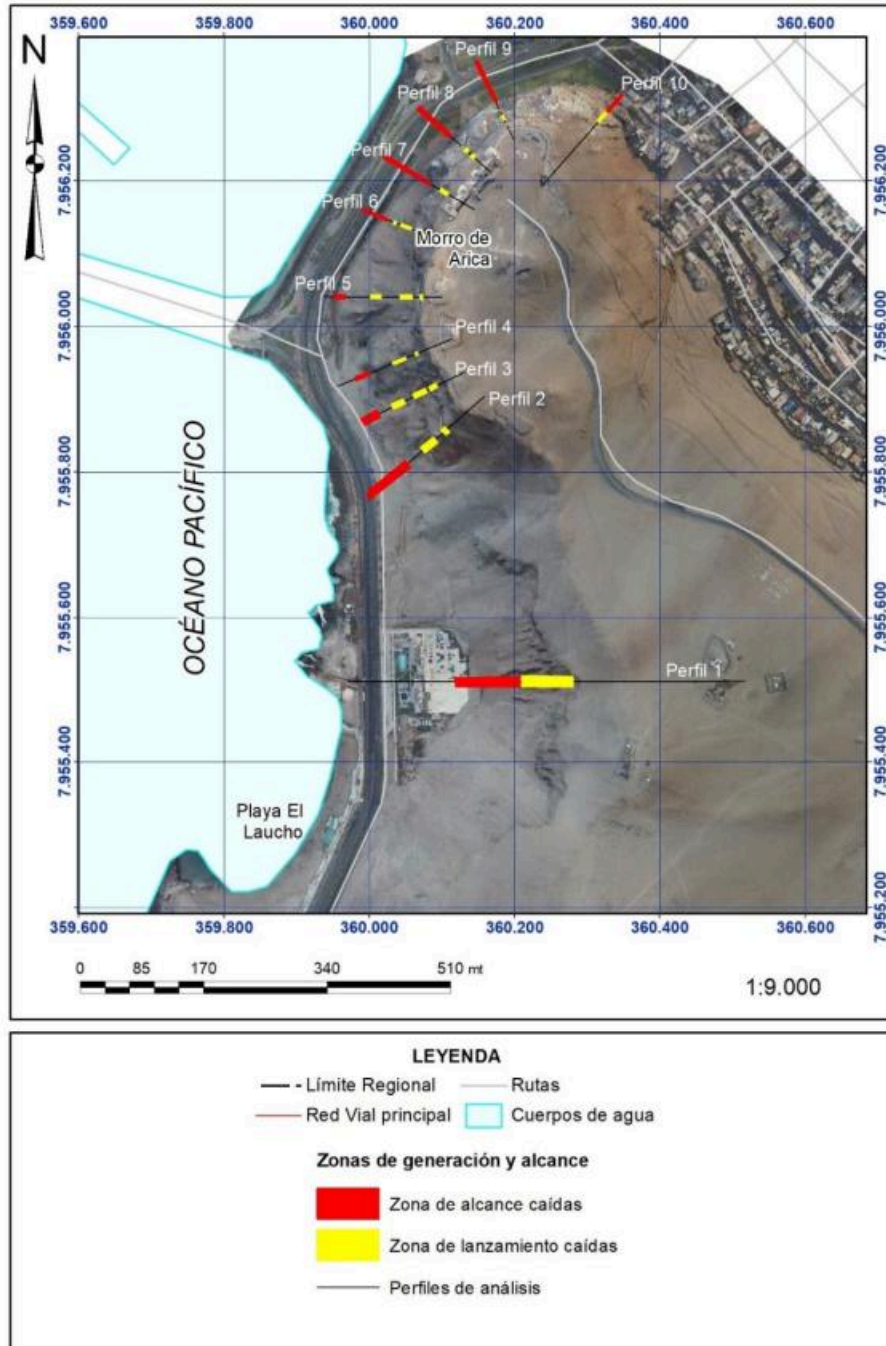


Fig. 91 Representación de las zonas de generación y alcance para caídas de rocas.

6.5 Conclusiones

Los resultados del análisis de estabilidad realizado permitieron identificar zonas dentro del área de estudio que actualmente están en condición de equilibrio límite, es decir, presentan una estabilidad marginal dada por factores de seguridad cercanos a 1,0 los cuales se reducen ($FS < 1,0$) al considerar las grietas del terreno y un eventual sismo, siendo **zonas potencialmente inestables**. En caso de ocurrir remociones en masa en estas zonas, podrían afectar la plataforma superior del Morro de Arica, donde actualmente se emplazan los paseos, infraestructura patrimonial y turística. Esta pérdida de plataforma (o retroceso) es desde el borde del talud (escarpe) hacia la zona donde transitan personas o se encuentra la infraestructura del Museo, con distancias potencialmente afectadas entre 20 y 50 metros. También se identificaron bloques que pueden desprenderse desde las laderas, alcanzado distintas trayectorias y alcances variables dependiendo de la sección analizada. Estos bloques quedan en su mayoría retenidos en la ladera o en la zona que actualmente tiene una zanja de protección. Estas zonas coinciden en las laderas con las zonas potencialmente inestables. En ambos casos, los resultados permiten **zonas críticas** para el área de estudio.

Además, existe la posibilidad que bloques eventualmente puedan traspasar hacia la costanera en los casos en que no hay zanja o hacia zonas sin protección. Las zonas de alcance en la proyección de los bloques permitieron definir una franja definida como **zona de restricción y seguridad**.

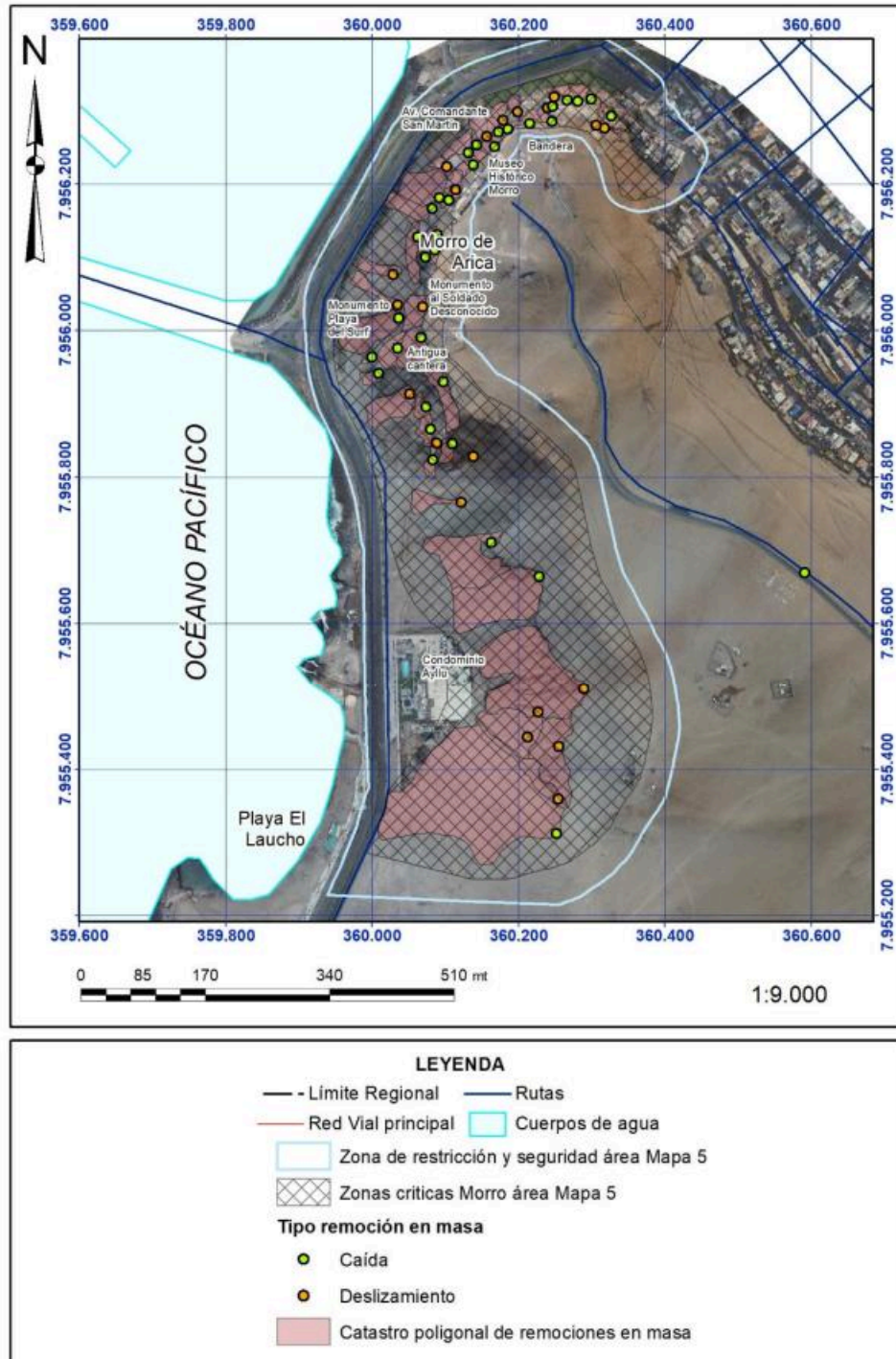


Fig. 92 Resultados y definición de zonas críticas, de restricción y seguridad del área del mapa 5 escala 1:1.000.

Las zonas achuradas (zonas críticas) tienen una alta probabilidad de presentar deslizamientos (rotacionales y traslacionales) y caídas de rocas desde las laderas del Morro y desde el escarpe y cornisas superiores. Estos deslizamientos y caídas de rocas provienen desde áreas actualmente agrietadas, con presencia de bloques sueltos, o limitadas por estructuras con rellenos de baja calidad geotécnica. Esta zona se definió a partir de los resultados de cada perfil y no debiese ser intervenida, pues sufre un deterioro progresivo producto de las fracturas, grietas, los rellenos que presentan, condiciones climáticas y de erosión en el Morro, entre otras. Estas zonas no deben estar restringidas a todo tipo de acceso e intervención.

También se define un área llamada zona de restricción y seguridad (línea color celeste) la cual cubre una franja por la parte inferior del Morro (bordeando el macizo por Av. Comandante San Martín) y cubre aquellas áreas que podrían ser alcanzadas eventualmente por bloques o deslizamientos en las laderas orientadas al oeste, norte y noroeste. Por la planicie superior (desde el borde del escarpe hacia la zona de infraestructura patrimonial), esta franja define una zona restricción y seguridad para evitar que las personas construyan, intervengan, se acerquen al borde de la ladera o se aglomeren en grupos. Tanto las zonas críticas como la zona de restricción y seguridad fueron definidas como un perímetro a partir de los resultados del análisis de estabilidad para cada perfil, considerando en la parte superior, una distancia desde el escarpe el doble de la definida como zona crítica, pero incluyendo además intervenciones, monumentos y paseos. En la parte inferior del Morro, está asociada al máximo alcance potencial de rocas y bloques en caso de remociones en masa de mayor volumen.

Las zonas potencialmente inestables o críticas del Morro podrían ser contenidas o mitigadas con obras de ingeniería, como la instalación de mallas, pernos, cemento proyectado u otra medida que ya en el pasado se evaluó y recomendó. Sin embargo, hay que recordar que históricamente existen estudios específicos de los cuales surgieron recomendaciones geotécnicas como soporte, fortificación, monitoreo y seguridad, y de las cuales a la fecha ninguna ha sido efectivamente implementada. En el ANEXO F se presentan en detalle las recomendaciones emitidas para cada caso considerado.

6.6 Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y considerando del carácter patrimonial y turístico del Morro, sumado a los costos, tiempos y efectividad de las medidas de sostenimiento, se optó en el presente estudio entregar recomendaciones orientadas principalmente a seguridad. Para definir las recomendaciones, se utilizaron los mismos escenarios que en el modelamiento de deslizamientos y caídas de material, considerando 3 casos definidos a partir de todos los antecedentes del estudio y presentados en detalle en el ANEXO F.

Tabla 14 Casos analizados para definir recomendaciones del área de estudio del mapa 5 escala 1:1.000.

Caso	Características	Probabilidad de ocurrencia	Impactos	Recomendaciones emitidas
Caso 1 Caída de bloques puntuales	Este caso se asocia a la caída puntual de bloques pequeños (< 40 cm de diámetro aproximadamente) desde las laderas del Morro. El tamaño está definido a partir de los antecedentes de las personas entrevistadas y de todos los antecedentes del estudio. Estos eventos puntuales son captados sólo por personas muy ligadas al Morro (como personal de mantención de jardines, vecinos o personas que habitan el lugar). El peso estimado de los bloques es menos a 1 tonelada (< 0,9 ton)	Alta , ya que a partir de los antecedentes de los habitantes y de las evidencias de terreno, desde las laderas del Morro siempre se está desprendiendo material.	Moderado . Si bien se tienen pocos registros de daños a personas o bienes a partir de esta caída puntual de bloques, el hecho es que personas transitan, trabajan, viven o pernoctan en el lugar. Por lo tanto, hay personas expuestas a estos bloques.	<ul style="list-style-type: none"> Prohibir accesos por parte superior e inferior. Para eso, se recomienda el cierre de la zona crítica mediante una reja perimetral. Para contener bloques < 1 ton, se suelen usar gaviones, enrocados, zanjas, camellones y muro de rocas. Se recomienda extender la construcción de la zanja y muro de enrocado o sistema similar hacia las zonas donde actualmente no existe (Secciones 2, 3, 4, 8 y 9). Instalar señalética advirtiendo riesgo y peligro por la parte superior e inferior. Se sugiere colocar mallas en Sección 10 en zona de casas. Erradicar a las personas que se encuentran habitando en la zanja.
Caso 2 Caídas y deslizamientos de varios bloques en conjunto	Este caso se asocia a remociones en masa como las ocurridas el 2014 o el 2021, en las cuales varios bloques se deslizan por las laderas del Morro. Estos eventos suelen llamar la atención de más personas (por el volumen involucrado y polvo levantado) y causan conmoción en la población. El tamaño definido para los bloques en este caso es entre 0,4 y 1m de diámetro (es decir, bloques individuales menores a 5 ton pero que en conjunto pueden sumar más volumen movilizado).	Alta , ya que a partir de los antecedentes y de las evidencias de terreno indican que las laderas del Morro han sido en parte modeladas producto de eventos de remoción en masa que han dejado cicatrices, zonas colgadas o bloques abiertos sensibles a deslizarse o caer.	Alto . Los registros de este tipo de eventos dan cuenta de daños a la infraestructura y dejan una condición favorable a nuevas remociones. Estas zonas alcanzarían parte de la costanera turística, en la que hay personas que transitan, trabajan, viven o pernoctan en el lugar expuestas a estos bloques.	<ul style="list-style-type: none"> Prohibir accesos por parte superior e inferior mediante el cierre de la zona crítica mediante una reja perimetral. Para contener bloques < 5 ton, se suelen usar gaviones, enrocados, zanjas, camellones y muro de roca o mallas de acero dinámicas. Se recomienda extender la construcción de la zanja y muro de enrocado o sistema similar hacia las zonas donde actualmente no existe (igual caso anterior). Instalar señalética advirtiendo riesgo y peligro por la parte superior e inferior.
Caso 3 Fallamiento mayor de la ladera	Este caso se asocia a un potencial fallamiento profundo o a mayor escala del talud, mediante una remoción en masa de importante volumen, como por ejemplo que deslizara la parte posterior del condominio Ayllu de manera rotacional o colapsara el bloque detrás del Museo de manera traslacional. En este caso, se consideran bloques de más de 2 m de diámetro con más de 5 ton de peso.	Moderada , ya que no existen evidencias recientes de estos eventos, pero se sabe que han ocurrido por la variación histórica en la geometría del Morro y por la presencia de zonas agrietadas y con evidencias claras de deformación.	Alto . En de ocurrir este tipo de proceso, tendría alto volumen involucrado (miles de m ³) el cual podría movilizarse a alta velocidad, siendo evento potencialmente muy catastrófico y con alto grado de pérdidas.	<ul style="list-style-type: none"> En este caso se recomienda realizar un estudio de monitoreo que permita estudiar el comportamiento de las zonas potencialmente inestables que abarcan mayor volumen (zona posterior a condominio Ayllu y zona de bloques agrietadas en la ladera este del Morro. Esto puede ser mediante InSAR, o radar o prismas topográficos, o sistemas Lidar o extensómetros Enel caso de grietas. Instalar señalética advirtiendo riesgo y peligro por la parte superior e inferior.

De igual forma se representan los casos en una figura tipo matriz de riesgos por remociones en masa, en la que se representa la probabilidad de ocurrencia en el eje vertical y el impacto en el eje horizontal. En el caso de la Probabilidad de ocurrencia, esta se estima a partir de

los resultados de los análisis y de lo expuesto en la tabla anterior. La nomenclatura usada considera los escenarios alto; moderado y bajo descritos para cada caso. Ver Fig. 96.

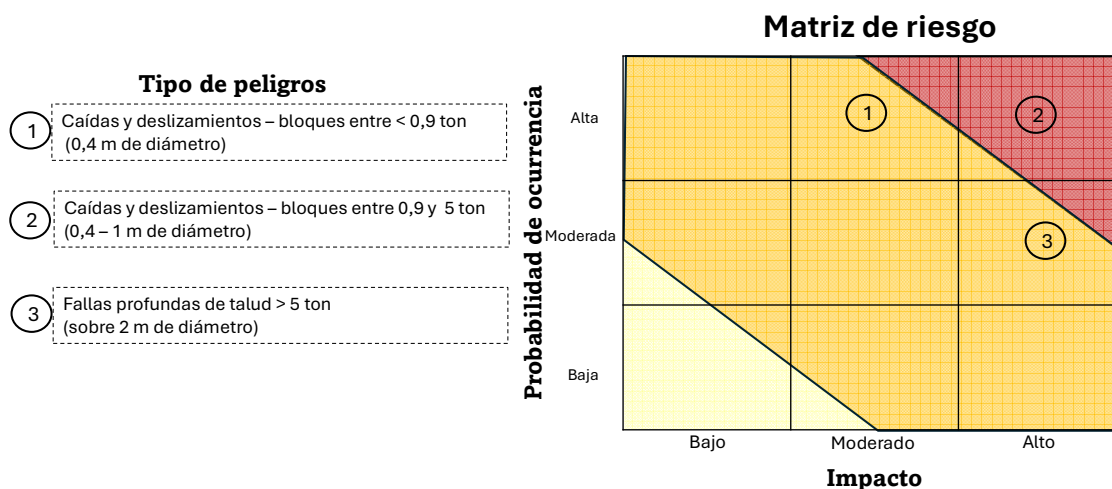


Fig. 93 Matriz de riesgo para el análisis de casos de peligros del área del Mapa 5

Las recomendaciones específicas indicadas para el Morro de Arica se presentan en la Fig. 94.

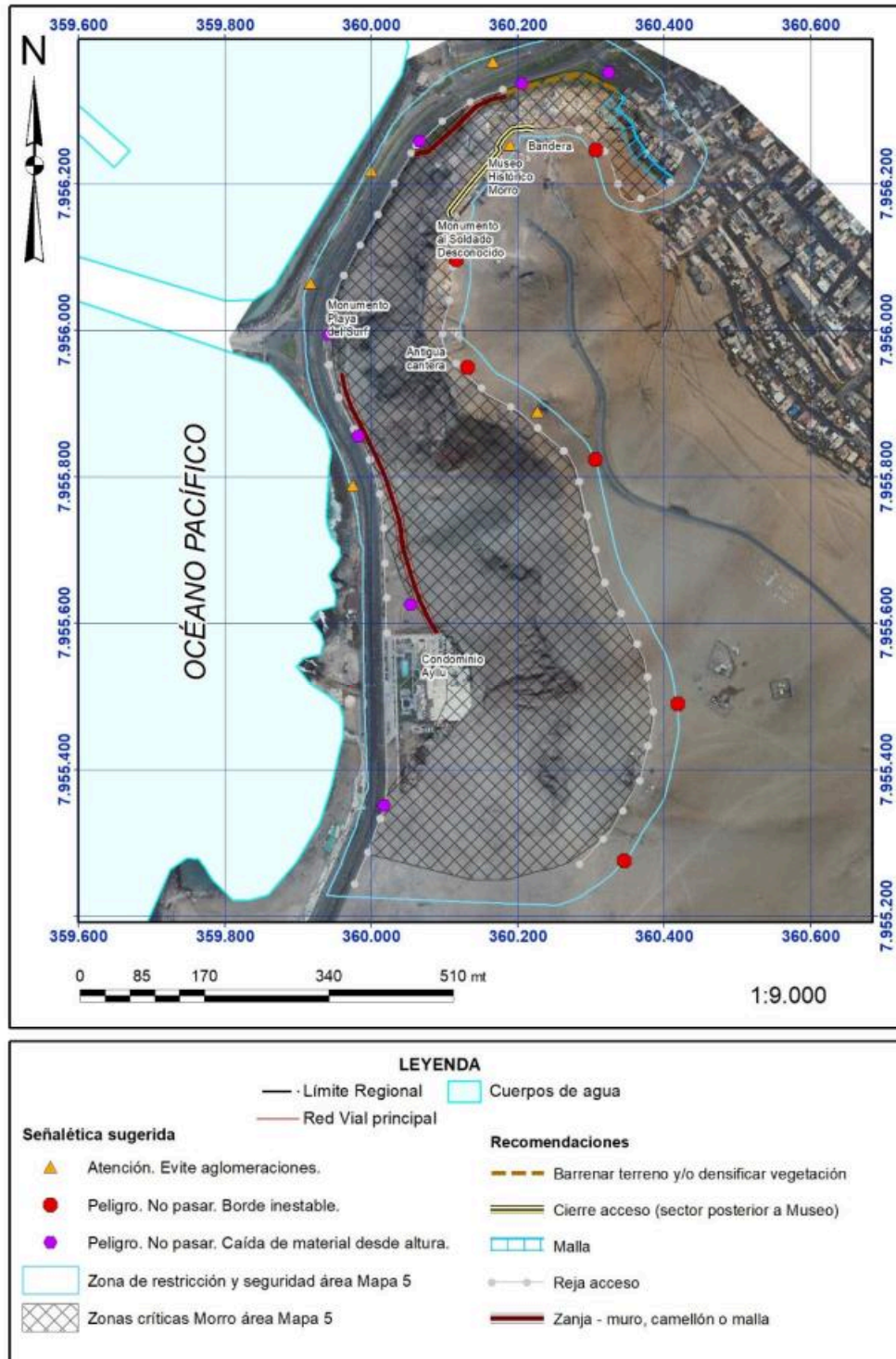


Fig. 94 Recomendaciones Morro de Arica.

En general las recomendaciones tienen por objetivo prohibir o impedir el acceso a las zonas potencialmente inestables; instalar señalética acorde a la condición y proteger las zonas de tránsito ante caídas y deslizamientos de material mediante barreras (como el actual muro de roca y zanja). Las actuales señaléticas que dan cuenta de la peligrosidad de las laderas del Morro se encuentran en mal estado y la información que entregan es deficiente. La zanja y muro de roca implementado por seguridad se encuentra actualmente colmatado (es decir, parcialmente relleno con material perdiendo su capacidad de almacenaje y contención). Además, como se señaló en el informe, existen personas habitando el sector, el que además es usado como basural y acopio de desperdicios. La zona del condominio Ayllu fue señalada como de alto peligro por remoción en masa en estudios anteriores, y en la actualidad se encuentra construida y en avance de nuevas edificaciones. El relleno y monitoreo de las grietas de la parte superior del Morro (museo) se encuentra colapsado y/o abandonado.

Específicamente se recomienda:

- Cierre perimetral para impedir el acceso por la parte inferior y superior de las laderas del Morro. Esto implica bloquear el acceso a parte de la infraestructura del borde superior en la zona crítica (zona achurada de Fig. 94).
- Realizar mantención de la actual zanja y muro, limpiando y barrenando el terreno de la zanja y erradicando a las personas que habitan el sector.
- Continuar la zanja y muro de roca hacia el sur (hasta Condominio Ayllu) y hacia el norte, hasta el límite de la actual reja y pasto. Fig. 94. La zanja debiese tener mínimo 2 metros de arena en la base en contrapendiente.
- En la zona en que actualmente hay pasto, se debe mantener el cierre perimetral, densificar la vegetación y/o barrenar (arar) el terreno
- En la zona en que hay casas en la base de ladera (cara N y NE de Morro), se sugiere instalar mallas dinámicas en la base de la ladera, las que deben ser definidas a partir de un estudio de ingeniería de detalle de la ladera.
- Complementar el cierre perimetral con señalética acorde al real escenario en buen estado. En Fig. 94 se representa la ubicación sugerida para las señaléticas y lo que debiesen transmitir. La Fig. 95 muestra ejemplos de estas señaléticas.
- A estos resultados, se debe incluir una franja o faja de seguridad, la que debe quedar expresamente establecida que se eviten aglomeraciones de personas y que no se deben realizar intervenciones antrópicas de ningún tipo en el Morro de Arica, incluyendo evitar vibraciones, como fuegos artificiales, explosiones o vibraciones sonoras.
- En el caso de la parte posterior del condominio Ayllu, se debe instar a la comunidad del edificio a aumentar la altura y resistencia del muro posterior a los estacionamientos. Esta recomendación debe tratarse directamente con la comunidad legal del condominio.

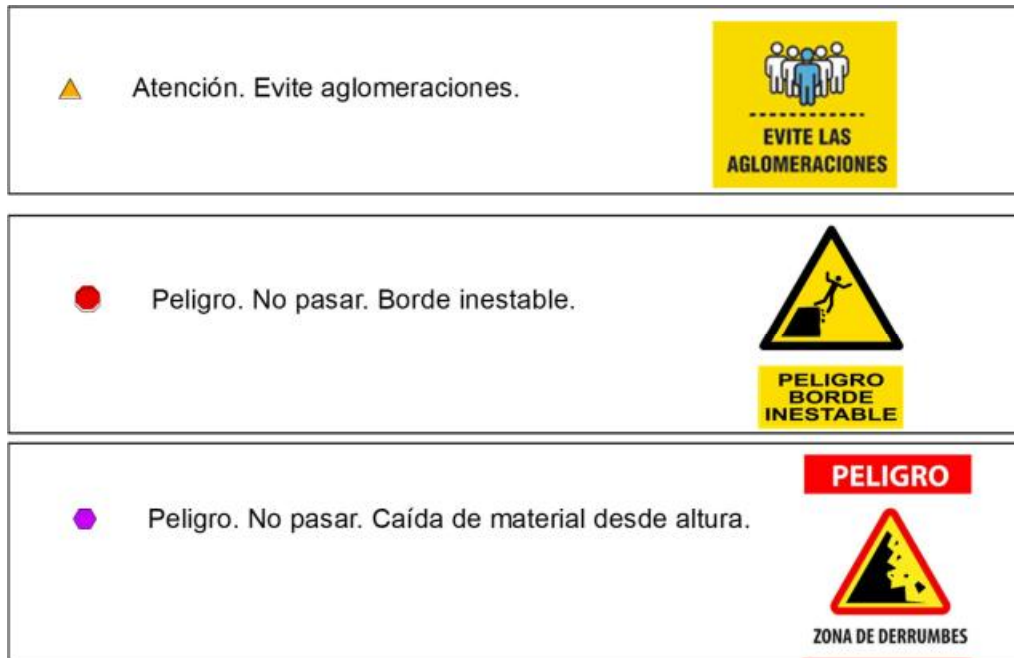


Fig. 95 Resumen estudios Morro de Arica 1960 – 2024.

La Fig. 96 muestra qué representaría el actual estudio del Morro de Arica en la línea del tiempo de estudios realizados a este emblemático macizo. La Fig. 97 muestra ejemplos de las recomendaciones emitidas.

Historia estudios del Morro, últimos 70 años

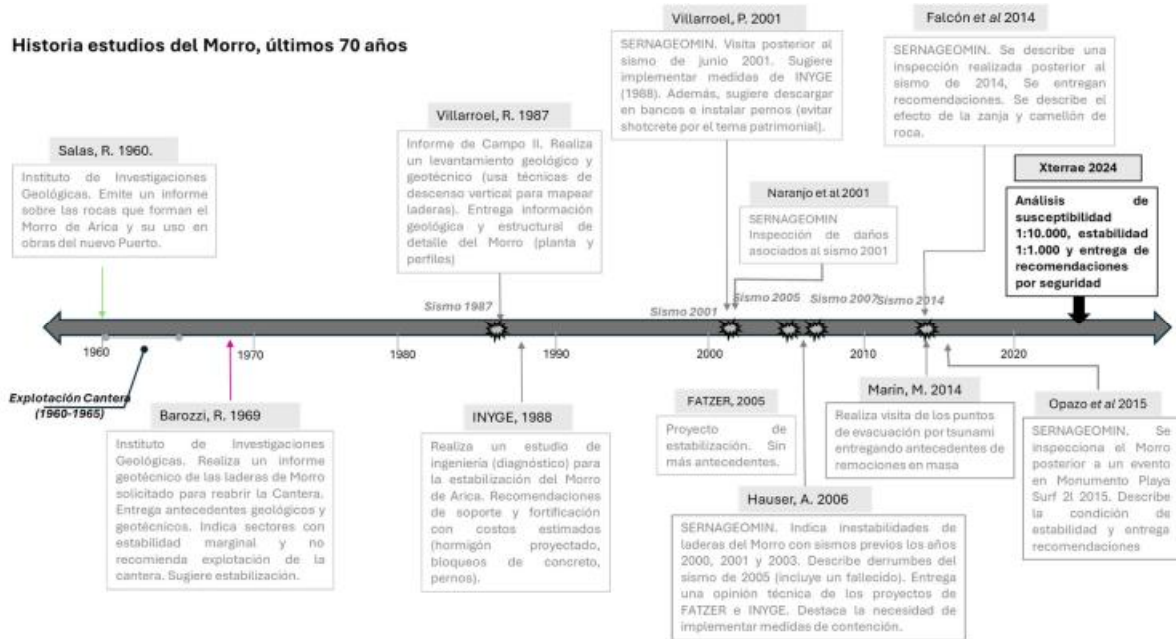


Fig. 96 Resumen estudios Morro de Arica 1960 – 2024.



Fig. 97 Recomendaciones Morro de Arica

7 ZONAS CRÍTICAS

El término “zona crítica” se puede definir como un área geográfica específica que muestra una intensa interacción entre factores naturales y humanos, lo que resulta en desafíos o problemas particulares que requieren atención y gestión especializada. Estas áreas suelen ser identificadas por su importancia estratégica, su fragilidad ambiental o su alta densidad poblacional (Gregory, et al., 2009).

En específico, y contextualizado al presente estudio, la definición de “zonas críticas” se refiere a zonas del territorio que tengan una alta o muy alta susceptibilidad de sufrir remociones en masa, o que concentren eventos de manera recurrente y que, simultáneamente, hayan sido registradas como zonas de especial y urgente atención debido a estar asociadas a algún acceso o infraestructura fundamental para la población. También se incluyó entre las zonas críticas algunos casos en que, pese a no ser una zona de susceptibilidad alta o muy alta, existen condiciones que hacen que la infraestructura existente sea particularmente vulnerable.

La identificación de zonas críticas se desarrolla a lo largo de todo el proyecto. Comenzando con la etapa inicial de revisión, análisis y sistematización de la información existente. Continuando con el catastro a escala 1:5.000, donde quedaron en evidencia zonas donde se concentran eventos de remoción en masa o que constantemente han sido afectadas por estos fenómenos a la población o zonas estratégicas de conectividad. Posterior a ello, mediante el mapa de susceptibilidad se corroboró que dichas zonas se encontraran en zonas de susceptibilidad alta o muy alta de remociones en masa, obteniendo una buena correlación. Sin embargo, a pesar de que en general el mapa de susceptibilidad sí representa la realidad, la escala de trabajo de los mapas es a 1:250.000, por tanto, la definición de zonas críticas no cuenta con el detalle suficiente y es necesario hacer trabajos a mayor detalle y estudios específicos, los que se detallan más adelante en el presente informe.

A continuación, se presentan las zonas identificadas como críticas, enumeradas, mostradas en la Fig. 102 y resumidas en la Tabla 15. Estas fueron agrupadas por comuna, y en el ANEXO D se describe cada una de ellas de manera más detallada, junto con una fotografía de terreno representativa de las amenazas presentes en la zona (adjunto al informe se encuentran las originales).

7.1 Comuna de General Lagos

La ruta A-93, es una de las principales vías que dan forma a la conectividad en dirección norte-sur en la comuna, llegando al punto tripartito en Visviri. Cuenta con registros concretos de remociones en masa, principalmente flujos que las han afectado, lo que las convierte en zonas críticas. También dentro de la comuna, las rutas A-23 y A-127 que conectan la región en dirección este-oeste, pueden verse afectada de manera significativa

tanto por caída de rocas y deslizamiento como por flujos. De esta forma, un evento como un sismo o precipitaciones intensas, como las que se pueden esperar producto del invierno altiplánico, podrían significar un compromiso serio a la conectividad comunal.

