

Universidad de Concepción
Facultad de Arquitectura Urbanismo y Geografía.
Departamento de Geografía.



**EVALUACIÓN CRÍTICA DE LOS ESTUDIOS DE REMOCIONES EN
MASA EN LA COMUNA DE LOTA.
UNA NUEVA PROPUESTA INTEGRADA.**

MEMORIA DE TÍTULO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓGRAFO

Estudiante: Felipe Ignacio Flores Cuadra

Profesora Guía: Edilia Jaque Castillo

Dr. © Francisco Castro Venegas

Ciudad Universitaria, Concepción, Enero de 2024

Dedicatoria

Con un profundo sentido de gratitud, deseo expresar mi más sincero reconocimiento a cada individuo e institución que ha sido parte esencial en la culminación de esta Memoria de título. En particular, quiero dedicar un emocionado agradecimiento a mis Padres, Rosa Elvira Cuadra Sáez y José Mercedes Flores Placencia cuyo apoyo inquebrantable, sacrificios y amor incondicional han sido la fuerza motriz de este viaje académico y la piedra angular de mis esfuerzos. A mi Profesora Edilia Jaque Castillo le agradezco por su guía sabia y paciencia constante, elementos cruciales en la conformación de esta investigación. A los investigadores Francisco Castro y Luis Guajardo, agradezco sus valiosas contribuciones y compañía, que han enriquecido profundamente este proceso. Mi familia, amigos y Universidad también merecen un reconocimiento especial por su respaldo continuo y confianza pese a mis deficiencias. A todas las personas que generosamente compartieron palabras de ánimo, mi más profundo agradecimiento. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en este logro de manera desinteresada, y por ello, creo les debo mi gratitud.

Contenido

RESUMEN.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	10
4. HIPÓTESIS.....	10
2.1 OBJETIVO GENERAL	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	10
3. MARCO TEÓRICO	11
3.1 REMOCIONES EN MASA	11
3.2 SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA	15
3.2.1 Modelo de técnica por Análisis de Espacial Multicriterio	18
3.2.2 Susceptibilidad de remoción en masa propuesta por Castro et al. 2001.	18
3.2.3 Metodología de susceptibilidad por remociones en masa por sismicidad	21
3.2.4 Metodología de susceptibilidad de remoción en masa por Soeters, R., y Van Westen, C. J. (1996).	22
3.2.5. Metodología de susceptibilidad Mora & Vahrson, 1991.	23
3.2.6. Susceptibilidad de Lara M. et al. (2007).....	26
3.2.7. Método o geo morfométricos para determinar áreas susceptibles a deslizamientos (2018).	29
3.2.8. Metodología de mapeo de ángulo de alcance mínimo incorporado en susceptibilidad de RM.....	30
3.2.8. Proceso Jerárquico Analítico (AHP).....	30
3.2.9. Regresión – Logística	32
3.2.10. Combinación lineal ponderada (WLC).....	33
3.3. Riesgo por remoción en masa.....	34
3.4. PLANIFICACIÓN URBANA Y ESTUDIOS DE RIESGO.....	37
3.4.1 Modelación para Amenazas de Remoción en masa de 2010, Laboratorio de Estudios Urbanos, (LEU) (Universidad del Bío-Bío).	43
3.4.2 Propuesta de Plan regulador de la comuna de Lota, 2011.....	46
3.4.3. Mapa de susceptibilidad de SERNAGEOMIN, 2010.....	48
3.5. INVENTARIOS DE REMOCIÓN EN MASA.....	50
4. METODOLOGÍA.....	51
4.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	51
4.1.1 ÁREA DE ESTUDIO	51
4.1.2. Hidrogeología de la comuna de Lota	53
4.1.3. Vegetación del área de estudio.....	55
4.2 MÉTODO Y TÉCNICAS:	56
4.3.1 METODOLOGÍA DE SUSCEPTIBILIDAD FREQUENCY RATIO.....	56
4.3.2 APLICACIÓN DE METODOLOGÍA	57
4.3.3. PREPARACIÓN DE DATOS DE REMOCIÓN EN MASA PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.	60
4.3.4. INVENTARIO DE TIPOS DE DATOS DE DESLIZAMIENTOS UTILIZADOS.....	61
4.4. EVALUACION DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD.....	63
4.4.1. EVALUACIÓN DE MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE LEU. 2010	64
4.4.2. EVALUACIÓN DE MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA DE SERNAGEOMIN, 2010.....	64
4.4.3 EVALUACIÓN DE PROPUESTA DE MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD CON MODELACIÓN FR (FREQUENCY RATIO)	65
4.5. PREPARACIÓN DE PARÁMETROS DE ENTRADA	65

