



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



SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN LA COMUNA DE LEBU, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE

Memoria para optar al Título de Geólogo

Esteban Camilo Andrade Vidal

Profesor Guía:	Dr. Joaquín Alejandro Cortés Aranda
Profesora Co-Guía:	Dra. Edilia del Carmen Jaque Castillo
Profesional Guía:	Dr. (c) Francisco Eduardo Castro Venegas
Profesor Comisión:	Dr. Mauricio Esteban Espinoza Vargas

Concepción, 2025

Para el 2023, un año de pérdidas, aprendizaje y mucho dolor

Que nunca falte el amor de familia y la fuerza para seguir adelante

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	VI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS	3
1.3. AGRADECIMIENTOS	3
2. ANTECEDENTES	5
2.1. MARCO TEÓRICO	5
2.1.1. CONCEPTOS GENERALES	5
2.1.1.1. Susceptibilidad	5
2.1.1.2. Vulnerabilidad	5
2.1.1.3. Peligro	5
2.1.1.4. Riesgo	5
2.1.1.5. Evaluación del riesgo	6
2.1.1.6. Amenaza	6
2.1.2. REMOCIONES EN MASA	6
2.1.2.1. Tipos de remociones en masa	6
2.1.2.1.1. Caída (<i>fall</i>)	6
2.1.2.1.2. Volcamiento (<i>topple</i>)	6
2.1.2.1.3. Deslizamiento (<i>slide</i>)	7
2.1.2.1.4. Extensión (<i>spread</i>)	7
2.1.2.1.5. Flujo (<i>flow</i>)	7
2.1.2.2. Factores condicionantes	7
2.1.2.3. Factores desencadenantes	8
2.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
2.2.1. UNIDADES GEOLÓGICAS	8
2.2.1.1. Formación Boca Lebu	8
2.2.1.2. Formación Trihuco	9
2.2.1.3. Formación Millongue	10
2.2.1.4. Formación Ranquil	10
2.2.1.5. Formación Tubul	10
2.2.1.6. Formación Cañete	10
2.2.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	11
2.2.3. GEOMORFOLOGÍA LOCAL	13
3. METODOLOGÍA	15
3.1. RECOPIACIÓN DE DATOS	15
3.1.1. INVENTARIO DE PUNTOS DE REMOCIONES EN MASA	15
3.2. MÉTODO ESTADÍSTICO <i>FREQUENCY RATIO</i>	16
3.3. FACTORES CONDICIONANTES CONSIDERADOS	18

3.3.1. UNIDADES GEOLÓGICAS	18
3.3.2. DISTANCIA A FALLAS	18
3.3.3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	19
3.3.4. PENDIENTE	19
3.3.5. ORIENTACIÓN DE LADERAS	19
3.3.6. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA	20
3.3.7. DISTANCIA A REDES DE DRENAJE PRINCIPALES	21
3.3.8. ELEVACIÓN	21
3.3.9. CURVATURA	22
3.3.10. DISTANCIA A CARRETERAS PRINCIPALES	22
3.4. VALIDACIÓN DEL MODELO	22
4. RESULTADOS	25
4.1. INVENTARIO DE PUNTOS DE REMOCIONES EN MASA	25
4.2. MAPAS DE FACTORES CONDICIONANTES CONSIDERADOS	30
4.2.1. UNIDADES GEOLÓGICAS	30
4.2.2. DISTANCIA A FALLAS	30
4.2.3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	31
4.2.4. PENDIENTE	32
4.2.5. ORIENTACIÓN DE LADERAS	32
4.2.6. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA	32
4.2.7. DISTANCIA A REDES DE DRENAJE PRINCIPALES	32
4.2.8. ELEVACIÓN	33
4.2.9. CURVATURA	33
4.2.10. DISTANCIA A CARRETERAS PRINCIPALES	33
4.3. VALORES <i>FREQUENCY RATIO</i> OBTENIDOS PARA CADA FACTOR	33
4.3.1. FACTORES DESCARTADOS A PARTIR DE MAPA PRELIMINAR	34
4.3.1.1. Distancia a fallas	34
4.3.1.2. Distancia a redes de drenaje principales	35
4.3.1.3. Distancia a carreteras principales	35
4.3.1. FACTORES UTILIZADOS PARA MAPA DEFINITIVO	37
4.3.2.1. Unidades geológicas	37
4.3.2.2. Unidades geomorfológicas	38
4.3.2.3. Pendiente	38
4.3.2.4. Orientación de laderas	39
4.3.2.5. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	41
4.3.2.6. Elevación	41
4.3.2.7. Curvatura	42
4.4. MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA	43
4.4.1. MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD PRELIMINARES	43
4.4.2. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DEFINITIVO	44
4.5. VALIDACIÓN MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DEFINITIVO	47
5. DISCUSIÓN	49
5.1. INTERPRETACIÓN DE FACTORES CONDICIONANTES PRINCIPALES	49
5.2. VALIDACIÓN DEL MODELO	51
5.3. MEJORAS, MITIGACIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS	52
5.3.1. MEJORA DEL INVENTARIO DE REMOCIONES EN MASA	52

5.3.2. OPTIMIZACIÓN DE INSUMOS UTILIZADOS	53
5.3.3. MITIGACIÓN	54
5.3.4. PERSPECTIVAS FUTURAS	55
6. CONCLUSIONES	57
7. REFERENCIAS	61
ANEXOS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y accesos	3
2. 1. Mapa geológico de la Cuenca Arauco 1:500.000	9
2. 2. Mapa geológico simplificado de la región de Arauco-Nahuelbuta	11
2. 3. Mapa geológico de la Península de Arauco	12
2. 4. Mapa geológico de la Península de Arauco (SERNAGEOMIN)	13
3. 1. Mapa de puntos de remoción en masa de entrenamiento y prueba	17
3. 2. Código para cálculo de NDVI en el área de estudio mediante GEE	20
3. 3. Código utilizado para cálculo de curva ROC mediante <i>RStudio</i>	23
4. 1. Captura de GE Pro con caídas de roca	26
4. 2. Mapas de factores condicionantes considerados para <i>Frequency Ratio</i>	31
4. 3. Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Distancia a fallas	34
4. 4. Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Distancia a redes de drenaje principales	35
4. 5. Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Distancia a carreteras principales ..	36
4. 6. Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Distancia a carreteras principales II	36
4. 7. Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Unidades geológicas	37
4. 8. Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Unidades geomorfológicas	38
4. 9. Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Pendiente	39
4. 10. Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Orientación de laderas	40
4. 11. Diagrama de Roseta de Valores FR del factor Orientación de laderas	40
4. 12. Gráfico de Clases vs Valores FR del factor NDVI	41
4. 13. Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Elevación	42
4. 14. Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Curvatura	43
4. 15. Mapa LSI Preliminar	44
4. 16. Mapa LSI Preliminar 2	44
4. 17. Mapa LSI Normalizado al 100	45
4. 18. Mapa LSI Definitivo	46
4. 19. Curva ROC para la validación del Mapa LSI Definitivo	48
5. 1. Valores PR de factores condicionantes obtenidos con modelo FR para Mapa LSI Definitivo	49
5. 2. Histograma de valores LSI del Mapa LSI Definitivo	52

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
4. 1. Deslizamientos de suelos en sector Bocalebu	25
4. 2. Deslizamiento de suelos en sector Junquillo Bajo	26
4. 3. Deslizamiento de suelos y caída de roca en Diagonal Freire	27
4. 4. Vista aérea de área urbana afectada por RM en sector Junquillo Bajo	28
4. 5. Vista general aérea de sectores con algunas RM	29
4. 6. Vista aérea del Mirador Cerro La Cruz y Diagonal Freire afectado por RM	30

RESUMEN

Las remociones en masa son fenómenos naturales de alto impacto caracterizados por el movimiento de roca o suelo cuesta abajo debido a la gravedad y pueden ser exacerbados por factores desencadenantes como precipitaciones o sismos. Estos eventos han causado daños significativos en Chile, afectando tanto el norte como el sur del país, destacando el aluvión de Copiapó en 2015 y el de Villa Santa Lucía en 2017, por lo que constituyen un problema crítico para la evaluación y gestión del riesgo. En la comuna de Lebu, ubicada en la Región del Biobío, la interacción de factores como pendientes pronunciadas, formaciones geológicas inestables y la expansión urbana incrementa la susceptibilidad a remociones en acantilados costeros y zonas urbanas. Sin embargo, esta problemática no ha sido suficientemente estudiada, y únicamente se han realizado estudios de zonificación y riesgo. El presente estudio aborda esta problemática evaluando la susceptibilidad a remociones en masa mediante el modelo *Frequency Ratio* (FR). En primer lugar, se realizó una recopilación de puntos de remociones en masa mediante la fotointerpretación a través de *Google Earth Pro* y trabajo de campo, incluyendo el uso de un dron, permitiendo identificar 90 puntos de remociones en masa, distribuidos principalmente en acantilados costeros activos y sectores urbanos. Posterior a esto, se elaboraron mapas de factores condicionantes relevantes en la comuna, como unidades geológicas, pendiente, curvatura, NDVI, orientación de laderas, entre otros. Factores como la distancia a fallas y carreteras principales fueron descartados tras el análisis preliminar, debido a su baja correlación con la ocurrencia de remociones en el área de estudio. El modelo *Frequency Ratio* permitió calcular índices de susceptibilidad basados en la relación entre los factores condicionantes y los eventos registrados, generando mapas preliminares y uno definitivo. Los resultados identificaron como factores clave la pendiente, el NDVI y la curvatura. Además, en cuanto a las unidades geológicas, las más antiguas presentaron alta inestabilidad. El mapa de susceptibilidad definitivo incluyó 5 clases de índice de susceptibilidad (muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto). Dentro del área urbana, la susceptibilidad moderada abarca 0,92 km², la alta 2,08 km² y la muy alta 0,50 km², con sectores críticos como Diagonal Freire y Junquillo Bajo, mientras que la susceptibilidad baja cubre 4,66 km² y la muy baja 1,33 km². La validación del modelo mediante la curva ROC y el índice AUC, con un valor de 0,8368, confirmó la alta capacidad predictiva. Finalmente, los resultados obtenidos constituyen una herramienta sólida para el desarrollo y fortalecimiento de futuros estudios que profundicen en la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa ya sea a nivel local o regional.

1. INTRODUCCIÓN

Las remociones en masa se definen como un amplio conjunto de procesos originadas por el movimiento de roca o escombros, en el suelo, cuesta abajo por efectos de la gravedad (Watkins y Hargitai, 2014). La ocurrencia de estos eventos está dada por factores condicionantes que corresponden a las características del entorno como pendientes pronunciadas, materiales fracturados, entre otros. Los factores desencadenantes son eventos específicos que activan estas remociones, como lluvias intensas, sismos o la actividad humana (SERNAGEOMIN, 2022). Este fenómeno genera efectos socioeconómicos significativos, causando daños a infraestructuras y poniendo en peligro vidas humanas. Además, en el contexto del cambio climático global, ha aumentado significativamente la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos lo que a su vez incrementa la ocurrencia de remociones en masa (Fidan y otros, 2024). Por ende, el estudio y comprensión de las remociones en masa son aspectos sumamente importantes para el mejoramiento de la evaluación y gestión de riesgo, además de la planificación territorial.

En Chile, las remociones representan una amenaza significativa para la población, además están asociadas con la actividad sísmica (Araya-Cornejo y otros, 2024) y también con los eventos de lluvias intensas (Roldán y otros, 2022). Las remociones en masa han resultado en pérdidas humanas y materiales considerables. Entre 1928 y 2017 se registraron 882 muertes producto de procesos de remoción en masa (Marín y otros, 2018). Un ejemplo característico corresponde al aluvión ocurrido en Villa Santa Lucía en 2017, el cual dejó 21 fallecidos y 1 desaparecido, junto con la destrucción de numerosas viviendas (MINVU, 2023). Por otra parte, al norte del país, el aluvión de 2015 en Copiapó dejó 31 fallecidos, 16 desaparecidos y daños significativos producto de lluvias excepcionales de 80 mm en 48 horas, con erosión y sedimentos contaminados en zonas costeras (Wilcox y otros, 2016). En particular, en contextos costeros, estas manifestaciones geomorfológicas adquieren una relevancia aún mayor debido a la evolución constante del relieve, por factores naturales y antropogénicos. En la zona centro-sur de Chile, la interfaz urbano-forestal presenta una gran susceptibilidad a este tipo de eventos, especialmente durante períodos de precipitaciones extremas. En los últimos años, los esfuerzos por evaluar la susceptibilidad de remociones en masa se han intensificado notoriamente, evidenciado por el estudio realizado por López y otros (2021) junto con el de Parra y otros (2023).

La comuna de Lebu, ubicada en el borde costero de la provincia de Arauco en la Región del Biobío, cuenta con una superficie de aproximadamente 561 km² y una población cercana a 25,000 habitantes (INE, 2017). En cuanto a geomorfología corresponde a una planicie marina o fluvio-marina, sobre la cual sobreyacen algunas terrazas marinas (CIGIDEN, 2020). Esta localidad costera del Biobío reviste una importancia estratégica debido a su ubicación costera en la Región del Biobío y a su vulnerabilidad frente a fenómenos naturales, como remociones en masa y eventos sísmicos. Céspedes (2022) llevó a cabo un estudio de zonificación de remociones en masa en Lebu, identificando que estos procesos están principalmente asociados a sismicidad y precipitaciones, considerando factores condicionantes como el clima, la pendiente y la geomorfología. El trabajo realizado por Céspedes (2022) resultó en la elaboración de mapas de vulnerabilidad, además de un mapa de amenaza y otro de riesgo, que constituyen valiosas herramientas para la planificación territorial. Además, Sepúlveda (2022) realiza un estudio de riesgos para la modificación del Plan Regulador Comunal (PRC), con una evaluación preliminar de peligros geológicos, que incluye las remociones en masa. Sin embargo, hasta la fecha no se han desarrollado mapas de susceptibilidad a remociones en masa en Lebu, lo cual representa una oportunidad para avanzar en la evaluación de geopeligros en el Biobío costero. La elaboración de estos mapas no solo complementaría la información existente, sino que también permitiría una planificación más eficaz frente a eventos que ya han afectado el área urbana de la comuna y sus alrededores, reduciendo así los riesgos para su población e infraestructura. Entonces, se pretende realizar mapas de susceptibilidad de remociones en masa, en la comuna de Lebu, a partir del método *Frequency Ratio* (FR) que corresponde a un modelo probabilístico simple para estudios de susceptibilidad de remociones en masa y se define como la proporción entre el área donde ocurrieron remociones y el área total de estudio, además también corresponde a la probabilidad de ocurrencia de remociones en relación con la no ocurrencia para un atributo específico (Acharya y Lee, 2019).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la susceptibilidad de remociones en masa en la comuna de Lebu en la Región del Biobío.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar áreas urbanas y rurales de la comuna de Lebu afectadas por remociones en masa.

- Jerarquizar los factores que influyen en la susceptibilidad de remociones en masa en la comuna de Lebu, caracterizando elementos controladores como pendiente, elevación, entre otros.
- Analizar la validez del mapa de susceptibilidad obtenido a partir de diferentes parámetros.

1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS

La comuna de Lebu está ubicada en la provincia de Arauco, Región del Biobío, Chile, con coordenadas aproximadas entre las latitudes $37^{\circ}25'$ S y $37^{\circ}50'$ S, y longitudes $73^{\circ}38'$ O y $73^{\circ}25'$ O (Figura 1.1). Lebu es accesible principalmente a través de la Ruta 160, que conecta la zona con la ciudad de Concepción, en la parte central del país. La ruta 160 también la vincula con otras localidades costeras y las zonas interiores de la región del Biobío, facilitando su conexión con la provincia de Arauco y otros puntos cercanos.

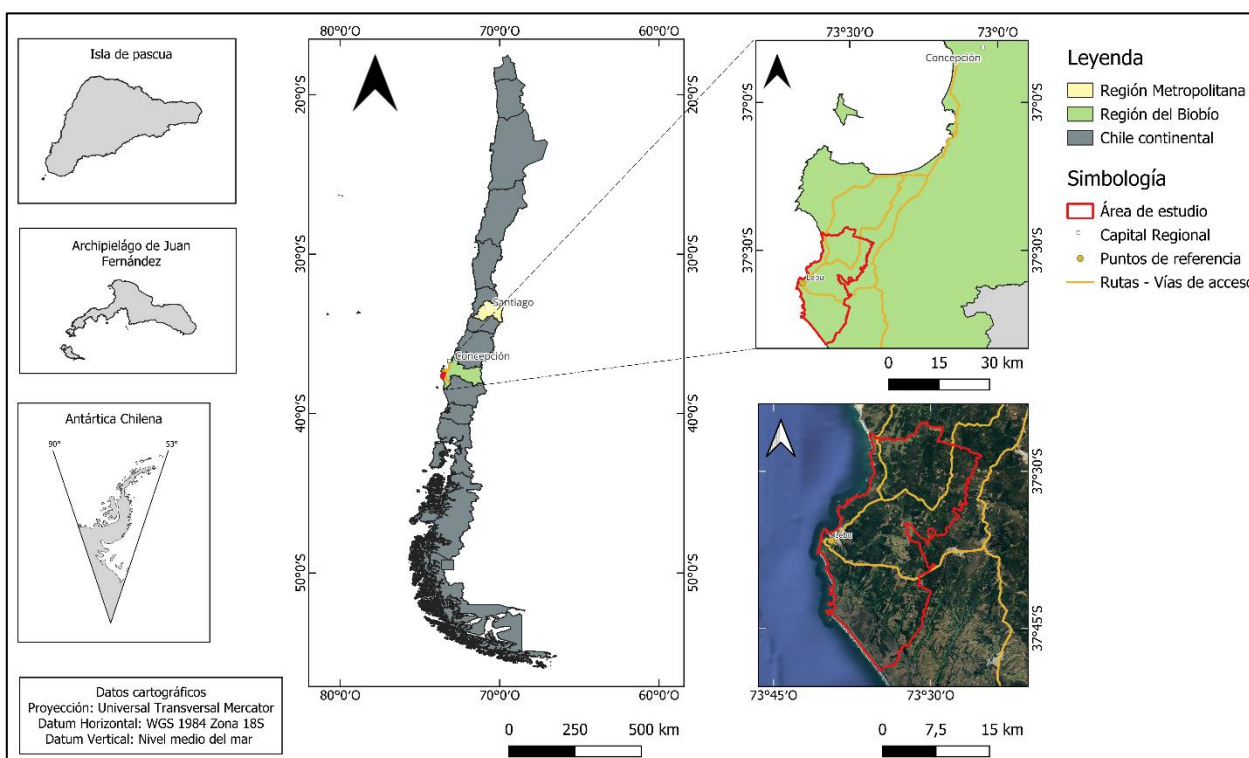


Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos.

1.3. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer al profesor Joaquín Cortés por su paciencia y apoyo durante todo este proceso, por las reuniones sobre la memoria, donde también era posible compartir un café o una buena charla, y por siempre estar pendiente del desarrollo del trabajo. También, agradecer a la

profesora Edilia Jaque que me permitió ser parte de esta memoria, entregó su apoyo ante las modificaciones, proporcionó el material que tenía disponible y gestionó el terreno, con el financiamiento del proyecto FONDEF ID22I10334 “Implementación de una infraestructura de datos geoespacial geomorfológica (I2GEO), para la región del Biobío: Una herramienta estandarizada para la planificación territorial”. Agradezco, al Grupo de estudios Multiamenazas Biobío, en especial a Francisco Castro, quien entregó su tiempo, dedicación y conocimientos para enseñar lo necesario para la realización de este trabajo. Agradecer también a Felipe, Luis, Joaquín, y Miguel, quienes resolvieron dudas, fuimos a terreno, trabajamos en conjunto o simplemente compartimos una conversación en la oficina.

Por otra parte, quiero agradecer a los profesores y a todos quiénes son parte del Departamento Ciencias de la Tierra (DCT), quienes me entregaron conocimientos o una grata conversación. Al profesor Luis Vásquez, del área de Geomática del DCT, que siempre estuvo disponible para resolver dudas y entregar material útil relacionado con los sistemas de información geográfica.

Estudiar Geología no hubiese sido lo mismo sin los amigos que hice durante este proceso, quienes sé que estarán ahí ante algún problema, mis guatoncitos: Favio, *Partner*, Vicho, Andrés, Maop, Oyarzo, Boba, Benja Reyes, Cata *baby*, Porotillo, Calobos, Katurri, Ratona y, a quién lamentablemente partió el 2023 dejando un vacío tremendo, Joaco Herrera. Te extraño papito lindo. Conocí a mucha gente maravillosa en esta carrera, como Palmo, Milla, Mella y muchos más, si bien no puedo mencionarlos a todos, agradezco haber compartido con cada uno de ustedes, ya que ocupan un lugar especial en mi memoria. También, agradezco a mis amigos de la infancia: Tomi, Nico, Basti, Marcos, Feña, Seba, Franco y Christian, quienes a pesar de la distancia han estado en los momentos difíciles. Por último y más importante, nada de esto hubiese sido posible sin el apoyo de mi familia, en especial mi mamá, Ximena, que ha tenido mucha paciencia conmigo, siempre me ha entregado su contención en momentos difíciles, además de todo su amor y cariño. Agradecer a mi hermano mayor, Cristóbal, por siempre estar preocupado por mí y dispuesto a entregar algún consejo o apoyo ante alguna adversidad. También, un abrazo al cielo, a mi viejito, Rodrigo, quién partió el 2023, que, a pesar de ya no estar físicamente, siempre lo recuerdo y llevo en mi corazón. Finalmente, agradecer a mi abuelita Blanquita y tía Verito, por entregar su cariño y apoyo siempre, además de tenerme presente en sus oraciones. Gracias a Dios por haberme dado esta oportunidad.

2. ANTECEDENTES

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. CONCEPTOS GENERALES

En el contexto global actual, el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, exacerbados por el cambio climático, ha destacado la importancia de las remociones en masa, ya que representan riesgos significativos para la seguridad de las personas e infraestructuras. Para una mejor comprensión de la dinámica de estos fenómenos, es sumamente importante definir algunos conceptos clave:

2.1.1.1. Susceptibilidad

De acuerdo con Fell y otros (2008) la susceptibilidad de remociones en masa es una evaluación de la probabilidad de que ocurran deslizamientos en un área, basada en la clasificación, tamaño y distribución espacial de deslizamientos existentes o potenciales, sin considerar el marco temporal explícitamente.

2.1.1.2. Vulnerabilidad

Se define como las condiciones físicas, sociales, económicas y ambientales que aumentan la susceptibilidad de individuos, comunidades, activos o sistemas a los impactos de los peligros. Estas condiciones incluyen factores como la ubicación geográfica y las características estructurales y sociales que determinan la exposición a riesgos y la capacidad de recuperación (UNDRR, 2023).

2.1.1.3. Peligro

Es un fenómeno o proceso físico, social, económico o ambiental que tiene el potencial de causar pérdidas, daños, interrupciones o cambios no deseados en el entorno natural o construido. Su caracterización incluye magnitud, frecuencia, duración y probabilidad del evento (UNDRR, 2023).

2.1.1.4. Riesgo

Corresponde a la función combinada de la probabilidad de que un peligro ocurra, la vulnerabilidad de los sistemas expuestos y las consecuencias potenciales. Evaluar el riesgo implica comprender estas interrelaciones para gestionar impactos adversos en los sistemas sociales, económicos y ecológicos (UNDRR, 2023).

2.1.1.5. Evaluación del riesgo

Es clave en la gestión de desastres, pues permite identificar amenazas y vulnerabilidades, determinando su impacto social, ambiental y económico. Según la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y la Ley N° 21.364, es esencial para planificar acciones de mitigación. El informe GAR 2023 resalta la importancia de un enfoque sistémico que considere riesgos naturales, humanos y climáticos, fomentando estrategias resilientes y efectivas.

2.1.1.6. Amenaza

Comprende la combinación de peligros y factores contextuales que, al interactuar, intensifican los impactos negativos en comunidades y sistemas. Esta interacción puede estar influenciada por cambios climáticos, conflictos, urbanización y otros procesos socioeconómicos, generando una condición de riesgo elevado (UNDRR, 2023).

2.1.2. REMOCIONES EN MASA

Bates y Jackson (1987) definen la remoción en masa como el transporte descendente bajo la influencia de la gravedad de suelo y material rocoso en masa, el cual se mueve sobre una zona o superficie de cizalla que se encuentra relativamente confinada (Cruden, 1991).

2.1.2.1. Tipos de remociones en masa

De acuerdo con Cruden y Varnes (1996), se tienen los siguientes tipos de remociones en masa:

2.1.2.1.1. Caída (*fall*)

Ocurre cuando el suelo o la roca se desprende rápidamente de una pendiente empinada ya sea cayendo, rebotando o rodando por el aire. Este proceso es muy rápido, excepto cuando la masa desplazada ha sido socavada previamente. La socavación generalmente ocurre en suelos o rocas cohesivos en la base de acantilados afectados por olas o en las orillas erosionadas de los ríos.

2.1.2.1.2. Volcamiento (*topple*)

Es la rotación hacia adelante de masa de suelo o roca fuera de una pendiente, alrededor de un punto bajo su centro de gravedad. Puede ser impulsado por la gravedad del material en la pendiente superior o por agua o hielo en grietas. Dependiendo de la geometría y las discontinuidades activas,

puede resultar en caídas o deslizamientos de la masa desplazada, variando en velocidad desde lenta hasta muy rápida.