7.2 Comuna de Arica

En la comuna que concentra la mayor población, se identifican sectores críticos dentro de zonas mayormente urbanas y que han afectado a infraestructuras vial, férrea, industrial, entre otras. En Arica, el Morro y el borde costero sur (estudiado a escala 1:10.000 en el presente estudio y presentado en el ANEXO F: Morro de Arica y alrededores y mapa adjunto al este informe) tienen áreas críticas tanto en la zona turística y patrimonial del Morro como en zonas habitadas e industriales más al sur (por ejemplo, condominio Ayllu o laderas de áreas industriales de Copec o Corpesca). Más al sur de Arica, las Cuevas de Anzota son una zona crítica las que han tenido algunos eventos con pérdidas de vidas humanas (Fig. 98).



Fig. 98 Fotografía que muestra el acceso a las cuevas de Anzota, con evidencias de caídas y deslizamientos que han afectado la ruta (se ejemplifica con flechas rojas la dirección del material movilizado).

En la misma comuna de Arica, existen zonas críticas en los valles de las quebradas de Acha, Vítor, Azapa y Lluta, así como en el sector de caleta Vítor. Específicamente, existen tramos altamente susceptibles en el acceso a caleta Vítor (Ruta 5 Panamericana y rutas A-32 y A-

304). El Valle de Azapa (cuyo acceso principal es la ruta A-27) presenta zonas con alta a muy alta susceptibilidad. Además, es una zona con alto crecimiento de zonas pobladas.

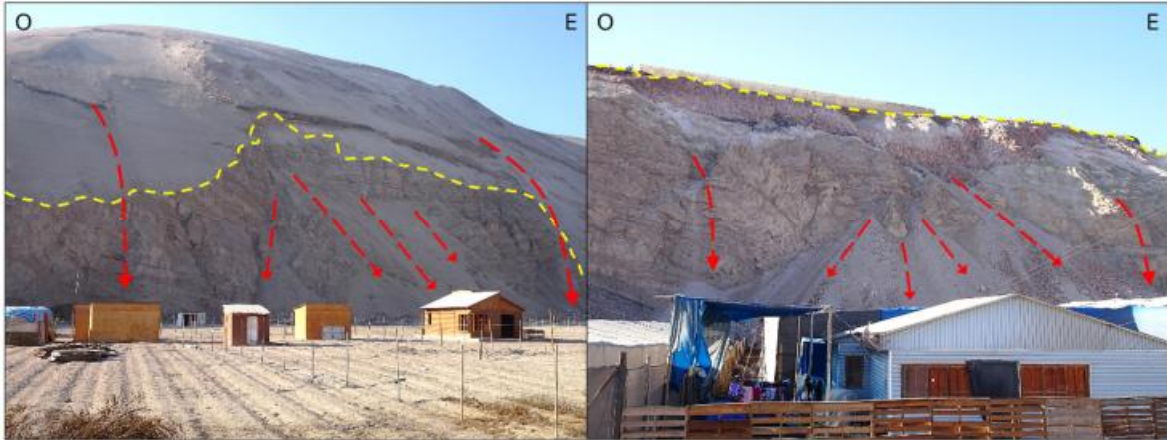


Fig. 99 Remociones en masa que afectan zonas pobladas en el Valle de Azapa. Archivo de terreno (las flechas rojas destacan las trayectorias del material movilizado; línea segmentada amarilla señala escarpes). Fotografías tomadas en zona urbanizada en ruta A-227 ID_RM 1500047 (coordenadas 390024.36E; 7945978.65S).

La ruta internacional CH-11 (que va por el valle del Lluta) tiene varios sectores en áreas críticas, como estación Rosario, cuesta El Tambo (fotografías), lo mismo que la ruta A-15 acceso embalse Chironta.



Fig. 100 Remociones en masas en ruta 11, cuesta dirección el Tambo-Zapahuira. Archivo de terreno (las flechas rojas indican la dirección del deslizamiento). Vista inferior de relleno de quebrada con evidencias de arrastre (flecha café) (398523.51 E; 7963305.66 S).

7.3 Comuna de Putre

En la comuna de Putre, la ruta internacional CH-11 que atraviesa la comuna, tiene varios sectores con muy alta susceptibilidad ante remociones en masa, que incluso fueron afectadas con las lluvias del reciente invierno Altiplánico (2024). En la Fig. 101 se muestra el depósito de un flujo reciente que atravesó la ruta 11 CH, afectado gran parte de las zonas aledañas.

De igual forma, tramos altamente susceptibles en la ruta A-31 (acceso a Tignamar), y que atraviesa además una serie de localidades como Saxamar, Lupica, Belén, Chapiquiña, entre otras. Cabe destacar que Putre, a pesar de que se encuentra en el límite entre la Precordillera y la Cordillera Principal, esta se encuentra sobre una gran terraza, evitando que la zona urbana sea altamente afectada por remociones en masa.



Fig. 101 Quebrada actividad en febrero 2024 en cruce a entrada a Zapahuira.

7.4 Comuna de Camarones

En la comuna de Camarones, se identificaron zonas críticas asociadas a poblados y rutas. El acceso principal al sector es por la Ruta 5 Panamericana, la cual tiene zonas de alta criticidad y ocurrencia de remociones recientes. También la Ruta A-35, camino a Codpa y al sector de Guanacagua, tiene zonas con alta criticidad a remociones en masa. Hacia el sector de Caleta Camarones, existen una serie de rutas (en la mayoría el único acceso) que tienen zonas críticas, como la A-376; A-345 y A-35 (hacia localidad de Camarones y Palca. Otras localidades con rutas con presencia de tramos susceptibles en esta misma comuna son consideradas zonas críticas, como el sector de Cuya (A-355; Taltape (A-345); Putaralla (A-335); acceso a Esquina (A-331); Ulapata (A-331). También accesos a Caritaya (A-41); Pailcoaillo (A-319) y la ruta que conecta Sacuna con Saguara (A-323).

Tabla 15 Resumen de las zonas críticas mostradas en la Fig. 102

Número de ficha	Sector afectado	Remociones identificadas
1	Ruta A-23 (sector cruce Río Lluta)	Caídas, deslizamientos y flujos
2	Ruta A-93	Flujos
3	Ruta A-127	Flujos
4	Al oeste del Morro de Arica, en la Costanera Av. Comandante San Martín	Caídas y deslizamientos
5	Borde costero al sur de Arica, en la Costanera Av. Comandante San Martín.	Caídas, deslizamientos y flujos
6	Borde costero al sur de Arica, en la Costanera Av. Comandante San Martín.	Caídas y deslizamientos
7	Cuevas de Anzota	Caídas
8	Quebrada Acha (ruta A-301)	Flujos
9	Caleta Vitor (Ruta A-302 y A-304).	Caídas, deslizamientos y flujos
10	Ruta 5 (cruce de quebrada Vitor).	Caídas y deslizamientos
11	San José - Valle de Azapa	Caídas, deslizamientos y flujos
12	Ruta 11-CH	Caídas, deslizamientos y flujos
13	Ruta A-143 (quebrada Lluta).	Caídas y deslizamientos
14	Rutas A-215 (quebrada Lluta, acceso al embalse Chironta).	Caídas, deslizamientos y flujos
15	Ruta 11-CH y Ruta A-149	Caídas, deslizamientos y flujos
16	Ruta A-31	Caídas, deslizamientos y flujos
17	Ruta 5 (cuesta Chinchorro)	Caídas y deslizamientos
18	Rutas A-306, A-307, A-315, A-331, A-335 y A-345.	Caídas, deslizamientos y flujos
19	Codpa, Guañacagua y Timar	Caídas, deslizamientos y flujos

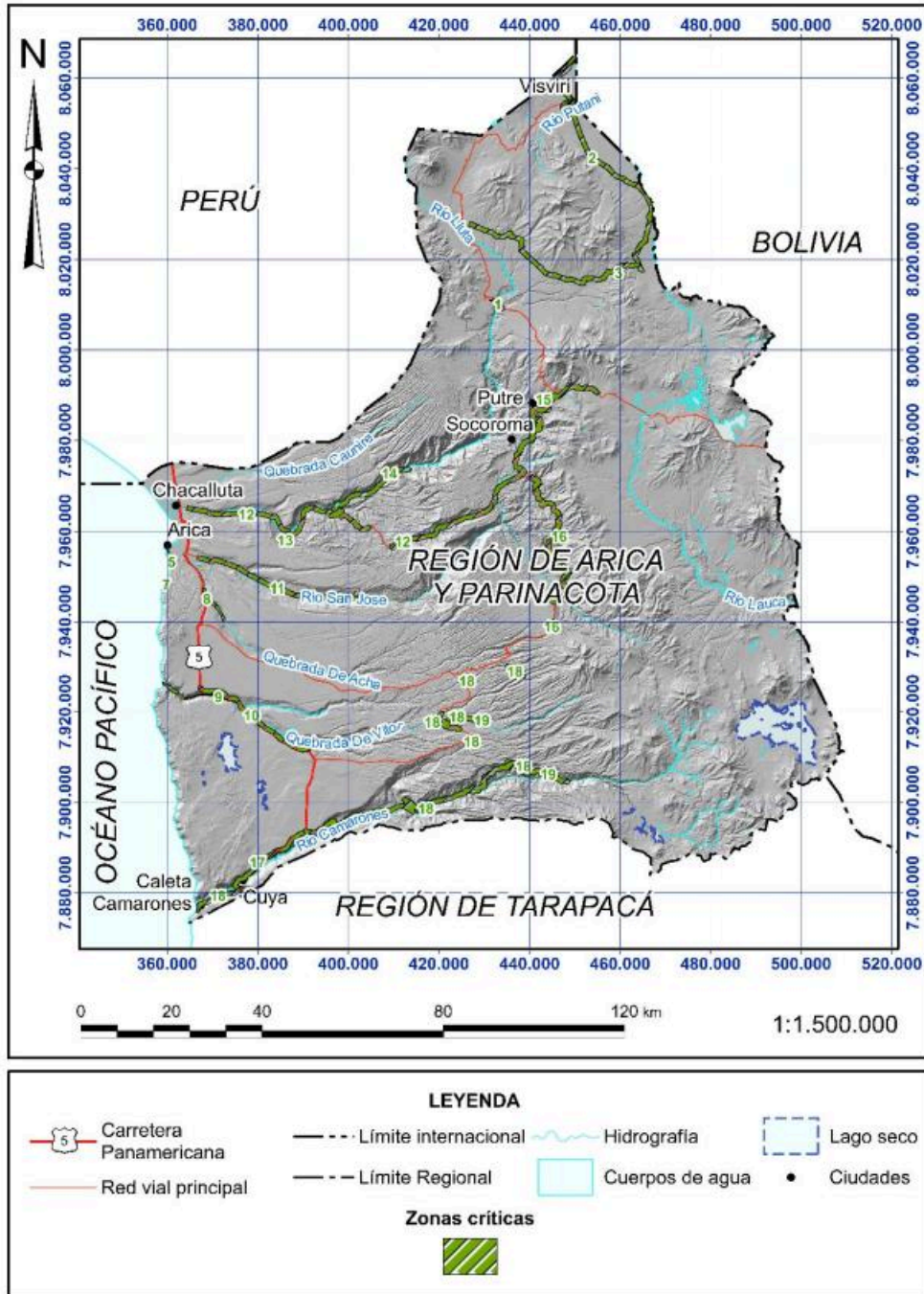


Fig. 102 Ubicación de zonas críticas en la región de Arica y Parinacota

7.5 Planes de manejo para las zonas críticas

Las zonas críticas de la región dependen, en un primer orden, del tipo de amenaza y de las condiciones locales que inciden en ella.

En un segundo orden, incide la infraestructura que se encuentra expuesta. Los tres principales tipos de infraestructuras amenazadas son áreas pobladas, áreas industriales o productivas y obras de vialidad. En los dos primeros casos, es más probable que afecten la integridad física de las personas, mientras que, en el último, aunque es posible que afecte a personas, la más probable afectación es la conectividad.

7.5.1 Caídas y deslizamientos

Un ejemplo recurrente de zonas afectadas por este tipo de amenaza se encuentra al fondo de las quebradas de piedemonte, donde existen varias localidades con condiciones para ser afectadas por estos procesos, especialmente por caídas, porque están ubicados junto a acantilados con un desnivel importante, que en algunos casos llega hasta los 1.000 m aproximadamente. En algunos casos, también hay rutas bajo esta condición que, en los casos más críticos, son el único acceso a determinados sectores o localidades.

En estos casos, se necesitan estudios destinados a reconocer las zonas donde es más probable que ocurran estos tipos de procesos, que combinen resultados de tipo geológicos y geotécnicos con el tipo de uso del territorio, especialmente en las zonas más expuestas. De esta forma, los estudios deberán considerar:

- Levantamiento de topografía de detalle e imágenes aéreas.
- Elaboración de catastro de detalle de las caídas y deslizamientos en el área (por ejemplo, escala 1:5.000), donde se reconozcan la mayor cantidad de procesos ocurridos.
- Levantamiento geológico de detalle (escala 1:5.000 o similar), donde se identifiquen las zonas de generación de los diferentes tipos de procesos. Para ello, se deberá distinguir en detalle los afloramientos de roca y los depósitos no consolidados.
- Análisis geotécnico, destinado a identificar las condiciones litológicas que inciden en la generación de estos procesos.
- Estudio de los factores condicionantes (litología, condiciones geotécnicas, pendiente, geomorfología, vegetación, etc.) y desencadenantes (principalmente precipitaciones y sismos) que inciden en la generación de remociones en masa en cada lugar.
- Estudio de las condiciones de vulnerabilidad, que inciden en la generación del riesgo.
- Elaboración de planes para la mitigación y/o gestión del riesgo.

Debe considerarse que, aunque los condicionantes de estas amenazas suelen ser similares, el análisis de cada uno de ellos debe hacerse por separado, para evitar simplificaciones de problemas que omitan las condiciones locales.

7.5.2 Flujos

Para los flujos, se diferencian dos casos.

El primero de ellos tiene que ver con flujos que nacen en zonas altas y que cruzan gran parte de la región de este a oeste. Estos casos son recurrentes en las quebradas de piedemonte.

En estos casos, si bien el flujo representa una amenaza, las comunidades suelen percibirlos como algo positivo, porque les traen agua necesaria para sus cultivos.

Estos suelen ocurrir durante el verano, asociadas al invierno altiplánico. Por el carácter dendrítico de la red de drenaje y la heterogeneidad de las precipitaciones, no es tan simple definir la zona donde se generan los flujos, por lo que el uso de modelos numéricos puede no ser lo más adecuado. En este caso, la geomorfología es una herramienta más eficiente para analizar la amenaza.

Por lo tanto, los estudios para estos tipos de flujos debieran incorporar las siguientes actividades:

- Levantamiento de topografía de detalle e imágenes aéreas.
- Construcción de catastro de flujos que han afectado a las quebradas, que incorporen información relativa a las zonas donde se han provocado daños.
- Construcción de mapa geomorfológico a escala 1:5.000 del tramo de quebrada de interés.
- Análisis de los factores condicionantes y desencadenantes.
- Estudio de las condiciones de vulnerabilidad, que inciden en la generación del riesgo.
- Elaboración de planes para la mitigación y/o gestión del riesgo.

El segundo caso se relaciona con quebradas menores, con un recorrido más corto. Este caso es más común en el altiplano.

En estos casos, como las quebradas tienen una cuenca aportante más pequeña, la modelación numérica si puede aplicarse, aunque no necesariamente es la herramienta más eficiente. Por lo tanto, las actividades propuestas en el caso anterior se pueden complementar con modelación numérica.

8 FACTORES DESENCADENANTES DE REMOCIONES EN MASA

Los factores desencadenantes son aquellos estímulos o agentes que gatillan o favorecen la ocurrencia de un evento de tipo remoción en masa (González de Vallejo, et al., 2002). En la mayoría de los casos, son varias causas las que finalmente contribuyen al movimiento de una ladera y, para el estudio de la susceptibilidad de remociones en masa es adecuado identificar, distinguir y establecer sus principales características.

Dentro de los factores desencadenantes, los más comunes se reconocen:

- Sismos
- Precipitaciones
- Intervención antrópica
- Actividad volcánica
- Cambio en las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas

Para caídas y deslizamientos los desencadenantes más frecuentes son movimientos sísmicos y/o vibraciones inducidas por acciones antrópicas. Para flujos, los desencadenantes más frecuentes son precipitaciones que en la región se asocian al invierno altiplánico y actividad volcánica. También se reconocen remociones en masa generadas por la intervención de laderas o erosión. En algunos casos los detonantes reconocidos están asociados a acción antrópica (como flujos por rotura de cañerías o quiebre de cornisas).

La Tabla 16 muestra los detonantes identificados a partir de catastro de remociones en masa del estudio y la Fig. 103 muestra una gráfica que muestra los factores desencadenantes reconocidos.

Tabla 16 Tipos de detonantes identificados a partir del catastro de remociones en masa.

Tipo de detonante identificado	Número de RM
Erosión al pie de ladera	43
Evento sísmico	17
Excavación pie de ladera/talud	11
Lluvias	34
Otros	18
Sin información	5237
Total	5360

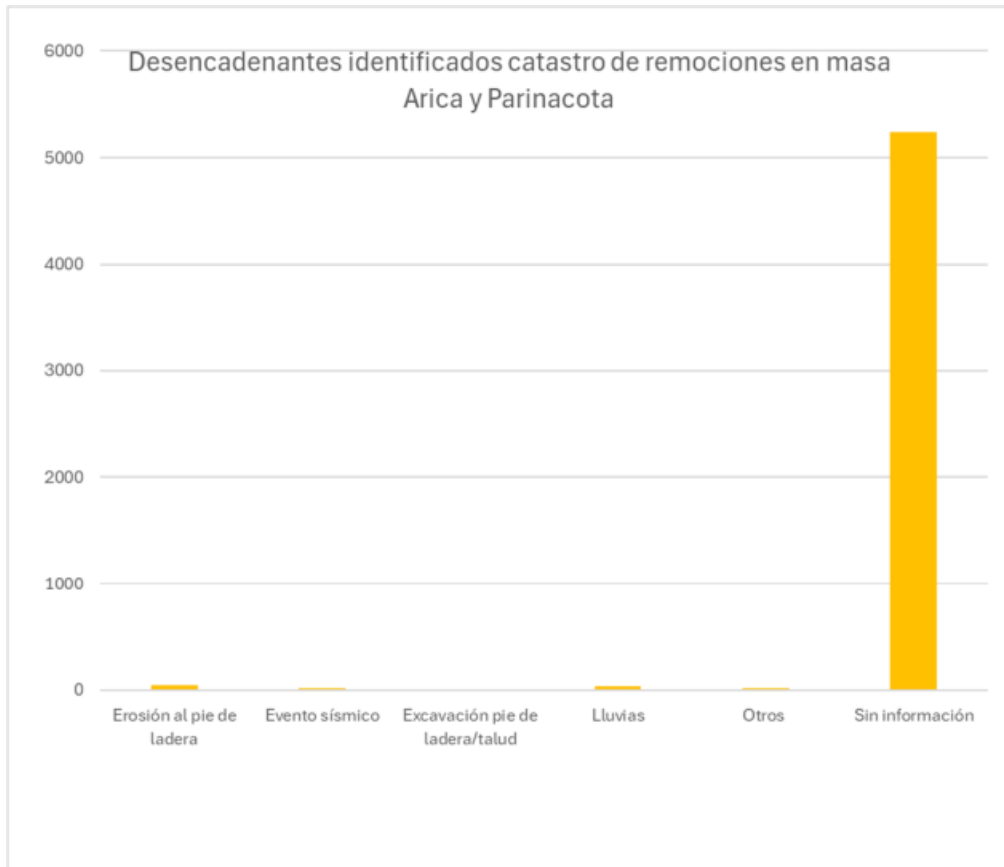


Fig. 103 Desencadenantes identificados a partir del catastro de remociones en masa.

De los 5360 registro, en 123 casos se tiene certeza del detonante, lo que equivale a que casi un 3% de los casos se cuenta con información fidedigna o fue posible tener certeza de su actuar. Esto ocurre principalmente en aquellas remociones en masa en que se cuenta con algún antecedente técnico o estudio anterior (como los informes de asistencias técnicas geológicas del Servicio Nacional de Geología y Minería) o hay clara información de prensa sobre el evento. No obstante, en muchos casos se tienen hipótesis o sospechas sobre los detonantes que actuaron, pero la rigurosidad y criterios fijados para la realización del catastro fijan como criterio que debe haber certeza de él o los desencadenantes.

8.1 Remociones en masa desencadenadas por sismos

Los terremotos pueden provocar movimientos de todo tipo en las que desestabilizan la masa de rocas o suelos, especialmente en aquellas zonas altamente susceptibles. Dependiendo de las características y de parámetros sísmicos, como la magnitud y distancia a la fuente, serán los tipos de remociones en masa generadas y el volumen del material

movilizado. Las aceleraciones sísmicas generan un cambio temporal en los esfuerzos de la ladera. Dentro de las remociones en masa más frecuentes desencadenadas por sismos son desprendimientos de bloques, deslizamientos, flujos y avalanchas de roca.

Existen varios estudios que revisan la sismicidad en la región, especialmente en la ciudad de Arica (Becerra, 2014) (Crispiero, 2011) (Tapia, et al., 2002).

La región de Arica ha sido afectada por sismos de distinto tipo, situándola en un contexto de sismicidad asociada a al margen de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana. La Tabla 17 muestra algunos eventos sísmicos importantes ocurridos en la región y algunos eventos asociados como tsunamis y remociones en masa.

Tabla 17 Sismos, magnitudes y principales eventos.

Fecha	Magnitud	Principales eventos asociados
1968, Arica	Estimada 9	Daño y destrucción. Tsunami
1877, Iquique	8,8	Daño y destrucción. Tsunami
1987, Tarapacá	7,2	Daño en viviendas y en el Morro de Arica
2001, Tarapacá	8,1	Caídas de rocas desde el Morro de Arica y en ladera dañando infraestructura vial.
2005, Iquique	7,8	Caídas de rocas desde el Morro de Arica
2007	7,7	Caídas de rocas desde el Morro de Arica y en laderas
2014	8,2	Caídas de bloques y deslizamientos de suelo y/o roca, con impacto en infraestructura. Caídas de rocas en el Morro de Arica

De los registros del catastro, en sólo 17 casos se tiene registros de detonante sísmico. Por ejemplo, se 8 eventos de caídas de rocas asociados a los sismos ocurridos el 1 y 2 de abril del 2014, distribuyéndose principalmente en el Morro de Arica y zonas cercanas a la localidad de Putre y Socoroma.

8.2 Precipitaciones

Las precipitaciones y aportes de agua, así como el cambio en las condiciones hidrológicas produce variación en las presiones intersticiales, en el peso del terreno, cambia los niveles de saturación, favorece la pérdida de resistencia de los materiales y aumenta la erosión de las laderas o generando socavamiento. Las remociones en masa por causas meteorológicas y climáticas están relacionadas fundamentalmente con el volumen, intensidad y



distribución de las precipitaciones, así como las características de los suelos y su ubicación geográfica, que en caso de la región de Arica y Parinacota se encuentran secos y sin vegetación. En general, precipitaciones cortas e intensas serían más proclives a generar eventos superficiales. La cantidad de lluvias necesarias para que se desencadenen remociones en masa dependerá del tipo y condición de los terrenos. En general, distintas zonas necesitarán lluvias de intensidad y/o duración distinta para que se generen remociones, existiendo así un umbral de precipitaciones característico de cada lugar.

Los umbrales característicos de cada zona pueden ser estimados gracias a bases de datos meteorológicas que tengan valores representativos (en el tiempo y espacio). También se debe incluir en el análisis la ocurrencia de fenómenos climáticos, como por ejemplo invierno Aльтиplánico que genera precipitaciones en la cordillera y precordillera de la región, siendo

Según los antecedentes, las precipitaciones ocurridas en la región han desencadenado remociones en masa. Se cuenta con antecedentes concretos de lluvias el año 2002 que generaron aluviones. Así como los años 2006 (según antecedentes de prensa, incluyendo una persona fallecida), 2016 y 2019 (generando flujos en la quebrada de Acha).

También hay evidencias de 5 registros de deslizamientos asociados a eventos hidrometeorológicos ocurridos entre el 26 y 13 de febrero del 2019 y los sismos anteriormente señalados, distribuyéndose en el río San José, cercanías de Putre y Socoroma; 8 eventos de flujos asociados a las precipitaciones ocurridas entre el 26 y 13 de febrero del 2019 y que se distribuyen principalmente en las quebradas, tal como en el río San José, incluyendo daños en Quebrada Acha.

cooperativa.cl

Los efectos de las lluvias altiplánicas en el norte del país

Publicado: Martes, 12 de Febrero de 2019 a las 08:00hrs. Autor: Cooperativa.cl

- Más de dos mil viviendas resultaron afectadas por las fuertes lluvias en la zona norte.
- El Gobierno destinará más de 128 mil millones de pesos para la reconstrucción.



<https://cooperativa.cl/noticias/pais/tiempo/los-efectos-de-las-lluvias-altiplanicas-en-el-norte-del-pais/2019-02-08/015732.html>

Fig. 104 Registros de prensa de remociones en masa gatilladas por lluvias el año 2019 (fuente: medio de prensa digital cooperativa.cl).

A partir del catastro, se pudo identificar registros de 34 remociones en masa reconocidas oficialmente como gatilladas lluvias, situación que se sabe que son más, pero al igual que el caso anterior, los estándares del catastro no permite poner desencadenantes basados en hipótesis.

Como antecedentes, a partir de los estudios anteriores e informes de asistencia técnica, para los eventos del 2019 (río Lluta) se registraron precipitaciones acumuladas que fluctuaron entre 12 y 24 mm (entre los días 8 a 10 de febrero 2019), mientras que para la estación del río San José de Azapa, Camarones y Vitor (los mismos días) se registraron precipitaciones acumuladas de 12 mm.

8.3 Actividad volcánica

Las erupciones volcánicas pueden desencadenar remociones en masa, tales como deslizamiento, avalanchas y flujos de gran magnitud denominados lahares, a causa del derretimiento de nieves en el entorno volcánico, y/o por la movilización de materiales depositados recientemente.

Según los antecedentes de los centros volcánicos presentes en la región, no hay registros históricos de ocurrencia de lahares. Sin embargo, existe evidencia geológica y geomorfológica que da cuenta de que existió actividad eruptiva en el Complejo volcánico Taapaca, y que hace no más de 2.000 años se han producido colapsos parciales de domos, generando explosiones, flujos piroclásticos, avalanchas volcánicas de detritos y lahares (Clavero, 2007). Es por esto por lo que, aunque no hayan ocurrido remociones en masa asociadas a volcanismo en el último tiempo, no quiere decir que puedan volver a ocurrir en un futuro.

Además, es necesario destacar que debido al gran volumen de material suelto sobre los flancos del complejo volcánico Taapaca, los lahares son habituales durante la época de precipitaciones pluviales, aunque generalmente son de pequeño volumen y de menos de 3 km de extensión, por lo que no afectaría zonas pobladas (Clavero, 2007).

8.4 Erosión y excavación al pie de laderas y taludes

Una ladera es una superficie de terreno que se encuentra inclinada, ya sea naturalmente o producto de una determinada intervención. Por su parte, un talud es una obra de intervención del terreno, que por lo general está destinada a reducir la probabilidad de generación de remociones en masa.

La morfología de la región, que presenta laderas muy escarpadas producto de la erosión que naturalmente generan el escurrimiento en ríos y quebradas y el oleaje del mar, según corresponda, el clima, de carácter hiperárido, y los períodos de escurrimiento esporádicos por cauces con pendientes relativamente altas son condiciones que favorecen la erosión. En los casos que este proceso ocurre en zonas muy próximas a laderas o taludes, las condiciones de equilibrio pueden verse afectadas.

De igual forma, la remoción de material al pie de taludes ya sea naturalmente, producto de la erosión, o de forma artificial, es decir, por extracción, puede llevar a la inestabilidad de ellos.

8.5 Intervención antrópica

El hombre, como ente modificador del medio, genera una serie de cambios que en algunos casos son el principal desencadenante de remociones en masa. La generación de obras constructivas, cortes, terraplenes, plataformas, entre otros, sin un análisis geotécnico adecuado, puede ocasionar desestabilización, así como el poco mantenimiento de sistemas de contención, o bien la limpieza de laderas sin la guía de un especialista. La intervención antrópica también puede generar cambios en las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas, que se traduzcan en variaciones de las propiedades de los materiales y en el nivel freático.

Se han identificado desencadenantes asociados a la intervención antrópica. Por ejemplo, se han registrado eventos de caídas de rocas en la ruta 5 han sido registrados los años 2017 y 2023. Esta ruta atraviesa las profundas e inclinadas laderas de las quebradas Camarones y Vítor, donde el material se desplaza hacia las calzadas desde la parte superior de las laderas o del mismo corte. Además, se identificaron remociones en masa generadas en materiales provenientes de obras antrópicas, los cuales han sido dispuestos sobre la superficie sin una correcta planificación y diseño. Como ejemplo, los materiales del corte del talud de la ruta 5 (en la quebrada Camarones) están dispuestos sobre la ladera, inmediatamente por debajo de la ruta, se deslizan hacia el valle. Esta misma condición se observó en la ruta 11, con un deslizamiento del material de relleno de la ruta hacia un canal de regadío.

Las cuevas de Anzota, que, si bien tienen un origen natural, han sido utilizadas con fines turísticos, y en las cuales se han reportado una serie de remociones en masa, algunas de ellas con heridos como lo reporta la prensa el año 2019 mostrado en la Fig. 105 Según el reporte, el viento y las mareas actúan como agentes desencadenantes de remociones en masa en dicho sector.

DESPRENDIMIENTOS DE ROCAS EN CUEVAS DE ANZOTA DEJA UNA PERSONA CON LESIONES



Fig. 105 Información de prensa del 6 de abril de 2019. (Fuente <https://www.aricaldia.cl/cuatro-personas-3-adultos-y-un-nino-resultaron-afectados-tras-deslizamiento-de-piedras-en-sector-de-anzota/>)

También dentro del estudio y catastro de remociones en masa en la región de Arica y Parinacota, se identificaron otras causas que han desencadenado eventos. Dentro de estas, se identificaron 18 casos en los detonantes están relacionados con acción antrópica, como la rotura de ductos de aguas que gatillan flujos en la zona industrial sur, o el peso de los estakes de Copec sumado al corte para el camino, generan deslizamientos y deformación en la ladera como los muestran las fotografías en la Fig. 106.



Fig. 106 Fotografías de remociones en masa desencadenadas por otras causas, pero relacionadas a intervención antrópica

8.6 Desencadenantes identificados en el catastro

En el catastro se identificaron 123 remociones en masa con desencadenante conocido. En la Tabla 18 se clasifican los desencadenantes según tipo de desencadenante y el tipo de proceso generado.

Tabla 18 Desencadenantes identificados a partir del catastro FNDR.

Desencadenante	Flujo	Caída	Deslizamiento	Volcamiento	Total
Erosión pie de ladera/talud	4	18	20	1	43
Evento sísmico	1	12	4		17
Excavación pie de ladera/talud		6	5		11
Lluvias	31	2	1		34
Otros	10	3	5		18
Total	31	18	14	1	123

Los flujos son gatillados principalmente por lluvias, que generan principalmente flujos de detritos, barro o indeterminados, solo algunos de ellos se atribuyen a un evento de precipitaciones específico, ocurrido el 26 de enero de 2019.

En la categoría de desencadenante Otro, hay ocho flujos desencadenados por roturas de cañerías y dos por aguas antrópicas en zona de basural ilegal, es decir, todos ellos se pueden atribuir a condiciones antrópicas. Todos ellos se encuentran cercanos a la zona industrial ubicada en calle San Martín, en Arica.

Uno de los principales desencadenantes de las caídas son los eventos sísmicos, entre los cuales destacan los eventos sísmicos de los días 1 y 2 de abril de 2014. Una parte importante de ellos se encuentran en el acantilado costero, en el Morro o en la zona de la desembocadura de la quebrada Codpa.

Otros detonantes que se repiten para el caso de las caídas, pero en menor cantidad, son la erosión al pie de ladera/talud en cauces asociados a las quebradas de piedemonte y la excavación al pie de ladera/talud.

También son relevantes tres casos en que las caídas son el resultado de condiciones generadas producto de condiciones antrópicas, dos de ellos relacionados con extracción de material que genera inestabilidades.

Los deslizamientos se relacionan mayoritariamente con erosión al pie de ladera/talud, y tienen que ver con la erosión que ocurre en cauces activos, principalmente el río Lluta y la quebrada Codpa.

Otros casos que se repiten son aquellos en que los deslizamientos se relacionan con eventos sísmicos, excavación de laderas/talud en rutas, y asociados a condiciones antrópicas.

Por último, el registro de volcamiento responde a erosión al pie de ladera/talud, y se encuentra en la parte alta de la cuenca de la quebrada Codpa.

9 TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO

El apartado de transferencia de conocimiento, entendido como la **generación de insumos** e instancias para la difusión de los resultados técnicos a la comunidad, es uno de los aspectos más importantes del estudio porque define, en gran medida, la utilidad de los productos que se generaron.

9.1 Objetivos y público

El objetivo principal de la transferencia de conocimiento es **difundir** el estudio, en especial sus resultados y conclusiones.