4.5.1. DESCRIPCIÓN Y PREPARACIÓN DE PARÁMETRO: PENDIENTES	65
4.5.2. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE PARÁMETRO: ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADO (NDVI)	67
4.5.3. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE PARÁMETRO: ORIENTACIÓN DE LADERAS.....	68
4.5.4. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE PARÁMETRO: DISTANCIA A DRENAJE	69
4.5.5. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE PARÁMETRO: DISTANCIA A CARRETERAS.....	70
4.5.6. DESCRIPCIÓN Y PREPARACIÓN DE PARÁMETRO: ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE HUMEDAD (TWI).....	71
4.5.7. DESCRIPCIÓN Y PREPARACIÓN DE PARÁMETRO: GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	72
4.5.8. JUSTIFICACIÓN DE PARÁMETRO EN ÁREA DE ESTUDIO: FALLAS GEOLÓGICAS.....	73
4.5.9. JUSTIFICACIÓN DE PARÁMETRO EN ÁREA DE ESTUDIOS: PERFIL DE CURVATURA	74
4.5.10. JUSTIFICACIÓN DE PARÁMETRO EN ÁREA DE ESTUDIO: PLANO DE CURVATURA	76
4.5.11. JUSTIFICACIÓN DE PARÁMETROS EN ÁREA DE ESTUDIO: ÁREA DE USO DE SUELO.....	78
5. CÁLCULO DE SUSCEPTIBILIDAD DE RM.....	79
6. VALIDACIÓN DE MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD.....	79
6.1. RELACIÓN DE CURVATURA OPERATIVA (ROC).....	80
7. RESULTADOS.....	83
7.1.1 ALTITUD	83
7.1.2 PENDIENTE.....	84
7.1.3 NDVI ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADO.....	86
7.1.4 ORIENTACIÓN DE LADERA	87
7.1.5 DISTANCIA A RED HÍDRICA	89
7.1.6 DISTANCIA A CARRETERAS	90
7.1.7 ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE HUMEDAD (TWI).....	92
7.1.8 GEOLOGÍA	94
7.1.9. DISTANCIA A FALLA GEOLÓGICA.....	98
7.1.10. PERFIL DE CURVATURA	99
7.1.11 PLANO DE CURVATURA	101
7.1.12 USO DE SUELO	102
7.2. RESULTADO DE SUSCEPTIBILIDAD ANTE REMOCIONES EN MASA COMUNA DE LOTA	104
7.2.1. SECTOR COLCURA	107
7.2.2 SECTOR CERRO FUNDICIÓN	108
7.2.3 SECTOR SOTO MAYOR.....	109
7.2.4 SECTOR LOTA ALTO	110
7.2.5 SECTOR BELLAVISTA.....	111
7.2.6. SECTOR PARQUE COUSIÑO Y PUNTA PIQUE	112
7.3. RESULTADOS DE VALIDACIÓN	113
7.3.1 RESULTADO DE EXACTITUD	113
7.3.2 RESULTADO DE PRESICIÓN	114
7.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS.	115
7.4.1 CONTRASTE PROPUESTO BIVARIADA / MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD LEU (2010).....	115
7.4.2 CONTRASTE PROPUESTA BIVARIADA / MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD SERNAGEOMIN (2010).....	116
8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	119
9. ANEXOS.	122
12. BIBLIOGRAFÍA	139

RESUMEN.

La comuna de Lota ha experimentado históricamente deslizamientos y diversos procesos de remoción que han impactado a sus comunidades. Este contexto ha suscitado un interés y una necesidad imperante de llevar a cabo estudios de peligro y susceptibilidad frente a remociones en masa. A pesar de la existencia de propuestas de herramientas, estas han quedado desactualizadas, limitando su eficacia en la toma de decisiones en planificación territorial.

La presente investigación se propuso realizar una evaluación crítica de los estudios de susceptibilidad por remociones en masa (RM). Se llevó a cabo una exhaustiva revisión de los estudios de susceptibilidad previos para, posteriormente, generar una cartografía de susceptibilidad utilizando el método Frequency Ratio (FR), basado en el modelo propuesto por Tri Dev Acharya y Dong Ha Lee en 2019. Como resultado, se identificó en la nueva propuesta que el 4% del área de estudio presenta una muy alta susceptibilidad, caracterizada por laderas desnudas con alto grado de inclinación. Además, se evidenció una susceptibilidad alta en la cabeza de la ladera y áreas inclinadas del terreno (9%), una media susceptibilidad al pie de laderas descubiertas (28%), y niveles bajos y muy bajos (45% y 22%, respectivamente) en zonas mayormente residenciales.