2.1.2.1.3. Deslizamiento (*slide*)

Es un movimiento descendente de una masa de suelo o roca que ocurre principalmente en superficies de ruptura o en zonas delgadas de alto esfuerzo de cizalla. El movimiento comienza localmente y luego se extiende, formando grietas en la superficie original que eventualmente se convierten en el borde principal del deslizamiento. La masa desplazada puede moverse más allá del punto de ruptura cubriendo la superficie original del terreno, formando una superficie separada.

2.1.2.1.4. Extensión (*spread*)

Extensión de masa cohesiva de suelo o roca, con hundimiento hacia material más blando debajo. No implica superficie de cizalla intensa y puede ser causada por licuefacción o flujo del material blando. Varnes (1978) distinguió entre expansiones en roca, sin superficie de ruptura identificable, y movimientos en suelos cohesivos sobre material licuado o en flujo plástico. Estos movimientos son complejos pero comunes en ciertos materiales y situaciones geológicas, justificando su reconocimiento como un tipo de movimiento separado.

2.1.2.1.5. Flujo (*flow*)

Es un movimiento continuo similar al de un líquido viscoso, donde superficies de cizalla son efímeras y no se conservan. El límite inferior puede ser una superficie de movimiento diferencial o zona de cizalla distribuida. La transición de deslizamientos a flujos depende del contenido de agua y movilidad. Los deslizamientos de escombros pueden convertirse en flujos o avalanchas de escombros al perder cohesión, ganar agua o encontrar pendientes más empinadas.

2.1.2.2. Factores condicionantes

Los factores condicionantes o pasivos son características intrínsecas del terreno natural que determinan la resistencia y el comportamiento de un talud. Estos factores incluyen las propiedades físicas y resistentes del material de la ladera, así como sus características morfológicas y geométricas, que influyen en su inestabilidad. La superposición de estos factores permite reconocer que las remociones en masa resultan de la combinación de distintos elementos, y se utiliza en la

creación de mapas de susceptibilidad para establecer el grado de vulnerabilidad de una zona determinada (González de Vallejo y otros, 2002). Entre los principales factores que se analizarán en esta tesis están las unidades geológicas, la pendiente, la distancia a fallas y las unidades geomorfológicas, junto con otros factores que serán definidos oportunamente en el capítulo 3.

2.1.2.3. Factores desencadenantes

Los factores desencadenantes son condiciones externas que provocan una remoción en masa al aumentar rápidamente los esfuerzos o reducir la resistencia del material de una ladera, con un corto lapso entre causa y efecto (Wieczorek, 1996). Estos factores influyen en la magnitud y velocidad de los movimientos (González de Vallejo y otros, 2002). Aunque estos estímulos externos suelen desencadenar una remoción en masa, en algunos casos, la acumulación progresiva de otras causas, como la erosión química o física, puede llevar al material a ser movilizado (Wieczorek, 1996).

2.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.2.1. UNIDADES GEOLÓGICAS

En la zona, las unidades geológicas sedimentarias presentes son la Formación Boca Lebu, sobreyacida por la Formación Trihueco que infrayace a la Formación Millongue, cuya localidad tipo se encuentra al sur de la ciudad de Lebu. Estas unidades están cubiertas por la Formación Ranquil, correlacionada con la Formación Navidad en otros sectores del país (Sepúlveda, 2022). Sobre la Formación Ranquil se encuentran la Formación Tubul, de ambientes marinos someros (García, 1968; Nielsen y Valdovinos, 2008), y la Formación Cañete, que corresponde a depósitos transicionales del último interglacial (Kaizuka y otros, 1973; Melnick y otros, 2009) (Figura 2.1).

2.2.1.1. Formación Boca Lebu

La Formación Boca Lebu, definida por Muñoz-Cristi (1956), consiste en una secuencia de areniscas grises verdosas con contenidos moderados de fósiles marinos. Hacia la base, presenta areniscas grises con guías onduladas de arcilla y tiene un espesor medio de 268 metros. Su localidad tipo se ubica en el sector Boca Lebu. En el sector oriental de la provincia de Arauco, esta formación se sitúa sobre la Formación Curanilahue y subyace de manera concordante a la Formación Trihueco. En el lado occidental, sobreyace discordantemente a la Formación Quiriquina e infrayace

concordantemente a la Formación Trihueco. La edad de esta formación se estima desde el Paleoceno Superior alto hasta el Eoceno Inferior bajo.

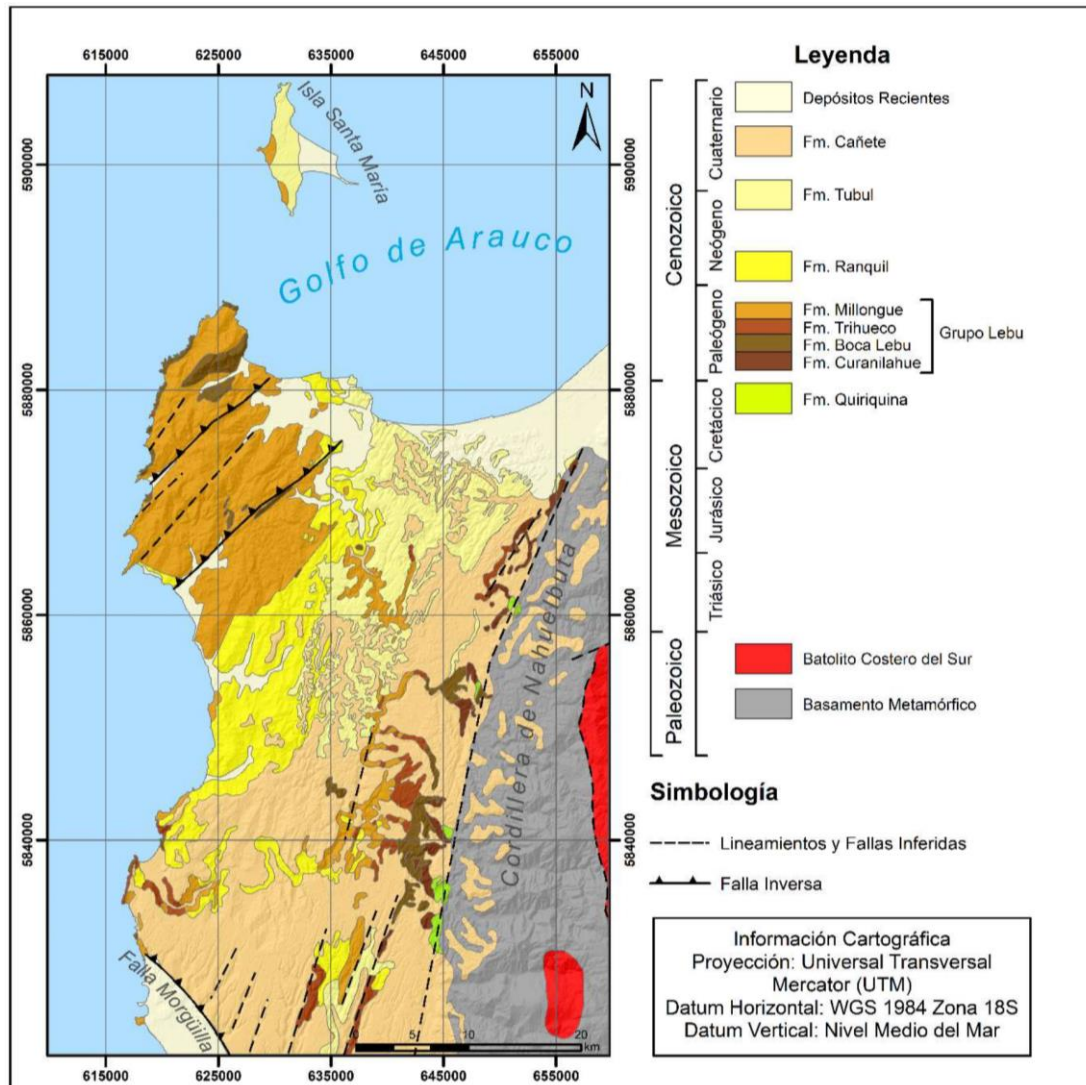


Figura 2.1: Mapa geológico de la Cuenca Arauco 1:500.000. Tomado de Volosky (2021).

2.2.1.2. Formación Trihueco

La Formación Trihueco, de edad Eoceno Inferior, descrita por Muñoz-Cristi (1956) es una secuencia continental con intercalaciones de unidades marinas compuestas principalmente por areniscas y arcillolitas. Tiene un espesor general de 292 metros y se encuentra estratigráficamente encima de la Formación Boca Lebu y debajo de la Formación Millongue, de manera concordante en ambos casos. Su localidad tipo está ubicada en la antigua localidad minera de Trihueco.

2.2.1.3. Formación Millongue

Esta formación fue definida por Muñoz-Cristi (1946) como una secuencia de arcillolitas (lutitas) limosas de color gris claro a verdoso, con cierta presencia de glauconita, que contiene macro y microfauna y, además, presenta intercalaciones de areniscas finas, algo calcáreas y glauconíticas, con un espesor promedio de 270 m. La localidad tipo de la Formación Millongue se encuentra en Punta Millongue y se extiende en la provincia de Arauco en dos franjas paralelas: una Oriental (Trongol, Curanilahue, Estero Chupalla, Río Cupaño y Quebrada Ranquilco) y una Occidental (Punta Lavapié, Punta Carnero, Caleta Viel, Punta Millongue, Punta Bocarripe, Chimpe y Punta Morguilla). Esta formación se estima que tiene una edad del Eoceno Medio.

2.2.1.4. Formación Ranquil

La Formación Ranquil, con una edad del Mioceno, fue descrita por García (1968) como una secuencia marina transgresiva compuesta por conglomerados finos, areniscas, limolitas y lutitas tobáceas, con un espesor general de 100 m. Su localidad tipo se encuentra en caleta Ranquil y está ampliamente distribuida en la costa de la provincia de Arauco (Tavera, 1942; Pineda, 1983).

2.2.1.5. Formación Tubul

La Formación Tubul, definida por García (1968), aflora principalmente en el norte de la península de Arauco, con localidad tipo en la desembocadura del río Tubul. Está compuesta por areniscas finas a limosas, frecuentemente fosilíferas, con fauna dominada por moluscos y braquiópodos, lo que indica un ambiente de sedimentación en una plataforma marina somera (Nielsen y Valdovinos, 2008). Su espesor, estimado entre 60 y 80 metros, corresponde a mediciones en los afloramientos más representativos de la península (Melnick y otros, 2009). Estratigráficamente, yace en discordancia angular sobre la Formación Ranquil y es cubierta por la Formación Cañete en algunas áreas. La edad de esta formación se ha estimado entre el Plioceno Superior y el Pleistoceno Inferior (García, 1968; Nielsen y Valdovinos, 2008).

2.2.1.6. Formación Cañete

La Formación Cañete, del Pleistoceno, está compuesta por una unidad inferior de areniscas volcánicas con estructuras sedimentarias y una unidad superior de conglomerados y areniscas con fósiles marinos. Tiene un espesor de 20-50 m y está sobre la Formación Tubul. Su localidad tipo

corresponde a la Superficie Cañete, una terraza marina bien preservada con 231 m de altitud. Esta formación se asocia con ambientes de transición entre sistemas fluviales y marinos, formados durante el último interglacial (~125 ka, MIS 5e) (Kaizuka y otros, 1973; Melnick y otros, 2009).

2.2.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La geología estructural de la comuna de Lebu, en la Península de Arauco, está dominada por procesos tectónicos asociados a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.

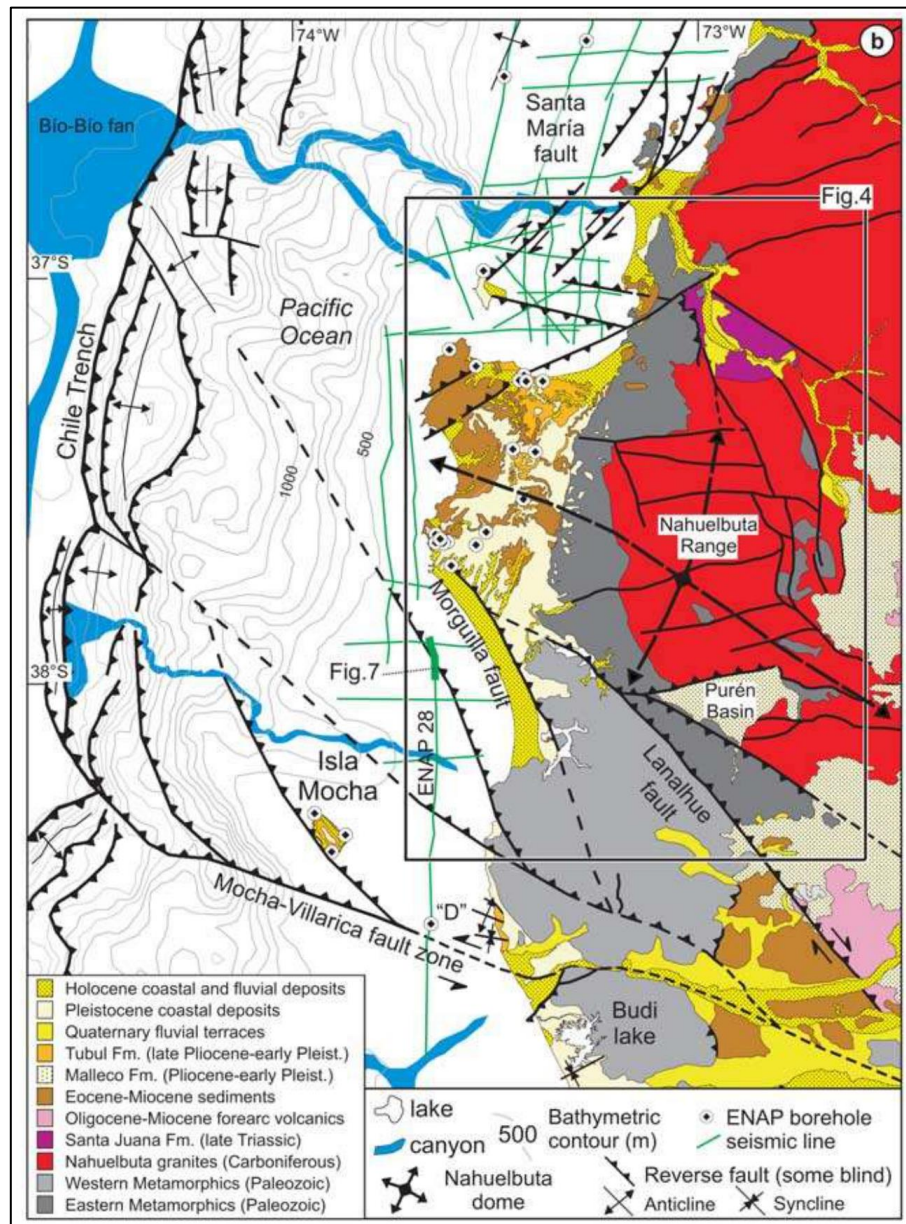


Figura 2.2: Mapa geológico de la región de Arauco-Nahuelbuta. Tomado de Melnick y otros (2009).

Por otro lado, el anticlinal de Arauco, una estructura de orientación WNW-ESE, refleja un acortamiento paralelo al margen, con tasas de levantamiento que oscilan entre 0,3 y 1,8 mm/año y un ancho aproximado de 40 km. Su desarrollo continuo durante los últimos 2,5 millones de años está asociado a la actividad tectónica de subducción, como se ilustra en el mapa geológico de la región (Figura 2.2) (Melnick y otros, 2009).

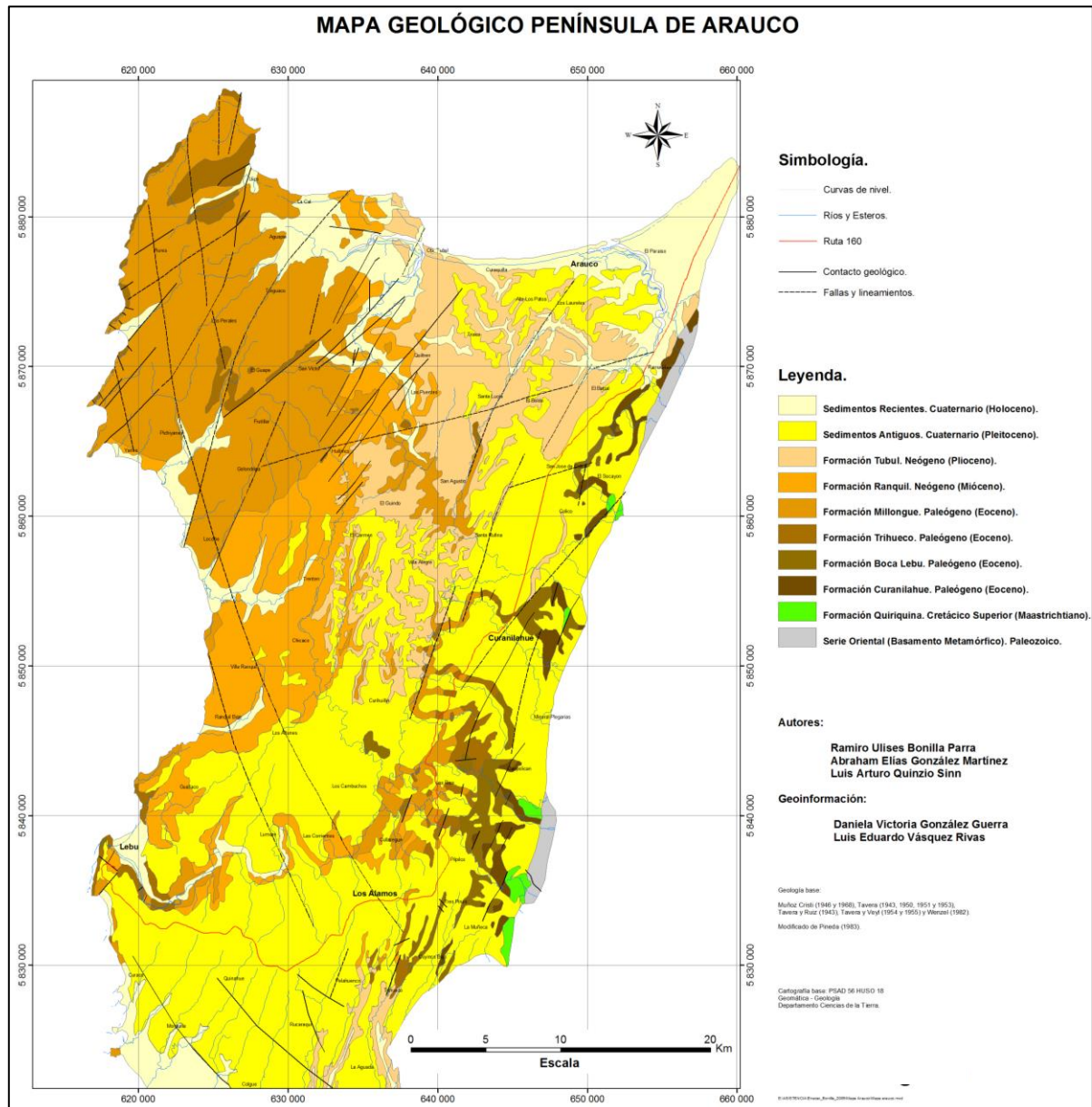


Figura 2.3: Mapa geológico de la Península de Arauco. Tomado de Bonilla y otros (2010).

Pineda (1983) identifica sistemas de fallas mayores en la región de Lebu, asociadas a dos fases tectónicas sucesivas. Durante la fase Eocena, se desarrollaron fallas con dirección NNE (20° – 25°)

y NW (340° – 345°). En la fase post-Miocena, predominaron las fallas con dirección NE (70° – 75°). Estas estructuras reflejan la evolución tectónica de la región en respuesta a diferentes regímenes de deformación y se pueden asociar a las presentes en la Figura 2.3.

Sumado a esta información, en cuanto a la geología estructural de la comuna de Lebu, se dispone del mapa geológico de Chile elaborado por SERNAGEOMIN de escala 1:1.000.000 (Figura 2.4). Si bien presenta una escala de menor detalle, se determinó que las estructuras presentes en este mapa abarcaban gran parte del área de estudio y en mayor medida que el restos de los insumos disponibles.

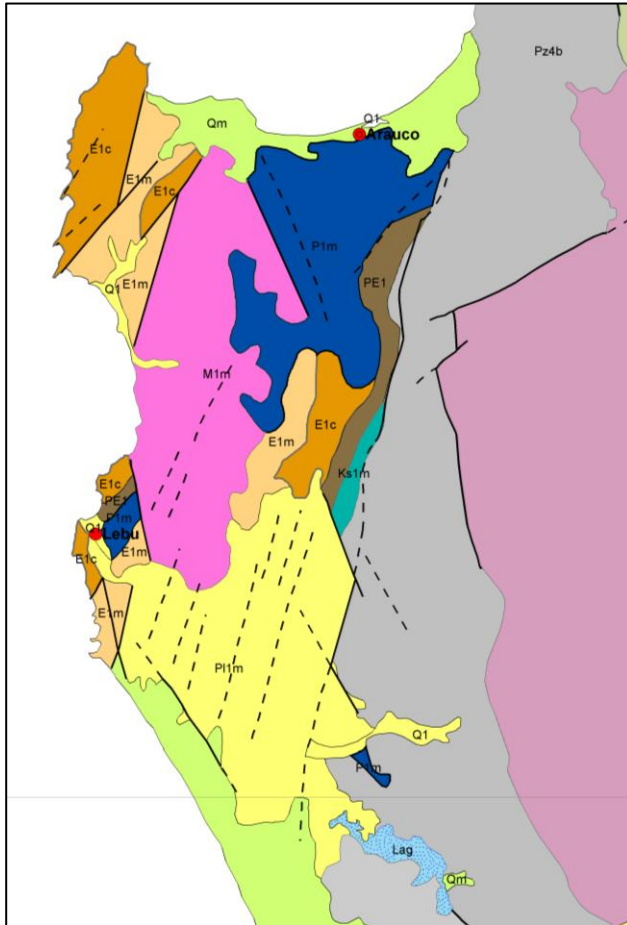


Figura 2.4: Mapa geológico de la Península de Arauco (SERNAGEOMIN). Tomado de Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000 SERNAGEOMIN.

2.2.3. GEOMORFOLOGÍA LOCAL

Céspedes (2022) destaca las diversas unidades geomorfológicas presentes en el área urbana de Lebu, que incluyen llanuras fluvio-marinas, dunas costeras, acantilados marinos y laderas con

cobertura vegetal. Estas formaciones no solo definen el paisaje local, sino que también desempeñan roles clave en los estudios de amenazas tanto naturales como antrópicas y la conservación del medio ambiente urbano. Las llanuras fluvio-marinas, ubicadas cercanas al río Lebu, con una extensión de 403 hectáreas correspondiente al 27% del área urbana, presentan depósitos marinos finos y fluviales más gruesos. Las dunas costeras protegen contra la erosión y retienen sedimentos en una extensión de 26 hectáreas. Los acantilados marinos y las laderas forestales representan áreas críticas de erosión y uso silvícola, ocupando el 1,7% y el 53% del área urbana, respectivamente (Céspedes, 2022). Estas características geomorfológicas no solo enriquecen el entorno natural de Lebu, sino que también son fundamentales para su planificación urbana y gestión de riesgos ambientales. Sin embargo, este análisis se limita al área urbana de Lebu, dejando fuera la dinámica geomorfológica del resto de la comuna, un territorio significativamente más amplio y diverso.

Para superar esta limitación y abarcar toda la comuna de Lebu, este estudio utiliza las cartas geomorfológicas elaboradas por el Grupo de Estudios Multiamenazas Biobío (MA Biobío) en el marco del proyecto FONDEF I2GEO, las cuales se pueden observar en el visualizador de mapas geomorfológicos de la Región del Biobío, disponible en el sitio web oficial de MA Biobío. Estas cartas, generadas a una escala de 1:50.000, identifican y delimitan las principales unidades geomorfológicas de la comuna, proporcionando información clave sobre las características del terreno en un área más extensa y serán expuestas en el capítulo de Resultados.

3. METODOLOGÍA

3.1. RECOPIACIÓN DE DATOS

3.1.1. INVENTARIO DE PUNTOS DE REMOCIONES EN MASA

Para la realización de este estudio, es sumamente importante obtener datos de remociones en masa, puesto que son el principal dato de entrada para la elaboración de los mapas de susceptibilidad de remociones en masa, por lo cual se debe realizar un inventario de remociones en masa el cual puede elaborarse mediante técnicas de teledetección, estudios de campo o una combinación de ambos (Shano y otros, 2021).

En primer lugar, se revisó el material disponible en línea, tanto el catastro de remociones en masa de SERNAGEOMIN de todo el país, como informes realizados en el área de estudio por SERNAGEOMIN (N. Sepúlveda, 2022; Sepúlveda, 2023). Luego, se procedió a utilizar el software *Google Earth Pro* (GE Pro) para el mapeo de remociones en masa mediante la observación de las imágenes satelitales disponibles en GE Pro, las cuales están disponibles desde el 2003 hasta 2023.

Sumado a esto fue posible la realización de un terreno con MA Biobío en el marco del proyecto FONDEF I2GEO, donde se visitaron las localidades de Laraquete, Carampangue, Curanilahue, Arauco, Punta Lavapié, Antiguala, Cañete, Contulmo, Los Álamos, Santa Rosa y Lebu con el objetivo de finalizar el mapeo geomorfológico de MA Biobío en estas zonas, pero que también permitió la visita a las áreas de estudio de memoristas de la carrera de Geografía y Geología. En ese sentido, se desarrolló un trabajo en terreno en gran parte del área urbana de la comuna de Lebu, lo que permitió identificar nuevos puntos de remociones en masa, fotografiar las remociones mediante el uso de un dron y también validar algunas remociones que fueron mapeadas mediante fotointerpretación a través de GE Pro.