Los objetivos específicos planteados se definen respondiendo ¿para qué difundir el estudio?:

- Dar a conocer a la población, instituciones gubernamentales y autoridades dónde y por qué ocurren eventos de remoción en masa en la región de Arica y Parinacota.
- Entregar herramientas para una planificación territorial y vial segura.
- Contribuir, a partir de las identificaciones de susceptibilidad de remociones en masa, en la disminución del riesgo por remoción en masa en la región de Arica y Parinacota.
- Orientar a la población y autoridades sobre qué hacer en caso de un evento.
- Dar a conocer a la población que existen restricciones en el uso del territorio por seguridad.
- Dar a conocer las necesidades de implementar medidas de mitigación.

A partir de lo anterior, y considerando la importancia de la transferencia de conocimiento, se plantea un modelo que agrupa el público objetivo según su ubicación geográfica, ya sea en entornos rurales o urbanos, así como también están dirigidos a instituciones del Estado (Fig. 107).

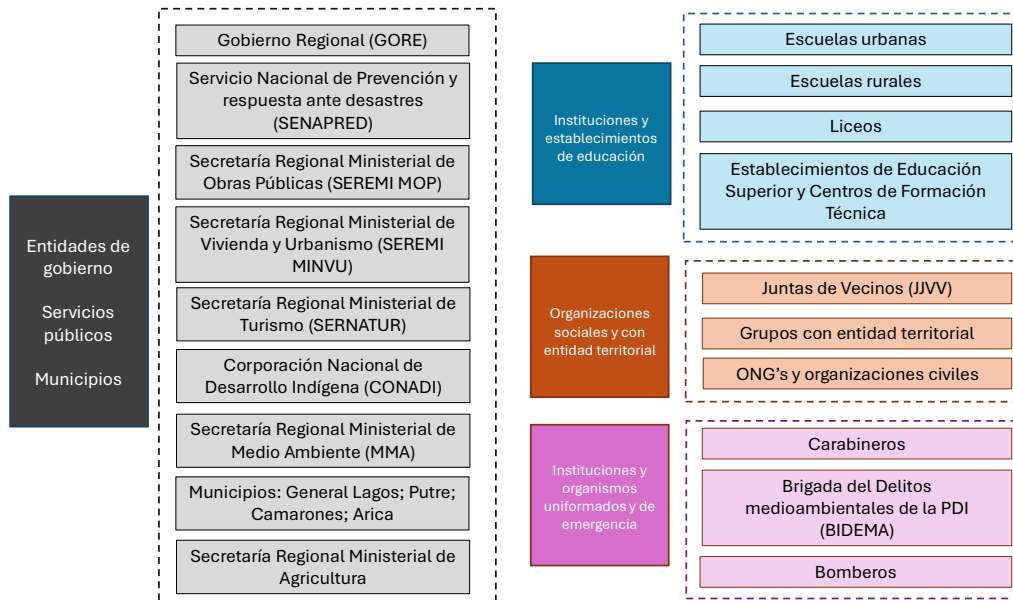


Fig. 107 Modelo conceptual de transferencia de conocimiento.

9.2 Productos

Los productos específicamente diseñados como material de apoyo para actividades de difusión del estudio de análisis y zonificación de susceptibilidad a remociones en masa son los siguientes:

- 3 dípticos informativos
- 3 vídeos
- 2 talleres (uno online y otro presencial).

En cada uno los casos señalados anteriormente se abarcan los resultados y productos del estudio.

Los tres dípticos elaborados corresponden a documentos digitales (PDF) imprimibles, secuenciales y complementarios entre sí, pero también explicativos en sí mismos. En el caso de los videos, estos corresponden a archivos MP4 de alta calidad, también secuenciales, complementarios entre sí. Los diseños respetan los estándares definidos para videos institucionales del Estado, pero pretenden ser innovadores y cercanos a la comunidad. El lenguaje empleado está dirigido a una audiencia variada, tanto en términos de conocimientos técnicos como de edad.

Para su diseño, se llevó a cabo una exhaustiva revisión de material educativo relacionado con la transferencia de conocimiento, tanto proveniente del Servicio Nacional de Geología y Minería como de otras instituciones estatales y privadas. Además, se consideraron las indicaciones y sugerencias proporcionadas por los profesionales del Servicio Nacional de

Geología y Minería, así como los productos resultantes de estudios de remociones en masa regionales (FNDR) de las regiones de Antofagasta y Los Ríos realizados por la consultora Xterrae. En este proceso, se procuró mantener y dar continuidad a la línea editorial en todos los productos.

Las temáticas definidas y abordadas, de acuerdo con el mandante son para los dípticos:

- Díptico informativo sobre el peligro por remociones en masa en la ciudad de Arica y alrededores, destacándose especialmente las remociones en masa del entorno urbano.
- Díptico informativo sobre el peligro por remociones en masa en zonas interiores de la región de Arica y Parinacota orientado a público general especialmente en zonas rurales.
- Díptico informativo sobre el peligro por remociones en masa en zonas interiores de la región de Arica y Parinacota orientado a instituciones técnicas y políticas.

El resultado de los productos de transferencia de conocimiento refleja las sugerencias y consideraciones del mandante en este ámbito, así como la experiencia del equipo consultor. Este equipo, conformado por diseñadores, ilustradores y profesionales audiovisuales, contribuyó desde sus respectivos campos de especialización para asegurar que el producto final sea visualmente atractivo, conciso y preciso en sus contenidos.

9.3 Prototipos

Los prototipos han sido mayormente desarrollados utilizando material generado por el equipo consultor durante las diversas campañas de terreno a lo largo del estudio. En lo que respecta a los dípticos dirigidos a la ciudadanía (Fig. 108), comunidades rurales (Fig. 109) e instituciones públicas (Fig. 110), todos ellos tienen como finalidad mostrar áreas propensas a remociones en masa, así como las interacciones entre las actividades humanas y el entorno natural. En este contexto, las portadas de los dípticos buscan resaltar esta temática mediante una presentación armoniosa y una simplificación de los procesos representados. En otras palabras, se busca transmitir de manera clara y concisa la relación entre las actividades humanas y la susceptibilidad a las remociones en masa del territorio. Para la revisión en detalle de estos dípticos, se pueden encontrar en formato PDF en el ANEXO K.



Fig. 108 Dúptico dirigido a la ciudadanía de Arica.



Fig. 109 Dúptico dirigido a comunidades rurales.

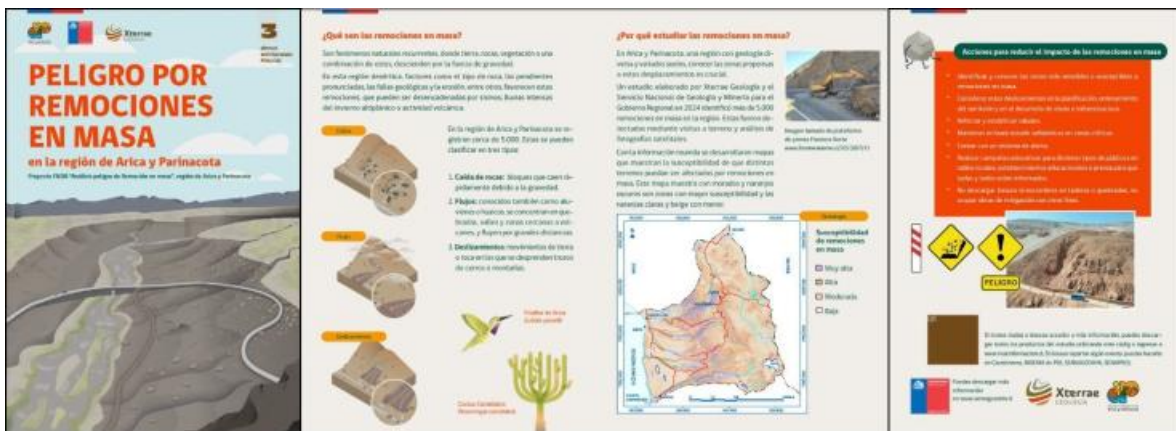


Fig. 110 Dúptico dirigido a instituciones públicas.



En cuanto a los videos, se desarrollaron tres guiones, cada uno persiguiendo objetivos específicos. El primero de estos se enfoca en la descripción de la geomorfología y geología de la región de Arica y Parinacota. El segundo tiene como propósito explicar qué son las remociones en masa. Por último, el tercero se centra en presentar los resultados del estudio, es decir, los análisis de zonificación de áreas susceptibles a remociones en masa en la región de Arica y Parinacota. Estos videos tienen una duración aproximada de 2 minutos y, siguiendo la misma línea que los dípticos, se busca mantener lo preciso y conciso en la presentación de la información de modo que se mantenga la atención del público en los videos.

En cuanto a los recursos utilizados para realizar los tres videos, consisten en fotografías y videos capturados en las diversas campañas de terreno. De este modo, cada imagen mostrada en los videos corresponde a un lugar específico de la región. De la misma manera, los videos incorporan animaciones que ilustran procesos de remoción en masa mediante la metodología de bajo poligonaje. Esta técnica cumple dos propósitos fundamentales: en primer lugar, proporciona un estilo eficaz, ya que las animaciones simples son más efectivas para comunicar conceptos a audiencias no especializadas y, en segundo lugar, genera un impacto visual y un valor educativo notable mediante una animación ejecutada bajo esta metodología, sobre todo para audiencias más jóvenes.

Para revisar cada uno de los videos, estos se encuentran en el ANEXO K.

10 CONCLUSIONES

El trabajo realizado ha generado una serie de conclusiones derivadas de las temáticas abordadas, las cuales se exponen a continuación. Estas conclusiones representan el resultado de un análisis exhaustivo y riguroso, proporcionando un entendimiento profundo sobre los temas tratados en el estudio.

10.1 Mapas temáticos

Los mapas temáticos que permitirán tener un punto de partida para las discusiones y decisiones técnicas respecto a la evaluación de los diversos factores condicionantes de remociones en masa de la región.

Los mapas temáticos derivan de antecedentes disponibles o bien de análisis desarrollados en este trabajo y corresponden a los siguientes:

1. Litología compilada: Compilación de la cartografía geológica de la región desarrollada por el Servicio Nacional de Geología y Minería. En este se desarrolla una unión de las unidades geológicas que han sido cartografiadas a diversas escalas con el propósito de que sean coherentes con la base cartográfica y escala del estudio.
2. Estructuras geológicas: Se compiló la información disponible sobre estructuras geológicas, particularmente fallas, que afectan a la región.
3. Geomorfología: Las unidades geomorfológicas principales que pueden tener características particulares y que puedan asociarse a ciertas condiciones generadoras de remociones en masa.
4. Alteración: Identificación de aquellas áreas en la región que presentan minerales de alteración que pueden asociarse a la ocurrencia de procesos de remociones en masa, esto se realizó considerando la información existente y el análisis de imágenes satelitales.
5. Modelo de aspecto: Cobertura derivada del modelo de elevaciones utilizado para el estudio y que indica las direcciones preferenciales de la superficie del terreno respecto al norte.
6. Mapa de pendientes: Cobertura que presenta el gradiente, o inclinación vertical del terreno respecto a la horizontal en grados.
7. Factor LS: Cobertura morfométrica que muestra la relación entre el largo de una cuenca y la pendiente de esta, se estima que se relaciona con la capacidad de una cuenca para generar flujos de detritos.
8. Modelo de cuencas: Delimitación de cuencas hidrográficas a partir del modelo de elevación.
9. Razón de Melton: Relación entre área, pendiente y largo de la porción superior de la cuenca respectiva. Refleja las condiciones geomorfológicas de esta.

10. Mapa de clima: Mapa zonificación climático para la región, las zonas climáticas reflejan las características que pueden resultar en condiciones de meteorización diferenciales que afectan a las unidades de roca.
11. Hidrografía: Mapa que representa la red de drenaje y su distribución en la superficie de la región.
12. Uso de suelo y vegetación: Esta cobertura representa la componente más superficial del territorio, es un mapa derivado de información existente y que permitiría reflejar condiciones particulares de las diversas unidades representadas que pudiesen asociarse a los procesos de remoción en masa.
13. Peligro volcánico de Lahares: Cobertura tomada de los mapas de peligro volcánico de la región elaborados por el Servicio Nacional de Geología y Minería.

A partir de los revisado en terreno y en la fotointerpretación, se puede señalar de forma cualitativa que algunos mapas temáticos tienen mayor influencia que otros en la ocurrencia de remociones en masa. Por ejemplo, las unidades geomorfológicas, litológicas, estructuras, y algunos parámetros morfométricos como las pendientes, parecen tener una influencia directa en los tipos de mecanismos identificados y su distribución.

10.2 Catastro

El catastro final comprende un total de 5.360 eventos registrados a partir del análisis de antecedentes, fotointerpretación y de recorrido a terreno. Estos eventos han sido georreferenciados y llevados a una base en SIG para que puedan ser analizados, cuyo formato y ubicación se especifica en el ANEXO J. Del total de eventos catastrados, un 19,95% fueron validados mediante las visitas a terreno.

De los registros del catastro los más frecuentes corresponden a los tipos de caídas, seguidos por flujos y en tercer lugar por deslizamientos.

Los materiales afectados en las caídas corresponden principalmente a rocas, seguidas por materiales no consolidados (suelos y sedimentos). De los deslizamientos predominan los de grava, arena y detritos, seguido de los deslizamientos indeterminados. En los flujos los predominantes son los indeterminados, seguidos por los de detritos. Se identificaron, además, algunos detonantes de remociones en masa, tales como sismos (para caídas y deslizamientos), precipitaciones (que desencadenan flujos) y algunas obras de acción antrópica (como cortes en laderas para caminos o para construcciones), las cuales no cuentan con un adecuado diseño y planificación, estando asociados a la ocurrencia de remociones en masa.

10.3 Susceptibilidad

Los mapas temáticos se evaluaron respecto a los registros que forman parte del catastro de remociones en masa para identificar las condiciones o unidades, de cada uno de ellos que se asocien a la generación o frecuencia de remociones en masa, a partir del peso de la evidencia.

La ponderación específica que se asignó a las distintas variables temáticas analizadas como factores condicionantes de la susceptibilidad, se realizó mediante la aplicación del método estadístico razón de frecuencia

Los factores considerados en la evaluación de susceptibilidad tuvieron un análisis previo para determinar la correlación entre ellos, de esta forma para la generación de flujos (FL) las variables utilizadas son elevación, alteración, curvatura, litología, geomorfología, factor LS, razón de melton y uso de suelo. Para el caso de deslizamientos y caídas (DC) los factores seleccionados corresponden a: elevación, aspecto, curvatura, fallas, litología, geomorfología, pendiente y uso de suelo.

Los resultados de susceptibilidad dieron buenos resultados, con una curva de éxito que para ambos procesos supera el 70%, mínimo exigible para validar el modelo de susceptibilidad, el resultado de susceptibilidad de flujos alcanza un 75% y caídas y deslizamientos llega a un 85%. Este resultado deriva, posiblemente para el caso de flujos, en la dificultad de determinar su zona de generación, lo que refleja una disminución del porcentaje de éxito en relación con caídas y deslizamientos.

Por otro lado, los resultados de los mapas de susceptibilidad son un reflejo de los insumos utilizados (mapas temáticos), que fueron levantados a escala 1:250.000, es por esto por lo que su uso debe ser considerando dicha escala.

10.4 Zonas críticas

La ocurrencia de remociones en masa reflejadas en el catastro permitió reconocer zonas críticas. Estas corresponden a zonas más densamente pobladas que otras e infraestructuras que podrían ser afectadas ante la ocurrencia de algún fenómeno de remoción en masa. Se identificaron zonas críticas en todas las comunas, algunas de ellas son: Morro de Arica y alrededores, Codpa, algunas zonas del valle de Azapa, Putre, Socoroma, Belén, Ticnamar y Guallatire, y algunas rutas que conectan dichas localidades. Los recorridos por las rutas de la región en terreno permitieron identificar el efecto de remociones en masa en conectividad y accesos a estas localidades.

Además, cabe destacar que existe una buena correlación entre las zonas críticas descritas y las zonas de susceptibilidad muy alta y alta definidas en los mapas generados.

10.5 Morro de Arica (Mapa 5 escala 1:1.000)

Los resultados obtenidos del estudio realizado para elaborar el Mapa 5: Análisis e identificación de áreas críticas de Morro escala 1:1.000, indican la existencia en el área de estudio de zonas inestables y otras que podrían desestabilizarse ante sismos, vibraciones, lluvias u otro tipo de intervenciones. Las zonas potencialmente inestables o críticas del área del Mapa 5 fueron definidas a partir del análisis de estabilidad realizado en 10 secciones o perfiles representativos del área de estudio e incluyó la utilización de todos los modelos y recursos generados para el área de estudio a escala 1:1.000. El estudio arroja la existencia de **zonas críticas** en el área del Mapa 5, e incluyen zonas las potencialmente inestables o con videncias de inestabilidad. Se identificaron bloques que pueden desprenderse desde las laderas, alcanzando distintas trayectorias y alcances. En algunos casos, los bloques quedan retenidos en la ladera o en la zona que actualmente tiene una zanja de protección. No obstante, existen bloques que eventualmente pueden traspasar hacia la costanera en los casos en que no hay zanja o hacia zonas sin protección. Las zonas de alcance en la proyección de los bloques permitieron definir una franja o **zona de restricción y seguridad**.

A partir de los resultados obtenidos y considerando del carácter patrimonial y turístico del Morro, sumado a los costos, tiempos y efectividad de las medidas de sostenimiento, se optó en el presente estudio entregar recomendaciones orientadas principalmente a seguridad. Las recomendaciones definidas se basan en los resultados del estudio de estabilidad y la definición de escenarios definidos a partir de todos los antecedentes del estudio, incluyendo los antecedentes aportados por personas entrevistadas.

En general las recomendaciones tienen por objetivo prohibir o impedir el acceso a las zonas potencialmente inestables, es decir, instalar un cierre perimetral en toda la zona definida como crítica, a modo de impedir el acceso, tránsito, intervención o habitación del área; instalar señalética acorde a la condición, sugerida de acuerdo con los distintos mecanismos y condiciones, tanto por la parte superior como inferior del área de estudio, especialmente en la zona de restricción y seguridad. Para proteger las zonas de tránsito ante caídas y deslizamientos de material, se recomienda mantener la actual zanja y muro de roca, incluyendo la erradicación de personas que habitan el sector que además es usado como basural y acopio de desperdicios. La zona del condominio Ayllu fue señalada como de alto peligro por remoción en masa en estudios anteriores, y en la actualidad se encuentra construida y en avance de nuevas edificaciones, situación que no debe ocurrir. También se recomienda instalar medidas de contención en las zonas que actualmente no tienen, por ejemplo, continuando la construcción de la zanja y muro de roca hacia el norte y sur de la ladera este de Morro. En la zona que representa la cara turística del Morro (ladera norte), se recomienda densificar vegetación y/o barrenar el terreno, manteniendo las restricciones de acceso. Hacia la zona de las casas (ladera noreste del Morro) se recomienda la instalación de mallas contra la caída de rocas que protejan las casas.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, A., Pantoja, G. & Brantt, H., 2018. *Peligro de remoción en masa en la región de Coquimbo-Sector Norte. Servicio Nacional de Geología y Minería.*, Santiago: s.n.
- Alvarado-Anampa, M., Escobar-Soldevilla, M. & Sánchez-Araujo, V., 2021. Estimación del factor topográfico LS (RUSLE) mediante la aplicación de sistemas de información geográfica Caso subcuenca Ichu, Huancavelica-Perú.. *Polo del Conocimiento*, 6(10), pp. 66-81.
- Amigo, Á., Bertin, D. & Orozco, G., 2012. *Peligros Volcánicos de la Zona Norte de Chile, Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama.*, Santiago: s.n.
- Ammann, C., Jenny, B., Kammer, K. & Messerli, B., 2001. Late Quaternary Glacier responde to humidity changes in the arid Andes of Chile (18-29°S). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Volumen 172, pp. 313-326.
- Anderson, R. S., 1998. Near-surface Thermal Profiles in Alpine Bedrock: Implications for the Frost Weathering of Rock. *Artic and Alpine Research*, 30(4), pp. 362-372.
- Anderson, R. S., Anderson, S. P. & Tucker, G. E., 2013. Rock damage and regolith transport by frost: an example of climate modulation of the geomorphology of the critical zone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(3), pp. 299-316.
- Arcos, R., Naranjo, J., Ladino, M. & Polanco, E., 2018. *Carta Putre, región de Arica y Parinacota.*, s.l.: s.n.
- Arenas, M. & Opazo, E., 2017. *Guía metodológica para la elaboración de mapas de susceptibilidad a las remociones en masa a escala regional.*, s.l.: s.n.
- Arenas, M. & Opazo, E., 2017. *Guía metodológica para la elaboración de Mapas de Susceptibilidad a las remociones en masa a escala regional.*, s.l.: s.n.
- Aristizabal, E., Vásquez, M. & Ruiz, D., 2019. Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. *Tecnológicas*, 22(46), pp. 39-60.
- Barozzi, R., 1969. *Informe geotécnico de los taludes del Morro de Arica y su relación con la factibilidad de continuar explotando la Cantera*, Santiago de Chile: s.n.
- Becerra, A., 2014. *Seismic microzoning of Arica and Iquique. Tesis para el grado de Master of Science in Engineering.*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Beiranvand, A. & Hashim, M., 2014. *Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran.* s.l.:Elsevier.



Berlín, L., Jara, G. & Toloza, V., 2022. *Peligros del volcán Parinacota, región de Arica y Parinacota*, s.l.: s.n.

Biota. Gestión y Consultorías Ambientales Ltda., 2015. *Monitoreo de cambios, corrección cartográfica, y actualización del catastro de recursos vegetacionales nativos de la región de Arica y Parinacota.*, Santiago, abril de 2015.: s.n.

Bovis, M. & Jakob, M., 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity.. *Earth surface processes and landforms*, 24(11), pp. 1039-1054.

Brantt, C., Pantoja, G. & Muñoz, A., 2021. *Peligro de remociones en massa en el sector sur de la región de Coquimbo Sur. Servicio Nacional de Geología y Minería.*, Santiago.: IR-21-88: 107p. 1 mapa escala :250.000..

Brideau, M.-A. y otros, 2021. Empirical Relationships to Estimate the Probability of Runout Exceedance for Various Landslide Types. En: F. Guzzetti, y otros edits. *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*. Cham: WLF-Springer, pp. 321-327.

Broecker, W. S. & Denton, G. H., 1990. The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Quaternary Science Reviews*, 9(4), pp. 305-341.

Brüggen, J., 1939. *Geología de las guaneras de Chile*. Santiago: Imprenta Universitaria.

Burrough, P. & McDonell, R., 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. New York: Oxford University Press.

Carrasco, J., Osorio, R. & Casassa, G., 2008. Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observation. *Journal of Glaciology*, 54(186), pp. 538-550.

Charrier, R. y otros, 2005. Rapid tectonic and paleogeographic evolution associated with the development of the Chucal anticline and the Chucal-Lauca Basin in the Altiplano of Arica, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, Volumen 19, pp. 35-54.

Charrier, R. y otros, 2000. El Cordón Chapiquiña-Belén en el borde occidental del Altiplano chileno: significado paleogeográfico y contexto tectónico regional. *Trabajo presentado en el IX Congreso Geológico Chileno*, pp. Actas 1: 763-767.

Charrier, R. y otros, 1999. Opposite thrust-vergencies in the Precordillera and Western Cordillera in northern Chile and structurally linked Cenozoic paleoenvironmental evolution. *Proceedings 4th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG)*, pp. 155-158.



Charrier, R. y otros, 2012. Cenozoic tectonic evolution in the Central Andes in the northern Chile and west central Bolivia: implications for the paleogeographic, magmatic and mountain building evolution. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*.

CIREN, 2018. *Región de Arica y Parinacota, Provincia de Arica, Comuna de Arica, Recursos Naturales*, s.l.: s.n.

Clavero, J., 2007. *Peligros del Complejo Volcánico Taapaca, Región de Arica y Parinacota*, Santiago: s.n.

Clavero, J., Droguett, B., Quiroga, R. & Álvarez, P., 2018. *Carta Lago Chungará, región de Arica y Parinacota*, Santiago: s.n.

Coloma, F. y otros, 2017. Geochemistry of Permian to Triassic igneous rocks from northern Chile (28°-30°15'S): Implications on the dynamics of the proto-Andean margin. *Andean Geology*, Mayo, 44(2), pp. 147-178.

Condom, T., Coudrain, A., Sicart, J.-E. & Théry, S., 2007. Computation of the space and time evolution of equilibrium-line altitudes on Andean glaciers (10°N–55°S). *Global and Planetary Change*, 59(1-4), pp. 189-202.

Cortés, J., 2011. *Evolución depositacional y tectónica neógena del Altiplano Chileno entre los 19°22'S y 19°42'S*, Santiago: s.n.

Cortés, J., Farías, M., Comte, D. & Charrier, R., 2012a. Estructuras y depósitos neógenos de la región de Cariquima (Altiplano chileno): Implicancias en el origen de la Cordillera occidental a los 19°30's. *Trabajo presentado en el XIII Congreso Geológico Chileno*.

Crispiero, A., 2011. *Caracterización y diagnóstico sísmico de las viviendas sociales de albañilería de la ciudad de Arica*, Santiago de Chile: s.n.

Cuadra, M., 2017. *Caracterización de la susceptibilidad a la ocurrencia de remociones en masa en el valle del río Lluta, entre Chapisca y Socoroma, región de Arica y Parinacota, Chile*. Memoria para optar al título de Geólogo. ed. s.l.:Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología..

Dávila, J., 1995. *Diccionario Geológico*. Ministerio de Energía y Minas, s.l.: s.n.

Dávila, J., 2011. *Diccionario geológico*. s.l.:Arthaltuna grouting.

DeMets, C., Gordon, R., Argus, D. & Stein, S., 1994. Effects of recent revisions of the geomagnetic reversal time scale on estimates on current plate motion. *Geophysical Research Letters*, Volumen 21(20), pp. pp.2191-2194.



Desmet, P. & Govers, G., 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), pp. 427-433.

Desmet, P. & Govers, G., 1995. GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information.. *Catena*, Volumen 25, pp. 389-401.

Draebing, D. & Mayer, T., 2021. Topographic and Geologic Controls on Frost Cracking in Alpine Rockwalls. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(6).

El-Deskoy, H. y otros, 2022. *Hydrothermal Alteration Mapping Using Landsat 8 and ASTER Data and Geochemical Characteristics of Precambrian Rocks in the Egyptian Shield..* s.l.:Nicola Casagli.

Errázuriz, A. & González, J., 2008. *Atlas Universal y Chile regionalizado*. 24° edición ed. Santiago de Chile: Zig-Zag.

Espinoza, L., Marín, M. & Pantoja, G., 2019. *Peligro de remociones en masa tipo flujo de la cuenca alta del río Maipo, Región Metropolitana de Santiago.*, s.l.: s.n.

Falcón, F., Velásquez, R., Ortiz, M. & Sepúlveda, N., 2014. *Efectos geológicos de los sismos del 1 y 2 de abril de 2014: estabilidad del Morro Arica*, s.l.: s.n.

Farías, M. y otros, 2005. Late Cenozoic deformation and uplift of the western flank of the Altiplano: Evidence from the depositional, tectonic, and geomorphologic evolution and shallow seismic activity (northern Chile at 19°30'S). *Tectonics*, 24(TC4001).

Fernández, J. & Espinoza, L., 2020. *Compilación y análisis del registro histórico de remociones en masa tipo flujo en la cuenca del río Copiapó, región de Atacama.*, s.l.: s.n.

García, M., Clavero, J. & Gardeweg, M., 2012. *Cartas Visviri y Villa Industrial, Región de Arica y Parinacota*, Santiago: s.n.

García, M. & Fuentes, G., 2012. *Carta Cuya, Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá*, Santiago: s.n.

García, M. & Fuentes, G., 2012. *Carta Cuya, Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá*, Santiago: s.n.

García, M., Fuentes, G. & Riquelme, F., 2013. *Carta Miñimiñi, Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá*, Santiago: s.n.

García, M., Gardeweg, M., Clavero, J. & Hérail, G., 2004. *Hoja Arica, Región de Tarapacá.*, s.l.: s.n.



García, M. y otros, 2011. Late Miocene-Holocene canyon incision in the western Altiplano, northern Chile; tectonic or climatic forcing?. *Bulletin Geological Society*, Volumen 168, pp. 1047-1070.

Goetz, J. y otros, 2021. Optimizing and validating the Gravitational Process Path model for regional debris-flow runout modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(8), pp. 2543-2562.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. s.l.:Editorial Pearson..

González, G. y otros, 2022. *Guía Metodológica para la Caracterización de la Multiamenaza de la Cuenca del Río Maipo*, s.l.: Proyecto FONDEF 19i10021.

Gregory, D. y otros, 2009. *The dictionary of human geography*, s.l.: Wiley-Blackwell.

Guzzetti, F., y otros, 2009. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, pp. 222 - 229.

Guzzetti, F. y otros, 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem.. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), pp. 42-66.

Hales, T. & Roering, J. J., 2005. Climate-controlled variations in scree production, Southern Alps, New Zealand. *Geology*, 33(9), pp. 701-704.

Hauser, A., 2000. *Remociones en masa en Chile*, Santiago: s.n.

Hauser, A., 2006. *Informe de opinión proyecto Fatzer AG, estabilización del Morro de Arica, primera región*, s.l.: s.n.

Hawker, L. y otros, 2022. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environ. Res. Lett.*, Volumen 17, p. 024016.

Heim, A., 1932. Bergsturz und Menschenleben. *Beiblatt zur Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 77(20).

Herrera, S., 2013. *Configuración y evolución estructural post-oligocena de la precordillera de Camiña, región de Tarapacá, Chile (19° 14'-19° 32'S/69° 13'-69° 38'W)*, s.l.: s.n.

Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L., 2013. The Varnes classification of landslide types, an update.. *Landslides*, 11(2), pp. 167-194.

Jorquera, C., Rodríguez, I., Bertin, L. & Flores, F., 2019. *Peligros del Volcán Guallatiri, región de Arica y Parinacota, Chile*, s.l.: s.n.



Kaufman, H., 1988. *Mineral exploration along the Aqaba-levant Structure by use of Tm-data*. Karlsruhe, Alemania: s.n.

Kull, C. & Grosjean, M., 2000. Late Pleistocene climate conditions in the north Chilean Andes drawn from a climate-glacier model. *Journal of Glaciology*, 46(155), pp. 622-632.

Kull, C., Grosjean, M. & Veit, H., 2002. Modeling modern and Late Pleistocene glacio-climatological conditions in the North Chilean Andes (29-30°S). *Climatic Change*, 52(3), pp. 359-381.

Lara, M., 2007. *Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana*, s.l.: s.n.

León Muñoz, J., Echeverría, C., Fuentes, R. & Aburto, F., 2017. How is the land use-cover changing in drinking water catchments in the coastal range of south-central Chile (35° - 38,5° S)? *Revista Bosque*, Issue 38 (1), pp. 203-209.

Lobo-Luján, D., 2013. Estimación del factor de erosividad de lluvia en la zona semiárida de San Pedro, Chile. *Geominas*, Volumen 41, pp. 135-140.

Madella, A., Delunel, R. & Audin, L., 2016. Why is there no Coastal Cordillera at the Arica Bend (Western Central Andes)?

MAE, 2013. *Modelo de unidades geomorfológicas para la representación cartográfica de ecosistemas del Ecuador Continental*, QUITO: s.n.

Marín, M., 2014. *Evaluación de zonas de seguridad y puntos de encuentro en la ciudad de Arica, región de Arica y Parinacota, ante una posible inundación por tsunami y fenómenos de remoción en masa asociados*, Santiago de Chile: s.n.

Melton, M., 1957. *An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology*, New York: Columbia Univ.

Moreno, T. & Gibbons, W., 2007. *The Geology of Chile*. The Geological Society, Londres.. Londres: The Geological Society.

Mpodozis, C. & Ramos, V. A., 1989. *The Andes of Chile and Argentina In: Ericksen, G. E.; Cañas, M. T.; Reinemund, J. A. (eds) Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Energy Resources*. Circum-PACific Council for Energy and Hydrothermal Resources, American Association of Pet. 11 ed. Houston, Texas: Earth Science Series.

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 de San José de Maipo, Región*



Metropolitana., Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería en colaboración con Instituto Nacional de Hidráulica (INH). Informe Registrado IR-18-69. 131p. .

Muñoz, A. y otros, 2021. *Remociones en masa y crecidas fluviales en la cuenca del río Las Minas de Punta Arenas, región de Magallanes y de la Antártica Chilena*, Santiago: s.n.

Muñoz, E., 2013. *Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en áreas urbanas. Estudio de caso Viña del Mar, V región, s.l.:* s.n.

Muñoz, M., 2018. *Metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos utilizando un análisis jerárquico de procesos y el software RAMMS, con aplicación en la cuenca del estero San Alfonso, Región Metropolitana., s.l.:* s.n.

Muñoz, N. & Charrier, R., 1996. Uplift of the western border of the Altiplano on a west-vergent thrust system, Northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, Issue 9, pp. 171 - 181.