En conclusión, la investigación reveló una alta susceptibilidad en áreas cercanas a zonas residenciales, con una precisión del 85%. Aunque los modelos actuales coinciden en gran medida en la zonificación esperada de susceptibilidad, aún queda mucho por avanzar en la validación de puntos, destacando la necesidad de integrar nuevos modelos que prescindan una adecuada validación y uso de parámetros actualizados, dada la continua activación de remociones para redefinir el enfoque en diversos sectores expuestos a susceptibilidad.

Palabras claves: Remoción en masa, Susceptibilidad, planificación territorial y riesgo.

1. Introducción

En las últimas cinco décadas, los fenómenos de remoción en masa han resultado en la pérdida de aproximadamente 2.8 millones de vidas desde 1960, una cifra que ha aumentado paralelamente al crecimiento demográfico. Este aumento ha concentrado a la población en procesos urbanizadores caóticos, donde el 68% de la población mundial en zonas urbanas experimenta condiciones marcadas por desigualdades sociales, baja calidad de viviendas y ocupaciones, exacerbando eventos como inundaciones y aluviones, comúnmente asociados a periodos de precipitaciones intensas (Mardones M., y Vidal C., 2001).

Chile, ubicado en una zona de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana, ha experimentado fenómenos como subsidencia mareal y remociones de arena, siendo notablemente asociados al terremoto de febrero de 2010 y el consecuente tsunami (Quezada et al., 2012). Estudios realizados por Espinoza Lizama, C. (2013) han destacado la importancia de las remociones en masa en diferentes regiones del país, señalando su recurrencia y los impactos significativos en viviendas, infraestructura y vidas humanas.

En el contexto chileno, el área metropolitana de Concepción ha experimentado una planificación organizada y jerárquica a pesar de los desastres naturales que han causado pérdidas económicas y humanas (Mardones M. y Vidal C., 2001). Similarmente, el área urbana de Lota y sus alrededores, con una alta densidad poblacional, presenta desafíos en su planificación territorial incluyendo riesgos de origen antrópico y natural, como se evidenció en el desastre de 2010 (Secretaría Regional Ministerial MINVU, 2010).

En este contexto, autores como Mergili, M., et al., (2015) subrayan la importancia de un análisis inclusivo del territorio, considerando sectores con menor concentración de población, en particular aquellos con poblados en pendientes bajas o al pie de áreas montañosas aisladas. También se destaca la vulnerabilidad del noroeste de Sudamérica a los riesgos de remoción en masa, con consecuencias fatales y daños significativos (Marín V. et al., 2018).

La reducción del riesgo de desastres ha sido un tema crucial en Chile, con la participación de la ONU y la ONEMI en colaboración con el SERNAGEOMIN para la generación de estrategias y la recopilación de áreas críticas afectadas por remociones en masa (Marín V. et al., 2018). A pesar de que entre 1976 y 2017 se declararon solo 40 eventos, estos registraron 547 decesos, con un promedio de 12 personas fatales por evento, destacándose la temporada de otoño como un periodo de mayor concentración de eventos (Marín V. et al., 2018).

La atención hacia nuevas evaluaciones de riesgo se ha orientado hacia la integración de herramientas cartográficas en los dispositivos de planificación comunal, con el propósito de proponer metodologías innovadoras para la evaluación de riesgos. La Municipalidad de Lota (2014) ha identificado amenazas tales como deslizamientos e inundaciones; no obstante, subsiste la necesidad crucial de determinar umbrales para las variables que rigen la activación por remoción en masa, como ha sido señalado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU, 2010). Es pertinente destacar que la focalización en la zonificación de riesgos y la imperiosa exigencia de llevar a cabo una zonificación precisa son aspectos subrayados por investigadores como Jaque Castillo, E. D. et al., (2017).

Patiño – Murillo, M. et al., (2018) enfatizan la necesidad de una visión más holística en las evaluaciones, integrando factores que ayuden a evaluar las remociones en masa y sus consecuencias. Esto ha llevado, en algunos casos, a inversiones de mitigación mediante prácticas como revegetación, reforestación y obras de conservación.

La investigación propuesta se centró en evaluar los mapas de susceptibilidad actuales. La ocupación de áreas como llanuras de inundación se considera crucial en este estudio. La investigación busca analizar estudios actuales de remoción en masa, contrastándolos con una nueva propuesta de mapa de susceptibilidad utilizando un método bivariado validado con el objetivo de reconocer diferencias importantes y avanzar en la comprensión del estado actual de la zonificación ante remociones en masa.