En el inventario de remociones en masa se incluyó el grado de confiabilidad en la delimitación de cada evento, siguiendo los criterios propuestos por el *California Geological Survey* (Wills y otros, 2017): Definitivo, cuando el límite fue delimitado con alta probabilidad de precisión; Probable, cuando el límite se aproximó, pero puede contener cierta incertidumbre; y Cuestionable, cuando existe la posibilidad de que no corresponda a una remoción en masa.

3.2. MÉTODO ESTADÍSTICO *FREQUENCY RATIO*

Recientemente, estudios de remociones en masa han utilizado métodos de aprendizaje automático, los cuales requieren grandes cantidades de datos de entrenamiento. Sin embargo, cuando existe una limitación de datos, es posible emplear modelos probabilísticos basados en la frecuencia y proporción de remociones en masa en distintos factores, puesto que la susceptibilidad a remociones en masa se puede evaluar en función de la influencia de los factores condicionantes y su relación entre ellos (Acharya y Lee, 2019).

El método *Frequency Ratio* (FR) es uno de los modelos probabilísticos más utilizados en estudios de susceptibilidad a remociones en masa por la simplicidad que presenta (Yilmaz, 2009; Lee y Sambath, 2006). El FR es definido como la relación entre el área donde ocurrieron remociones en masa en el área total de estudio y también como la relación entre las probabilidades de ocurrencia y no ocurrencia de una remoción en masa para un atributo dado, donde un FR igual a 1 indica una relación promedio; si es mayor a 1, la probabilidad de remociones en masa es alta, y si es menor a 1, es baja o débil. (Lee y Sambath, 2006; Acharya y Lee, 2019). Este enfoque bivariado se emplea para calcular la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en función de variables como pendiente, distancia a fallas, unidades geomorfológicas, entre otros. El cálculo del FR se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$FR = \frac{[N_{pix}(LX_i)/\sum_{i=1}^m N_{pix}(LX_i)]}{[N_{pix}(X_j)/\sum_{j=1}^n N_{pix}(X_j)]}$$

Donde FR corresponde a la relación de frecuencias de la clase i del factor condicionante j ; $N_{pix}(LX_i)$ es el número de píxeles con remociones en masa en la clase i del factor X_i ; $N_{pix}(X_j)$ es el número de píxeles en la variable X_j ; m es el número de clases en la variable X_i y n es el número total de factores en el área de estudio.

El FR debe ser normalizado entre 0 y 1, utilizando la fórmula de Frecuencia Relativa o *Relative Frequency* (RF), calculada como:

$$RF = \frac{FR_{ij}}{\sum_{i=1}^m FR_{ij}}$$

Después de calcular los RF, se estima la Tasa de Predicción o *Prediction Rate* (PR) para asignar un peso equitativo a cada factor. Esta tasa se obtiene de la siguiente manera:

$$PR = \frac{RF_{max} - RF_{min}}{(RF_{max} - RF_{min})_{min}}$$

Finalmente, el *Landslide Susceptibility Index* o Índice de Susceptibilidad a Remociones en Masa (LSI) se calcula como:

$$LSI = \sum (PR \times RF)$$

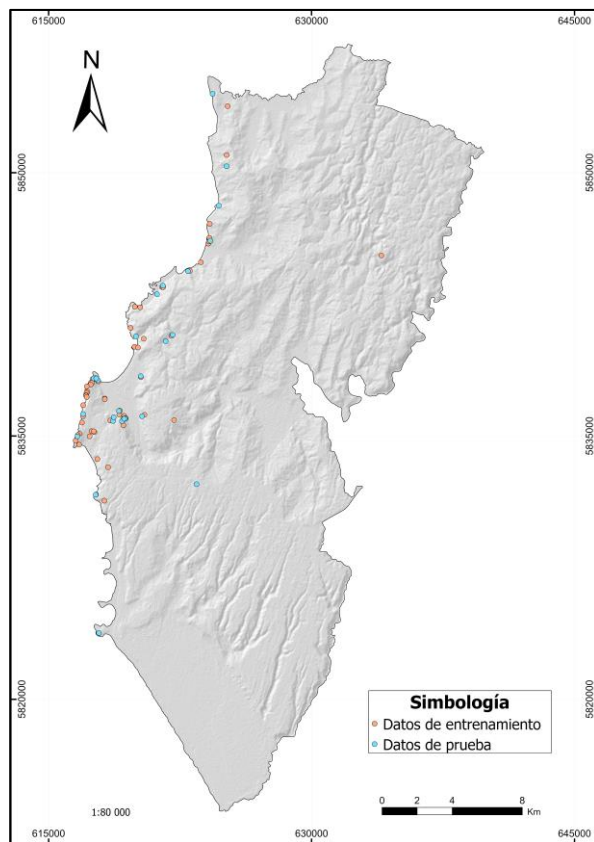


Figura 3.1: Mapa de puntos de remoción en masa de entrenamiento y prueba.

Para validar la precisión del modelo, se dividen los datos en dos grupos: puntos de entrenamiento (70% de los datos) y puntos de prueba (30% restante) (Figura 3.1). Los puntos de entrenamiento son utilizados para generar el modelo de susceptibilidad, mientras que los puntos de prueba permiten verificar la fiabilidad del modelo desarrollado, ayudando a evaluar su exactitud y capacidad predictiva en el área de estudio.

Este proceso permite asegurar que el modelo no esté sobreajustado a los datos de entrenamiento y pueda predecir de manera efectiva en áreas no observadas previamente. La división estándar de datos sigue siendo ampliamente utilizada para evaluar la fiabilidad y la aplicabilidad del modelo en nuevas áreas de análisis (Acharya y Lee, 2019; Wubalem y otros, 2022).

3.3. FACTORES CONDICIONANTES CONSIDERADOS

A continuación, se detallan los factores condicionantes, cuyo análisis y procesamiento se llevó a cabo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) utilizando el software *ArcGIS Pro*, para la generación y análisis de capas geoespaciales.

3.3.1. UNIDADES GEOLÓGICAS

La litología es un factor clave en la estabilidad de las laderas y la susceptibilidad a remociones en masa, ya que influye en las propiedades de resistencia del material. Los suelos finos, como las arcillas, tienen una alta cohesión, pero cuando se saturan de agua, pierden resistencia al corte, lo que genera superficies potenciales de deslizamientos (Lara y Sepúlveda, 2008). Por otra parte, las características litológicas como la granulometría y la resistencia mecánica son determinantes en la ocurrencia de remociones, puesto que las rocas con menor resistencia mecánica suelen tener una mayor tasa de deslizamientos (Chen y otros, 2011).

Este factor se obtuvo a partir del mapa geológico presentado en la tesis de pregrado de Volosky (2021). No obstante, se utilizó un archivo de datos espaciales vectoriales (*shapefile*) con simplificaciones en los polígonos originales para optimizar su uso. Finalmente, el *shapefile* fue transformado a formato ráster mediante la herramienta *Feature to Raster* en *ArcGIS Pro*.

3.3.2. DISTANCIA A FALLAS

Las estructuras geológicas, como planos de estratificación, diaclasas, grietas de tensión y fallas, influyen significativamente en la estabilidad de las laderas, puesto que actúan como planos de debilidad que favorecen deslizamientos (Lara y Sepúlveda, 2008). En particular, las fallas generan condiciones de baja resistencia en las rocas que se encuentran a lo largo de estas estructuras (Nhu y otros, 2020), de modo que la distancia a fallas influye directamente en la susceptibilidad de remociones en masa.

Se elaboró un ráster de distancia a fallas mediante la herramienta *Euclidean Distance* en *ArcGIS Pro* a partir de un *shapefile* de polilíneas de fallas correspondiente al Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000 elaborado por SERNAGEOMIN.

3.3.3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

Las formas del terreno son características del relieve terrestre originadas por procesos geológicos y geomorfológicos naturales que evolucionan constantemente (Kumar y Pandey, 2021). Las unidades geomorfológicas están vinculadas a las remociones en masa a través de la morfodinámica, que modifica progresivamente el terreno. En estos eventos, se identifican la zona modificada, donde ocurrió la remoción, y la unidad geomorfológica antecesora, que refleja las condiciones previas al proceso, permitiendo analizar los cambios en la estabilidad del terreno (Forero-Ospino y Duarte-Delgado, 2019).

Este mapa fue elaborado a partir del trabajo realizado por MA Biobío, donde se unieron 5 cartas geomorfológicas de escala 1:50.000, correspondientes a Quiapo (G012), Curanilahue (G013), Lebu (G023), Los Álamos (G024) y Rucaraqui (G034). Posteriormente, el *shapefile* fue convertido a ráster mediante la herramienta *Feature to Raster* de *ArcGIS Pro*.

3.3.4. PENDIENTE

Es uno de los factores más determinantes en los modelos de deslizamientos, ya que regula las fuerzas de corte que afectan la estabilidad de las laderas (Catani y otros, 2013). La pendiente se utiliza con frecuencia en estudios de susceptibilidad a remociones en masa puesto que al aumentar se correlaciona con una mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos (Bui y otros, 2011).

El mapa de pendientes se generó a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM) de la región del Biobío de 12,5 m/píxel, utilizando la herramienta *Slope* del *Spatial Analyst Toolbox* en *ArcGIS Pro*, donde se configuró la salida en grados.

3.3.5. ORIENTACIÓN DE LADERAS

Representa la dirección en el espacio de cada píxel que compone el terreno (Catani y otros, 2013). Se utiliza con frecuencia en la elaboración de mapas de susceptibilidad a remociones en masa, ya

que se relaciona con parámetros como la exposición a la luz solar y los vientos, los cuales controlan la concentración de humedad en el suelo, lo que puede influir en la ocurrencia de deslizamientos (Magliulo y otros, 2008).

Este ráster se generó mediante la herramienta *Aspect* del *Spatial Analyst Toolbox* utilizando el mismo DEM que para el cálculo de pendientes.

3.3.6. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se utiliza para medir de forma cuantitativa el grado de cobertura vegetal, puesto que la estabilidad de una pendiente está influenciada por la vegetación, ya que las raíces refuerzan el suelo, ayudando a consolidarlo y protegerlo contra deslizamientos. Una mayor densidad de vegetación mejora la estabilidad del terreno (Wu y otros, 2023).

```

1  // Filter Sentinel-2 imagery by date and region
2  var sentinel2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
3                    .filterBounds(geometry)
4                    .filterDate('2017-03-28', '2024-12-15') // Date range
5                    .sort('CLOUD_COVERAGE_ASSESSMENT');
6
7  // Function to calculate NDVI for each image in the collection
8  var calculateNDVI = function(image) {
9    var nir = image.select('B8');
10   var red = image.select('B4');
11   var ndvi = nir.subtract(red).divide(nir.add(red)).rename('NDVI');
12   return image.addBands(ndvi);
13 };
14
15 // Apply the function to each image in the collection
16 var sentinel2_with_ndvi = sentinel2.map(calculateNDVI);
17
18 // Select the NDVI band from the processed images
19 var ndvi = sentinel2_with_ndvi.select('NDVI');
20
21 // Compute the mean NDVI
22 var mean_ndvi = ndvi.mean();
23
24 // Export the NDVI image to Google Drive with WGS84 UTM 18S projection
25 Export.image.toDrive({
26   image: mean_ndvi,
27   description: 'NDVI_Sentinel2_SR_10m_UTM18S',
28   folder: 'GEE_Exports', // Specify the folder in your Google Drive where you want to save the image
29   region: geometry,
30   scale: 10, // Adjust the scale as needed
31   fileFormat: 'GeoTIFF',
32   crs: 'EPSG:32718' // WGS84 UTM Zone 18S (EPSG:32718)
33 });
34
35 // Display the NDVI image
36 Map.centerObject(geometry, 10);
37 Map.addLayer(mean_ndvi, {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white', 'green']}, 'Mean NDVI');

```

Figura 3.2: Código para cálculo de NDVI en el área de estudio mediante GEE.

El cálculo del NDVI se realizó utilizando imágenes de Sentinel-2 obtenidas desde *Google Earth Engine* (GEE) mediante el *script* que se puede observar en la Figura 3.2. Este código utiliza

imágenes de Sentinel-2 para calcular el índice NDVI promedio en el área de estudio, considerando el período entre marzo del 2017 a diciembre del 2024, y luego exporta el resultado como un archivo GeoTIFF. La fórmula utilizada para calcular el NDVI es la siguiente:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Donde la banda NIR (B8) corresponde a la región infrarroja cercana, mientras que la banda Red (B4) corresponde a la banda roja de la imagen satelital. Este análisis permite observar áreas con vegetación densa (valores cercanos a 1 en el NDVI) frente a áreas con escasa o nula vegetación (valores cercanos a -1). En este caso, el NDVI fue clasificado modificando las categorías propuestas por Doan y otros (2023).

3.3.7. DISTANCIA A REDES DE DRENAJE PRINCIPALES

El agua es uno de los principales factores que desencadenan los mecanismos de deslizamientos. Los ríos pueden causar el colapso de las riberas al socavar las pendientes, aumentando así la probabilidad de un deslizamiento (Bui y otros, 2011; Nhu y otros, 2020). Por ello, fue considerado como un factor relevante para este estudio.

Este factor se derivó a partir de un *shapefile* de líneas de drenaje principales obtenido en Geoportal de Chile perteneciente a Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE Chile). Se utilizó la herramienta *Euclidean Distance* para calcular las distancias en un ráster.

3.3.8. ELEVACIÓN

La elevación es considerada un factor determinante en la susceptibilidad de remociones en masa puesto que influye significativamente en la frecuencia de deslizamientos. Esto se debe a que tanto la temperatura como las precipitaciones, que afectan directamente la humedad del suelo, varían con la elevación, lo que influye directamente con la estabilidad del terreno. Cabe destacar que la relación entre la elevación y los deslizamientos no sigue un patrón uniforme, ya que su impacto puede diferir dependiendo de la geología local y la región geográfica estudiada (Nhu y otros, 2020).

El ráster de elevación se obtuvo directamente del DEM, reclasificando las altitudes en intervalos definidos según la topografía local.

3.3.9. CURVATURA

La curvatura se define como el cambio en la pendiente a lo largo de un pequeño arco de la curva (Dou y otros, 2015) y puede ser cóncava, convexa o nula (Nhu y otros, 2020). Se utiliza comúnmente para caracterizar las propiedades físicas de un área en relación con los procesos de erosión y escorrentía, así como para reconocer formas del terreno vinculadas a cuerpos de deslizamientos (Catani y otros, 2013), por lo que es un factor importante en la susceptibilidad de remociones en masa.

El cálculo de curvatura se realizó a partir del DEM utilizando la herramienta *Curvature* del *Spatial Analyst Toolbox* en *ArcGIS Pro*. Cabe mencionar que al igual que en Baltierra (2023), se utiliza la curvatura general, que corresponde a la suma de la curvatura de perfil y la curvatura en planta.

3.3.10. DISTANCIA A CARRETERAS PRINCIPALES

La distancia a las carreteras refleja la influencia de las actividades humanas en la ocurrencia de deslizamientos de tierra. La construcción de carreteras implica la excavación de montañas, lo que reduce la resistencia del suelo y la roca. Así como las laderas expuestas quedan más vulnerables, aumentando el riesgo de deslizamientos cuando ocurren lluvias intensas (Wu y otros, 2023).

Este ráster se elaboró mediante la herramienta *Euclidean Distance* a partir de un *shapefile* de carreteras principales extraído de los mapas vectoriales proporcionados por la Biblioteca del Congreso Nacional (BCN).

3.4. VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo de susceptibilidad a remociones en masa se realizó utilizando el método descrito por Acharya y Lee (2019), el cual emplea la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) y el cálculo del área bajo la curva ROC (AUC).

Se muestrearon valores de susceptibilidad desde el ráster generado, separándolos en dos conjuntos de datos: uno correspondiente a ubicaciones de remociones en masa reales, basado en el inventario existente, y otro de áreas sin remociones, seleccionados aleatoriamente y verificados manualmente.

Para evaluar la capacidad del modelo para distinguir entre áreas propensas y no propensas a remociones en masa, se combinaron los valores en un único conjunto de datos, asignándoles etiquetas de 1 (remociones) y 0 (sin remociones).

```

1 #install.packages("ROCR")
2 #install.packages("raster")
3 #install.packages("ggplot2")
4 #install.packages("rgdal")
5 #install.packages("sf")
6
7 #AUROC
8 # Cargar bibliotecas
9 library(ROCR) # Para crear la curva AUROC
10 library(raster) # Para trabajar con datos raster
11 library(ggplot2) # Para graficar
12 library(sf) # Para trabajar con shapefiles
13
14 # Cargar los datos raster
15 susceptibility_raster <- raster("D:/Universidad/Sexto Año/Tesis/SIG correcciones FR/ArchivosMapaFinal/LSI/Mapa Final 1 Normalizado/LSI_n")
16
17 # Leer los shapefiles de prueba utilizando sf
18 testing_shapefile <- st_read("D:/Universidad/Sexto Año/Tesis/SIG correcciones FR/ArchivosMapaFinal/Datos/Validación/RM_testing.shp")
19 non_landslide_shapefile <- st_read("D:/Universidad/Sexto Año/Tesis/SIG correcciones FR/ArchivosMapaFinal/AUC_ROC/negativepoints/npoints.shp")
20
21 # Extraer los valores del raster usando los shapefiles
22 slides_values <- extract(susceptibility_raster, testing_shapefile)
23 non_slides_values <- extract(susceptibility_raster, non_landslide_shapefile)
24
25 # Combinar los valores de remociones y no remociones
26 all_values <- c(slides_values, non_slides_values)
27
28 # Crear las etiquetas (1 para remociones, 0 para no remociones)
29 labels <- c(rep(1, length(slides_values)), rep(0, length(non_slides_values)))
30 # Crear un objeto de predicción para ROCR
31 pred <- prediction(all_values, labels)
32
33 # Calcular el rendimiento (tasa de verdaderos positivos y falsos positivos)
34 perf <- performance(pred, "tpr", "fpr")
35
36 # Convertir el objeto de rendimiento a un dataframe
37 roc_df <- data.frame(
38   FPR = perf$x.values[[1]],
39   TPR = perf$y.values[[1]]
40 )
41
42 # Calcular el AUC
43 roc_auc <- performance(pred, "auc")$y.values[[1]]
44 roc_auc
45
46 # Crear la gráfica de la curva ROC con la anotación para AUC
47 ggplot(roc_df, aes(x = FPR, y = TPR)) +
48   geom_line(color = "blue", linewidth = 0.8) + # Cambiar size por linewidth
49   geom_abline(intercept = 0, slope = 1, linetype = "dashed", color = "red") +
50   labs(title = "Curva ROC para Remociones de Masa - Lebu",
51        x = "Tasa de Falsos Positivos (FPR)",
52        y = "Tasa de Verdaderos Positivos (TPR)") +
53   annotate("text", x = 0.74, y = 0.05,
54          label = paste("AUC = ", round(roc_auc, 4)),
55          color = "black", size = 5, fontface = "bold") + # Cambiar geom_label por annotate
56   theme_minimal() +
57   scale_x_continuous(expand = c(0, 0)) +
58   scale_y_continuous(expand = c(0, 0)) +
59   coord_cartesian(xlim = c(-0.01, 1.01), ylim = c(-0.01, 1.01)) +
60   theme(
61     plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 12.5, face = "bold"),
62     axis.title.x = element_text(size = 12, face = "bold"),
63     axis.title.y = element_text(size = 12, face = "bold"),
64     aspect.ratio = 1,
65     panel.border = element_rect(color = "black", fill = NA, linewidth = 0.5) # Cambiar size por linewidth
66   )
67
68 # Guardar la gráfica en una resolución de 300 dpi
69 ggsave("D:/Universidad/Sexto Año/Tesis/SIG correcciones FR/ArchivosMapaFinal/AUC_ROC/ROC_curve3.tiff", dpi = 300)

```

Figura 3.3: Código utilizado para cálculo de curva ROC mediante *RStudio*.

Mediante el paquete *ROCR* en *RStudio*, con el *script* que se puede observar en la Figura 3.3, se calcularon la Tasa Verdadera Positiva (TPR) y la Tasa Falsa Positiva (FPR) para diversos umbrales, lo que permitió construir la curva ROC. Esta curva muestra el balance entre TPR y FPR, calculados con las siguientes ecuaciones:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}$$

Donde TP son los valores Verdaderos Positivos, FN los Falsos Negativos, FP los Falsos Positivos y TN los Verdaderos Negativos.

El valor de AUC, el cual mide qué tan bien el modelo distingue entre áreas propensas y no propensas a deslizamientos, se calculó a partir de la curva ROC, que se define mediante la integral:

$$AUC = \int_0^1 TPR(FPR) d(FPR)$$

donde AUC representa el área bajo la curva ROC, que grafica la Tasa de Verdaderos Positivos (TPR) frente a la Tasa de Falsos Positivos (FPR) en diferentes umbrales.

Según Jiao y otros (2019) un valor de AUC de 0,5 indica una predicción aleatoria, mientras que valores cercanos a 1 reflejan un excelente desempeño, permitiendo la comparación de modelos.

4. RESULTADOS

4.1. INVENTARIO DE PUNTOS DE REMOCIONES EN MASA

El inventario elaborado, que se puede observar en el Anexo I, contiene un total de 90 puntos de remoción en masa, los cuales fueron obtenidos mediante diferentes fuentes y métodos. La mayor cantidad de puntos (57) provienen de observación o fotointerpretación a través de *Google Earth Pro*. Por otra parte, se identificaron 13 puntos a través de la visualización en terreno, realizada tanto de manera directa como mediante el uso de un dron. Además, se registraron 11 puntos que fueron inicialmente observados en *Google Earth Pro* y posteriormente validados en terreno, utilizando también la combinación de observación directa y el uso de dron. Finalmente, también se incluyeron 8 puntos obtenidos a partir de los informes técnicos de SERNAGEOMIN.



Fotografía 4.1: Deslizamientos de suelo en sector Bocalebu. Tomada mediante dron por equipo MA Biobío. Se presentan dos deslizamientos: EA63 (a la izquierda) y EA 64 (a la derecha).

Estos puntos servirán como insumo para la aplicación del método *Frequency Ratio* y la posterior elaboración de mapas de susceptibilidad.



Fotografía 4.2: Deslizamiento de suelo en sector Junquillo Bajo. Tomada por Felipe Baltierra.



Figura 4.1: Captura de GE Pro con caídas de roca.

A partir del inventario, se determinó que el tipo de remoción en masa que predomina en el área de estudio corresponde a deslizamientos de suelo, los cuales ocurren tanto en el área cercana a los acantilados costeros (Fotografía 4.1) como en el área urbana (Fotografía 4.2). Por otra parte, en los acantilados costeros activos fue posible identificar caídas de roca (Figura 4.1), a partir de la fotointerpretación y observación de imágenes satelitales. Además, en algunos puntos ocurrían simultáneamente deslizamientos de suelo junto con caídas de roca (Fotografía 4.3).



Fotografía 4.3: Deslizamiento de suelo y caída de roca en sector Diagonal Freire. Tomada por Felipe Baltierra.

El uso del dron fue fundamental en la identificación y registro de puntos de remoción en masa, permitiendo acceder visualmente a sectores de difícil o nulo acceso, donde la observación directa en terreno habría sido limitada o imposible. Gracias a su capacidad de capturar imágenes aéreas de alta resolución, se logró complementar la fotointerpretación satelital y la observación en terreno, proporcionando una perspectiva detallada de la distribución y características de los deslizamientos. Esto no solo facilitó la validación de puntos previamente identificados mediante *Google Earth Pro*, sino que también permitió registrar nuevos eventos de remoción en masa con mayor precisión.

La Fotografía 4.4 muestra una vista aérea del sector Junquillo Bajo, donde se observa un área poblada emplazada en una ladera con pendiente moderada a pronunciada. La distribución de las viviendas es irregular, con construcciones en diferentes niveles de altura, lo que evidencia la adaptación del asentamiento a la topografía del terreno. Se pueden identificar caminos sinuosos, algunos sin pavimentar, y sectores con vegetación densa intercalados con terrenos despejados y áreas intervenidas para la construcción.



Fotografía 4.4: Vista aérea de área urbana afectada por RM en Junquillo Bajo. Tomada mediante dron.

En la Fotografía 4.5 se puede observar una vista aérea general de un área urbana, donde también se presenta una alta densidad de viviendas distribuidas irregularmente, con caminos adaptados a la topografía, asentadas sobre una ladera con pendiente pronunciada. Además, se presentan áreas con cobertura vegetal densa en la parte media y superior de la ladera, lo que contrasta con los sectores intervenidos por la construcción de viviendas, y puntos con signos de inestabilidad del terreno, como cortes de ladera y pendientes empinadas sin contención adecuada. Se pueden identificar

distintos sectores con presencia de remociones en masa, destacando el sector Diagonal Freire a la derecha, Junquillo Alto en el centro y Junquillo Bajo a la izquierda, evidenciando la expansión urbana en terrenos con condiciones geomorfológicas variables.



Fotografía 4.5: Vista general aérea de sectores con algunas RM. Tomada mediante dron. Al este sector Diagonal Freire, en el centro Junquillo Alto y al oeste Junquillo Bajo.

La Fotografía 4.6 muestra una vista aérea del sector Diagonal Freire, próximo al Mirador Cerro La Cruz, donde se aprecia al centro una remoción activa, evidenciando la interacción entre la ocupación urbana y laderas inestables. Esta situación es común en sectores urbanizados de Lebu, donde la ocupación territorial ha avanzado sin una adecuada planificación.