Muñoz, N. & Sepúlveda, P., 1992. Estructura compresiva con vergencia al oeste en el borde oriental de la Depresión Central, Norte de Chile (19°15'S). *Revista Geológica de Chile*, Issue 19(2), pp. 241-247.

Naranjo, J. & Villarroel, P., 2001. *Informe sobre los efectos del sismo del 23 de junio en Arica*, Santiago de Chile: s.n.

Oliveros, V. y otros, 2020. Lithospheric evolution of the Pre- and Early Andean convergent margin, Chile. *Gondwana Research*, pp. 202-227.

Opazo, E., Báez, F. & Alfaro, A., 2021. *Catastro de remociones en masa en la provincia de Tierra del Fuego, región de Magallanes y de la Antártica Chilena*, Santiago: s.n.

Opazo, E., Escudero, I. & Neira, H., 2017. *Remociones en masa tipo flujo de marzo de 2015 y sus efectos sobre los centros poblados en la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo., Santiago:* s.n.

Oyarzo, F., 2021. *Caracterización geológica y geotécnica de la zona de implantación del embalse Livilcar, Valle de Azapa, región de Arica y Parinacota..* Memoria para optar al título de geólogo ed. s.l.:Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Ciencias de la Tierra..

Oyarzún, J., 2009. *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas., s.l.:* s.n.

Pedraza Gilsanz, . J. D., 1996. *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones.* s.l.:s.n.

Pérez, Y. y otros, 2003. *Geología para el ordenamiento territorial: área de Osorno, Región de Los Lagos*, s.l.: s.n.



Perla, R., Cheng, T. & McClung, D., 1980. A two-parameter model of snow-avalanche motion. *Journal of Glaciology*, Volumen 26, pp. 197-207.

PMA, 2007. *Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería., s.l.: Publicación Geológica Multinacional, no. 4, 432p., 1cd-room..

PMA, 2007. *Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería., s.l.: Publicación Geológica Multinacional, no. 4, 432p., 1cd-room..

Renard, K., 1997. Predicting Soil Erosion by Water, a Guide for Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *USDA. ARS. Washington: Agriculture Handbook.*, Volumen 703.

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

Sabaj, R., 2008. *Identificación y caracterización de estructuras potencialmente activas en la cordillera de la costa, entre los 33° y 33°45'Sur.*, s.l.: s.n.

Salas, R., 1960. *Breve informe preliminar sobre las rocas que forman el Morro de Arica, y que serán empleadas en la construcción del nuevo Puerto*, Santiago de Chile: s.n.

Scheidegger, A. E., 1975. *Physical Aspects of Natural Catastrophes*. Amsterdam/New York: Elsevier.

Sernageomin, 2003. *Mapa Geológico de Chile: Versión digital, No4, CD-ROM versión 1.0.*, Santiago de Chile, Chile: s.n.

Servicio geológico colombiano, 2017. *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000.*, Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

Silalahi, F. E. S., Yukni Arifianti, P. & Hidayat, F., 2019. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia. *Geoscience Letters*, 6(1), p. 10.

SNIT, 2015. *Hidrografía regiones: de Arica y Parinacota a O'Higgins*. [En línea] Available at: <https://www.ide.cl/index.php/aguas-continentales/item/2015-hidrografia-regiones-arica-y-parinacota-tarapaca-y-antofagasta> [Último acceso: Agosto 2022].

Somoza, R., 1998. Updated Nazca (Farallon)- South America relative motions during the last 40 My: implication for mountain building in the central Andean region.. *Journal of South American Earth Sciences*, Issue 11, pp. 211-215.



Statistics Solutions, s.f. www.statisticssolutions.com. [En línea]
Available at: <https://www.statisticssolutions.com/free-resources/directory-of-statistical-analyses/pearsons-correlation-coefficient/#:~:text=High%20Degree%3A%20Values%20between%20%C2%B1,of%20zero%20implies%20no%20relationship>

Strahler, A., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), pp. 913-920.

Sultan, M., Arvidson, R., Sturchio, N. & Guinness, E., 1987. *Lithologic mapping in arid regions with Landsat thematic mapper data: meatiq dome, Egypt*. s.l.:Geological Society of America Bulletin.

Tapia, G., 2014. *Informe Técnico: Inventario de Cuencas, Subcuencas y Subsubcuencas de Chile. División de Estudios y Planificación*, Santiago de Chile: s.n.

Tapia, P., Roldán, G. & Villacis, C., 2002. *Vulnerabilidad sísmica de las ciudades del norte de Chile: Arica, Antofagasta y Copiapó*. 10p. s.l., ACHISINA. .

Tarbuck, E. J. & Lutgens, F. K., 2005. *Earth: an introduction to physical geology*. s.l.:Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall.

Tierney, J. E. y otros, 2020. Glacial cooling and climate sensitivity revisited. *Nature*, Volumen 584, pp. 569-573.

UNISDR, 2009. *Making disaster risk reduction gender sensitive: Policy and practical guidelines*, s.l.: s.n.

Valenzuela, I., Herrera, S., Pinto, L. & del Real, I., 2014. *Carta Camiña, Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá*, Santiago: s.n.

Varnes, D., 1978. Slope movement types and processes.. *In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Research Board, national Academy of Sciences, Washington D.C.*, pp. p.11-33.

Varnes, D. J., 1984. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. s.l.:s.n.

Velásquez, S., 2008. Erosión de suelos utilizando la EUPSR (RUSLE). Coronado, Costa Rica.. *Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza*, pp. 50-62.

Villarroel, P., 2001. *Minuta informe de visita al Morro de Arica del geólogo del SERNAGEOMIN Patricio Villarroel Aguirre*, Santiago de Chile: s.n.

Villarroel, R., 1987. *Características del Morro de Arica después del terremoto de agosto de 1987*, s.l.: s.n.



Warren, D. y otros, 2021. ENMTools 1.0: an R package for comparative ecological biogeography. *Ecography*, Volumen 44, pp. 1-8.

Wichmann, V., 2017. The Gravitational Process Path (GPP) model (v1. 0)–a GIS-based simulation framework for gravitational processes. *Geoscientific Model Development*, 10(9), pp. 3309-3327.

Wischmeier, W. & Smith, D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.. *USDA. SEA. Agriculture Handbook*, 537(58).



ANEXOS

ANEXO A	CATASTRO	A-1
ANEXO B	MAPAS TEMÁTICOS	B-15
ANEXO C	CORRELACIÓN UNIDADES LITOLÓGICAS	C-51
ANEXO D	DATOS DIGITALES, CARTOGRAFÍAS TEMÁTICAS Y CATASTRO.....	D-52
ANEXO E	GLOSARIO.....	E-56
ANEXO F	UBICACIÓN PUNTOS OBSERVACIÓN FOTOGRAFÍAS	F-73
ANEXO G	ESTUDIO MORRO DE ARICA Y ALREDEDORES.....	G-75
ANEXO H	FICHAS DE ZONAS CRÍTICAS.....	H-76
ANEXO I	VALIDACIÓN DEL CATASTRO EN TERRENO	I-77
ANEXO J	VALIDACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD EN TERRENO	J-78
ANEXO K	TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO	K-79
ANEXO L	ACTAS DE REUNIONES.....	L-80

ANEXO A CATASTRO

A continuación, se presentan en detalle los campos de catastro utilizados en este estudio. En su mayoría provienen de la estructura de *geodatabase* del Servicio Nacional de Geología y Minería. Los campos ID_RM, EDAD_REL, UNIDGEOLOGIA y UNIDGEOLOGIA son propuestos por la consultora con el objetivo de contar con información complementaria de las remociones en masa catastradas.

1. ID_RM: Código que identifica cada una de las remociones en masa catastradas, por lo que es único para cada una de ellas. Este parámetro es fundamental para el funcionamiento de la base de datos, porque es a partir de él que se vinculan los puntos levantados mediante fotointerpretación o en terreno con los restantes campos de la base de datos, por lo tanto, este campo no debe quedar vacío. Asimismo, es el identificador que permite correlacionar el catastro de puntos con el catastro de polígonos, ya que comparten el mismo ID_RM.

2. REG_USER: Código que indica la persona que ingresó el registro de la RM al catastro. Se utilizan tres iniciales: nombre, apellido 1 y apellido 2. Este campo no debe quedar vacío.

3. REG_FECHA: Corresponde a la fecha de ingreso del registro al catastro. En caso de puntos fotointerpretados u obtenidos desde otra fuente, y posteriormente validados en terreno, se actualiza a la fecha de validación. El formato de este campo en la GDB es dd/mm/aaaa. Este campo se ha completado en todos los registros.

4. SUBTIPO: Es un número natural entre 1 y 6 que indica el tipo de remoción en masa según la Tabla 19.

Tabla 19 Correlación numérica con el tipo de remoción que corresponde.

SUBTIPO	Tipo de remoción al que corresponde
1	Caída
2	Volcamiento
3	Deslizamiento
4	Propagación
5	Flujo
6	Deformaciones de ladera

Estas categorías se basan en la clasificación de Hungr *et al.* (2013). Este campo se ha completado en todos los registros.

5. SUBTIPO_DESC: Corresponde a la descripción de los tipos de remociones en masa. Debe correlacionarse con el código asignado en SUBTIPO (ver lista anterior) y contiene las siguientes alternativas (lista cerrada), por lo que este campo se ha completado en todos los registros.

- Caída



- Volcamiento
- Deslizamiento
- Propagación
- Flujo
- Deformación de ladera.

Las categorías anteriores se definen en el capítulo 2.5.1 Remociones en masa del presente informe y, a modo general, en el glosario de este estudio (ANEXO D “Datos digitales, cartografías temáticas y catastro).

En forma adjunta a este documento se entregan como anexos digitales 3 bases de datos y 2 carpetas que contienen proyectos ArcMap:

Carpetas contenidas:

- **Figuras informes** Corresponden a todos los archivos MXD correspondientes a las figuras incluidas en el informe.
- **Vi-Cart.** Corresponden a todos los proyectos MXD de los Mapas 1 a 5 del FNDR Arica y Parinacota.

Bases de datos:

- **Catastro_RM_Arica.gdb**
- **Complementos_FNDR_Arica.gdb**
- **FNDR_PG_Arica.gdb**

A continuación, se detalla lo incluido en cada una de las bases de datos:

- **Catastro_RM_Arica.gdb**

Tipo de archivo	Nombre	Capas contenidas Descripción
Feature Dataset	Catastro_RM_PG	PG_RM_CATALOGO. Catastro puntual de remociones en masa región Arica y Parinacota. PG_RM_CATALOGO_P. Catastro poligonal de remociones en masa región Arica y Parinacota.

- **Complementos_FNDR_Arica.gdb**

La gdb contiene los elementos que componen las figuras complementarias para la construcción de los MXD contenidos en la carpeta Vi-Cart, correspondientes a los siguientes DataFrame: Chile Mapa de Ubicación, Antártica Mapa de Ubicación, Mapa de ubicación, Trabajos anteriores, Fuente y Valor de la Información, Viñeta.

- **FNDR_PG_Arica.gdb**

Tipo de archivo	Nombre	Capas contenidas Descripción
Feature Dataset	Base_Topografia_TO	Corresponde a la base topográfica IGM entregada por la contraparte para el área de la Región de Arica y Parinacota.
Feature Dataset	ElementosCartograficos	Anotaciones, Alteración, Crioclastia, CuencasBNA, Escarpes_Morro_y_alrededores, Estructuras_geologicas_Morro_y_alrededores, InventarioGlaciaresDGA, MD_MAPA_P, MD_MAPA_P1, MD_MAPA_P_2, Modelo_geologico_geotecnico_Morro_y_alrededores, Océano, Países_vecinos, PeligroAltoVolcanico, Recomendaciones_Morro_1_1000, Susceptibilidad_FL, Toponimia_Morro_y_alrededores, TracksTerreno_XTERRAE, Unidades_susceptibilidad_IS_Morro_y_alrededores, UsoSuelo, Volcanes, Zona_seguridad_costanera, Zonas_criticas, Zonas_criticas_Morro_1_1000.
Feature Dataset	Peligro_Remocion_Masa	PG_AREA_PROYECTO, PG_CLIMA_L, PG_CLIMA_P, PG_CUENCA_L, PG_CUENCA_P, PG_DRENAJE_L, PG_FALLA_L, PG_GEOMORFOLOGIA_L,

		PG_GEOMORFOLOGIA_P, PG_HIDRO_L, PG_SINTESIS GEO_L, PG_SINTESIS_GEO_P
Raster	Alteraciones. Capa ráster correspondiente a mapa temático de alteraciones.	
Raster	Arica_ortofotomosaico. Capa ráster correspondiente a ortofotomosaico generado a partir de levantamiento con dron para el área del Morro y alrededores.	
Raster	Aspecto. Capa ráster correspondiente a mapa temático de aspecto.	
Raster	B6b7_values. Análisis de bandas para cálculo de alteraciones de rocas. B6b7_x_rocas. Análisis de bandas para cálculo de alteraciones de rocas, por rocas.	
Raster	Curvatura. Capa ráster correspondiente a mapa temático de curvatura.	
Raster	Curvatura_perfil. Capa ráster correspondiente a mapa temático de curvatura de perfil.	
Raster	Curvatura_plana. Capa ráster correspondiente a mapa temático de curvatura plana.	
Raster	FABDEM. Capa ráster correspondiente a DEM FABDEM Copernicus para la región de Arica y Parinacota.	
Raster	FC_CD_Fallas. Factor condicionante “Estructuras” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.	
Raster	FC_CD_Geomorfología. Factor condicionante “Geomorfología” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.	
Raster	FC_CD_Litología. Factor condicionante “Litología” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.	
Raster	FC_CD_Pendiente. Factor condicionante “Pendiente” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.	

Raster	FC_FL_Alteracion. Factor condicionante “Alteración” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	FC_FL_FactorLS. Factor condicionante “FactorLS” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	FC_FL_Geomorfologia. Factor condicionante “Geomorfología” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	FC_FL_Litologia. Factor condicionante “Litología” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	FC_FL_Pendiente. Factor condicionante “Pendiente” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	Hillshade. Capa ráster correspondiente a mapa temático de sombreado de relieve / hillshade.
Raster	LSFactor_Moore. Capa ráster correspondiente a mapa temático de Factor LS.
Raster	Melton_pixel. Capa ráster correspondiente a mapa temático de Razón de Melton calculado a escala de píxel.
Raster	Pendiente. Capa ráster correspondiente a mapa temático de pendientes.
Raster	Susceptibilidad_CD. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.
Raster	Susceptibilidad_CD_reclass. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos, reclasificado en “Baja”, “Moderada”, “Alta” y “Muy Alta”.
Raster	Susceptibilidad_FL. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	Susceptibilidad_FL_reclass. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por flujos, reclasificado en “Baja”, “Moderada”, “Alta” y “Muy Alta”.

- Las coberturas se encuentran cargadas en archivos ArcGis 10.5 que llevan el nombre del mapa temático respectivo para facilitar su lectura y resguardar las simbologías (Estructura_GBD_Proyecto\Figuras informe).

Glosario

6. TIPO_MATER: Campo que indica el material afectado por la remoción en masa de acuerdo con las siguientes alternativas (lista cerrada), por lo que este campo se ha completado en todos los registros.

- Roca
- Suelo/Sedimento
- Roca y Suelo/Sedimento
- Sin información: se utiliza cuando no es posible identificar el tipo de material removido, ya sea por la calidad de la fotointerpretación, por la distancia al afloramiento si se observó desde lejos, o si proviene de otra fuente, que esta información no esté especificada.

7. NOMBRE_RM: Campo que describe el nombre o tipo específico de la RM de acuerdo con las categorías basadas en Hungr *et al.* (2013) definidas en el capítulo 2.5 “Remociones en masa” del presente informe. En el caso de deslizamientos, “plano” y “traslacional” se entienden como sinónimos. Las categorías de remociones en masa, que corresponden a una lista cerrada, son las siguientes. Este campo se ha completado en todos los registros.

- Avalancha de detritos
- Avalancha de rocas
- Caída de roca
- Caída de bloque/detrito/arena/limo
- Caída indeterminada
- Crecida de detritos
- Deformación de laderas de montaña
- Deformación de laderas de roca
- Deformación de laderas de suelo
- Deformación indeterminada
- Deslizamiento compuesto de arcilla/limo
- Deslizamiento compuesto de roca
- Deslizamiento de grava/arena/detritos
- Deslizamiento en cuña de roca
- Deslizamiento indeterminado
- Deslizamiento irregular de roca
- Deslizamiento plano de arcilla/limo
- Deslizamiento rotacional de arcilla/limo
- Deslizamiento rotacional de roca
- Deslizamiento traslacional de roca
- Deslizamiento-Flujo de arcillas sensibles
- Deslizamiento-Flujo de arena/limo/detrito
- Flujo de barro

- Flujo de detritos
- Flujo de tierra
- Flujo de turba
- Flujo indeterminado
- Flujo seco de arena/limo/detritos
- Propagación de arcilla sensible
- Propagación de arena indeterminada
- Propagación de roca en pendiente
- Propagación por licuefacción de arena/limo
- Reptación de suelos
- Roca
- Roca y Suelo/Sedimentos
- Sin Información: se utiliza cuando no se puede definir el nombre específico de la RM catastrada.
- Soliflucción
- Suelo/Sedimento
- Volcamiento de bloque de roca
- Volcamiento de grava/arena/limo
- Volcamiento flexural de roca
- Volcamiento indeterminado

8. UTM_ESTE: Corresponde la coordenada que indica la posición Este UTM (coordenada proyectada) del punto del catastro. Se relaciona con el campo **LONGITUD**. Este campo se ha completado en todos los registros. En el caso del catastro de polígonos, este campo contiene las coordenadas del centroide.

9. UTM_NORTE: Corresponde a la coordenada que señala la posición Norte UTM (coordenada proyectada) del punto del catastro. Se relaciona con el campo **LATITUD**. Este campo se ha completado en todos los registros. En el caso del catastro de polígonos, este campo contiene las coordenadas del centroide.

Cabe destacar que el punto conformado por los dos parámetros anteriores se ha definido en el interior del área delimitada como remoción en masa, preferentemente en la zona de generación.

10. AREA_m2: Indica la superficie de la RM catastrada, expresada en metros cuadrados. Este valor se puede obtener a partir de un mapeo poligonal de la RM catastrada o a partir de bibliografía, dependiendo del origen del dato. En el caso de que el punto represente una "zona de" RM (ver campo **NOTA**), este valor representa la superficie total de la zona. En el catastro de puntos este campo puede contener una estimación de quien mapeó la remoción o el área del polígono correspondiente.

Debido a que es un campo numérico, en caso de que no se tenga información de superficie, el campo ha quedado vacío.

11. VOLUMEN_m3: Indica el volumen de la remoción, expresado en metros cúbicos. Este campo puede contener información a partir de bibliografía o a estimaciones de quien mapeó.

Debido a que es un campo numérico, en caso de que no se tenga información de superficie, el campo queda vacío.

12. COD_RM: En los casos que una remoción ya se encuentra en los catastros del Servicio Nacional de Geología y Minería, en este campo se señala el número del registro en el catastro oficial. En caso de que el dato ingresado provenga de otra fuente en la que cuente también con algún código identificador, se debe indicar en este campo dicho código. En caso de que el dato no cuente con esta información, el campo queda vacío.

13. TIPO_RASGO: Indica el tipo de rasgo al que hace referencia el registro del catastro, es decir, el rasgo de la RM en el que **se ubica** el punto del catastro, a partir de las siguientes categorías. Como se trata de una lista cerrada, este campo se ha completado en todos los registros.

- Cicatriz: Huellas del escarpe principal de una remoción en masa antigua (PMA, 2007).
- Cuerpo: Parte del material desplazado que yace sobre la superficie de falla, entre el escarpe principal y el pie de la superficie de falla (PMA, 2007).
- Depósito: acumulación de material removido por algún proceso de remoción en masa.
- Escarpe principal: En un deslizamiento se refiere a la parte superior vertical o semivertical del plano de falla que queda expuesta en superficie por el movimiento ladera abajo del cuerpo principal (PMA, 2007). En el caso de avalanchas, dado que estas comienzan con un deslizamiento (PMA, 2007; Hungr, et al., 2013), también se podría identificar este tipo de rasgo.
- Escarpe secundario: En un deslizamiento se refiere a los planos de falla secundarios que ocurren por el rompimiento diferencial del cuerpo del deslizamiento y quedan parcialmente expuestos en superficie.
- Flanco derecho/izquierdo: costado derecho o izquierdo del cuerpo principal de un deslizamiento (PMA, 2007). Se observa aguas abajo.
- Pie: Parte de un deslizamiento que se mueve más allá del pie de la superficie de falla y cubre la superficie original del terreno.
- Zona de generación: Zona donde inicia la remoción en masa.
- Zona de transporte: Zona de transporte de material durante un evento de remoción en masa.
- Zona de transporte y depositación: Zona de la RM donde ocurre transporte de material, pero también depositación. Por ejemplo, la zona del ápice de un flujo de detritos.

- Zona de transporte y erosión: Zona de la RM donde ocurre transporte de material, pero también erosión del sustrato (base o paredes).
- Otro: Cualquier otro rasgo reconocido que no se encuentre en la lista ya definida.
- Sin información: Categoría que se utiliza cuando no se puede determinar el tipo de rasgo sobre el cual se ha ubicado el registro del catastro.

En el presente Estudio se priorizará la ubicación del punto en la zona de generación o cicatriz.

14. DETONANTE: Se refiere al factor que desencadena la ocurrencia del evento catastrado. Es una lista cerrada que contiene las siguientes alternativas:

- Carga en la corona de talud/ladera
- Deshielo
- Erosión pie de ladera/talud
- Erupción volcánica
- Evento sísmico
- Excavación pie de ladera/talud
- Lluvia
- Vibración artificial (tráfico, explosiones, hincado de pilotes, otro)
- Otro
- Sin información

Esta información es completada a partir de información de terreno o bibliografía. En caso de puntos fotointerpretados en que no se cuente con información de respaldo, este campo se rellena con “Sin información”, por lo que este campo se ha completado en todos los registros.

15. ESTADO: Este campo indica que tan activa se encuentra una remoción en base a las siguientes categorías, en una lista cerrada, por lo que este campo se ha completado en todos los registros.

- Activo: movimiento en masa que actualmente se está moviendo, bien sea de manera continua o intermitente (PMA, 2007). En el presente estudio se propone utilizar esta categoría para deslizamientos y caídas.
- Latente: movimiento en masa actualmente inactivo, pero en donde las causas o factores contribuyentes aún permanecen (WP/WPI (1993) en PMA (2007)). En el presente estudio se propone considerar también como movimiento en masa actualmente inactivo, pero que tiene las condiciones para ser removilizado por un agente externo. Aplica también para depósitos.
- Relicto: movimiento en masa que claramente ocurrió bajo condiciones geomórficas o climáticas diferentes a las actuales, posiblemente hace miles de años (Cruden y Varnes (1996) en PMA (2007)). En el presente estudio se considera que no es bueno asociarlo a otros períodos climáticos o con condiciones tan distintas a las actuales.

Más bien, se podría asociar a un movimiento en masa que ocurrió hace un tiempo prolongado que se pueda inferir a partir de las características del sitio.

- Suspendido: movimiento en masa que se desplazó durante el último ciclo anual de las estaciones climáticas, pero que en el momento no presenta movimiento (Varnes (1978) en PMA (2007)).
- Estabilizado: movimiento en masa cuyo desplazamiento ha cesado debido a la ejecución de obras correctivas o de control (Cruden y Varnes (1996) en PMA (2007)). Se entiende a partir de la definición que el término se asocia a medidas de acción directa sobre el proceso (como pernos, hormigón proyectado, entre otros). En el presente estudio se propone ampliar la definición para considerar en esta categoría aquellas remociones en masa que posean obras de mitigación, como mallas para caídas, piscinas para flujos, etc.
- Reactivado: movimiento en masa que presenta alguna actividad después de haber permanecido estable o sin movimiento por algún período de tiempo. En el presente estudio se incorpora la condición de que esta reactivación debería ser identificable a partir del análisis de registros, ya sea de terreno o mediante fotointerpretación.
- Sin información: se utiliza esta categoría cuando no se puede definir el estado de la RM catastrada.

16. DIA_EVENTO: Para los eventos que se sabe cuándo ocurrieron, este campo contiene el o los días del mes en que ocurrió. En caso de que no se cuente con esta información el campo queda vacío.

17. MES_EVENTO: Para los eventos que se sabe cuándo ocurrieron, en este campo se pone el mes en que ocurrió. Es una lista cerrada con opciones desde enero a diciembre. Se incluye también la opción “Sin información” para aquellas RM que no se sabe cuándo ocurrieron, por lo tanto, este campo se ha completado en todos los registros.

18. AÑO_EVENTO: Para los eventos que se sabe cuándo ocurrieron, este campo contiene el año en que ocurrió. Si no se cuenta con esta información, el campo queda vacío.

19. TEMPORADA: Se refiere a la época del año o estación en que ocurrió un determinado evento. Es una lista cerrada que tiene las siguientes alternativas, por lo que se ha completado en todos los registros:

- Verano (del 21-12 al 20-03)
- Otoño (del 21-03 al 20 del 06)
- Invierno (del 21-06 al 20-09)
- Primavera (del 21-09 al 20-12)
- Sin información

20. PROFUNDIDAD: Este campo hace referencia al espesor del depósito. Este campo puede contener información a partir de bibliografía o a estimaciones de quien mapeó. Es una lista

cerrada que tiene las siguientes alternativas, por lo que se ha completado en todos los registros:

- Superficial (<3 m)
- Media (3 m< prof <6 m)
- Profunda (>6 m)
- Sin información

21. METODO: Este campo hace referencia a la forma como se obtuvo la información catastrada, por lo que se ha completado en todos los registros. Las alternativas son las siguientes:

- Fotointerpretado: se refiere al caso en que la identificación de la RM haya sido en base al análisis de imágenes satelitales.
- Observado en terreno: corresponde a datos levantados o validados en terreno.
- Otro: indica otros métodos de identificación de remociones en masa no especificados en las otras categorías de esta lista de alternativas.
- Referencia bibliográfica: indica que el dato proviene de una referencia bibliográfica. Estas pueden ser informes técnicos, tesis, memorias, artículos científicos, libros, cartas geológicas, mapas de peligro, etc.
- Medios digitales o escritos: esta categoría hace referencia a datos provenientes de prensa digital o escrita.

En este estudio, los registros identificados a partir de fotointerpretación se realizarán mediante análisis de imágenes satelitales de *Google Earth Pro*, dada la alta resolución de estas imágenes de acceso libre, así como la disponibilidad de imágenes históricas. De acuerdo con los sets de imágenes disponibles en dicha plataforma, se fijará una escala de observación (altura de ojo) para mapear a escala 1:10.000 o menor.

Se resalta, además, la importancia de analizar marcas y tipo de remociones identificadas a partir de la fotointerpretación, como el aspecto, coloración y erosión que exhibe la superficie de los terrenos. También se releva la importancia de la observación de imágenes con distinta temporalidad.

A los puntos fotointerpretados o provenientes de otra fuente de información, y que posteriormente sean validados en terreno se les debe cambiar el **METODO** a “Observado en terreno” y ajustar los campos correspondientes para mantener la coherencia de la tabla de atributos.

En el caso del catastro de polígonos, aquellos que se asocien a puntos “Observados en terreno”, el polígono también se debe categorizar de esta manera debido a que el mapeo por fotointerpretación posterior a las campañas de terreno permite complementar el análisis de imágenes satelitales con fotografías capturadas en superficie y/o con el uso de dron, apuntes de terreno, discusión con pares e incluso mapeo preliminar en dispositivos electrónicos.

22. ESCALA_FOTO: Corresponde a la escala de fotointerpretación. Este valor se asigna a partir de la escala de la imagen satelital analizada en Google Earth Pro.

23. CONF_INTERPRET: Este campo aplica únicamente para aquellos registros en que, en el campo **METODO**, se ha elegido la opción “Fotointerpretado”. Hace referencia al nivel de confianza de la fotointerpretación y, por lo tanto, del registro, según las siguientes alternativas (lista cerrada), por lo que se ha completado en todos los registros:

- Alta
- Media
- Baja
- Sin información
- No aplica: esta alternativa se utiliza cuando el **METODO** sea diferente a “Fotointerpretado”.

24. FUENTE_INFO: Este campo aplica únicamente para aquellos registros en que, en el campo **METODO**, se ha elegido la opción “Referencia bibliográfica” o “Medios digitales o escritos”. En este campo debe ir la referencia desde donde se obtuvo la información del registro. En casos que el punto se haya validado en terreno, se debe mantener la referencia bibliográfica y el método se debe cambiar a “Observado en terreno”. En cualquier otro caso este campo se debe dejar en blanco. Si la fuente de información antes mencionada posee un link (URL) asociado, esta información debe ir en el campo **ENLACE**.

El formato de llenado de este campo es: Año. Título.

25. AUTOR: Este campo aplica únicamente en aquellos registros que el campo **FUENTE_INFO** no está en blanco. Tiene por objetivo indicar el autor de la fuente citada según el formato: Apellido, I. (inicial de nombre). Si es más de un autor, se separa por “;”.

26. PROYECCION: Campo que indica la proyección de las coordenadas UTM de acuerdo con las siguientes opciones válidas para el país (lista cerrada). Este campo se ha completado en todos los registros.

- SIRGAS UTM 18S (esta opción no es válida en la región de Arica y Parinacota)
- SIRGAS UTM 19S

27. NOTA: En este campo se incluye toda la información relevante que no queda cubierta en los otros campos, por ejemplo, si afecta a alguna infraestructura o si está asociada a volcanismo. Puede almacenar un máximo de 250 caracteres. En el caso de RM observadas en terreno desde alguna ruta, al final del texto de este campo se indican las coordenadas UTM del punto de observación de la siguiente manera: “Observado desde camino; Coordenada E; Coordenada N”.

Aquellos sectores acotados donde ocurren varios fenómenos de características similares se describen en este campo como “zona de”, por ejemplo, “zona de flujos”, “zona de deslizamientos” o “zona de caídas”.

28. LATITUD: Corresponde la latitud (coordenada geográfica) del punto del catastro. Se relaciona con el campo **UTM_NORTE**. Este campo se ha completado en todos los registros.

29. LONGITUD: Corresponde la latitud (coordenada geográfica) del punto del catastro. Se relaciona con el campo **UTM_ESTE**. Este campo se ha completado en todos los registros.

30. PREC_COORD: Indica si las coordenadas muestran exactamente la ubicación de la remoción o si es sólo una aproximación. Es una lista cerrada que tiene las siguientes alternativas, por lo que se ha completado en todos los registros.

- Coordenadas exactas: se utiliza cuando el punto se ubica sobre una RM individualizable.
- Coordenadas aproximadas al sector: se utiliza en aquellos puntos que representan una “zona de”, aunque se ubiquen sobre un rasgo individual.
- Coordenadas inexactas ubicadas en la ciudad o comuna: se utiliza cuando la información disponible para ubicar la RM es limitada. Se utiliza para remociones que no sean fotointerpretadas ni observadas en terreno.
- Coordenadas inexactas ubicadas en la provincia o región: se utiliza cuando la información disponible para ubicar la RM es limitada. Se utiliza para remociones que no sean fotointerpretadas ni observadas en terreno.
- Coordenadas inexactas ubicadas a nivel de regiones o nacional: se utiliza cuando la información disponible para ubicar la RM es limitada. Se utiliza para remociones que no sean fotointerpretadas ni observadas en terreno.

31. REGION: Indica la región donde se ubica el registro. Es una lista cerrada que incluye todas las regiones del país, sin la actualización de la nueva región del Ñuble (contenida en Bío Bío). En el caso de este estudio a todos los registros les corresponde el valor “Arica y Parinacota”. Este campo se ha completado en todos los registros.

32. ENLACE: En aquellos casos que existe un enlace a la bibliografía referenciada en el campo **FUENTE_INFO** o a alguna página web que contenga más información acerca de la remoción, se incluye en este campo la URL. En caso contrario, el campo queda vacío.

33. EDAD_REL: En este campo se incluye información de la edad relativa, cuando existe información de referencia, según lo observado en terreno o en fotointerpretación de imágenes históricas. Por ejemplo “Pre 2019; Post 2018”, “Joven”, “Antiguo”. Si no hay información se rellena con “Indeterminado”.

Joven hace referencia a una remoción en masa cuyas características superficiales evidencien poca erosión/meteorización, pero que no hay evidencias en imágenes históricas de Google Earth Pro (es decir, antes de 1980 aproximadamente).

Antiguo hace referencia a remociones en masa cuyas características superficiales evidencien procesos de erosión/meteorización indicando una mayor edad relativa que una RM catalogada como joven.



34. UNIDGEOL: Indica la unidad geológica donde se ubica la remoción. Esta información se obtiene a partir de la ubicación del punto y su cruce con el mapa geológico compilado 1:250.000 elaborado en el presente estudio.

35. UNIDGEOM: Indica la unidad geomorfológica donde se ubica la remoción. Esta información se obtiene a partir de la ubicación del punto y su cruce con el mapa geomorfológico 1:250.000 elaborado en el presente estudio.