En consecuencia, el propósito central de esta investigación radica en llevar a cabo un análisis exhaustivo de los estudios contemporáneos sobre remoción en masa. Se destaca la consideración crítica de las condiciones bajo las cuales se ha evaluado la susceptibilidad, no encontrándose debidamente actualizadas. En virtud de ello, se persigue contrastar estos estudios con una propuesta novedosa de mapa de susceptibilidad, empleando un método bivariado debidamente validado. El objetivo subyacente de esta aproximación que consiste en identificar diferencias significativas en los resultados, al tiempo que se profundiza en la investigación de los fenómenos de remoción en masa.

3. Planteamiento del problema

Algunos autores como Espinoza Lizama, C. (2013) propician que países como Chile, no cuenta con la adecuada planificación para asentamientos, debido a que el marco jurídico chileno no define de correcta manera los factores desencadenantes que deben señalar los instrumentos, delimitando de forma reactiva, y no predictiva, las áreas de riesgo cartografiadas y derivando a causa de ello, en zonas latentes a remociones en masa.

En consonancia con este enfoque, Bustamante, L. P., Rebolledo, M. D. M., & Contreras, R. S. (2004), cuestionaron los efectos tangibles producidos por los instrumentos de acuerdo con su grado de aplicación y especificidad. Su argumento se centra en la importancia del respaldo de los roles desempeñados por cada tipo de cobertura de suelo, los cuales gestionan la multifuncionalidad de determinadas áreas que compiten por la expansión territorial. Esta competencia, en varias instancias, origina conflictos socio-territoriales. Por otra parte, algunos también postulan considerar las debilidades en las capacidades de gestión a la hora de planificar, apuntando hacia la aplicación de estrategias desarticuladas, problemas de integración de los actores que intervienen con decisiones sobre el territorio, mecanismos inadecuados de participación y por último una planificación histórica de urbanización.

La planificación urbana de Lota ha evidenciado la ocurrencia de eventos significativos en áreas residenciales específicas, como Bellavista y Benjamín Esquela. Estos eventos se caracterizan por la presencia de viviendas con cimientos agrietados y la ocurrencia de algunos derrumbes. Como respuesta a los impactos del terremoto de 2010, se llevó a cabo la reubicación de viviendas de emergencia, con la consiguiente reevaluación de los terrenos en estas zonas. Además, se propuso la evacuación preventiva de viviendas en la población Calero Sur, como medida anticipada ante posibles hundimientos según lo indicado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU, 2010).

Posterior a el terremoto 27 f de 2010, el informe por Remociones en masa de Sernageomin Fonseca, H., y Derch, F., (2019), evidenció la activación de remociones en masa de tipo rotacional, que afectaron a la población Gabriela Mistral de la ciudad de Lota el 28 de junio de 2019 incidiendo en la infraestructura del patio trasero de una vivienda, lo que de una forma similar sucedió en Calle Matta.

Aún con ello, la especialización del peligro por remoción en masa utilizado el 2010 (**ver Fig. 10**) por SERNAGEOMIN, (2010) tan solo corresponde a una actualización cartográfica disponible hasta la fecha, aun cuando advierte el mismo documento, que zonas corresponden a catalizadores de dichos procesos naturales.

Dentro del ámbito abordado por el Estudio de Riesgos y Protección Natural del MINVU (2010) en la comuna de Lota, se identifican áreas propensas a riesgos derivados de la actividad o intervención humana. A pesar de las actualizaciones realizadas en los años 2014 y 2016, enfocadas en los riesgos asociados a laderas inestables en zonas habitadas, estas revisiones no han abordado de manera adecuada el fenómeno progresivo de la erosión. Un hito significativo fue el informe emitido por SERNAGEOMIN en fecha 28 de junio de 2019, que corroboró la activación de laderas por remoción en masa en la Población Gabriela Mistral de la comuna, así como en el Sector Cousiño al cerro y el Morro. Este evento señala la necesidad apremiante de reconsiderar la evaluación de áreas que podrían representar riesgos por remoción en masa, especialmente en sectores específicos, como lo plantea el informe del MINVU de 2010. La fundación de dichas áreas, fueron de relleno estabilizado proveniente de la carretera en construcción, sin evitar la desestabilización del talud superior, ni habilitar el drenaje adecuado. Por lo que su construcción, se produjo fuera del ámbito del riesgo, obteniendo consigo algunos deslizamientos incipientes junto con agrietamientos curvos de sus laderas (Naranjo et al., 2005).

Adicionalmente, Naranjo et al. (2005), antes del terremoto del 27 de febrero de 2010, advirtió acerca de la sobrecarga en las construcciones, donde se evidenciaban fisuras y grietas en algunas estructuras. Este señalamiento indicaba un deterioro progresivo que podría afectar las futuras planificaciones urbanas.