En la Fotografía 4.3, presentada anteriormente, se puede observar una vista más cercana de esta misma remoción, destacando las condiciones de inestabilidad del talud y las intervenciones parciales presentes, como el muro de hormigón al pie de la ladera.



Fotografía 4.6: Vista aérea del Mirador Cerro La Cruz y Diagonal Freire afectado por RM. Tomada mediante dron.

4.2. MAPAS DE FACTORES CONDICIONANTES CONSIDERADOS

Los mapas generados (Figura 4.2) permiten identificar la distribución espacial de los factores seleccionados para el análisis. Luego, se describen las características observadas para cada factor.

4.2.1. UNIDADES GEOLÓGICAS

En la Figura 4.2 (1) se observa la distribución de las principales formaciones geológicas del área de estudio, incluyendo la Formación Boca Lebu, Trihuco, Millongue, Ranquil, Tubul y Cañete, además de los depósitos recientes. Estos últimos se presentan en zonas costeras al sur del área de estudio. Por otra parte, tenemos que la Fm. Cañete cubre la mayor parte del área. Además, las Fm. Boca Lebu y Trihuco se encuentran sobre todo en acantilados costeros y alrededor del río Lebu.

4.2.2. DISTANCIA A FALLAS

La representación de la distancia a fallas clasifica el terreno en intervalos que van desde áreas muy cercanas a estructuras con distancias menores a 20 m hasta áreas mayores a 1000 m. (Figura 4.2 (2)). Entre estas clases tenemos rangos que varían en extensión mientras mayor es la distancia a las fallas (20 - 50 m, 50 - 100 m, 100 - 150 m, 150 - 250 m, 250 - 500 m y 500 - 1000 m). La última

clase es la que concentra la mayor cantidad de puntos de remociones en masa del inventario, lo que sugiere que la proximidad a fallas no es un factor condicionante significativo en el área de estudio.

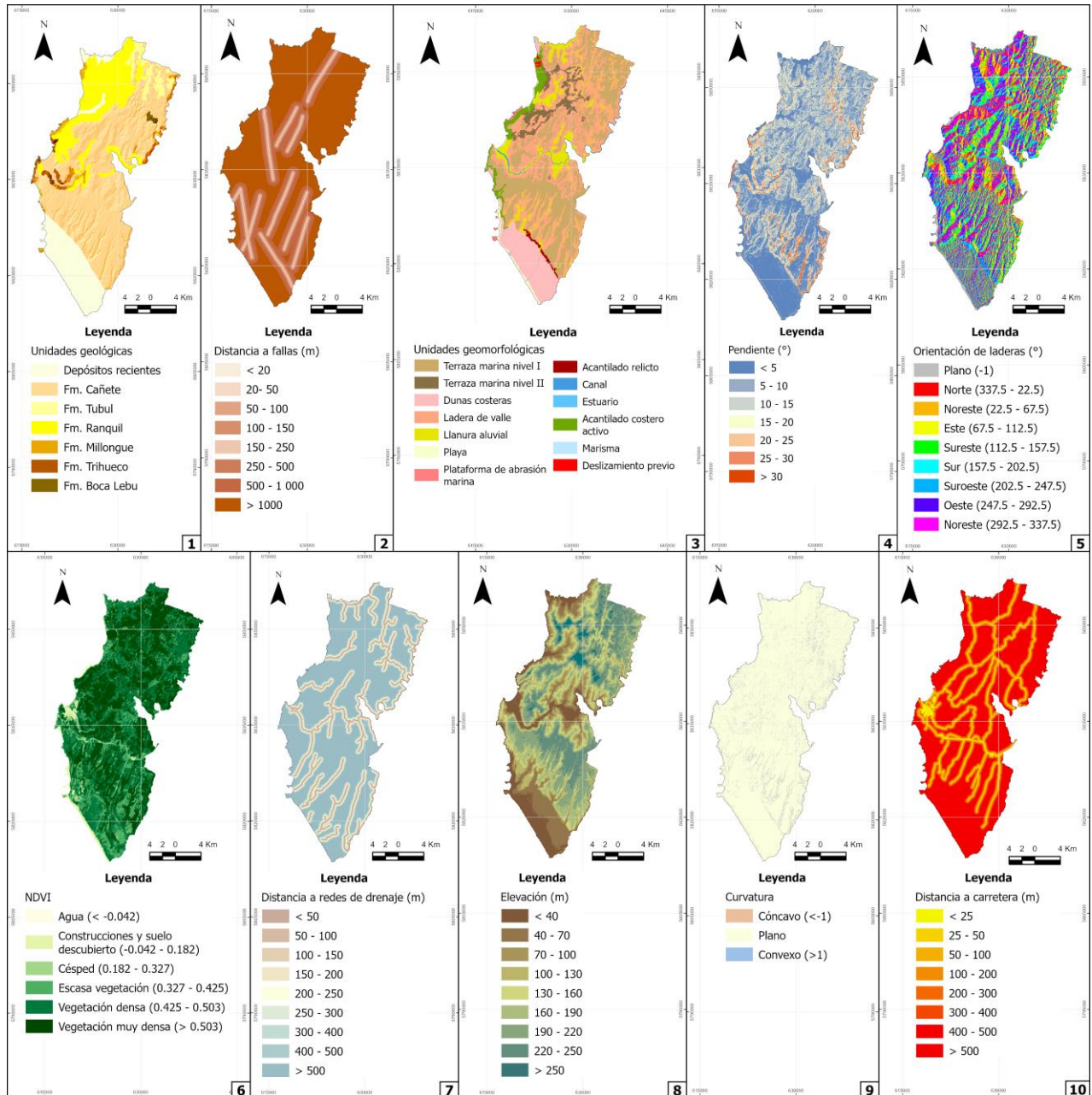


Figura 4.2: Mapas de factores condicionantes considerados para *Frequency Ratio*. (1) Unidades geológicas. (2) Distancia a fallas. (3) Unidades geomorfológicas. (4) Pendiente. (5) Orientación de laderas. (6) NDVI. (7) Distancia a redes de drenaje principales. (8) Elevación. (9) Curvatura. (10) Distancia a carreteras.

4.2.3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

La Figura 4.2 (3) destaca la diversidad de formas del terreno y las clases están dadas por el trabajo realizado por el Grupo de Estudios Multiamenazas Biobío, donde tenemos: Terraza marina nivel I,

Terraza marina nivel II, Dunas costeras, Ladera de valle, Llanura aluvial, Playa, Plataforma de abrasión marina, Acantilado relictos, Canal, Estuario, Acantilado costero activo, Marisma y Deslizamiento previo. Esta última clase originalmente correspondía a Remoción en masa, sin embargo, se modificó su nombre para evitar redundancia o incongruencia al aplicar el método, ya que este predice la ocurrencia de remociones en masa.

4.2.4. PENDIENTE

El mapa de pendiente muestra una distribución del terreno con 7 rangos: $< 5^\circ$, $5 - 10^\circ$, $10 - 15^\circ$, $15 - 20^\circ$, $20 - 25^\circ$, $25 - 30^\circ$ y $> 30^\circ$ (Figura 4.2 (4)). Donde se puede observar que las pendientes más altas se concentran en los acantilados costeros y en las laderas de valles cercanas a las redes de drenaje. Por otro lado, el área de estudio presenta principalmente zonas planas, puesto que la mayor parte corresponde a pendientes menores a 15° .

4.2.5. ORIENTACIÓN DE LADERAS

La Figura 4.2 (5) presenta el mapa de orientación de laderas que clasifica el terreno en direcciones cardinales correspondientes a norte ($337,5^\circ - 22,5^\circ$), sur ($157,5^\circ - 202,5^\circ$), este ($67,5^\circ - 112,5^\circ$), oeste ($247,5^\circ - 292,5^\circ$); direcciones diagonales que corresponden a noreste ($22,5^\circ - 67,5^\circ$), sureste ($112,5^\circ - 157,5^\circ$), suroeste ($202,5^\circ - 247,5^\circ$), noroeste ($292,5^\circ - 337,5^\circ$); y las zonas planas (-1).

4.2.6. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

El mapa correspondiente al NDVI, presente en la Figura 4.2 (6), clasifica el área de estudio en seis clases principales: agua ($< -0,042$), construcciones y suelo descubierto ($-0,042$ a $0,182$), césped ($0,182$ a $0,327$), escasa vegetación ($0,327$ a $0,425$), vegetación densa ($0,425$ a $0,503$) y vegetación muy densa ($> 0,503$). Las áreas con escasa vegetación y suelo descubierto se concentran principalmente en zonas urbanizadas y costeras, mientras que las clases de vegetación densa predominan en áreas más alejadas, asociadas a terrenos menos intervenidos. Mientras que el césped y las zonas con escasa vegetación se encuentran distribuidas de manera uniforme en el mapa.

4.2.7. DISTANCIA A REDES DE DRENAJE PRINCIPALES

En la Figura 4.2 (7) se observa la clasificación del terreno en función de la proximidad a las redes de drenaje principales en los siguientes intervalos: 0 - 50 m, 50 - 100 m, 100 - 150 m, 150 - 200 m,

200 - 250 m y > 250 m. La primera clase (0 - 50 m) sigue el trazado de los ríos y arroyos. Mientras que la última clase (> 500 m) abarca gran parte del área de estudio, correspondiente a zonas de mayor elevación o de menor actividad fluvial. Las remociones en masa identificadas no muestran una concentración significativa en las clases más cercanas a las redes de drenaje, lo que indica una baja influencia de este factor en el área de estudio.

4.2.8. ELEVACIÓN

El mapa de elevación clasifica el terreno en nueve rangos: < 40 m, 40 - 70 m, 70 - 100 m, 100 - 130 m, 130 - 160 m, 160 - 190 m, 190 - 220 m, 220 - 250 m, > 250 m (Figura 4.2 (8)). Donde las elevaciones más bajas se concentran en las zonas costeras y en los valles principales asociados a las redes de drenaje. Mientras que las clases intermedias corresponden a la mayor proporción del área de estudio y las elevaciones más altas se encuentran principalmente al norte del área de estudio en sectores puntuales.

4.2.9. CURVATURA

La Figura 4.2 (9) refleja tres tipos principales de formas del terreno: zonas cóncavas (< -1), zonas planas (~ 0) y zonas convexas (> 1). Las zonas planas abarcan la mayor parte del área de estudio, las zonas cóncavas se encuentran en los sectores de menor elevación cercanos a las redes de drenaje y las zonas convexas corresponden a lugares que presentan mayor elevación como las crestas y divisorias de agua.

4.2.10. DISTANCIA A CARRETERAS PRINCIPALES

El mapa de distancia a carreteras, presente en la Figura 4.2 (10), clasifica el área de estudio en ocho clases: 0 - 25 m, 25 - 50 m, 50 - 100 m, 100 - 200 m, 200 - 300 m, 300 - 400 m, 400 - 500 m y > 500 m. La clase (> 500 m) abarca la mayor parte del territorio, principalmente en áreas montañosas y de difícil acceso.

4.3. VALORES *FREQUENCY RATIO* OBTENIDOS PARA CADA FACTOR

Los cálculos para la creación del mapa de susceptibilidad se basaron en la metodología previamente descrita, utilizando como base los píxeles de las clases de cada parámetro y el set de puntos de remociones en masa convertido a ráster. Para obtener estos valores, se utilizó la herramienta

Tabulate Area de *ArcGIS PRO*, que permite calcular la cantidad de píxeles de remociones en masa dentro de cada clase de cada factor condicionante. Estos datos fueron compilados y procesados en tablas de Microsoft Excel, donde se realizaron los cálculos de *Frequency Ratio* (FR), *Relative Frequency* (RF) y *Prediction Rate* (PR). Posteriormente, estos valores permitieron construir los mapas de susceptibilidad a remociones en masa, presentados en la sección 4.3. Las tablas detalladas con los valores obtenidos para cada factor de los mapas preliminares se encuentran en el Anexo II.

4.3.1. FACTORES DESCARTADOS A PARTIR DE MAPA PRELIMINAR

Durante la aplicación del *Frequency Ratio*, se realizó un mapa de susceptibilidad preliminar, donde se identificaron factores condicionantes que no presentaron una relación significativa con la ocurrencia de remociones en masa en el área de estudio, por lo cual fueron descartados para el mapa definitivo. A continuación, se detallan estos factores y los argumentos correspondientes:

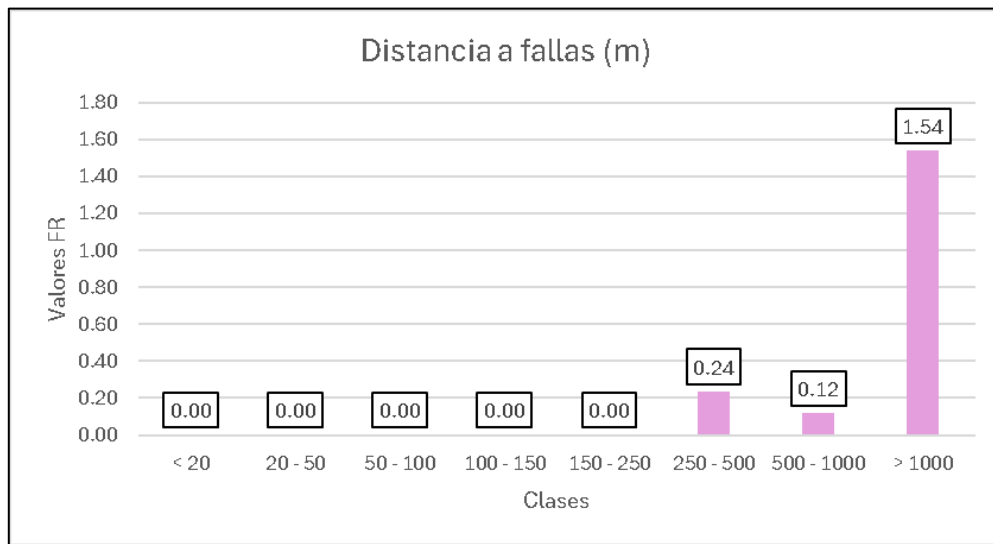


Figura 4.3: Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Distancia a fallas.

4.3.1.1. Distancia a fallas

Los valores de FR para el parámetro Distancia a fallas (Figura 4.3) indican que este factor no tiene influencia en las remociones en masa del área de estudio, puesto que las clases más cercanas tienen un valor de FR igual a 0. De hecho, recién en la clase de 250 – 500 m este valor difiere de 0. Además, el valor de FR más alto corresponde a la última clase, es decir, a la más lejana y es igual a 1,54 lo que indica una alta relación de ocurrencia de remociones en masa. Sin embargo, las zonas

cercanas a fallas debiesen presentar mayor probabilidad de ocurrencia de remociones en masa y, en este caso, ocurre lo contrario, lo cual sería incongruente y por esto fue descartado.

4.3.1.2. Distancia a redes de drenaje principales

En este caso, se presentan valores 0 en zonas cercanas a las redes de drenaje y recién a los 150 m aparecen valores FR diferentes de 0, que aumentan junto con la distancia hasta la clase 250 – 300 m, donde comienzan a disminuir, hasta llegar a la última clase que presenta el segundo valor más alto (Figura 4.4). Similar a lo que ocurre con el factor anterior, en las zonas más cercanas a las redes debiesen aparecer valores más altos, aquí ocurre lo contrario, por lo mismo, se descartó.

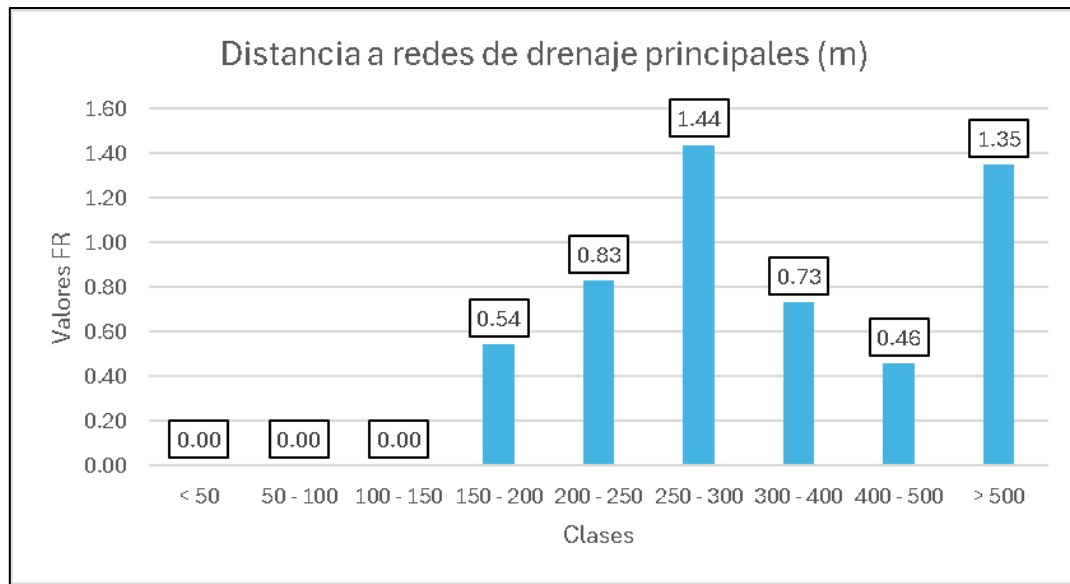


Figura 4.4: Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Distancia a redes de drenaje principales.

4.3.1.3. Distancia a carreteras principales

Para la Distancia a carreteras principales, la primera clase (< 25 m) presenta un valor FR de 7,13 (Figura 4.5) que disminuye al aumentar la distancia y varía en las zonas más lejanas. Estos valores tienen sentido en general, sin embargo, se consideró que el valor de la primera clase era demasiado alto. Para analizar esto, se definieron nuevos rangos (Figura 4.6), considerando que una carretera de doble vía no supera los 8 m de ancho, con una nueva clase inicial de distancias < 8 m, correspondiente a la carretera en sí, donde no debiesen ocurrir remociones en masa o su ocurrencia es poco probable por la estabilidad de la superficie construida. Sin embargo, el nuevo valor FR obtenido aumentó a 11,53 en la primera clase y luego disminuye a medida que aumenta la distancia.

Finalmente, si bien los valores obtenidos son relativamente consistentes, se optó por descartar este factor condicionante debido a que se observó nuevamente el insumo utilizado y no se había considerado que el *shapefile* incluye las calles del área urbana de la comuna de Lebu, lo que generaba una sobrestimación en la primera clase. Esto se debe a que, a diferencia de las carreteras con corte, donde se excava el terreno natural en pendientes generando posibles inestabilidades, las calles del área urbana se ubican principalmente en zonas planas, donde la ocurrencia de remociones es muy poco probable. Sin embargo, para estudios futuros, es posible editar este *shapefile* de manera que contemple solo las carreteras con corte, omitiendo las calles del área urbana.

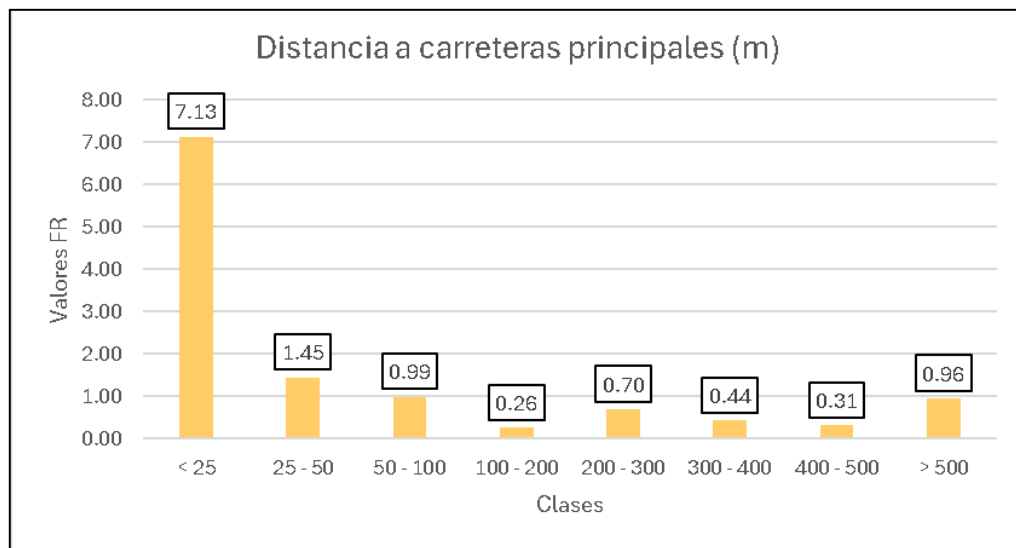


Figura 4.5: Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Distancia a carreteras principales.

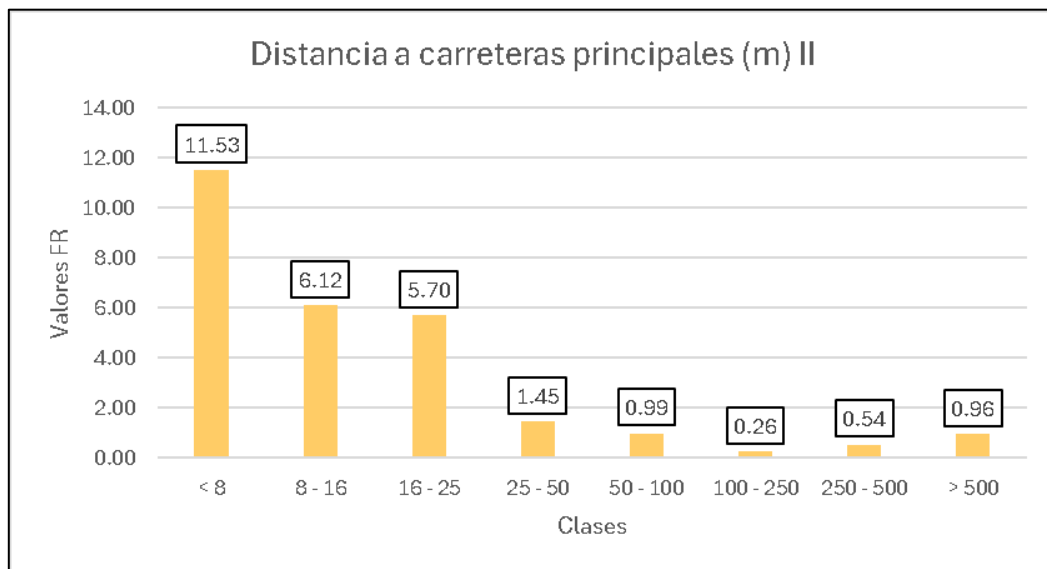


Figura 4.6: Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Distancia a carreteras principales II.

4.3.2. FACTORES UTILIZADOS PARA MAPA DEFINITIVO

Los factores que no fueron descartados para la elaboración del mapa de susceptibilidad a remociones en masa definitivo mostraron una relación más significativa con la ocurrencia de remociones en el área de estudio al realizar el mapa preliminar, cuyos valores FR se pueden ver en el Anexo III. Si bien estos factores presentaron valores coherentes en la mayoría de sus clases, también se observaron algunos detalles y comportamientos atípicos en ciertos rangos específicos. Sin embargo, se optó por no descartar más factores para evitar la pérdida de información relevante. De esta manera, se consideró que, a pesar de las inconsistencias menores, los factores seleccionados contribuyen de manera adecuada al modelo de susceptibilidad y permiten generar un mapa representativo del área de estudio. A continuación, se describen los valores FR obtenidos:

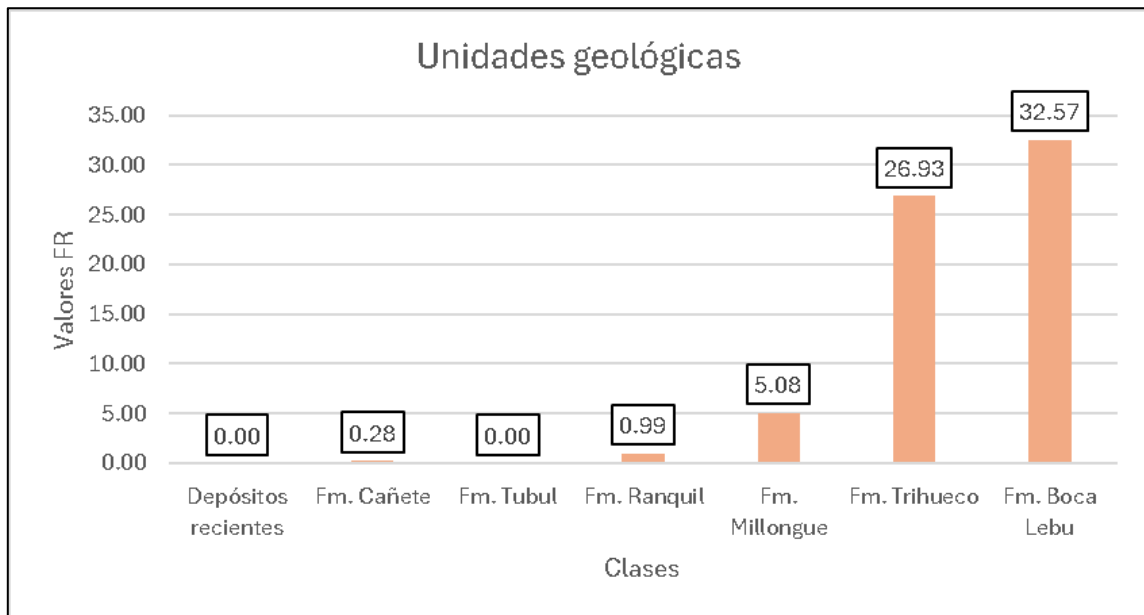


Figura 4.7: Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Unidades geológicas.