ANEXO B MAPAS TEMÁTICOS

B.1 Mapa geomorfológico

Para la elaboración del mapa geomorfológico se utilizó como base las unidades geomorfológicas descritas en el trabajo *Geology of Chile* (Moreno & Gibbons, 2007) y para el análisis se emplearon los subproductos del DEM de Copernicus.

La metodología utilizada para definir todas las unidades geomorfológicas consistió en una evaluación de las características fisiográficas del relieve que tuvo dos etapas:

- Clasificación no supervisada de variables fisiográficas, de acuerdo con la metodología desarrollada por el Ministerio del Ambiente de Ecuador, descrita en el trabajo por MAE (2013) y Alfaro, *et al.* (2018).
- Se utilizaron las herramientas *Principal Components* e *ISO Cluster Unsupervised Classification* de ArcGIS para la clasificación supervisada a partir de las siguientes capas:
 - DEM
 - Pendiente
 - Relieve sombreado
 - Curvatura de perfil
 - Curvatura planar
 - Curvatura transversal
 - Curvatura longitudinal
 - Curvatura máxima
- Se utilizaron las *Majority Filter*, *Bounday Clean*, y la asociación entre *Region Group*, *Set Null* y *Nibble*; para eliminar pixeles aislados, suavizar bordes, y eliminar grupos de hasta 400 pixeles de una clase dentro zonas donde domina otra clase.
- Ajuste y mapeo directo en base a la evaluación del control estructural y de la revisión de las capas de elevación, pendientes y relieve sombreado.

La geomorfología definida para la región de Arica y Parinacota comprende 8 macrounidades, las cuales corresponden a: Acantilado Costero, Cordillera de la Costa (subdividida en sierras y llanuras), Quebradas del piedemonte, Planicies fluvioaluviales, Depresión Central, Precordillera, Cordillera Occidental (incluye arco volcánico y sierras) y Altiplano.

A continuación, se describen las unidades geomorfológicas en la Tabla 20, y en la Fig. 111 se presenta el mapa geomorfológico elaborado para este estudio.

Tabla 20 Caracterización de unidades geomorfológicas.

Macrounidades geomorfológicas	Características
Acantilado Costero	<p>El Acantilado Costero forma una larga y estrecha franja norte-sur ubicada en el sector poniente de la región, que corresponde al límite occidental de la Cordillera de la Costa, y que en determinados lugares se encuentra disectada por quebradas que emergen de la Precordillera. Este rasgo destaca por ser un abrupto desnivel topográfico en un tramo relativamente estrecho, de entre 1 y 2 km de ancho, por lo que concentra las mayores pendientes de la Cordillera de la Costa, cuyos valores sobrepasan en general los 35°, alcanzando valores de hasta 50°.</p> <p><u>Altitud:</u> Su altitud va desde los 100 a los 1.000 m s.n.m.</p> <p><u>Litología:</u> Formada en general por rocas intrusivas, volcanosedimentarias, principalmente jurásicas. Además, se encuentran depósitos coluviales en esta área.</p> <p><u>Estructuras:</u> Sistema de fallas de rumbo NW-SE y NE-SW.</p>
Cordillera de la Costa	<p>La Cordillera de la Costa (CC) corresponde a una unidad de orientación norte-sur que se inicia en esta región con un ancho entre 10 y 15 km, y se expresa como una baja cordillera de no más de 1.200 m s.n.m, reconocible por algunas sierras que la distinguen de la depresión central. Su borde occidental es el Acantilado Costero, que corresponde a una morfología abrupta y su borde oriental está dado por la ausencia de sierras, dando paso a la depresión central.</p> <p><u>Altitud:</u> Varía entre 500 hasta 1.200 m s.n.m. aproximadamente.</p> <p><u>Litología:</u> Formada principalmente por rocas intrusivas y sucesiones de rocas volcánicas y sedimentarias del Jurásico. Además, las llanuras se encuentran rellenas con depósitos aluviales.</p> <p><u>Estructuras:</u> Sistema de fallas de rumbo NW-SE y NE-SW.</p> <p>La CC se puede subdividir en dos unidades según sus características morfológicas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.- <u>Sierras de la CC:</u> Cordones montañosos de distintas extensiones que constituyen las cumbres de la CC, están formados por unidades de roca y representan las mayores alturas y pendientes dentro de la CC. 2.- <u>Llanuras de la CC:</u> Zonas relativamente planas que forman llanuras intermontanas formadas por depósitos. Estas representan las menores alturas y pendientes en la CC.

Macrounidades geomorfológicas	Características
Quebradas del piedemonte	<p>Quebradas de orientación este-oeste, que se originan en la precordillera y el altiplano, extendiéndose hasta llegar al océano. Algunas de estas quebradas presentan fuertes incisiones de hasta 1.000 m de profundidad y pendientes de hasta 45°. Por otro lado, existen otras quebradas que se inician más al oeste, únicamente en la precordillera, las cuales no generan una incisión tan pronunciada, pero aun así presentan altas pendientes del orden de 30°.</p> <p><u>Altitud:</u> Varía entre el nivel del mar, hasta aproximadamente los 4.000 m s.n.m. al este.</p> <p><u>Litología:</u> La conforman principalmente secuencias sedimentarias, además de depósitos de remoción en masa, coluviales y aluviales.</p> <p><u>Estructuras:</u> no se reconoce un dominio estructural característico.</p>
Planicies fluvioaluviales	<p>Corresponden a los fondos de las quebradas del piedemonte y a la planicie donde convergen. Forman extensos valles de orientación este-oeste entre los que destacan Acha, Azapa, Vitor y Lluta.</p> <p><u>Altitud:</u> Varía entre el nivel del mar, hasta aproximadamente los 1.000 m s.n.m. al este.</p> <p><u>Litología:</u> Principalmente depósitos fluviales y aluviales.</p> <p><u>Estructuras:</u> no se reconoce un dominio estructural característico.</p>
Depresión Central	<p>Zona de orientación NO-SE ubicada entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera, cuyas alturas y pendientes son menores que ambas cordilleras. Posee un ancho aproximado de alrededor de 60 km.</p> <p>Corresponde a una planicie de pendiente suave hasta el oeste, menor a 5°, que se encuentra fuertemente disectada por las quebradas del piedemonte.</p> <p><u>Altitud:</u> Varía entre 600 m s.n.m. al oeste y 2.500 m s.n.m hacia el este.</p> <p><u>Litología:</u> Está formada principalmente por secuencias sedimentarias, volcánicas, así como depósitos de remoción en masa, aluviales, coluviales, fluviales, lacustres-salinos y eólicos.</p> <p><u>Estructuras:</u> El dominio estructural principal corresponde al sistema de fallas Ausipar, parte del Sistema de Cabalgamientos de Vergencia Oeste (ver unidad Precordillera), define el límite entre la Depresión Central y la Precordillera.</p>

Macrounidades geomorfológicas	Características
Precordillera	<p>La Precordillera corresponde a una zona de orientación NO-SE, que se desarrolla en toda la región y que forma el piedemonte de la Cordillera Occidental. Su ancho de alrededor de 30 km posee bajas pendientes de hasta 15° aproximadamente y altitudes que aumentan progresivamente hacia el oriente.</p> <p><u>Altitud:</u> Varía entre los 3.000 y 3.700 m s.n.m, siendo las zonas de mayor altitud al este de la región.</p> <p><u>Litología:</u> Esta formada principalmente por secuencias volcánicas y volcanosedimentarias.</p> <p><u>Estructuras:</u> El dominio estructural principal corresponde al Sistema de Cabalgamientos de Vergencia Oeste (SCVO), que se divide en dos sistemas de fallas: Ausipar la cual define el límite entre la Depresión Central y la Precordillera, y Belén en el lado oriental de la Precordillera.</p>
Cordillera Occidental	<p>Esta unidad representa el borde occidental del Altiplano, está constituido por cordones montañosos y se caracteriza por que concentra los centros volcánicos del arco volcánico actual. Los centros volcánicos Pleistocenos y Holocenos representan las mayores pendientes (mayores a 30°) y altitudes de esta unidad, formando un terreno rugoso y elevado. Las mayores altitudes corresponden a los volcanes: Taapaca (5.850 m s.n.m.), Parinacota (6.325 m s.n.m), Guallatiri (6.070 m s.n.m.) y Arintica (5.560 m s.n.m.).</p> <p><u>Altitud:</u> 4.500 a 6.325 m s.n.m.</p> <p><u>Litología:</u> Esta constituida principalmente por complejos volcánicos e ignimbritas del Mioceno y Pleistoceno. Adicionalmente, rocas intrusivas del Mioceno, secuencias sedimentarias y volcanosedimentarias del Oligoceno-Mioceno, así como depósitos de remoción en masa, glaciales y aluviales.</p> <p><u>Estructuras:</u> Sistema de Cabalgamiento Chucal, sistema de fallas de vergencia este que forma parte del Sistema de Cabalgamiento de Vergencia Este (SCVE).</p>
Altiplano	<p>Esta unidad, que corresponde a la unidad más oriental, es de gran extensión, pero que en la región su área se reduce a alrededor de 60 km en dirección E-O y 170 km en dirección N-S. Se caracteriza por sus pendientes bajas (menores a 10°) y gran altitud (mayor a 4.000 m s.n.m.), formando una gran meseta al este de la región, interrumpida por cordones montañosos y volcanes de la Cordillera Occidental.</p> <p><u>Altitud:</u> 4.000 a 4.500 m s.n.m.</p> <p><u>Litología:</u> Está formada principalmente por secuencias volcanosedimentarias del Mioceno y Pleistoceno, así como depósitos glaciofluviales y glacioaluviales, palustres, salinos, fluviales y aluviales.</p> <p><u>Estructuras:</u> Sistema de Cabalgamiento Chucal, sistema de fallas de vergencia este que forma parte del Sistema de Cabalgamiento de Vergencia Este (SCVE).</p>

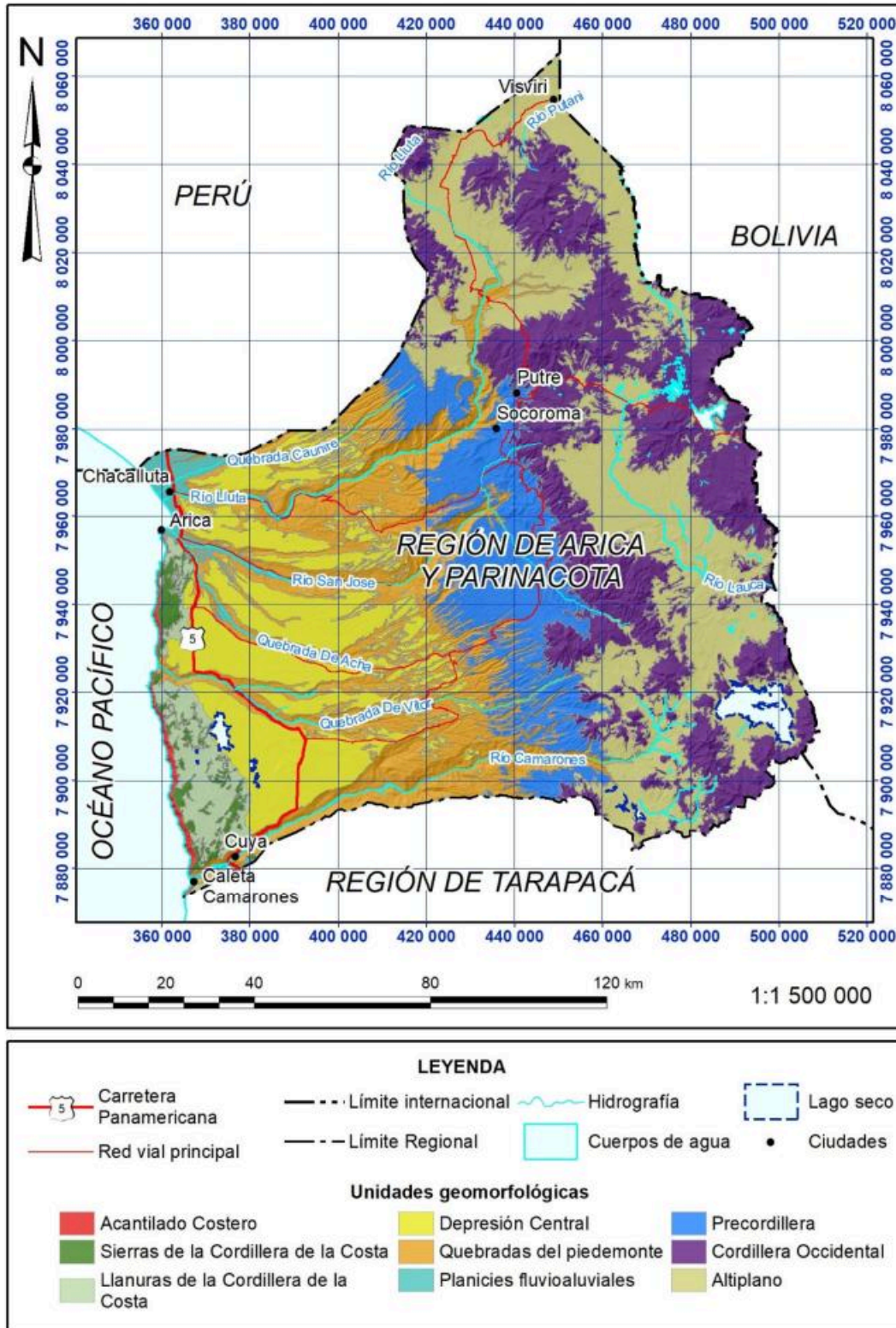


Fig. 111 Mapa geomorfológico.

B.2 Mapa litológico compilado

La elaboración del mapa litológico de la región se llevó a cabo mediante la unión de la información de cartografía geológica y proporcionada por el Servicio Nacional de Geología y Minería.

A pesar de la existencia de un mapa geológico nacional a escala 1:1.000.000 (Sernageomin, 2003), este solo se utilizó como referencia, pues la región está completamente cubierta con cartas geológicas a escala 1:100.000 y 1:250.000. Cabe destacar que, en las zonas cubiertas a ambas escalas, se mantuvieron las unidades litológicas cartografiadas a escala 1:100.000, considerando que estas fueron elaboradas con mayor detalle.

Las cartas geológicas utilizadas se muestran en la Fig. 112. y se detallan a continuación:

- García, M.; Clavero, J.; Gardeweg, M. (2012). Cartas Visviri y Villa Industrial, Región de Arica y Parinacota. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 135-136: 42 p.*, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- García, M.; Fuentes, G. (2012). Carta Cuya, Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 146: 80 p.*, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- García, M.; Fuentes, G.; Riquelme, F.; (2013). Carta Miñimiñi, Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 157*, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Valenzuela, I.; Herrera, S.; Pinto, L.; Del Real, I., (2014). Carta Camiña, Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 170*. 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Arcos, R.; Naranjo, J.A.; Ladino, M.; Polanco, E. (2018) Carta Putre, región de Arica y Parinacota. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 197: 141p.*, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Clavero, J.; Droguett, B.; Quiroga, R.; Álvarez, P. (2018). Carta Lago Chungará, región de Arica y Parinacota. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 194: 96 p.*, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- García, M.; Gardeweg, M; Clavero, J.; Hérail, G. (2004) Hoja Arica, Región de Tarapacá. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 84*, 150 p., 1 mapa escala 1:250.000.

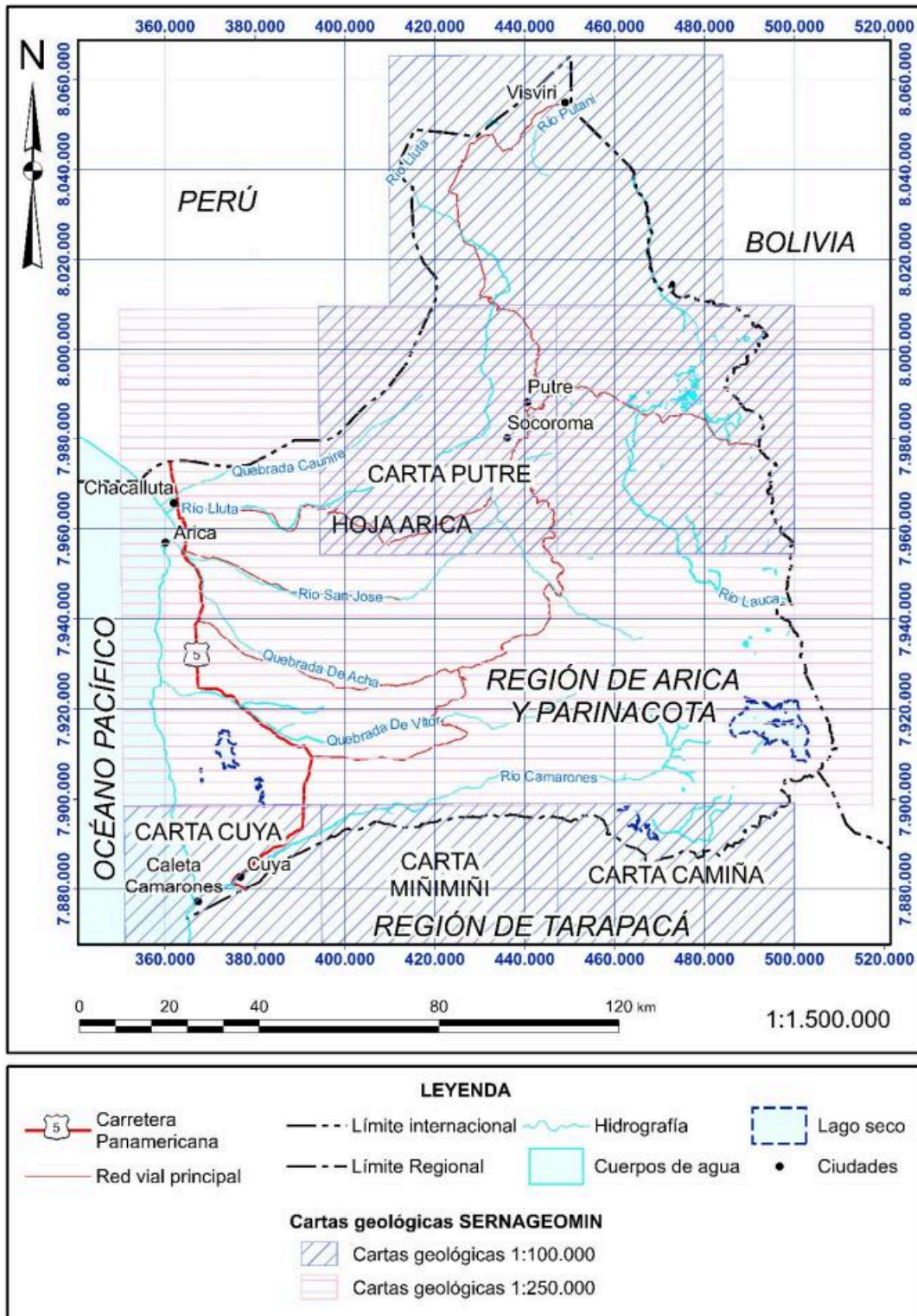


Fig. 112 Cartas geológicas utilizadas.

Primero se hizo una compilación de los datos mediante el software ArcGIS. Para esto se utilizó el geoproceso de unión vectorial *Merge (Data Management Tools/General/Merge)*, con el propósito de unir las cartas a escala 1:100.000. Una vez unidas, se procedió a restar de la Hoja Arica las zonas cubiertas por la unión de las cartas de mayor escala. Para esto se utilizó el geoproceso *Erase (Analysis Tools/Overlay/Erase)*. Finalmente, ambas capas vectoriales se unieron con el geoproceso *Merge* resultando una sola capa vectorial denominada “Litología compilado”.

El segundo paso tuvo por objetivo unificar y correlacionar las unidades que se encuentran en cartas adyacentes. Para ello se construyó una tabla de correlación de unidades litológicas que muestra una lista de todas las unidades presentes en la región, como se correlacionan entre ellas y en qué cartas están presentes. Para lograr un resultado más armónico, se definieron para algunos casos nuevos códigos y se agruparon varias unidades en una nueva, principalmente los intrusivos. Todos estos cambios y definiciones de código y agrupación de unidades se basaron en la edad de cada unidad, por lo que su representación en la tabla se acompaña de la Carta Cronoestratigráfica.

Las principales dificultades que se encontraron durante la unificación de la litología y las soluciones que se les dio se detallan a continuación:

- Discontinuidad entre cartas geológicas: En este caso se dio continuidad siguiendo la imagen satelital base de ArcGIS y el modelo de sombras (*Hillshade*).
- Unidades divididas en varias subunidades: Las subdivisiones no se tomaron en consideración y se dejó el nombre principal de la unidad. Esto debido a que cada carta diferencia y nombra estas subunidades de manera distinta.

B.3 Estructuras

Para la elaboración del mapa temático de estructuras geológicas, se utilizaron las mismas cartas geológicas elaboradas por el Servicio Nacional de Geología y Minería, que fueron mencionadas en el capítulo anterior “Mapa litológico compilado”.

Al igual que con el mapa litológico compilado, primero se hizo una compilación de los datos mediante el software ArcGIS. Para esto se utilizó el geoproceto de unión vectorial *Merge (Data Management Tools/General/Merge)*, para unir las cartas a escala 1:100.000. Una vez unidas tales cartas, se procedió a restar de la Hoja Arica, las zonas cubiertas por la unión de las cartas de mayor escala. Para esto se utilizó el geoproceto *Erase (Analysis Tools/Overlay/Erase)*. Finalmente, ambas capas vectoriales se unieron con el geoproceto *Merge* resultando una sola capa vectorial denominada “Estructuras compilado”.

B.4 Mapa de alteración

Para elaborar el mapa de alteración, se realiza un procesamiento de imágenes de los satélites *Landsat 08* y *09*, las cuales se encuentran disponibles en el sitio web de *Earth Explorer* de USGS².

En particular, se utilizan imágenes de tipo *level 2*, las cuales ya están previamente procesadas por los algoritmos LEDAPS y LaSRC. La finalidad de aplicar estos algoritmos consiste en corregir la dispersión y los efectos de absorción relacionados a gases atmosféricos, aerosoles y vapor de agua, y de esa manera entregar datos de reflectancia de la superficie de la Tierra más confiables³.

Estas imágenes se filtran por fechas (entre 01 de enero de 2023 y el 10 de julio de 2023) y según porcentaje de nubosidad (menor al 5%).

A partir de la búsqueda antes mencionada, se seleccionan 3 imágenes, las cuales cubren completamente el área de estudio:

Identificador imagen satelital	Fecha de obtención
ID: LC08_L2SP_002072_20230406_20230412_02_T1	06/04/2023
LC08_L2SP_002073_20230406_20230412_02_T1	06/04/2023
LC09_L2SP_001073_20230423_20230425_02_T1	23/04/2023

² Disponible en <https://earthexplorer.usgs.gov/> (visitado el 11/07/2023)

³ Fuente: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products> (visitado el 11/07/2023)

En la Tabla 21 se presentan las bandas, longitudes de onda y resoluciones con que cuentan las imágenes satelitales seleccionadas.

Tabla 21 Detalle de las bandas de imágenes satelitales, sus longitudes de onda y resoluciones.

Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Band 1 - Coastal aerosol	0.43-0.45	30
Band 2 - Blue	0.45-0.51	30
Band 3 - Green	0.53-0.59	30
Band 4 - Red	0.64-0.67	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85-0.88	30
Band 6 - SWIR 1	1.57-1.65	30
Band 7 - SWIR 2	2.11-2.29	30
Band 8 - Panchromatic	0.50-0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36-1.38	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.6-11.19	100
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50-12.51	100

Fuente: Elaboración propia a partir de la información de bandas de Landsat 08 y 09, en la página web <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>

Para detectar la presencia de minerales de alteración, se utiliza la relación numérica entre las bandas 6 y 7 (B6/B7). De acuerdo con los trabajos de El-Desoky, *et al.* (2022), Beiranvand y Hashim (2014), Kaufmann (1988) y Sultan, *et al.* (1987), esta relación entre bandas detecta la presencia de minerales de alteración (arcillas), carbonatos y sulfatos (Fig. 113).

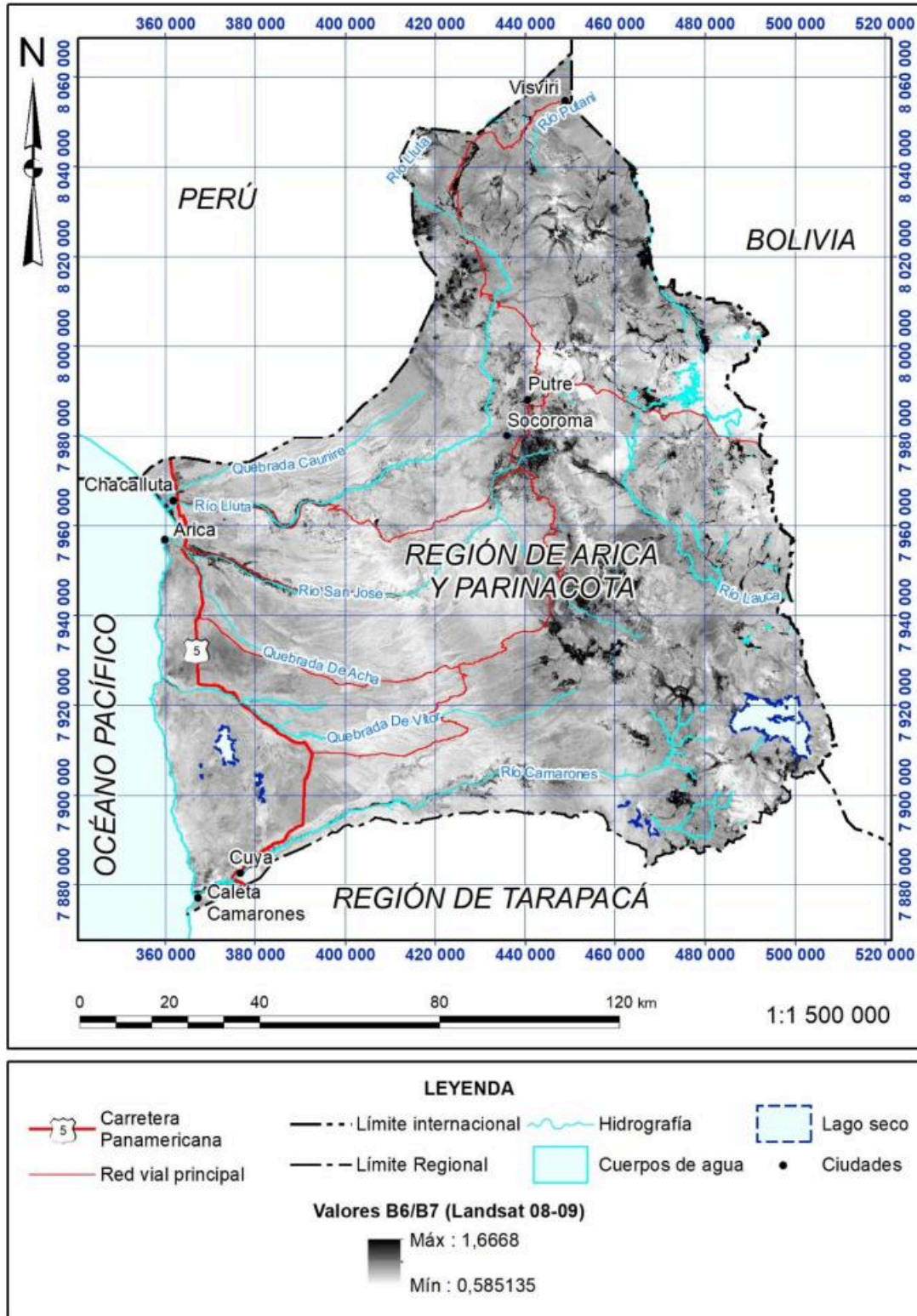


Fig. 113 Valores de la razón B6/B7 obtenidos a partir de imágenes satelitales Landsat 08-09.

Posteriormente se reclasifican los valores obtenidos, de manera tal que los mayores valores de la relación B6/B7 cumplan con los siguientes dos criterios:

1. Que coincidan suficientemente bien con las zonas/áreas de alteración ya cartografiadas previamente por el Servicio Nacional de Geología y Minería, presentes en las *geodatabase* de las cartas geológicas 1:100.000.
2. Que coincidan suficientemente bien con las zonas/áreas de alteración detectadas visualmente a partir de imágenes satelitales de *Google Earth*.

Este procedimiento de ensayo y error muestra que ambos criterios se cumplen para valores $B6/B7 > 1,15$. En consecuencia, se elabora un ráster binario donde las celdas “0” indican valores $B6/B7 < 1,15$, y “1” para valores $B6/B7 > 1,15$.

En la práctica, las celdas “1” pueden revelar tres tipos de escenarios distintos:

1. Minerales de alteración hidrotermal presentes en las **laderas de los cerros**.
2. Minerales de alteración hidrotermal que se han transportado desde los cerros hacia las llanuras circundantes.
3. Minerales carbonatados o sulfatados presentes en las llanuras de salares.

De estos tres escenarios, el primero favorece directamente la ocurrencia (generación) de remociones en masa, ya que indica sectores donde el material (suelo o roca) se ve debilitada su resistencia a las fuerzas que lo desestabilizan. El segundo escenario indica sectores donde los procesos de arrastre (principalmente flujos de barro y/o detritos) han transportado el material (previamente alterado), lo que puede ser un dato para dimensionar los alcances de los flujos, pero no para detectar zonas de generación de remociones. Y el tercer escenario pareciera no ser indicativo de procesos de remociones en masa, ya que se asocia principalmente a llanuras de salares.

Debido a lo expuesto en el párrafo anterior, se hace necesario individualizar las áreas correspondientes al primer caso (minerales de alteración en laderas de cerros). Para ello, se realiza un cruce entre el resultado obtenido y las unidades geológicas de rocas consolidadas, de modo de seleccionar solo aquellas zonas/áreas de alteración que pertenezcan a laderas de cerros (Fig. 114). De esta manera, se descartan todas las áreas que pertenecen a depósitos aluviales (escenario 2) y llanuras de salares (escenario 3).

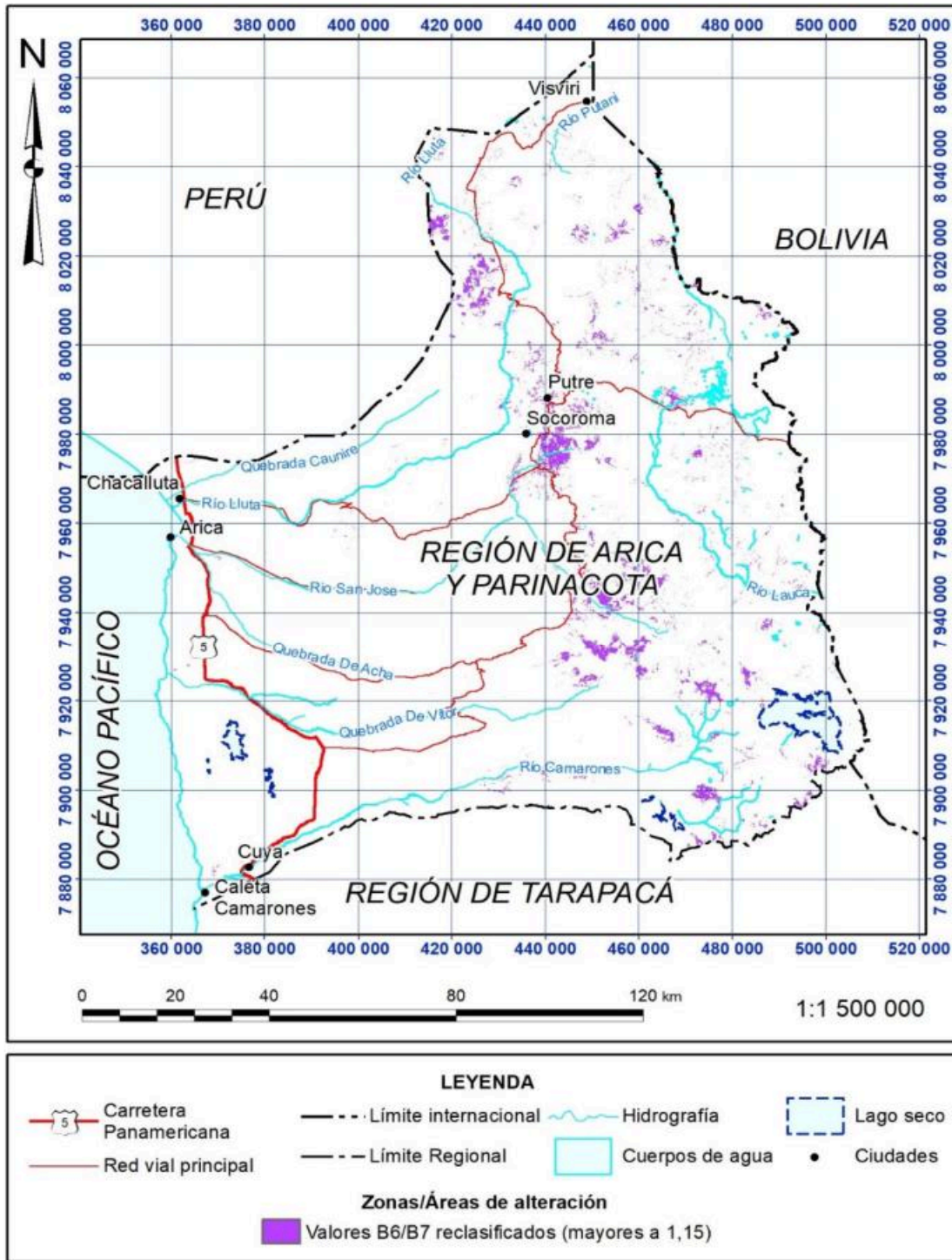


Fig. 114 Zonas/áreas de alteración obtenidas a partir de la razón B6/B7, en laderas de cerros.