De forma similar, el mismo año, la Municipalidad de Lota modificó el Plan Regulador Comunal de Lota de 1983 estableciendo que los Lotes como el Sector los Aromos se habilita construir en terrenos de fuerte pendiente, debiendo respetar los drenajes de aguas de lluvia (Decreto 1506 de 2005).

De esta forma se generan franjas de protección no edificables, sin restringir la construcción en laderas de 10 metros de ancho, medidos desde la ribera del curso de agua. Esto se traduciría en zonificar dicha área, el cual para el mapa de peligro de 2010 creado por SERNAGEOMIN (2010) (**Ver Fig. 10**) indica en niveles de alta susceptibilidad a remociones en masa aledaña a residencias altamente pobladas.

Dentro de la urbanización histórica de Lota, desde 1990, poblaciones como Nahuelbuta, 21 de mayo y Lautaro 1 y 2, fueron iniciadas gracias a un aporte de la Gobernación Provincial para su ejecución, donde ya existía alrededor de treinta dos familias establecidas previamente a el proyecto (Diario el Sur, 1990). A partir de la necesidad de contar un acceso expedito para los puertos en la región de Bío-Bío, en 1990, surgió la posibilidad del mejoramiento de la infraestructura, creándose una propuesta de 10 años del Serviu, que conecte la zona Costanera, de Hualqui, Lota, Concepción y Santa Juana y considerando elementos del tráfico e infraestructura vial e inclusive desconcentración de inversión, pero sin enfatizar en los riesgos posibles y en medidas de prevención ante remociones en masa (Diario el Sur. 1990). En consecuencia, debido a el uso de la población, y la necesidad de aumentar la conectividad, se realizaron nuevos cortes en las carreteras (ruta - 160) e intervenciones en las laderas, aumentando la necesidad de crear modelos que expliquen el

comportamiento y su evolución, resultando una gran cantidad de inestabilidad por nuevos cortes en las carreteras, personas fallecidas además de una gran cantidad de viviendas afectadas.

Preguntas de Investigación

Pregunta de investigación 1: ¿Los actuales mapas de riesgo de susceptibilidad cuentan con un correcto sustento teórico metodológico para ser utilizados en la planificación territorial en el área de estudio?

Pregunta de investigación 2: ¿Responden adecuadamente los actuales mapeos de susceptibilidad de remociones en masa, a las decisiones de usos de suelo en la planificación urbana actual de la comuna?

4. Hipótesis

Los mapas de susceptibilidad a remociones en masa de la comuna de Lota se encuentran obsoletos y no son eficaces como herramientas para la toma de decisiones, lo que redundará en una deficiente gestión del riesgo de remociones en masa, tanto las metodologías utilizadas como la obsolescencia de su información han determinado un mal manejo de estos peligros en la ciudad.

2.1 Objetivo General

Analizar los estudios de remociones en masa de la ciudad de Lota, que han sustentado las tomas de decisiones en el marco de la gestión del riesgo de desastre y proponer un modelo validado de evaluación de susceptibilidad de remociones en masa, que permita actualizar y mejorar la información de amenazas de estos fenómenos en el contexto urbano de la comuna.

2.2 Objetivos Específicos:

1. Evaluar críticamente dos estudios de remociones en masa de la comuna de Lota desde una perspectiva de su utilización en la planificación urbana del territorio.
2. Generar un mapa de susceptibilidad ante remociones en masa para el área urbana de la comuna de Lota, a partir del uso de un método bivariado denominado Frequency ratio.
3. Comparar los resultados del mapa de susceptibilidad ante remociones en masa para el área urbana de la comuna de Lota, con los estudios previos de remociones en masa que existen en la comuna.

