



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



REMOCIONES EN MASA DEL LÍMITE SUR ORIENTAL DE LA PENÍNSULA DE TUMBES Y SU RELACIÓN CON LA FALLA SAN VICENTE, TALCAHUANO, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE

Memoria para optar al Título de Geólogo

Catalina Sofía Hillerns Vega

Profesor Patrocinante: Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn

Profesional Guía: Msc. Natalia Sofía Sepúlveda Díaz

Profesores Comisión: Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Msc. Abraham Elías González Martínez

Concepción, 2025

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. UBICACIÓN Y ACCESOS	1
1.2. CLIMA	3
1.3. OBJETIVOS	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivos Específicos	5
1.4. TRABAJOS ANTERIORES	6
1.5. METODOLOGÍA DE TRABAJO	7
1.5.1. Recopilación de datos bibliográficos	7
1.5.2. Campaña de terreno	7
1.5.3. Análisis de material topográfico digital	8
1.5.4. Etapa de gabinete	9
1.6. AGRADECIMIENTOS	9
2. GEOMORFOLOGÍA	11
2.1. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	11
2.2. GEOMORFOLOGÍA LOCAL	12
3. MARCO GEOLÓGICO	16
3.1. GENERALIDADES	16
3.2. ROCAS METAMÓRFICAS	17
3.2.1. Serie Occidental o Complejo Metamórfico Tumbes	17
3.3. ROCAS INTRUSIVAS	18
3.3.1. Batolito Costero del Sur	18
3.3.1.1. Tonalitas de Santa Juana	19
3.3.1.2. Granitoides de Nahuelbuta	19
3.3.1.3. Granitoides de Concepción	20
3.3.2. Plutón Hualpén	20
3.4. ROCAS SEDIMENTARIAS	20
3.4.1. Formación Quiriquina	20
3.4.2. Formación Pilpilco	21
3.4.3. Formación Curanilahue	22
3.4.4. Formación Cosmito	23
3.4.5. Formación Tumbes	24
3.4.6. Formación Andalién	25
3.4.7. Formación Huachipato	25
3.4.8. Depósitos fluviales y marinos	26
3.4.9. Depósitos de remociones en masa	27
3.5. MARCO ESTRUCTURAL	27
3.5.1. Zona de Falla Biobío	27
3.5.2. Falla San Vicente	28
3.5.3. Deformación Serie Occidental	30
4. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	32
4.1. CONCEPTOS GENERALES	32

4.1.1. Susceptibilidad	32
4.1.2. Peligro o amenaza	32
4.1.3. Vulnerabilidad	32
4.1.4. Riesgo	32
4.1.5. Procesos gravitacionales	33
4.1.6. Factores condicionantes	33
4.1.7. Factores desencadenantes	33
4.2. REMOCIONES EN MASA	34
4.2.1. Clasificación	34
4.2.1.1. <u>Caída</u>	34
4.2.1.2. <u>Volcamiento</u>	36
4.2.1.3. <u>Deslizamiento</u>	37
4.2.1.4. <u>Extensión lateral</u>	40
4.2.1.5. <u>Flujo</u>	40
4.2.1.6. <u>Reptación</u>	41
4.2.2. Estado de actividad	42
4.2.2.1. <u>Activo</u>	42
4.2.2.2. <u>Reactivado</u>	43
4.2.2.3. <u>Suspendido</u>	43
4.2.2.4. <u>Inactivo</u>	43
4.2.2.5. <u>Relicto</u>	43
5. RESULTADOS	44
5.1. GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO	44
5.1.1. Rocas metamórficas	45
5.1.2. Rocas sedimentarias	49
5.1.2.1. <u>Formación Quiriquina</u>	49
5.1.2.2. <u>Formación Curanilahue</u>	49
5.1.2.3. <u>Arenas silíceas</u>	49
5.1.2.4. <u>Depósitos de remociones en masa</u>	50
5.1.2.5. <u>Remociones en masa</u>	51
5.2. LINEAMIENTOS	53
5.3. REMOCIONES EN MASA	55
5.3.1. Remociones en masa y su relación con la elevación	57
5.3.2. Remociones en masa y su relación con la pendiente	60
5.3.3. Remociones en masa y su relación con la orientación de la ladera	62
5.3.4. Remociones en masa y su relación con la litología	63
5.3.5. Remociones en masa y su relación con la distancia a caminos	66
6. DISCUSIÓN	68
6.1. FALLA SAN VICENTE	68
6.2. REMOCIONES EN MASA	69
6.3. REMOCIONES EN MASA Y SU RELACIÓN CON LA GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y LA URBANIZACIÓN	72
7. CONCLUSIONES	74
ANEXOS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de Ubicación del Área de Estudio	2
1. 2. Mapa de Zonas Climáticas de la Región del Biobío	3
1. 3. Climodiagrama del Área de Estudio entre 1993-2023	5
2. 1. Mapa Geomorfológico de la Región del Biobío	11
2. 2. Unidades Geomorfológicas de la Península de Tumbes y Sector de Talcahuano .	13
2. 3. Mapa Geomorfológico de la Zona Sur de la Península de Tumbes y del Sector de Talcahuano Aledaño	15
3. 1. Traza de la Zona de Falla Biobío	28
3. 2. Traza de la Falla San Vicente	29
3. 3. Fallas del límite suroriental y oriental de la península de Tumbes según Quinzio.	30
3. 4. Proyecciones Estereográficas de la Foliación de la Serie Occidental en la Península de Tumbes	31
4. 1. Esquema de Caída de roca	35
4. 2. Esquema de Volcamiento	36
4. 3. Esquema de Deslizamiento Rotacional	37
4. 4. Esquema de Deslizamiento Traslacional	38
4. 5. Esquema de la nomenclatura de un Deslizamiento	39
4. 6. Esquema de Extensión Lateral	40
4. 7. Esquema de Flujo	41
4. 8. Esquema de Reptación	41
4. 9. Estado de Actividad de las Remociones en Masa	42
5. 1. Mapa geológico del área de estudio	44
5. 2. Esquistos del área de estudio	45
5. 3. Falla N2°E/50°SE en la Serie Occidental	46
5. 4. Foliaciones de la Serie Occidental en el área de estudio	47
5. 5. Mapa foliación Serie Occidental en cerros Zaror y Alegre cercano al trazo de la Falla San Vicente	48
5. 6. Afloramiento de unidad Arenas silíceas en la cancha Juventud Monte Redondo	49
5. 7. Depósito de remoción en masa en el cerro Cornou	50
5. 8. Depósito de remoción en masa en el cerro La Unión	51
5. 9. Deslizamiento de suelo en el cerro Cornou	52
5. 10. Caída de roca en el cerro La Unión	52
5. 11. Lineamientos de la zona sur de la península de Tumbes	53
5. 12. Diagrama de roseta de los lineamientos de la zona sur de la península de Tumbes	54
5. 13. Diagrama de roseta de los lineamientos del área de estudio	55
5. 14. Mapa de ubicación de remociones en masa	56
5. 15. Gráfico del número de remociones en masa según el mes	57
5. 16. Mapa de elevación y las remociones en masa del área de estudio	58
5. 17. Gráfico del número de remociones en masa según la elevación	59

5.	18.	Mapa de pendiente y las remociones en masa del área de estudio	60
5.	19.	Gráfico del número de remociones en masa según la pendiente	61
5.	20.	Mapa de orientación de la ladera (o aspecto) y las remociones en masa del área de estudio	62
5.	21.	Gráfico del número de remociones en masa según la orientación de la ladera	63
5.	22.	Mapa de unidades litológicas del área de estudio	64
5.	23.	Mapa de litología y las remociones en masa del área de estudio	65
5.	24.	Gráfico del número de remociones en masa según la litología	66
5.	25.	Mapa de la distancia a caminos y las remociones en masa del área de estudio	67
5.	26.	Gráfico del número de remociones en masa según la distancia a caminos	67
6.	1.	Mapa estructural del piso Manto 5 de las minas de carbón de Lota	69
6.	2.	Fallas del límite sur y suroriental de la península de Tumbes	70
6.	3.	Mapa de remociones en masa en las comunas de Talcahuano, Hualpén, Concepción y Chiguayante	71
6.	4.	Corona de remociones en masa antiguas en los cerros La Gloria, La Unión y Zaror	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. 1. Promedio de precipitaciones y temperaturas mínimas, medias y máximas de Talcahuano entre los años 1993-2023	4
3. 1. Formaciones geológicas del área de Concepción y Talcahuano	16
3. 2. Cuadro comparativo de unidades estratificadas de Arauco y Concepción	17
4. 1. Clasificación abreviada de los tipos de movimiento de remociones en masa y sus divisiones según el tipo de material desplazado	35
4. 2. Clasificación de velocidad de remociones en masa	36
5. 1. Cantidad de remociones en masa por tipo	57
5. 2. Cantidad de remociones en masa según el factor desencadenante	57

RESUMEN

Dentro de la comuna de Talcahuano las remociones en masa son un peligro geológico frecuente, debido a que su ocurrencia ha sido anual, en los últimos 10 años, principalmente en los meses de invierno, en la zona sur de la península de Tumbes. Éstas afectan directamente a la población, ya que el material removido obstruye caminos, y cae en algunas casas. El límite sur de esta península se encuentra elevada a causa del desplazamiento de la Falla San Vicente, falla normal de alto ángulo definida por Galli en 1967. A pesar de haber sido identificada hace más de 5 décadas, no está tan estudiada, por lo que su desplazamiento total no se ha calculado. En este trabajo se analizan los procesos gravitacionales ocurridos en el límite sur y suroriental de la península de Tumbes, para lo cual se estudiaron los parámetros de elevación, pendiente, orientación de la ladera, litología y el factor antrópico, poniendo énfasis en la caracterización de la foliación de las rocas metamórficas del lugar, con el fin de determinar si hay una relación, entre las remociones en masa y los factores geológicos (estructural) de la zona.

Para el cumplimiento del objetivo se realizó una recopilación bibliográfica de las remociones en masa ocurridas en el área de estudio, seguida de una salida a terreno para identificar remociones recientes no registradas. Además, se clasificaron las rocas y se midió la foliación de la Serie Occidental (producto del metamorfismo regional), para compararla con la foliación que se encuentra en la zona de las fallas mayores (metamorfismo dinámico). Para el análisis de los distintos parámetros se realizaron mapas a través de modelos de elevación digital (*DEM*), y la identificación de lineamientos con el programa ArcMap 10.8.

Como resultado, se plantea que la Falla San Vicente mapeada por Galli (1967) corresponde a 2 fallas: una de dirección NNE-SSW, en la zona suroriental (sin nombre); y otra ENE-WSW, en la zona sur (que se plantea mantenga el nombre Falla San Vicente), las cuales se ven reflejadas por la alineación de la foliación de las rocas de la Serie Occidental en el escarpe de la península. Estas direcciones coinciden a las de las minas de carbón de Lota, en donde las rocas se ven afectadas por 2 sistemas de fallas de igual orientación a las propuestas en este trabajo. Es esta foliación la que condiciona a las rocas de la zona a ser más susceptibles a procesos de remociones en masa, y fue la causante de los deslizamientos antiguos de grandes dimensiones que se observan en los cerros La Unión y Cornou, donde el material no consolidado resultante y que compone la parte baja de ellos, constituyen las zonas más propensas a procesos gravitacionales en la actualidad. Producto de la alta urbanización en la zona de los escarpes de estas fallas, se han construido caminos y casas, para lo cual se han hecho cortes en el cerro, lo que, junto al aumento de peso, desestabilizan las laderas.

De este modo, las remociones en masa actuales, en la zona de estudio, tienen una relación directa con las fallas del límite sur y suroriental de la península de Tumbes, las que son potenciadas por los cambios antrópicos realizados en sus escarpes.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos gravitacionales son los movimientos de roca, regolito y/o suelo pendiente abajo, por influencia directa de la gravedad, y que no precisan un medio de transporte como el agua, viento o hielo (Tarbuck & Lutgens, 2005). Estos procesos suelen ser gatillados por tectónica, clima, geomorfología, acción antrópica (Hauser, 2000) y características estructurales (Mardones & Rojas, 2012). Cabe destacar que los procesos gravitacionales no corresponden a procesos excepcionales, sino que forman parte de la evolución natural del paisaje (Hauser, 2000), por lo que el estudio de estos debe ser constante para la prevención y/o la reducción de los daños físicos y económicos que estos pueden generar.

Talcahuano es la segunda comuna con mayor población en el Gran Concepción, con un total de 158.038 personas según el Censo del año 2017. Debido al constante crecimiento de esta población, la ciudad se encuentra saturada demográficamente, lo que resulta en la expansión de áreas residenciales a sectores no edificables expuestos a fuertes índices de peligrosidad natural como procesos de anegamiento, inundación y, la de importancia de este trabajo, zonas susceptibles a remociones en masa (Mardones *et al.*, 1994).

Dentro de la península de Tumbes, las remociones en masa se concentran a lo largo del trazo de la Falla San Vicente, en donde Gajardo (2022) reporta 13 remociones en masa, con base exclusiva en reportes del diario El Sur, a lo largo de esta falla en los últimos 30 años.

1.1. UBICACIÓN Y ACCESOS

El área de estudio corresponde al límite sur y sureste de la península de Tumbes (hasta el sur de la Avenida del Pescador), la cual está ubicada en la comuna de Talcahuano en la región del Biobío a aproximadamente 9,7 km al NNW de la comuna de Concepción. Este trabajo sigue la traza de la Falla San Vicente y sus alrededores inmediatos, hasta aproximadamente 300 metros desde el escarpe hacia adentro de la península, que abarca parte de los cerros Vista Hermosa, Cornou, Zaror, La Unión, Buena Vista y La Gloria (Figura 1.1).

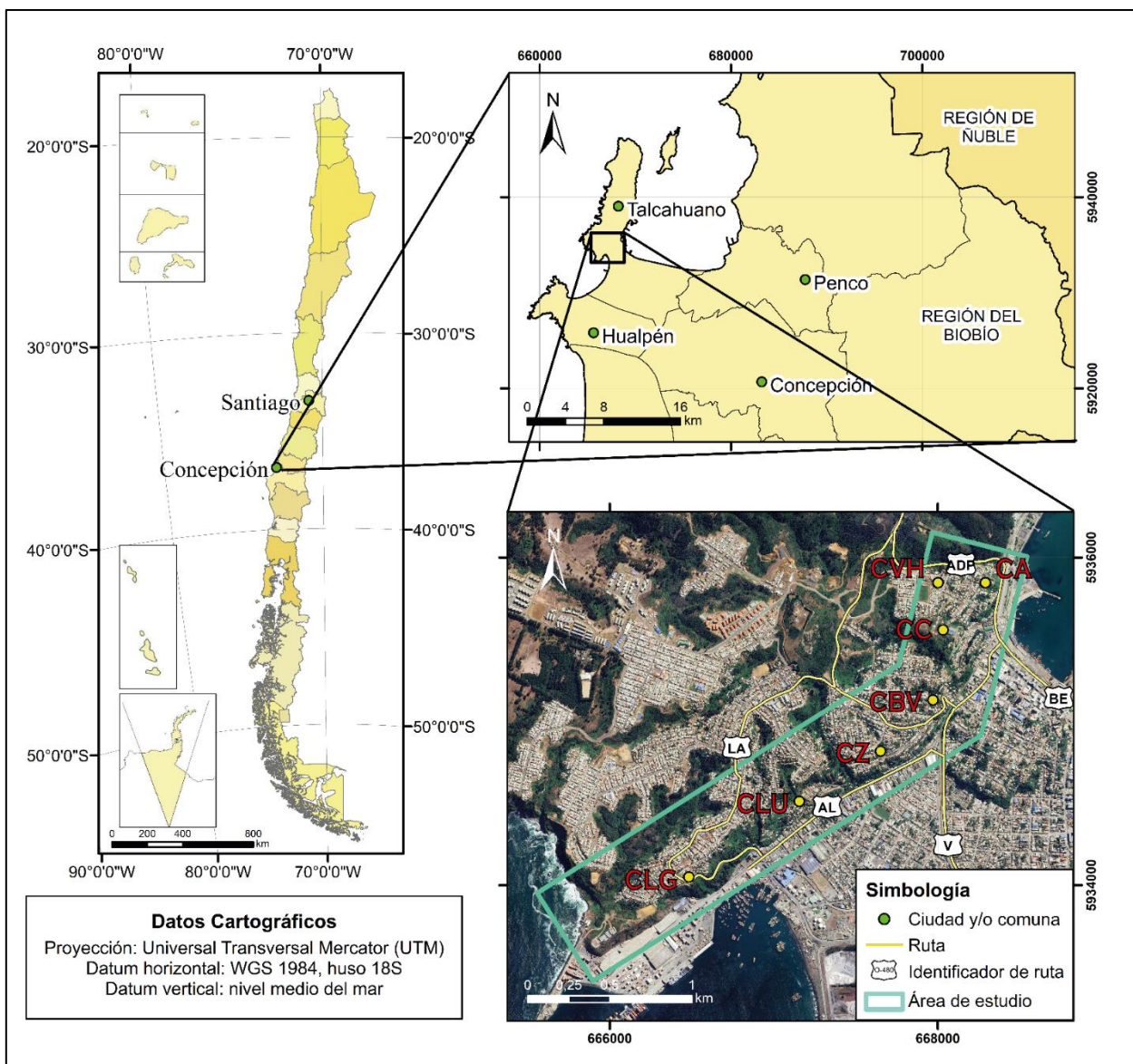


Figura 1.1: Mapa de Ubicación del Área de Estudio. ADP: Avenida del Pescador. LA: Los Araucanos. AL: Almirante Latorre. BE: Blanco Encalada. V: Valdivia. CLG: cerro La Gloria. CLU: cerro La Unión. CZ: cerro Zaror. CBV: cerro Buena Vista. CC: cerro Comou. CVH: cerro Vista Hermosa. CA: cerro Alegre.

El acceso a la península de Tumbes es posible desde las rutas Blanco Encalada, que sigue la costa este de Talcahuano, y la calle Valdivia por la zona centro. La calle Almirante Latorre se encuentra paralela al escarpe sur de la península. Para llegar al cerro La Gloria, en la zona más occidental del área, se realiza principalmente a través de la calle Subida La Gloria y para ingresar a los sitios urbanizados en los cerros, donde están los afloramientos se hace a través de pasos vehiculares y pasarelas peatonales. Es importante destacar que en el extremo oeste de la Falla San Vicente se ubica en el puerto homónimo, por lo que su acceso es restringido.

1.2. CLIMA

La región del Biobío se ubica en Chile Central y presenta un clima principalmente templado, en donde gran parte de la región se clasifica, según la clasificación de zonas climáticas de Köppen-Geiger, en el grupo climático “C” (Sarricolea *et al.*, 2017) que corresponde a climas templados lluviosos, donde la temperatura media del mes más frío es inferior a 18°C y superior a -3°C, y el mes más cálido es superior a 10°C (Rioseco & Tesser, s.f.). Sarricolea *et al.* (2017) en el mapa de climas de Chile, basándose en el mismo sistema de clasificación, definen toda la zona costera de esta región, incluida la comuna de Talcahuano, como Csb’ (Figura 1.2), en un clima mediterráneo de verano cálido con lluvias invernales e influencia oceánica.

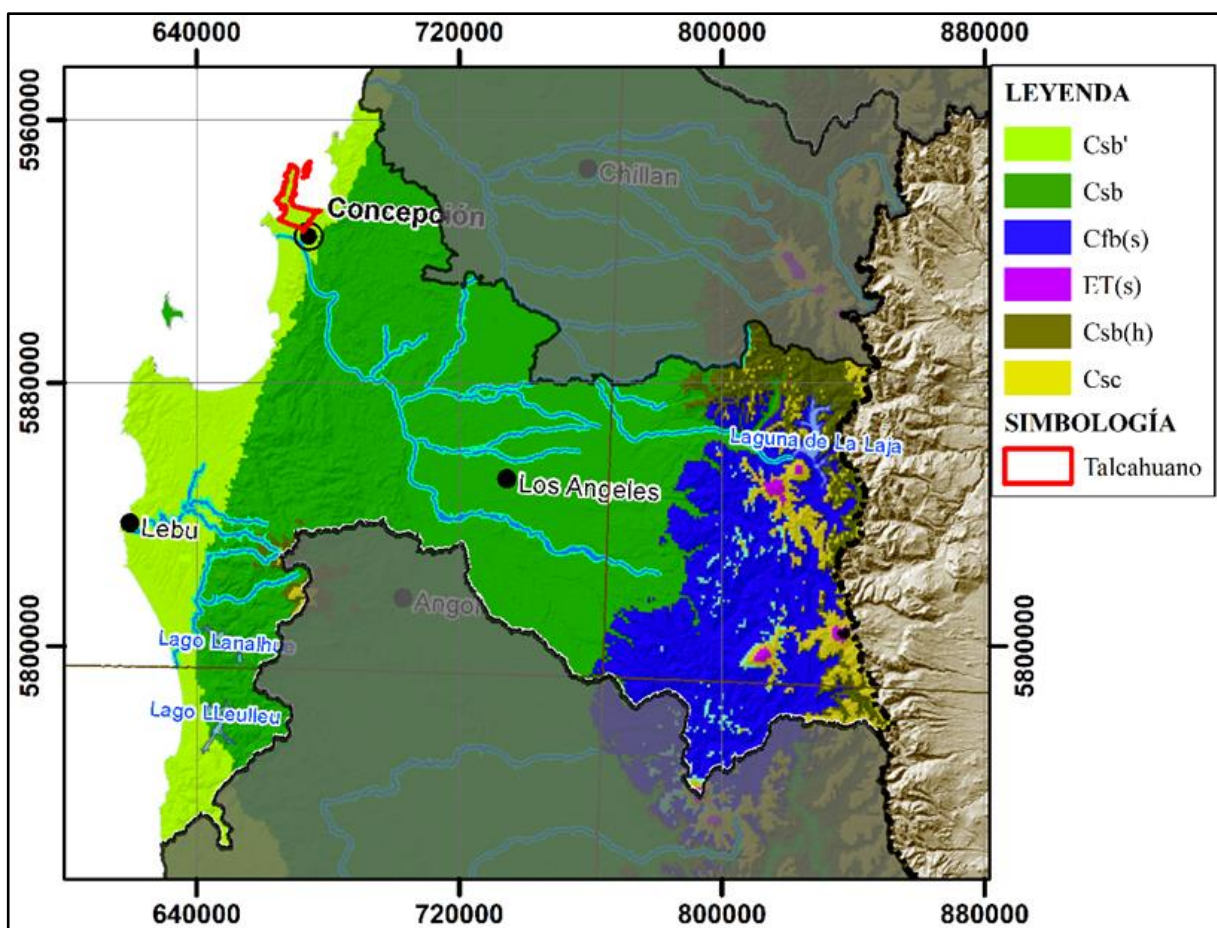


Figura 1.2: Mapa de Zonas Climáticas de la Región del Biobío. En rojo se encuentra delimitada la comuna de Talcahuano. Csb’: clima mediterráneo (verano cálido) con lluvias invernales e influencia oceánica. Csb: clima mediterráneo (verano cálido) con lluvias invernales. Cfb(s): clima marino de costa occidental (verano cálido y seco) con influencia oceánica. ET(s): clima de tundra con verano seco. Csb(h): clima mediterráneo (verano cálido) con influencia de montaña. Csc: clima mediterráneo (verano templado). Según la clasificación de Köppen-Geiger. Modificado de Sarricolea *et al.* (2017).

Con base en los datos meteorológicos de los últimos 30 años (1993-2023) de la estación Carriel Sur de la Dirección Meteorológica de Chile ubicada en la comuna de Talcahuano, la zona de estudio tiene un promedio anual de temperatura de 12,9°C y 939 mm de precipitaciones (Tabla 1.1). Las temperaturas más frías se registran entre los meses de invierno, en el cual julio es el más frío, con una mínima media de -0,5°C. Los meses más calurosos corresponden a los de verano, con temperaturas máximas medias que se elevan sobre los 26°C, donde enero tiene la temperatura más alta de 27,7°C. Las precipitaciones aumentan considerablemente entre mayo y agosto con lluvias mensuales que superan los 100 mm, las cuales concentran un 70,35% del total anual, en contraste con los meses de verano que representan un 4,26%. Dentro de estos meses, el con mayor cantidad de mm caídos corresponde al mes de junio con un promedio de 214,3 mm, 49 mm más que el segundo mes con mayores precipitaciones (julio con 165,3 mm).

Tabla 1.1: Promedio precipitaciones y temperaturas mínimas, medias y máximas, de Talcahuano entre los años 1993-2023. Basado en datos de la Estación Carriel Sur de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
T mínima (°C)	7,4	7,2	4,8	2,9	1,3	0,2	-0,5	0,0	0,7	2,6	4,5	6,3
T media (°C)	17,0	16,5	15,3	13,0	11,3	10,0	9,2	9,9	10,8	12,3	14,1	15,9
T máxima (°C)	27,7	27,6	26,2	23,7	20,6	17,5	17,4	19,1	21,6	22,3	24,5	26,2
PP (mm)	11,0	13,5	20,1	67,7	133,7	214,3	165,3	147,3	74,7	50,3	25,6	15,6

Para representar el clima local de manera gráfica, se realizó un climodiagrama según la relación de Gaussen (Figura 1.3), la cual relaciona las precipitaciones y temperaturas medias locales en proporción: $P = 2T$ (Hajek & di Castri, 1975). De acuerdo con los datos obtenidos es posible reconocer que la comuna de Talcahuano tiene un periodo seco de 5 meses a partir de noviembre hasta marzo, y una estación húmeda de 7 meses (abril hasta octubre).

Una variabilidad climática en diferentes regiones del planeta es el fenómeno El Niño-Oscilación Sur (o ENOS por sus siglas), que corresponde a una alteración del sistema oceánico-atmosférico en el Pacífico tropical y contiene tres fases: la fase cálida (El Niño), la fase fría (La Niña) y la fase neutral (CIIFEN, s.f.; Gorny, 2023). En Chile, y en el área de estudio, el fenómeno de El Niño se presenta como un aumento en la temperatura superficial del mar y de las precipitaciones (Gorny, 2023), donde los inviernos tienen más días de lluvia y de mayor intensidad que años normales (García, 2000 en Lara, 2007).

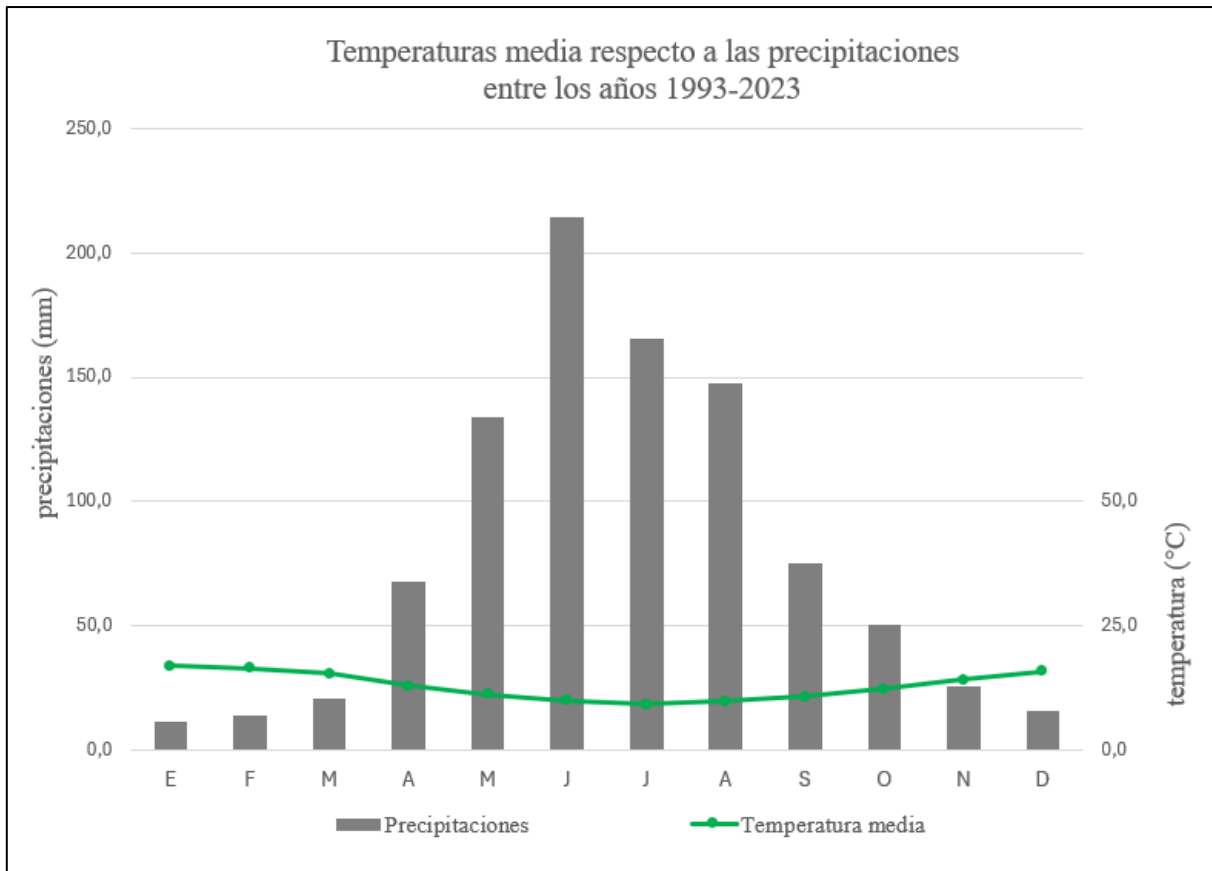


Figura 1.3: Climodiagrama del Área de Estudio entre 1993-2023. La relación entre los ejes del gráfico corresponde a la relación de Gaussien. Basado en datos de la Estación Carriel Sur.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Analizar y clasificar las remociones en masa a lo largo de la ladera sur de la península de Tumbes, y caracterizar la geomorfología, litología y estructuras de estas zonas, con el fin de determinar la importancia del factor estructural en la ocurrencia de las remociones.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Elaborar un catastro actualizado de las remociones en masa del área de estudio en base a prensa, publicaciones científicas y redes sociales.
- Identificar y clasificar las remociones en masa presentes dentro del área de estudio.
- Determinar la relación de las remociones en masa con la geología estructural local.

1.4. TRABAJOS ANTERIORES

La Geología Urbana de Concepción y de Talcahuano es descrita por primera vez por Galli (1967), donde también hace un análisis del suelo de fundación. En este trabajo menciona la existencia de rocas metamórficas en la península de Tumbes y en los cerros islas de ambas ciudades, rocas estratificadas marinas de la Formación Quiriquina del Cretácico Superior, sobre las cuales define las formaciones Cosmito, Andalién, Huachipato, entre otras unidades de sedimentos continentales y marinos.

Quinzio *et al.* (2003 y 2011) publican los mapas de la zona costera de la región del Biobío como resultado del trabajo realizado al dictar la asignatura de Geología de Campo II, de la Carrera de Geología, Universidad de Concepción, entre los años 1998 y 2022. Es estos cursos se abarcó desde la desembocadura del río Itata (por el norte), hasta la parte norte de la península de Arauco (por el sur). Los levantamientos geológicos incluyen a las comunas de Tomé, Penco, Talcahuano, Hualpén Concepción, San Pedro de la Paz, Chiguayante, Coronel, Lota, Hualqui, Arauco y Santa Juana.

Además, Velásquez *et al.* (en preparación) realizan un levantamiento cartográfico geológico de las comunas de Talcahuano, Hualpén y parte de Concepción y de San Pedro de la Paz, para la publicación de la “Carta Geológica Concepción-Talcahuano”, del Servicio de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), la cual está en edición.

Respecto a los procesos gravitacionales, SERNAGEOMIN efectúa informes técnicos de las remociones en masa reportadas, además de informes recopilatorios de todas las remociones ocurridas en épocas de invierno los cuales pueden ser descargados en la plataforma *online* de este servicio (<https://portalgeomin.sernageomin.cl/>). También existe un mapa de susceptibilidad de estos que abarca las comunas de Concepción, Talcahuano, Hualpén y Chiguayante de Falcón *et al.* (2010).

López (2013) hace una evaluación del peligro a remociones en masa específicamente en los cerros La Unión y Zaror en Talcahuano, y posteriormente en el 2015 un estudio sobre los umbrales de precipitación en procesos de remociones en las laderas urbanizadas costeras en Chile centro-sur.

Gajardo (2022) recopila los procesos de remociones en masa en la comuna de Talcahuano entre los años 1990 y 2020, y realiza un modelamiento de la susceptibilidad de estas a través de un método estadístico bivariado (*frequency ratio*). Además, actualiza la cartografía geomorfológica local e identifica las unidades geomorfológicas más susceptibles en la comuna.