4.3.2.1. Unidades geológicas

La Figura 4.7 muestra que las formaciones más antiguas, como Boca Lebu y Trihueco, con valores FR de 32,57 y 26,93, respectivamente, son las más susceptibles debido a que se encuentran principalmente en acantilados costeros activos. Por el contrario, las unidades más recientes, como los Depósitos recientes y la Formación Tubul, con valores iguales a 0, presentan mayor estabilidad al encontrarse en terrenos planos. Por otra parte, la formación Millongue presenta un valor de FR igual a 5,08 y Ranquil igual a 0,99, mostrando susceptibilidades moderadas por su composición de lutitas y arcillolitas, que favorecen la inestabilidad.

4.3.2.2. Unidades geomorfológicas

En cuanto a los valores FR de las unidades geomorfológicas (Figura 4.8), tenemos que el acantilado costero activo (16,74) y los deslizamientos previos (9,61) destacan con alta susceptibilidad debido a pendientes pronunciadas e inestabilidad. Los valores elevados de playa y plataforma de abrasión marina (5,52 y 4,51, respectivamente) son atribuibles a errores de mapeo o la escala de los insumos utilizados, o bien, los puntos de remoción en masa presentes en esas clases fueron mal ubicados y probablemente corresponden al acantilado costero activo. Las laderas de valle muestran susceptibilidad moderada (0,75), mientras que unidades como terrazas marinas, dunas costeras, llanuras aluviales, canales, estuarios y marismas presentan valores menores a 1 o 0, reflejando estabilidad y baja relación con remociones en masa.

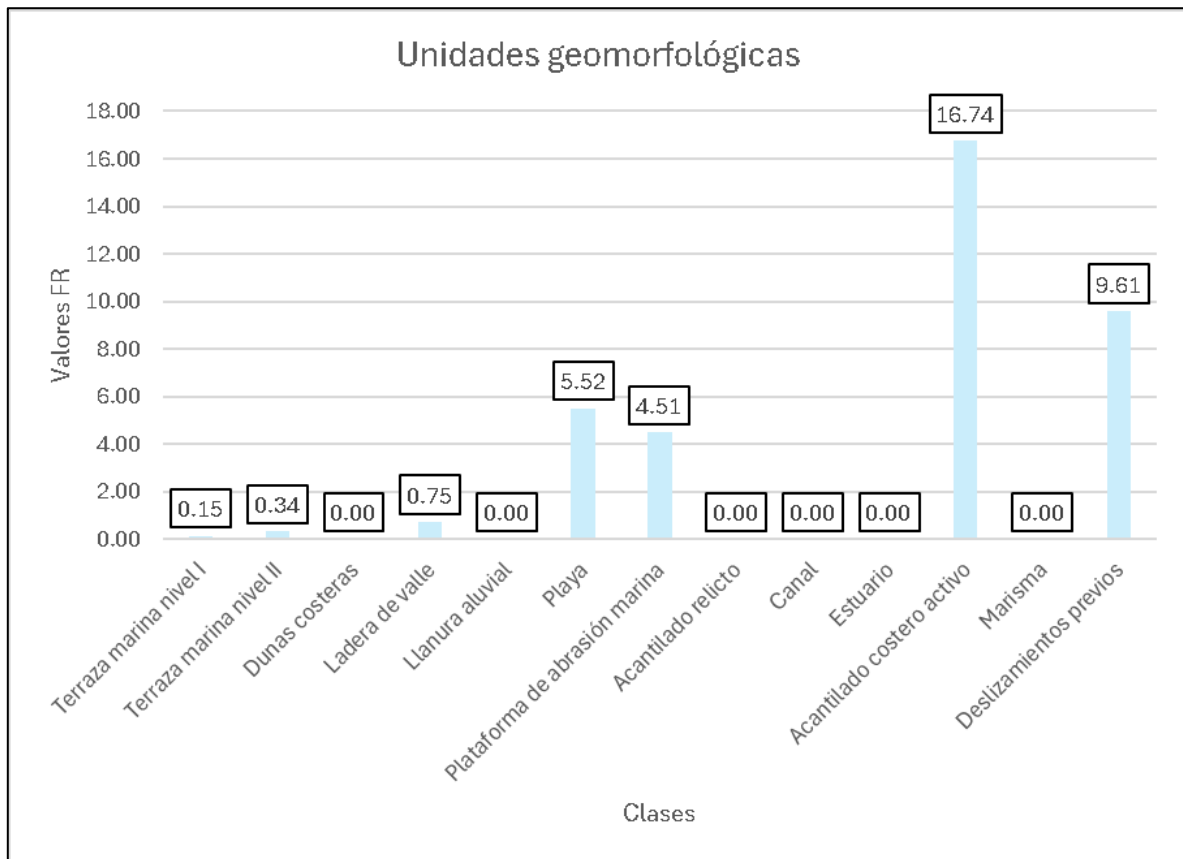


Figura 4.8: Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Unidades geomorfológicas.

4.3.2.3. Pendiente

Dentro de los valores FR obtenidos para el factor pendiente (Figura 4.9), las pendientes más altas (> 30°) destacan con un valor FR de 20,17, evidenciando una fuerte relación con la inestabilidad

debido a la influencia de la gravedad en zonas más empinadas. Le siguen las clases 25 - 30 ° (5,11) y 20 - 25 ° (4,92), que también presentan una susceptibilidad significativa. En contraste, las clases de pendientes bajas (0 - 5 °, 5 - 10 °, y 10 - 15 °) muestran valores FR menores a 1 (0,00 - 0,84), lo que refleja una mayor estabilidad y menor relación con remociones. La clase 15 - 20 ° presenta un valor FR de 1,13, indicando una relación débil pero existente, puesto que es un valor cercano al promedio. En general, el comportamiento de los valores FR confirma que la susceptibilidad aumenta con la inclinación, siendo crítica en terrenos con pendientes superiores a 30°.

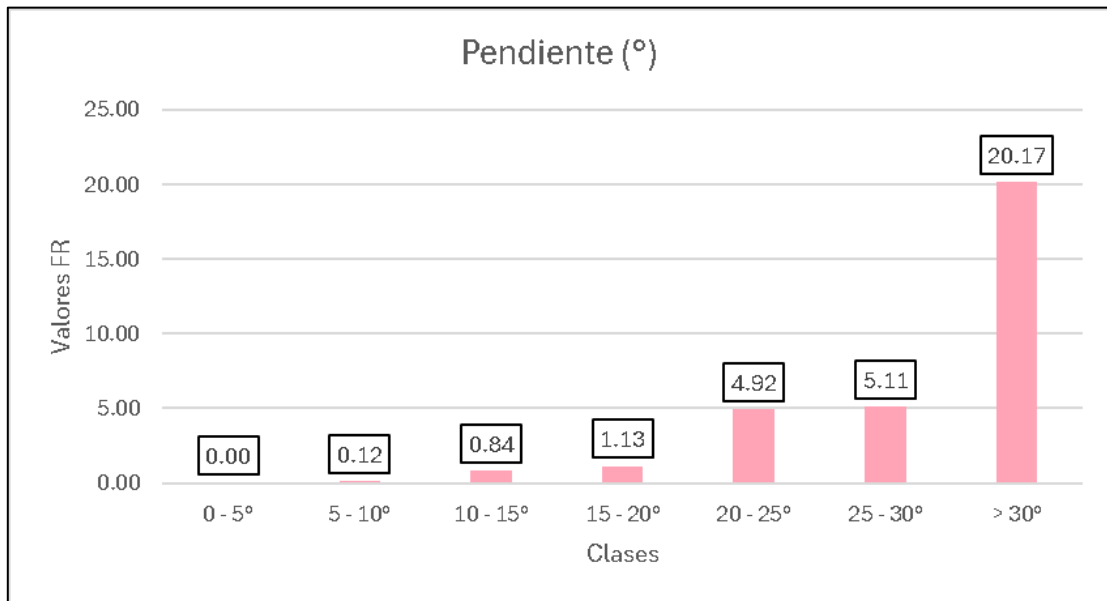


Figura 4.9: Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Pendiente.

4.3.2.4. Orientación de laderas

Los valores FR obtenidos para el factor orientación de laderas (Figura 4.10) evidencian que ciertas orientaciones son más susceptibles a remociones en masa. Las clases Oeste (1,71), Suroeste (1,40), Noroeste (1,31) y Norte (1,39) presentan mayor susceptibilidad a remociones en masa. Esta tendencia se explica porque en dichas orientaciones predominan los acantilados costeros activos, donde las pendientes pronunciadas y la erosión activa favorecen la inestabilidad. En contraste, las orientaciones Sureste y las zonas planas muestran valores FR de 0,00, indicando mayor estabilidad. Por otro lado, la orientación Sur presenta un valor bajo (0,33) debido a su menor exposición a procesos erosivos, mientras que las orientaciones Noreste (1,07) y Este (0,73) muestran valores moderados, asociados a pendientes más suaves y menor impacto de factores climáticos directos.

Para una mejor comprensión, en la Figura 4.11 se presenta un diagrama de roseta, el cual permite visualizar de manera clara las orientaciones más susceptibles y su relación con la distribución espacial de los acantilados costeros activos.

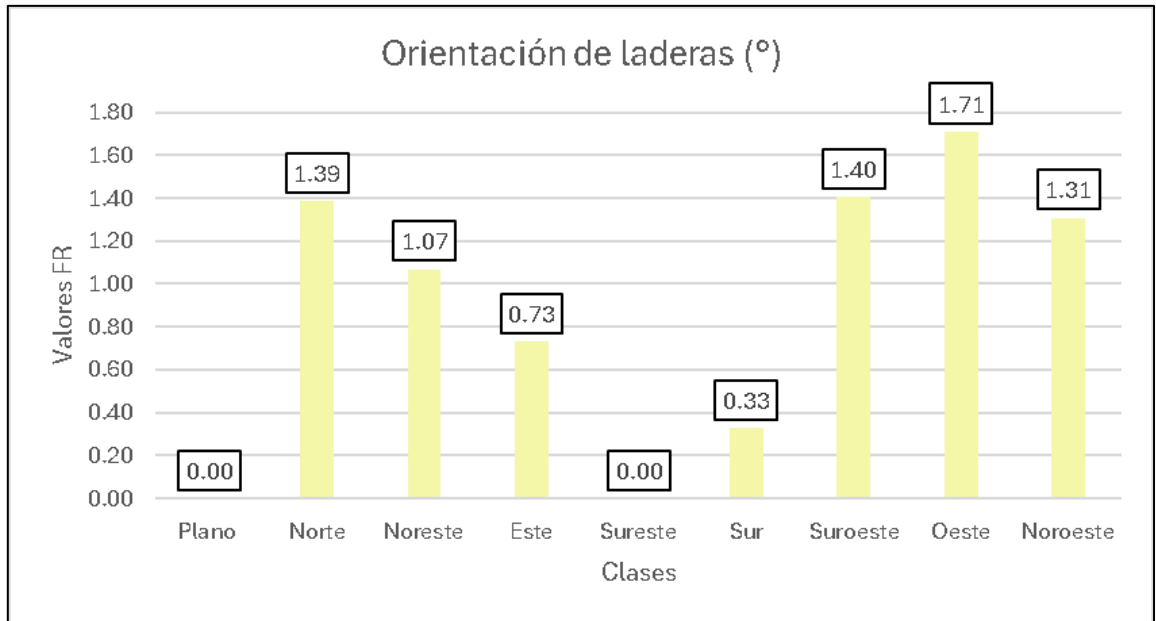


Figura 4.10: Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Orientación de laderas.

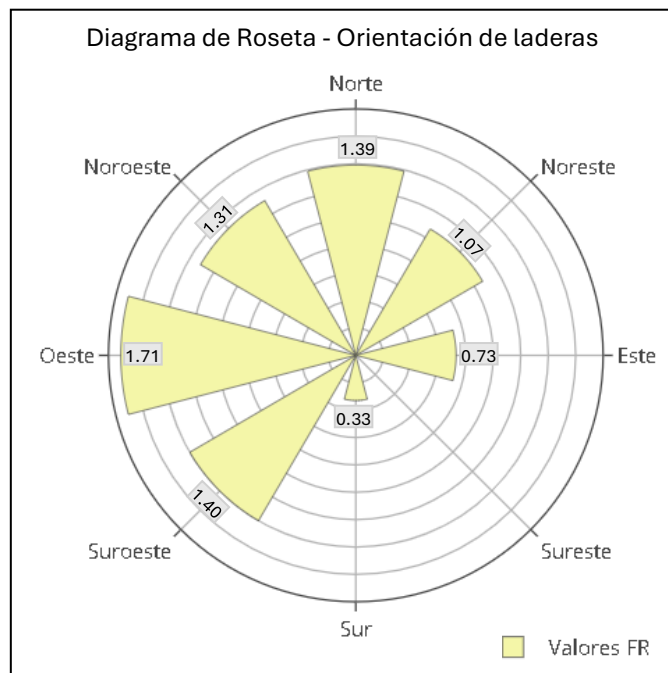


Figura 4.11: Diagrama de Roseta de Valores FR del factor Orientación de laderas.

4.3.2.5. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Los valores FR del factor NDVI (Figura 4.12) muestran una relación variable con las remociones en masa, ordenados de menor a mayor susceptibilidad. El agua presenta un valor FR igual a 0, indicando nula relación con las remociones. Le siguen la vegetación muy densa (0,12) y densa (0,59), ambas con valores menores a 1, lo que confirma su rol como factor estabilizador al proteger el suelo y reducir la susceptibilidad. Las zonas con escasa vegetación presentan un valor de 2,56, reflejando alta susceptibilidad debido a su valor mayor a 1, aunque en comparación con las demás clases es moderado, debido a la limitada cobertura vegetal, que deja expuestos sectores del terreno.

La clase construcciones y suelo descubierto alcanza un valor de 3,52, asociado a la ausencia de vegetación y la intervención humana, lo que favorece la inestabilidad. Finalmente, la clase césped presenta el valor más alto (13,61), lo cual se explica por tratarse de un promedio anual de las imágenes Sentinel, donde estas áreas alternaron entre períodos con cobertura vegetal y otros con suelo desnudo, aumentando significativamente su susceptibilidad a remociones en masa.

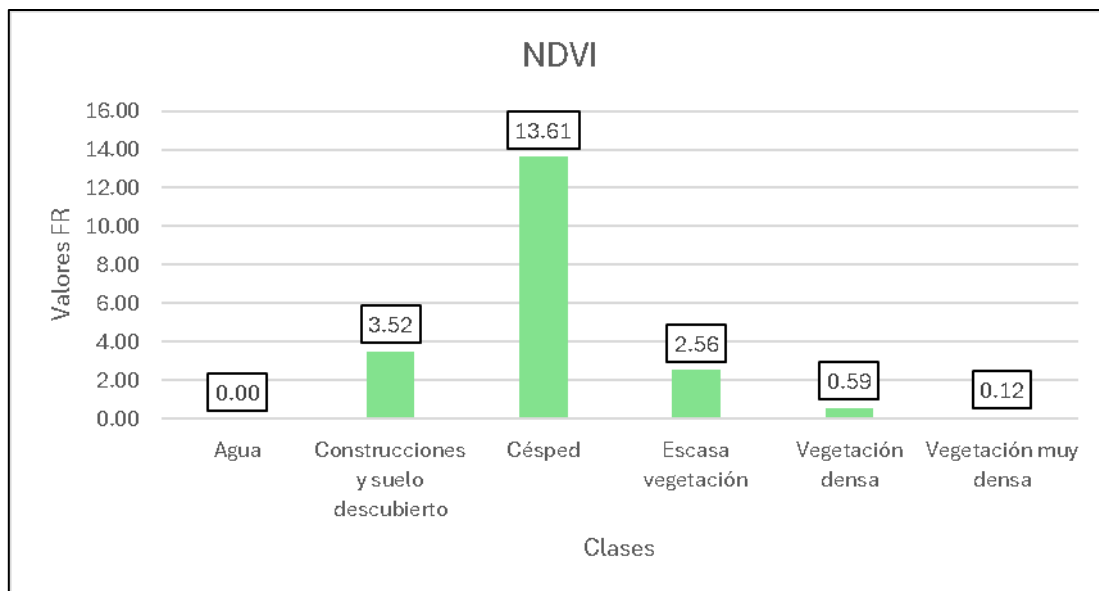


Figura 4.12: Gráfico de Clases vs Valores FR del factor NDVI.

4.3.2.6. Elevación

El gráfico de clases vs valores FR del factor elevación (Figura 4.13) muestra una mayor susceptibilidad a remociones en masa en la clase 40 - 70 m, que presenta el valor más alto (3,32), seguida de las clases 70 - 100 m (2,14) y 100 - 130 m (1,54), lo que sugiere una fuerte relación

entre estas elevaciones y la ocurrencia de remociones, posiblemente debido a la presencia de laderas inestables y condiciones de erosión activa en estos rangos. La clase < 40 m muestra un valor moderado (1,15), mientras que en altitudes superiores los valores disminuyen progresivamente: 130 - 160 m registra 0,91, y las clases > 160 m presentan valores cercanos a cero ($\leq 0,22$), reflejando mayor estabilidad en elevaciones más altas. En resumen, la susceptibilidad se concentra entre los 40 y 130 m, disminuyendo de manera notable con el aumento de la elevación.

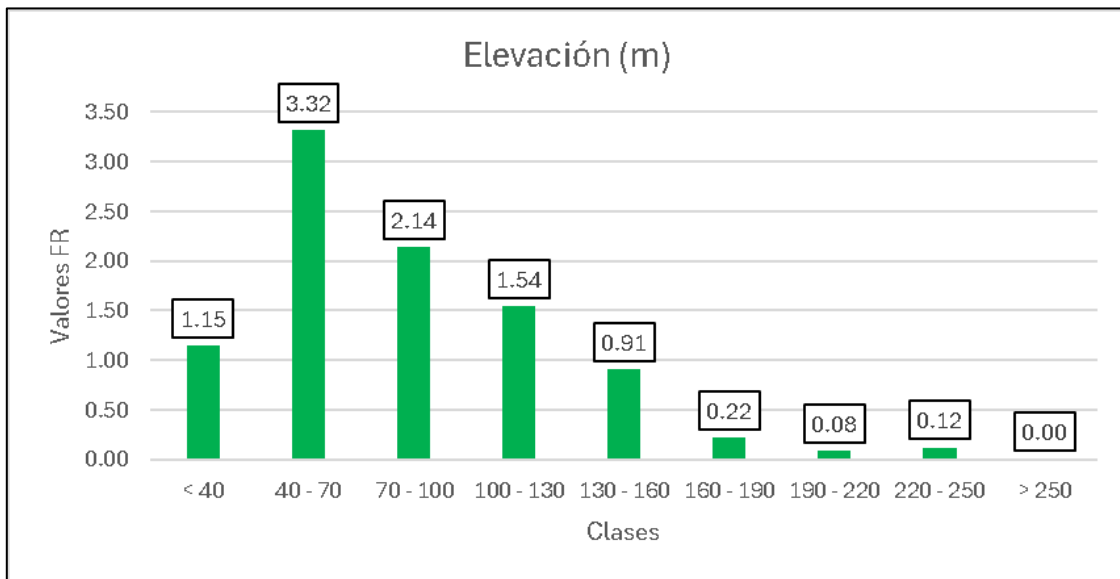


Figura 4.13: Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Elevación.

4.3.2.7. Curvatura

Los valores FR del factor curvatura del terreno (Figura 4.14) presentan diferencias claras en la susceptibilidad a remociones en masa según la forma de la superficie. De acuerdo con los resultados obtenidos, las áreas convexas (FR = 5,19) muestran la mayor susceptibilidad, lo que podría deberse a que comúnmente se encuentran en las partes superiores de las laderas, donde están más expuestas a procesos de erosión. Por otro lado, las áreas cóncavas (FR = 2,04) presentan una susceptibilidad moderada al actuar como zonas de acumulación de materiales y humedad, lo que puede provocar saturación del suelo y una reducción de su resistencia. En contraste, las superficies planas registran el valor FR más bajo (0,80), reflejando su mayor estabilidad. La ausencia de pendientes y la menor concentración de esfuerzos en estas zonas reducen significativamente la probabilidad de ocurrencia de remociones en masa.

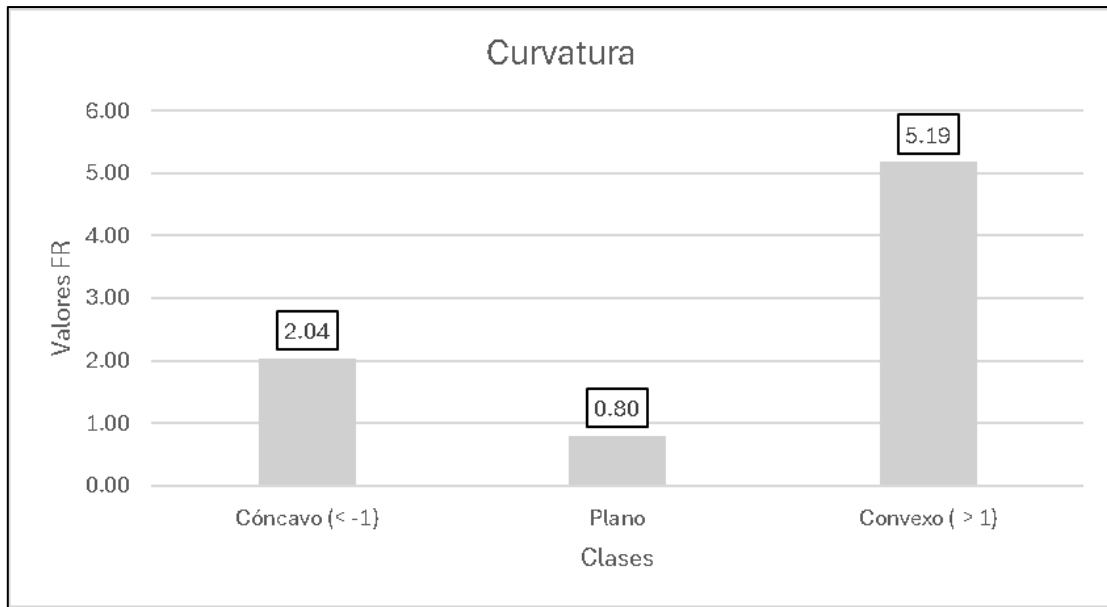


Figura 4.14: Gráfico de Clases vs Valores FR del factor Curvatura.

4.4. MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA

4.4.1. MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD PRELIMINARES

Inicialmente, se consideraron 10 factores condicionantes (Unidades geológicas, Distancia a fallas, Unidades geomorfológicas, Pendiente, Orientación de laderas, NDVI, Distancia a redes de drenaje principales, Elevación, Distancia a carreteras principales, Curvatura), con los cuales se elaboró el Mapa LSI Preliminar 1 (Figura 4.15), con todos los puntos de remociones en masa, clasificándolo en 5 clases de *Natural Breaks*, que es una técnica de clasificación que agrupa datos minimizando la varianza dentro de cada clase y maximizándola entre clases (Jenks, 1967), para obtener un resultado preliminar antes de realizar la división de datos de entrenamiento y prueba.

En base a los valores FR obtenidos, que se detallan en la sección 4.2, y que visualmente se veía que algunos ráster tenían mucha importancia numérica en el modelo, sin embargo, no había un argumento geológico que justificara el comportamiento o tendencias de estos valores, fueron descartados 3 factores condicionantes (Distancia a fallas, Distancia a redes de drenaje principales y Distancia a carreteras principales).

Seguido a esto, se procedió a realizar el Mapa LSI Preliminar 2 (Figura 4.16) con los factores que no fueron descartados, utilizando los valores FR obtenidos para realizar el mismo análisis. En este

caso, pese a algunos detalles, las clases de los factores eran más consistentes y se obtuvo un mejor resultado de manera visual.

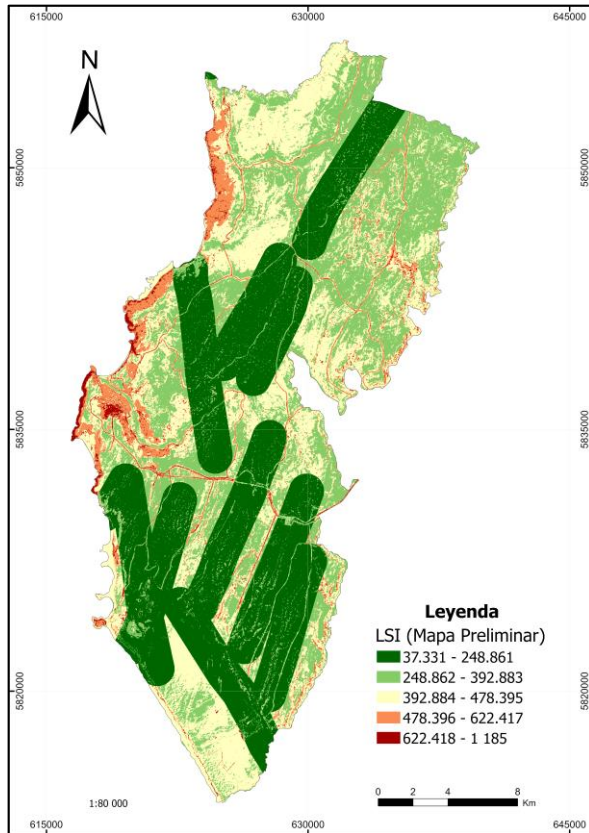


Figura 4.15: Mapa LSI Preliminar 1.