Finalmente, se incorporan las zonas de alteración definidas en las *geodatabase* de las cartas geológicas 1:100.000 del Servicio Nacional de Geología y Minería. Dichas zonas aumentan en un 44% el área total obtenida a partir del procedimiento anterior, y están identificadas como “alteración hidrotermal indiferenciada”.

En la Fig. 115 se presenta el mapa de alteración, en el cual se diferencian aquellas zonas/áreas de alteración obtenidas a partir de imágenes satelitales (color rojo de fondo), de aquellas obtenidas a partir de las *geodatabase* de las cartas geológicas 1:100.000 del Servicio Nacional de Geología y Minería (color negro superficial).

La presencia de alteración fue contrastada en terreno especialmente en la zona de la Cordillera Occidental y Precordillera, en la que se reconoce una intensa alteración en zonas donde concentran, en su mayoría, flujos (Fig. 116). Los sedimentos alterados son arrastrados por laderas y quebradas hacia zonas de menor altura en la región, aportando coloración a las rocas, suelos y cuerpos de agua. Ejemplos de lo anterior corresponde a la zona de la laguna Caritaya o el entorno a Estancia Gutiérrez en la cuenca de Camarones, el sector de Suriplaza o la ladera más septentrional del volcán Tacora. En la Fig. 116 se reconoce laderas densamente alteradas donde concentra diversos depósitos de flujos.

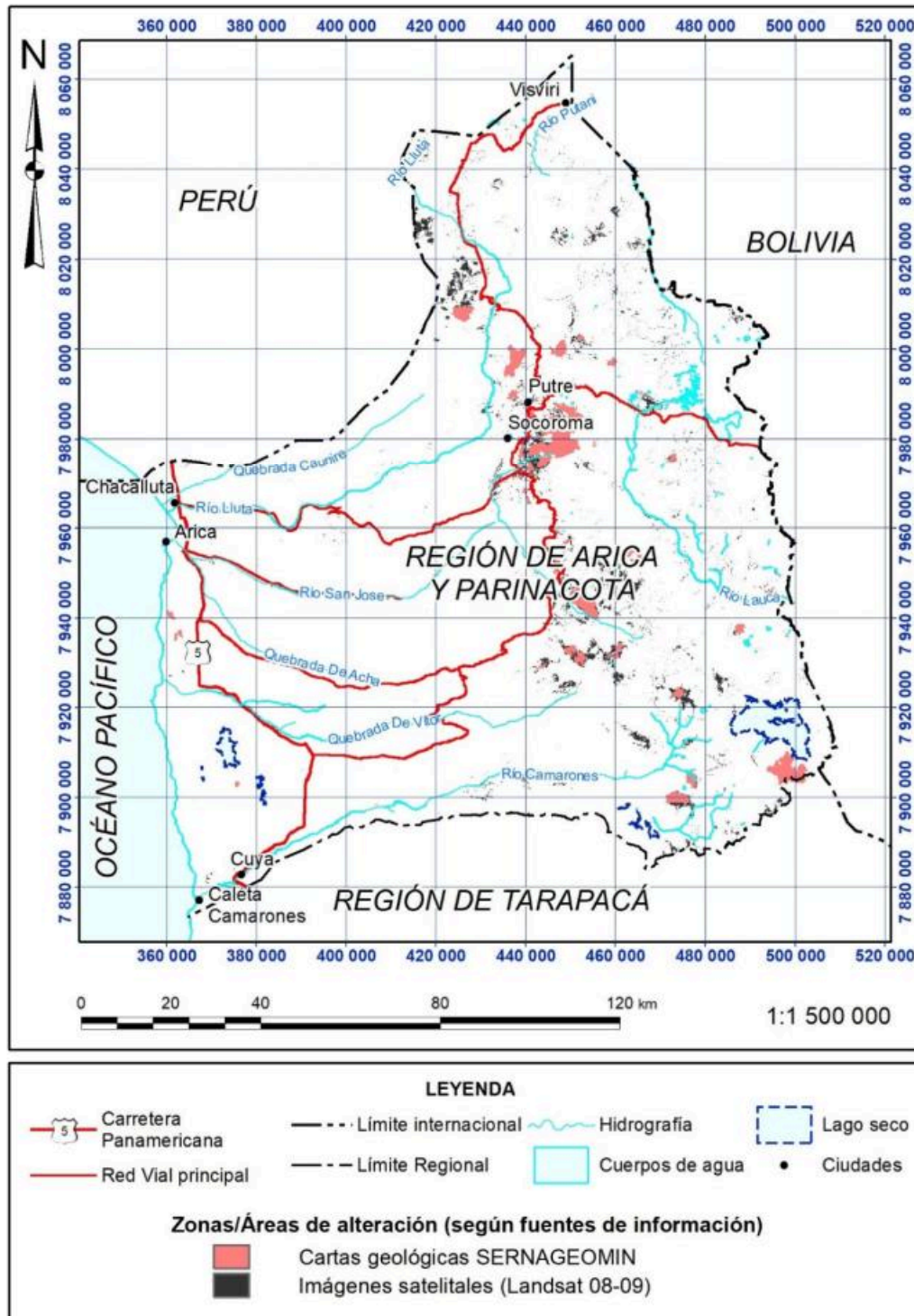


Fig. 115 Mapa de alteración. Se indica en color rojo y negro la fuente de información

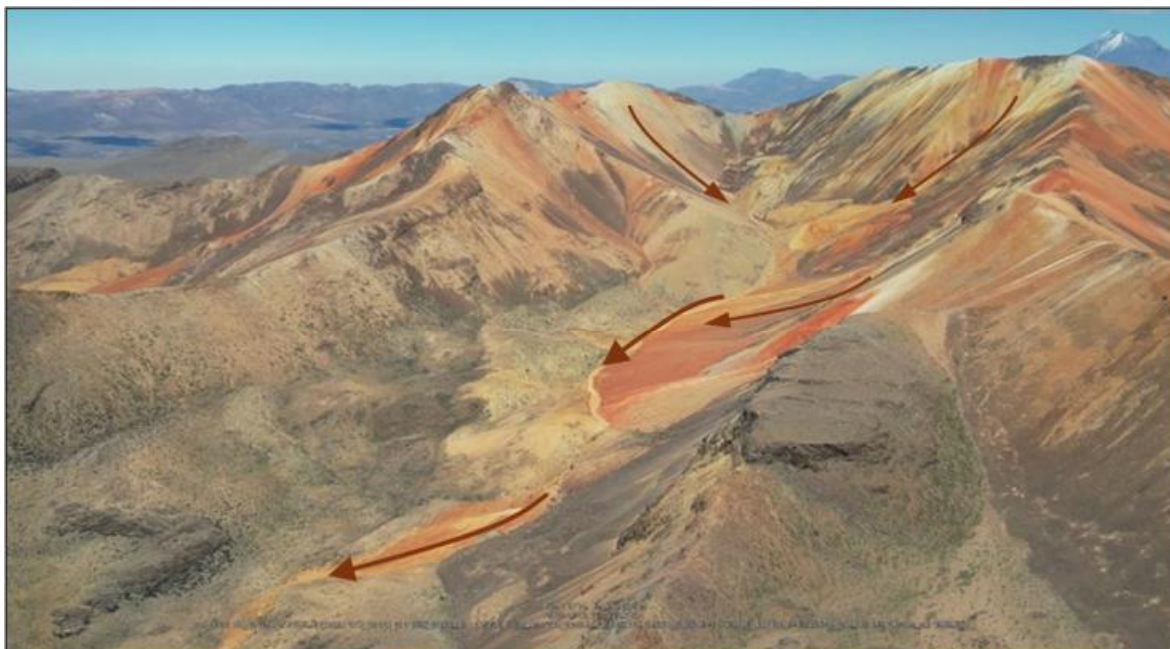


Fig. 116 Evidencia de alteración y desarrollo de flujos (flechas cafés) que descienden de laderas y destacan en el paisaje. Sector Suriplaza, comuna de General Lagos (coordenadas 448225E;8025926S). Archivo de terreno.

B.5 Peligro volcánico – Lahares

Para la inclusión de los lahares en los mapas temáticos, se realizó una revisión de los mapas de peligros volcánicos elaborados por el Servicio Nacional de Geología y Minería para la región de Arica y Parinacota. Esta revisión permitió identificar zonas de alto peligro de lahares. Es importante señalar que en que en los mapas no se individualiza este fenómeno respecto de otros peligros volcánicos, como coladas de lava o flujos/oleadas piroclásticas.

A continuación, se detallan los insumos utilizados:

- Clavero (2007), Peligros del Complejo Volcánico Tarapacá, región de Arica y Parinacota, escala 1:50.000.
- Jorquera, *et al.* (2019), Peligros del Volcán Guallatiri, región de Arica y Parinacota, escala 1:50.000.
- Amigo, *et al.* (2012), Peligros Volcánicos de la Zona Norte de Chile, Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, escala 1:3.000.000.
- Berlin, L.; Jara, G.; Toloza, V. (2022), Peligro del volcán Parinacota, región de Arica y Parinacota, escala 1:50.000

En la Fig. 117 se muestra el mapa temático correspondiente.

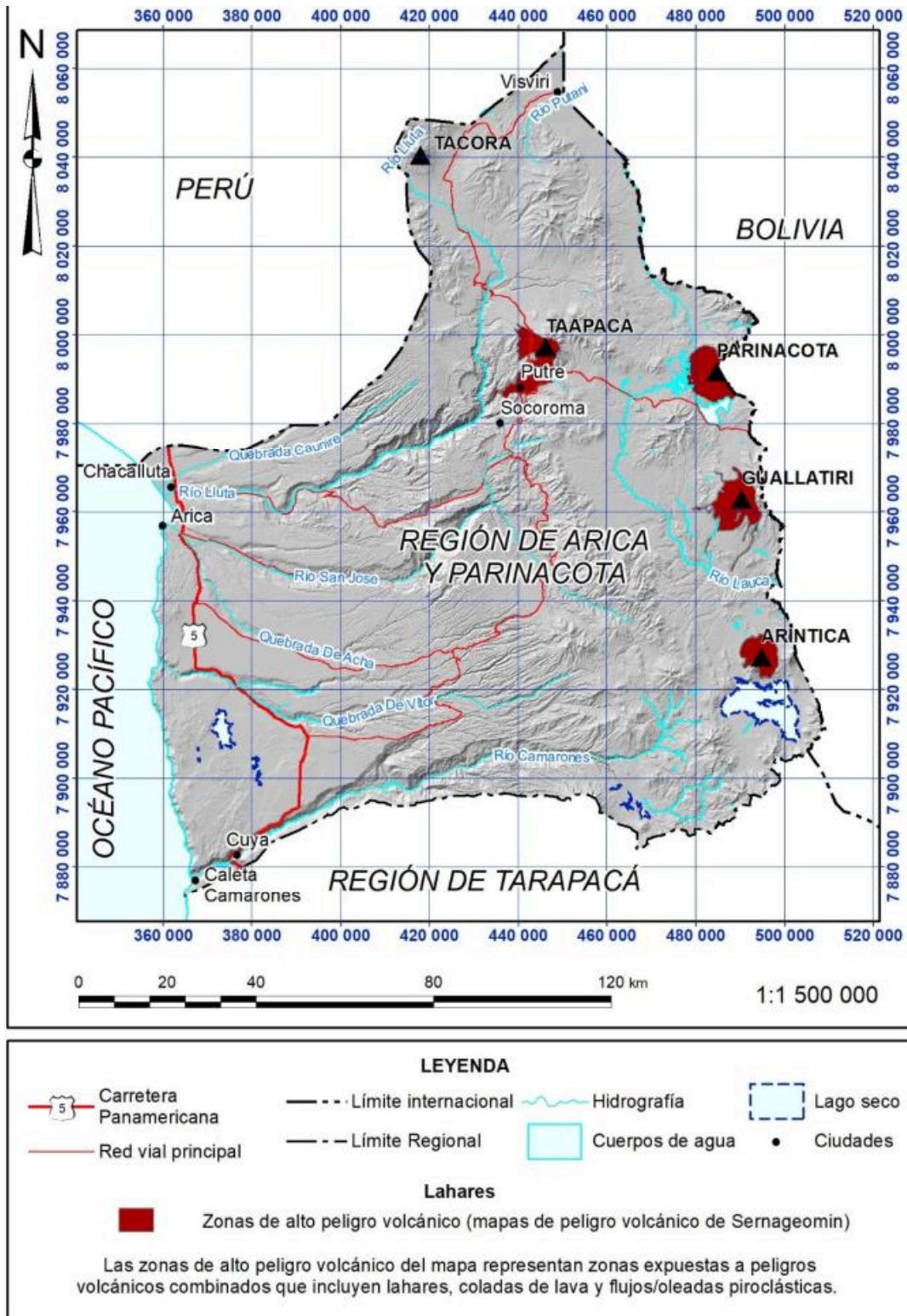


Fig. 117 Mapa de peligro de lahares.

B.6 Mapas derivados del DEM

B.6.1 Modelo digital de elevación (DEM)

Se utilizó como modelo digital de elevación la versión corregida (FABDEM) el Copernicus GLOBAL 30 DEM, el cual se encuentra disponible en una grilla de 1 grado de arco a escala mundial. El modelo FABDEM (*Forest And Buildings Removed Copernicus DEM*), corresponde a la versión mejorada del error vertical en las áreas construidas y de vegetación, elementos que limitan la utilización para aplicaciones que precisan modelos de terreno con mayor grado de detalle. Dicho modelo es puesto a disposición por Hawker *et al.* (2022), se aplica un algoritmo de corrección a partir de un set de datos de referencia para 12 países, que cubren un amplio rango de zonas climáticas y extensiones urbanas. El error vertical medio absoluto es reducido en áreas construidas de 1,61 a 1,12 m y en áreas de vegetación de 5,15 a 2,88 m. Se descargan todas las cuadrículas comprendidas entre los 10º y los 20º Latitud y los 60º y 80º Longitud, de esa manera pudiendo asegurar cubrir la extensión completa de la región y las áreas colindantes al momento de realizar el cálculo completo de las unidades de cuencas hidrográficas.

En la Fig. 118 se presenta el Modelo de Elevación Digital (DEM).

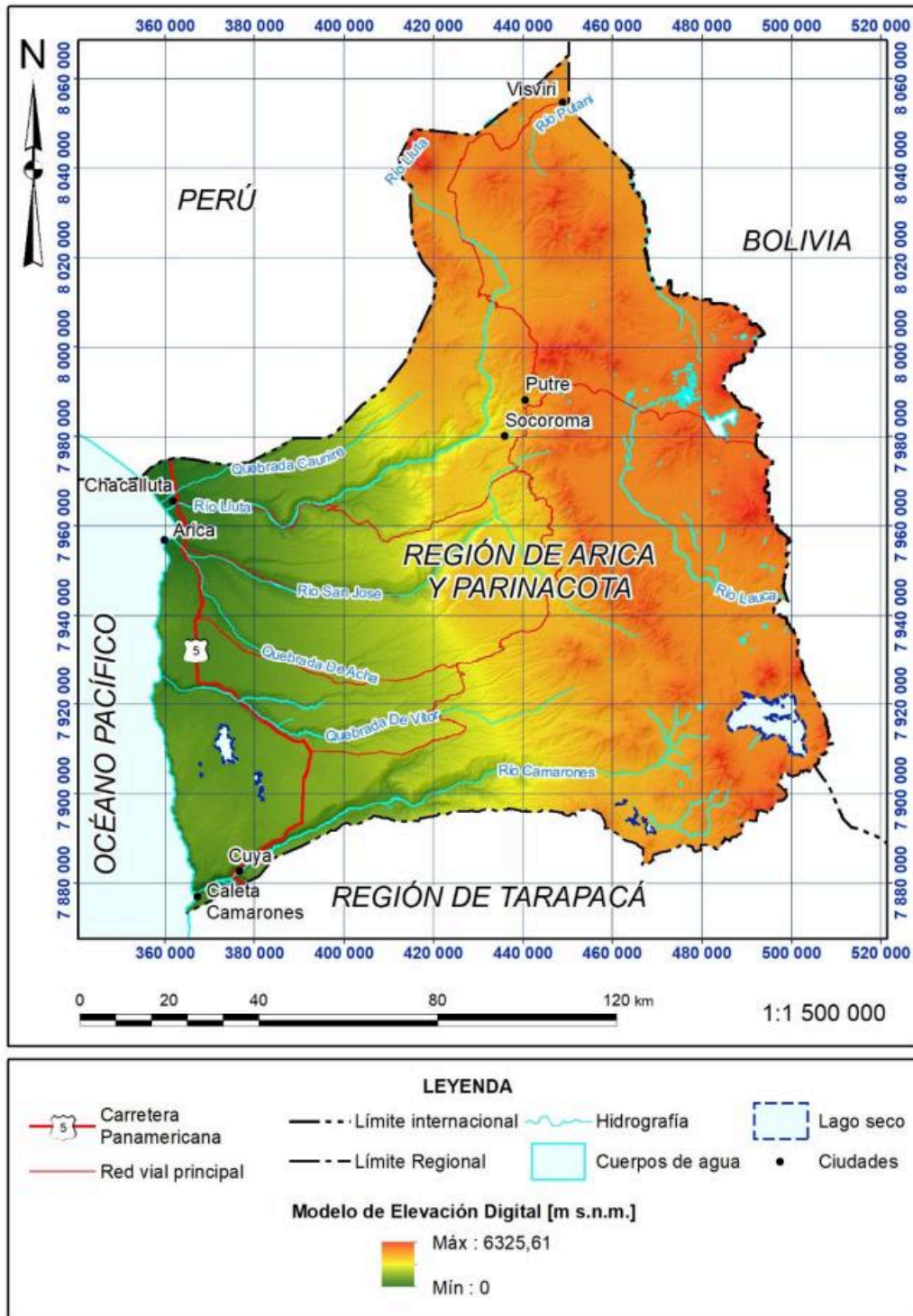


Fig. 118 Modelo digital de elevación.

B.6.2 Modelo de aspecto (*Aspect*)

El aspecto se puede definir como la exposición del relieve respecto al medio circundante. La orientación del terreno es clave en procesos morfológicos y en la existencia o ausencia de algún tipo de vegetación, y por consecuencia, puede influir en la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

El modelo de exposición de ladera se generó a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) Copernicus con una resolución espacial de 30 m por píxel. Se utilizó la herramienta de ArcMap *Spatial Analyst Tools/Surface/Aspect* para generar este modelo. Los valores de la salida del aspecto varían en un rango de -1 a 360°, donde -1, corresponde a los terrenos planos y los valores entre 0 y 360° son el valor del ángulo de exposición de cada píxel con respecto al norte.

En la Fig. 119 se presenta el Modelo de aspecto. Como se muestra en la figura, se especifica los valores comprendidos por cada rango. Además, se muestran laderas de las profundas y extensas quebradas de la región orientadas este-oeste, tienen una distinta exposición de sus laderas al norte o al sur.

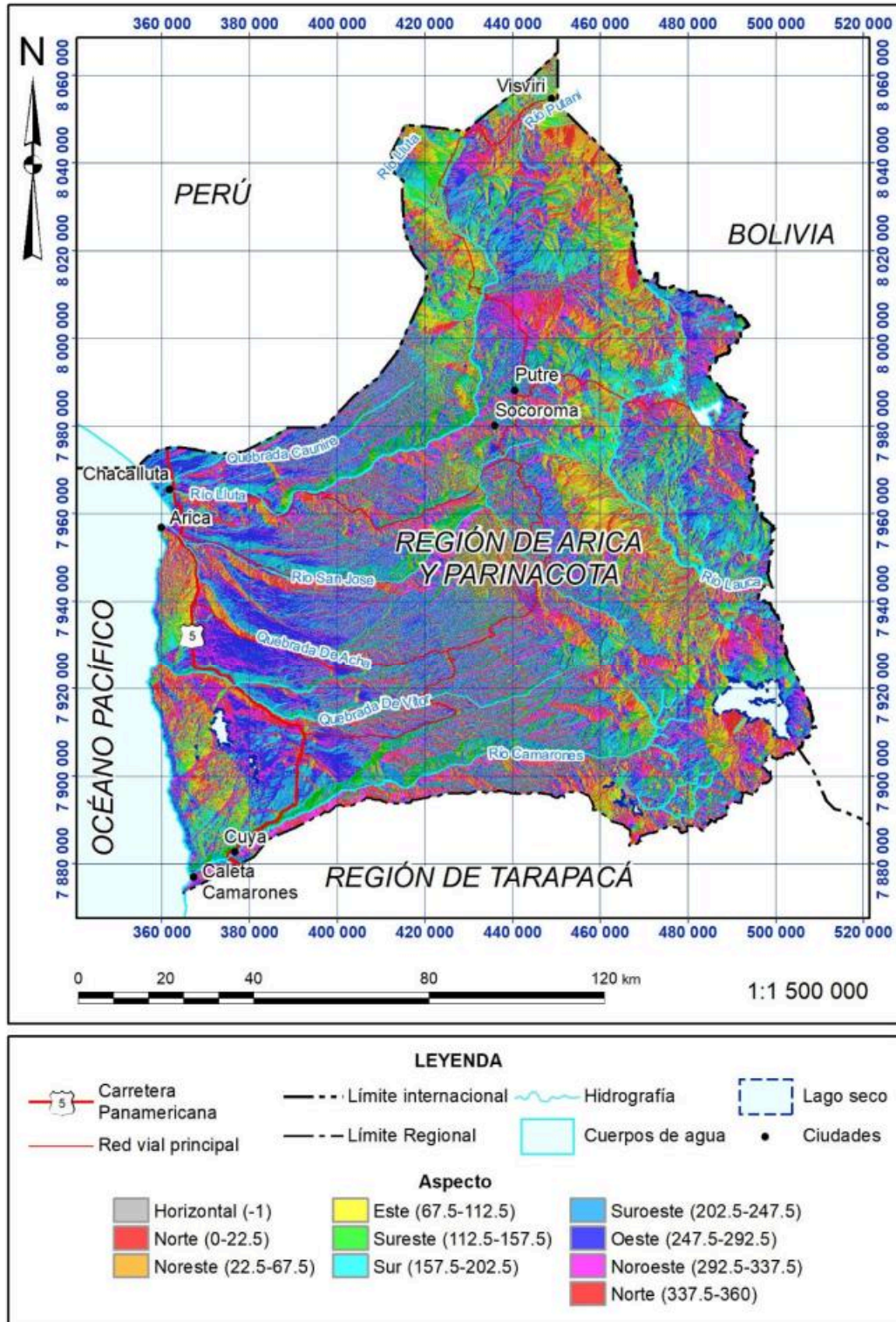


Fig. 119 Modelo de aspecto.

B.6.3 Mapa de pendiente (Slope)

El modelo de pendientes representa la tasa de cambio de elevación para cada celda del Modelo de Elevación Digital (DEM). La herramienta Pendiente (*Slope*) identifica la inclinación en cada celda de una superficie de ráster, el valor de pendiente de este plano se calcula mediante la técnica de promedio máximo (Burrough & McDonell, 1998). Por un lado, mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno; por otro lado, mientras más alto sea el valor de la pendiente, más inclinado será el terreno. Se calculó a través de la herramienta de ArcMap *Spatial Analyst Tools/Surface/Slope*. El rango de valores de la salida de pendiente en grados es de 0 a 90°.

El cálculo de pendiente usa el siguiente algoritmo:

$$\text{slope_degrees} = \text{ATAN} \left(\sqrt{([\text{dz}/\text{dx}]^2 + [\text{dz}/\text{dy}]^2)} \right) * 57.29578$$

Donde el valor: 57,29578 es una aproximación a 180/pi.

En la Fig. 120 se muestra el mapa de pendiente. Como se aprecia en la figura, las zonas con mayor pendiente en la región se ubican en el Acantilado Costero y en las laderas de las profundas quebradas con orientación este-oeste (Quebradas del piedemonte). Asimismo, se reconocen pendientes elevadas en zonas de la Cordillera de la Costa, la Precordillera y en la Cordillera Occidental (especialmente en centros volcánicos). Por otro lado, se identifican extensas áreas de bajas pendientes (más bien planas) como en la Depresión Central, el Altiplano y en las Llanuras fluvioaluviales en el fondo de las quebradas.

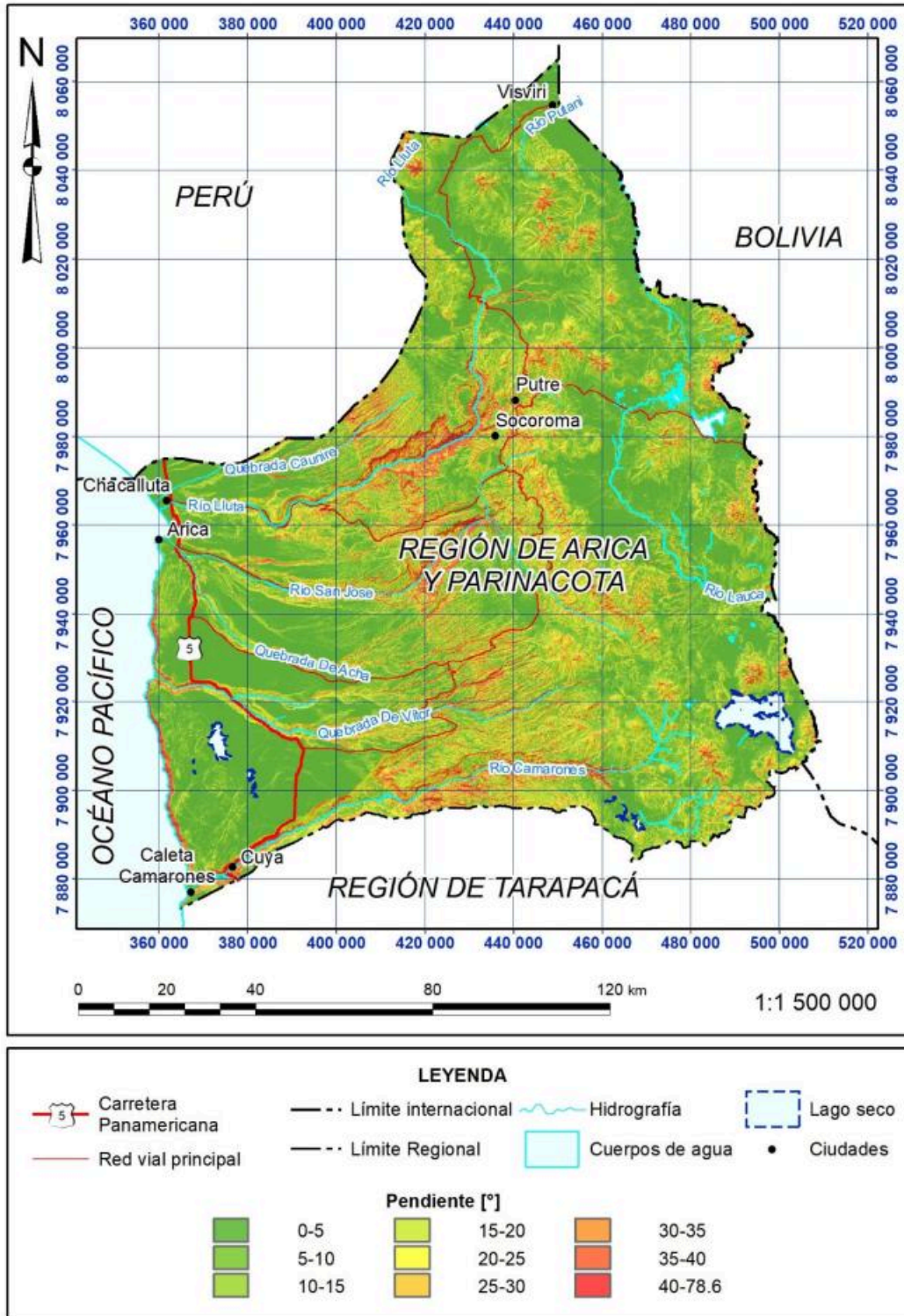


Fig. 120 Mapa de pendientes (slope).

Las observaciones realizadas durante las diversas campañas de terreno han revelado que las pendientes desempeñan un rol preponderante, tanto en la ocurrencia como en el alcance de caída de rocas y/o deslizamientos. Por ejemplo, se han identificado depósitos de caídas en las laderas de los valles, como en el valle de Azapa, donde dichas caídas se han ocasionado daños significativos, como es la rotura de la carpeta asfáltica en la ruta A-23 del río San José (Fig. 121). Del mismo modo, en el sector de las Cuevas de Anzota, ubicada entre el mar y el Acantilado Costero, es frecuentemente afectada por caída de rocas (Fig. 122).

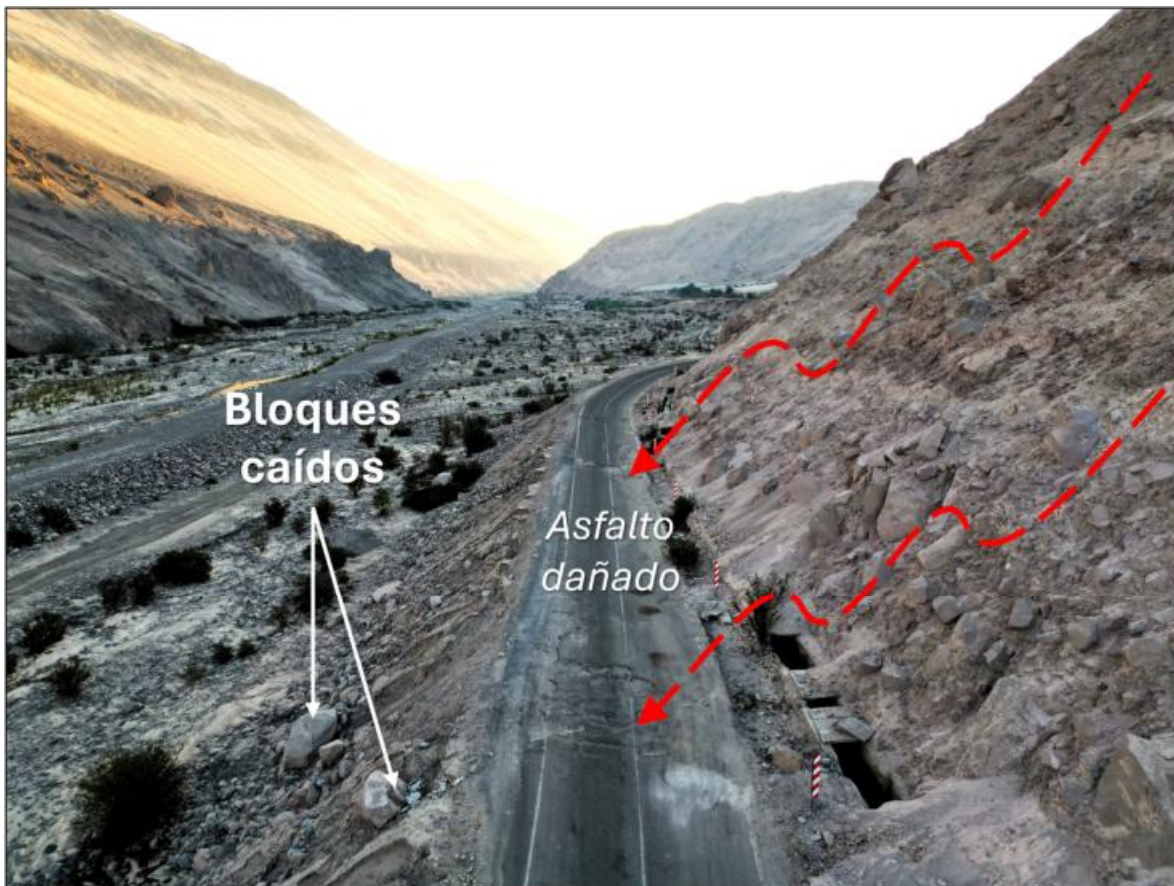


Fig. 121 Caída de rocas que afecta tramo de la ruta A-23 (coordenadas 404825E;7945112S). Bloques provienen de laderas de alta pendiente (flechas rojas esquematizan caídas de roca). Archivo de terreno.



Fig. 122 Altas pendientes del Acantilado Costero que genera caída de rocas (flechas rojas). Sector sur Cuevas de Anzota (coordenadas 359357E;7947958S). Archivo de terreno. Mapa de relieve de sombreado (Hillshade)

El modelo de relieve sombreado representa el contraste de luminosidad sobre las laderas del terreno y se deriva a partir del DEM a través de la herramienta de ArcMap *Spatial Analyst Tools/Surface/HillShade*. El modelo utilizado para estudio usó valores de 315° y 45° de azimut luz para su generación.