1.5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

1.5.1. Recopilación de datos bibliográficos

La primera etapa de este trabajo consistió en una revisión y recopilación bibliográfica disponible sobre la geología, tanto regional como estructural, del área de estudio, tales como memorias, tesis, informes inéditos de la asignatura de Geología de Campo II de la Carrera de Geología, Universidad de Concepción, y publicaciones científicas, con el fin de describir la zona. Posteriormente, se hizo un inventario de las remociones en masa ocurridas a lo largo de la Falla San Vicente y alrededores inmediatos a través de bibliografía, principalmente Gajardo (2022), López (2013) y el catastro de SERNAGEOMIN, además de una recopilación de datos de redes sociales y prensa (Anexo I). Finalmente, fueron agregadas las remociones observadas en terreno (Anexo II).

1.5.2. Campaña de terreno

Se realizaron 5 salidas de terreno, no consecutivos, a lo largo del mes de julio del año 2024, y una salida excepcional el 21 de agosto, está última, para observar una remoción en masa en el cerro Cornou. Se recorrieron las calles de Talcahuano y afloramientos accesibles a lo largo del escarpe sur y suroriental de la península de Tumbes correspondiente a los cerros Vista Hermosa, Cornou, Zaror, La Unión, entre otros.

Se tomaron fotografías de los afloramientos, se identificaron las rocas de ellos y, en el caso de ser rocas metamórficas, se midió la foliación de estas. Además, se describieron las remociones en masa no presentes en el catastro bibliográfico.

Cabe destacar que al corresponder a un área altamente poblada y con abundantes zonas habitacionales, especialmente en los sectores aledaños al escarpe de falla, no fue posible identificar en terreno las remociones en masa del inventario, ya que estas ya fueron removidas y/o tapadas con medidas de contención. Además, la zona posee abundante vegetación, la cual ha crecido sobre

estas mismas cubriéndolas parcial o totalmente.

1.5.3. Análisis de material topográfico digital

Se utilizó un modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) de 5 m de resolución proporcionado por el MINVU, para la confección de ocho imágenes hillshade a través de la herramienta de procesamiento del mismo nombre, del programa ArcMap 10.8. Estas imágenes se generaron con diferentes orientaciones (azimut) del sol, correspondientes a 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° y 315°, como en los trabajos de Abdullah *et al.* (2010) y Muhammad & Awdal (2012), con un ángulo de elevación solar de 30°, al igual que los autores recién nombrados y Fajri *et al.* (2019). A partir de estas imágenes se hizo una identificación de los lineamientos de la parte sur de la península de Tumbes.

Se realizaron 4 mapas: de elevación, pendiente, orientación de la ladera (o aspecto) y distancia a caminos. Se utilizó también el mapa litológico de la Carta Talcahuano-Concepción en edición de Velásquez *et al.* (en preparación).

En el mapa elevación, la elevación mínima corresponde a 0 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.) y el bloque alzado (península de Tumbes) tiene una cota menor a 190 m s.n.m., y específicamente en el área de estudio, este no excede los 140 m s.n.m. Como esta clasificación se utiliza para ver la relación con las remociones en masa y no para la obtener un mapa de susceptibilidad, se clasificó la elevación solo hasta donde éstas se encuentran en la zona, en 11 clases: 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90, 90-100 y >100 m s.n.m. Este mapa fue hecho con el software ArcMap en las propiedades del DEM, donde se cambió la simbología a *classified* y se especificó la cantidad de clases.

Para el mapa de pendientes, al igual que el de elevación, se utilizó ArcMap, a través de la herramienta de slope, y luego se determinaron las clases y sus intervalos. Se emplearon como base los rangos descritos por Falcón *et al.* (2010), que corresponde a un mapa de peligro de remociones en masa de las comunas de Talcahuano, Concepción, Hualpén y Chiguayante, que incluye el área de estudio de este trabajo. Estos rangos son: 0°-15°, 15°-25° y >25°, pero para mayor detalle se separaron ambos intervalos de 0°-15° y >25° en dos, con finalmente 5 clases: 0°-5°, 5°-15°, 15°-

25°, 25°-35° y >35°.

El mapa de orientación de la ladera o de aspecto, se realizó con la herramienta de *aspect (spatial analyst)*, con las clasificaciones definidas por el mismo programa, las cuales corresponden a 10 clases de intervalos en grados: plano (-1), norte (0°-22,5° y 337,5°-360°), noreste (22,5°-67,5°), este (67,5°-112,5°), sureste (112,5°-157,5°), sur (157,5°-202,5°), suroeste (202,5°-247,5°), oeste (247,5°-292,5°) y noroeste (292,5°-337,5°).

El último mapa corresponde al de distancia a caminos, que se construyó con la herramienta *euclidean distance* de ArcMap, donde los intervalos fueron reclasificados en 5 clases: 0-15 m, 12-25 m, 25-50 m, 50-75 m y >75 m.

1.5.4. Etapa de gabinete

La última etapa de este trabajo fue la unión de los datos bibliográficos con la información recopilada en terreno, descripción de los resultados, y posteriormente la discusión y análisis de éstos, con el fin de identificar una relación entre las remociones en masa presentes en la zona y la geología, principalmente con la geología estructural del área de estudio, especialmente la Falla San Vicente.

1.6. AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, agradezco al profesor Luis Arturo Quinzio Sinn y a mi Profesional Guía Natalia Sepúlveda del SERNAGEOMIN por darme este tema de Memoria del proyecto “Estructura y peligros asociados a la Falla San Vicente, región del Biobío”, y por toda la ayuda que me brindaron al responder las dudas que se me presentaron sin esperar nada a cambio.

Quiero agradecer a todos los docentes y funcionarios del Departamento de Ciencias de la Tierra, especialmente al Sr. Luis Vásquez encargado del Laboratorio de Geomática y a los profesores Sr. Ramiro Bonilla Parra y Msc. Abraham González Martínez, los cuales me aportaron con material de apoyo y aspectos técnicos. Sin ustedes esta Memoria no habría sido posible.

A mis queridos amigos de la carrera, Victoria, Eduardo, Javier, Rocío, Susana, Sebastián, Kevin,

Yorch, Catalina R., María Paz y Rubén. La vida universitaria fue muy difícil para mí, y ellos hicieron de mi vida a lo largo de todos sus años mucho más ameno. Llegaron y se ganaron un espacio en mi corazón y estaré siempre aquí para ustedes.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia y a mi pareja, quienes fueron mi mayor soporte durante la universidad y el desarrollo de esta memoria, con especiales cariños a mi padre, quien a pesar de tener una rodilla mala me acompañó a terreno en los cerros de Talcahuano con completa disposición, y a mi pareja quien me apoyó y calmó siempre que las dudas llenaban mi cabeza.

2. GEOMORFOLOGÍA

2.1. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

Börgel en 1983 describe 5 unidades morfológicas principales en Chile, las que se disponen como franjas longitudinales paralelas de W a E. Éstas corresponden a: Planicies Litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera y Cordillera Andina. El mismo autor, además, define una segunda división geomorfológica, que separa a Chile continental en 5 regiones, esta vez latitudinalmente (de N a S). La región del Biobío se incluye en dos zonas: la parte norte del río Biobío corresponde a la Región Central de las Cuencas y del Llano Central fluvio-glacio-volcánico, y al sur del río a la Región Periglaciaria y Lacustre de volcanismo activo.

Según la clasificación de Börgel, en la región del Biobío se reconocen 8 unidades geomorfológicas, en las que el área de estudio pertenece a la unidad “Llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional” (Figura 2.1).

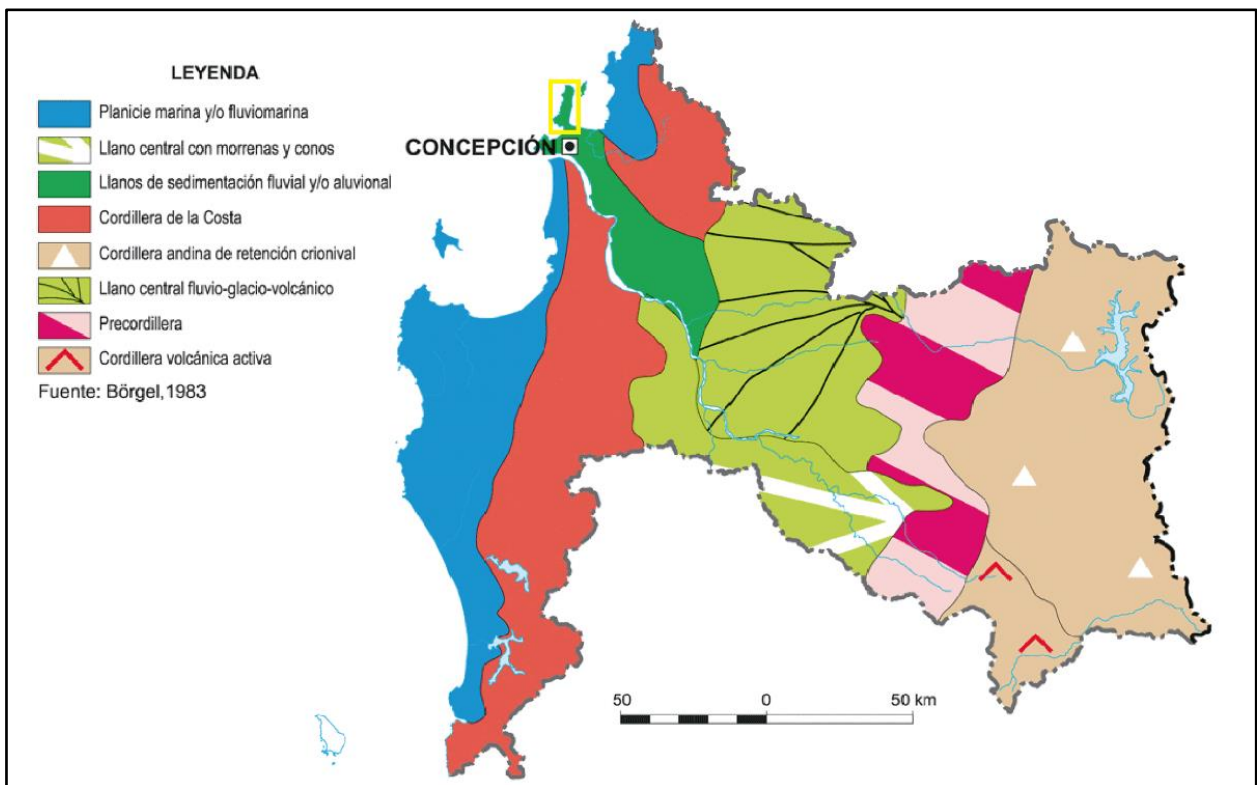


Figura 2.1: Mapa Geomorfológico de la región del Biobío. El rectángulo amarillo corresponde al área de estudio. Modificado del Instituto Geográfico Militar en base a Börgel (1983).

2.2. GEOMORFOLOGÍA LOCAL

La comuna de Talcahuano se caracteriza por una extensa llanura deltaica localizada entre las penínsulas de Hualpén y Tumbes por el oeste, la cordillera de la Costa por el este, y la bahía de Concepción por el norte. En la primera, sobresalen cerros islas: San Miguel, San Martín, Las Pulgas, Cerro de la U, Cerro Verde, El Morro y David Fuentes, los que tienen alturas no mayores a 90 m s.n.m. La península de Tumbes corresponde a una plataforma de abrasión marina con cotas que no sobrepasan los 200 m s.n.m., la cual está limitada por fallas normales (Quezada *et al.*, 1997).

La geomorfología de la zona costera de la región del Biobío ha sido producto de la tectónica del Cenozoico, la que ha dado origen a bloques estructurales elevados (Horst) y deprimidos (Graben), que conforman penínsulas y fosas o llanuras (Mardones, 2010). Isla *et al.* (2012) indican que la bahía de Concepción, específicamente los niveles rasos actuales de los cerros de Concepción y Talcahuano, fue modelada por la evolución del sistema deltaico del río Biobío y la transgresión marina holocena. Mardones y Brito (1979) señalan que esta planicie se debe a la cambiante dirección del cauce del río Biobío, debido a que en ella se ubicaban los antiguos lechos que durante el Holoceno desembocaban al mar y que fueron migrando desde el N hacia el S, y que en la actualidad están abandonados.

En el área de estudio, Mardones (1978) define 2 unidades geomorfológicas: “El horst occidental de granito y pizarras paleozoicas” correspondiente a la península de Tumbes, y “El graben de Concepción y la llanura de arenas negras del Biobío”, que se refiere a la llanura al SE de la península (Figura 2.2).

La unidad del horst, que corresponde a la más importante de este trabajo, se encuentra delimitada por la Falla San Vicente por el SE. Presenta un relieve disimétrico y amesetado, que por el E su trazado es prácticamente rectilíneo, aunque al detalle es posible observar pendientes convexas y quebradas cortas (Mardones, 1978). Al W de la península su contorno es irregular, con ensenadas de fondos estrechos y cornisas de erosión prácticamente horizontales (Mardones, 1978).

En el lado oriental se concentran las mayores alturas, donde destaca el cerro Centinela con una cota máxima de 188 m s.n.m., y en el occidental las mesetas, que escasamente superan los 100 m s.n.m.

(Mardones, 1978).

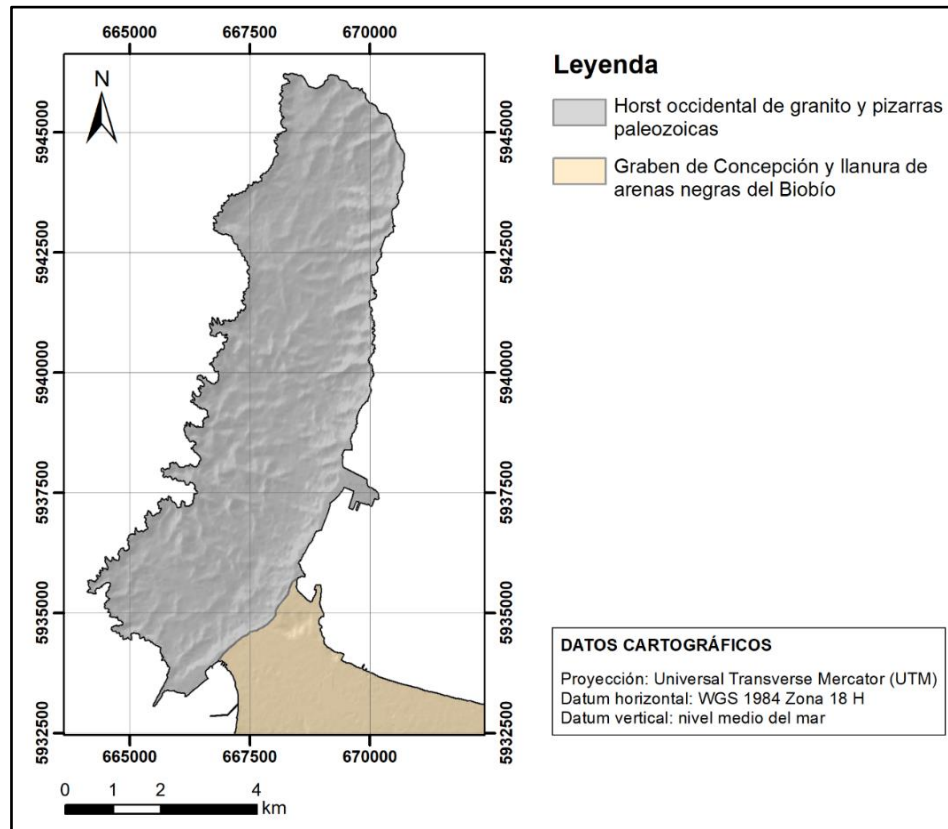


Figura 2.2: Unidades Geomorfológicas de la península de Tumbes y sector de Talcahuano. Propuestas por Mardones (1978).

“El graben de Concepción y la llanura de arenas negras del Biobío”, corresponde a una planicie de origen fluvio-marino sobre la cual se han depositado grandes espesores de arenas aluviales del río Biobío. Morfológicamente está constituida por una terraza fluvial interior alta y estrecha, y a una extensa llanura, en el margen occidental, producto de la migración del cauce del río Biobío, que ha sido modelada por acción eólica y marina (Mardones, 1978 y Mardones y Brito, 1979). Dentro de esta última, el río Biobío ha inscrito dos grandes paleocanales correspondientes a los cauces abandonados, el más antiguo se ubica entre Hualpén y Carriel Sur, da salida a la bahía de Concepción al N, y otro hacia la Bahía de San Vicente, en el sector del estuario de Lengua, al S de la terraza de Hualpén (Mardones *et al.*, 1994).

Dos conjuntos de cerros islas emergen de la llanura fluvio-marina: uno dispuesto en dirección NE-SW, adosado al N de la cordillera de la Costa, ubicado en la comuna de Concepción hasta el sector

de Cosmito, que está compuesto por los cerros Chacabuco, La Pólvara, Chepe y Cosmito, con cotas máximas entre 70 y 100 m s.n.m., donde el de mayor elevación es el cerro Cosmito con 100 m s.n.m. El segundo conjunto tiene orientación de NW-SE, se localiza en las comunas de Talcahuano y Hualpén, constituido por los cerros San Martín, San Miguel, Perales y La U (Mardones, 1978).

Gajardo (2022), realizó un mapa geomorfológico de la zona sur de la península de Tumbes (Figura 2.3) donde, además de las plataformas de abrasión marinas, describe las siguientes unidades geomorfológicas dentro del área de estudio:

- **Acantilado marino estabilizado**

En las zonas más cercanas al escarpe de la Falla San Vicente (aproximadamente 100 m desde la falla) en los cerros La Gloria, La Unión, Zaror y Alegre.

- **Laderas de cordones y plataformas: pendientes largas o débiles**

Correspondiente a las zonas a más de 100 m al NW de la traza de la Falla, en el cerro Zaror, Alegre, Buena Vista y la totalidad de los cerros Cornou y Bagnara.

- **Escarpe de erosión fluvial fuerte**

A esta unidad pertenecen las quebradas presentes en el área de estudio, como son las quebradas entre los cerros La Gloria, La Unión y Zaror, y las quebradas al norte del sector de La Gloria.

- **Terrazas y plataformas de abrasión marina en roca sedimentaria de Edad Terciaria y/o en rocas metamórficas de edad Paleozoica. Nivel Superior (>100 m)**

Esta se concentra en las zonas al NW de la unidad de Abrasión marina estabilizada en el cerro La Unión y al NW de la unidad de Laderas de cordones y plataformas en el cerro Zaror.

- **Terrazas y plataformas de abrasión marina en roca sedimentaria de Edad Terciaria y/o en rocas metamórficas de edad Paleozoica. Nivel medio (50-100 m)**

Se encuentra entre la unidad de Abrasión marina estabilizada y Escarpe de erosión fluvial fuerte en el sector de La Gloria.

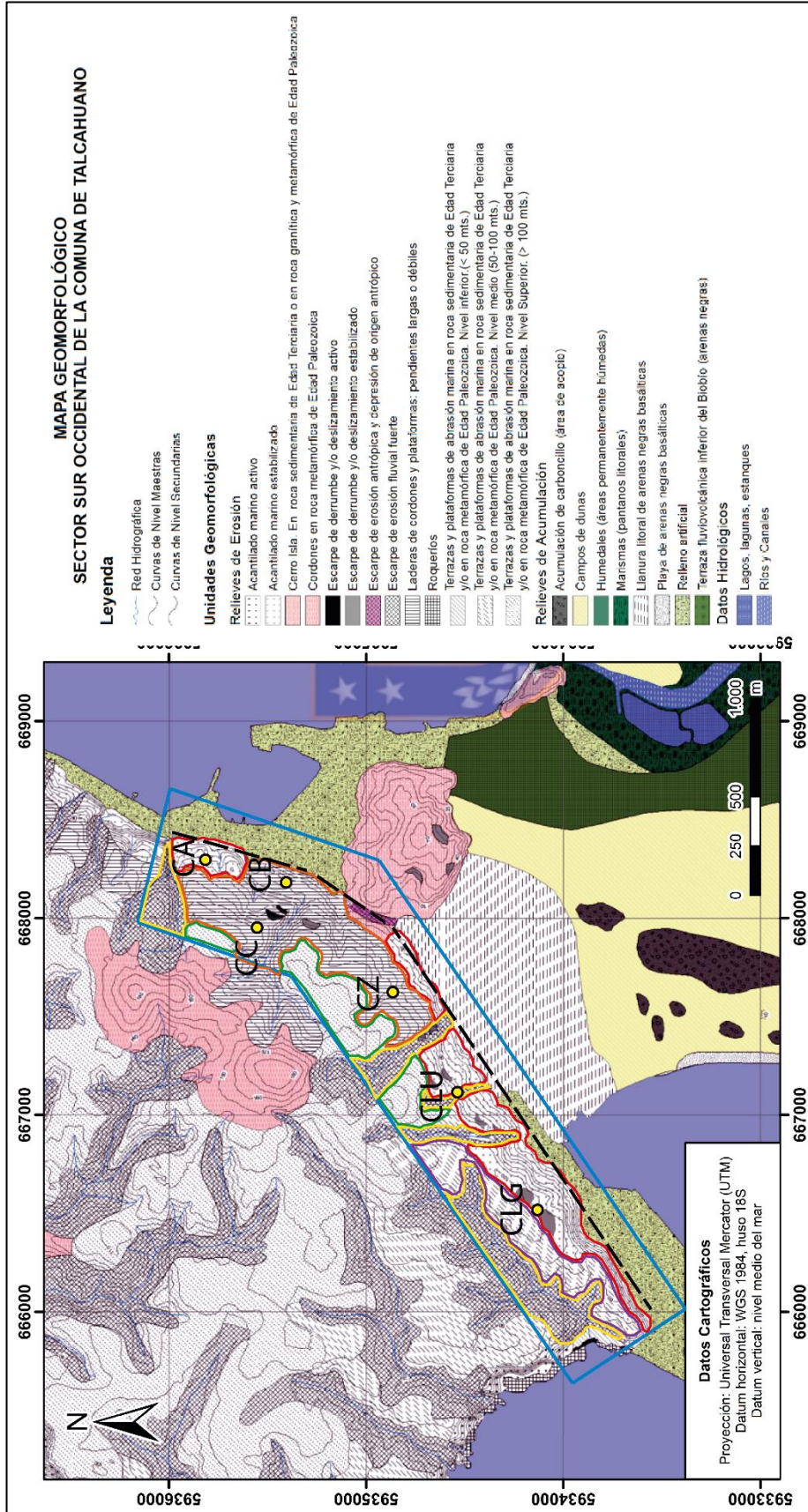


Figura 2.3: Mapa Geomorfológico de la Zona Sur de la Península de Tumbes y de. Sector de Talcahuano Aledaño. Modificado de Gajardo (2022). En azul se delimita el área de estudio y en línea segmentada negra la Falla San Vicente, CLG; cerro La Giroia, CLU; cerro La Unión, CZ; cerro Zaror, CC; cerro Cornou, CB; cerro Bagnara, CA; cerro Alegre. Limitado por rojo la unidad Acantilado marino estabilizado. En naranja Laderas de cordones y plata formas. En amarillo escarpe de erosión fluvial fuerte. En verde Terrazas y plataformas de abrasión marina nivel medio. En morado Terrazas y plataformas de abrasión marina nivel superior.

3. MARCO GEOLÓGICO

3.1. GENERALIDADES

Galli (1967) en su trabajo “Geología Urbana y Suelo de Fundación de Concepción y Talcahuano, Chile”, junto con mencionar la existencia de un Basamento Cristalino constituido por un complejo metamórfico (conformado principalmente por filitas de la facies esquistos verdes) intruido por un Batolito Paleozoico de rocas graníticas, que aflora en la península de Tumbes y en algunos cerros de Talcahuano y Concepción.

Sobre el basamento paleozoico, yace un conjunto de rocas sedimentarias (Tabla 3.1), que divide en 5 formaciones, distribuidas en los cerros islas de ambas ciudades: Formación Quiriquina (Campaniano-Maastrichtiano) marino epicontinental; Formación Cosmito (Eoceno) continental costanero, con algunos niveles de carbón; Formación Andalién (Plioceno-Pleistoceno) continental pedemontano; Formación Tumbes (Plioceno-Pleistoceno) marino epicontinental y continental-costanero; y Formación Huachipato (Pleistoceno y Reciente) fluvio-deltaico y estuarial-marino, con depósitos recientes continentales y marinos (Galli, 1967).

Tabla 3.1: Formaciones geológicas del área de Concepción y Talcahuano. Modificado de Galli (1967).

EDAD	FORMACIÓN	ROCAS	FÓSILES	AMBIENTE DE SEDIMENTACIÓN	ESPESOR (metros)
Reciente		Arena, limo, arcilla, turba. Material derrumbado. Coluvio. Relleno artificial		Continental, marino, mixto	Muy variable
Pleistoceno	Huachipato	Arena, limo, arcilla, grava	<i>Trachammina inflata</i> , <i>Ammonia beccarii</i> ex gr. <i>parkinsoniana</i> , <i>Bucella peruviana</i> , <i>Charophyta</i> sp. Restos de plantas (especialmente semillas). Restos de moluscos, <i>Balanus</i> sp.		40
Plioceno	Tumbes y Andalién	Tumbes: Grauwacas Andalién: Arenisca y conglomerados		Tumbes: Marino y continental costanero. Andalién: Continental pedemontano.	Tumbes: 15 y Andalién: 30
Eoceno	Cosmito	Lutita, toba, arenisca conglomerado, carbón	Restos de plantas	Continental costanero	300
Campaniano-Maastrichtiano	Quiriquina	Arcosa, subarcosa, conglomerado	<i>Cardium acucostatum</i> , <i>Pecten delicatulus</i> , <i>Trigonia hanetiana</i> , <i>Patella auca</i> , <i>Nautulus (Eutrephoceras) subplicatus</i> , <i>Grossouvrites gemmatus</i> , <i>Maorites densicostatus</i> , <i>Pliosaurus chilensis</i> .,	Marino epicontinental	50

En la Tabla 3.2. se hace un cuadro comparativo de las diferentes unidades litoestratigráficas definidas para la zona de Arauco y Concepción, con el fin de comprender mejor las nomenclaturas utilizadas por diferentes autores.

Tabla 3.2: Cuadro comparativo de unidades estratificadas de Arauco y Concepción.

Unidades estratificadas de la Cuenca Carbonífera de Arauco	Unidades estratificadas de la zona de Concepción-Talcahuano				
NOMBRE ACTUAL	Galli 1967	Quinzio <i>et al.</i> 2003 y 2011		Velásquez <i>et al.</i> (en preparación)	EDAD
	Arena, limo, arcilla, turba. Material derrumbado. Coluvio. Relleno artificial	Depósitos Fluviales Actuales	Depósitos Marinos Modernos	Depósitos Antrópicos Depósitos Aluviales Depósitos de Remoción en Masa Depósitos Coluviales Depósitos Fluviales Depósitos Deltaicos Depósitos Litorales	Holoceno
	Formación Huachipato	Formación Huachipato	Depósitos Fluviales y Marinos Antiguos		
		Estratos Molino del Sol-Punta de Parra		Estratos Molino del Sol	Pleistoceno
Formación Tubul		Formación Andalién		Formación Andalién	Plioceno
Formación Ranquil					Mioceno
Formación Millongue					
Formación Trihueco					
Formación Boca Lebu					
Formación Curanilahue - Miembro Lota - Miembro Intercalación - Miembro Colico	Formación Cosmito	Formación Cosmito-Curanilahue		Formación Curanilahue	Eoceno
Formación Pilpilco					Paleoceno-
Formación Quiriquina	Formación Quiriquina	Formación Quiriquina		Formación Quiriquina	Maastrichtiano

3.2. ROCAS METAMÓRFICAS

3.2.1. Serie Occidental o Complejo Metamórfico Tumbes

Corresponde a una serie de alto P/T del Basamento Metamórfico (Aguirre *et al.*, 1972 en Hervé, 1977) la cual aflora de manera continua en la costa de Chile, en dos secciones: entre los 34° y 36°S, y desde los 38° hasta 42°S (Glodny *et al.*, 2008). Fuera de estas dos zonas, se observan rocas

pertenecientes a esta serie en la península de Tumbes y la desembocadura del río Biobío (Mendoza, 2001). Dentro del área de estudio, esta unidad conforma gran parte de la península de Tumbes (Quinzio *et al.*, 2011). Velásquez *et al.* (en preparación) las describen como Complejo Metamórfico Tumbes.

La Serie Occidental ha sido interpretada como una secuencia ofiolítica desmembrada, que formaba parte de la corteza oceánica (Hervé, 1988), y está compuesta principalmente de micaesquistos, metabasitas; en menor medida, metacherts y serpentinitas, las cuales se encuentran, en su mayoría, altamente deformadas y completamente recristalizadas a facies de esquistos verdes de transición a esquistos azules (Hervé, 1977; Hervé, 1988; Glodny *et al.*, 2008).

Collao *et al.* (1990) subdividen la Serie Occidental en dos unidades: Unidad Tirúa: constituida principalmente de esquistos verdes (metabasitas) con intercalación de micaesquistos y en menor medida metacherts y serpentinitas; y Unidad Nahuelbuta: conformada en gran parte de micaesquistos con intercalaciones de metachert (no mineralizado y ferruginosos) y cantidades subordinadas de serpentinitas. La Unidad Tirúa se sitúa en la costa, y al este de ella la Unidad Nahuelbuta.

Hervé *et al.* (1984), con el método de datación de Rb-Sr en roca total, asignan una edad de metamorfismo de la Serie Occidental de 311 ± 10 Ma en el sector de Pichilemu. Glodny *et al.*, (2008), utilizando la misma metodología y determinaron que la edad de metamorfismo en la provincia de Arauco es de $294,3 \pm 9,4$ Ma, en un micaesquisto de granate, y de $272,7 \pm 2,8$ Ma, en un esquisto de albita.

3.3. ROCAS INTRUSIVAS

3.3.1. Batolito Costero del Sur

Definido por Hervé *et al.* (1987), corresponde a una franja de orientación NNE-SSW que aflora de manera continua en la Cordillera de la Costa desde los $32^{\circ}30'S$ hasta los $38^{\circ}S$, y de manera esporádica entre los $39^{\circ}S$ y $41^{\circ}S$ (Martin *et al.*, 1999 en Creixell, 2001) y territorio norpatagónico argentino (Franzese, 1995 en Creixell, 2001). Intruye a las rocas del Basamento Metamórfico (Serie Oriental), en la cual generó 3 zonas de metamorfismo de contacto: zona de biotita, de andalucita y

de silimanita (Creixell, 2001). Los Estratos Patagual-El Venado (Quinzio *et al.*, 2011) o las Pizarras Patagual-El Verado (Vásquez *et al.*, en preparación) no muestran señales de metamorfismo de contacto, ni la zonación que se reconoce en la Serie Oriental. El Batolito Costero del Sur Infrayace en inconformidad Formación Santa Juana en la localidad del mismo nombre (Cucurella, 1978 en Creixell, 2001) y a la Formación Quiriquina y Curanilahue (Quezada, 1996).

Litológicamente, está compuesto mayoritariamente de granodioritas y tonalitas de biotita y hornblenda (Parada, 1990 en Creixell, 2001), la cual presenta una zonación lateral, donde hacia los márgenes las rocas son más diferenciadas como cuerpos pegmatíticos y granitos de biotita y muscovita (Creixell, 2001).

Creixell (2001) describe 3 sub-unidades en el Batolito Costero del Sur en la región del Biobío: Tonalitas de Santa Juana, Granitoides de Nahuelbuta y Granitoides de Concepción, ninguna de ellas aflora en el área de estudio, aunque la última lo hace en algunos cerros islas y en el borde occidental de la cordillera de la Costa en Concepción.

3.3.1.1. Tonalitas de Santa Juana

Según Creixell (2001) está compuesto de tonalitas de anfíbol cálcico y ferromagnesiano, en menor medida, de dioritas cuarcíferas. Aflora en las cercanías de la localidad de Santa Juana y es comagmático a las rocas de Granitoides de Nahuelbuta, correspondiente a las facies marginales orientales del plutón (Creixell, 2001).

3.3.1.2. Granitoides de Nahuelbuta

Consiste en granodioritas de biotita y anfíbol cálcico, con cantidades subordinadas de tonalitas de biotita y anfíbola cálcica, que se distribuyen en la parte central de la Cordillera de Nahuelbuta; entre las latitudes de Curanilahue y Cañete, y su margen occidental; en el contacto entre los granitoides y el Basamento Metamórfico (Creixell, 2001). Es comagmático a la sub-unidad de Tonalitas de Santa Juana, donde representa a las facies centrales (Creixell, 2001).

3.3.1.3. Granitoides de Concepción

Definido por Creixell (2001), consisten en granitoides altamente diferenciados que afloran en las inmediaciones de la ciudad de Concepción. Litológicamente están constituidos por monzogranitos de biotita y, en menor medida, tonalitas de biotita y mica blanca (Creixell, 2001). A diferencia de las sub-unidades anteriores, Creixell (2001) señala que las rocas de los Granitoides de Concepción corresponden a otro plutón del Batolito Costero del Sur.