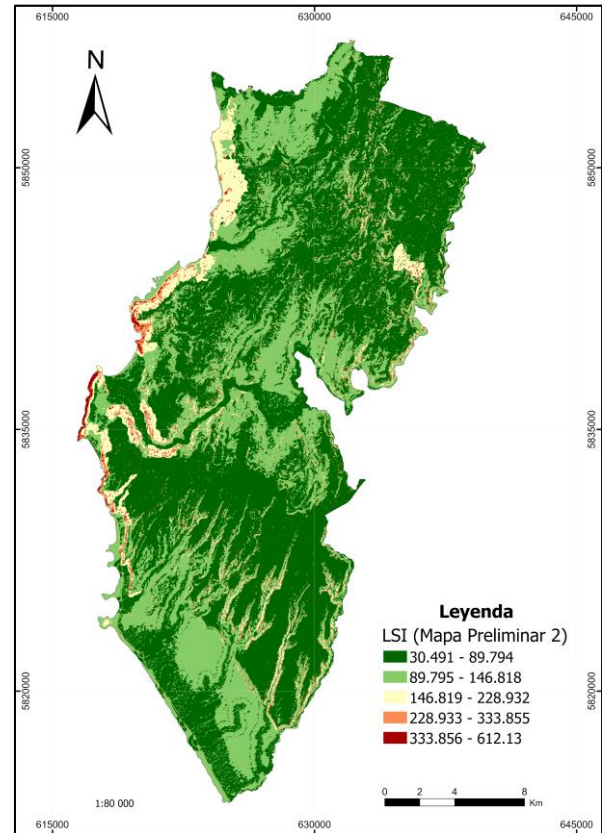


Figura 4.16: Mapa LSI Preliminar 2.

4.4.2. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DEFINITIVO

En esta sección se presenta el resultado final obtenido a partir de los valores entregados por el modelo *Frequency Ratio*. Se presentan los resultados en un Mapa LSI Normalizado al 100 (Figura 4.17), que muestra una distribución continua de valores entre 0 y 100 mediante una clasificación *Stretched*. Esta representación permite visualizar gradualmente las zonas de mayor y menor susceptibilidad sin divisiones discretas, facilitando el análisis del comportamiento espacial del LSI.

Luego, se tiene el Mapa LSI Definitivo (Figura 4.18), que presenta la distribución espacial del índice de susceptibilidad a remociones en masa en la comuna de Lebu, clasificado en 5 categorías: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto, mediante el método *Natural Breaks*, el cual segmenta los datos en función de sus discontinuidades naturales, permitiendo una clasificación más objetiva y representativa de la variabilidad en los valores de LSI.

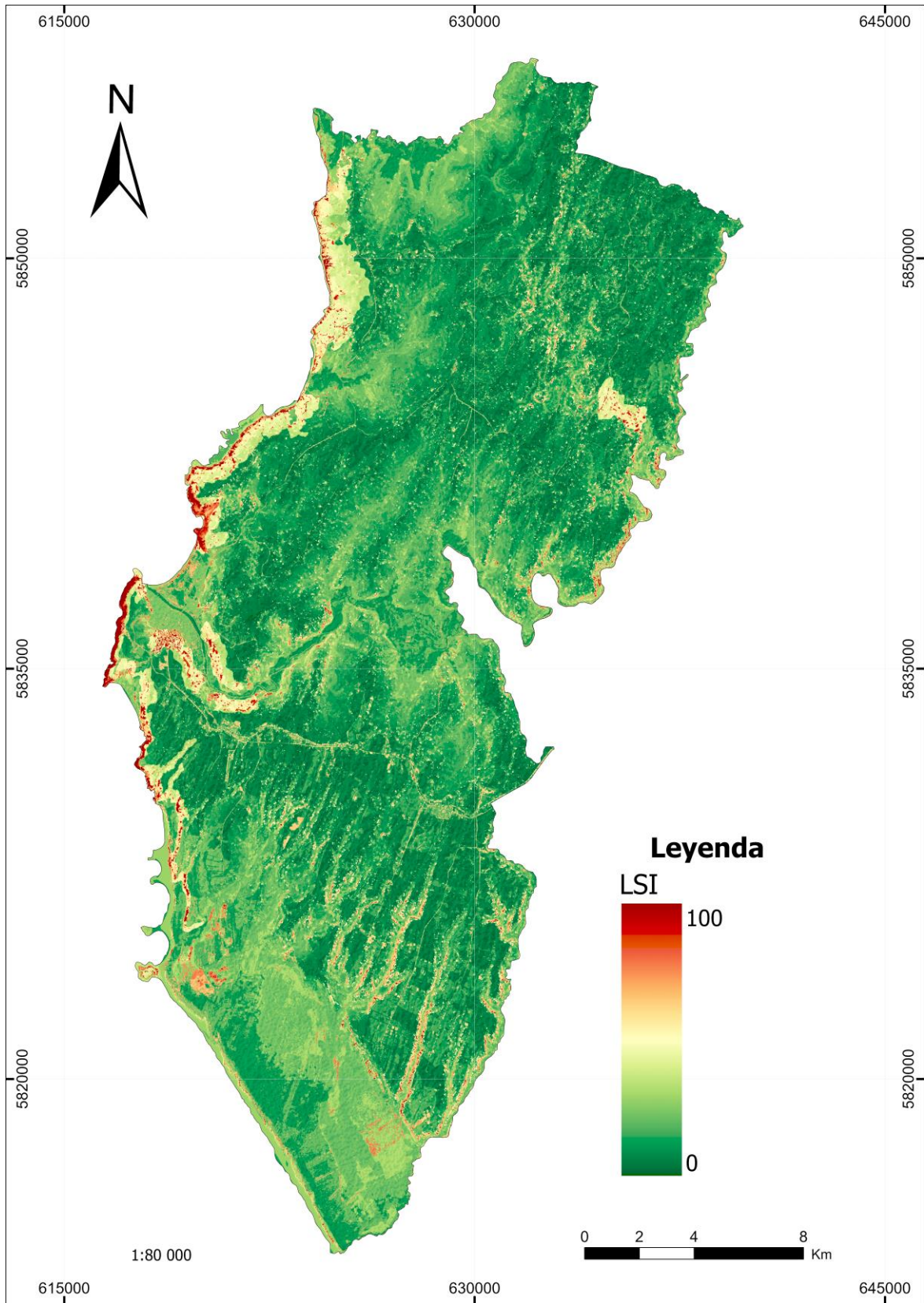


Figura 4.17: Mapa LSI Normalizado al 100.

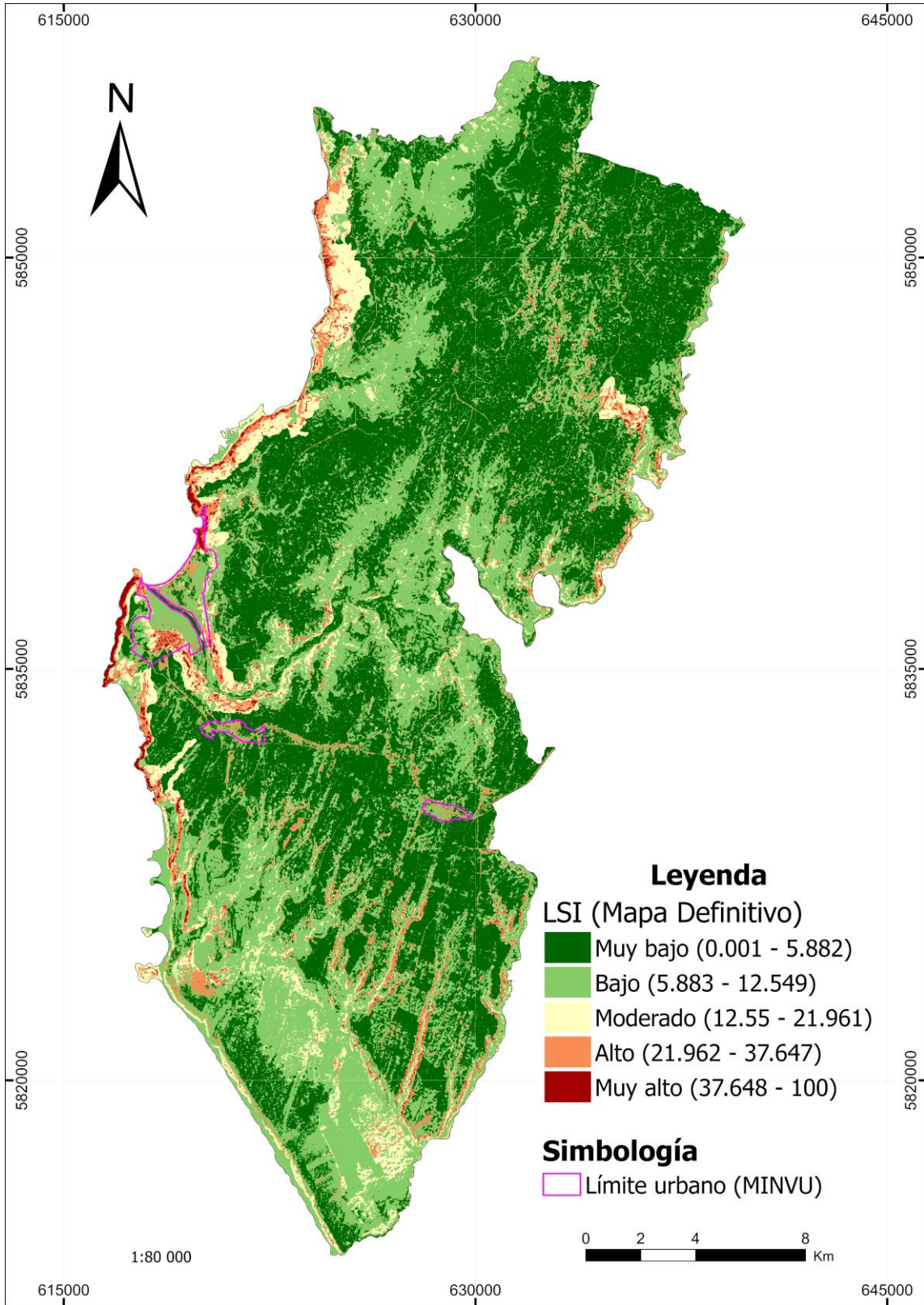


Figura 4.18: Mapa LSI Definitivo.

Se observa que las áreas con mayor susceptibilidad se concentran en los acantilados costeros activos, sectores urbanos con pendientes pronunciadas y algunas laderas en la periferia de la comuna. Entre los sectores urbanos más afectados se encuentran Diagonal Freire, Junquillo Bajo y sectores cercanos a la ribera del río Lebu, donde se han registrado eventos de remoción en masa.

Como se puede observar en la Figura 4.18, fue incorporado al mapa de susceptibilidad el límite urbano del Plan Regulador Comunal representado por la línea magenta, obtenido del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), el cual permite cuantificar la presencia de áreas urbanas dentro de zonas de alta susceptibilidad. Se identificó que una parte significativa del área urbana se encuentra dentro de sectores clasificados como moderado (9,74%), alto (21,89%) o muy alto (5,27%) en susceptibilidad, indicando la presencia de asentamientos en zonas potencialmente inestables. En contraste, las zonas con susceptibilidad baja (49,13%) o muy baja (13,97%) corresponden principalmente a llanuras aluviales, terrazas marinas y sectores con menor pendiente.

En cuanto a la superficie que abarca cada clase en el área urbana tenemos que, se presentan 0,92 km² de susceptibilidad moderada, la alta abarca 2,08 km² y la muy alta 0,50 km², destacando sectores críticos como Diagonal Freire y Junquillo Bajo, mientras que la susceptibilidad baja cubre 4,66 km² y la muy baja 1.33 km².

4.5. VALIDACIÓN MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DEFINITIVO

La Curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) presentada en la Figura 4.19 muestra la capacidad predictiva del mapa de susceptibilidad a remociones en masa. En el eje Y se encuentra la Tasa de Verdaderos Positivos (TPR), que indica la proporción de remociones correctamente predichas, mientras que en el eje X se observa la Tasa de Falsos Positivos (FPR), que representa las zonas sin remociones identificadas erróneamente como susceptibles. La curva azul refleja el desempeño del modelo, mientras que la línea roja punteada corresponde a un modelo aleatorio (AUC = 0,5). El Área Bajo la Curva (AUC) obtenida es de 0,8368, lo cual indica que el modelo tiene una buena capacidad de predicción, ya que un AUC superior a 0,8 se considera como un rendimiento adecuado, puesto que indica que el modelo tiene una alta probabilidad de distinguir entre zonas con y sin remociones en masa.

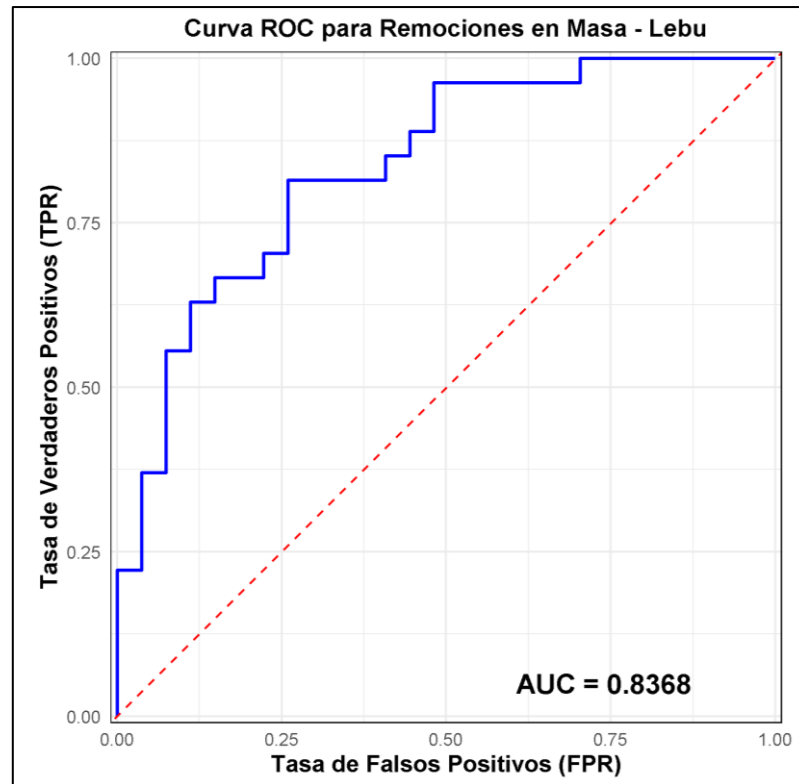


Figura 4.19: Curva ROC para validación del Mapa LSI Definitivo.

5. DISCUSIÓN

5.1. INTERPRETACIÓN DE FACTORES CONDICIONANTES PRINCIPALES

La influencia de los factores condicionantes más relevantes en la ocurrencia de remociones en masa se refleja en los valores obtenidos de *Frequency Ratio* (FR) y *Prediction Rate* (PR). Además, estos valores pueden ser comparados con otros estudios, en este caso es posible realizar algunas comparaciones con los resultados con estudios previos realizados con la misma metodología en el Área Metropolitana de Concepción (AMC), un área cercana a la zona de estudio de este trabajo, realizados por Baltierra (2023) y Gajardo (2022), lo que hace posible la identificación de aquellos factores que presentan una mayor correlación y consistencia en su comportamiento.

La Figura 5.1 muestra los valores PR obtenidos para los factores condicionantes evaluados en el presente estudio. Se observa que los factores NDVI, pendiente y curvatura destacan como los más influyentes en la ocurrencia de remociones en masa, mientras que la orientación de laderas presenta el valor más bajo (1,00).

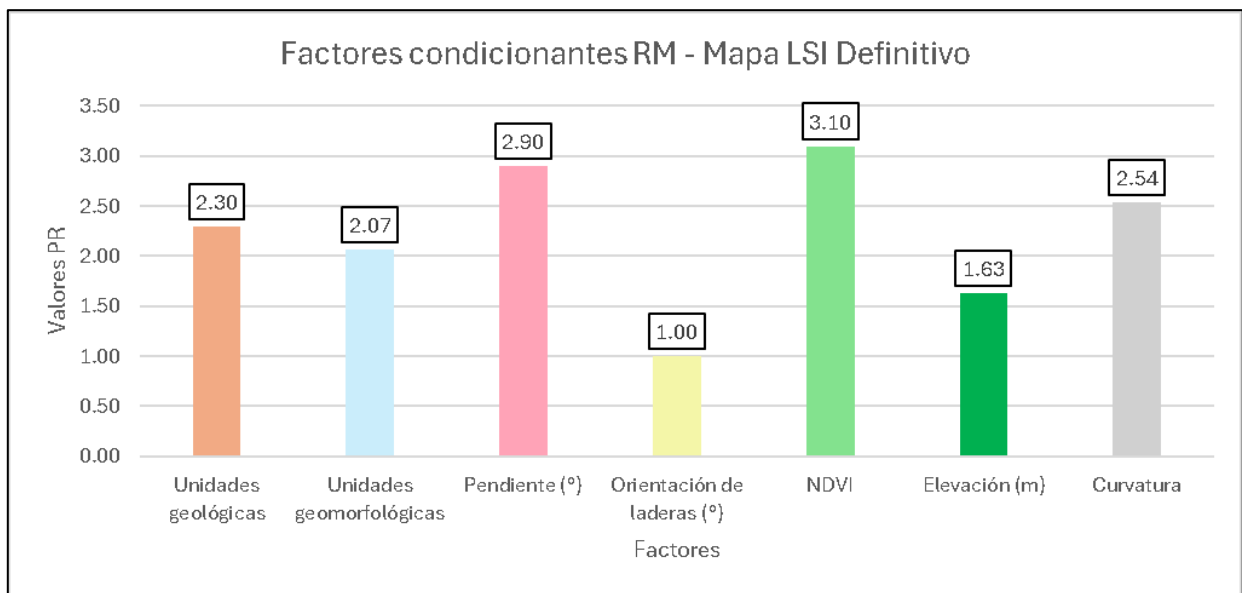


Figura 5.1: Valores PR de factores condicionantes obtenidos con modelo FR para Mapa LSI Definitivo.

Aunque las unidades geomorfológicas no presentan el mayor valor de PR (2,07), su influencia es considerable al analizar las clases individuales. Esto se debe a que una gran parte de las remociones en masa identificadas se localizan en acantilados costeros activos. Esta clase específica presenta un alto valor FR (16,74), lo que evidencia su relevancia dentro del contexto geomorfológico. Por

lo tanto, aunque el valor PR de las unidades geomorfológicas sea menor en comparación con otros factores, su impacto en las remociones no debe subestimarse, ya que las características geomorfológicas locales condicionan fuertemente la ocurrencia de los procesos de inestabilidad.

Por otro lado, las unidades geológicas registran un valor PR de 2,30, ubicándose entre los factores de mayor relevancia. Este resultado es coherente con la alta susceptibilidad observada en las unidades más antiguas, como la Formación Boca Lebu y la Formación Trihueco, que alcanzan valores FR de 32,56 y 26,93, respectivamente. Estas unidades, caracterizadas por su alto grado de meteorización y fracturamiento, junto con su ubicación en pendientes pronunciadas, favorecen la inestabilidad y el desarrollo de remociones en masa. Esta tendencia también ha sido identificada en estudios previos, como el de Baltierra (2023) en el AMC, donde las unidades geológicas estratificadas antiguas presentaron una correlación significativa con las zonas de alta susceptibilidad, mientras las más recientes presentan menor influencia (Fm. Cañete con FR = 0,28; Fm. Ranquil con FR = 0,00). En el caso de la comuna de Lebu, este patrón se ve exacerbado por la interacción entre factores litológicos y geomorfológicos, particularmente en las zonas costeras.

Por su parte, el factor pendiente, con un PR de 2,90, reafirma su rol fundamental en la ocurrencia de remociones en masa. Las clases con pendientes superiores a 30° registran valores FR de 20,17, evidenciando una fuerte relación entre el aumento del ángulo de inclinación y la inestabilidad del terreno. Este comportamiento es consistente con estudios en áreas cercanas, como el trabajo de Gajardo (2022), donde la pendiente es directamente proporcional al valor FR. La inclinación del terreno no solo incrementa la fuerza gravitacional que actúa sobre el material, sino que también facilita procesos como la pérdida de cohesión en suelos y rocas meteorizadas, condiciones presentes en diversas zonas de la comuna de Lebu.

En cuanto al NDVI, que presenta el mayor valor PR (3,10), su influencia es atribuida a la relación inversa entre cobertura vegetal y susceptibilidad a remociones en masa. Las clases de césped y escasa vegetación registran valores FR de 13,61 y 2,55, respectivamente, lo que indica que las zonas con cobertura vegetal menos densa son más propensas a estos eventos. En contraste, las áreas con vegetación densa y muy densa muestran valores FR menores a 1, confirmando su rol estabilizador al reducir la infiltración de agua y proporcionar cohesión al suelo. No obstante, cabe

destacar que el NDVI utilizado en este estudio corresponde a un promedio anual, por lo que podría no capturar con precisión la variabilidad estacional de la vegetación, lo cual constituye una limitación metodológica a considerar.

Por último, el factor curvatura también resulta significativo, con un PR de 2,54. Las clases convexas (>1) presentan un valor FR de 5,19, destacando su susceptibilidad a remociones debido a la tensión superficial y la erosión diferencial que suelen ocurrir en estas morfologías. En contraste, las zonas cóncavas, con un FR de 2,04, tienden a acumular materiales y agua, lo que incrementa la saturación del suelo y favorece procesos de inestabilidad. Estudios como los de Baltierra (2023) y Gajardo (2022) también identifican una relación directa entre la curvatura convexa y la ocurrencia de remociones, reforzando la consistencia de los resultados obtenidos en la comuna de Lebu.

Los resultados evidencian que la combinación de factores topográficos (pendiente y curvatura), geológicos y de cobertura vegetal (NDVI) son los principales condicionantes de las remociones en masa en la zona de estudio, con patrones similares a los reportados en trabajos previos en el AMC. La influencia local de las unidades geomorfológicas, especialmente en los acantilados costeros, también juega un rol crítico que debe considerarse en estudios futuros.

5.2. VALIDACIÓN DEL MODELO

El valor obtenido de AUC (0,8368) se encuentra en el rango aceptable de estudios similares. Por ejemplo, Baltierra (2023) y Gajardo (2022), quienes, como se mencionó anteriormente, trabajaron con el modelo *Frequency Ratio*, obtuvieron valores de AUC de 0,81 y 0,85, respectivamente. Esto sugiere que el modelo desarrollado en este trabajo presenta resultados consistentes, respaldando la metodología aplicada y la relevancia de los factores condicionantes utilizados, especialmente aquellos con altos valores PR.

El histograma de distribución del LSI (Figura 5.2), correspondiente al Mapa LSI Definitivo muestra cómo se distribuyen los valores normalizados del índice en la zona de estudio. Se observa que la mayoría de los valores LSI se concentran en el rango muy bajo a bajo, con una menor proporción de valores en las clases de alta y muy alta susceptibilidad. Esta distribución evidencia que el modelo es capaz de identificar con precisión las zonas de mayor susceptibilidad, aunque los

valores LSI más altos son significativamente menos frecuentes en comparación con los valores LSI más bajos, considerando la totalidad del área de estudio.

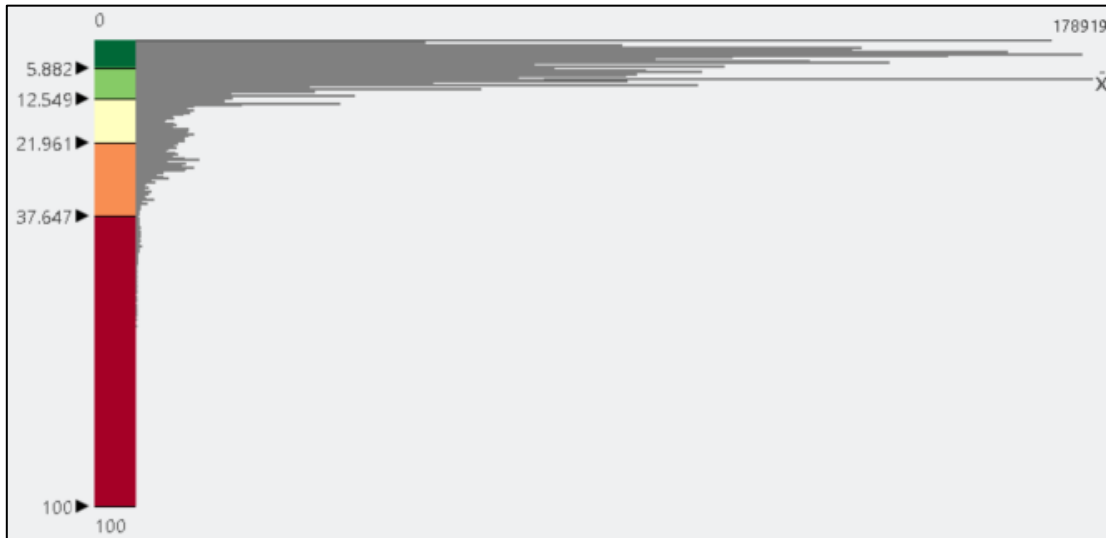


Figura 5.2: Histograma de valores LSI de Mapa LSI Definitivo. Captura del software *ArcGIS PRO*.

5.3. MEJORAS, MITIGACIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS

5.3.1. MEJORA DEL INVENTARIO DE REMOCIONES EN MASA

El inventario de remociones en masa es la base fundamental para la elaboración de mapas de susceptibilidad, ya que su precisión en la ubicación, caracterización y clasificación de las remociones influye directamente en la calidad de los resultados obtenidos. Actualmente, el inventario presenta limitaciones relacionadas con la detección, escala y caracterización temporal de las remociones, lo que restringe la identificación completa de las zonas afectadas.