En la Fig. 123 se presenta el mapa de relieve sombreado. Este modelo es muy útil para identificar formas en el relieve que sean indicadoras de ocurrencia de remociones en masa, ya sea por cicatrices en zonas de generación, zonas con deformación o depósitos.

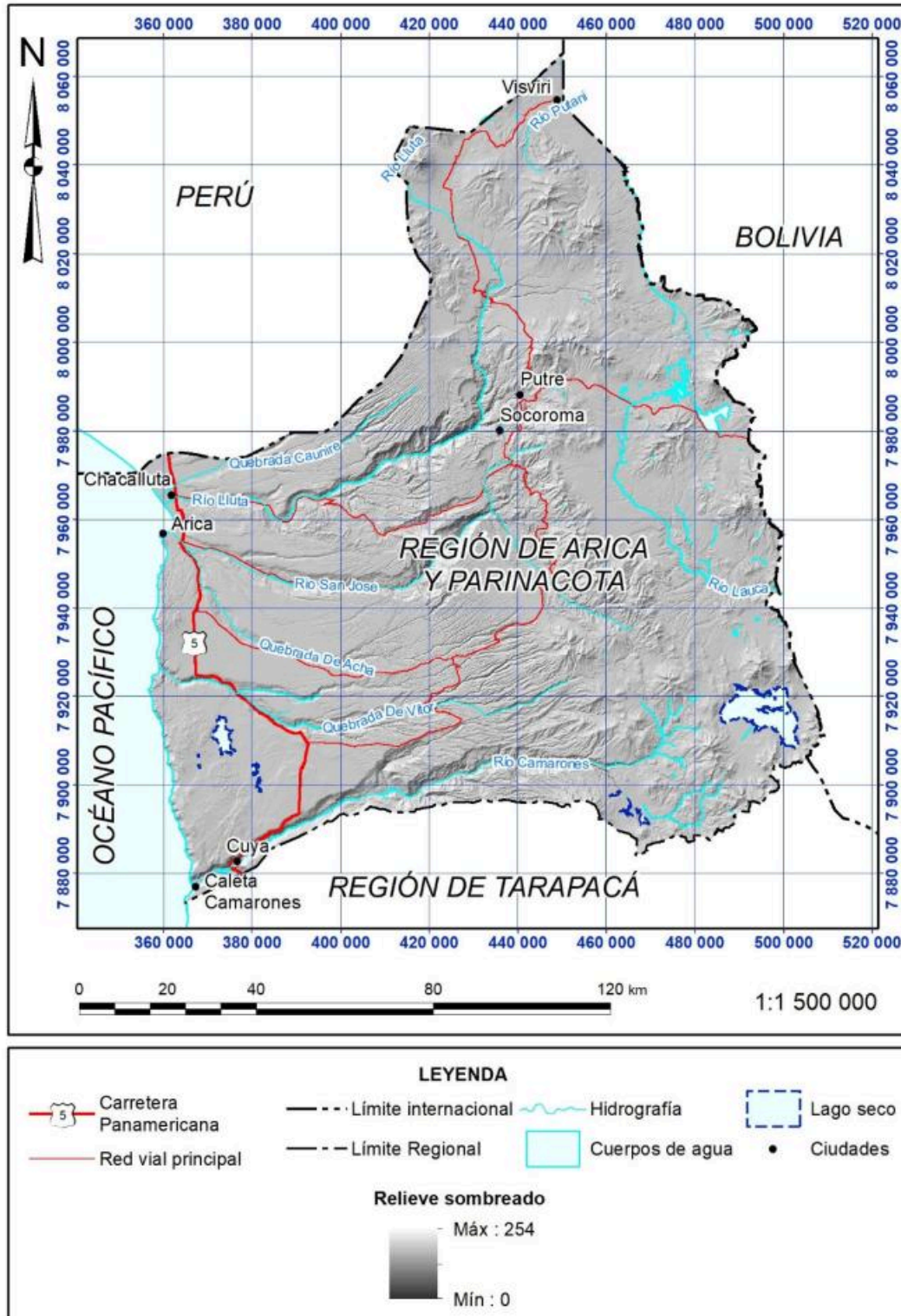


Fig. 123 Mapa de relieve de sombreado (hillshade).

B.6.4 Factor LS (longitud e inclinación de pendiente)

El factor LS es un índice diseñado inicialmente para predecir niveles de erosión en secciones rectas con pendiente. Corresponde a una de las cinco componentes de los modelos de evaluación indirecta de pérdida de suelos USLE (Wischmeier & Smith, 1978) y RUSLE (Renard, 1997).

Para predecir la erosión promedio a largo plazo en pendientes uniformes, la ecuación más utilizada es la USLE, conocida por su simplicidad y robustez (Wischmeier & Smith, 1978).

En los modelos mencionados, el factor LS representa las variables relacionadas con la morfología del terreno. La ecuación integra la inclinación de la pendiente (S), el cual se considera uno de los componentes determinantes para iniciar el movimiento de un flujo, y la longitud (L), que condiciona el volumen de agua que fluye en una ladera determinada (Lobo-Luján, 2013).

En principio los subfactores L y S se incluyeron en la siguiente ecuación (Desmet & Grovers, 1995; Velásquez, 2008; Alvarado-Anampa, et al., 2021):

$$LS = \left[\left(\frac{\lambda}{72,6} \right)^M * (65,41 * \sin^2 A + 4,56 * \sin \alpha + 0,065) \right]$$

En la ecuación anterior, A corresponde a la longitud de la pendiente en pies, α al ángulo de la pendiente y M al parámetro resultante de la pendiente en grados β como se muestra en la siguiente ecuación:

$$m = \left[\frac{\beta}{1 + \beta} \right]$$

Para el desarrollo del presente estudio, el factor LS se calculó partir del mosaico del FABDEM (*Forest And Buildings removed Copernicus DEM*, con cobertura global de 30 metros, GLO-30), mediante el módulo *Terrain Analysis/Hydrology/Topographic Indices/LS Factor*.

Para calcular el Factor LS, se debe conocer el área pendiente arriba que contribuye a cada celda y la pendiente de cada una de estas. En el algoritmo se considera el área aportante como la celda central en una sub matriz de 3x3, en donde el área de la celda central es dividida por todas las celdas vecinas cuesta abajo (pendiente abajo) de la celda central. La parte recibida por cada celda cuesta abajo es proporcional al producto de la caída ponderada por distancia y el factor geométrico de peso.

Cabe destacar que los algoritmos de flujo simple, que definen la ruta de cursos de agua en topografías complejas, no logran identificar accidentes topográficos menores, y esto puede resultar en una imprecisa localización de algunas líneas de drenaje.

Por la forma en que se calcula este parámetro, el resultado muestra la acumulación de flujos, de manera que representa las zonas de generación y alcance.

En cuanto a la distribución de los valores que se obtienen para el valor LS, se pueden relacionar con la morfología del terreno, representada por las unidades geomorfológicas.

Así, las zonas llanas, asociadas a la Cordillera de la Costa, Llanuras de la Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera, Quebradas de piedemonte, Cordillera Principal y Altiplano, tienen valores generalmente bajos. Los cauces que se encuentran en estas zonas tienen valores más altos, pero el paso desde zonas de escurrimiento hacia zonas que los rodean está marcado por un cambio muy abrupto del factor LS.

Se identificó una situación particular que ocurre en la parte baja de la Depresión Central. Varios cauces, que nacen principalmente en la parte alta de la Depresión Central y la Precordillera, dejan de tener el carácter confinado, formando abanicos aluviales con zonas de escurrimiento más dispersas, de manera que las zonas con valor del factor LS alto son más anchas.

Una diferencia entre la vertiente oriental (Cordillera Principal y Altiplano) y la occidental (Precordillera, Quebradas de piedemonte y Depresión Central) que se observa a partir de la distribución espacial del factor LS es que en la primera zona los cauces tienden a converger antes de llegar a zonas más bajas, mientras que en la segunda el escurrimiento tiene un carácter más paralelo.

En las zonas de laderas relativamente cortas, pero muy pronunciadas, como las que se encuentran en el Acantilado Costero y en las Quebradas de piedemonte, el valor del factor LS es muy variable, con los máximos asociados a zonas donde las condiciones morfológicas favorecen la concentración de las caídas o flujos o donde se reciben quebradas provenientes desde otros lugares (cauces más largos).

Por último, en los Valles se encuentran valores muy altos del factor LS, relacionado con la acumulación de flujos en ellos.

En la Fig. 124 se presenta el mapa con los resultados del Factor LS.

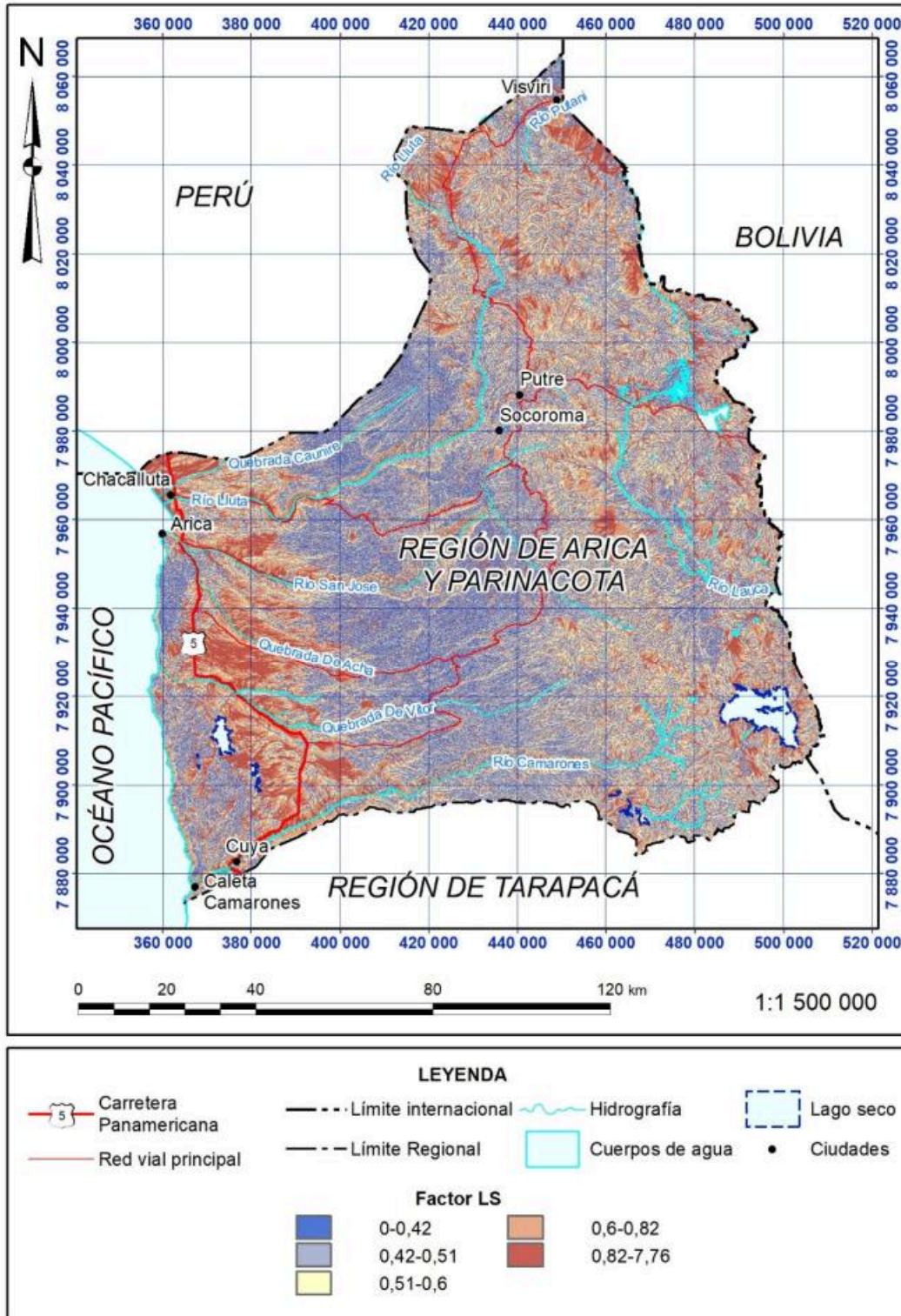


Fig. 124 Factor LS.

B.6.5 Modelo de cuencas

Para la construcción del modelo de cuencas, se utilizó como base el Modelo Digital de Terreno FABDEM *Copernicus*. Se empleó la metodología sugerida por Alfaro *et al.* (2018), en donde se construyó el modelo de cuencas para la región a partir del procesamiento del DEM en las herramientas *Hydrology (Spatial Analyst, ArcMap)* y el módulo *ArchHydro (Spatial Analyst, ArcGis)*.

El modelo de cuencas y subcuencas hidrográficas fue desarrollado con el software ArcGis y la extensión hidrológica *ArchHydroTools*, desarrollada por el Centro de Investigaciones en recursos de agua de la Universidad de Texas, Austin. Para efectos metodológicos, la delimitación de cuencas se basó en el trabajo de (León Muñoz, *et al.*, 2017), el cual utiliza como fuente, el manual – *ArchHydroTools*- versión 2.0 desarrollado por ESRI en 2011.

Para la delimitación de las cuencas, se identifican los valores negativos y/o que representan sumideros, relacionados a cuencas de drenaje de tipo endorreico. De este modo se busca representar correctamente el comportamiento del drenaje en el área; el modelo de procesamiento por defecto establece que todas las unidades deben desembocar en el mar (establece una regularidad de cuencas exorreicas), por lo que la corrección de los valores de sumideros busca representar aquellas cuencas que desembocan en las mismas unidades o cuencas aledañas, en sectores interiores. Una vez identificados estos píxeles con valores negativos, correspondientes a sumideros o puntos de drenaje interior, se realiza el preprocesamiento del Modelo mediante la herramienta “*Fill*”, la cual elimina posibles imperfecciones originadas por valores negativos que no correspondan a los antes mencionados. Posteriormente se aplican los siguientes procesos: *Flow Direction* (Dirección de flujo), *Flow Accumulation* (Flujo acumulado), modelo condicional de red hidrográfica basada en condicionante matemático de umbrales máximos y mínimos de sumideros (Hidrografía, vértices hidrográficos y clasificación de jerarquía de drenajes según el orden propuesto por (Strahler, 1957) citado en (Mesa, 2018) (SNIT, 2015). El valor de k utilizado para la generación de la red de drenaje y el modelo de cuencas fue de 3 (log).

Mediante la herramienta *Hydrology* se genera la delimitación de las cuencas costeras de la región, para el caso de las cuencas interiores, estas se derivan de la aplicación del módulo *ArchHydro*. Una vez obtenido el modelo de salida de cuencas hidrográficas, se realizaron correcciones manuales para afinar límites de quebradas y cursos hídricos, tanto para cuencas costeras como altiplánicas.

El modelo de cuencas fue revisado y contrastado con el modelo de relieve de la región y la red de drenaje y se realizó la corrección topológica de las unidades para la eliminación de inconsistencias.

A la estructura original de esta cobertura en la *geodatabase*, se agregó la columna “ID_Cuenca”, para identificar de manera temporal a cada subcuenca a través de un ID único.

En la Fig. 125 se presenta el resultado del modelo de cuencas.



Fig. 125 Modelo de cuencas.

Los resultados obtenidos, se contrastaron con el inventario de cuencas y subcuencas de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (MOP), en su informe del año 2014 (Tapia, 2014). El modelo realizado entrega mayor nivel de detalle en la subdivisión. La cuenca de la Quebrada de la Concordia se subdivide en 4 subcuencas, todas ellas exorreicas, existiendo una principal en la región de Arica y Parinacota, dos menores, y la desembocadura de una subcuenca al norte. La cuenca el río Lluta se subdivide en tres subcuencas. Una principal exorreica en la zona del valle y desembocadura, y dos subcuencas alimentadoras de la anterior hacia la zona de la Precordillera. Dentro de las cuencas Altiplánicas, se reconocen 5 subcuencas, todas ellas endorreicas y alimentadoras de las principales quebradas de la región. En el caso de las cuencas del río San José y las cuencas Costeras Río. San José – Quebrada Camarones, se reconocen subcuencas (todas exorreicas) además de subcuencas en el acantilado costero. La cuenca del río Camarones, se subdivide en cuencas costeras exorreicas, y cuencas interiores endorreicas.

B.6.6 Razón de Melton

Corresponde a un índice simple de acumulación de flujo, calculado como la diferencia entre la altura máxima y la altura mínima en un área aportante, dividido por la raíz cuadrada de la superficie de dicha unidad. Definida por Melton (1957), esta fórmula se asocia a la capacidad de una subcuenca para generar flujos. Este factor se relaciona con la rugosidad, como una aproximación a la inestabilidad de una subcuenca (Bovis & Jakob, 1999), poniendo énfasis en que subcuencas altamente disectadas son más propensas a generar flujos de detritos durante eventos climáticos extremos. Si bien el factor originalmente es planteado a escala de cuenca, hoy en día es posible la aplicación de herramientas de SIG para su cálculo aplicando el mismo principio, pero a escala de píxel. El cálculo del factor a escala de píxel provee valores con una mayor resolución que si se calculan a escala de cuenca, viéndose representada la variabilidad de elevaciones en las distintas ubicaciones. Asimismo, es posible obtener las particularidades locales del paisaje, la cual puede ser importante para las ciertas aplicaciones a escalas de mayor detalle. El análisis a escala de cuenca tiende a simplificar el relieve y las particularidades que dentro de las unidades se presenta. Junto a lo anterior, es posible establecer que en la región se obtiene una amplia variabilidad con respecto a los tamaños de las cuencas, por lo que dichos valores tienden a sesgar el resultado del factor (a mayor superficie de la cuenca, se establece que debería haber una mayor superficie drenada).

A partir de lo anterior, se realiza el proceso de cálculo de la razón de Melton a escala de píxel, mediante el uso de la herramienta *Terrain Analysis/Hydrology/Topographic Indices/Melton Ruggedness Number*, del software SAGA GIS. El Número de Rugosidad de Melton (MNR) es un índice simple de relación de acumulación de flujo, calculado como la diferencia entre la elevación máxima y la elevación mínima de un área de acumulación,



dividido por la raíz cuadrada de la superficie del área de acumulación. El cálculo se realiza para cada píxel de la grilla, en donde la elevación mínima será la de la posición de la celda.

Dentro de la región los menores valores se concentran sobre la Depresión Central y el Altiplano, sectores con pendientes bajas y con quebradas poco desarrolladas, donde se considera poca rugosidad del paisaje con una baja propensión de generación de flujos.

Por otro lado, los mayores valores de Razón de Melton se concentran en las quebradas del piedemonte y sectores representados por cuerpos volcánicos de la Cordillera Principal. Estos valores se relacionan con zonas de valles profundos y laderas incisas de volcanes. Las principales quebradas que presentan altos valores de esta relación son Río Camarones, Quebrada de Vítor, Quebrada de Acha, Río San José y Río Lluta, cuyos valores más elevados se encuentran, en su mayoría, en las laderas orientadas hacia el Sur. Esto ocurre con mayor frecuencia en la sección occidental de la Precordillera. En la Fig. 126 se presenta el mapa con los resultados de la Razón de Melton.

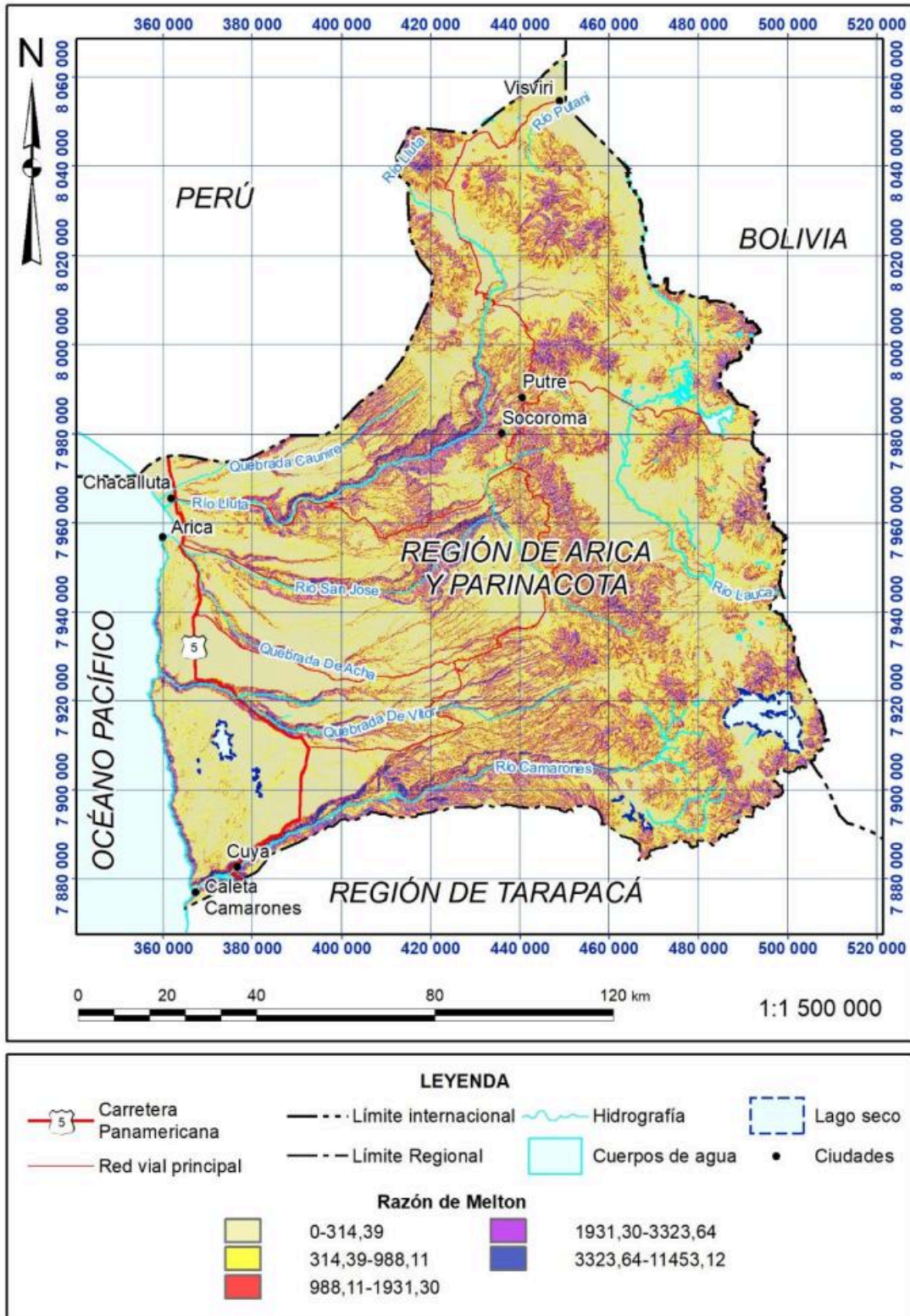


Fig. 126 Razón de Melton.



ANÁLISIS DE PELIGRO
DE REMOCIÓN EN MASA
Informe Final



ANEXO C CORRELACIÓN UNIDADES LITOLÓGICAS

En la carpeta “Anexo C Correlación_unidades_litológicas” se encuentra en digital el documento Excel “AnexoB_Correlación_unidades_litológicas.xlsx”, donde se presenta la correlación de unidades litológicas realizada para este estudio a partir de las cartas geológicas de la región de Arica y Parinacota.

ANEXO D Datos digitales, cartografías temáticas y catastro.

En forma adjunta a este documento se entregan como anexos digitales 3 bases de datos y 2 carpetas que contienen proyectos ArcMap:

Carpetas contenidas:

- **Figuras informes** Corresponden a todos los archivos MXD correspondientes a las figuras incluidas en el informe.
- **Vi-Cart.** Corresponden a todos los proyectos MXD de los Mapas 1 a 5 del FNDR Arica y Parinacota.

Bases de datos:

- **Catastro_RM_Arica.gdb**
- **Complementos_FNDR_Arica.gdb**
- **FNDR_PG_Arica.gdb**

A continuación, se detalla lo incluido en cada una de las bases de datos:

- **Catastro_RM_Arica.gdb**

Tipo de archivo	Nombre	Capas contenidas Descripción
Feature Dataset	Catastro_RM_PG	PG_RM_CATALOGO. Catastro puntual de remociones en masa región Arica y Parinacota. PG_RM_CATALOGO_P. Catastro poligonal de remociones en masa región Arica y Parinacota.

- **Complementos_FNDR_Arica.gdb**

La gdb contiene los elementos que componen las figuras complementarias para la construcción de los MXD contenidos en la carpeta Vi-Cart, correspondientes a los siguientes Dataframe: Chile Mapa de Ubicación, Antártica Mapa de Ubicación, Mapa de ubicación, Trabajos anteriores, Fuente y Valor de la Información, Viñeta.

- FNRD_PG_Arica.gdb

Tipo de archivo	Nombre	Capas contenidas Descripción
Feature Dataset	Base_Topografia_TO	Corresponde a la base topográfica IGM entregada por la contraparte para el área de la Región de Arica y Parinacota.
Feature Dataset	ElementosCartograficos	Anotaciones, Alteración, Crioclastia, CuencasBNA, Escarpes_Morro_y_alrededores, Estructuras_geologicas_Morro_y_alrededores, InventarioGlaciaresDGA, MD_MAPA_P, MD_MAPA_P1, MD_MAPA_P_2, Modelo_geologico_geotecnico_Morro_y_alrededores, Océano, Países_vecinos, PeligroAltoVolcanico, Recomendaciones_Morro_1_1000, Susceptibilidad_FL, Toponimia_Morro_y_alrededores, TracksTerreno_XTERRAE, Unidades_susceptibilidad_IS_Morro_y_alrededores, UsoSuelo, Volcanes, Zona_seguridad_costanera, Zonas_criticas, Zonas_criticas_Morro_1_1000.
Feature Dataset	Peligro_Remocion_Masa	PG_AREA_PROYECTO, PG_CLIMA_L, PG_CLIMA_P, PG_CUENCA_L, PG_CUENCA_P, PG_DRENAJE_L, PG_FALLA_L, PG_GEOMORFOLOGIA_L, PG_GEOMORFOLOGIA_P, PG_HIDRO_L, PG_SINTESIS GEO_L, PG_SINTESIS_GEO_P
Raster	Alteraciones. Capa ráster correspondiente a mapa temático de alteraciones.	

Raster	Arica_ortofotomosaico. Capa ráster correspondiente a ortofotomosaico generado a partir de levantamiento con dron para el área del Morro y alrededores.
Raster	Aspecto. Capa ráster correspondiente a mapa temático de aspecto.
Raster	B6b7_values. Análisis de bandas para cálculo de alteraciones de rocas. B6b7_x_rocas. Análisis de bandas para cálculo de alteraciones de rocas, por rocas.
Raster	Curvatura. Capa ráster correspondiente a mapa temático de curvatura.
Raster	Curvatura_perfil. Capa ráster correspondiente a mapa temático de curvatura de perfil.
Raster	Curvatura_plana. Capa ráster correspondiente a mapa temático de curvatura plana.
Raster	FABDEM. Capa ráster correspondiente a DEM FABDEM Copernicus para la región de Arica y Parinacota.
Raster	FC_CD_Fallas. Factor condicionante “Estructuras” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.
Raster	FC_CD_Geomorfología. Factor condicionante “Geomorfología” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.
Raster	FC_CD_Litología. Factor condicionante “Litología” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.
Raster	FC_CD_Pendiente. Factor condicionante “Pendiente” para susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.
Raster	FC_FL_Alteracion. Factor condicionante “Alteración” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	FC_FL_FactorLS. Factor condicionante “FactorLS” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	FC_FL_Geomorfologia. Factor condicionante “Geomorfología” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.

Raster	FC_FL_Litologia. Factor condicionante “Litología” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	FC_FL_Pendiente. Factor condicionante “Pendiente” para susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	Hillshade. Capa ráster correspondiente a mapa temático de sombreado de relieve / hillshade.
Raster	LSFactor_Moore. Capa ráster correspondiente a mapa temático de Factor LS.
Raster	Melton_pixel. Capa ráster correspondiente a mapa temático de Razón de Melton calculado a escala de píxel.
Raster	Pendiente. Capa ráster correspondiente a mapa temático de pendientes.
Raster	Susceptibilidad_CD. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos.
Raster	Susceptibilidad_CD_reclass. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por caídas y deslizamientos, reclasificado en “Baja”, “Moderada”, “Alta” y “Muy Alta”.
Raster	Susceptibilidad_FL. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por flujos.
Raster	Susceptibilidad_FL_reclass. Resultado de susceptibilidad de remociones en masa por flujos, reclasificado en “Baja”, “Moderada”, “Alta” y “Muy Alta”.

- Las coberturas se encuentran cargadas en archivos ArcGis 10.5 que llevan el nombre del mapa temático respectivo para facilitar su lectura y resguardar las simbologías (Estructura_GBD_Proyecto\Figuras informe).

ANEXO E GLOSARIO

Abanico aluvial: material detrítico depositado en forma de abanico por una corriente acuosa, debido al cambio de pendiente de un torrente o cercano a su nivel base. También se les conoce como “cono aluvial”.

Abrupto: término usado en geología y geomorfología para describir fuertes desniveles de terreno, sobre todo en acantilados (Dávila, 1995).

Acantilado costero: farellón orientado hacia el mar a lo largo de una línea de costa empinada, formado por la erosión de las olas en su base y por procesos gravitacionales (Tarbuck & Lutgens, 2005). También se le denomina farellón costero.

Activo/a: término utilizado en varias disciplinas de la geología para describir el nivel de movimiento o actividad en el tiempo de un elemento o proceso. Particularmente, el grado de actividad se asocia a la expectativa de que el elemento o proceso lo seguirá haciendo en el presente o futuro. Ej. falla activa; volcán activo; remoción en masa activa.

Acumulación: proceso mediante el cual se realiza la deposición de los materiales transportados por los agentes de erosión o cualquier otro medio (Dávila, 1995).

Afloramiento: exposición limitada de rocas o depósitos geológicos en la superficie terrestre.

Agrietamiento: formación de grietas causada por esfuerzos de tensión o de compresión sobre masas de suelo o roca, asfaltos y pavimentos, o por desecación de materiales arcillosos (PMA, 2007).

Aguas meteóricas: denominación utilizada para referirse al modelo general de las aguas pluviales o de precipitación (Dávila, 1995), excluyendo otras fuentes como magmáticas, termales.

Aguas subterráneas: agua que se encuentra en el subsuelo, ocupando los espacios porosos o fracturas de las rocas y/o suelos.

Alteración: proceso de modificación de los minerales que componen las rocas y los suelos que ocurre por acción de agentes como el agua, el sol, el agua y fluidos químicamente activos, ya sea en superficie o en rocas bajo la corteza a mayores profundidades.

Altitud: altura de la superficie terrestre medida con respecto al nivel del mar.

Altura: distancia vertical que existe entre dos puntos de la superficie terrestre y que no hace referencia al nivel del mar. En el estudio se utiliza para describir dimensiones de laderas, cortes de taludes y dimensiones de remociones en masa.

Aluvial: génesis de la forma de un terreno o depósito de material debida a la acción de las corrientes naturales de agua (PMA, 2007).

Aluvi3n: flujo muy rápido a extremadamente rápido (Cruden y Varnes (1996) en Brantt *et al.* (2021)) que contiene agua y sedimentos de variado tama1o, composici3n y origen. Un aluvi3n fluye a lo largo de un canal o cauce y se caracteriza por una notoria e inusualmente alta descarga m1xima, lo que se traduce en una mayor energ1a de impacto y, por ende, en un alto poder destructivo (Mu1oz, et al., 2018).

An1lisis de estabilidad: proceso en el que se evalúa cuantitativamente la interacci3n entre las fuerzas (o momentos) estabilizantes o resistentes y las fuerzas (o momentos) desestabilizantes o movilizantes que actúan sobre un volumen de material sobre una superficie (por ejemplo, una masa de roca sobre una ladera). A partir de esto, se establecen las condiciones de estabilidad actual o hipot3tica de la masa a analizar. Usualmente esta condici3n de estabilidad se expresa en t3rminos de un Factor de Seguridad (FS, entendido como el cociente entre las fuerzas estabilizantes y desestabilizadoras). Los valores de $FS > 1.0$ se asocian a condiciones de estabilidad; $FS < 1.0$ se asocian a condiciones de inestabilidad. Para valores de FS cercanos a 1.0 define la condici3n de equilibrio l1mite.

An1lisis cualitativo: proceso en que se evalúa una condici3n o situaci3n bas1ndose en la experiencia de las/los investigadores en los escenarios estudiados (<http://www.ujaen.es/>) o an1lisis de car1cter no cuantificable.

An1lisis cuantitativo: proceso de an1lisis que utiliza herramientas matem1ticas, estad1sticas y el modelamiento de variables para evaluar distintos escenarios.

1ngulo de reposo: se denomina así al 1ngulo m1ximo de un talud de un material granular que se deposita por ca1da libre medido con respecto a la horizontal, o cuando este ha alcanzado un estado de equilibrio despu3s de sufrir alg1n desplazamiento (PMA, 2007).