3.3.2. **Plutón Hualpén**

Descrito por Creixell (2001), el Plutón Hualpén es un cuerpo intrusivo epizonal de pequeña dimensión, de composición monzogranítica, que aflora en la zona norte de la península de Hualpén y de forma dispersa en la de Tumbes. Esta unidad intruye a esquistos pelíticos de la Serie Occidental, con la presencia de una aureola de contacto de poca extensión (<1 km) (Creixell, 2001).

Las rocas que componen a este plutón son, principalmente, monzogranitos de grano medio a grueso, con diques aplíticos y andesíticos. También se encuentran diques de composición tonalítica-porfídica, los cuales afloran en el sector oriental de la península de Tumbes (Creixell, 2001).

Hervé *et al.* (1988 en Creixell, 2001) asignan la edad de estas rocas en varias localidades, a través del método K-Ar en concentrados de biotita, con resultados que fluctúan entre 218 y 202 Ma (Triásico). En el área de Concepción, las rocas fueron datadas en 215 ± 4 Ma. Utilizando otro método, que corresponde al de Rb-Sr en la roca total, entrega valores de 215 Ma (Creixell *et al.*, 2002) y de 222 ± 2 a 216 ± 1 Ma (Lucassen *et al.*, 2004). Todas estas dataciones son del Triásico Superior entre el Noriano y Rhaetiano (Nórico-Rético), que es prácticamente la misma edad de la Formación Santa Juana.

3.4. **ROCAS SEDIMENTARIAS**

3.4.1. **Formación Quiriquina**

Fue definida formalmente por Biró-Bagóczy (1982), corresponde a las capas fosilíferas del Cretácico Superior de la región del Biobío. Su localidad tipo se ubica en la bahía Las Tablas, en el sector nororiental de la Isla Quiriquina, y su localidad paratipo en Caleta Cocholgue, al norte de

Tomé (Biró-Bagóczy, 1982).

Esta unidad aflora en Isla Quiriquina, Dichato, Tomé, Cocholgüe, Punta de Parra, Lirquén, Penco, y en varios de los cerros de Talcahuano y Concepción (Biró-Bagóczy, 1982). Sobreyace en inconformidad a los Granitoides de Concepción y al Basamento Metamórfico, e infrayace en paraconformidad a las formaciones Pilpilco y Curanilahue (Salazar, 2004). En el área de estudio esta aflora en el sector del cerro La Gloria.

Salazar *et al.* (2015) proponen cuatro unidades para esta formación, todas de origen marino, las cuales de base a techo corresponden a: conglomerado basal, compuesto por clastos polimícticos de esquistos, metarenitas y cuarzo; areniscas amarillas, con estratificación cruzada planar; unidad de coquina, que consiste en areniscas verdes glauconíticas con intercalaciones de coquina; y la unidad de arenisca limosa con concreciones de arenisca calcárea y predominancia de fósiles de ammonites.

Por los ammonites presentes, Biró-Bagóczy (1982) asigna a la Formación Quiriquina una edad Campaniano-Maastrichtiano. Posteriormente, Salazar (2004) restringe la edad a la parte superior del Maastrichtiano inferior o comienzos del Maastrichtiano superior, también por su contenido fosilífero.

Quinzio *et al.* (2011) integran a esta formación los estratos marinos superiores, que afloran en el área del Gran Concepción (y que fueron considerados por autores anteriores como parte de la Formación Pilpilco), basándose en que el contacto entre ambas unidades es concordante en partes gradual o en paraconformidad y, sobre todo, porque sus litologías son similares (principalmente areniscas verdes glauconíticas), y amplían su rango al Paleoceno en base a que en la parte superior de la Formación Quiriquina, en los niveles marinos que se consideraban como la base de la Formación Cosmito o de la Formación Pilpilco (en sectores de Concepción, Talcahuano y Tomé), se han encontrado dientes de elasmobranquios de esa edad. Los ambientes interpretados para la Formación Quiriquina son marinos transgresivos y el de la Formación Pilpilco es marino regresivo.

3.4.2. Formación Pilpilco

Definida inicialmente por Muñoz-Cristi (1946) dentro del “Piso de Curanilahue” como el

“Horizonte Pilpilco” respecto a las areniscas verdes de grano fino con abundante material andesítico en la península de Arauco. Posteriormente es redefinida por el mismo autor en 1968 como Formación Pilpilco. Su localidad tipo corresponde al sector del río Pilpilco, al sur de Curanilahue (Pineda, 1983).

Se distribuye en el sector oriental de la península de Arauco, al norte de Ramadilla, en las minas de Lota (Muñoz-Cristi, 1946; Frutos, 1967), la región de Laraquete (Muñoz-Cristi, 1946), en sondajes al sur de Arauco y al oeste de Carampangue (Muñoz-Cristi, 1968). Sobreyace en paraconformidad a la Formación Quiriquina y en inconformidad al Basamento Metamórfico, además, infrayace en concordancia a la Formación Curanilahue (Pineda, 1983).

Pineda (1983) identifica dos sectores de sedimentación característica de la Formación Pilpilco en la península de Arauco; al norte de Ramadilla aflora una secuencia continental que consiste en brechas, conglomerados, areniscas conglomerádicas, areniscas verdes de grano fino a medio y arcillas. Por otro lado, al sur de Ramadilla se reconoce una secuencia marina con una base de conglomerado fino a arenisca conglomerádica sobre la cual se deposita una alternancia de areniscas de grano fino a medio con areniscas de grano grueso.

Muñoz-Cristi (1946) determina, basándose en relaciones estratigráficas, una edad de Eoceno inferior, pero posteriormente Muñoz *et al.* (2008 en Inostroza, 2018) en base de su contenido fosilífero le otorgan una edad máxima paleocena.

3.4.3. Formación Curanilahue

Definida inicialmente como “Piso de Curanilahue” por Muñoz-Cristi (1946) y posteriormente redefinida formalmente como Formación Curanilahue en 1956 por el mismo autor, consiste en areniscas, en parte conglomerádicas, y arcillas asociadas a mantos carboníferos, las cuales se intercalan con areniscas verdes fosilíferas (Pineda, 1983).

Su localidad tipo se ubica en Curanilahue en el sector este de la meseta de Arauco (Muñoz-Cristi, 1956 en Pineda, 1983). Aflora de manera esporádica como una franja paralela al oeste de las rocas del Cretácico Superior, desde la península de Arauco hasta Concepción. Sobreyace en

concordancia a la Formación Pilpilco y a la Formación Quiriquina, e infrayace de la misma manera a la Formación Boca Lebu (Pineda, 1983). En la península de Tumbes, esta aflora en el cerro David Fuentes.

Muñoz-Cristi (1946) define tres miembros en esta Formación, dos de origen continental y uno de origen marino, los cuales corresponden de base a techo a: Miembro Lota (continental), compuesto por areniscas gruesas basales y areniscas medias a finas hacia techo, con intercalaciones de arcillas asociadas a siete mantos de carbón; Miembro Intercalación (marino), constituido de areniscas verdes glauconíticas de buena selección; y Miembro Colico (continental), el cual es litológicamente similar al Miembro Lota, pero los mantos de carbón son menores (Pineda, 1983).

Según el contenido fosilífero del Miembro Intercalación, la edad de la Formación Curanilahue corresponde al Eoceno inferior (Tavera, 1942 en Pineda, 1983). Galli (1967) correlaciona esta formación con la Formación Cosmito, descrita en el área de Concepción. Inostroza (2018) establece que la Formación Cosmito podría incluirse en la Formación Curanilahue.

En la carta geológica de Concepción-Talcahuano de Velásquez *et al.* (en preparación), se considera como parte de la Formación Curanilahue a las rocas definidas como Formación Cosmito por Galli (1967), ubicadas en la parte continental y también a las de la Formación Cerro Alto, que están en la isla Quiriquina, debido a que estas denominaciones corresponden a nombres más locales, mientras que el que la Formación Curanilahue, es más conocida y de mayor uso en la literatura. Además, se incluyen en esta formación a los estratos conglomerádicos y areniscas verdosas de una potencia máxima de 5 m distribuidos en los cerros islas de Talcahuano.

3.4.4. Formación Cosmito

Fue definida por Galli (1967) para denominar a una secuencia constituida principalmente por lutitas y areniscas, con niveles de conglomerados y carbón, asignadas al Eoceno, que afloran concordantemente sobre la Formación Quiriquina, en los cerros de Concepción y Talcahuano. Su nombre proviene de la estación de ferrocarriles de Cosmito, ubicada a 5 km al N de Concepción, cercana al lugar designado por como localidad tipo. Infrayace en discordancia angular a las formaciones Andalién y Huachipato, y a los sedimentos del Cuaternario (Galli, 1967). Además,

flora en Cocholgue, Punta Montecristo, Miramar, Cosmito y Penco (Galli, 1967; Inostroza, 2018).

Las lutitas y areniscas predominan y en la mayoría de sus afloramientos están alterados y son de colores pardo-amarillento a rojizo. En sectores la lutita es carbonosa, fisible y puede contener fósiles de plantas y, localmente, está asociada a mantos de carbón tipo lignito. Las areniscas tienen granulometría fina a gruesa, en partes con niveles con estratificación cruzada, lo que indica que su origen es fluvial y eólico. En menor medida también se encuentran niveles de areniscas conglomerádicas y de conglomerados, dentro de las capas de arenisca.

Por las características de sus depósitos Galli (1967), indica que la Formación Cosmito es de ambiente lagunar-costanero, asociados a pantanos y dunas litorales. Los niveles de conglomerados de escasa distribución y con clastos de tamaño máximo de 20 cm serían de origen fluvial.

La Formación Cosmito es correlacionada con la Formación Curanilahue, basándose en sus características litoestratigráficas, lo que le otorga, según Galli (1967), una edad Eoceno.

3.4.5. Formación Tumbes

La Formación Tumbes fue definida por Galli (1967), para designar a las areniscas con espesores cercanos a los 15 m, que se distribuyen bajo las terrazas VI y VII de la península de Tumbes entre los 80 y 145 m s.n.m. Yacen en inconformidad sobre el Basamento Metamórfico y el Batolito Costero del Sur en la península de Tumbes (Galli, 1967).

Litológicamente son grauvacas de color naranja a pardo-amarillento, de grano medio con presencia de cuarzo de origen metamórfico y clastos redondeados de roca volcánica, que varía a grauvacas submaduras a maduras (según clasificación de Folk 1959), en las cercanías de bahía Taiguén (Galli, 1967).

Los sedimentos se habrían acumulado en fondos litorales y sublitorales marinos de gran energía que incluyen depósitos de origen eólico, probablemente en una antigua planicie costanera, formada por la regresión del mar del Plioceno o Cuaternario Antiguo (Pleistoceno) (Galli, 1967).

La edad de esta formación, en base a sus relaciones estratigráficas y por correlaciones con otras formaciones de la península de Arauco, es Plioceno a Pleistoceno (Galli, 1967).

3.4.6. Formación Andalién

Definida por Galli en 1967 y su localidad tipo corresponde a las serranías bajas entre el cerro Verde (al NW de Concepción) y la comuna de Penco. Su nombre proviene del río Andalién, el que bordea por el NE a la ciudad de Concepción (Galli, 1967).

Aflora en el cerro Bellavista en Penco, Lomas de San Sebastián, cerros de Cosmito y laguna Redonda (García, 2004 en Rodríguez, 2023). Según Quezada (1996), esta formación sobryace en discordancia angular a las formaciones Quiriquina y Curanilahue, e infrayace en paraconformidad a sedimentos no consolidados correspondientes a “Arenas del Biobío” (definidas por el mismo autor) o corresponde a la actual superficie de erosión.

Su litología consiste en areniscas y conglomerados, en donde la matriz de estos últimos es arenítica de granulometría media a gruesa, con fenoclastos subredondeados de filita, micacita, metacuarcita, sílexita y rocas graníticas (Galli, 1967).

Galli (1967) determina a esta unidad una edad Plioceno-Pleistoceno basándose en relaciones estratigráficas.

3.4.7. Formación Huachipato

Los depósitos de arenas de color negro y gris oscuro, distribuidos en el área entre la bahía de San Vicente y la de Talcahuano, la ribera del río Biobío, en los escarpes de la cordillera de la Costa, la península de Tumbes y que forman parte del suelo de fundación de Concepción fueron definidos por Galli (1967) como Formación Huachipato, y recibe su nombre por la planta siderúrgica de Huachipato.

Esta formación sobryace en inconformidad al Basamento Metamórfico y las rocas intrusivas paleozoicas, y está en discordancia angular a las formaciones Quiriquina, Cosmito, Curanilahue y Andalién (Galli, 1967; Quezada 1996). Su límite superior corresponde a la actual superficie de

erosión o depositación (Quezada, 1996).

Consiste en arenas de granulometría fina a muy gruesa, de color negro castaña a gris oscuro, compuestas principalmente de fragmentos de rocas basálticas, de formas irregulares. En menor proporción, también posee granos de magnetita, plagioclasa, hematita, micas, olivino, cuarzo y vidrio volcánico. Dentro de estas arenas se intercalan capas de limos y arcilla de igual color, con algunos niveles de gravas angulosas a subredondeadas (Galli, 1996).

Los ambientes de sedimentación en partes son marinos y mixtos, como lo indica la presencia de su contenido fosilífero: foraminíferos, moluscos, *Balanus* sp. y restos de plantas, especialmente semillas (Martínez Pardo en Galli, 1967). Por este motivo y debido a que estos sedimentos aún son transportados por el río Biobío en la actualidad, Galli (1967) le asigna una edad Pleistoceno Superior-Reciente. De todos modos, los sedimentos corresponden mayoritariamente al Holoceno, debido a la alta presencia de material derivado del lahar producido por el volcán Antuco de edad de 7.000 años (Velásquez *et al.*, en preparación).

3.4.7. Depósitos fluviales y marinos

Los depósitos fluviales y marinos antiguos son aquellos asociados a los cursos superficiales de los ríos Biobío y Andalién, y a las zonas de costa con playas y dunas antiguas. Están compuestos de arenas de grano fino a grueso, y localmente ripio (Quinzio *et al.*, 2011).

Los depósitos marinos modernos son las arenas de las playas actuales y las dunas litorales (Quinzio *et al.*, 2011). Se distribuyen en una zona litoral angosta, la cual se encuentra delimitada por los niveles del mar en bajamar y pleamar que bordean las bahías de San Vicente y Concepción (Galli, 1967).

Litológicamente los depósitos marinos son similares a las arenas de la Formación Huachipato, pero tienen diferencias en su mineralogía y textura producto del oleaje que retrabaja los clastos (Galli, 1967).

3.4.8. Depósitos de remociones en masa

Definidos por Galli (1967) como “Materiales derrumbados”, corresponden a todo el material transportado producto de remociones en masa en el sector. En el área de estudio se distribuyen principalmente en las barrancas de la península de Tumbes, pero también se observan a lo largo de Talcahuano y Concepción.

Se el resultado de los procesos gravitacionales tales como deslizamientos, reptación, caída de roca y/o tierra, entre otros, durante períodos de lluvias torrenciales, sismos, alteración antrópica del terreno, alto nivel de meteorización, fracturamiento o presencia de arcillas plásticas en las rocas subyacentes. Estos depósitos se encuentran en equilibrio inestable y se han depositado en el tiempo Reciente (Galli, 1967).

3.5. MARCO ESTRUCTURAL

3.5.1. Zona de Falla Biobío

Descrita como “Zona de Falla Biobío” (Bohm *et al.*, 2002; Echtler *et al.*, 2003 en Moreno 2004; Melnick *et al.*, 2003), o como “Lineamientos Biobío” por Moreno (2004). Corresponde a una falla de rumbo sinistral (Rosenau, 2004 en Basso & Cembrano, 2009) con una amplia densidad de lineamientos (Moreno, 2004) de dirección NW-SE que se extiende desde la península de Tumbes hasta el Valle Central (Moreno, 2004), aunque otros autores la prolongan hasta la Cordillera de los Andes (Bohm *et al.*, 2002; Melnick *et al.*, 2003) (Figura 3.1).

Esta estructura sería la causante de la dirección del cauce del río Biobío en la zona costera (Quezada, 1996; Moreno, 2004). Jara *et al.* (2015) proponen como prueba de la existencia de esta Zona de Falla el cambio de elevación de la terraza MIS 5e al sur del río Biobío (Coronel) y el norte de este (Penco).

Esta zona de falla se considera generalmente activa desde el Paleozoico (Rapela & Pankhurst, 1992 en Bohm *et al.*, 2002), y si bien se extiende hasta la Cordillera de los Andes, la sismicidad superficial indica que su zona sísmicamente activa se limita principalmente en el antearco en la actualidad (Bohm *et al.*, 2002).

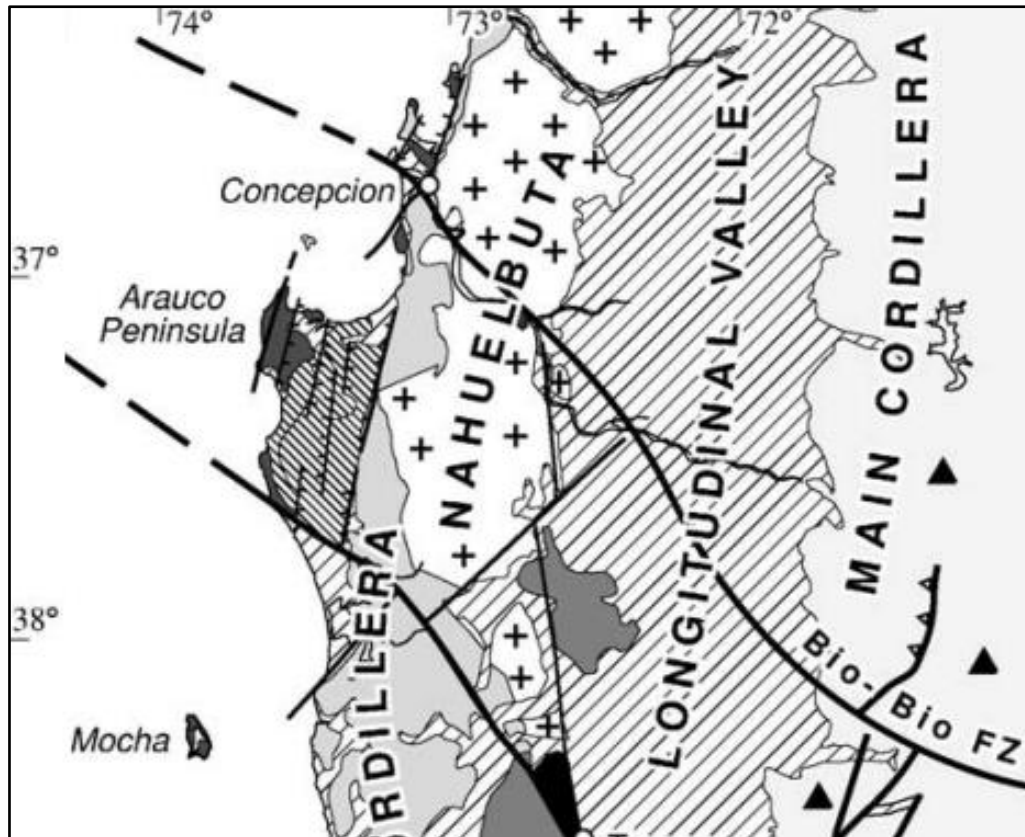


Figura 3.1: Traza de la Zona de Falla Biobío. Modificado de Bohm *et al.* (2002).

3.5.2. Falla San Vicente

Descrita por Galli en 1967, corresponde a una falla normal de gran ángulo que pone en contacto el Basamento Metamórfico y la Formación Quiriquina con rocas sedimentarias holocenas. Su traza constituye el límite suroriental y oriental de la península de Tumbes, desde Caleta Gloria hasta la Base Naval de Talcahuano (Galli, 1967) (Figura 3.2). Galli (1967) no descarta la posibilidad de que su extensión sea mayor.

La Falla San Vicente tiene rumbo que varía de NE-SW a N-S. En San Vicente corresponde a N53°E, mientras que en la Base Naval es prácticamente N-S. En 1961, producto de una excavación próxima a Caleta Gloria, fue posible observar el plano de falla, el cual estaba caracterizado por una zona de salbanda de falla, de 1 m de espesor, con manto de 80° hacia el SE (Galli, 1967). Si bien el desplazamiento en el manto de la falla no está determinado, la presencia de depósitos litorales de edad Pleistoceno Superior, en la zona superior del bloque NW, señala como mínimo un salto de 120 m (SERNAGEOMIN, 2024a).

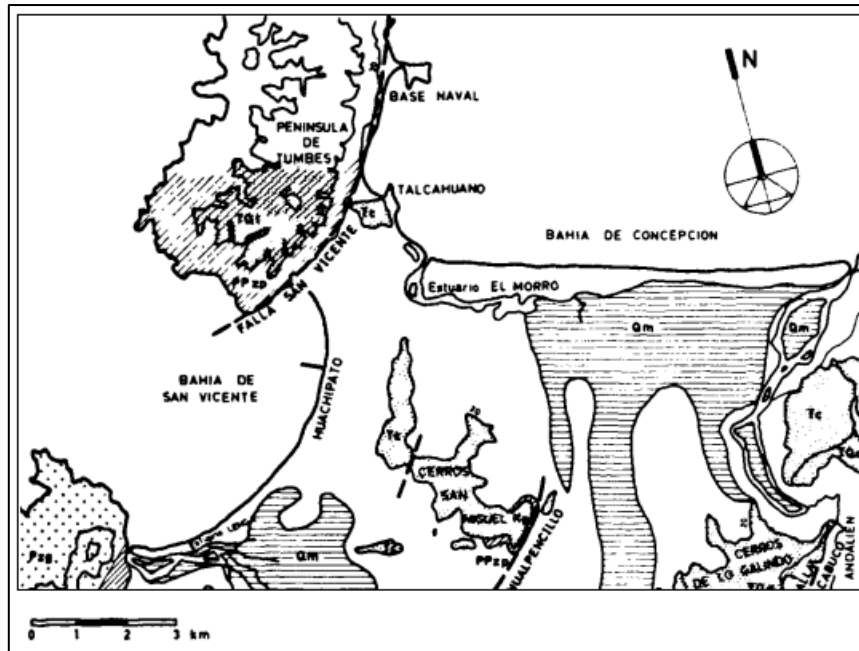


Figura 3.2: Traza de la Falla San Vicente. Poblete y Dobry (1968) modificado del Mapa Geológico de Galli (1967).

Respecto a su actividad, esta falla es intermitente (Illies, comunicación oral en Galli, 1967), donde presenta reactivaciones como, por ejemplo, en los terremotos de 1939 y 1960, en los cuales ocurrieron desplazamientos decimétricos (Galli, 1967).

Quinzio (comunicación personal) en base a los lineamientos presentes en la península de Tumbes, indica que la falla San Vicente no se curva hacia el N en el sector de la Base Naval, como muestra la Figura 3.2., sino que en realidad corresponde a uno de los 3 lineamientos (fallas) que limitan la parte suroriental y oriental de la península (Figura 3.3). Los 3 lineamientos, que se han interpretado como la falla San Vicente, tienen direcciones: $N10^{\circ}E$, $N30^{\circ}E$ y $N55^{\circ}-60^{\circ}E$, todos con el bloque elevado al NW y el descendido al SE, lo que evidencia que son fallas normales que mantean hacia el SE. Con esto, la falla San Vicente es la del lineamiento de dirección $N55^{\circ}-60^{\circ}E$, que se corta con la del lineamiento $N30^{\circ}E$ entre los cerros Buena Vista y David Méndez (específicamente en la intersección de las calles Almirante Latorre y Valdivia). El lineamiento de dirección $N10^{\circ}E$, se cortan en la punta donde está la Astillería Asmar. La unión de estos 3 lineamientos es lo que Galli (1967) denomina Falla San Vicente.

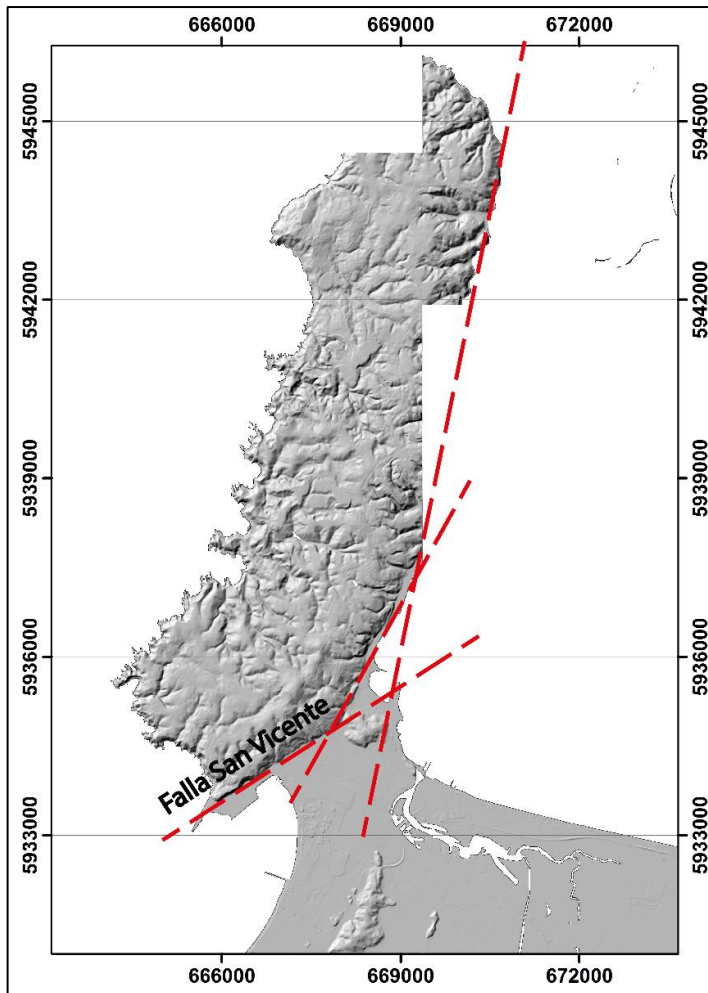


Figura 3.3: Fallas del límite suroriental y oriental de la península de Tumbes según Quinzio. Comunicación personal.

3.5.3. Deformación Serie Occidental

Las rocas de la Serie Occidental tienen un gran nivel de deformación dúctil, con foliación de tipo milonítica y desarrollo de bandas de cizallamiento a escala mesoscópica (Ardiles *et al.*, 2003).

La foliación S_1 corresponde a una esquistosidad penetrativa constituida por un fino bandeamiento de alternancias de capas micáceas a feldespato-micáceas con bandas cuarcíferas (Ardiles *et al.*, 2003), y está obliterada por una segunda foliación S_2 dominante penetrativa subhorizontal (Willner *et al.*, 2000; Glodny *et al.*, 2005; Glodny *et al.*, 2008), la cual es subparalela a la estratificación y el S_1 relicto (Willner *et al.*, 2000). Además, en ciertos sectores es posible observar una tercera foliación (Hervé, 1977; Muñoz, 2007) que da origen a *kink bands*, frecuentemente acompañadas por vetas de cuarzo paralelas a S_3 (Hervé, 1977).

El crecimiento mineral y los ejes de plegamiento poseen una tendencia de orientación NW-SE (Kato, 1985; Godoy & Kato, 1990; Martin *et al.*, 1999; Glodny *et al.*, 2005 en Glodny *et al.*, 2008) y la dirección de las mineralizaciones de cuarzo son principalmente paralelas a la foliación (Glodny *et al.*, 2008).

Dentro de la península, Geología de Campo II (2021) identifica en el sector de Tumbes una orientación de foliación mayoritariamente NW-SE y en menor medida otra NE-SW, con manteos que varían entre 20°-70° al NW y NE. En la parte sur de la península, la dirección preferencial de foliación es NNE-SSW, con planos que mantean al E con ángulos entre 33°-48° (Figura 3.4).

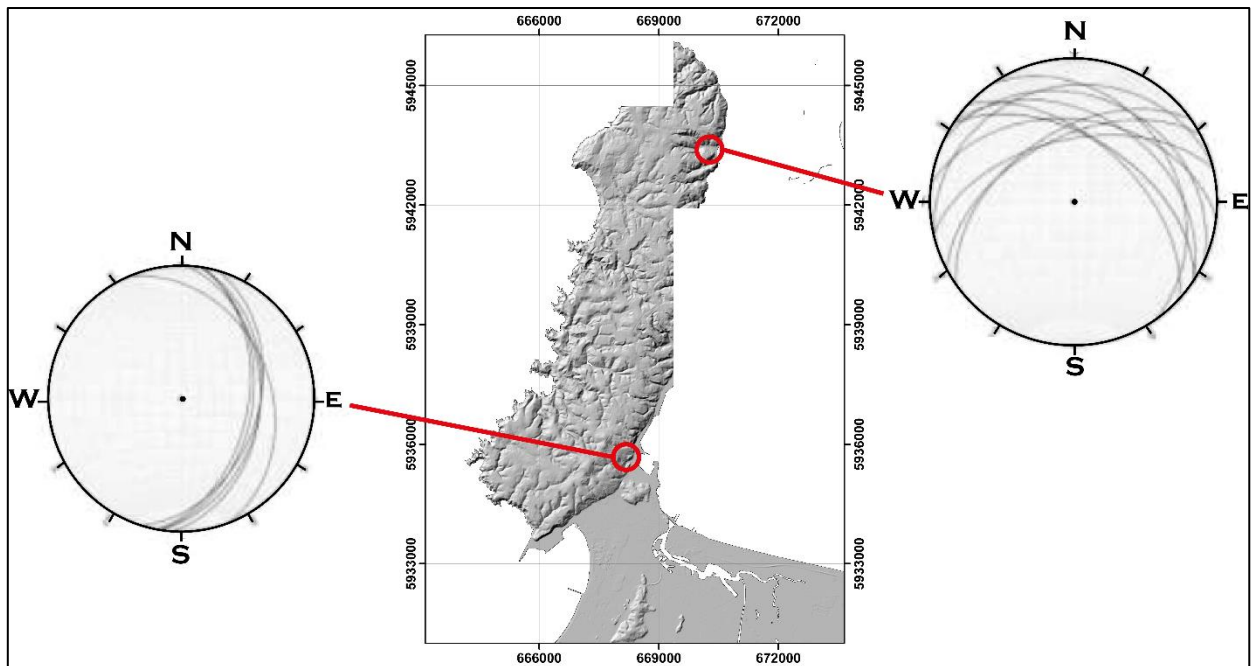


Figura 3.4: Proyecciones estereográficas de la foliación de la Serie Occidental en la península de Tumbes. Modificado de Geología de Campo II (2021).

4. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

4.1. CONCEPTOS GENERALES

4.1.1. Susceptibilidad

Corresponde a la capacidad o potencialidad de una unidad, geológica o geomorfológica, de ser afectada por un proceso geológico o de desencadenarlo. Representa la posibilidad espacial de ocurrencia y no tiene relación con la probabilidad temporal (SERNAGEOMIN, 2022). De manera más específica, Fell *et al.* (2008), en base a las definiciones propuestas por el IUGS (1997), describen la susceptibilidad de las remociones en masa como la evaluación (cuantitativa o cualitativa) de la clasificación, el volumen o área, y la distribución espacial de las remociones que existen o que podrían ocurrir, en una determinada zona.

4.1.2. Peligro o amenaza

Se define como la probabilidad de que ocurra un fenómeno de un nivel de intensidad determinado, dentro de un periodo de tiempo dado, en una zona específica (Varnes, 1984 en González de Vallejo *et al.*, 2002). Su descripción debe incluir el lugar, el volumen o área, su clasificación, velocidad del potencial proceso, material que se movilizará, y la probabilidad de que este ocurra dentro de un periodo de tiempo (Fell *et al.*, 2008).

4.1.3. Vulnerabilidad

Es el grado de pérdida de un determinado elemento, o conjunto de elementos, por consecuencia de un fenómeno como, por ejemplo, un proceso gravitacional. Su valor se expresa mediante una escala de 0 a 1 o en porcentaje de 0 a 100%, el mínimo (0 o 0%) es “no pérdida o sin daño” y el máximo (1 o 100%) “pérdida o destrucción total” (IUGS, 1997 en Suárez, 1998; González de Vallejo *et al.*, 2002).

4.1.4. Riesgo

Varnes (1984 en Henríquez, 2019) define dos tipos: riesgo específico y riesgo total. El primero corresponde al grado de pérdida esperado a causa de un fenómeno, y se expresa como el producto de peligro y vulnerabilidad. En cambio, el riesgo total incorpora consideraciones socioeconómicas y consiste en el número esperado de pérdidas humanas, cantidad de personas heridas, propiedades

dañadas y la interrupción de actividades económicas a causa del fenómeno ocurrido. Este es el producto del riesgo específico y de elementos de riesgos (población, propiedades, servicios públicos, etc., en un área determinada).