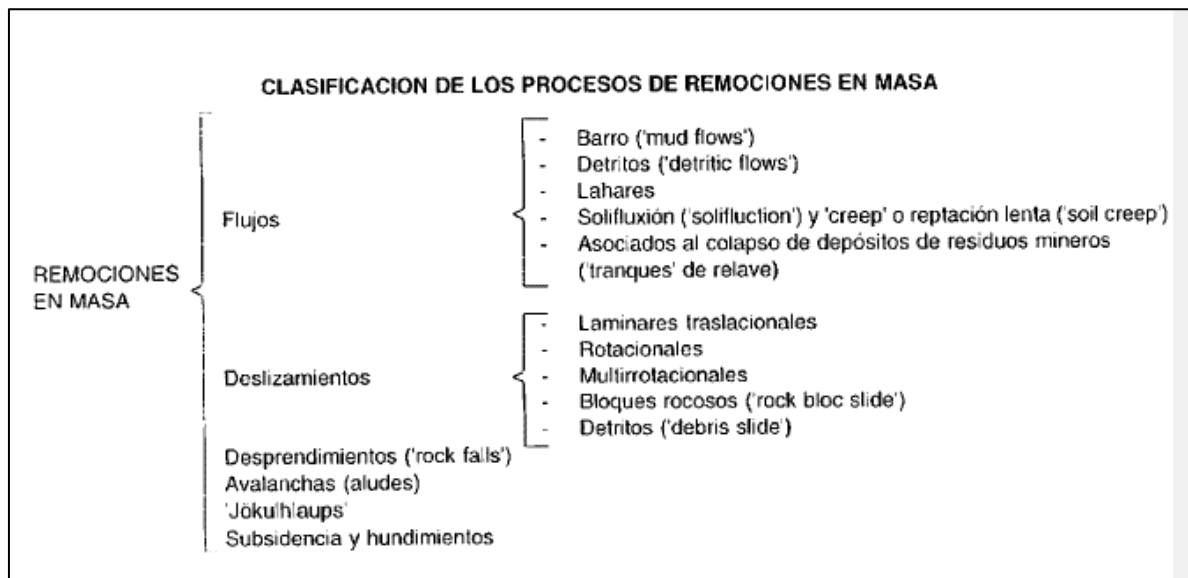
3. Marco Teórico

3.1 Remociones en masa

Las remociones en masa se caracterizan por sus mecanismos de ruptura, litología, ambientes climáticos y geomorfológicos dificultando su establecimiento y clasificación, de tal modo que es posible identificarlas según distintas clasificaciones, una vez se cuente con diversos criterios. Hauser, A., (2000) utilizando la definición de Whittow, J. (1986), comprende las remociones en masa como un proceso de movilización de sedimentos por transporte, aun cuando la medida aumenta en flujo, sigue una transición entre ambos flujos, siempre y cuando existan mecanismos climáticos que produzcan grandes planos de ruptura profunda, reafirmando desde esta postura las bases en el desprendimiento de laderas.

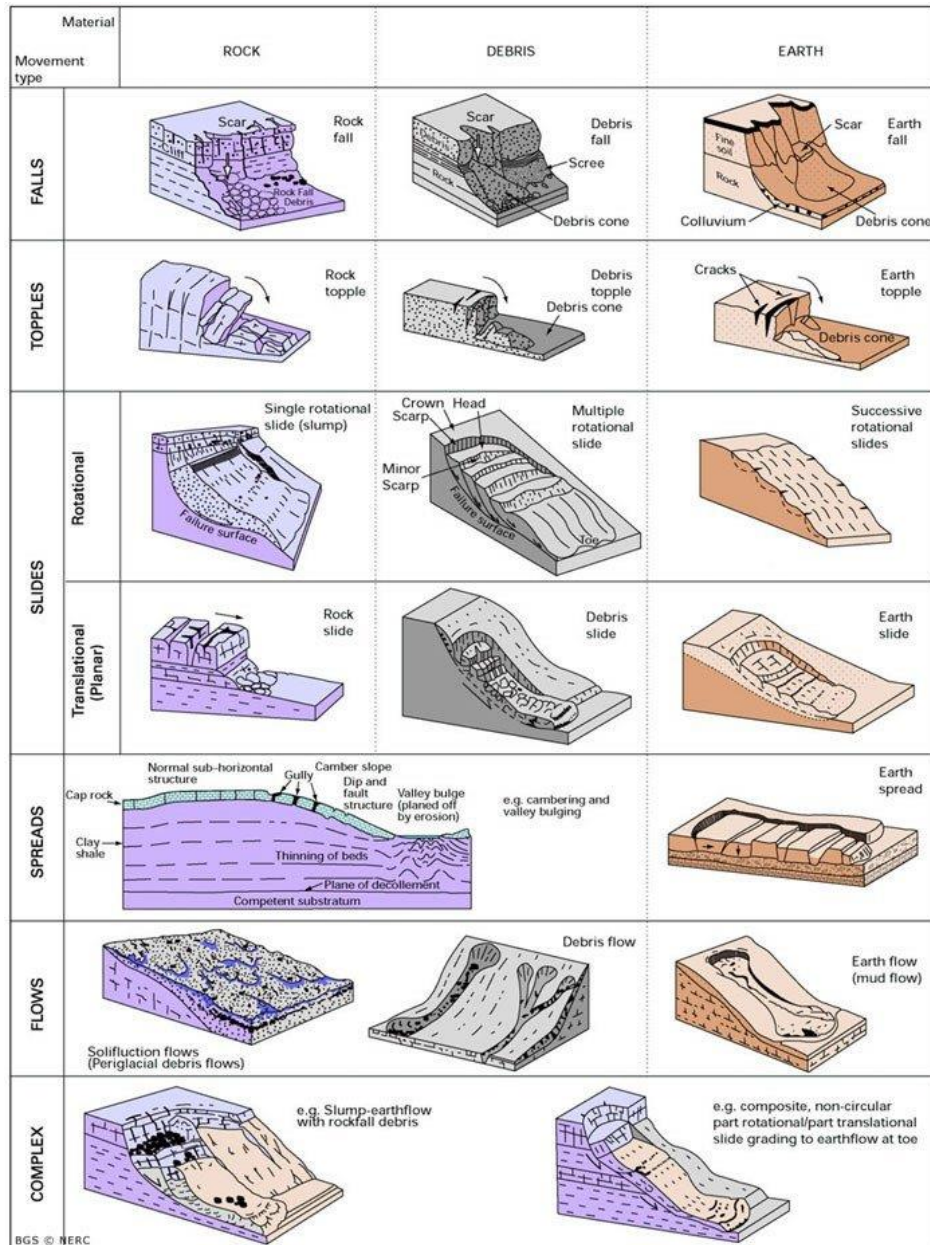
La definición de Whittow, J. (1986) de remociones en masa, propone una clasificación simple con la intención de agrupar la totalidad de procesos de remoción en masa, siguiendo las causas, énfasis de tipología, mecanismos de ruptura, agentes desencadenantes y magnitud.