Arcillas: suelo para ingenier1a con tama1o de part1culas menores a 2 micras (0,002 mm) que contienen minerales arcillosos. Las arcillas y suelos arcillosos se caracterizan por presentar cohesi3n y plasticidad. En este tipo de suelos es muy importante el efecto del agua sobre su comportamiento geomec1nico (PMA, 2007).

Avalancha: movimiento en masa tipo flujo, muy rápido a extremadamente rápido, que se caracteriza porque el material se desplaza libremente ladera abajo, es decir que normalmente no se canaliza a lo largo, por ejemplo, del cauce de un río (Hungar, *et al.* (2001) en PMA (2007)). Se diferencian varios tipos de avalancha según el tipo de material (avalancha de detritos; avalancha de roca; avalancha de nieve). Para detalles ver el contenido del informe.

Batolito: afloramiento de rocas ígneas intrusivas o plutónicas cuyo diámetro supera los 100 km de largo y 20 km de ancho (Dávila, 1995).

Bloque: término relacionado con la granulometría de suelos para referirse a partículas de suelo con diámetro mayor a 300 mm. En mecánica de rocas se refiere a una porción de masa rocosa limitada por discontinuidades (PMA, 2007). En este caso se toma en cuenta el tamaño, forma y disposición de los bloques. Para la descripción de los bloques se utilizan términos geométricos como masivo, cúbico, tabular, columnar, irregular y triturado según la clasificación del ISRM, 1981.

Bofedales: humedales tipo turberas que se reconocen en zonas de los Andes entre los 3.200 y 5.000 m.s.n.m. (www.pucv.cl).

Buzamiento: ángulo con respecto a la horizontal que forma una línea o recta de máxima pendiente contenida en un plano. Varía de 0° a 90°.

Cabecera: área o región topográficamente elevada donde se encuentran las nacientes de las fuentes de aguas que dan origen a los cursos fluviales.

Caída: tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable (PMA, 2007).

Camanchaca: proviene de la palabra aimara “kamanchaka” que significa oscuridad. Hace referencia a un fenómeno meteorológico de nubosidad baja y espesa que ocurre en las costas del sur del Perú y norte de Chile.

Cárcava: surcos formados por el movimiento de las aguas pluviales sobre la superficie de las laderas. Presentan variadas formas y profundidad.

Cartografía: ciencia y arte que se ocupa de la representación gráfica de la superficie terrestre (Dávila, 2011). En el contexto del estudio es la unidad conformada por

profesionales geógrafos encargados de la generación de mapas temáticos, geodatabase y álgebra de mapas para susceptibilidad, con todas las revisiones topológicas correspondientes.

Catastro (o inventario) de remociones en masa: registro ordenado de la ubicación y características de los procesos de remoción en masa en un área determinada. Idealmente deben contener información respecto al tipo de remoción en masa, tamaño y/o volumen, fecha de ocurrencia o edad relativa, actividad y causas. Pueden registrar todos los eventos ocurridos en el pasado, o sólo en un lapso de él, o también proveer el registro de remociones en masa de un evento detonante específico (Arenas & Opazo, 2017).

Cicatriz: huellas del escarpe principal de un antiguo movimiento o remoción en masa.

Clima: conjunto de las condiciones atmosféricas características de una zona geográfica, como la temperatura, presión atmosférica, humedad del aire, vientos y precipitaciones (Oyarzún, 2009) medidas en un tiempo representativo (30 años).

Clasto: fragmento de roca con tamaño menor al de una grava gruesa (PMA, 2007).

Cohesión: resistencia al corte (de un suelo, roca o depósito compuesto por ambos) cuando el esfuerzo normal es cero y que expresa la fuerza por la cual las moléculas homogéneas de un cuerpo se adhieren unas con otras (PMA, 2007). Expresa el grado de adherencia de las partículas que componen el material. Su uso en el estudio hace referencia a materiales más o menos cohesivos.

Competente: término que hace referencia a rocas o macizo rocoso con alta resistencia o dureza (Pérez, et al., 2003). Rocas o materiales que pueden soportar grandes esfuerzos sin sufrir deformaciones (Dávila, 1995).

Contacto (litológico): es el límite que separa rocas o unidades litológicas de distinta naturaleza.

Consultora: empresa que desarrolla servicios profesionales con experiencia y mano de obra especializada en una o varias áreas del conocimiento, desarrollo, ciencia y tecnología.

Coordenadas: conjunto de valores que se utilizan para ubicar un punto en una superficie o en un volumen. Los valores representan una distancia, o a veces un ángulo, respecto de un punto que se define como el origen. Por ejemplo, en el caso de un plano cartesiano, las

coordenadas de un punto son un par de números, que representan la distancia respecto del origen, tanto en el eje X como en el eje Y.

Coordenada UTM: par de valores que se utilizan para ubicar un punto en la superficie terrestre. Cada valor representa la longitud lineal en metros a nivel del mar desde un punto de referencia. Las coordenadas UTM pertenecen a un sistema de coordenadas, donde se divide la superficie terrestre en distintas zonas, cada una de ellas contiene su propio origen, por tanto, para ubicar un punto en coordenadas UTM, además de conocer el par coordenado, se debe conocer la zona en la cual se ubica el punto.

Coordenada geográfica: par de valores que se utilizan para ubicar un punto en la superficie terrestre. Cada valor representa un ángulo, los cuales se miden considerando como origen el centro de la Tierra, estos ángulos son la longitud, que representa el ángulo respecto de un meridiano origen, y la latitud, que representa el ángulo con respecto a la línea del Ecuador. Además, se utiliza un tercer valor para describir la altitud del punto, o distancia vertical respecto del nivel del mar.

Cordillera de la Costa: cadena montañosa ubicada entre el Océano Pacífico y la Depresión Central en Chile. En el caso de la región de Arica y Parinacota, nace en el cerro Camaraca, a unos pocos kilómetros al sur de Arica altitudes menores a 1.200 m s.n.m.

Cordillera de los Andes: cadena montañosa ubicada en el borde occidental de Sudamérica. Se reconoce por el norte en Venezuela y Colombia, como también en Ecuador, Perú, Bolivia, y por el sur en Chile y Argentina. Es el principal rasgo geomorfológico del territorio chileno.

Cordillera Occidental: unidad geomorfológica ubicada al oeste del altiplano, que incluye el arco volcánico y las sierras.

Cuenca hidrográfica: lugar geométrico de todos los puntos que drenan hacia una misma corriente (emisario o colector), y cuyo límite con otras anexas viene marcado por líneas imaginarias llamadas divisorias (Pedraza Gilsanz, 1996; Brantt, et al., 2021). Estas pueden ser exorreicas, es decir, que desaguan al mar, o endorreicas, las cuales desaguan a otro cuerpo de agua al interior del continente.

Deformación: modificación de forma o volumen que sufre una roca o material por acción de uno o más esfuerzos. Existen deformaciones plásticas y rígidas en función de las características y propiedades de los materiales. La deformación se traduce en la rotación, traslación y distorsión de las partículas que componen el material. En geología estructural la deformación en la corteza terrestres genera fallas y pliegues.

Densidad de drenaje: corresponde a la densidad de la red de drenaje representada como unidades de longitud (líneas) por unidad de área (superficie de cuenca). En este estudio, esta relación se calcula a nivel de píxel.

Deslizamiento: movimiento que ocurre 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, 2007).

DEM: siglas en inglés de *Digital Elevation Model* o Modelo de Elevación Digital. Es un modelo de la superficie representado como ráster, o matriz, construido con herramientas computacionales y que almacena datos de la elevación correspondiente a cada celda.

Depresión Central: nombre que recibe una de las unidades geomorfológicas de Chile, caracterizada por ser un terreno relativamente plano limitado al este y al oeste por las cordilleras. También se conoce como Depresión Intermedia.

Detrito: material suelto con estructura desordenada y de baja plasticidad originado por procesos de movimientos en masa (coluvios), meteorización (suelo residual), transporte glaciar (tilita, morrenas), volcanismo explosivo (depósitos piroclásticos), o desechos antrópicos con estructura granular desordenada tales como los estériles de minería. Los detritos también pueden contener una proporción significativa de material orgánico, incluyendo troncos y ramas de árboles o cualquier otra cubierta orgánica (Hungry *et al.* (2001) en PMA (2007).

Diaclasa: en inglés *joint*. Plano de discontinuidad en una masa rocosa a lo largo del cual no ha ocurrido desplazamiento tangencial relativo entre los bloques rocosos que lo conforman (PMA, 2007). Suelen ser frecuentes en el medio geológico y suelen presentarse en familias (*joint set*) con orientación similar. La combinación de *joint set* o sistemas de diaclasas puede generar bloques preformados de roca.

Discontinuidad: en geología estructural hace referencia a un plano de debilidad. Es cualquier plano de un macizo rocoso o de una masa de suelo que separa bloques de material más o menos intacto. Estos planos pueden ser de origen mecánico o sedimentario y se caracterizan porque su resistencia a la tracción es generalmente baja a nula. Entre ellos están los planos de estratificación, las diaclasas, las grietas, las microfallas, los planos de esquistosidad y las superficies de falla. La presencia de discontinuidades implica un comportamiento no continuo del macizo (PMA, 2007).

Dique (geología): cuerpo de roca ígnea intrusiva que se presenta forma tabular.

Distal: término utilizado para hacer referencia relativa a algo que está a mayor distancia de su origen o fuente.

Era geológica: período de tiempo geológico con una duración de varios millones de años, que da lugar a grandes divisiones (Dávila, 1995).

Escala: relación que existe entre las dimensiones representadas en un mapa y las dimensiones reales del terreno. Las escalas pueden ser numéricas o gráficas. Por ejemplo, una escala numérica 1:250.000 significa que 1 cm en el mapa equivale a 250.000 cm en la realidad.

Escarpe: fuerte desnivel en los terrenos que delimita dos o más superficies (Dávila, 1995). Según el PMA (2007), se refiere a superficies verticales o subverticales que se forman en macizos rocosos o de depósitos de suelo debido a procesos denudativos (erosión, movimientos en masa, socavación), o a la actividad tectónica.

Escorrentía: son todas las aguas que se encuentran en movimiento sobre la superficie terrestre, tales como ríos, arroyos, torrente, entre otras (Dávila, 1995).

Erosión: parte del proceso denudativo de la superficie terrestre que consiste en el arranque y movilización de material de suelo o roca por un agente natural como el agua, el viento y el hielo, o por el hombre. De acuerdo con el agente, la erosión se puede clasificar en eólica, fluvial, glacial, marina y pluvial. Por su aporte, de acuerdo con las formas dejadas en el terreno afectado se clasifica como erosión en surcos, erosión en cárcavas y erosión laminar (PMA, 2007).

Erosión diferencial: hace referencia al proceso de erosión sobre la superficie terrestre y que afecta de manera irregular o heterogénea a los materiales rocosos y sedimentos en función de sus propiedades resistentes y características geológicas, como litología, dureza, granulometría, porosidad, presencia de fracturas, entre otras y, que ocasiona un desgaste mayor en materiales de menor resistencia y un menor desgaste en materiales de mayor resistencia.

Estabilidad: se refiere a la capacidad de un cuerpo o material para mantener su equilibrio natural.

Estado: descripción que hace referencia al desplazamiento en el tiempo de un movimiento en masa. Se utilizan términos como activos, reactivados, suspendidos, latentes e inactivos. Para mayor detalle ver el contenido del informe.

Estratificación: superficies de separación de las capas de rocas sedimentarias. Los planos de sedimentación son más notorios cuando existen en la secuencia una intercalación de sedimentos de diferente granulometría o de diferente naturaleza mineralógica (Dávila, 2011).

Estrato: capa de roca compuesta por rocas sedimentarias, volcánicas o metamórficas.

Factor de catastro: cantidad de remociones en masa de cada unidad hidrográfica dividida en su área total en km² (Alfaro, et al., 2018; Brantt, et al., 2021).

Factor condicionante: agente que favorece una situación de potencial. En remociones en masa hace referencia a los agentes que participan o influyen en la inestabilidad de una unidad, masa rocosa o porción de tierra. Estos factores son inherentes al medio estudiado.

Factor detonante, desencadenante o gatillante: agente o estímulo externo que, tras su actividad, genera una respuesta directa e inmediata de una remoción en masa (PMA, 2007; Muñoz, et al., 2021). Estos factores pueden estudiarse con métodos estadísticos para establecer cualitativamente magnitudes características o período de retorno. El análisis de los factores desencadenantes es un paso necesario para realizar un estudio de amenaza.

Fallas: discontinuidades de la corteza terrestre, que se pueden presentar como planos, grietas o quiebres, en la cual los bloques en contacto sufren o han sufrido movimiento relativo de uno con respecto al otro. Existen fallas pequeñas (pocos centímetros o metros) hasta fallas a escala continental, asociadas al contacto de las placas tectónicas.

Fallas activas: falla geológica que ha presentado evidencias de actividad o movimiento durante el régimen tectónico actual (Sabaj, 2008). En ingeniería geológica se considera como activa aquella falla que ha presentado movimiento en el Holoceno (últimos 10.000 años de la historia geológica pasada). Se considera que una falla activa va a generar sismos en el futuro.

Fallas inversas: falla cuando el bloque basal baja con respecto al bloque colgante o el bloque colgante sube con respecto al bloque basal, o ambos bloques se desplazan en el sentido indicado. Las fallas inversas, generalmente son producto de los esfuerzos de compresión (Dávila, 2011).

Fallas normales: falla en que la roca situada por encima del plano de falla se ha movido hacia abajo, en relación con la roca situada por debajo (Tarbuck & Lutgens, 2005).



Fisiografía: geografía física, área de la geografía consagrada al estudio de la disposición de los mares y las tierras.

Flujo: 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. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (PMA, 2007).

Fluvial: son todos los fenómenos y procesos asociados a la dinámica y acción de aguas en cauces (ríos, esteros, arroyos, etc.).

Foliación: propiedad de las rocas metamórficas de presentarse con una estructura en forma laminar.

Fotointerpretación: análisis y estudio de fotografías aéreas e imágenes satelitales de un área con un objetivo específico (por ejemplo, la identificación de procesos o rasgos asociados a remociones en masa).

Geología: ciencia que estudia la Tierra, su forma y composición, y los cambios que ha experimentado y está experimentando (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Geomorfología: ciencia que estudia las formas del relieve terrestre teniendo en cuenta su origen, naturaleza de las rocas, el clima de la región y las diferentes fuerzas endógenas y exógenas que de modo general entran como factores constructores del paisaje (Dávila, 2011).

Geotecnia: parte de la geología aplicada que estudia las propiedades mecánicas de las rocas, de los sedimentos y de los suelos en los cuales se van a realizar obras de arquitectura o de ingeniería.

Georreferenciado (georreferenciación): proceso que permite determinar la posición de un elemento en un sistema de coordenadas espacial.

GDB: sigla que significa “geodatabase” y hace referencia a la estructura de datos nativa para ArcGIS y es el formato de datos principal que se utiliza para la edición y administración de datos (<https://desktop.arcgis.com/>).

Google Earth: plataforma de geomática basada en la nube que permite a los usuarios visualizar y analizar imágenes de satélite de nuestro planeta (www.google.com).

Guaneras: lugar dónde se acumula guano según los incas (o estiércol de ave). Hace referencia a yacimientos fósiles de rocas cubiertas con guano y cuya explotación fue masiva en el norte durante 1800. (Brüggen, 1939).

Hidrografía: estudio de las aguas y su distribución en la corteza terrestre (Dávila, 1995).

Hidrología: es la ciencia que estudia el comportamiento de las aguas y las leyes que rigen el comportamiento, como la permeabilidad, presión hidrostática, movimiento y circulación, así como propiedades físicas y químicas (Dávila, 1995).

Huaico: palabra proveniente del quechua *wayqu* que se utiliza en el norte de Chile y Perú para referirse a los aluviones o “corrimientos de tierra”.

Hundimiento: desplazamiento vertical brusco de una masa de suelo o roca por debajo del subsuelo (subsistencia). Pueden estar asociados a procesos de disolución de rocas carbonatadas, a la minería subterránea (Hauser, 2000) o a otros factores.

Ignimbrita: roca piroclástica ácida formada por la consolidación de cenizas volcánicas.

Imágenes satelitales: representación visual de un territorio específico, ya sea una ciudad, un país o un cuerpo celeste, basado en la absorción de luz en algún espectro determinado de ondas electromagnéticas que se utiliza para el análisis de los objetos levantados.

Inestabilidad: lo opuesto a estabilidad. Es la incapacidad de un cuerpo o material para mantener o recuperar ese equilibrio o estabilidad.

Invierno Altiplánico: fenómeno climático que ocurre entre los meses de diciembre y marzo y que se genera por la llegada de masas de aire cálido y húmedo desde la zona amazónica hacia la Cordillera de los Andes. Cuando las masas de aire ascienden por la Cordillera de los Andes, la reducción de la presión producto del ascenso disminuye la capacidad del aire para retener agua, lo que genera precipitaciones (lluvia, nieve, granizo). También se conoce como invierno boliviano.

Ladera: superficie natural inclinada de terreno (PMA, 2007).

Lahar: término de origen indonesio para designar movimientos en masa tipo flujo que corren por las laderas de un volcán. Pueden ser detonados por la actividad eruptiva de éste o por lluvias (PMA, 2007).

Landsat: satélites construidos y puestos en órbita por EE. UU. para la observación de la superficie terrestre con alta resolución. A partir de esta misión desarrollada desde los años

70s se cuenta con imágenes satelitales de diferente resolución y bandas espectrales, de acceso libre.

Latente: término que hace referencia al movimiento de una remoción en masa inactiva, pero en donde las causas o factores contribuyentes aún permanecen (PMA, 2007).

Limo: fragmentos o partículas de rocas y minerales cuyas dimensiones están comprendidas entre 0.02 y 0.002 mm.

Litología: término que hace referencia a distintos tipos de roca (distintos tipos litológicos) pertenecientes a alguno de los grupos mayores de rocas (ígneas, sedimentarias o metamórficas).

Macizo rocoso: en geología aplicada y mecánica de rocas hace referencia al conjunto formado por roca intacta, discontinuidades, alteración, meteorización, aguas subterráneas entre otros.

Manteo: ángulo máximo de inclinación de un plano que representa una estructura geológica (por ejemplo, una falla) medido con respecto a la horizontal. En geología se indica el ángulo (en grados) y la dirección de inclinación.

Mapa geológico: representación cartográfica de la información de los afloramientos de las rocas, su edad, las estructuras geológicas, los yacimientos minerales, los yacimientos petrolíferos, es decir, contiene toda la información geológica del área que cubre el mapa (Dávila, 2011).

Mapa de peligro volcánico: mapa que identifica una amenaza y áreas expuestas a los efectos de un evento volcánico o a los efectos directos o indirectos de los procesos posibles durante una erupción, y proponen una zonificación más simple e integrada. Un mapa es un aporte a la gestión de eventuales crisis (www.sernageomin.cl).

Mapeo: en geología hace referencia al levantamiento de datos e información en terreno mediante el trabajo de campo.

Margen convergente activo de placas tectónicas: región geográfica caracterizada por situarse sobre un contacto de placas tectónicas en que una placa se acerca a la otra generándose subducción (la placa más densa se introduce por debajo de la placa menos densa), ocasionando con este movimiento sismicidad.



Meteorización: descomposición y desagregación de materiales sobre la superficie terrestre producto de agentes atmosféricos (como cambios de temperatura) y fuerzas superficiales (como la gravedad). Afecta a rocas, suelos, sedimentos y materiales de origen antrópico (como materiales de construcción y cementos). La meteorización transforma los materiales rocosos en suelo.

Mitigación: aplacar o disminuir (RAE). En el contexto del estudio son las medidas o acciones para disminuir el efecto de las remociones en masa o medidas para reducir el riesgo.

Modelo de terreno base ALOS-PASAR: es un modelo digital de la superficie ofrecido por *Alaska Satellite Facility*.

Modelo de pendientes: modelo digital de la superficie terrestre que muestra la inclinación o ángulo de la superficie respecto al plano horizontal.

Modelo hidrológico: representación simplificada de un sistema real complejo, en el que se representa una o varias “cuencas” y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. Puede modelarse de manera matemática.

Monitoreo: actividad de medición sistemática de una condición. En ingeniería geológica es la medición del comportamiento del macizo rocoso, ladera, talud o condición particular mediante instrumentos instalados en una ladera y análisis de su comportamiento en términos de magnitud de desplazamientos, velocidad de desplazamiento, cambios de presión de poros y otras variables instrumentadas, con el objeto de establecer medidas preventivas, correctivas o de control (PMA, 2007).

Ordenamiento Territorial: proceso técnico-político que orienta la toma de decisiones para la organización y expresión espacial de una visión de desarrollo del país, permitiendo: la definición y orientación de la ocupación del territorio con su organización temporal y espacial; y la definición de un conjunto de reglas y orientaciones para compatibilizar la relación entre desarrollo económico, social y ambiental; junto con propiciar la articulación entre políticas, planes y programas (Decreto 469, Aprueba Política Nacional de Ordenamiento Territorial, Ministerio de Interior y Seguridad Pública, Subsecretaría del Interior 14/10/2019).

Peligro: capacidad intrínseca de una sustancia o potencialidad de una situación física para ocasionar daños a las personas, los bienes y al medioambiente (RAE). Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de cierta magnitud e intensidad en un lugar, área y tiempo determinado.

Peligro geológico: situación o proceso geológico que puede afectar a un territorio determinado, causando daños en su estructura física y social, es decir, que podría ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (UNISDR, 2009; Muñoz, et al., 2018). Considera la probabilidad de ocurrencia de un determinado fenómeno geológico en un área y tiempo determinado.

Peligro de remociones en masa: probabilidad de ocurrencia de un evento de remoción en masa, para cierto tipo, determinado volumen, alcance y/o intensidad en un periodo de tiempo dado. Para poder evaluar peligro es necesario contar con una estadística representativa de los eventos ocurridos en, o cerca, del área analizada.

Permeabilidad: capacidad que tiene de un material (roca, suelo, depósito u otro) para transmitir agua o fluidos. Depende del grado de interconexión entre poros, intersticios, fracturas o discontinuidades. También se conoce como conductividad hidráulica. Se expresa en unidades de velocidad.

Pillow lavas: rocas provenientes de lavas con forma de almohadillas.

Piroclasto: material expulsado en forma de fragmentos por un volcán (Oyarzún, 2009).

Plan Regulador Comunal: instrumento de planificación territorial normativo, confeccionado por la municipalidad respectiva, que regula el desarrollo físico de las áreas urbanas y de extensión urbana en Chile, según lo indicando por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

Planicie litoral: unidad geomorfológica que representa superficies planas labradas o erosionadas por acción oceánica.

Pliegue: estructura formada por capas geológicas en forma de arco, siguiendo la forma que representa una onda mecánica. Se producen por el efecto de presiones laterales sobre capas que se comportan de manera plástica (Oyarzún, 2009).

Polígono: en el contexto del estudio es un área o superficie del terreno delimitada virtualmente por líneas continuas, y que representa un área de afectación de una remoción en masa.

Porosidad: capacidad que tiene de un material (roca, suelo, depósito u otro) para almacenar agua o fluidos. Se calcula como la relación que existe entre el volumen de intersticios o poros y el volumen total del material expresada en %.

Procesos erosivos: fenómenos que desgastan y ponen en movimiento los materiales en superficie por acción de agentes externos, como el agua en escorrentía, acción del oleaje, viento, entre otros.

Procesos endógenos: conjunto de agentes, factores y fuerzas provenientes del interior del planeta Tierra, causados por la pérdida de calor interno del planeta y que dan origen a procesos como el movimiento de placas tectónicas, magmatismo, metamorfismo y deformación de la corteza terrestre.

Procesos exógenos: conjunto de agentes, factores y fuerzas externas que actúan sobre la superficie terrestre o cerca de ella, encargados de modificar el paisaje y dentro de los cuales se reconoce la meteorización, erosión y sedimentación. Estos procesos están alimentados, principalmente, por la irradiación de energía desde el Sol.

Puna: región altiplánica o meseta de alta montaña propia del área central de la Cordillera de Los Andes.

Quebrada: valle que puede ser estrecho y profundo formado por la erosión de escorrentías en la superficie (ej. valle fluvial).

Razón de Melton: diferencia entre la altura máxima y mínima de cada unidad hidrográfica, dividida por la raíz de su área total (Melton, 1957; Brantt, et al., 2021).

Remoción en masa: procesos naturales asociados a la dinámica externa del sistema terrestre y a la evolución del paisaje y que incluyen todos los movimientos ladera abajo de una masa de roca y/o detritos por acción de la gravedad, los que pueden, además, incorporar la cobertura vegetal y elementos antrópicos a su paso. Estos procesos pueden ser de movilización lenta o rápida, y son el resultado de la interacción entre una serie de factores condicionantes y otros que actúan como detonantes (PMA, 2007; Arenas & Opazo, 2017; Brantt, et al., 2021).

Riesgo: conjunto de amenazas potenciales que pueden generar daño a personas y/o sus bienes (González de Vallejo, et al., 2002).

Roca: sólido de origen natural compuesto por un agregado cohesivo de minerales, formado por procesos geológicos endógenos como el magmatismo, metamorfismo, la diagénesis y la litificación. Se agrupan en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

Roca intacta: en mecánica de rocas hace referencia a un fragmento de roca libre de discontinuidades a partir del cual se pueden estimar propiedades mecánicas y resistentes que condicionan su comportamiento ante intervenciones y deformaciones.

Rocas ígneas: grupo de rocas más abundantes formadas por el enfriamiento del magma dentro de la corteza terrestre (rocas ígneas intrusivas o plutónicas) o en la superficie por el enfriamiento de lava (rocas extrusivas o volcánicas).

Rocas metamórficas: rocas formadas por la transformación de rocas preexistentes mediante el proceso de metamorfismo bajo la corteza terrestre, producto de la acción de altas presiones, temperatura y fluidos químicamente activos.

Rocas piroclásticas: rocas asociadas a volcanismo formadas por la acumulación y consolidación de fragmentos y materiales piroclásticos (“*piro*” = fuego; “*clasto*” = fragmento).

Rocas sedimentarias: rocas provenientes de la acumulación permanente de fragmentos provenientes de procesos exógenos, los cuales se consolidan mediante los procesos de diagénesis y litificación que convierten los sedimentos acumulados en rocas sedimentarias.

Rumbo: en geología estructural es el ángulo de una línea horizontal contenida en un plano (estrato, falla o estructura geológica) medido con respecto al norte.

Salar: zona más baja de una cuenca endorreica, que actúa como recipiente de todos los cauces de la cuenca y que elimina el agua que recibe mediante evaporación, dando origen a una capa de depósitos salino.

Sernageomin: sigla que hace referencia al Servicio Nacional de Geología y Minería, que es un organismo técnico responsable de generar, mantener y divulgar información de geología básica y de recursos y peligros geológicos del territorio nacional, para el bienestar de la comunidad y al servicio del país, y de regular y/o fiscalizar el cumplimiento de normativas mineras en materia de seguridad, propiedad y planes de cierre, para contribuir al desarrollo de la minería nacional.

Sismo: movimiento súbito de la corteza terrestre debido a desplazamientos de los bloques o placas tectónicas. Los sismos pueden ser de baja intensidad (temblores que no ocasionan daños), de mediana intensidad y alta intensidad (terremotos o movimientos que sí ocasionan daños). También pueden ser ocasionados por procesos volcánicos o por grandes desplazamientos de masas rocosas (Dávila, 2011).

Suelos: cobertura superficial de la corteza terrestre producto de la alteración de los minerales de las rocas preexistentes. La formación del suelo implica la meteorización química de los minerales primarios dando lugar a nuevos minerales. Los procesos de formación de suelos son oxidación, hidratación e hidrólisis, carbonatación y disolución. Previamente a estos procesos deben realizarse los procesos de meteorización física. Los suelos bien desarrollados presentan un perfil bien definido que consiste en tres horizontes principales llamados A, B y C, que varían en color, textura, estructura y composición mineralógica y orgánica y también en espesor de acuerdo con la roca madre que dio origen, así como el clima, la humedad, etc. (Dávila, 2011).

Susceptibilidad: en ingeniería geológica es la posibilidad de que una zona esté afectada por un determinado proceso, expresada en diversos grados cualitativos y relativos (González de Vallejo, et al., 2002).

Talud: superficie inclinada de terreno que puede ser natural o artificial.

Topografía: disciplina que estudia la representación gráfica de la tierra, con sus formas y detalles.

Unidades hidrográficas: término empleado en este trabajo para referirse a una microcuenca hidrográfica, la unión o la modificación de ellas para que sean reconocibles a la escala de este trabajo (1:250.000) (Brantt, et al., 2021).

Volcán activo: son aquellos volcanes que han tenido algún indicio de actividad eruptiva en los últimos 10.000 años del pasado geológico (Holoceno).

Vulnerabilidad: grado de pérdida o daños a elementos en riesgo, resultado de la ocurrencia de fenómenos naturales (Varnes, 1984).

Zona de generación: corresponde al área o punto del territorio donde inicia el movimiento en masa. En este lugar existen las condiciones geológicas, geomorfológicas, hidrológicas y/o climáticas, entre otras, que favorecen la ocurrencia de remociones en masa.



Zonificación: división de la superficie del terreno en áreas graduadas de acuerdo con la susceptibilidad de movimientos de laderas (Varnes, 1984).

ANEXO F UBICACIÓN PUNTOS OBSERVACIÓN FOTOGRAFÍAS

A continuación, se detalla la ubicación de las fotografías tomadas en terreno presentes en este informe.

Figura N°	Punto de observación		Capítulo asociado
	Coordenada E	Coordenada N	
5i	441977	7968514	3.1.2 Unidades litológicas
5d	379112	7964067	
6i	389432	7946090	
6d	377802	7919633	
7	433826	8010928	
9	381954	7887826	3.2 Estructuras
10	430690	8004038	
13	381205	7951959	3.3 Mapa geomorfológico
14	483100	7946040	
17	448225	8025926	3.4 Mapa alteración
21	404825	7945112	3.5.3 Mapa de pendiente (slope)
22	359357	7947958	
31	487124	7998775	3.6.4 Mapa de crioclastia
35	440423	7972072	3.8 Vegetación y uso de suelos
36	380584	7952553	
46i	375261	7921967	
46d	390839	7911923	4.3.1 Caídas
47	378441	7884405	
48i	405132	7945072	
48d	379112	7964067	
49	398098	7945557	
50	418386	7918098	
51	426877	7913455	
52	477380	7990613	
55	378347	7884033	
56	377520	7883979	
57	400299	7896260	
58i	378810	7950242	
58d	381597	7948606	

59i	386692	7957424	
59d	386247	7957220	
63	359423	7925541	4.3.3 Flujos
64	367457	7877575	
65	367438	7878600	
66i	359821	7965597	
66d	396827	7964773	
67	407276	7959170	
68	398618	7964574	
69i	401772	7945000	
69d	395367	7945584	
70	448457	7959130	
71	483811	7946743	
97	360036	7949853	7 zonas críticas
98	390024	7945977	
99	398523	7963304	



ANEXO G ESTUDIO MORRO DE ARICA Y ALREDEDORES

En la carpeta **“Anexo G Análisis Morro de Arica”** se encuentra contenido el documento en .docx y PDF adjunto **“Estudio_Morro de Arica_Final”** con el contenido y detalles de los análisis del Morro de Arica a escala 1:10.000 y detalle a escala 1:1.000.



ANEXO H Fichas de zonas críticas

contenido en la carpeta “Anexo H Fichas Zonas Críticas” se encuentra en formato .docx y PDF “Fichas_zonas_criticas” fuera de este informe. Cada una de ellas esta categorizada con un número de ficha, cuya ubicación se puede reconocer en la Fig. 102.



ANEXO I VALIDACIÓN DEL CATASTRO EN TERRENO

En la carpeta **“Anexo I Cartillas Terreno”** se encuentran los documentos PDF adjuntos catalogados como **“Cartillas_Terreno”** los cuales corresponden a los respaldos digitales de las caracterizaciones realizadas en cada una de las actividades de terreno.



ANEXO J Validación de la susceptibilidad en terreno

En la carpeta **“Anexo J Cartillas Validación Susceptibilidad”** se encuentra contenido el documento PDF adjunto **“Cartillas_validación_susceptibilidad.pdf”** con el respaldo digital de las planillas de validación de susceptibilidad de terreno.



ANEXO K TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO

En la carpeta “**Anexo K**” adjunta en formato digital, se encuentran las carpetas “01_Dípticos” y “02_Videos” orientados a la transferencia de conocimiento.

El contenido de la carpeta 01_Dípticos es el siguiente:

- Díptico_1_Arica
- Díptico_2_Rural
- Díptico_3_Instituciones

El contenido de la carpeta 02_Videos es el siguiente:

- VIDEO GEOMORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA DE ARICA Y PARINACOTA.mp4
- VIDEO QUE SON LAS REMOCIONES EN MASA.mp4
- VIDEO RESULTADOS DE ESTUDIO.mp4



ANEXO L ACTAS DE REUNIONES

En la carpeta **“Anexo L Actas de reuniones”** se encuentran en formato PDF todas las actas de reunión levantadas durante el presente FNDR Análisis de Peligro de Remoción en Masa.