4.1.5. Procesos gravitacionales

Se entiende por procesos gravitacionales a todos los movimientos pendiente abajo, ya sea de roca, regolito y/o suelo, que se movilizan bajo la influencia directa de la gravedad. Estos no necesitan de un medio de transporte como el agua, viento o hielo para su movimiento y su velocidad puede ser desde extremadamente lenta a extremadamente rápida (Tarbuck & Lutgens, 2005).

4.1.6. Factores condicionantes

Los factores condicionantes o “pasivos” corresponden a las características intrínsecas de los materiales naturales que influyen en la inestabilidad de las laderas (González de Vallejo *et al.*, 2002; Cuanalo *et al.*, 2011). Éstos dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, como la geomorfología, litología, estructuras presentes, sus propiedades (físicas, resistentes, y deformacionales) y el comportamiento hidrogeológico del material (González de Vallejo *et al.*, 2002). Otro factor que puede condicionar la ocurrencia de una remoción en masa es la vegetación, debido a que la presencia de un sistema de raíces fuerte puede ayudar a estabilizar la ladera, por lo que la ausencia de ésta puede hacer una zona más susceptible a deslizamientos (Montgomery *et al.*, 2000 en García-Rodríguez *et al.*, 2008; Cuanalo *et al.*, 2011).

4.1.7. Factores desencadenantes

Los factores desencadenantes, también conocidos como “activos”, son aquellos externos al terreno que modifican las características y condiciones de equilibrio de la ladera (como un incremento rápido de los esfuerzos o la reducción de la resistencia del material) y que gatillan la remoción en masa (Wieczorek, 1996 en Lara y Sepúlveda, 2008; González de Vallejo *et al.*, 2002).

Uno de los factores más importante es el agua, por ejemplo: periodos de altas precipitaciones, lo cual disminuye drásticamente la resistencia de corte del terreno y aumenta las presiones intersticiales a lo largo de potenciales planos o superficies de ruptura (Hauser, 2000). Otros desencadenantes son: sismos, vulcanismo, congelación y deshielo, y actividad humana como

excavaciones, construcciones y deforestación (Tarbuck & Lutgens, 2005; Cuanalo *et al.*, 2011). Cabe destacar que es posible la ocurrencia de remociones sin un factor desencadenante, sino por el debilitamiento gradual del terreno (Tarbuck & Lutgens, 2005).

4.2. REMOCIONES EN MASA

Las remociones en masa son procesos de movilización lenta o rápida de un determinado volumen de suelo y/o roca en diversas proporciones (Hauser, 2000) pendiente abajo por influencia de la gravedad (Cruden, 1991). Estas se producen por un desequilibrio de las fuerzas internas (litología, estructura, comportamiento hidrogeológico, estados tenso-deformativos, propiedades físicas) y externas (aplicación de cargas estáticas o dinámicas, variaciones en las condiciones hidrogeológicas, factores climáticos, alteraciones en la geometría de taludes) que actúan sobre el terreno. Finalmente, las fuerzas desestabilizadoras superan a las estabilizadoras, lo que resulta en el desplazamiento de material hasta volver a un punto de estabilidad (González de Vallejo *et al.*, 2002; Hauser, 2000).

4.2.1. Clasificación

Diversos autores han propuesto clasificaciones de remociones en masa (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Cruden & Varnes, 1996; Hauser, 2001; Hungr *et al.* 2001), según el tipo de movimiento, el tipo de material desplazado, la velocidad y/o las necesidades de categorizar las remociones más comunes en sus respectivos países.

Una de las más utilizadas globalmente es la de Varnes (1978), actualizada posteriormente por Cruden y Varnes (1996), la que toma en consideración el tipo de movimiento exhibido y el material desplazado (Tabla 4.1).

4.2.1.1. Caída

Corresponde al desprendimiento de una masa de cualquier tamaño de roca o tierra de una superficie empinada, con poca o nula presencia de desplazamiento de corte (Figura 4.1). Esta masa posteriormente desciende en caída libre a velocidades muy rápidas o extremadamente rápidas (Tabla 4.2). La caída es precedida por deslizamientos de menor tamaño o volcamiento, que separa el material desplazado del no afectado, a excepción de cuando la ladera ha sido socavada (Varnes,

1978; Cruden & Varnes, 1996).

Tabla 4.1: Clasificación abreviada de los tipos de movimiento de remociones en masa y sus divisiones según el tipo de material desplazado. Modificado de Varnes (1978).

TIPO DE MOVIMIENTO		TIPO DE MATERIAL		
		Roca	Suelo	
			Predominantemente grueso	Predominantemente fino
Caída		Caída de roca	Caída de detritos	Caída de tierra
Volcamiento		Volcamiento de roca	Volcamiento de detritos	Volcamiento de tierra
Deslizamiento	Rotacional	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detritos	Deslizamiento de tierra
	Traslacional			
Extensión lateral		Extensión de roca	Extensión de detritos	Extensión de tierra
Flujo		Flujo de roca	Flujo de detritos	Flujo de tierra
Complejo		Combinación de dos o más tipos de movimientos		

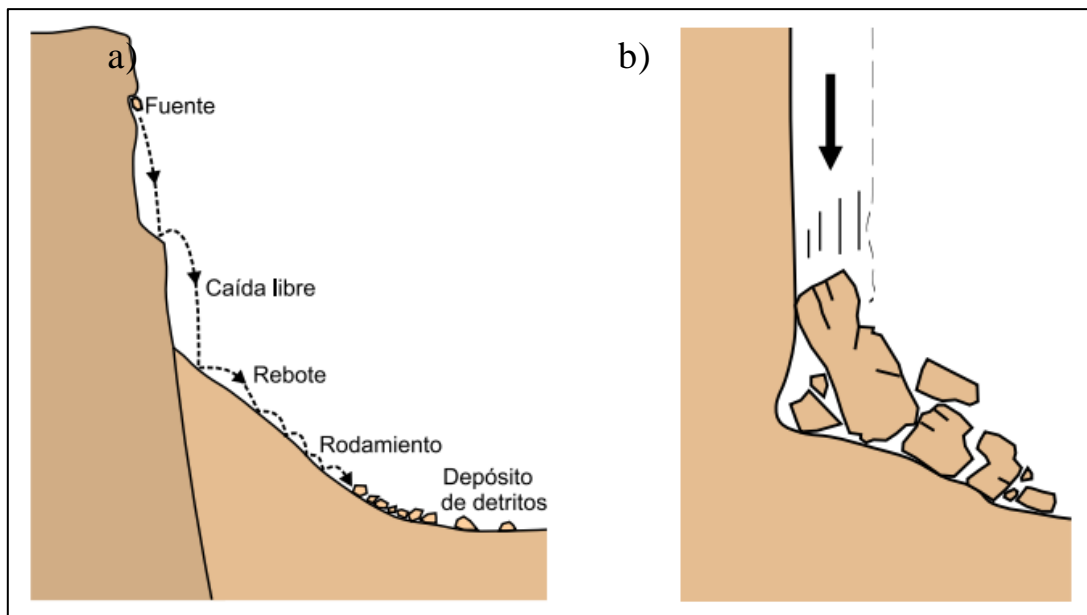


Figura 4.1: Esquema de Caída de roca. a) Caída libre por pendiente pronunciada, y posterior rebote por cambio de pendiente a una de menos de 45°. b) Caída libre sin rebote. Modificado de PMA:GCA (2007).

En laderas altas de pendientes menores o iguales a 45°, el material será desplazado por rebote, y, a medida que este disminuye gradualmente, por rodamiento. Por otro lado, cuando las pendientes son mayores a 76°, estos caen en caída libre (Cruden & Varnes, 1996).

Tabla 4.2: Clasificación de velocidad de remociones en masa. Modificado de Varnes (1978).

Clases de velocidad	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad típica
7	Extremadamente rápido	5×10^3	5 m/seg
6	Muy rápido	5×10^1	3 m/min
5	Rápido	5×10^1	1,8 m/hora
4	Moderado	5×10^3	13 m/mes
3	Lento	5×10^5	1,6 m/año
2	Muy lento	5×10^7	16 mm/año
1	Extremadamente lento		

4.2.1.2. Volcamiento

Consiste en la rotación hacia adelante de roca o suelo alrededor de un punto o eje bajo el centro de gravedad de la masa desplazada (Figura 4.2). Estos son desencadenados a causa de la gravedad ejercida por el material pendiente arriba de los elementos desplazados o también pueden producirse por la fuerza de agua o hielo dentro de grietas en el material. Posterior a un volcamiento, puede o no producirse una caída o deslizamiento (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996).

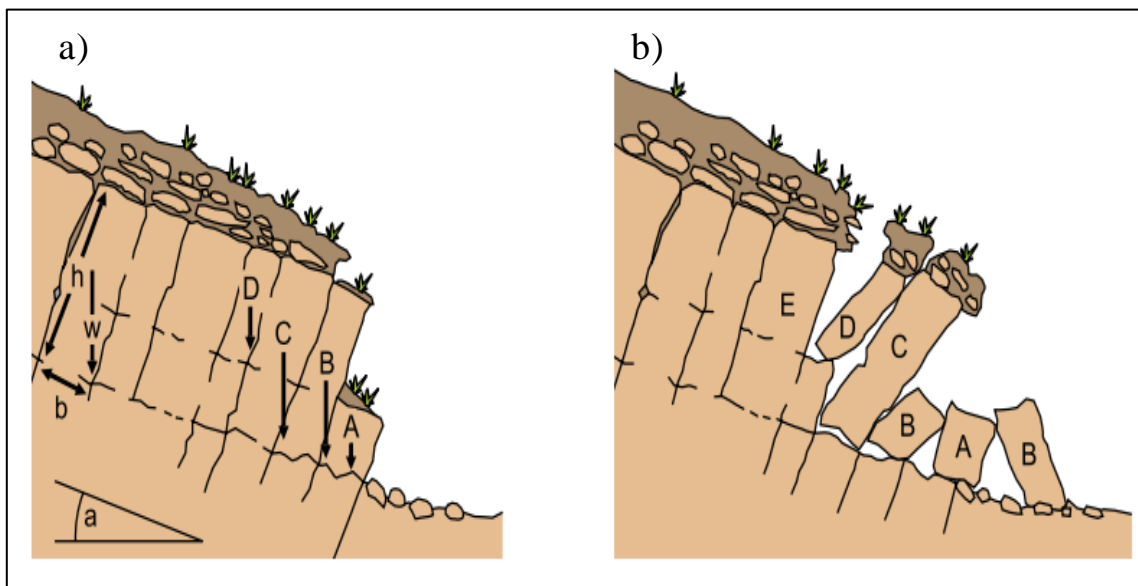


Figura 4.2: Esquema de Volcamiento. a) Inicio del volcamiento. b) Desprendimiento de las unidades las cuales rotan hacia adelante. Modificado de PMA:GCA (2007).

Este tipo de movimiento tienen un rango de velocidad que va desde extremadamente lento hasta extremadamente rápido, donde, en oportunidades, puede presentar un aceleramiento a medida que ocurre el volcamiento (Cruden & Varnes, 1996).

4.2.1.3. Deslizamiento

Es el movimiento ladera abajo de una masa de roca o suelo, principalmente en superficies de ruptura o en zonas relativamente delgadas con intenso esfuerzo de corte. Puede ser progresivo, donde el desplazamiento no ocurre en lo que posteriormente se convertirá en la superficie de ruptura, sino que el volumen del material desplazado se amplía desde un área de fallo local. Un signo inicial de que podría gatillarse un deslizamiento corresponde a grietas en la superficie original a lo largo de lo que conformará el escarpe principal (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996). Varnes (1978) clasifica los deslizamientos en dos tipos según su superficie de ruptura: rotacionales y traslacionales:

A) *Deslizamiento rotacional*

Se caracteriza porque tiene una superficie de ruptura curva y cóncava (Figura 4.3). En el área de la cabeza, el desplazamiento es casi por completo descendente en la vertical con poca rotación aparente, pero las superficies de cada una de las unidades movilizadas suelen inclinarse hacia los escarpes (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996). Ocurren principalmente en rocas poco competentes (PMA:GCA, 2007) y materiales homogéneos (Cruden & Varnes, 1996), donde la deformación interna de la masa desplazada es mínima (PMA:GCA, 2007). La velocidad del movimiento varía desde lento a rápido, con valores menores a 1 m/s (PMA:GCA, 2007).

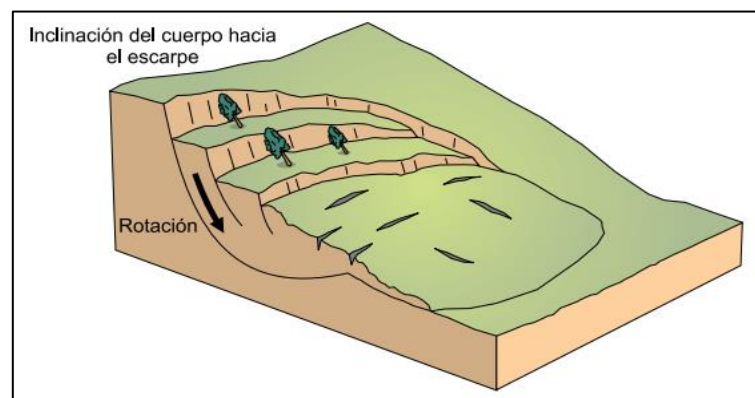


Figura 4.3: Esquema de Deslizamiento Rotacional. Modificado de PMA:GCA (2007).

B) *Deslizamiento traslacional*

En este tipo de deslizamiento, el material es desplazado a lo largo de una superficie de ruptura plana u ondulada (Figura 4.4), son generalmente más superficiales que los rotacionales y el movimiento es usualmente controlado estructuralmente por superficies de debilidad, tales como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre roca y suelo. Durante el desplazamiento es muy común que el material sea altamente desfigurado o se rompa en más unidades, y puede llegar a convertirse en un flujo si es que la deformación, velocidad y/o contenido de agua aumentan (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996). La velocidad de este tipo de remoción varía desde rápida a extremadamente rápida (PMA:GCA, 2007).

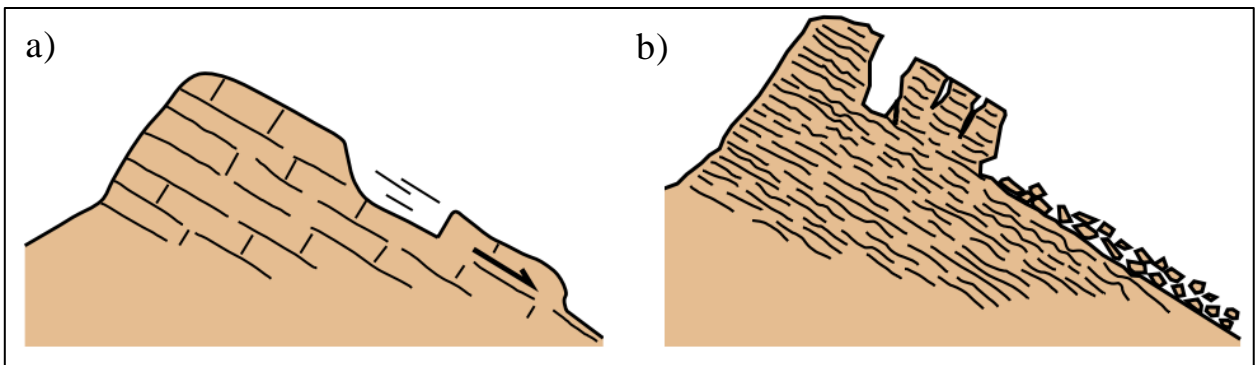


Figura 4.4: Esquema de Deslizamiento Traslacional. a) Deslizamiento de roca. b) Deslizamiento de roca con separación del material en distintas unidades. Modificado de PMA:GCA (2007).

C) *Partes de un deslizamiento*

En 1978 Varnes creó un diagrama de un deslizamiento-flujo de tierra complejo, en el cual define sus características observables, las cuales se representan en la figura 4.5. Esta nomenclatura es posteriormente profundizada por Cruden y Varnes en 1996 y corresponde a:

- a) Corona: material prácticamente no desplazado, adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- b) Escarpe principal: superficie empinada, del suelo no desplazado, en el borde superior del deslizamiento, causado por el movimiento del material. Es la parte visible de la superficie de ruptura.

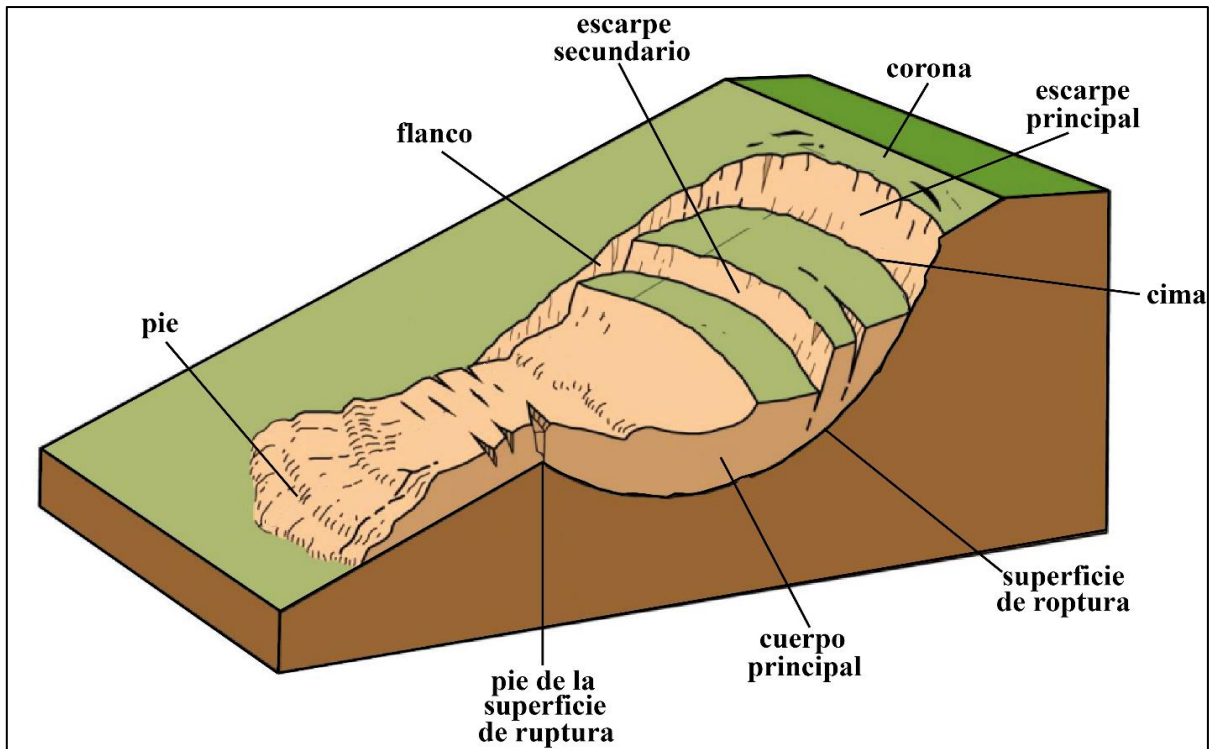


Figura 4.5: Esquema de la nomenclatura de un deslizamiento. Modificado de Baltierra (2023) basado en Varnes (1978).

- c) Escarpe secundario: superficie empinada en el material desplazado producto de movimientos diferenciales dentro de este.
- d) Cima: punto de contacto más alto entre el material desplazado y el escarpe principal.
- e) Flanco: material no desplazado adyacente a los lados de la superficie de ruptura.
- f) Superficie de ruptura: superficie que se forma en el límite inferior del material desplazado, bajo la superficie original del suelo.
- g) Cuerpo principal: parte del material desplazado del deslizamiento que se superpone a la superficie de ruptura, entre el pie de este y el escarpe principal.
- h) Pie: margen inferior, usualmente curvo, del material desplazado. Es la parte más alejada del escarpe principal.

- i) Pie de la superficie de ruptura: es la intersección entre la parte inferior de la superficie de ruptura y la superficie original del suelo.

4.2.1.4. Extensión lateral

Son aquellas remociones en las cuales el movimiento predominante es lateral, acomodadas por fracturas de cizalle o tensión (Varnes, 1978), en laderas de poca pendiente (González de Vallejo *et al.*, 2002) (Figura 4.6). Varnes (1978) define dos tipos: uno en el que la zona basal de la zona de cizalle o zona de flujo plástico no es reconocible, el cual se presenta principalmente en masas de roca; y otro donde el movimiento implica la fractura y extensión de materiales cohesivos, sea roca o suelo, producto de licuefacción o flujo plástico del material subyacente. Durante la remoción, el material cohesivo desplazado se puede hundir, trasladar, rotar, desintegrar o fluir (Cruden & Varnes, 1996). La velocidad de este tipo varía desde extremadamente lento, típico de extensiones laterales de roca, a extremadamente rápido, como producto de licuefacción de materiales como arenas saturadas, limos o arcillas (PMA:GCA, 2007).

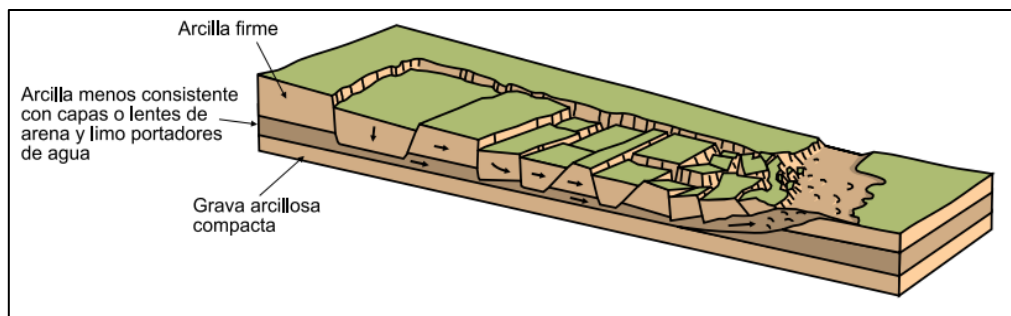


Figura 4.6: Esquema de Extensión lateral. Modificado de PMA:GCA (2007)

4.2.1.5. Flujo

El flujo es un movimiento espacialmente continuo, donde la distribución de velocidades en la masa movilizada asemeja un líquido viscoso, que puede ser rápido o lento, y húmedo o seco. Además, su superficie de ruptura es de poca duración, poco espaciada y usualmente no preservada. En ciertos casos, los deslizamientos pueden transformarse en un flujo, lo que depende del contenido de agua, movilidad y evolución del movimiento (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996).

Según el tipo de movilización de esta remoción, los flujos pueden clasificarse en dos tipos:

- canalizados, su desplazamiento sigue canales preexistentes (Figura 4.7a); y

- no canalizados o abiertos, en los que el flujo genera su propio canal en su trayecto (Figura 4.7b).

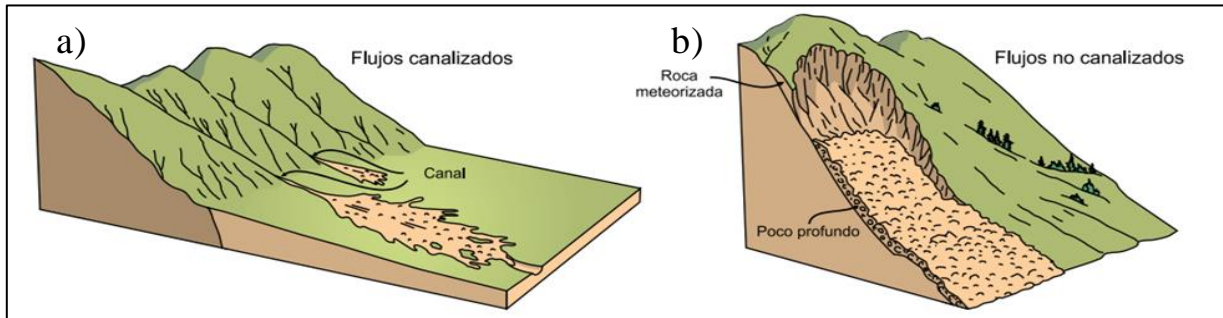


Figura 4.7: Esquema de Flujo. a) Flujo canalizado. b) Flujo no canalizado. Modificado de PMA: GCA (2007).

También pueden ser clasificados según el material que los compone, dividiéndose en: flujos de barro, flujos de detritos, flujos de tierra y avalancha de detritos (Cruden & Varnes, 1996).

4.2.1.6. Reptación

Hauser (2000) identifica en Chile otro tipo de remoción en masa denominado reptación o “*creep*”. Corresponde a un proceso superficial lento, que implica el movimiento gradual de suelos residuales, rocas blandas y/o coluvios, que tienen matriz con alto contenido de arcilla (Figura 4.8).

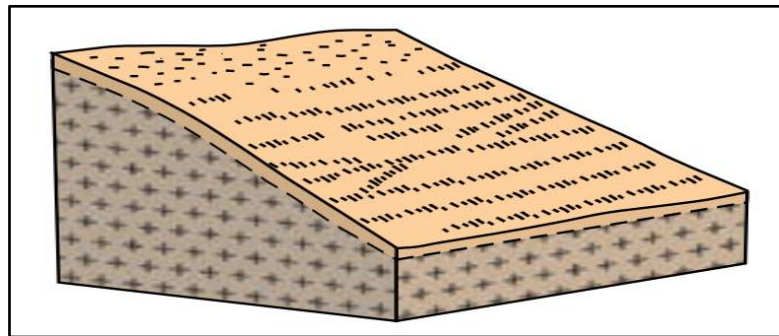


Figura 4.8: Esquema de Reptación. Modificado de PMA:GCA (2007)

Puede ser: estacional, producto de cambios en la humedad, sequedad, congelación y deshielo; o verdadero, cuando el desplazamiento es relativamente continuo a lo largo del año (PMA:GCA, 2007).

Debido a su velocidad extremadamente lenta, su movimiento no puede ser observado, pero sí reconocerse su efecto en la inclinación de troncos de árboles, deformaciones en muros de

contención, cercado y tendidos eléctricos, y por el desarrollo de ondulaciones en el suelo (Hauser, 2000; Tarbuck & Lutgens, 2005).

4.2.2. Estado de actividad

Cruden y Varnes (1996) definen el estado de actividad de una remoción en masa como la descripción de la temporalidad del movimiento. Inicialmente, Varnes (1978) reconoce dos tipos: activo e inactivo, pero posteriormente Cruden y Varnes (1996) los clasifican en 5 tipos: activo, reactivado, suspendido, inactivo y relicto (Figura 4.9).

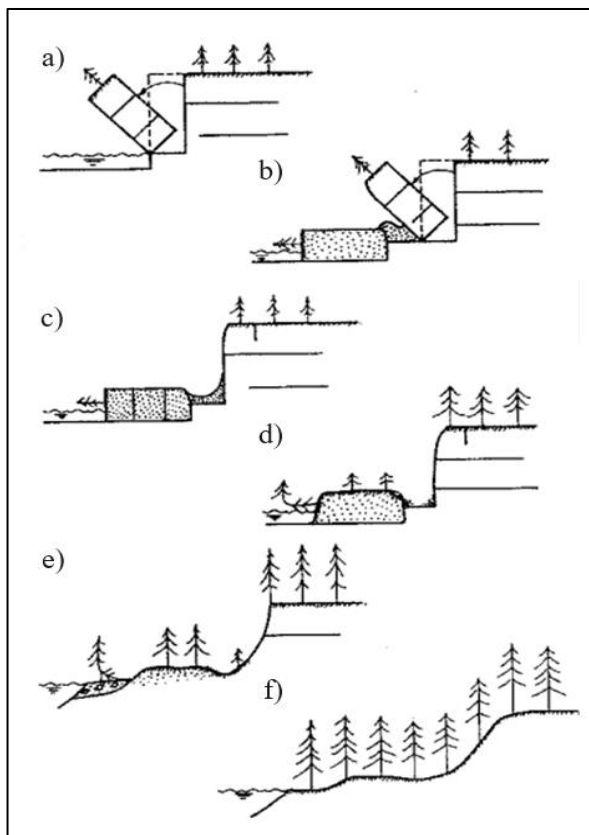


Figura 4.9: Estado de actividad de las Remociones en Masa. a) Activo. b) Reactivado. c) Suspendido. d) Inactivo latente. e) Inactivo estabilizado. f) Relicto. Modificado de Cruden & Varnes (1996).

4.2.2.1 Activo

Remociones comúnmente frescas con sus características morfológicas fácilmente reconocibles de ser productos de un proceso gravitacional, que no presentan modificaciones notables a causa de meteorización o erosión (Figura 4.9a). Incluyen remociones que ocurren por primera vez en una zona o reactivados.

4.2.2.2. Reactivado

Corresponden a aquellos deslizamientos de tierra que se activan nuevamente luego de haberse encontrado inactivos (Figura 4.9b).

4.2.2.3. Suspendido

Son las remociones que no se encuentran en movimiento en la actualidad, pero que lo han hecho dentro del último ciclo anual (Figura 4.9c).

4.2.2.4. Inactivo

Se refiere a los deslizamientos que no se han activado en más de un ciclo anual. Estos se subclasifican en 3 tipos: latentes, si las causas aparentes del movimiento se mantienen en la actualidad (Figura 4.9d); abandonados, cuando las causas del movimiento no están presentes; y estabilizados, si es que el talud de la remoción fue protegido por obras artificiales las cuales detuvieron el movimiento (Figura 4.9e).

4.2.2.5. Relicto

Son remociones en masa antiguas que pueden ser identificadas en el paisaje a pesar de estar inactivas por miles de años, en donde la zona se encuentra bajo condiciones geomorfológicas o climáticas distintas a cuando ocurrió el evento (Figura 4.9f).

5. RESULTADOS

5.1. GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

En la Geología de la zona de estudio (Figura 5.1) se entrega una descripción en detalle de toda la franja aledaña a la zona de la falla San Vicente de Galli (1967) entre el puerto homónimo o punta Lilies (al SW) y cerro Alegre (al NE).

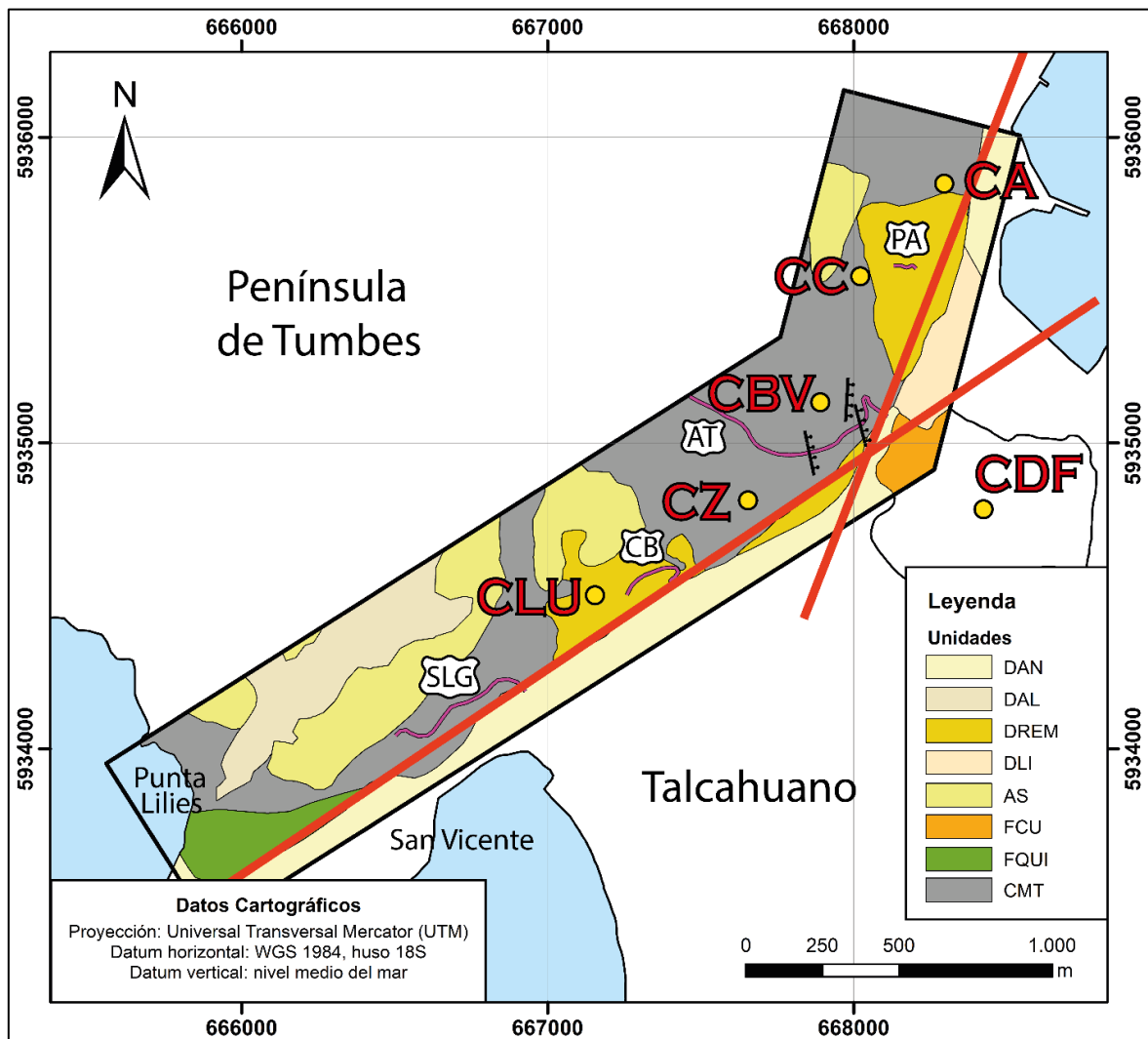


Figura 5.1: Mapa geológico del área de estudio. Contactos litológicos basados en mapa de Velázquez *et al.* (2025): CMT: Complejo Metamórfico Tumbes; FQUI: Formación Quiriquina; FCU: Formación Curanilahue; AS: Arenas Silíceas; DLI: Depósitos Litorales; DREM: Depósitos de Remociones en Masa; DAL: Depósitos Aluviales; DAN: Depósitos Antrópicos. Líneas rojas: Fallas San Vicente En letras rojas nombres de cerros: CLU: La Unión. CZ: Zaror. CBV: Buena Vista. CC: Comou. CA: Alegre y CDF: David Fuentes. Las líneas color púrpura corresponden a calles y pasarelas relevantes en este estudio: SLG: Subida La Gloria. CB: calle Barranquilla. AT: Avenida Tumbes. PA: pasarela que une calle Galvéz con calle Dieciocho de Septiembre.