- **Figura. 1.** Clasificación utilizada por Whittow, J. (1986) comúnmente utilizada en Chile.



Fuente: Hauser, A., 2000.

- **Figura:** 1.2 Clasificación según Crudens, D.M. y Varnes, D.J. 1996.



Fuente: Peshevski, I., Jovanovski, M., Papic, J., & Abolmasov, B. (2015) citando a Crudens, D. M. y Varnes, D. J. (1996)

Desde una perspectiva Ingenieril y Geológica, Varnes, D. J, (1958 y 1978) define las remociones como aquellos transportes de una masa de roca, detritos u material artificial de una ladera, de tal modo que afecten los materiales del escarpe de tal movimiento. En base tanto a el material como su movimiento, Crudens, D. M. y Varnes, D. J. (1996) clasifican los movimientos en masa en 4 grandes grupos, caído, inclinación, deslizamiento, esparcimiento y flujo (**ver Fig. 1.2**), dicha clasificación propone a expertos en riesgos naturales y comprende la categorización influyente para diferenciar de acuerdo con su comportamiento. Por otro lado, Hutchinson, contribuye desde la comprensión de las RM basándose en el mecanismo de deformación, consigue una clasificación (**Ver Tabla 1.**)

- **Tabla 1:** Clasificación según Varnes D.J. (1978) y Hutchinson, J. (1988)

Mecanismos de movimiento	Tipo de material involucrado			
	Tipo	Roca (rock)	Derrubios (debris)	Suelo (soil)
Desprendimientos (<i>fall</i>)		Caída o desprendimiento de rocas (<i>rockfall</i>)	Caída o desprendimiento de derrubios (<i>debris fall</i>)	Caída o desprendimiento de suelos (<i>soil fall</i>)
Vuelco o desplome (<i>topple</i>)		Vuelco o desplome de rocas (<i>rock topple</i>)	Vuelco o desplome de derrubios (<i>debris topple</i>)	Vuelco o desplome de suelos (<i>soil topple</i>)
Deslizamiento rotacional simple (<i>rotational slide</i>)		Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)
Deslizamiento translacional o de bloques-no rotacional (<i>translational slide, non-rotational</i>)		Deslizamiento de roca en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento de derrubios en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento translacional de suelos (<i>slab slide</i>)
Deslizamiento planar		Deslizamiento de rocas (<i>rock slide</i>)	Deslizamiento de derrubios (<i>debris slide</i>)	Coladas de barro (<i>mudslide</i>)
Flujos (<i>flow</i>)		Flujo de rocas (<i>rock flow</i>)	Corrientes de derrubios (<i>debris flow</i>)	Flujos de tierra, arena o suelo (<i>soil flow</i>)
Expansión lateral (<i>lateral spreading</i>)		Expansiones laterales en rocas (<i>rock spreading</i>)	Expansiones laterales en derrubios (<i>debris spread</i>)	Expansiones laterales en suelos (<i>soil spreading</i>)
Complejo (<i>complex</i>)		Ejemplo: Alud de rocas (<i>rock avalanche</i>)	Ejemplo: Flujo deslizante (<i>flow slide</i>)	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras (<i>slump-earthflow</i>)