Si bien el inventario incluye la ubicación de remociones principales, existen omisiones en remociones más pequeñas o incipientes, especialmente en áreas urbanas y zonas con cobertura vegetal densa. En las fotografías, obtenidas mediante dron, presentes en el capítulo anterior, se observan ejemplos claros de sectores con ocupación territorial sobre laderas inestables donde las remociones no han sido completamente identificadas, o bien, su ubicación no fue determinada con tanta precisión. La incorporación de un trabajo de campo sistemático, acompañado de fotografías georreferenciadas, permitiría una mejora significativa en la precisión del inventario.

Por otra parte, el inventario actual carece de una clasificación detallada en activas, inactivas o estabilizadas, lo que dificulta la identificación de patrones de evolución temporal. Un análisis multitemporal, utilizando imágenes satelitales de diferentes fechas y datos en terreno, facilitaría el seguimiento de las remociones. Esto es especialmente relevante en zonas críticas, como los acantilados costeros y las laderas urbanizadas, donde la actividad de las remociones puede estar en constante cambio.

5.3.2. OPTIMIZACIÓN DE INSUMOS UTILIZADOS

Por otra parte, la mejora del inventario debe ir acompañada de una optimización de los insumos utilizados, ya que estos constituyen la base para el análisis de los factores condicionantes y la generación de mapas de susceptibilidad. En el presente estudio se utilizaron datos como el DEM, mapas geológicos y geomorfológicos, los cuales presentan limitaciones en su resolución o escala.

El DEM utilizado, con una resolución de 12,5 m/píxel, condiciona la precisión en el cálculo de factores como la pendiente y la curvatura, los cuales presentan altos valores de PR (2,90 y 2,54, respectivamente). El uso de un DEM de resolución media puede ocultar microrelieves importantes asociados a remociones, como escarpes, grietas y acumulaciones de material. La incorporación de tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*), que permite obtener un DEM de alta resolución, mejoraría significativamente la identificación de remociones en áreas más complejas.

Los mapas geológicos y geomorfológicos utilizados, que varían en escalas de 1:500.000 a 1:50.000, respectivamente, corresponden a datos existentes, que no siempre tienen la precisión necesaria para estudios locales. La actualización de estos mapas mediante trabajo de campo y análisis de teledetección permitiría ajustar la clasificación de las unidades y mejorar su relación con la susceptibilidad observada.

La incorporación de imágenes satelitales de alta resolución, como las de *PlanetScope*, y herramientas de drones facilitaría la generación de información detallada sobre la superficie y la detección de remociones no visibles en datos convencionales, permitiendo una representación más precisa de las condiciones del terreno en zonas críticas.

El análisis multitemporal de imágenes satelitales permitiría evaluar cambios en la cobertura del suelo que influyen en la susceptibilidad, como la deforestación, urbanización o cambios en la cobertura vegetal con mayor precisión al mejorar la resolución espacial de los insumos.

5.3.3. MITIGACIÓN

La identificación de sectores con alta susceptibilidad a remociones en masa permite orientar medidas de mitigación para reducir el riesgo en la población. Según los resultados obtenidos, el 21,89% del área urbana se encuentra en zonas de alta susceptibilidad y el 5,27% en zonas de muy alta susceptibilidad, lo que implica que una proporción significativa de viviendas e infraestructuras está expuesta a potenciales remociones, especialmente en sectores críticos de la comuna de Lebu, donde la presencia de construcciones en pendientes pronunciadas, junto con la falta de intervenciones estructurales o la insuficiencia de estas, acentúa el riesgo de deslizamientos, particularmente en períodos de altas precipitaciones o sismos. La implementación de medidas de mitigación es fundamental para reducir estos riesgos.

Las fotografías de Diagonal Freire y Junquillo Bajo muestran viviendas ubicadas en laderas con pendientes pronunciadas, algunas de ellas sin estructuras de contención adecuada. En ese sentido, es necesario implementar medidas como muros de contención anclados, drenajes superficiales y/o subterráneos, y protección con mallas metálicas en laderas de roca.

Por otra parte, sectores como los acantilados costeros, donde la erosión marina contribuye a la inestabilidad, la instalación de barreras disipadoras de energía en la base de los acantilados podría reducir la erosión causada por el oleaje. Además, la restricción del acceso a ciertas zonas mediante señalización y la prohibición de nuevas construcciones en áreas de alta susceptibilidad son estrategias que podrían ser empleadas para la gestión del riesgo.

Los resultados del factor NDVI, evidenciaron la importancia de la vegetación en la estabilización de laderas, puesto que se observó que zonas con vegetación densa presentan menores valores de susceptibilidad. En este sentido, se recomienda la implementación de proyectos de reforestación con especies de raíces profundas, que contribuyan a estabilizar el suelo y reducir la erosión en sectores vulnerables.

Dado el nivel de exposición identificado en este estudio y la presencia de asentamientos en zonas de alta susceptibilidad, es necesario fortalecer las estrategias de mitigación en áreas vulnerables, que permitan estabilizar laderas y proteger a la población expuesta. Esto no solo contribuiría a reducir los riesgos asociados a las remociones, sino que también resaltaría la importancia de una planificación territorial rigurosa para evitar la ocupación de zonas de alta susceptibilidad identificadas en este estudio, promoviendo un desarrollo urbano más seguro y sostenible.

5.3.4. PERSPECTIVAS FUTURAS

Los resultados obtenidos en este estudio a nivel comunal constituyen un punto de partida relevante para ampliar su alcance y precisión. Un análisis más detallado en sectores específicos dentro de la comuna permitiría una mayor precisión, especialmente en áreas críticas como laderas urbanizadas, donde la actividad humana incrementa la vulnerabilidad. Por otro lado, una aplicación a nivel regional permitiría evaluar la susceptibilidad a remociones en masa en un contexto más amplio, identificando patrones a escala territorial que puedan ser útiles para la planificación regional, además se podrían integrar estos resultados en una base de datos geoespacial regional.

La incorporación de estos resultados en la planificación territorial permitiría mejorar la regulación del uso del suelo mediante su integración en instrumentos como los Planes Reguladores Comunales. Esto ayudaría a restringir la expansión urbana en zonas de alta susceptibilidad y definir criterios para el desarrollo de infraestructura segura. En sectores críticos, como laderas urbanizadas, esta información es clave para reducir la exposición de la población y orientar la planificación del crecimiento urbano hacia áreas menos riesgosas, en concordancia con la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (MINVU, 2023).

Integrar los mapas de susceptibilidad en un análisis de riesgo permitiría no solo identificar zonas propensas a remociones en masa, sino también evaluar la exposición y vulnerabilidad de la población e infraestructura. Esto se lograría combinando los resultados del estudio con datos sociodemográficos y redes viales para delimitar áreas de mayor impacto, establecer zonas prioritarias para intervención y estrategias de respuesta ante emergencias, optimizando la toma de decisiones a nivel municipal.

Por último, estudios futuros podrían incorporar metodologías avanzadas, como el uso comparativo de técnicas de *Machine Learning*, como *Random Forest*, para mejorar de manera significativa la capacidad predictiva. Comparar resultados entre distintas metodologías fortalecería la robustez del análisis y permitiría la validación cruzada de los resultados, además se podrían identificar patrones comunes y diferencias entre factores condicionantes, o bien, entre zonas con diferentes índices de susceptibilidad.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se identificaron un total de 90 puntos de remoción en masa en el área de estudio mediante fotointerpretación, observación en terreno y el uso de dron, permitiendo caracterizar su distribución y tipo predominante, correspondiente a deslizamientos de suelo. A partir de la información obtenida, se evaluó la susceptibilidad a remociones en masa en la comuna de Lebu, proporcionando un modelo metodológicamente robusto que permitió la elaboración de un mapa de susceptibilidad validado, integrando información geológica, geomorfológica y topográfica con una interpretación detallada de los factores condicionantes más relevantes, permitiendo abordar el riesgo geológico en la comuna de manera más precisa.

La jerarquización de los factores condicionantes fue un aspecto clave del análisis, donde el modelo *Frequency Ratio* permitió establecer la influencia relativa de cada factor en la susceptibilidad a RM. Entre los elementos controladores, la pendiente (PR = 2,90), el NDVI (PR = 3,10) y la curvatura (PR = 2,54) demostraron ser los más influyentes, destacándose por su correlación directa con la ocurrencia de remociones. Además, las unidades geomorfológicas revelaron una fuerte asociación con estos procesos, pese a no presentar los mayores valores PR. Estos hallazgos subrayan la importancia de realizar análisis de múltiples variables que permitan comprender las interacciones entre factores, considerando tanto condiciones naturales como impactos antrópicos.

Estos resultados se ven reflejados en los valores FR obtenidos para cada factor, permitiendo cuantificar su influencia en la susceptibilidad a remociones en masa. Los valores más altos indican una mayor relación con la ocurrencia de remociones, mientras que valores cercanos a 1 indican una influencia neutra y valores menores a 1 reflejan una baja incidencia. A continuación, se describen los factores condicionantes analizados y sus respectivos valores FR.

Las unidades geológicas más antiguas, como Boca Lebu (FR = 32,57) y Trihueco (FR = 26,93), mostraron la mayor susceptibilidad, mientras que los depósitos recientes y la Formación Tubul presentaron valores FR cercanos a 0, indicando mayor estabilidad. En cuanto a las unidades geomorfológicas, los acantilados costeros activos (FR = 16,74) y los deslizamientos previos (FR = 9,61) fueron los más inestables, reflejando su asociación con procesos de remoción recientes. La pendiente se confirmó como un factor determinante, con valores FR de 20,17 en inclinaciones

mayores a 30°, mientras que las menores a 15° mostraron $FR < 1$. La orientación de laderas reveló mayor susceptibilidad en el oeste ($FR = 1,71$), suroeste ($FR = 1,40$) y noroeste ($FR = 1,31$), vinculadas a procesos erosivos costeros. El NDVI evidenció el papel estabilizador de la vegetación, con FR de 0,12 en áreas densamente vegetadas, mientras que las zonas con escasa cobertura presentaron valores FR de 2,56. La curvatura convexa ($FR = 5,19$) mostró alta susceptibilidad, mientras que las superficies planas registraron $FR = 0,80$, indicando mayor estabilidad. El factor elevación indicó que las remociones se concentran en rangos de 40 a 130 m, mientras que en altitudes superiores la incidencia disminuye. Finalmente, tres factores fueron descartados debido a su baja correlación con la ocurrencia de remociones. La distancia a fallas mostró valores FR bajos y sin tendencia clara ($FR \text{ máx.} = 1,54$), lo que sugiere que la actividad tectónica no es un factor determinante en esta zona. La distancia a redes de drenaje presentó un comportamiento irregular, sin un patrón de susceptibilidad definido. Finalmente, la distancia a carreteras principales reflejó una sobrestimación en las clases más cercanas debido a la inclusión de calles urbanas en el insumo original, lo que distorsionó su relación con la inestabilidad del terreno.

La validación del mapa de susceptibilidad mediante el índice AUC (0,8368) confirma la robustez metodológica y la capacidad predictiva del modelo implementado. Este valor refleja un nivel de precisión que se alinea con estudios previos realizados en el Área Metropolitana de Concepción por Baltierra (2023) y Gajardo (2022), que también utilizaron el modelo *Frequency Ratio*.

La identificación de zonas afectadas por remociones en masa, tanto en áreas urbanas como rurales, destacó como uno de los principales aportes de este trabajo. Las zonas críticas, como, por ejemplo, Diagonal Freire y Junquillo Bajo, fueron identificadas mediante la integración de múltiples datos, revelando una alta vulnerabilidad debido a la interacción entre factores naturales y actividades humanas. En particular, las laderas urbanizadas presentan condiciones que favorecen la ocurrencia de remociones, como pendientes pronunciadas, suelos poco consolidados y cobertura vegetal intervenida. Esta información constituye una base fundamental para la toma de decisiones en evaluación de riesgos y para orientar los esfuerzos hacia las áreas más expuestas, promoviendo acciones específicas para reducir la vulnerabilidad existente.

El Mapa LSI Definitivo constituye una herramienta de gran utilidad para las autoridades locales y regionales, proporcionando un marco técnico que puede guiar la planificación territorial y, además, la gestión del riesgo geológico. Los sectores priorizados, como Diagonal Freire, Junquillo Bajo, entre otros, representan áreas donde deben implementarse medidas de mitigación urgentes, como estabilización de laderas, restricciones en el desarrollo urbano y reforestación estratégica. Asimismo, este estudio sienta las bases para la elaboración de políticas públicas orientadas a reducir la exposición de las comunidades y a fomentar un desarrollo más sostenible y resiliente frente a los riesgos naturales.

A pesar de los avances logrados, este trabajo reconoce limitaciones relacionadas con la resolución de los insumos utilizados, como el DEM de resolución media y la falta de mapas geológicos actualizados. Estas limitaciones subrayan la necesidad de incorporar tecnologías de alta precisión, como LiDAR y drones, que permitan identificar microrelieves y procesos incipientes con mayor detalle. Asimismo, la falta de un seguimiento a lo largo del tiempo dificulta la evaluación dinámica de las remociones, lo que sería fundamental para comprender su evolución y proponer medidas más efectivas. Es fundamental un estudio continuo para obtener mejores resultados.

De cara al futuro, se recomienda la realización de estudios regionales que amplíen la cobertura del análisis, así como investigaciones locales más detalladas en zonas críticas, integrando datos de alta resolución y validaciones en terreno. La implementación de tecnologías avanzadas permitirá no solo mejorar la precisión de los inventarios, sino también optimizar los modelos predictivos. Además, el enfoque aplicado en este estudio puede ser replicado en otras comunas con características similares, contribuyendo a una gestión del riesgo más eficiente a nivel regional.

Finalmente, este estudio reafirma la importancia de combinar métodos cuantitativos con interpretaciones cualitativas para abordar problemas complejos, como las remociones en masa. Su aplicación práctica no solo fortalece la gestión del riesgo en Lebu, sino que también aporta conocimientos relevantes para el desarrollo de políticas públicas. Este trabajo constituye un aporte significativo a la geología aplicada, demostrando cómo los enfoques interdisciplinarios pueden generar resultados con un impacto real en la sociedad. Además, cabe destacar que el trabajo realizado, aunque presenta resultados consistentes, es un modelo perfectible, el cual proporciona

una base robusta para que futuros estudios sean desarrollados con la finalidad de profundizar en la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa ya sea en el área de estudio o lugares similares, con mayor precisión a una escala local o con una perspectiva más amplia a nivel regional.

7. REFERENCIAS

- Acharya, T.D. y Lee, D.H. 2019. Landslide susceptibility mapping using relative frequency and predictor rate along Araniko Highway. *KSCE Journal of Civil Engineering*. Vol. **23**, (3): 763–776. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0156-x>
- Araya-Cornejo, C.; Carvajal, M.; Melnick, D.; Moernaut, J.; Araya, C. y González, F. 2024. River-damming landslides during the 1960 Chile earthquake (M9.5) and earlier events: Implications for risk assessment in the San Pedro River basin. *Natural Hazards*. Vol. **120**, 7173–7193. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06474-8>
- Baltierra, F. 2023. Susceptibilidad de remociones en masa en las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui. Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 121 pp. Concepción.
- Bates, R.L. y Jackson, J.A. 1987. Glossary of Geology (3ª ed.). American Geological Institute: 788 pp. Alexandria.
- Bonilla, R.; González, A.; Quinzio, L.A.; González, D. y Vásquez, L. 2010. Evaluación de recursos carboníferos de la Península de Arauco. Informe Inédito: 26 pp, Concepción.
- Bui, D.T.; Lofman, O.; Revhaug, I. y Dick, O.B. 2011. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*. Vol. **59**, (3): 1413–1444. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9844-2>
- Catani, F.; Lagomarsino, D.; Segoni, S. y Tofani, V. 2013. Landslide susceptibility estimation by random forests technique: Sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. **13**, (11): 2815–2831. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2815-2013>
- Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN). 2020. Unidades geomorfológicas de Chile. ArcGIS Hub. Disponible en: https://ide-cigiden.hub.arcgis.com/datasets/f18aa2001ae04a51998abb952f337370_0/explore
- Céspedes, I. 2022. Zonificación de riesgo por procesos de remoción en masa en la ciudad de Lebu. Memoria para optar al título de Geógrafo. Universidad de Concepción, Departamento de Geografía (Inédito): 71 pp. Concepción.
- Chen, H.; Lin, G.-W.; Lu, M.-H.; Shih, T.-Y.; Horng, M.-J.; Wu, S.-J. y Chuang, B. 2011. Effects of topography, lithology, rainfall and earthquake on landslide and sediment discharge in mountain catchments of southeastern Taiwan. *Geomorphology*. Vol. **133**, (3-4): 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.12.031>

Cruden, D. 1991. A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. Vol. **43**: 27–29.

Cruden, D. y Varnes, D. 1996. Landslide types and processes. *Landslides: Investigation and Mitigation* (Turner, A.K. y Schuster, R.L. editores). Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press: 36–75. Washington, D.C.

Doan, V.L.; Nguyen, B.Q.V.; Pham, H.T.; Nguyen, C.C. y Nguyen, C.T. 2023. Effect of time-variant NDVI on landside susceptibility: A case study in Quang Ngai province, Vietnam. *Open Geosciences*. Vol. **15**, (1): 20220550. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0550>

Dou, J.; Tien Bui, D.; Yunus, A.P.; Jia, K.; Song, X.; Revhaug, I.; Xia, H. y Zhu, Z. 2015. Optimization of causative factors for landslide susceptibility evaluation using remote sensing and GIS data in parts of Niigata, Japan. *PLOS ONE*. Vol. **10**, (7): e0133262. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133262>

Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E. y Savage, W.Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*. Vol. **102**, N° 3-4: 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>

Fidan, S.; Tanyaş, H.; Akbaş, A. y Kızılkaya, M. 2024. Understanding fatal landslides at global scales: A summary of perspectives. *Natural Hazards*. Vol. **120**, (2): 6437–6455. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06487-3>

Forero-Ospino, O.E. y Duarte-Delgado, W.F. 2019. Caracterización e identificación de la geomorfología (ambientes y unidades geomorfológicas) en la plancha 121 - Cerrito, Colombia, aplicado a movimientos en masa, escala 1:100.000. *Boletín de Geología*. Vol. **41**, (2): 35–44. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n2-2019002>

Gajardo, L. 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. Memoria para optar al título de Geógrafo. Universidad de Concepción, Departamento de Geografía (Inédito): 121 pp. Concepción.

García, F. 1968. Estratigrafía del Terciario de Chile Central. *El Terciario de Chile, zona central* (Cecioni, G. editor). Sociedad Geológica de Chile. Editorial Andrés Bello: 25–58. Santiago.

Gobierno de Chile. 2020. Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres 2020-2030. Ministerio del Interior y Seguridad Pública: 86 pp. Santiago.

Gobierno de Chile. 2021. Ley N° 21.364. Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: 64 pp. Santiago. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163423>

González de Vallejo, V.; Ferrer, M.; Ortuño, L. y Oteo, C. 2002. Ingeniería geológica. Pearson Educación: 768 pp. Madrid.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2017. Censo Nacional de Población y Vivienda. Resultados definitivos. Santiago.

Jenks, G.F. 1967. The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography*. Vol. 7: 186–190.

Jiao, Y.; Zhao, D.; Ding, Y.; Liu, Y.; Xu, Q.; Qiu, Y.; Liu, C.; Liu, Z.; Zha, Z. y Li, R. 2019. Performance evaluation for four GIS-based models purposed to predict and map landslide susceptibility: A case study at a World Heritage site in Southwest China. *CATENA*. Vol. 183: 104221. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104221>

Kaizuka, S.; Matsuda, T.; Nogami, M. y Yonekura, N. 1973. Quaternary tectonic and recent seismic crustal movements in the Arauco peninsula and its environs, central Chile. *Geographical Review of Japan*. Vol. 46, (3): 157–167.

Kumar, M. y Pandey, R.K. 2021. Geographical study of landforms of Nandhaur drainage basin (Kumaun Himalaya). *JournalNX*. Vol. 7, (8): 33–39. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/U4KXH>

Lara, M. y Sepúlveda, S. 2008. Remociones en masa. Apuntes del curso de Geología Aplicada. Universidad de Chile: 75 pp. Santiago.

Lee, S. y Sambath, T. 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia, using frequency ratio and logistic regression models. *Environmental Geology*. Vol. 50, (6): 847–855. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0256-7>

López, P.; Quense, J.; Henríquez, C. y Martínez, C. 2021. Applicability of spatial prediction models for landslide susceptibility in land-use zoning instruments: A guideline in a coastal settlement in South-Central Chile. *Geocarto International*. Vol. 37: 6474–6493. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1846506>

Marín, M.; Muñoz, A. y Naranjo, J. 2018. Víctimas fatales causadas por remociones en masa en Chile (1928-2017). Congreso Geológico Chileno N° 15. Actas 1: 216-219. Concepción.

Melnick, D.; Bookhagen, B.; Strecker, M.R. y Echtler, H.P. 2009. Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of years, Arauco

península, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. **114**, (B1): 1–23. <https://doi.org/10.1029/2008JB005788>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (MINVU). 2023. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Chile: 420 pp. Santiago.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (MINVU). 2023. Reconstrucción tras el aluvión de Villa Santa Lucía. Disponible en: <https://www.minvu.gob.cl/reconstruccion/aluvion-villa-santa-lucia-2017/>

Muñoz-Cristi, J. 1946. Estado actual del conocimiento sobre la geología de la Provincia de Arauco. *Anales Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile*. N°3: 30–63. Santiago.

Muñoz-Cristi, J. 1956. Chile. Handbook of South American Geology: An Explanation of the Geologic Map of South America (Jenks, W.F. editor). Geological Society of America: 187–214. Baltimore.

Nhu, V.H.; Shirzadi, A.; Shahabi, H.; Singh, S.K.; Al-Ansari, N.; Clague, J.J.; Jaafari, A.; Chen, W.; Miraki, S.; Dou, J. y otros. 2020. Shallow landslide susceptibility mapping: A comparison between logistic model tree, logistic regression, naïve Bayes tree, artificial neural network, and support vector machine algorithms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Vol. **17**, (8): 2749. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082749>

Nielsen, S. y Valdovinos, C. 2008. Early Pleistocene mollusks of the Tubul Formation, South-Central Chile. *The Nautilus*. Vol. **122**, (4): 201–216.

Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR). 2023. Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres 2023. Naciones Unidas: 267 pp. Ginebra.

Parra, F.; González, J.; Chacón, M. y Marín, M. 2023. Modeling and evaluation of the susceptibility to landslide events using machine learning algorithms in the province of Chañaral, Atacama Region, Chile. *Sustainability*. Vol. **15**, (24): 16806. <https://doi.org/10.3390/su152416806>

Pineda, V. 1983. Evolución paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior-Terciario. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología (Inédito): 268 pp. Santiago.

Roldán, F.; Salazar, I.; González, G.; Roldán, W. y Toro, N. 2022. Flow-type landslides analysis in arid zones: Application in La Chimba Basin in Antofagasta, Atacama Desert (Chile). *Water*. Vol. **14**, (14): 2225. <https://doi.org/10.3390/w14142225>

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). 2022. Díptico informativo 1 de 3 proyecto FNDR “Análisis peligro de remoción en masa, región de Los Ríos” código BIP 40016748-0 (2022-2023).

Sepúlveda, N. 2022. Visita técnica a sectores de la comuna de Lebu, región del Biobío, afectados por remociones en masa durante el mes de julio del año 2022. Informe Técnico (Inédito): 16 p. Servicio Nacional de Geología y Minería, Concepción.

Sepúlveda, T. 2022. Estudio fundado de riesgos para la tercera modificación del PRC, Lebu. Municipalidad de Lebu, Secretaría Comunal de Planificación.

Sepúlveda, N. 2023. Remociones en masa detonadas por precipitaciones durante agosto y septiembre de 2023, comunas de Arauco, Lebu y Punta Lavapié, provincia de Arauco, Biobío. Informe Técnico (Inédito): 25 p. Servicio Nacional de Geología y Minería, Concepción.

Shano, L.; Raghuvanshi, T.K. y Meten, M. 2021. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio model: The case of Gamo Highland, South Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. **14**, (1): 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06335-8>

Tavera, J. 1942. Contribución al estudio de la estratigrafía y paleontología del Terciario de Arauco. Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología N° 1. Actas **2**: 580–632. Santiago.

Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes. *Landslides, Analysis and Control* (Schuster, R.L. y Krizek, R.J. editores). Transportation Research Board, National Academy of Sciences: 11–33. Washington, D.C.

Volosky, D. 2021. Análisis tafonómico de las asociaciones faunísticas presentes en los afloramientos de la Formación Ranquil (Mioceno inferior), provincia de Arauco, región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 135 pp. Concepción.

Watkins, J. y Hargitai, H. 2014. Mass Wasting. *Encyclopedia of Planetary Landforms* (Hargitai, H. y Kereszturi, Á. editores). Springer: 227 pp. New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9213-9_227-1

Wieczorek, G.F. 1996. Landslide triggering mechanisms. *Landslides: Investigation and mitigation* (Turner, A.K. y Schuster, R.L. editores). Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press: 76–90. Washington, D.C.

Wilcox, A.C.; Escauriaza, C.; Agredano, R.; Mignot, E.; Zuazo, V.; Otárola, S.; Castro, L.; Gironás, J.; Cienfuegos, R. y Mao, L. (2016), An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *Geophysical Research Letters*. Vol. **43**, (15): 8035–8043. <https://doi.org/10.1002/2016GL069751>

Wills, C.; Roth, N.E.; McCrink, T.P. y Short, B. 2017. The California Landslide Inventory Database. 3rd North American Symposium on Landslides. Actas **1**: 1073–1074. Virginia.