La unidad geológica predominante en la península de Tumbes corresponde a las rocas metamórficas de la Serie Occidental o Complejo Metamórfico Hualpén. Tanto la Formación Quiriquina como la Formación Curanilahue tienen afloramientos restringidos al sector suroeste (San Vicente-Punta Lilies) y el suroriental (cerro David Fuentes), respectivamente. En las partes más altas de la zona se encuentran las unidades cuaternarias en inconformidad sobre las rocas más antiguas. El plano de la ciudad de Talcahuano corresponde Depósitos Antrópicos (DAN).

5.1.1. Rocas metamórficas

La unidad geológica predominante en la península de Tumbes corresponde a las rocas metamórficas de la Serie Occidental (Aguirre *et al.*, 1972 en Hervé, 1977) o Complejo Metamórfico Hualpén de Velásquez *et al.* (en preparación). Esta unidad aflora en la mayor parte del sector de estudio, conformando el bloque elevado de la traza de la Falla San Vicente. Su contacto con las unidades más modernas (Formación Quiriquina y cuaternarias) es por inconformidad.

En los cerros Zaror y Buena se puede reconocer que su litología consiste exclusivamente esquistos, con foliación esquistosa, constituida por lepidoblastos que se encuentran altamente alterados (Figura 5.2a). Son de colores gris y gris pardo, en superficie fresca, con tonos pardos rojizos, en superficie alterada. Su mineralogía completa no se puede determinar en muestras de mano, debido al pequeño tamaño de sus granos (Figura 5.2b), pero se logran identificar micas, además de clorita de alteración.

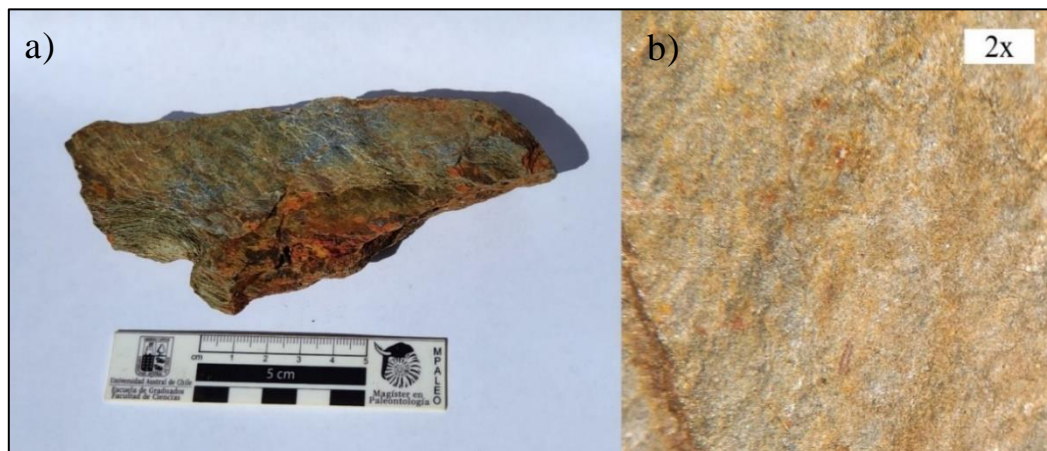


Figura 5.2: Esquistos del área de estudio. a) Muestra de mano de esquistos de la Serie Occidental. b) Esquistos bajo la lupa (aumento 2x).

En el cerro Buena Vista, en las coordenadas 667.977 E y 5.935.118 N, se identificó una falla normal de orientación N2°E/50°SE, rellena por una veta de cuarzo de 5 cm de espesor. En sectores de la falla (Figura 5.3) hay una zona de aproximadamente 10 cm en los que la veta se encuentra triturada, posiblemente debido al movimiento de ésta. En toda el área aledaña a la estructura, el rumbo de la foliación de la roca es subparalelo al de la falla.



Figura 5.3: Falla N2°E/50°SE en la Serie Occidental.

Más al sur, en la calle Avenida Tumbes, aún en el cerro Buena Vista, se identifican otras 2 fallas, que como la anterior, son normales, de rumbo N10°W/75°NE y N13°W/65°NE, respectivamente, por lo que se pueden considerar a estas tres estructuras como de rumbo aproximado N-S (Creixell, comunicación personal).

La foliación predominante de estas rocas, según bibliografía, corresponde al S₂ que obliteró tanto al S₀ como al S₁, previos. En ciertos puntos es posible observar una tercera foliación (S₃), como en la calle Subida La Gloria, que presenta un eje de orientación NNE-SSW a NE-SW (Creixell, comunicación personal).

En total se conocen 67 datos de foliación, la cual varía a lo largo del área de estudio en todas direcciones, pero se observa una tendencia N-S y NW-SE (Figura 5.4).

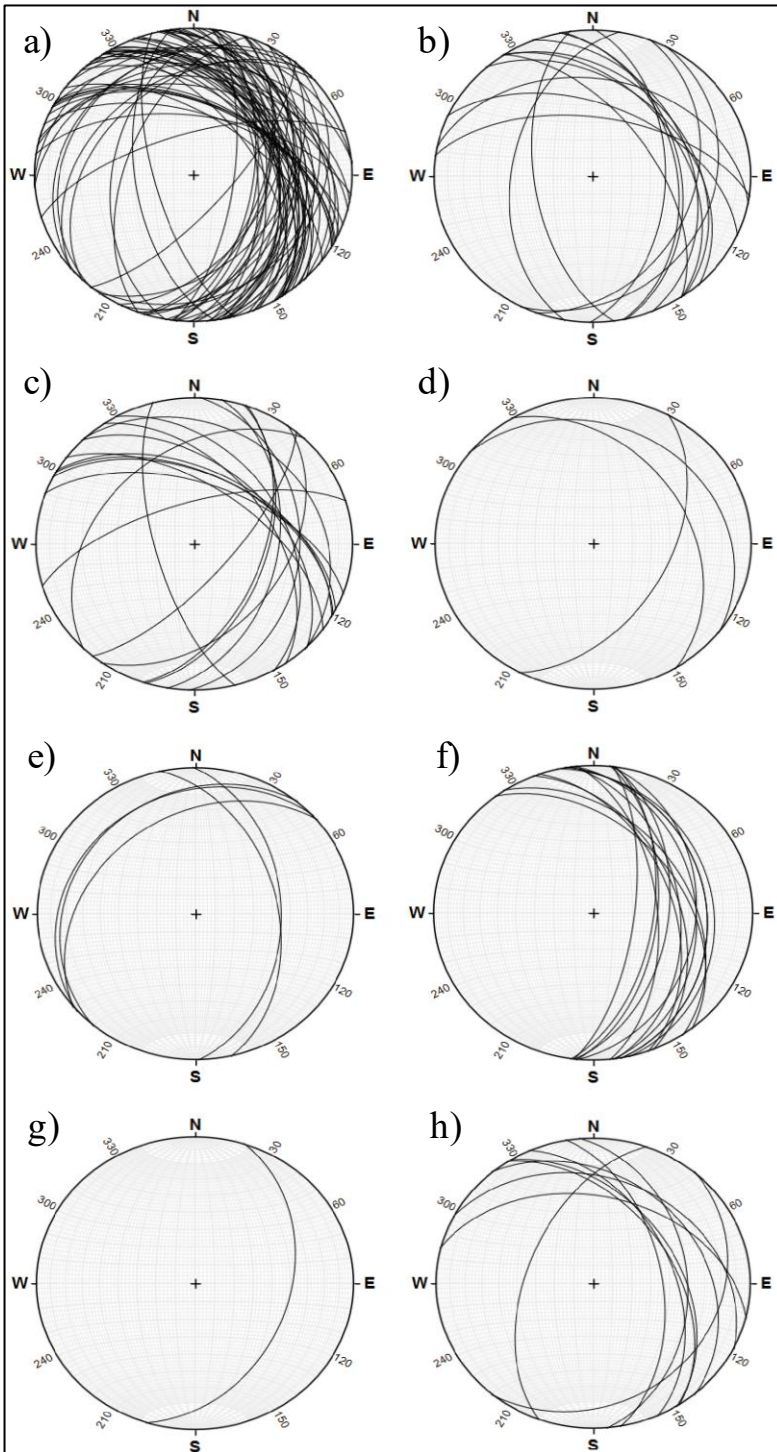


Figura 5.4: Foliaciones de la Serie Occidental en el área de estudio. 67 datos. a) Toda el área b) Cerro Alegre. c) Cerro Cornou. d) Cerro Bagnara. e) Cerro Zaror. f) Cerro Buena Vista. g) Subida La Gloria. h) Cerro La Unión. Datos de terreno de este estudio y Creixell (comunicación personal). Diagrama hecho en Stereonet v. 11.3.6.

Al separar las foliaciones según su ubicación en los diferentes cerros de la zona, se puede observar cómo en los cerros La Unión, Alegre y, especialmente, Cornou no existe una dirección preferencial, sino que, por el contrario, hay varias direcciones, a diferencia del cerro Buena Vista, la cual tiene

una gran tendencia N-S y NNW-SEE; y del cerro Zaror, que también existen 2 tendencias: N-S y NE-SW. Los cerros Bagnara y el sector de Subida La Gloria se excluyen debido que la información es muy escasa.

En las rocas metamórficas de las zonas cercanas al trazo de la Falla San Vicente, es posible observar en el cerro Alegre un punto en el que la foliación posee orientación similar a la de la falla (NNE-SSW). Lo mismo ocurre en el cerro Zaror, donde hay un punto con orientación NE-SW (Figura 5.5). Esto podría indicar que la foliación, en estos puntos, posiblemente está asociada a la falla.

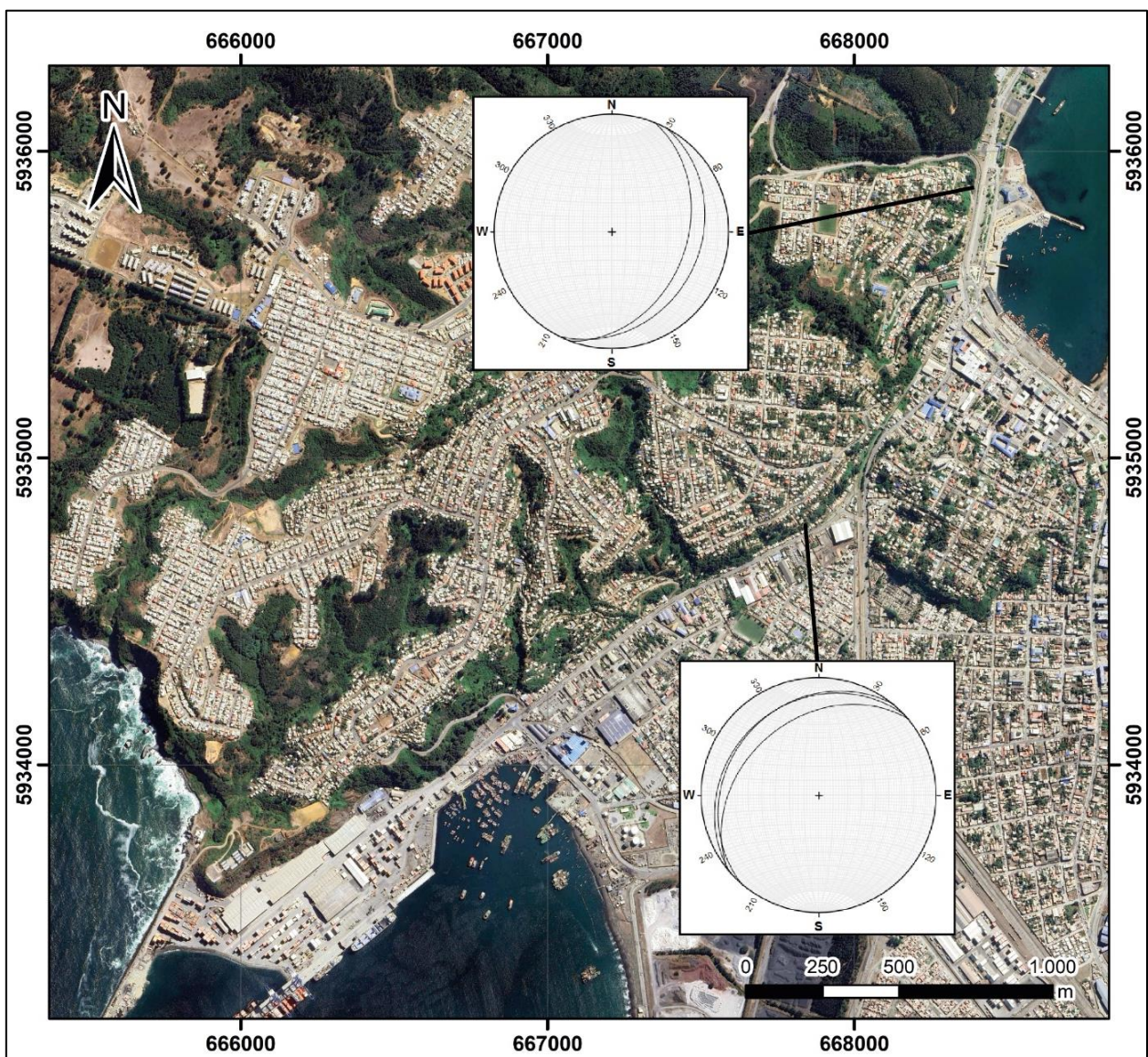


Figura 5.5: Mapa foliación Serie Occidental en cerros Zaror y Alegre cercano al trazo de la Falla San Vicente.

5.1.2. Rocas sedimentarias

5.1.2.1. Formación Quiriquina

Los únicos afloramientos de rocas de la Formación Quiriquina están en el extremo suroccidental del área de estudio, entre Punta Lilies y San Vicente, donde yace sobre a la Serie Occidental en inconformidad y su techo corresponde a la superficie de erosión actual.

El acceso a estos afloramientos es restringido al pertenecer a distintas empresas privadas como el Puerto de San Vicente, empresa constructora SVTI, entre otras.

5.1.2.2. Formación Curanilahue

Esta formación aflora en la zona SE de la zona de estudio en el cerro David Fuentes y no aflora en la península de Tumbes. Se encuentra en varios cerros islas de la ciudad de Talcahuano en paraconformidad sobre la Formación Quiriquina. En el sector de estudio está prácticamente cubierta por construcciones y vegetación.

5.1.2.3. Arenas Silíceas

Al norte del puerto de San Vicente, en la cancha Juventud Monte Redondo, se identificó un afloramiento de pequeña dimensión de arenas ricas en cuarzo, de colores pardo-anaranjado, semiconsolidadas, de grano medio. No se observan estructuras, pero hay abundante vegetación y desarrollo de raíces, las cuales podrían haberlas destruido (Figura 5.6).



Figura 5.6: Afloramiento de Arenas Silíceas en la cancha Juventud Monte Redondo.

Según la clasificación de Folk *et al.* (1970), composicionalmente estas arenas son subarcosas y están constituidas en un 75% de cuarzo y, en menor medida, feldespato potásico (17%), el cual se encuentra alterado a arcilla, lo que les da su coloración. De manera escasa, también hay micas y líticos de origen metamórfico. Tienen fábrica grano soportada, buena selección y los granos son mayoritariamente subredondeados.

5.1.2.4. Depósitos de Remociones en Masa

Los depósitos de remociones en masa antiguos en el área de estudio, se distribuyen en los cerros Cornou (Figura 5.7) y La Unión. Están constituidos brechas con matriz variable de fragmentos líticos de rocas de la Serie Occidental, con granulometría mayoritariamente de arena de grano medio a grueso y, en menor medida, arcilla de color parda anaranjada de arenas. Los clastos son angulosos, centimétricos a decimétricos (hasta 50 cm), de esquistos micáceos y algunos de cuarzo. No se descarta la posibilidad de la presencia de clastos métricos, debido a que la foliación de estas rocas, en el cerro Cornou, cambia considerablemente de dirección a lo largo de los afloramientos.



Figura 5.7: Depósito de remoción en masa en el cerro Cornou.

En el cerro La Unión, calle Barranquilla, se observaron depósitos de remociones en masa bajo construcciones de casas. En este lugar, la remoción es de gradación normal, donde la base tiene matriz tamaño arena fina a muy fina, de mala selección con una potencia de aproximadamente 40

cm de escasa matriz. Los clastos, no poseen orientación, son principalmente de esquistos y cuarzo, con tamaño que varía entre 10 a 20 cm y, con una pequeña proporción, pueden llegar hasta 30 cm.

Hacia techo la matriz es de granulometría más fina y se hace más abundante, en la cual se encuentran alrededor de 30 cm de depósito con clastos centimétricos (3-5 cm mayoritariamente) y escasos decimétricos (<15 cm) también de esquistos y cuarzo (Figura 5.8).



Figura 5.8: Depósito de remoción en masa en el cerro La Unión.

5.1.2.5. Remociones en Masa

Durante la campaña de terreno se identificaron 5 puntos con remociones en masa: cuatro (4) deslizamientos y una (1) caída de roca, los cuales se distribuyen entre los cerros Cornou y La Unión, y en el sector de La Gloria, sobre el puerto de San Vicente.

Los deslizamientos se componen de: tierra dos (2), de tierra y roca uno (1) y de suelo uno (1). En los de tierra el material removido corresponde principalmente a arenas de granulometría fina a media, de color pardo rojizo y en el de tierra y roca, los clastos son de esquistos de la Serie Occidental.

De estos tipos de remoción, el de mayor extensión es el de suelo, ubicado en la pasarela que une la

calle Gálvez con Dieciocho de Septiembre. Su extensión es de aproximadamente 80 m² y obstruyó por completo la pasarela peatonal del sector (Figura 5.9).



Figura 5.9: Deslizamiento de suelo en el cerro Cornou.

La caída de roca se observó en el cerro La Unión, en la calle Barranquilla, en donde el bloque de mayor tamaño caído tiene 1 m de extensión (Figura 5.10). Las rocas son esquistos altamente meteorizados.



Figura 5.10: Caída de roca en el cerro La Unión.

Un factor presente en todos los deslizamientos observados es la intervención antrópica del paisaje,

como, por ejemplo: cortes en la ladera para la construcción de una pasarela o calle, con un talud de elevada pendiente; o la construcción o ampliación de viviendas, que aplanan y sobrecargan la cima de las laderas. Al igual que en el caso de los deslizamientos, en la caída de rocas, se puede apreciar que la zona se encuentra intervenida para la construcción de la calle, con un talud subvertical.

5.2. LINEAMIENTOS

A partir de las imágenes de *hillshade* realizadas anteriormente, se identificaron los lineamientos de la zona sur de la península de Tumbes. Estas se presentan en la Figura 5.11, con un *hillshade* de base con un azimut solar de 225° y una inclinación solar de 30° .

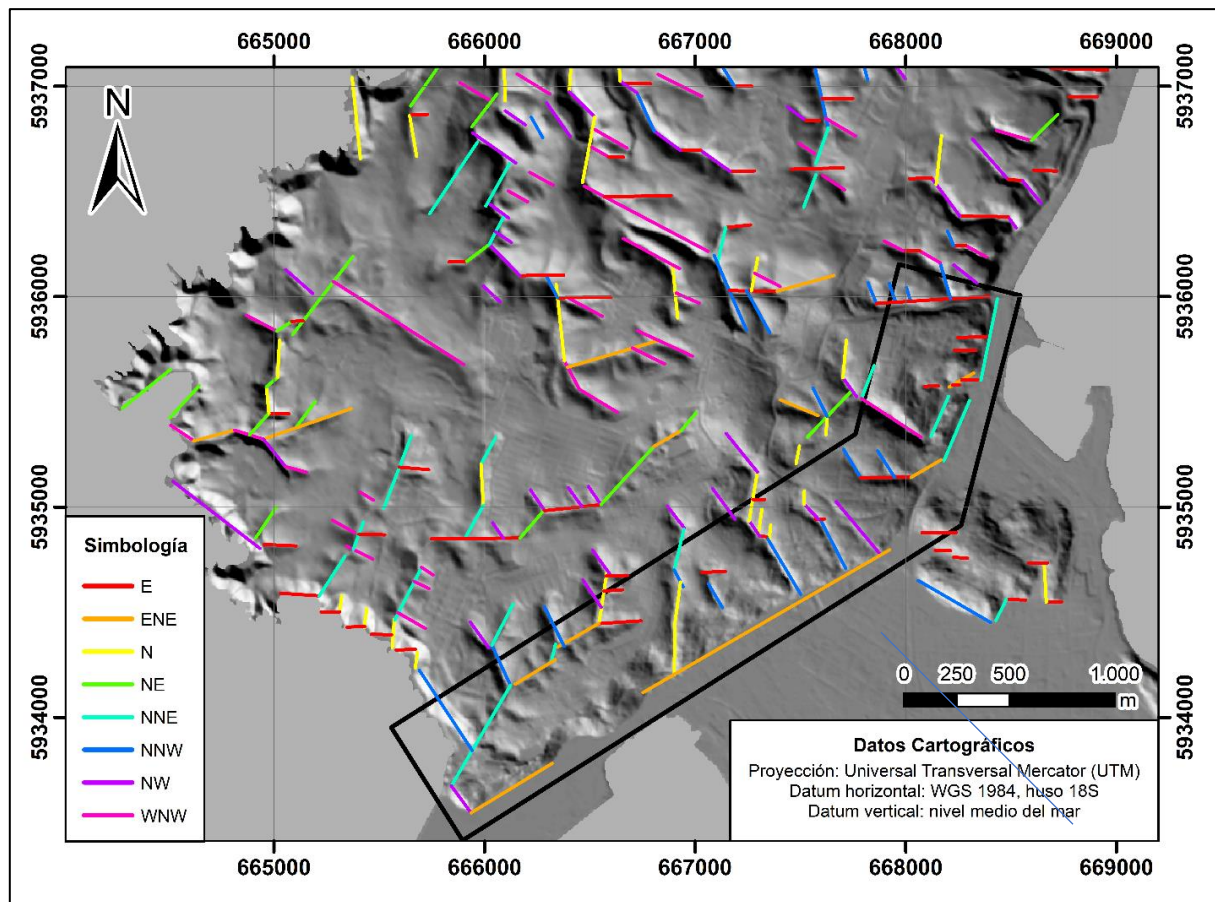


Figura 5.11: Lineamientos de la zona sur de la península de Tumbes. El polígono negro marca el área de estudio.

Las direcciones de los lineamientos fueron separadas en 8 categorías de azimut, las cuales tienen un rango de $22,5^\circ$ cada una. Corresponden a: WNW-ESE ($281,25^\circ$ - $303,75^\circ$), NW-SE ($303,75^\circ$ - $326,25^\circ$), NNW-SSE ($326,25^\circ$ - $348,75^\circ$), N-S ($348,75^\circ$ - $11,25^\circ$), NNE-SSW ($11,25^\circ$ - $33,75^\circ$), NE-

SW ($33,75^{\circ}$ - $56,25^{\circ}$), ENE-WSW ($56,25^{\circ}$ - $78,75^{\circ}$) y W-E ($78,75^{\circ}$ - $101,25^{\circ}$).

Con los 227 datos de lineamientos se realizó un diagrama de roseta (Figura 5.12). De ella se puede inferir que el grupo principal de lineamientos es el de dirección W-E, y, en menor medida, 2 grupos WNW-ESE y NW-SE. Si bien la dirección de lineamiento ENE-WSW es la menos frecuente en la zona, el lineamiento de mayor extensión pertenece a ese grupo.

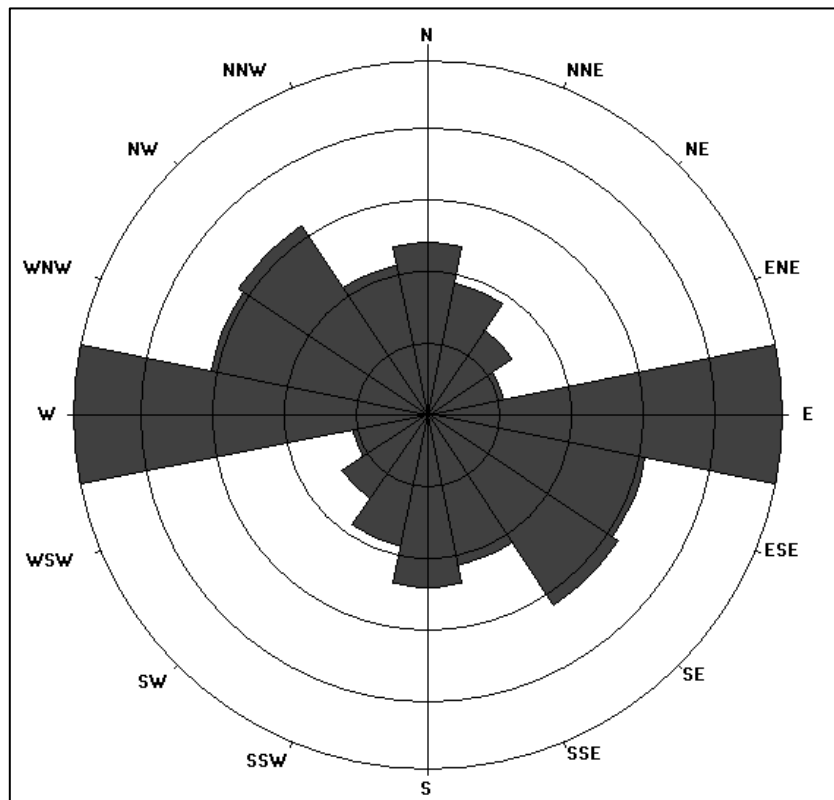


Figura 5.12: Diagrama de roseta de los lineamientos de la zona sur de la península de Tumbes. N° de datos: 227. Realizado en GEOrient v.10.

Al separar de los 227 datos los lineamientos reconocidos dentro del área de estudio, se obtienen 51, donde hay dos grupos principales de tendencia de dirección: uno W-E, al igual que en toda la zona sur de la península; y NNW-SSE (Figura 5.13). La diferencia entre estos grupos es que los lineamientos de dirección W-E, si bien son bastante frecuentes en la zona, son de pequeña extensión, en cambio a los del otro grupo que son más extensos. Las otras direcciones poseen una misma frecuencia, a excepción de las WNW-ESE y NE-SW, las cuales tienen pequeña a nula presencia.

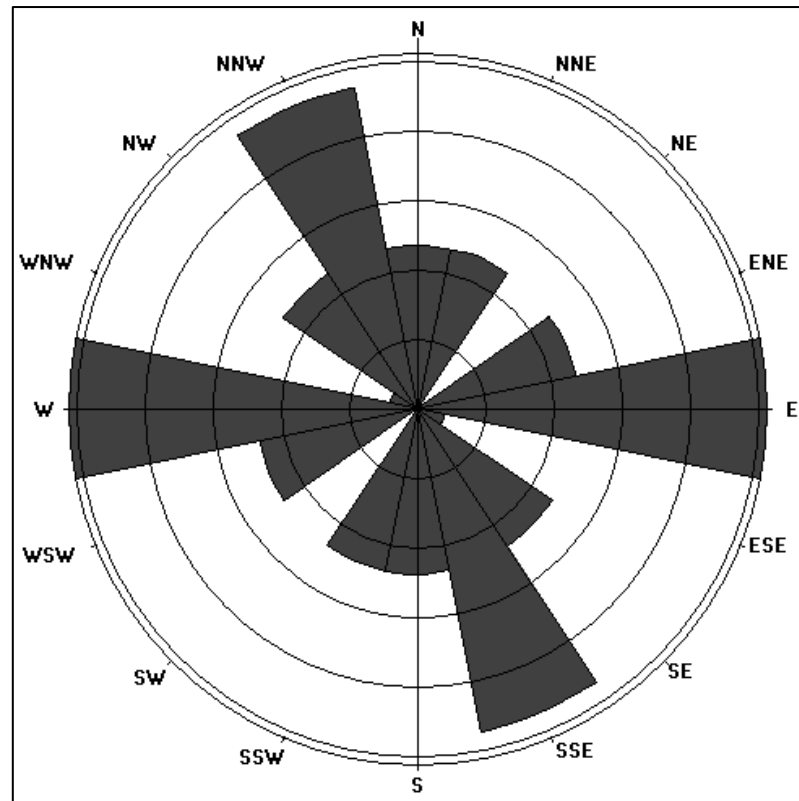


Figura 5.13: Diagrama de roseta de los lineamientos del área de estudio. 51 datos. Realizado en GEOrient v.10.

Respecto a la zona de la traza de la Falla San Vicente, se visualizan dos direcciones de lineamientos asociadas a ella. En la zona sur estos tienen dirección ENE-WSW y, en la zona suroccidental, entre el cerro David Fuentes y la Base Naval de Talcahuano, son de dirección NNE-SSW. Entre ellos no se pudo trazar un lineamiento debido al origen antrópico de la ladera en ese trecho.

5.3. REMOCIONES EN MASA

Las remociones en masa reconocidas o registradas en el área de estudio son 68, de ellas 63 por datos bibliográficos y 5 observadas en terreno, los cuales se distribuyen en todos los cerros del sector (Figura 5.14).

Los tipos de remociones identificados son 3: deslizamientos, caídas y flujos. Con alta predominancia de deslizamientos, que corresponden a más del 75% del total de eventos (Tabla 5.1). En lo observados en la campaña de terreno, éstos también son las remociones más frecuentes, con 4 de las 5 reconocidas.

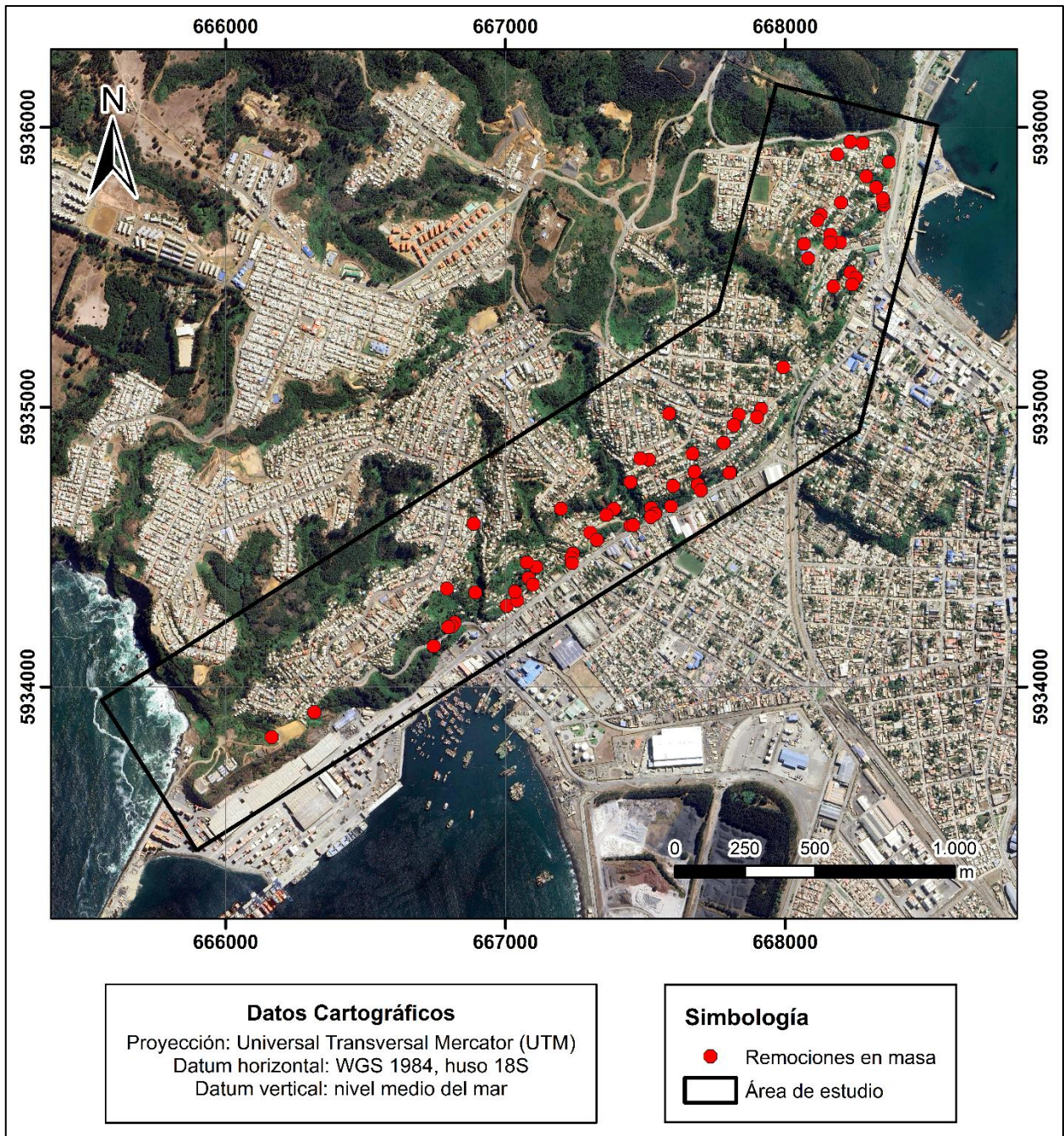


Figura 5.14: Mapa de ubicación de remociones en masa.

En relación a los factores desencadenantes, se tiene el registro de ellos de 31 de las 68 remociones (45,5%). De ellas, el principal factor corresponde a las precipitaciones, con un 90% del total (Tabla 5.2). Del mismo modo, la distribución de remociones según el mes de ocurrencia se concentra principalmente en la temporada lluviosa entre mayo y septiembre (Figura 5.15), siendo la mayoría en el mes junio, que es el mes de mayor cantidad de precipitaciones en la zona (Figura 1.3).

Tabla 5.1: Cantidad de remociones en masa por tipo. Según datos bibliográficos y de terreno.

Tipo de remoción en masa	Cantidad
Deslizamiento	53
Caída	11
Flujo	4

Tabla 5.2: Cantidad de remociones en masa según el factor desencadenante. Según datos bibliográficos y de terreno.

Factor desencadenante	Cantidad
Precipitaciones	28
Sismo	2
Antrópico	1

Las remociones ocurridas en verano son 3, con desencadenantes que no son precipitaciones: la primera es un deslizamiento que se produjo en el mes enero y fue gatillado por factores antrópicos; y las otras dos por hechos sísmicos, fueron desencadenadas por el Terremoto del Maule del 27 de febrero del 2010.

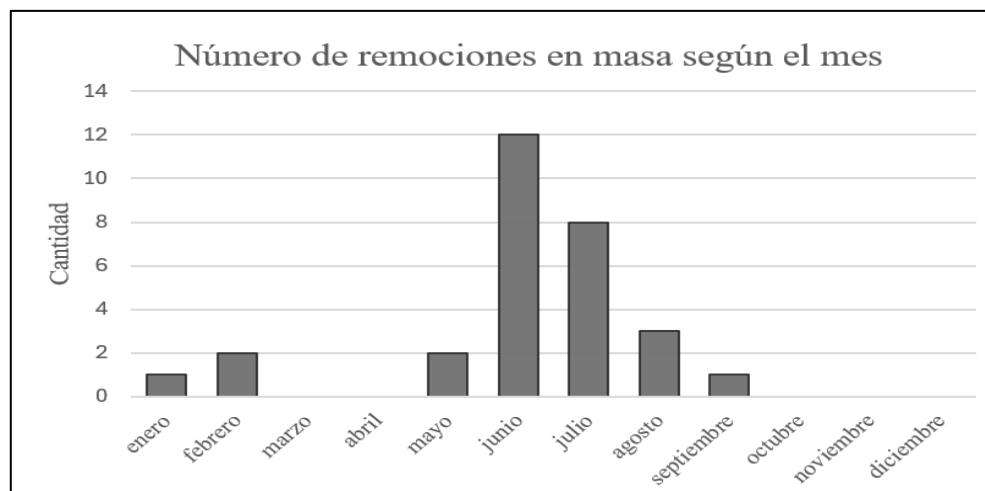


Figura 5.15: Gráfico del número de remociones en masa según el mes.

5.3.1. Remociones en masa y su relación con la elevación

La elevación es un factor importante de deslizamientos de tierra, por lo que es muy utilizado en la

preparación de mapas de susceptibilidad a deslizamientos, debido a que está relacionada con otros factores como la lluvia, los tipos de suelo, el tipo de vegetación y su cobertura, que afectan la estabilidad de la pendiente (Du *et al.*, 2017; Shano *et al.*, 2021), además de su influencia en la geomorfología y en la tasa de erosión (Rabby *et al.*, 2020).

Los intervalos de elevación utilizados en la zona de estudio, cambian rápidamente en distancia muy cortas. Por esto, y debido al alto volumen de remociones en masa inventariadas, se delimitaron las clases en rangos pequeños de 10 m, con 11 clases que van desde 0 m s.n.m. hasta >100 m s.n.m. y se puede éstas se distribuyen a lo largo de todas las clases de rangos delimitados (Figura 5.16).

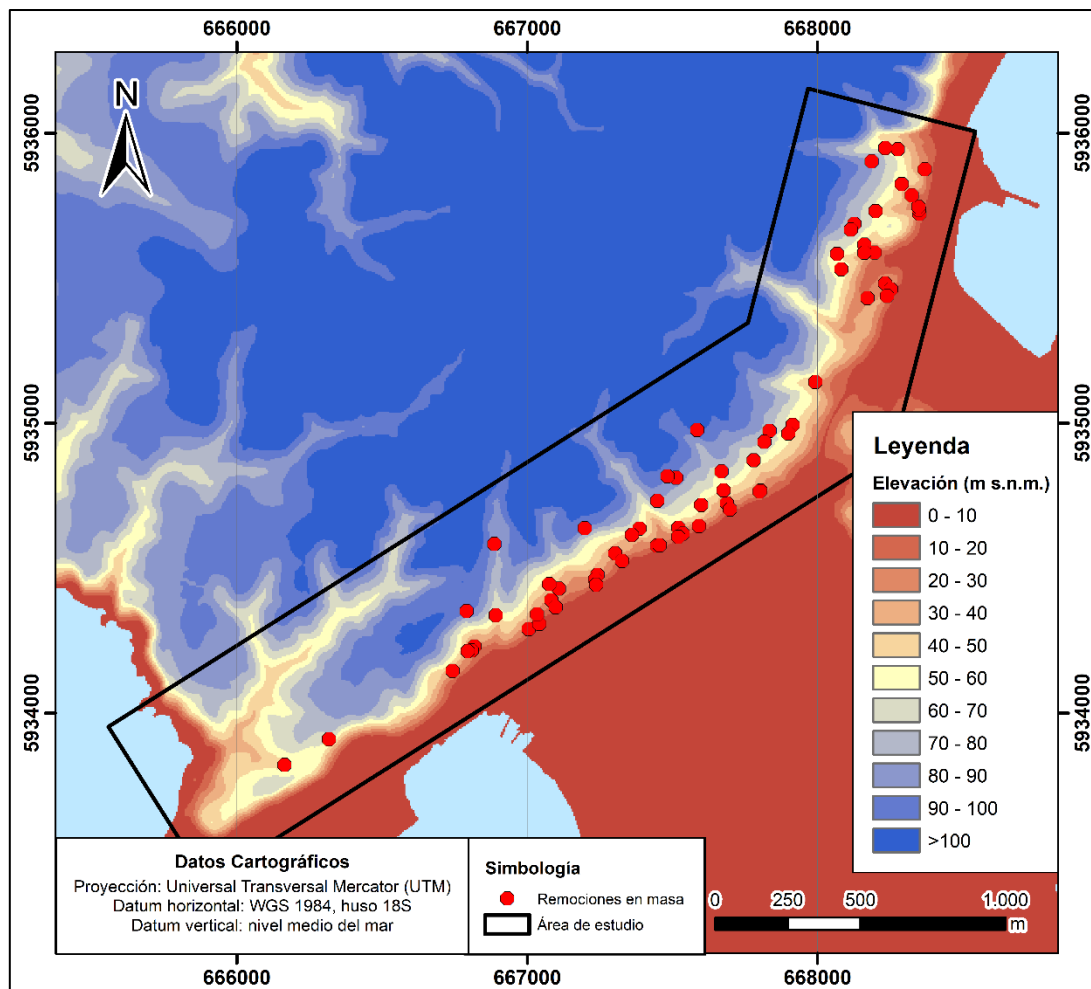


Figura 5.16: Mapa de elevación y las remociones en masa del área de estudio.

En la zona estudiada, la distancia entre la planicie de Talcahuano y los sectores de mayor elevación (rango de >100 m s.n.m.) son relativamente constantes, con algunas excepciones en las quebradas.

Al hacer un gráfico de las remociones en masa según su elevación (Figura 5.17a), se observa que la mayoría se concentra entre los 10 y 60 m s.n.m., con una alta tendencia de ocurrencia en el rango de 20-30 m s.n.m. y con menor frecuencia en los intervalos de 10-20 m s.n.m. y 50-60 m s.n.m.

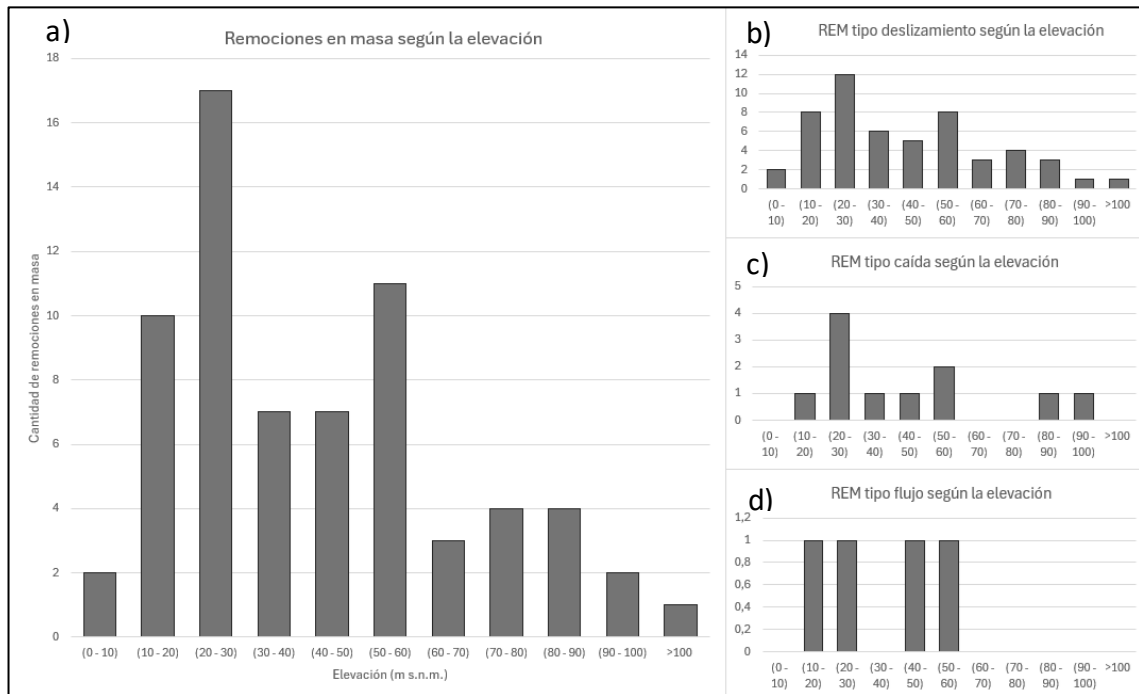


Figura 5.17: Gráfico del número de remociones en masa según la elevación. a) Gráfico de todas las remociones en masa. b) Deslizamientos. c) Caídas. d) Flujos.

Al separarlas según el tipo de remoción, se puede observar que la tendencia principal, tanto en los deslizamientos (Figura 5.17b) como en las caídas (Figura 5.17c), continúa predominando el grupo de 20-30 m s.n.m., seguido del de 50-60 m s.n.m., aunque en el primero también se encuentra el de 10-20 m s.n.m. En el caso de los flujos, estos son muy pocos datos (4), pero se observa que la ocurrencia de estos según la elevación es homogénea a lo largo de los intervalos en que se presentan (Figura 5.17d). Respecto al resto de los rangos, las remociones se distribuyen entre ellos de manera uniforme.

5.3.2. Remociones en masa y su relación con la pendiente

La pendiente es uno de los factores más importantes en la susceptibilidad a remociones en masa (Rabby *et al.*, 2020), ya que controla la estabilidad de la ladera (Kavzoglu *et al.*, 2014; Du *et al.*, 2017). Esto es debido a que afecta directamente la distribución de las fuerzas dentro de esta (Du *et*

al., 2017). Este factor influye en el contenido de agua del suelo, la formación de este y el potencial de erosión (Shano *et al.*, 2021). Mientras más alto sea el grado de pendiente, mayor será el estrés de cizalle en la ladera, lo que aumenta la susceptibilidad a remociones en masa (Shano *et al.*, 2021; Rabby *et al.*, 2020).

En el escarpe de la península de Tumbes, las pendientes tienen un alto grado de inclinación, en el que predominan los rangos sobre los 25°, especialmente en el sector sobre el Puerto San Vicente donde estas son mayoritariamente sobre los 35°. Las remociones en masa de la zona se distribuyen principalmente a lo largo de las secciones con pendientes sobre los 15°, e incluyen no solo la zona de traza de la Falla San Vicente, sino también las zonas de quebradas y escarpes de remociones en masa antiguas (Figura 5.18).

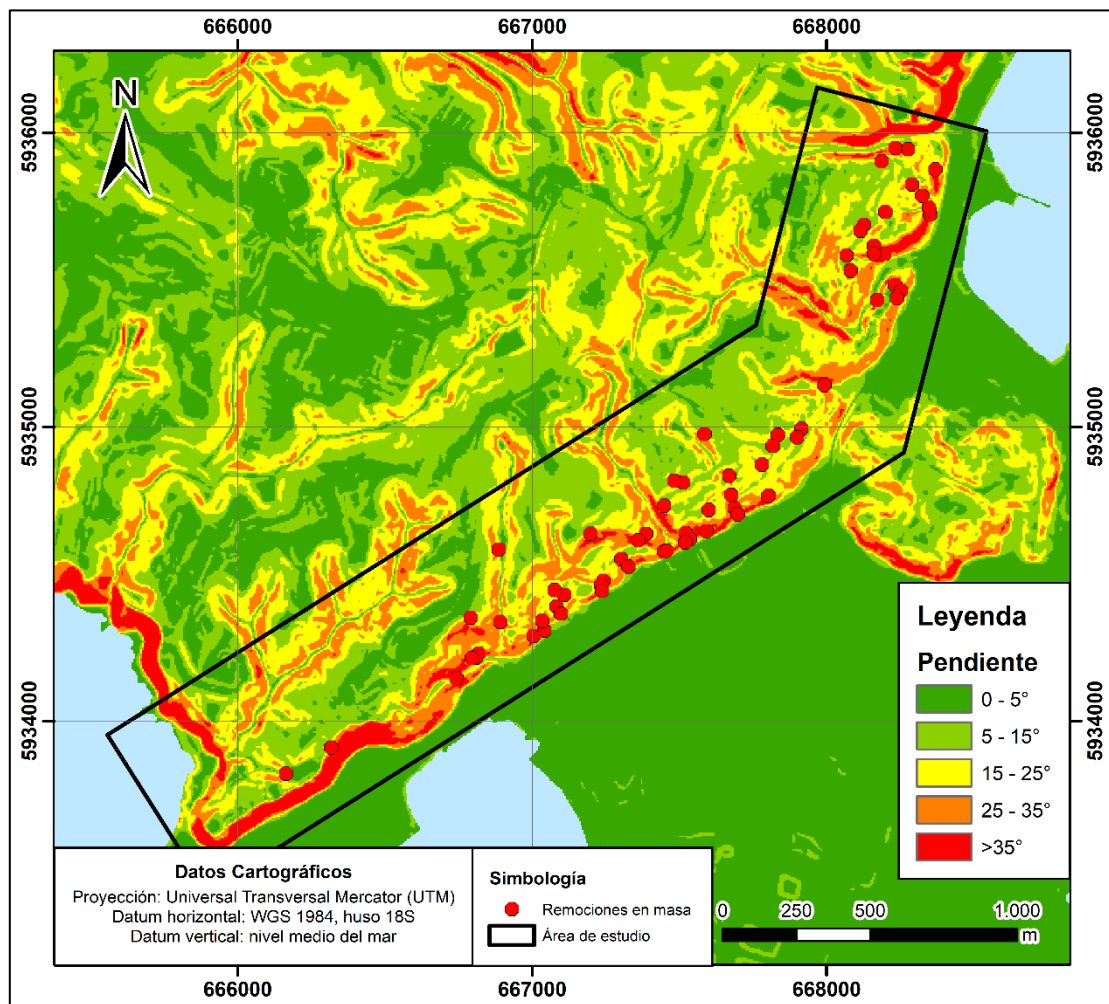


Figura 5.18: Mapa de pendiente y las remociones en masa del área de estudio.

Como se puede observar en el gráfico de la figura 5.19, las remociones ocurrieron principalmente en pendientes en los rangos de 15° - 25° y 25° - 35° , con casi un 78% de todos los movimientos. El intervalo de $>35^{\circ}$ corresponde al menos frecuente de todos, (sin contar el rango de 0° - 5° al ser una superficie aproximadamente plana) con solo un 7% del total de las remociones.

Al realizar el mismo gráfico, pero separado según el tipo de remoción en masa, se consigue que los deslizamientos presentan las mismas tendencias, con una predominancia de estas en los rangos entre 15° y 35° , a diferencia de las caídas de roca las cuales se encuentran principalmente en pendientes de 15° - 25° .

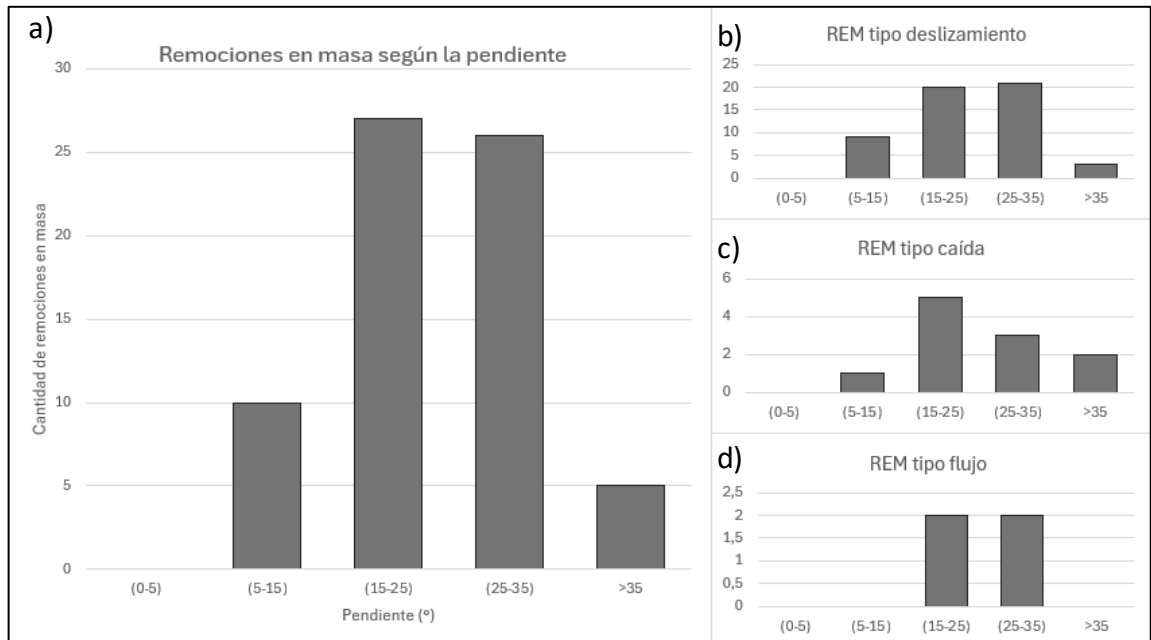


Figura 5.19: Gráfico del número de remociones en masa según la pendiente. a) Gráfico de todas las remociones en masa. b) Deslizamientos. c) Caídas. d) Flujos.

Es muy importante considerar que el mapa de pendientes no toma en consideración los cortes de camino y de construcciones de casas, las cuales presentan pendientes mucho mayores que 35° . Por ejemplo, en la campaña de terreno, todas las remociones observadas ocurrieron en pendientes sobre los 50° , 2 de ellas incluso en taludes subverticales. En el caso de la caída de roca reportada, si bien el talud era subvertical, el DEM determinó que ocurrió en una pendiente menor a 45° . De este modo, el mapa de pendiente y sus valores es más generalizado y no contempla este tipo de detalles.

5.3.3. Remociones en masa y su relación con la orientación de la ladera

La orientación de la ladera se refiere a la dirección en que cae o está la pendiente de ella y se mide en grados desde 0° a 360° en sentido horario, donde 0° corresponde a la orientación hacia el N, 90° hacia el E, y así sucesivamente (Kavzoglu *et al.*, 2013). Este factor es importante debido a que tiene relación con la exposición al sol y al viento, a la saturación del terreno de agua por precipitaciones y también está relacionada con la orientación de las discontinuidades (Kavzoglu *et al.*, 2013; Du *et al.*, 2017; Shano *et al.*, 2021).

A lo largo de toda el área de estudio (Figura 5.20), la orientación más predominante es la SE, con una tendencia menor al S, en el límite sur, y al E, en el límite suroriental (cerros Cornou, Bagnara y Alegre).

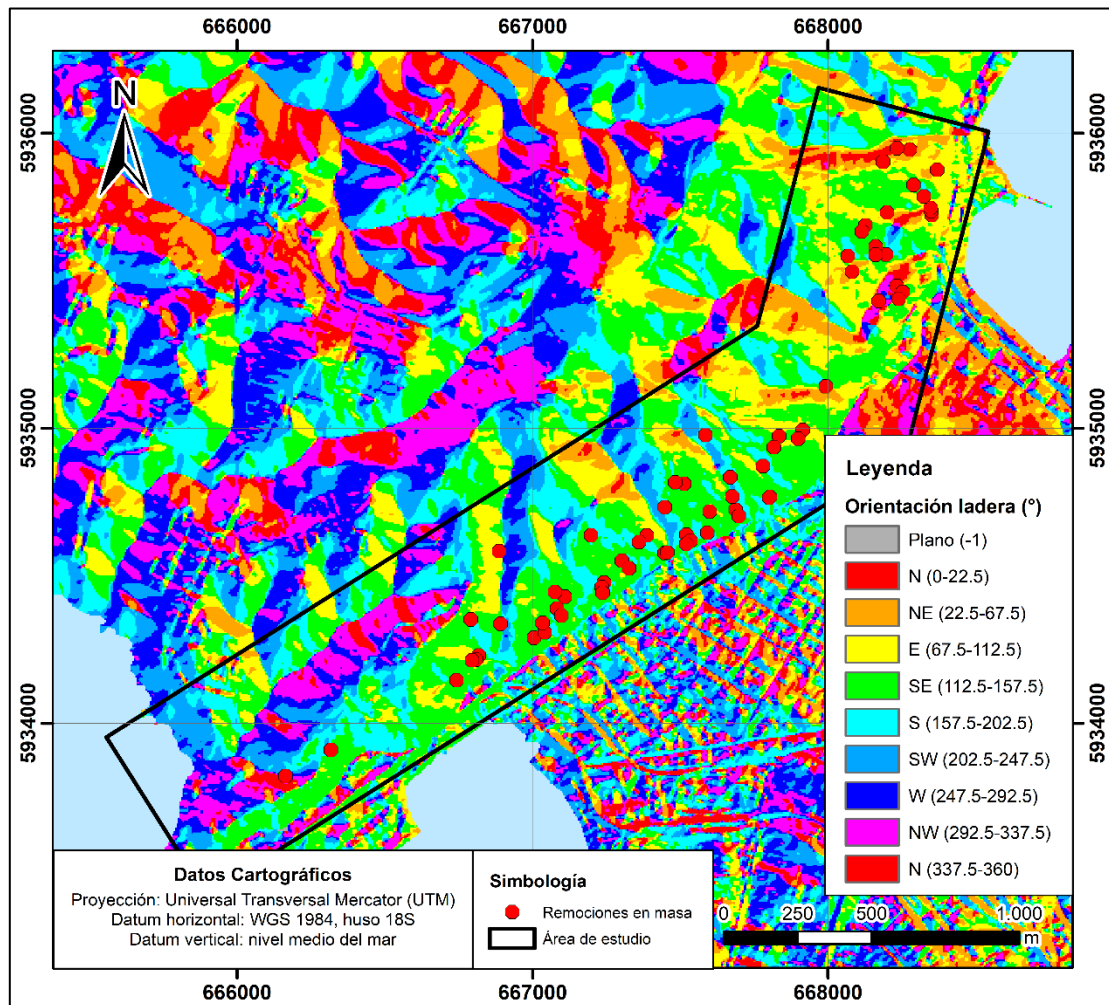


Figura 5.20: Mapa de orientación de la ladera (o aspecto) y las remociones en masa del área de estudio.

Las remociones en masa en el área de estudio tienden a ocurrir en laderas de orientación SE, en todos los diferentes tipos de remoción, concentrando al 61% de ellas (Figura 5.21). Son seguidas, en un porcentaje mucho menor por los deslizamientos con dirección al S y al E (13% y 11% respectivamente). Esto es consecuente con que, a lo largo del escarpe (donde se concentran la mayor cantidad de remociones) gran parte del área son laderas de orientación al SE producto de la falla.

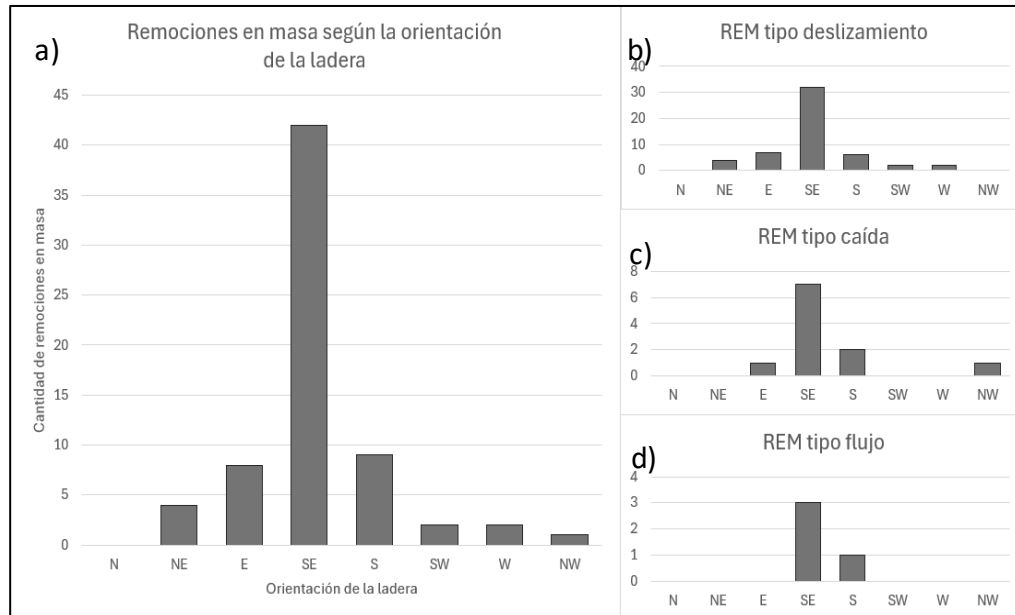


Figura 5.21: Gráfico del número de remociones en masa según la orientación de la ladera. a) Gráfico de todas las remociones en masa. b) Deslizamientos. c) Caídas. d) Flujos.

5.3.4. Remociones en masa y su relación con la litología

La litología es un factor de gran importancia que tiene relación directa con la susceptibilidad y ocurrencia de remociones en masa, debido a que cambios en ella implican variaciones en la resistencia, permeabilidad de la roca y del suelo (Kavzoglu *et al.*, 2013), y también en la respuesta a la meteorización y a la erosión (Du *et al.*, 2017).

Dentro del área de estudio afloran 8 unidades: Complejo Metamórfico Tumbes perteneciente a la Serie Occidental, Formación Quiriquina, Formación Curanilahue, Arenas Silíceas, Depósitos Litorales, Depósitos de Remociones en Masa, Depósitos Aluviales y Depósitos Antrópicos. De todas ellas no hay evidencias de estos procesos en las formaciones Quiriquina y Curanilahue, ni en los Depósitos Aluviales y tampoco en los Depósitos Antrópicos.

Los Depósitos de Remociones en Masa se concentran principalmente en los cerros La Unión, Cornou y Bagnara, aunque también se presentan, en menor medida, en el cerro Zaror (Figura 5.22).

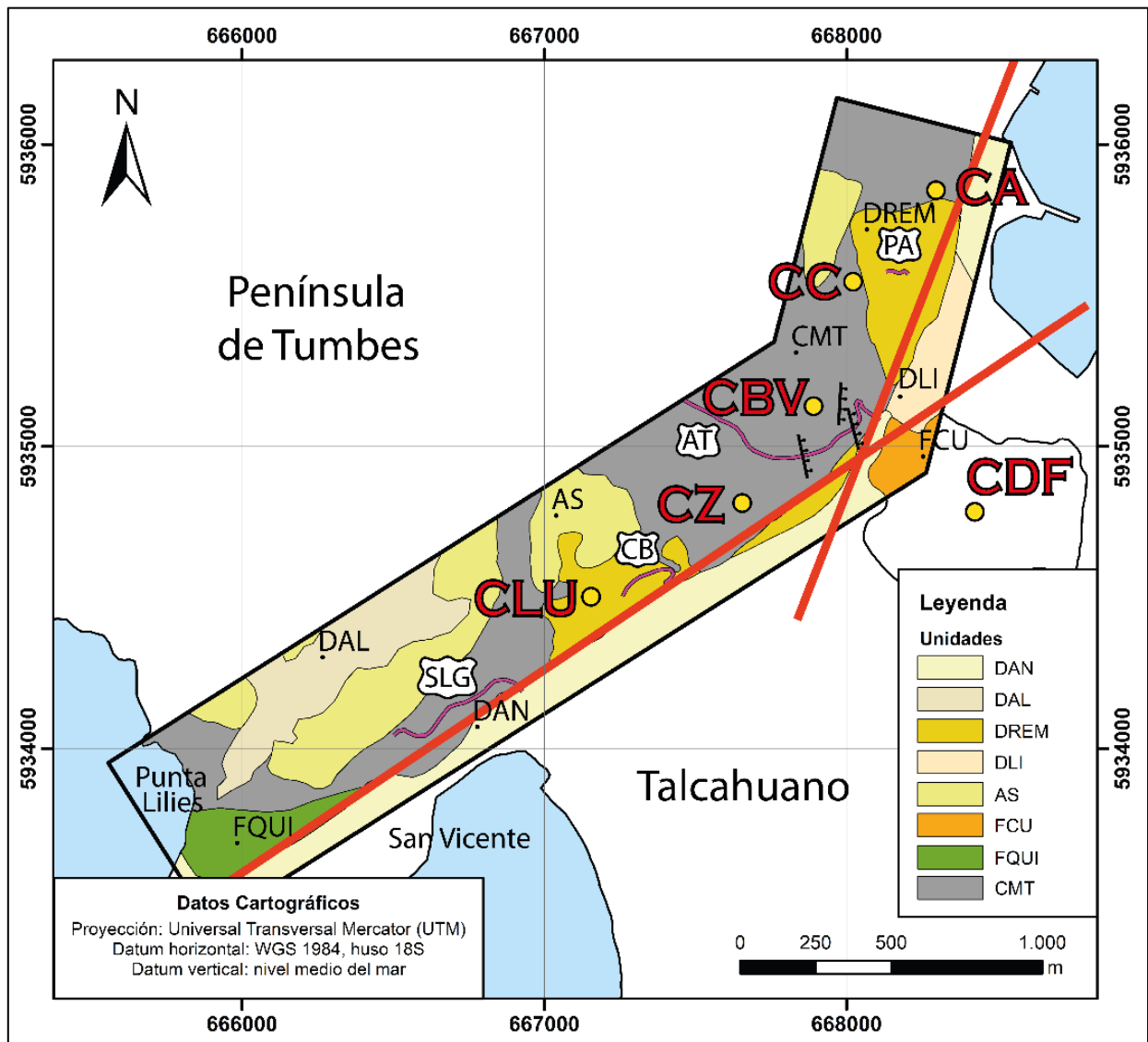


Figura 5.22: Mapa de unidades litológicas del área de estudio. Contactos litológicos basados en mapa de Velázquez *et al.* (2025): CMT: Complejo Metamórfico Tumbes; FQUI: Formación Quiriquina; FCU: Formación Curanilahue; AS: Arenas Silíceas; DLI: Depósitos Litorales; DREM: Depósitos de Remociones en Masa; DAL: Depósitos Aluviales; DAN: Depósitos Antrópicos. Líneas rojas: Fallas San Vicente En letras rojas nombres de cerros: CLU: La Unión. CZ: Zaror. CBV: Buena Vista. CC: Cornou. CA: Alegre y CDF: David Fuentes. Las líneas color púrpura corresponden a calles y pasarelas relevantes en este estudio: SLG: Subida La Gloria. CB: calle Barranquilla. AT: Avenida Tumbes. PA: pasarela que une calle Galvéz con calle Dieciocho de Septiembre.