Wu, W.; Guo, S. y Shao, Z. 2023. Landslide risk evaluation and its causative factors in typical mountain environment of China: A case study of Yunfu City. *Ecological Indicators*. Vol. **154**: 110821. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110821>

Yilmaz, I. 2009. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). *Computers & Geosciences*. Vol. **35**, (6): 1125–1138. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.08.007>

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
I. Inventario de puntos de remociones en masa	69
II. Tabla de cálculo FR, RF y PR de cada factor condicionante para Mapas Preliminares	71
III. Tabla de cálculo FR, RF y PR de cada factor condicionante para Mapa Definitivo	73

Anexo I: Inventario de puntos remociones en masa.

N°	Nombre	Coordenadas UTM		Sector	Tipo Aparente	Confiabilidad	Tipo de punto	Fuente	Observaciones
		Este	Norte						
1	EA01	617568.00	5838284.00	Punta Tucapel	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro / Visualización con dron	Del 12/2019 en adelante, hay material desprendido
2	EA02	617563.00	5838260.00	Punta Tucapel	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro / Visualización con dron	
3	EA03	617510.00	5838244.00	Punta Tucapel	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro / Visualización con dron	
4	EA04	617481.00	5838033.00	El Venado	Caída de roca	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imagen del 10/2013 y 11/2014
5	EA05	617397.00	5837931.00	El Venado	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Comparar con primera imagen disponible
6	EA06	617181.00	5837820.00	El Venado	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Comparar imagen 12/2009 con recientes
7	EA07	617215.00	5837525.00	Consolidada	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes 11/2014
8	EA08	617165.00	5837455.00	Consolidada	Caída de roca	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes 11/2014
9	EA09	617126.00	5837324.00	Consolidada	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes 01/2023
10	EA10	617131.00	5837298.00	Consolidada	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes 01/2023
11	EA11	617175.00	5837224.00	Consolidada	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes 01/2023
12	EA12	616971.00	5836756.00	Santa Fe	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
13	EA13	616965.00	5836255.00	Santa Fe	Caída de roca	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro	
14	EA14	616959.00	5836120.00	Santa Fe	Caída de roca	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
15	EA15	616898.00	5835767.00	-	Caída de roca	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
16	EA16	616771.00	5835129.00	Cerro Santa Cruz	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes 01/2023.
17	EA17	616667.89	5835055.76	Cerro Santa Cruz	Caída de roca	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Se observa material acumulado en la base
18	EA18	616541.00	5834741.00	Cerro Santa Cruz	Caída de roca	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
19	EA19	616738.00	5834506.00	Morro Bocarripe	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes 11/2014
20	EA20	617687.42	5831653.47	Punta Lorcura	Deslizamiento de suelo	Probable	Prueba	Observación con GE Pro	Ver imágenes 2014
21	EA21	618178.00	5831316.00	-	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
22	EA22	617866.42	5823771.44	Punta Morguilla	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro / Fotos de Google Maps	Ver imagen de Google Maps de David Espinoza, junio 2022
23	EA23	617854.75	5823758.75	Punta Morguilla	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro / Fotos de Google Maps	Ver imagen de Google Maps de David Espinoza, junio 2022
24	EA24	618394.96	5833221.07	El Diezmo	Deslizamiento de suelo	Cuestionable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes 09/2022
25	EA25	617784.00	5833684.00	El Diezmo	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes 12/2019
26	EA26	617334.35	5834984.07	-	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
27	EA27	617441.00	5835276.00	-	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
28	EA28	617613.00	5835219.00	-	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
29	EA29	619898.00	5840082.00	Cueva del Toro	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro / Visualización con dron	
30	EA30	620090.00	5840043.00	Millaneco	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
31	EA31	620427.00	5840544.00	Millaneco	Deslizamiento de suelo	Cuestionable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Aparición de suelo desnudo
32	EA32	619986.00	5840672.00	Estero Guallanaco	Deslizamiento de suelo	Cuestionable	Prueba	Observación con GE Pro / Visualización con dron	
33	EA33	619916.00	5842365.00	Millonhue	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
34	EA34	620220.00	5842333.00	Millonhue	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
35	EA35	621181.00	5843078.00	Millonhue	Deslizamiento de suelo	Probable	Prueba	Observación con GE Pro	
36	EA36	621474.00	5843489.00	Millonhue	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes 2022
37	EA37	621534.00	5843477.00	Millonhue	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
38	EA38	621523.00	5843565.00	Millonhue	Deslizamiento de suelo	Probable	Prueba	Observación con GE Pro	
39	EA39	622944.00	5844390.00	Caleta La Poza	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro	
40	EA40	623057.00	5844413.00	Caleta La Poza	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes 11/2022
41	EA41	623685.00	5844901.00	Caleta Viet	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
42	EA42	624097.00	5845968.00	Caleta Ranquil	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
43	EA43	624143.00	5846093.00	Caleta Ranquil	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Comparar imágenes 2021-2022
44	EA44	624225.00	5846128.00	Caleta Ranquil	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro	Se observa claramente suelo desnudo

Continúa en la página 70

Continuación del Anexo I

45	EA45	624171.00	5846289.00	Caleta Ranquil	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
46	EA46	624191.00	5847081.00	Punta Huenteguapi	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver imágenes antiguas
47	EA47	624707.00	5848120.00	-	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro	
48	EA48	625148.00	5850372.00	Villarrica	Deslizamiento de suelo	Cuestionable	Prueba	Observación con GE Pro	
49	EA49	625157.00	5851009.00	Villarrica	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
50	EA50	624353.00	5854502.00	Quiapo	Deslizamiento de suelo	Cuestionable	Prueba	Observación con GE Pro	
51	EA51	625212.00	5853798.00	Ruta P-40	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver Street View
52	EA52	622008.00	5840701.00	Ruta P-40	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Ver Street View
53	EA53	633976.04	5845285.66	Río Curihuillin	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	Vér imágenes 5/2012
54	EA54	623438.43	5832253.52	Ruta 160	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro / Visualización en terreno	Ver Street View
55	EA55	619397.00	5836003.00	Junquillo Bajo	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro / Visualización en terreno	
56	EA56	618205.00	5837133.00	Ruta P-496	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro / Visualización en terreno	
57	EA57	618204.00	5837108.00	Ruta P-497	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro / Visualización en terreno	
58	EA58	620259.00	5838411.00	Población Walter Ramírez	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro	
59	EA59	620261.00	5838355.00	Población Walter Ramírez	Deslizamiento de suelo / Caída de roca	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
60	EA60	617809.00	5838172.00	Bocalebu	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Visualización en terreno	
61	EA61	617810.00	5838162.00	Bocalebu	Caída de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Visualización en terreno	
62	EA62	617833.00	5838112.00	Bocalebu	Caída de roca	Definitiva	Entrenamiento	Visualización en terreno	
63	EA63	617711.00	5838277.00	Bocalebu	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro / Visualización en terreno	
64	EA64	617671.00	5838301.00	Bocalebu	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro / Visualización en terreno	
65	EA65	619008.00	5836424.00	Freire Interior	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Visualización con dron	
66	EA66	619039.00	5836442.00	Diagonal Freire	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Visualización con dron	
67	EA67	619059.00	5836440.00	Diagonal Freire	Deslizamiento de suelo / Caída de roca	Definitiva	Entrenamiento	Informe SERNAGEOMIN Natalia Sepúlveda Díaz, 2022 RM N°2	Ubicación del punto ajustada según lo observado en GE Pro
68	EA68	619069.00	5836431.00	Diagonal Freire	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
69	EA69	619068.00	5836435.00	Diagonal Freire	Deslizamiento de suelo / Caída de roca	Definitiva	Entrenamiento	Informe SERNAGEOMIN Natalia Sepúlveda Díaz, 2023 RM N°10	Ubicación del punto ajustada según lo observado en GE Pro
70	EA70	619381.00	5835994.00	Junquillo Bajo	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Informe SERNAGEOMIN Natalia Sepúlveda Díaz, 2023 RM N°9	
71	EA71	618514.00	5835885.00	Los Filtros	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Informe SERNAGEOMIN Natalia Sepúlveda Díaz, 2023 RM N°8	
72	EA72	618669.00	5835854.00	Los Filtros	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Informe SERNAGEOMIN Natalia Sepúlveda Díaz, 2023 RM N°7	
73	EA73	622160.00	5835906.00	La Fortuna	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Informe SERNAGEOMIN Natalia Sepúlveda Díaz, 2022 RM N°4	
74	EA74	619192.00	5835845.00	Agua Las Niñas	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Informe SERNAGEOMIN Natalia Sepúlveda Díaz, 2022 RM N°3	
75	EA75	618715.00	5836064.00	Las vertientes	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Informe SERNAGEOMIN Natalia Sepúlveda Díaz, 2022 RM N°1	
76	EA76	619306.45	5836143.55	Junquillo Alto	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Visualización con dron	
77	EA77	620334.25	5836123.83	-	Deslizamiento de suelo	Probable	Prueba	Observación con GE Pro	
78	EA78	620466.40	5836212.77	-	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Visualización con dron	
79	EA79	621673.30	5840397.63	Ruta P-40	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro	Ver Street View
80	EA80	622072.14	5840763.74	Ruta P-40	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro	Ver Street View
81	EA81	619675.17	5841160.54	Punta Millonhue	Caída de roca	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
82	EA82	619028.27	5836229.71	Mirador Cerro La Cruz	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Visualización con dron	
83	EA83	619259.94	5835616.61	Agua Las Niñas	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Visualización con dron	
84	EA84	619310.10	5835982.36	Junquillo Alto	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Prueba	Visualización con dron	
85	EA85	619276.79	5835983.12	Junquillo Alto	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Visualización con dron	
86	EA86	619325.63	5835978.66	Junquillo Alto	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Visualización con dron	
87	EA87	619378.48	5836011.18	Junquillo Bajo	Deslizamiento de suelo	Definitiva	Entrenamiento	Visualización con dron	
88	EA88	617701.96	5831664.58	Punta Lorcura	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	
89	EA89	616640.95	5834973.78	Cerro Santa Cruz	Caída de roca	Definitiva	Prueba	Observación con GE Pro	
90	EA90	617572.33	5835266.02	-	Deslizamiento de suelo	Probable	Entrenamiento	Observación con GE Pro	

Anexo II: Tabla de cálculo FR, RF y PR de cada factor condicionante para Mapas Preliminares.

Factor	Clase	Pixeles Clase	Pix Clase(%)	Area RM	Pixeles RM	Pix RM (%)	FR	RF	RF(%)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min RF)min	PR
Unidades geológicas	Depósitos recientes	481291	14.62%	156.25	1	1.14%	0.07771	0.001	0	0.000	0.467	0.467	0.232	2.02
	Fm. Cañete	1889993	57.42%	2031.25	13	14.77%	0.25727	0.004	0					
	Fm. Tubul	113576	3.45%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Fm. Ranquil	646282	19.64%	2812.50	18	20.45%	1.04173	0.017	2					
	Fm. Milongue	104581	3.18%	2031.25	13	14.77%	4.64938	0.074	7					
	Fm. Trihuenco	39422	1.20%	4843.75	31	35.23%	29.41218	0.467	47					
	Fm. Boca Lebu	16302	0.50%	1875.00	12	13.64%	27.53243	0.437	44					
Total	3291447	100.00%	13750	88	100.00%	62.97070	1	100						
Distancia a fallas (m)	< 20	25825	0.78%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0	0.000	0.812	0.812	0.232	3.51
	20 - 50	36983	1.12%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	50 - 100	59790	1.82%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	100 - 150	60609	1.84%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	150 - 250	125199	3.80%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	250 - 500	316643	9.62%	312.50	2	2.27%	0.23625	0.125	12					
	500 - 1000	622546	18.91%	312.50	2	2.27%	0.12016	0.063	6					
	> 1000	2043852	62.10%	13125.00	84	95.45%	1.53721	0.812	81					
Total	3291447	100.00%	13750	88	100.00%	1.89362	1	100						
Unidades geomorfológicas	Terraza marina nivel I	1049777	31.89%	625.00	4	4.55%	0.14252	0.004	0	0.000	0.440	0.440	0.232	1.90
	Terraza marina nivel II	156782	4.76%	468.75	3	3.41%	0.71570	0.020	2					
	Dunas costeras	344715	10.47%	156.25	1	1.14%	0.10850	0.003	0					
	Ladera de valle	1211381	36.80%	4062.50	26	29.55%	0.80278	0.023	2					
	Llanura aluvial	315937	9.60%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Playa	38485	1.17%	781.25	5	5.68%	4.85940	0.138	14					
	Plataforma de abrasión marina	11771	0.36%	312.50	2	2.27%	6.35508	0.180	18					
	Acantilado relicto	19161	0.58%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Canal	25193	0.77%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Estuario	1286	0.04%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Acantilado costero activo	110966	3.37%	7187.50	46	52.27%	15.50501	0.440	44					
	Marisma	468	0.01%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Deslizamientos previos	5525	0.17%	156.25	1	1.14%	6.76974	0.192	19					
	Total	3291447	100.00%	13750	88	100.00%	35.25873	1	100					
Pendiente (°)	0 - 5°	1139568	34.62%	312.50	2	2.27%	0.06564	0.002	0	0.002	0.544	0.542	0.232	2.34
	5 - 10°	890002	27.04%	781.25	5	5.68%	0.21013	0.007	1					
	10 - 15°	635629	19.31%	1406.25	9	10.23%	0.52959	0.018	2					
	15 - 20°	328673	9.99%	2031.25	13	14.77%	1.47939	0.049	5					
	20 - 25°	161902	4.92%	3437.50	22	25.00%	5.08247	0.169	17					
	25 - 30°	83038	2.52%	2187.50	14	15.91%	6.30602	0.210	21					
	> 30°	52635	1.60%	3593.75	23	26.14%	16.34396	0.544	54					
	Total	3291447	100.00%	13750	88	100.00%	30.01721	1	100					
Orientación de laderas (°)	Plano	37291	1.13%	0	0	0.00%	0.00000	0.000	0	0.000	0.232	0.232	0.232	1.00
	Norte	306249	9.30%	1718.75	11	12.50%	1.34345	0.169	17					
	Noreste	297972	9.05%	1562.5	10	11.36%	1.25525	0.158	16					
	Este	436845	13.27%	1250	8	9.09%	0.68496	0.086	9					
	Sureste	463405	14.08%	156.25	1	1.14%	0.08071	0.010	1					
	Sur	325974	9.90%	312.5	2	2.27%	0.22948	0.029	3					
	Suroeste	377959	11.48%	1875	12	13.64%	1.18752	0.149	15					
	Oeste	558907	16.98%	3125	20	22.73%	1.33843	0.168	17					
	Noroeste	486845	14.79%	3750	24	27.27%	1.84385	0.232	23					
Total	3291447	100.00%	13750	88	100.00%	7.96365	1	100						
NDVI	Agua	8253	0.25%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0	0.000	0.708	0.708	0.232	3.06
	Construcciones y suelo descubierto	75397	2.29%	781.25	5	5.68%	2.48039	0.124	12					
	Césped	66307	2.01%	3906.25	25	28.41%	14.10213	0.708	71					
	Escasa vegetación	456823	13.88%	5000	32	36.36%	2.62003	0.132	13					
	Vegetación densa	1349734	41.01%	3593.75	23	26.14%	0.63736	0.032	3					
	Vegetación muy densa	1334933	40.56%	468.75	3	3.41%	0.08406	0.004	0					
Total	3291447	100.00%	13750	88	100.00%	19.92397	1	100						
Distancia a redes de drenaje principales (m)	< 50	159935	4.86%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0	0.000	0.269	0.269	0.232	1.16
	50 - 100	145005	4.41%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	100 - 150	137978	4.19%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	150 - 200	137514	4.18%	312.5	2	2.27%	0.54399	0.102	10					
	200 - 250	135636	4.12%	468.75	3	3.41%	0.82728	0.155	15					
	250 - 300	130124	3.95%	781.25	5	5.68%	1.43720	0.269	27					
	300 - 400	256159	7.78%	781.25	5	5.68%	0.73007	0.137	14					
	400 - 500	245925	7.47%	468.75	3	3.41%	0.45627	0.085	9					
	> 500	1943171	59.04%	10937.5	70	79.55%	1.34738	0.252	25					
Total	3291447	100.00%	13750	88	100.00%	5.34218	1	100						

Continúa en página 72

Continuación Anexo II

Factor	Clase	Pixeles Clase	Pix Clase(%)	Area RM	Pixeles RM	Pix RM (%)	FR	RF	RF(%)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min RF)min	PR
Elevación (m)	< 40	323419	9.83%	1250	8	9.09%	0.92519	0.096	10	0.000	0.322	0.322	0.232	1.39
	40 - 70	399564	12.14%	5156.25	33	37.50%	3.08910	0.322	32					
	70 - 100	272771	8.29%	3125	20	22.73%	2.74243	0.285	29					
	100 - 130	309446	9.40%	1718.75	11	12.50%	1.32957	0.138	14					
	130 - 160	351049	10.67%	1562.5	10	11.36%	1.06546	0.111	11					
	160 - 190	487404	14.81%	468.75	3	3.41%	0.23022	0.024	2					
	190 - 220	646134	19.63%	156.25	1	1.14%	0.05789	0.006	1					
	220 - 250	446466	13.56%	312.50	2	2.27%	0.16755	0.017	2					
	> 250	55194	1.68%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Total	3291447	100.00%	13750	88	100.00%	9.60740	1	100					
Curvatura	Cóncavo (< -1)	130152	3.95%	625	4	4.55%	1.14951	0.145	14	0.102	0.753	0.651	0.232	2.81
	Plano	3048693	92.62%	10312.5	66	75.00%	0.80972	0.102	10					
	Convexo (> 1)	112602	3.42%	2812.5	18	20.45%	5.97903	0.753	75					
	Total	3291447	100.00%	13750	88	100.00%	7.93826	1	100					
Distancia a carreteras principales (m)	< 25	104867	3.19%	3125	20	22.73%	7.13338	0.582	58	0.021	0.582	0.561	0.232	2.42
	25 - 50	77315	2.35%	468.75	3	3.41%	1.45132	0.118	12					
	50 - 100	150530	4.57%	625	4	4.55%	0.99390	0.081	8					
	100 - 200	285078	8.66%	312.50	2	2.27%	0.26240	0.021	2					
	200 - 300	266306	8.09%	781.25	5	5.68%	0.70225	0.057	6					
	300 - 400	255075	7.75%	468.75	3	3.41%	0.43990	0.036	4					
	400 - 500	239990	7.29%	312.50	2	2.27%	0.31170	0.025	3					
	> 500	1912286	58.10%	7656.25	49	55.68%	0.95840	0.078	8					
Total	3291447	100.00%	13750	88	100.00%	12.25326	1	100						

Factor	Clase	Pixeles Clase	Pix Clase(%)	Area RM	Pixeles RM	Pix RM (%)	FR	RF	RF(%)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min RF)min	PR
Distancia a carreteras principales II (m)	< 8	22716	0.69%	1093.75	7	7.95%	11.52578	0.941	94	0.022	0.941	0.919	0.232	3.97
	8 - 16	42793	1.30%	1093.75	7	7.95%	6.11828	0.499	50					
	16 - 25	39358	1.20%	937.5	6	6.82%	5.70194	0.465	47					
	25 - 50	77315	2.35%	468.75	3	3.41%	1.45132	0.118	12					
	50 - 100	150530	4.57%	625	4	4.55%	0.99390	0.081	8					
	100 - 250	423963	12.88%	468.75	3	3.41%	0.26467	0.022	2					
	250 - 500	622486	18.91%	1406.25	9	10.23%	0.54078	0.044	4					
	> 500	1912286	58.10%	7656.25	49	55.68%	0.95840	0.078	8					
Total	3291447	100.00%	13750	88	100.00%	27.55505	2	225						

Anexo III: Tabla de cálculo FR, RF y PR de cada factor condicionante para Mapa Definitivo.

Factor	Clase	Pixeles Clase	Pix Clase(%)	Area RM	Pixeles RM	Pix RM (%)	FR	RF	RF(%)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min RF)min	PR
Unidades geológicas	Depósitos recientes	481291	14.62%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0	0.000	0.495	0.495	0.216	2.30
	Fm. Cañete	1889993	57.42%	1562.50	10	16.13%	0.28089	0.004	0					
	Fm. Tubul	113576	3.45%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Fm. Ranquil	646282	19.64%	1875.00	12	19.35%	0.98572	0.015	1					
	Fm. Milongue	104581	3.18%	1562.50	10	16.13%	5.07624	0.077	8					
	Fm. Trihueco	39422	1.20%	3125.00	20	32.26%	26.93311	0.409	41					
	Fm. Boca Lebu	16302	0.50%	1562.50	10	16.13%	32.56524	0.495	49					
	Total	3291447	100.00%	9688	62	100.00%	65.84120	1	100					
Unidades geomorfológicas	Terraza marina nivel I	1049777	31.89%	468.75	3	4.84%	0.15171	0.004	0	0.000	0.445	0.445	0.216	2.07
	Terraza marina nivel II	156782	4.76%	156.25	1	1.61%	0.33861	0.009	1					
	Dunas costeras	344715	10.47%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Ladera de valle	1211381	36.80%	2656.25	17	27.42%	0.74501	0.020	2					
	Llanura aluvial	315937	9.60%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Playa	38485	1.17%	625.00	4	6.45%	5.51777	0.147	15					
	Plataforma de abrasión marina	11771	0.36%	156.25	1	1.61%	4.51005	0.120	12					
	Acantilado relicto	19161	0.58%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Canal	25193	0.77%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Estuario	1286	0.04%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Acantilado costero activo	110966	3.37%	5468.75	35	56.45%	16.74454	0.445	45					
	Marisma	468	0.01%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
	Deslizamientos previos	5525	0.17%	156.25	1	1.61%	9.60866	0.255	26					
	Total	3291447	100.00%	9688	62	100.00%	37.61636	1	100					
Pendiente (°)	0 - 5°	1139568	34.62%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0	0.000	0.625	0.625	0.216	2.90
	5 - 10°	890002	27.04%	312.50	2	3.23%	0.11930	0.004	0					
	10 - 15°	635629	19.31%	1562.50	10	16.13%	0.83520	0.026	3					
	15 - 20°	328673	9.99%	1093.75	7	11.29%	1.13065	0.035	4					
	20 - 25°	161902	4.92%	2343.75	15	24.19%	4.91852	0.152	15					
	25 - 30°	83038	2.52%	1250.00	8	12.90%	5.11456	0.158	16					
	> 30°	52635	1.60%	3125.00	20	32.26%	20.17207	0.625	62					
	Total	3291447	100.00%	9688	62	100.00%	32.29030	1	100					
	Orientación de laderas (°)	Plano	37291	1.13%	0	0	0.00%	0.00000	0.000					
Norte		306249	9.30%	1250	8	12.90%	1.38679	0.175	17					
Noreste		297972	9.05%	937.5	6	9.68%	1.06898	0.135	13					
Este		436845	13.27%	937.5	6	9.68%	0.72915	0.092	9					
Sureste		463405	14.08%	0	0	0.00%	0.00000	0.000	0					
Sur		325974	9.90%	312.5	2	3.23%	0.32572	0.041	4					
Suroeste		377959	11.48%	1562.5	10	16.13%	1.40459	0.177	18					
Oeste		558907	16.98%	2812.5	18	29.03%	1.70973	0.216	22					
Noroeste		486845	14.79%	1875	12	19.35%	1.30854	0.165	16					
Total		3291447	100.00%	9688	62	100.00%	7.93351	1	100					
NDVI	Agua	8253	0.25%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0	0.000	0.667	0.667	0.216	3.10
	Construcciones y suelo descubierto	75397	2.29%	781.25	5	8.06%	3.52055	0.173	17					
	Césped	66307	2.01%	2656.25	17	27.42%	13.61083	0.667	67					
	Escasa vegetación	456823	13.88%	3437.5	22	35.48%	2.56664	0.125	13					
	Vegetación densa	1349734	41.01%	2343.75	15	24.19%	0.58998	0.029	3					
Elevación (m)	Vegetación muy densa	1334933	40.56%	468.75	3	4.84%	0.11930	0.006	1	0.000	0.350	0.350	0.216	1.63
	Total	3291447	100.00%	9688	62	100.00%	20.39732	1	100					
	< 40	323419	9.83%	1093.75	7	11.29%	1.14902	0.121	12					
	40 - 70	399564	12.14%	3906.25	25	40.32%	3.32161	0.350	35					
	70 - 100	272771	8.29%	1718.75	11	17.74%	2.14087	0.226	23					
	100 - 130	309446	9.40%	1406.25	9	14.52%	1.54402	0.163	16					
	130 - 160	351049	10.67%	937.5	6	9.68%	0.90736	0.096	10					
	160 - 190	487404	14.81%	312.5	2	3.23%	0.21784	0.023	2					
	190 - 220	646134	19.63%	156.25	1	1.61%	0.08216	0.009	1					
	220 - 250	446466	13.56%	156.25	1	1.61%	0.11891	0.013	1					
> 250	55194	1.68%	0.00	0	0.00%	0.00000	0.000	0						
Total	3291447	100.00%	9688	62	100.00%	9.48178	1	100						
Curvatura	Cóncavo (< -1)	130152	3.95%	781.25	5	8.06%	2.03946	0.254	25	0.100	0.646	0.546	0.216	2.54
	Plano	3048693	92.62%	7187.5	46	74.19%	0.80101	0.100	10					
	Convexo (> 1)	112602	3.42%	1718.75	11	17.74%	5.18611	0.646	65					
	Total	3291447	100.00%	9688	62	100.00%	8.02658	1	100					