Las remociones en masa recientes recopiladas se registran solo en 3 unidades, las cuales son: Serie Occidental, Depósitos de remociones en masa y Arenas Silíceas. Estas se distribuyen

principalmente en las dos primeras unidades (Figura 5.23).

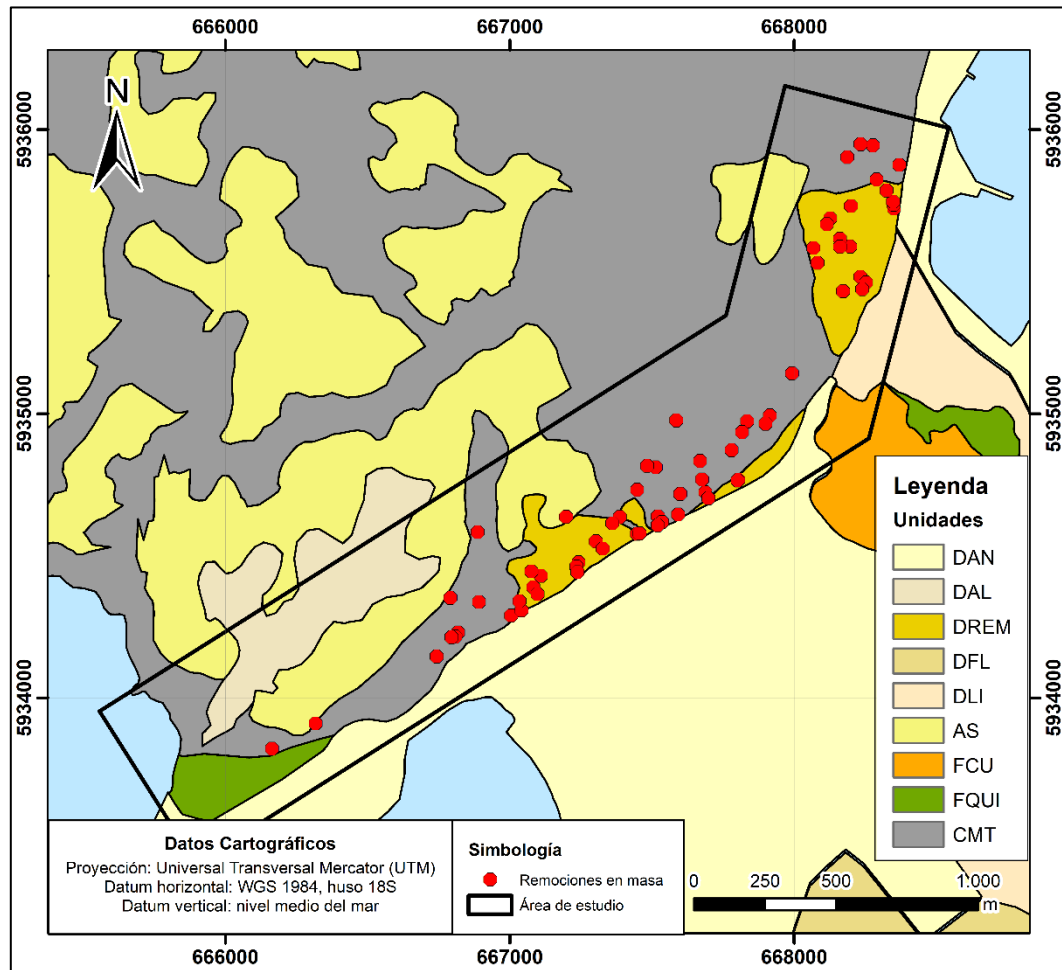


Figura 5.23: Mapa de litología y las remociones en masa del área de estudio.

En la Figura 5.24a se puede observar el gráfico de todas las remociones en masa del área y en que unidad litológica ocurrieron. En su mayoría se produjeron en la Serie Occidental (34), que es la unidad dominante y con los mayores escarpes, y en los Depósitos de Remociones en Masa (33). Es importante mencionar que el área de esta última es menor que un tercio de la otra (14% del área de estudio en comparación con el 50% que ocupan las rocas metamórficas) por lo que comparando la razón por km^2 , la proporción es 37 remociones en masa en la Serie Occidental y de 123 remociones en los Depósitos de Remociones en Masa, lo que muestra que se han producido más remociones sobre los materiales ya removidos anteriormente, los que son mucho más susceptibles, debido a que corresponden a sedimentos no consolidados, lo que los hace menos resistente que las unidades de rocas.

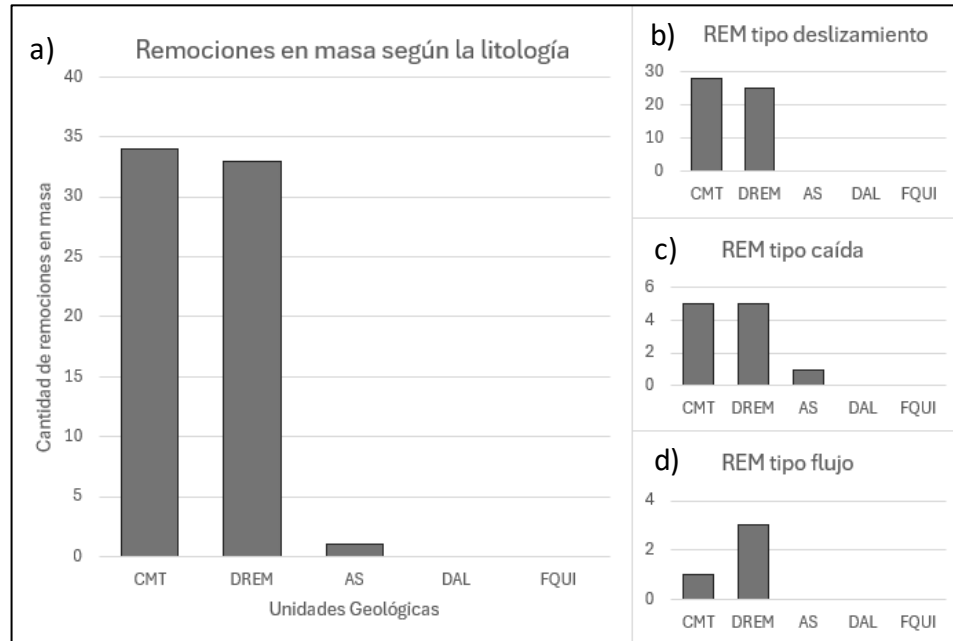


Figura 5.24: Gráfico del número de remociones en masa según la litología. a) Gráfico de todas las remociones en masa. b) Deslizamientos. c) Caídas. d) Flujos.

Al diferenciarlos por tipo de remoción, la cantidad de deslizamientos y caídas es similar. Esto no es el caso en los flujos, dado que la ocurrencia de estos es en los Depósitos de Remociones en Masa. Al igual que en el análisis anterior, esto se debe a que corresponden a materiales no consolidados, por lo que son más permeables.

5.3.5. Remociones en masa y su relación con la distancia a caminos

La construcción de caminos tiene un gran impacto en la ocurrencia de remociones en masa debido a que los cortes en la ladera afectan directamente a su estabilidad (Kavzoglu *et al.*, 2013) y aumentan el esfuerzo detrás de esta (Youssef *et al.*, 2015). Las laderas pueden cambiar de estables a inestables durante la construcción del camino o, incluso posteriormente producto del tránsito de vehículos. El área de estudio corresponde a una zona altamente urbanizada con abundantes caminos, los cuales están en toda el área (Figura 5.25).

Las remociones tienden a producirse en la zona del intervalo más cercano a los caminos, que corresponde al tramo entre 0 m y 15 m (Figura 5.26). En menor medida, ocurren en los intervalos de 15 m a 25 m y en el de 25 m a 50 m, con 4 y 5 remociones respectivamente. No se reporta ninguna remoción a más de 50 m de un camino, lo que demuestra el impacto de la construcción de estos en la inestabilidad de las laderas del área.

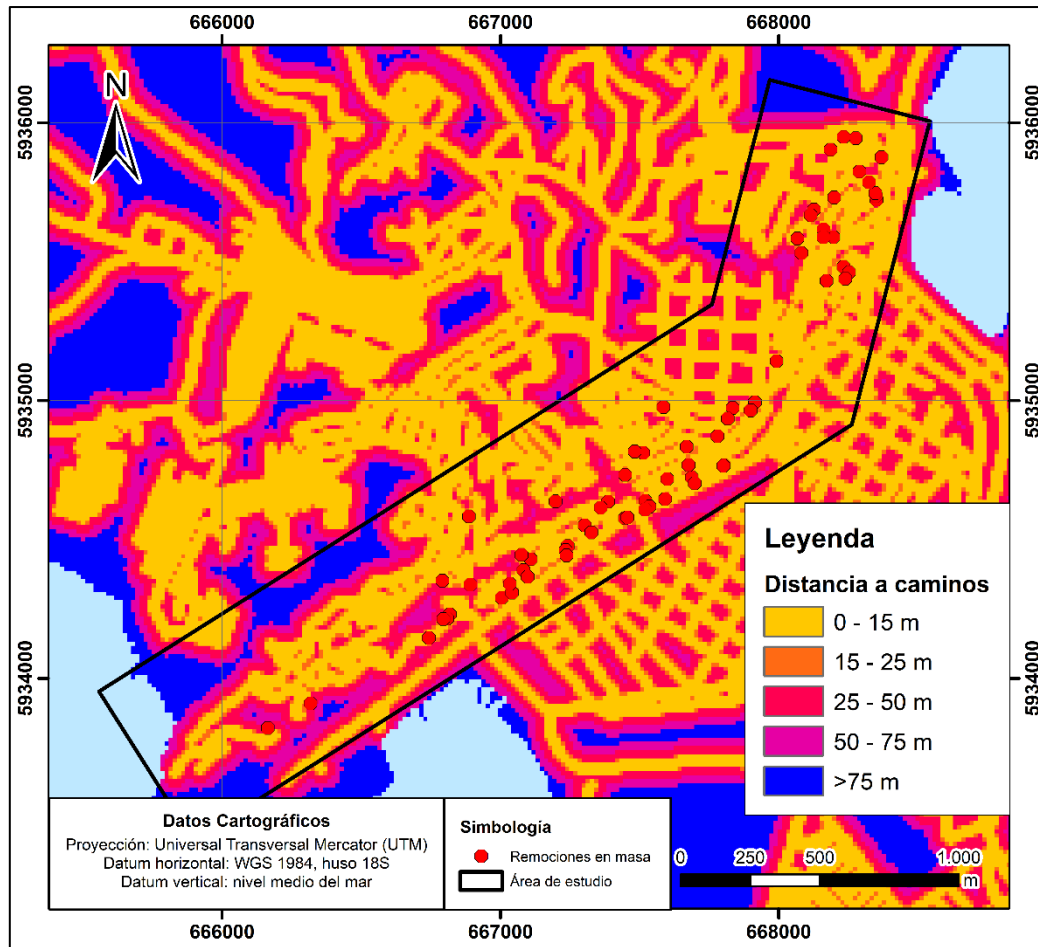


Figura 5.25: Mapa de la distancia a caminos y las remociones en masa del área de estudio.

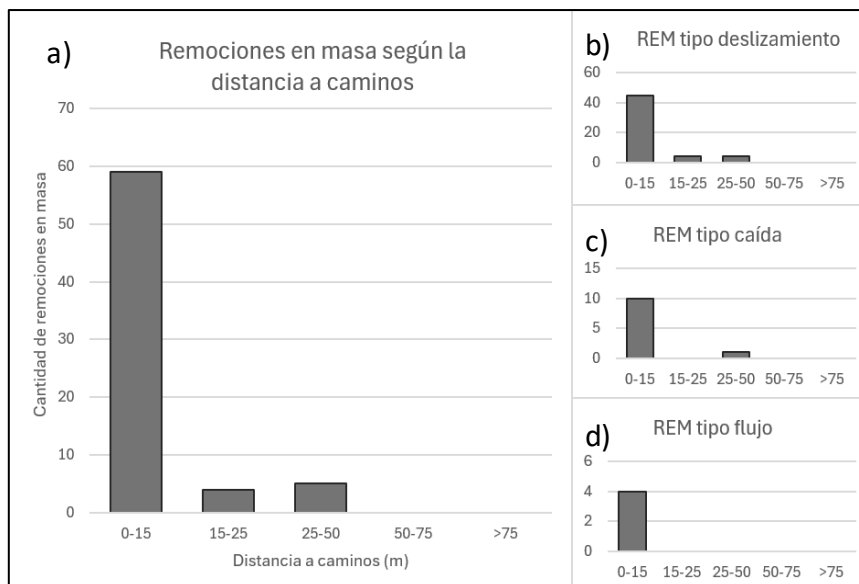


Figura 5.26: Gráfico del número de remociones en masa según la distancia a caminos. a) Gráfico de todas las remociones en masa. b) Deslizamientos. c) Caídas. d) Flujos.

6. DISCUSIÓN

6.1. FALLA SAN VICENTE

Galli (1967) describe la extensión de la Falla San Vicente desde lo que actualmente es el Puerto San Vicente hasta la Base Naval de Talcahuano. Esta corresponde a una falla normal de gran ángulo cuyo rumbo cambia de NE-SW a N-S a medida que se acerca a la Base Naval. A partir de los lineamientos identificados, a lo largo del trazo de falla que plantea Galli, existen dos de gran longitud, uno ENE-WSW y otro NNE-SSW, lo que significa que la traza falla San Vicente de Galli (1967) corre por dos de las direcciones de lineamientos, es decir que es más probable que corresponda a dos estructuras que se cortan y, por lo tanto, a dos fallas en vez de sólo una.

Según Geología de Campo II (2021), en el Mirador de Talcahuano (en la intersección de las calles Avenida del Pescador y Michimalongo), la foliación de la Serie Occidental es $N22^{\circ}W/33^{\circ}NE$. Sin embargo, como se describió con anterioridad en el capítulo de resultados, la foliación de la roca aledaña a los lineamientos es paralela al rumbo de estos, con una orientación NNE-SSW en el cerro Alegre y ENE-WSW en el cerro Zaror. Esta alineación pudo haber sido producida por el movimiento de estas fallas.

Además, en las minas de carbón de Lota, existen 2 sistemas de fallas: uno de orientación NNE-SSW, que incluye a la falla Victoria; y otro ENE-WSW, con las fallas Oeste y Coronel, entre otras (Figura 6.1). Todas estas fallas son normales y mantean al SE. De este modo, presentan las mismas orientaciones que los lineamientos mayores en el área de estudio.

Así, a partir de los lineamientos, foliaciones y la similitud de los primeros con las estructuras en Lota, se plantea la posibilidad de que la Falla San Vicente corresponda en realidad a dos fallas normales con manteo al SE: una de orientación ENE-WSW, y otra de orientación NNE-SSW. La zona de intersección de estos no está determinada debido a que la ladera en esa zona está creada antrópicamente, por lo que el lineamiento resultante no es indicativo de una estructura.

El trazo de las fallas resultantes se puede observar en la Figura 6.2.

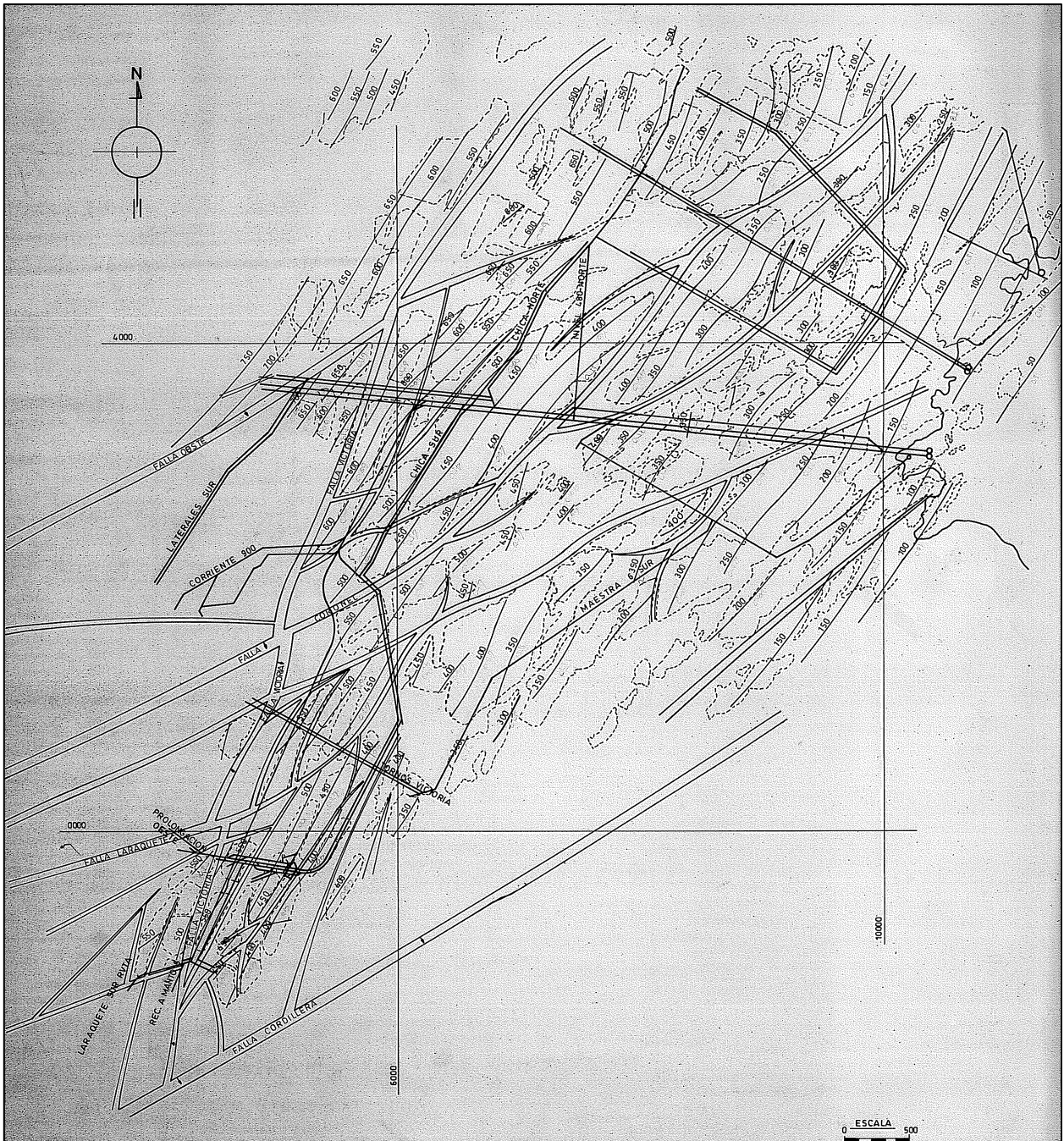


Figura 6.1: Mapa estructural del piso Manto 5 de las minas de carbón de Lota. Bonilla (s.f.)

6.2. REMOCIONES EN MASA

Las remociones en masa del área de estudio se concentran principalmente en los cerros La Unión y Zaror en la zona sur, y en los cerros Cornou y Alegre en la zona sureste. En el sector de La Gloria, sobre el Puerto San Vicente, no se registran remociones en la Formación Quiriquina y, en las rocas

de la Serie Occidental hay considerablemente menos deslizamientos que en otros sectores. Del mismo modo, en el cerro Buena Vista, la cantidad de eventos es menor, con 4 registros, y sólo uno de ellos ocurrió en las cercanías de las fallas menores observadas en terreno.

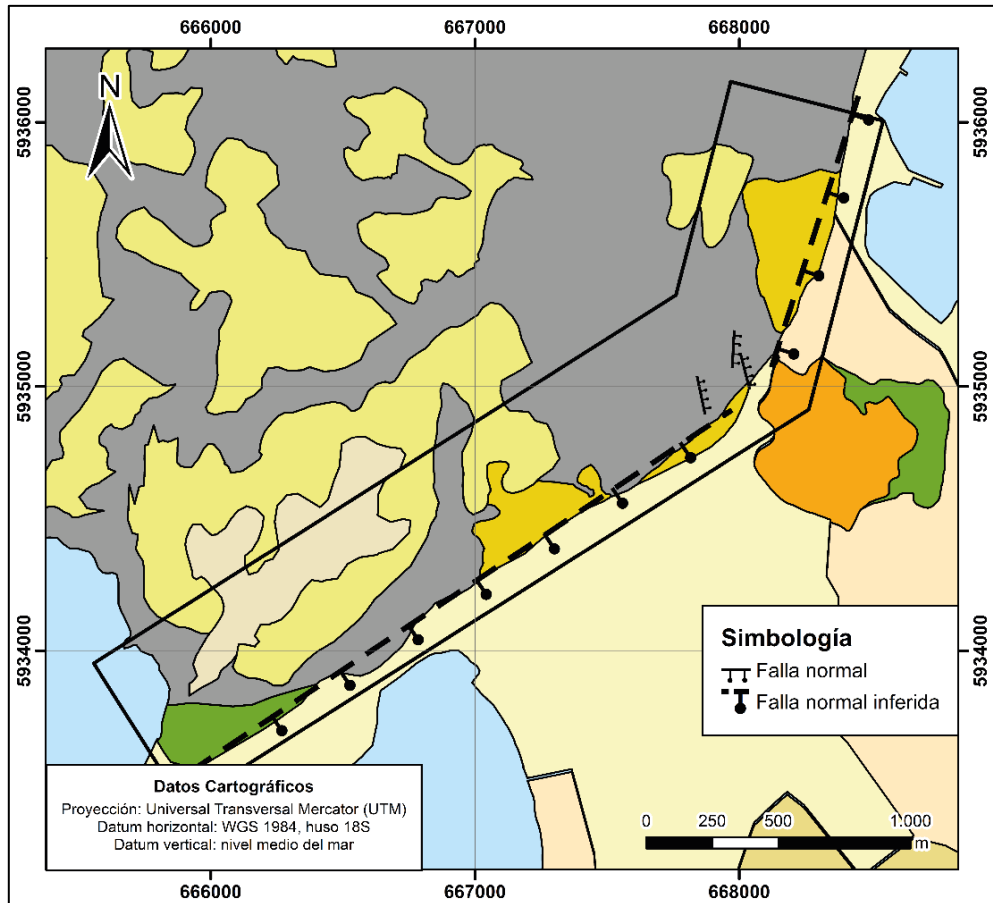


Figura 6.2: Fallas del límite sur y suroriental de la península de Tumbes. Fallas trazadas sobre mapa litológico modificado de Velázquez (en edición).

El tipo de remoción más frecuente es el deslizamiento, que representa a más del 75% del total del catastro, y predomina tanto en rocas de la Serie Occidental como en la unidad de Depósitos de Remociones en Masa. En el caso de los deslizamientos de la Serie Occidental, además de tener como uno de los factores condicionante a los planos de debilidad por la foliación de la roca, existe otros que corresponde a la superficie de contacto entre la roca y la capa de suelo. Este último es el caso del evento de mayor dimensión observado en terreno.

Las remociones en masa ocurrieron a lo largo de todos los intervalos de elevación, pero se concentran más entre los 10 y 60 m s.n.m., sectores donde se encuentran las mayores pendientes

en el área de estudio. Esto también se refleja en las remociones en masa respecto al grado de pendiente, los cuales predominan entre los 15° a 35° . Las zonas con pendientes sobre los 35° se concentran en el sector de la calle Subida la Gloria, zona sin mucho desarrollo urbano en la ladera, que minimice el grado de la pendiente, y a pesar de ser un lugar con alto ángulo, no tiene un número grande de remociones en masa.

En relación a la orientación de la ladera, producto del escarpe de las fallas, gran parte del área tiene laderas que mantean al SE, orientación donde se concentra la mayor cantidad de remociones en masa, que corresponden a más del 60% de ellas.

El factor litológico predominante se relaciona a que la Serie Occidental es la unidad de mayor representación en el área y, por sí sola, no tiene un gran grado de susceptibilidad a remociones, como se observa en el mapa de Gajardo (2022) (Figura 6.3).

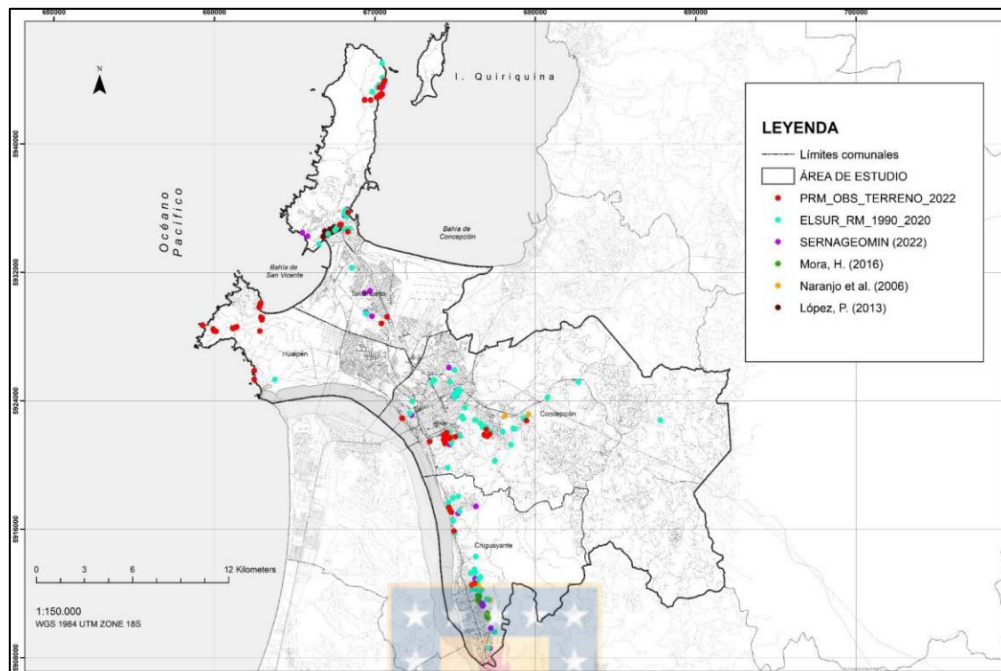


Figura 6.3: Mapa de remociones en masa en las comunas de Talcahuano, Hualpén, Concepción y Chiguayante. Gajardo (2022).

En la Figura 6.3. se evidencia que en el resto de la península de Tumbes no se registran remociones en masa, a pesar de estar compuesta principalmente de rocas de la Serie Occidental y tener zonas con pendientes mayores a 35° (Figura 5.18).

6.3. REMOCIONES EN MASA Y SU RELACIÓN CON LA GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y LA URBANIZACIÓN

Las fallas presentes en el límite sur y suroriental de la península de Tumbes provocaron, además del alzamiento de este bloque, una alineación de la foliación en las rocas metamórficas aledañas a la zona de la falla. Esta foliación creó planos de debilidad a lo largo del escarpe, los cuales condicionaron la formación de grandes remociones en masa, especialmente en el cerro La Unión, en la zona sur; y en los cerros Cornou y Bagnara, en la zona este del área de estudio. Evidencia de estos eventos de grandes dimensiones, a parte de su litología, es la presencia de coronas de deslizamientos (Figura 6.4). No hay registros históricos de la ocurrencia de estas remociones, pero, posiblemente, son anteriores a la gran urbanización de la zona.

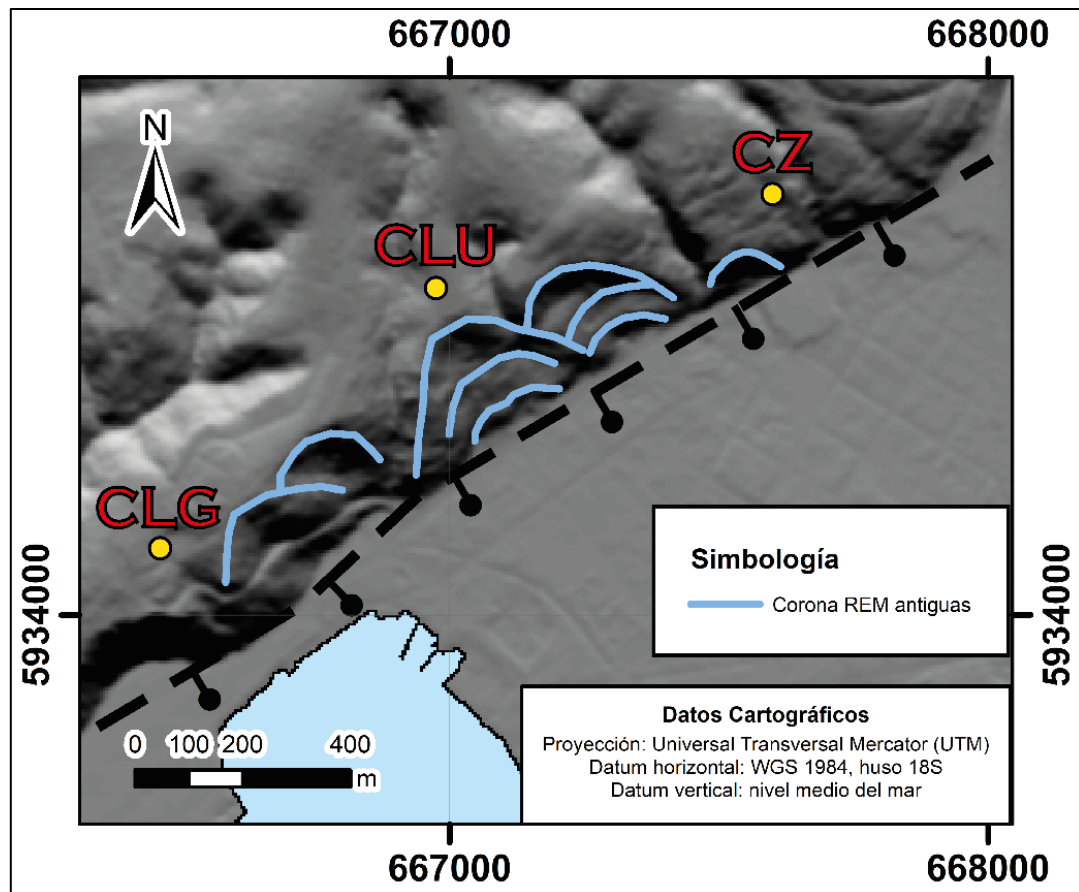


Figura 6.4: Corona de remociones en masa antiguas en los cerros La Gloria, La Unión y Zaror.

A partir del análisis de la figura 6.4., es importante señalar que las remociones en masa más recientes que han sido documentadas en la zona de estudio y las más recientes o actuales, son de

menor tamaño que las antiguas, y los factores condicionantes de mayor importancia corresponden a las fallas de gran extensión presentes en el límite sur y suroriental de la península de Tumbes y al efecto antrópico. El primero, como fue explicado con anterioridad, produjo planos de debilidad al alinear la foliación de las rocas metamórficas (unidad que consiste en la de mayor extensión en el área de estudio) con los escarpes, por dónde ocurrieron los depósitos de remociones en masa antiguas, cuya unidad, al no ser compuesta de depósitos consolidados, es altamente propensa a procesos gravitacionales.

Sobre el factor antrópico, la alta urbanización a lo largo de la ladera de la península, consistente en cortes en los cerros y el aumento del peso sobre éstos producto de la construcción de caminos y edificaciones, han desestabilizado la ladera. Este factor, en particular, es de gran importancia, porque, en el sector de La Gloria, la ladera no se encuentra altamente urbanizada (con la presencia sólo de la calle Subida La Gloria) y han ocurrido considerablemente menos remociones en masa que en el resto del área de estudio. Además, las remociones en este mismo sector se concentran exclusivamente al lado de la calle, o al lado de casas en la cima de la ladera, lo que refleja que, a pesar de que en la zona hay pendientes sobre los 25° e incluso 35°, y que están próximos a la Falla San Vicente, el factor antrópico es el de mayor impacto.

Estos factores condicionantes hacen que la zona sea más susceptible a remociones en masa, las cuales posteriormente son gatilladas, principalmente en los meses de invierno, por precipitaciones.

7. CONCLUSIONES

Se plantea la posibilidad de que la Falla San Vicente, definida por Galli (1967), corresponda, realmente a dos (2) fallas que se cortan: una falla normal de orientación ENE-WSW, en el límite sur de la península de Tumbes, y otra con rumbo NNE-SSW, en el límite suroriental. Respecto al ángulo de manteo de estas fallas, no pudo ser observado en terreno, y tampoco ha sido determinado por otros autores, debido a que no existe un afloramiento de los escarpes en el que estén expuestos. Por esto, se recomienda realizar estudios geofísicos en el límite de la península de Tumbes a modo de tener mayor conocimiento de estas fallas, como el ángulo de manteo, la intersección de estas fallas (en el caso de ser 2 sistemas) y el desplazamiento total del manteo o de sus manteos.

Las remociones en masa se concentran en la ladera de la península o zona de los escarpes de las fallas, y sólo se identifican 3 tipos: deslizamientos, caídas y flujos, con un alto dominio de los primeros, cuyo número es de 53 de un total de 68 registros. No hay evidencias de remociones tipo volcamiento, extensión lateral o producto de reptación.

Según los datos de las remociones en el área de estudio entre los años 1991 y 2024, estas se desencadenaron principalmente por precipitaciones de aguas lluvias, y ocurrieron entre los meses de mayo y septiembre. La mayoría de ellas se producen en junio y julio, meses en los cuales el agua caída se superó los 150 mm. Se debe destacar que, en los meses de mayo y agosto, las precipitaciones son sobre los 100 mm.

En relación a los parámetros estudiados, las remociones ocurren mayoritariamente en pendientes de 15° - 25° y 25° - 35° con 27 y 26 eventos respectivamente; solamente 5 remociones ocurrieron en grados más altos ($>35^{\circ}$). Esto se debe a que las zonas de menor pendiente son también las de mayor intervención antrópica, ya que tienen la mayor concentración urbana. En las inclinaciones más elevadas, las remociones se producen en las zonas adyacentes a construcciones.

Respecto a la elevación, el rango que concentra el mayor número es entre los 20 y 30 m s.n.m., con un total de 17 remociones; seguido del rango de 50-60 m s.n.m., con 11 remociones y 10-20 m s.n.m., con 10. Esta tendencia de elevaciones se debe a que bajo los 60 m s.n.m. se concentran las

laderas con pendientes entre los 15° y 35°. La orientación de la ladera donde predominan los procesos gravitacionales corresponde a la que está hacia el SE, con 42 eventos, que corresponde a. manteo de las fallas mayores (San Vicente) que controlan el relieve y límite de la península de Tumbes, lo que indica la importancia del factor estructural en el desarrollo de las remociones en masa.

La litología dominante en la zona corresponde a las rocas metamórfica de la Serie Occidental, donde existen evidencias de remociones antiguas, que dieron origen a los Depósitos de Remociones en Masa. Es en estas dos unidades donde ambos registran más de 30 remociones y no hay evidencias de estos procesos en las rocas de la Formación Quiriquina, ni en las de la Formación Curanilahue del sector, como tampoco en los Depósitos Aluviales. Las unidades donde se observa el mayor número de estos eventos son las que abarcan más área y, además, corresponden a las zonas con mayor urbanización.

La importancia del factor antrópico en la ocurrencia de las remociones en masa se ve confirmada al relacionar su número con la distancia a los caminos, ya que hay un total de 59 eventos entre los 0 m y 15 m.

Las fallas presentes en el límite sur y suroriental de la península de Tumbes son las causantes del aumento de elevación y pendiente de ésta, las cuales, además, produjeron una alineación de la foliación de las rocas de la Serie Occidental con los escarpes. El hecho de que la foliación sea paralela a las fallas creó planos de debilidad a favor de la pendiente de la ladera, lo que la hace más susceptible a las remociones en masa. A ello se le suma el factor antrópico, donde la alta urbanización de la zona ha aumentado la desestabilizado la ladera.

De este modo, aunque no haya evidencia de movimiento actual de las fallas mayores, estas han condicionado la zona a ser más susceptible a remociones en masa, por lo que la comprensión de estas fallas, hace necesario realizar estudios de suelo previos a nuevas obras viales y construcciones, en todo el sector, lo que es fundamental para la prevención de daños que se puedan producir por estos procesos.

8. REFERENCIAS

- ABDULLAH, A.; MAT AKHIR, J. & ABDULLAH, I. 2010. Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran-Sungi Lembing Area, Malaysia. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. **15**, (6): 949-958.
- ARDILES, M.; BURÓN, P.; ECHTLER, H.; FIGUEROA, O. & GLODNY, J. 2003. Análisis estructural y petrográfico de la Serie Occidental del basamento metamórfico a la latitud de Quidico (38°08' a 38°21'S), Cordillera de Nahuelbuta, Chile. Congreso Geológico Chileno N° 10: Actas digitales. Concepción.
- BASSO, M. & CEMBRANO, J. 2009. Estudio Geológico-estructural en el Valle del Alto Río Biobío, Lonquimay, Chile; Avances Preliminares. Congreso Geológico Chileno N° 12: Actas digitales. Santiago.
- BIRÓ-BAGÓCZKY, L. 1982. Revisión y redefinición de los “Estratos de Quiriquina”, Campaniano-Maastrichtiano, en su localidad tipo, en isla Quiriquina, 36°37' Lat. sur, Chile, 127 Sudamérica, con un perfil complementario en Cocholgüe. Congreso Geológico Chileno N° 3. Actas A: 29-64. Concepción.
- BLANCO, N.; CREIXELL, C. & ARANCIBIA J.P. 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: observaciones de daños y evaluación de riesgos geológicos en la comuna de Talcahuano. Informe técnico. Servicio Nacional de Geología y Minería: 9 pp. Santiago.
- BOHM, M.; LÜTH, S.; ECHTLER, H.; ASCH, G.; BATAILLE, K.; BRUHN, C.; RIETBROCK, A. & WIGGER, P. 2002. The Southern Andes between 36° and 40°S latitude: seismicity and average seismic velocities. *Tectonophysis*. Vol. **356**: 275-289.
- BÖRGEL, R. 1983. Geomorfología. Instituto Geográfico Militar: 182 pp. Santiago.
- CIIFEN. s.f. *El Niño Oscilación Sur*. En: <https://ciifen.org/el-nino-oscilacion-del-sur/>. Consultado el: 11/04/2024.
- COLLAO, S.; ALFARO, G. & HAYASHI, K. 1990. Banded iron formation and massive sulfide orebodies, south-central Chile: Geologic and isotopic aspects. *Stratabound Ore Deposits in the Andes*. Springer: 209-219. Berlin, Heidelberg.
- CREIXELL, C. 2001. Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30' S y 38°00' S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 149 pp. Concepción.
- CREIXELL, C.; LUCASSEN, F.; FRANZ, G.; VÁSQUEZ, P. & FIGUEROA, O. 2002. Petrology of the Hualpén stock: Evidence of late Triassic epizonal plutonism at the western Margin of Gondwana (36°45'S, 73°10'W). *Symposium on Andean Geodynamics* N° 5: 167-170. Toulouse.

- CRUDEN, D. 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. Vol. **43**: 27-29.
- CRUDEN, D.M. & VARNES, D.J. 1996. Landslide types and processes. *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report. N° 247: 36-75.
- CUANALO, O.; OLIVA, A.; GALLARDO, R. 2011. Inestabilidad de laderas: influencia de la actividad humana. *Inestabilidad de laderas: deslizamientos y factores desencadenantes. Elementos BUAP*. Vol. **84**: 39-46. México.
- DERCH, P. 2014. Remoción en masa sector cerro Alegre, Talcahuano, Región del Biobío. Informe técnico. Servicio Nacional de Geología y Minería (Inédito): 9 pp. Puerto Varas.
- DU, G.L.; ZHANG, Y.S.; IQBAL, J.; YANG, Z.H. & YAO, X. 2017. Landslide susceptibility mapping using an integrated model of information value method and logistic regression in the Bailongjiang watershed, Gansu Province, China. *Journal of Mountain Science*. Vol. **14** (2): 249-268.
- FALCÓN, M.F.; RAMÍREZ, P.; ARENAS, M.; CREIXELL, C.; HUERTA, S. & MARÍN, M.F. 2010. Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área de Concepción-Talcahuano-Hualpén-Chiguayante, Región del Biobío. Mapa 12-1: Peligro de Remociones en Masa. Servicio Nacional de Geología y Minería. Vol. **1**: 12 pp. Santiago.
- FAJRI, S.N.; SURTIYONO, E. & NALENDRA, S. 2019. Lineament analysis of digital elevation model to identification of geological structure in Northern Manna Sub-Basin, Bengkulu. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. **636**: 012001.
- FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E. & SAVAGE, W.Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*. Vol. **102** (3-4): 85-98.
- GALLI, C. 1967. Geología Urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano, Chile. Universidad de Concepción. Informe final del Proyecto de Investigación N° 75 de la Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción (Inédito): 248 pp. Concepción.
- GAJARDO, L. A. 2022. Método estadístico bivariado (*frequency ratio*) para modelar la susceptibilidad a remociones en masa e identificar unidades geomorfológicas susceptibles. Una herramienta para la gestión del riesgo en las comunas de Concepción, Hualpén, Chiguayante y Talcahuano. Tesis para obtener al Título de Geógrafo. Departamento de Arquitectura, Urbanismo y Geografía. Universidad de Concepción (Inédito): 192 pp. Concepción.
- GARCÍA-RODRÍGUEZ, M.; MALPICA, J.; BENITO, B. & DÍAZ, M. 2008. Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology*. Vol. **95** (3-4): 172-191.

- GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2018. Geología de la zona Concepción-Arauco, al sur del río Biobío, Región del Biobío, Chile. 36°49'S-37°16'S y 73°19'W-72°55'W. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 176 pp. Concepción.
- GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2021. Geología del sector nororiental del río Biobío, entre los 36°33'35"-37°08'03"S y 73°00'09"-73°17'38"W, Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 193 pp. Concepción.
- GLODNY, J.; ECHTLER, H.; COLLAO, S.; ARDILES, M.; BURÓN, P. & FIGUEROA, O. 2008. Differential late Paleozoic active margin evolution in south-central Chile (37°S-40°S)-the Lanahue Fault Zone. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **26** (4): 397-411.
- GLODNY, J.; LOHRMANN, J.; ECHTLER, H.; GRÄFE, K.; SEIFERT, W.; COLLAO, S. & FIGUEROA, O. 2005. Internal dynamics of a paleoaccretionary wedge: insights from combined isotope tectonochronology and sandbox modelling of the South-Central Chilean forearc. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. **231** (1-2): 23-39.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. & OTEO, C. 2002. Ingeniería geológica. Pearson Prentice Hall: 715 pp. España.
- GORNY, M. 30 de marzo 2023. El fenómeno de El Niño en Chile: ¿Qué debemos saber?. Oceana Chile. En: <https://chile.oceana.org/blog/el-fenomeno-de-el-nino-en-chile-que-debemos-saber/>. Consultado el 10/04/2024.
- HAJEK, E. R. & DI CASTRI, F. 1975. Bioclimatografía de Chile. Manual de consulta. Dirección de Investigación. Universidad Católica de Chile.
- HAUSER, A. 2000. Remociones en masa en Chile (versión actualizada). Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín N° 59: 89 pp. Santiago
- HENRÍQUEZ, E. 2019. Análisis de susceptibilidad a remociones en masa en la comuna de Corral, al norte de los 39°54'S, región de los Ríos, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 94 pp. Concepción.
- HERVÉ, F. 1977. Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, South Central Chile. Comparative Studies on the Geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile. Japan Society for the promotion of Science: 1-51. Tokyo.
- HERVÉ, F.; KAWASHITA, K.; MUNIZAGA, F. & BASSEI, M. 1984. Rb-Sr isotopic ages from late Palaeozoic metamorphic rocks of central Chile. *Journal of the Geological Society*. Vol. **141**: 877-884. London.
- HUNGR, O.; EVANS S. G.; BOVIS M. & HUTCHINSON, J. N. 2001. Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience*. Vol. **7**: 221-238.

- HUTCHINSON, J. N. 1988. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. International Symposium on Landslides N° 5. Acta 1: 3-35. Lausanne.
- ISLA, F.; QUEZADA, J.; MARTÍNEZ, C.; FERNÁNDEZ, A. & JAQUE, E. 2012. The evolution of the Bío Bío delta and the coastal plains of the Arauco Gulf, Bío Bío Region: the Holocene sea-level curve of Chile. *Journal of Coastal Research*. Vol. **28** (1): 102-111.
- KAVZOGLU, T.; SAHIN, E.K. & COLKESEN, I. 2014. Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides*. Vol. **11**: 425-439.
- LARA, M. 2007. Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología y Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología (Inédito): 212 pp. Santiago.
- LARA, M. & SEPÚLVEDA, S. 2008. Remociones en Masa.. Apunte del Curso GL62C. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 63 pp. Santiago.
- LÓPEZ, P. 2013. Evaluación de peligrosidad por procesos de remoción en masa en los cerros La Unión y Zaror. Comuna de Talcahuano, Región del Biobío (Chile). *Revista Geográfica del Sur*. Vol. **4** (6): 59-83. Concepción.
- LUCASSEN, F.; TRUMBULL, R.; FRANZ, G.; CREIXELL, C.; VÁSQUEZ, P.; ROMER, R. & FIGUEROA, O. 2004. Distinguishing crustal recycling and juvenile additions at active continental margins: the Paleozoic to recent compositional evolution of the Chilean Pacific margin (36°-41° S). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **17** (2): 103-119. Amsterdam.
- MARDONES, M. 1978. El sitio geomorfológico de las ciudades de Concepción y Talcahuano. Universidad de Concepción, Instituto de Antropología. Historia y Geografía (Inédito): 67 pp. Concepción.
- MARDONES, M. 2010. Procesos de remoción en masa asociados al sismo de 8.8 mw del 27/F 2010 en el litoral de Concepción, Chile. *Sociedad Hoy*. Vol. **19**: 11-32. Concepción.
- MARDONES, M., & ROJAS, J. 2012. Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*. Vol. **53**: 57-74. Santiago
- MARDONES, M.; RODRÍGUEZ, A. & SOTO, J. 1994. Los riesgos naturales en la comuna de Talcahuano. Congreso Geológico Chileno N° 7. Vol. **1**: 635-656. Concepción.

- MELNICK, D.; ECHTLER, H.; PINEDA, V.; BOHM, M.; MANZANARES, A. & VIETOR, T. 2003. Active faulting and northward growing of the Arauco Peninsula, South-central Chile (37°30'S). Congreso Geológico Chileno N° 10: Actas digitales. Concepción.
- MENDOZA, J. 2001. Distribución, caracterización, génesis y características tectónicas de los yacimientos arenas silíceas del área costera de la Octava Región, entre Coliumo y Los Álamos. Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 181 pp. Concepción.
- MORENO, M. 2004. Dinámica del Antearco Externo en la zona del Bloque de Arauco, 37°-38° S, Octava Región, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito). 121 pp. Concepción.
- MUHAMMAD, M. & AWDAL, A. 2012. Automatic mapping of lineaments using shaded relief images derived from digital elevation model (DEM) in Erbil-Kurdistan, northeast Iraq. *Advances in Natural and Applied Sciences*. Vol. 6 (2): 138-146.
- MUÑOZ, V. 2007. El basamento metamórfico paleozoico, Serie Occidental en la Hoja Queule, IX y X Región, Chile: condiciones presión-temperatura del metamorfismo. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 191 pp. Santiago.
- PINEDA, V. 1983. Evolución paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior -Terciario. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología (Inédito): 286 pp.
- POBLETE, M., & DOBRY, R. 2016. Modelo dinámico del subsuelo de Concepción. *IDIEM*. Vol. 7 (3): 111-136. <https://revistaidiem.uchile.cl/index.php/RIDIEM/article/view/38525>.
- QUEZADA, J. 1996. Geología urbana y ambiental de la ciudad de Concepción. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 143 pp. Concepción.
- QUEZADA, J.; CECIONI, A.; ESTERIO, H. & PINEDA, V. 1997. Geología urbana de Talcahuano. Congreso Geológico Chileno N° 8. Vol. 1: 785-789. Antofagasta.
- QUINZIO, L. A.; BONILLA, R. U. & GONZÁLEZ, A. E. 2003. Geología del sector costero provincia de Concepción. Mapa realizado con los cursos de Geología de Campo II de la Carrera de Geología de la Universidad de Concepción entre los años 1998 y 2002. Congreso Geológico Chileno N° 10. Poster. Concepción.
- QUINZIO, L. A., BONILLA, R. U., GONZÁLEZ, A. E., & GONZÁLEZ, L.N. 2011. Geology of the Coastal Range, Biobío Region, Chile. Poster in 22. Lateinamerika Kolloquium (LAK2011 22th) Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) Heidelberg Institute of Earth Sciences. Poster. Heidelberg.

- RABBY, Y.W.; ISHTIAQUE, M.B. & RAHMAN, M. 2020. Evaluating the effects of digital elevation models in landslide susceptibility mapping in Rangamati District, Bangladesh. *Remote Sensing*. Vol. **12** (17): 35 pp.
- RAMÍREZ, P. & CARRASCO, F. 2022. Evaluación de peligro de remoción en masa en tres sectores de la comuna de Talcahuano, Región del Biobío. Informe Inédito. Servicio Nacional de Geología y Minería. En <https://repositorio.sernageomin.cl/handle/0104/25961>.
- RIOSECO, R. & TESSER, C. s.f. Cartografía Interactiva de los climas de Chile. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. En: www.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva. Consultado el 15/04/2024.
- RODRÍGUEZ, D. 2022. Análisis estructural, implicancias tectónicas y geología del margen suroccidental de la comuna de Talcahuano, región del Biobío. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 370 pp. Concepción.
- SALAZAR, C. 2004. Ammonites del Maastrichtiano de la Formación Quiriquina, VIII Región del Biobío, Chile: sistemática, bioestratigrafía y afinidades paleobiogeográficas. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 155 pp. Concepción.
- SALAZAR, C.; STINNESBECK, W.; QUINZIO-SINN, L. & ÁLVAREZ, M. 2015. Sequence stratigraphy affinities of the Quiriquina Formation (Late Cretaceous) from central Chile. Congreso Geológico Chileno N° 14. Actas 1: 700-703. La Serena.
- SARRICOLEA, P.; HERRERA-OSSANDON, M. & MESEGUER-RUIZ, O. 2017. Climatic regionalization of continental Chile. *Journal of Maps*. Vol. **13** (2): 66-73.
- SEPÚLVEDA, N. 2022. Visita técnica a sectores de la comuna de Talcahuano Región del Biobío, afectados por remociones en masa durante julio del año 2022. Informe técnico. Servicio Nacional de Geología y Minería. En <https://repositorio.sernageomin.cl/handle/0104/24700>.
- SEPÚLVEDA, N. 2024. Remociones en masa detonadas por precipitaciones durante agosto y septiembre de 2023, comunas de Tomé, Talcahuano y Hualpén, Gran Concepción, Biobío. Informe técnico. Servicio Nacional de Geología y Minería. En <https://repositorio.sernageomin.cl/handle/0104/26031>.
- SERNAGEOMIN. 2022. Guía de contenidos exigidos en estudios de peligro de remociones en masa evaluados por SERNAGEOMIN, en el contexto de permisos municipales. Servicio Nacional de Geología y Minería. En: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2022/10/Guia-Usuario-ATG-OPM.pdf>. Consultado el 28/05/2024.
- SERNAGEOMIN. 2024a. Ficha proyecto: Estructura y peligros asociados a la Falla San Vicente, Talcahuano, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería. En: https://plannacionalgeologia.sernageomin.cl/project/falla_san_vicente_talcahuano/. Consultado el 08/05/2024.

- SERNAGEOMIN. 2024b. Minuta ATG flash Biobío 31/2024. Descripción de la remoción en masa de tipo deslizamiento de rocas observada el 17-06-2024. Informe técnico. Servicio Nacional de Geología y Minería. Concepción.
- SHANO, L.; RAGHUVANSHI, T.K. & METEN, M. 2021. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio model: the case of Gamo highland, South Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. **14**: 1-18.
- SUÁREZ, J. 1998. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Ingeniería de suelos. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos: 550 pp. Bucaramanga.
- TARBUCK, E.J.; LUTGENS, F.K. & TASA, D. 2005. Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología física (8ª edición). Pearson Prentice Hall: 736 pp. Madrid.
- VARNES, D.J. 1978. Slope movement types and processes. *Special Report*. Vol. **176**: 11-33.
- VELÁSQUEZ, R.; CREIXELL, C.; MERINO, R.N.; SEPÚLVEDA, N.; QUINZIO, L.A. (en preparación). Geología del Área Concepción-Talcahuano, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica: pp. 1 Mapa Escala 1:100.000. Santiago.
- WILLNER, A.; HERVÉ, F. & MASSONNE, H. 2000. Mineral chemistry and pressure-temperature evolution of two contrasting high-pressure-low-temperature belts in the Chonos Archipelago, Southern Chile. *Journal of Petrology*. Vol. **41** (3): 309-330.
- YOUSSEF, A.M.; PRADHAN, B.; JEBUR, M.N. & EL-HARBI, H.M. 2015. Landslide susceptibility mapping using ensemble bivariate and multivariate statistical models in Fayfa area, Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences*. Vol. **73**: 3.745-3.761

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
I. Inventario de remociones en masa en el área de estudio	85
II. Inventario de remociones en masa observadas en terreno	90

ANEXO I

Tabla de Inventario de remociones en masa en el área de estudio. Elaborada con datos de SERNAGEOMIN, López (2013), Gajardo (2022), prensa local y red social X.

N°	ID	Coordenadas UTM		Sector	Fecha	Tipo de remoción en masa	Factor desencadenante	Referencia
		Este	Norte					
1	BI001	667512	5934616	Cerro Zaror	19/6/1991	Deslizamiento de suelo	Precipitaciones	Diario el Sur en Gajardo (2022)
2	BI002	667376	5934618	Cerro La Unión	19/6/1991	Deslizamiento y flujo	Precipitaciones	Diario el Sur en Gajardo (2022)
3	BI003	667587	5934710	Cerro Zaror	9/6/1992	Deslizamiento de tierra	Precipitaciones	Diario el Sur en Gajardo (2022)
4	BI004	668290	5935810	Cerro Cornou	9/6/1992	Deslizamiento de tierra	Precipitaciones	Diario el Sur en Gajardo (2022)
5	BI005	667652	5934810	Cerro Zaror	3/5/1992	Deslizamiento de tierra	Precipitaciones	Diario el Sur en Gajardo (2022)
6	BI006	668195	5935710	Cerro Zaror	30/7/1993	Deslizamiento de tierra	Desconocido	Diario el Sur en Gajardo (2022)
7	BI007	667081	5934370	Cerro La Unión	3/6/1993	Deslizamiento de tierra	Precipitaciones	Diario el Sur en Gajardo (2022)
8	BI008	668122	5935670	Cerro Cornou	18/1/1997	Deslizamiento de tierra	Antrópico	Diario el Sur en Gajardo (2022)
9	BI009	667108	5934410	Cerro La Unión	30/6/2000	Deslizamiento de tierra	Precipitaciones	Diario el Sur en Gajardo (2022)
10	BI010	668351	5935710	Cerro Cornou	5/8/2001	Deslizamiento de tierra	Precipitaciones	Diario el Sur en Gajardo (2022)
11	BI011	668110	5935650	Cerro Cornou	24/5/2009	Deslizamiento de tierra	Precipitaciones	Diario el Sur en Gajardo (2022)
12	BI012	668234	5935470	Cerro Bagnara	5/7/2010	Deslizamiento de tierra	Precipitaciones	Diario el Sur en Gajardo (2022)
13	BI013	668180	5935880	Cerro Alegre	13/7/2016	Deslizamiento de tierra	Precipitaciones	Diario el Sur en Gajardo (2022)
14	BI014	667589	5934625	Cerro Zaror	Reportado el 2013	Caída de roca	Desconocido	López (2013)

Continuación Tabla Inventario de remociones en masa en el área de estudio.								
N°	ID	Coordenadas UTM		Sector	Fecha	Tipo de remoción en masa	Factor desencadenante	Referencia
		Este	Norte					
15	BI015	667531	5934605	Cerro Zaror	Reportado el 2013	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
16	BI016	666888	5934564	Cerro La Unión	Reportado el 2013	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
17	BI017	667295	5934526	Cerro La Unión	Reportado el 2013	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
18	BI018	666889	5934320	Cerro La Unión	Reportado el 2013	Caída de roca	Desconocido	López (2013)
19	BI019	667681	5934707	Cerro Zaror	Reportado el 2013	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
20	BI020	667505	5934780	Cerro Zaror	Reportado el 2013	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
21	BI021	667520	5934583	Cerro Zaror	Reportado el 2013	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
22	BI022	667775	5934852	Cerro Zaror	Reportado el 2013	Flujo	Desconocido	López (2013)
23	BI023	667076	5934444	Cerro La Unión	Sin fecha	Flujo	Desconocido	López (2013)
24	BI024	666818	5934229	Subida La Gloria	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
25	BI025	666809	5934215	Subida La Gloria	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
26	BI026	667236	5934451	Cerro La Unión	Sin fecha	Caída de roca	Desconocido	López (2013)
27	BI027	667239	5934432	Cerro La Unión	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
28	BI028	666741	5934151	Subida La Gloria	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
29	BI029	666795	5934213	Subida La Gloria	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)





Continuación Tabla Inventario de remociones en masa en el área de estudio.								
N°	ID	Coordenadas UTM		Sector	Fecha	Tipo de remoción en masa	Factor desencadenante	Referencia
		Este	Norte					
30	BI030	667477	5934798	Cerro La Unión	Sin fecha	Caída de roca	Desconocido	López (2013)
31	BI031	667043	5934304	Cerro La Unión	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
32	BI032	667025	5934322	Cerro La Unión	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
33	BI033	667891	5934944	Cerro Buena Vista	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
34	BI034	667807	5934913	Cerro Buena Vista	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
35	BI035	667801	5934764	Cerro Zaror	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
36	BI036	667678	5934755	Cerro Zaror	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
37	BI037	667322	5934503	Cerro La Unión	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
38	BI038	667438	5934554	Cerro La Unión	Sin fecha	Caída de roca	Desconocido	López (2013)
39	BI039	667448	5934556	Cerro La Unión	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
40	BI040	667701	5934687	Cerro Zaror	Sin fecha	Deslizamiento	Desconocido	López (2013)
41	BI041	667200	5934625	Cerro La Unión	Sin fecha	Caída de roca	Desconocido	López (2013)
42	BI042	667824	5934953	Cerro Buena Vista	Reportado en septiembre 2022	Deslizamiento de tierra	Desconocido	Gajardo (2022)
43	BI043	667906	5934975	Cerro Buena Vista	Reportado en septiembre 2022	Caída de roca	Desconocido	Gajardo (2022)

Continuación Tabla Inventario de remociones en masa en el área de estudio.								
N°	ID	Coordenadas UTM		Sector	Fecha	Tipo de remoción en masa	Factor desencadenante	Referencia
		Este	Norte					
44	BI044	668349	5935724	Cerro Cornou	Reportado en septiembre 2022	Deslizamiento de tierra y roca	Desconocido	Gajardo (2022)
45	BI045	668372	5935861	Cerro Alegre	27/2/2010	Deslizamiento	Sismo	Blanco <i>et al.</i> (2010)
46	BI046	668347	5935734	Cerro Alegre	27/2/2010	Deslizamiento	Sismo	Blanco <i>et al.</i> (2010)
47	BI047	668273	5935930	Cerro Alegre	6/2014	Deslizamiento de suelo y roca	Precipitaciones	Derch (2014)
48	BI048	666792	5934339	San Vicente	27/7/2014	Deslizamiento de tierra	Precipitaciones	X (ex twitter)
49	BI049	667454	5934712	Cerro Zaror	7/2022	Deslizamiento rotacional de suelo y roca	Precipitaciones	Sepúlveda (2022)
50	BI050	668165	5935417	Cerro Bagnara	25/7/2022	Caída de roca	Precipitaciones	Sepúlveda (2022)
51	BI051	668080	5935511	Cerro Cornou	26/7/2024	Deslizamiento de suelo	Precipitaciones	Sepúlveda (2022)
52	BI052	668054	5935567	Cerro Cornou	26/7/2022	Deslizamiento de suelo y roca	Precipitaciones	Sepúlveda (2022)
53	BI053	667572	5934955	Cerro Zaror	15/8/2022	Deslizamiento de suelo	Precipitaciones	Ramírez & Carrasco (2022)
54	BI054	668229	5935934	Cerro Vista Hermosa	Reportado en agosto 2023	Deslizamiento de suelo y roca	Precipitaciones	Sepúlveda (2024)
55	BI055	668203	5935565	Cerro Cornou	14/9/2023	Deslizamiento de suelo	Precipitaciones	Sepúlveda (2024)
56	BI056	667990	5935124	Cerro Buena Vista	Reportado en agosto 2023	Deslizamiento de suelo y roca	Precipitaciones	Sepúlveda (2024)
57	BI057	668251	5935445	Cerro Bagnara	12/6/2024	Deslizamiento de roca	Precipitaciones	SERNAGEOMIN (2024b)

Continuación Tabla Inventario de remociones en masa en el área de estudio.								
N°	ID	Coordenadas UTM		Sector	Fecha	Tipo de remoción en masa	Factor desencadenante	Referencia
		Este	Norte					
58	BI058	667096	5934346	Cerro La Unión	12/6/2024	Flujo de detritos	Precipitaciones	SERNAGEOMIN (2024b)
59	BI059	667002	5934275	Cerro La Unión	12/6/2024	Deslizamiento de suelo y roca	Precipitaciones	SERNAGEOMIN (2024b)
60	BI060	667234	5934459	Cerro La Unión	12/6/2024	Flujo de detritos	Precipitaciones	SERNAGEOMIN (2024b)
61	BI061	668239	5935437	Cerro Bagnara	2/8/2024	Deslizamiento de suelo	Precipitaciones	SERNAGEOMIN (2024b)
62	BI062	667788	5934743	Cerro Zaror	11/6/2024	Deslizamiento de tierra y roca	Precipitaciones	Prensa 24 horas
63	BI063	668322	5935770	Cerro Cornou	Reportado en junio 2024	Caída de roca	Precipitaciones	Instagram

ANEXO II

Inventario de remociones en masa observadas en terreno. Registrados en los meses de julio y agosto del año 2024.

N°	ID	Coordenadas UTM		Sector	Fecha	Tipo de remoción en masa	Comentarios	Fotografía
		Este	Norte					
64	CH001	666164	5933820	La Gloria	Reportado en julio 2024	Deslizamiento rotacional de tierra activo	El deslizamiento ocurre en el talud de una cancha deportiva	
65	CH002	666317	5933909	La Gloria	Reportado en julio 2024	Deslizamiento de tierra activo	Imágenes satelitales de Google Earth muestran que ha tenido reactivaciones desde el 2016, aparentemente a orillas de una casa en la cima de la ladera. No fue posible determinar el tipo de deslizamiento debido a que no es posible acercarse	
66	CH003	667352	5934598	Cerro La Unión	Reportado en julio 2024	Caída de roca activa	Clastos de roca (esquisto) más grandes tienen más de 40 cm de largo, altamente meteorizada. El talud es subvertical con abundante vegetación	
67	CH004	668156	5935597	Cerro Cornou	Reportado en julio 2024	Deslizamiento de tierra y roca activo	Deslizamiento de tierra con presencia de clastos de roca (esquisto) centimétrica a máxima decimétrica con una superficie de rotura irregular. Abundantes raíces de gran extensión (más de 1 m) y grosor (5-10 cm) en el talud	
68	CH005	668156	5935575	Cerro Cornou	2/8/2024	Deslizamiento traslacional de suelo activo	Deslizamiento traslacional de suelo de gran extensión (10 m de largo) con aproximadamente 80 m ² de masa removida la cual obstruyó por completo el paso peatonal bajo este	