Fuente: Alcantara Ayala citando a EPOCH., 2000

Para otros autores como Suarez, D. J. (1998), las remociones en masa son deslizamientos de material antiguo, como descapote o remoción en los primeros metros de suelo, caracterizándose por generar así la eliminación de todo material inestable causado por la alteración química y física del mineral, a la vez que reproduce efectos de relajación y abrasión que llevan por consiguiente la fracturación de partículas en la destrucción de la superficie y conducción de caídas de roca y colapso. En su obra del año 2000, Hauser, A. destaca la importancia de llevar a cabo una evacuación rápida del material movilizado, ya sea suelo, roca o una combinación de ambos, señalando un desplazamiento originado por procesos gravitacionales en un conjunto de terreno desplazado hacia cotas más bajas. Este enfoque pone énfasis en el mecanismo subyacente o el tipo de movimiento involucrado, a diferencia de la perspectiva presentada por Whittow, J. (1968).

En alineación con las investigaciones de Hauser, A. (2000), diversos autores, entre ellos Ramos C. et al. (2015), haciendo referencia al trabajo de Bonnard, C. y Noverraz, F. (2001), así como a Dahal, R. K. et al. (2006), han profundizado en la explicación de los deslizamientos profundos, destacando su vínculo con las lluvias acumuladas a lo largo de extensos periodos temporales. En este contexto, las remociones en masa no se han clasificado exclusivamente según el factor climático, sino que también se ha considerado su duración durante los episodios de precipitaciones, asociándose a los efectos de incisión. En adición, Hauser, A. (2000) sugiere que las variables o factores condicionantes, incluyendo aquellos de naturaleza climática, pueden variar en el contexto de las remociones en masa. En consecuencia, la definición de estos eventos no se restringe únicamente a los impactos climáticos directos, sino que se relaciona con la naturaleza del material depositado, ya sea de origen volcánico, glaciario, proveniente de escombros de falda o aluvial.

Dicho enfoque, precisa que el agua se infiltra y trae consigo una saturación del suelo, creando un escenario de susceptibilidad ante remoción en masa, que puede significar un riesgo. Sin embargo, existen autores como Borja Baeza, R. C y Alcántara Ayala I. (2004) quienes centran su definición en el potencial de impacto sobre la superficie y la actividad humana, siempre y cuando cause la desestabilización/ interrupción u desequilibrio en las actividades humanas y las condiciones espacio físicas, sean económicas, social, política y ambiental, determinando así un grado de riesgo. Otros autores citados por Hauser, A., (2000) como Pierson. T. C y Scott, K. M, (1998) utilizan el término avalancha de detritos al referirse a un rápido movimiento de masas compuestas de detritos rocosos, movilizándolo la pendiente por acción de la gravedad.

En paralelo a ello, algunas instituciones con el fin de estandarizar para su país una nomenclatura, también han buscado definir las remociones en masa, tales como, Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático de Bogotá. IDGER, (2023) proponiendo una clasificación de acuerdo con procesos de material

constituido por roca, suelo, tierras, detritos y escombros, desplazándose por gravedad, deslizamientos, derrumbes, procesos de remoción, fallas de taludes y laderas.

Otra clasificación según *IDIGER*, (2023) advierte la importancia del proceso que origina las remociones para definirlo y clasificarlo según las condiciones físicas – naturales, sea natural las altas pendientes del terreno, materiales débiles, presencia de fallas geológicas y falta de cobertura vegetal, las características que se contrastan con la acción humana, como los cortes, excavaciones en las laderas, rellenos en las laderas, modificaciones del drenaje natural, falta de drenaje urbano y actividad minera.

Por último, con el fin de estandarizar y facilitar los trabajos en el campo el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) ha decidido el concepto de deslizamientos de tierra, para describir el movimiento descendente de suelo, rocas y materiales orgánicos bajo el efecto de la gravedad, clasificando la nomenclatura en derrumbes en caídas de rocas, derribo, deslizamientos, extensiones laterales y corrientes (Highland, L. y Bobrowsky, P. 2008).

3.2 Susceptibilidad de remociones en masa

Desde una perspectiva histórica, para Montero, J. C. (2008) la Susceptibilidad es un concepto que nace con la elaboración de mapas del Servicio Geológico de Estados Unidos de los años 70, en donde se trabajó vinculando los procesos de inestabilidad de una ladera y con ello obteniendo áreas propensas a movimientos de ladera, así mismo añade la mutabilidad de las laderas, por lo que su susceptibilidad puede aumentar o reducirse debido a condicionantes que lo puedan modificar como la reforestación, excavación, efectos de movimiento en la ladera, entre otros.

Andrés, A. A. P. (1998) afirma que es por medio de la susceptibilidad de un área, que las remociones en masa se derivan de factores que condicionan y generan una situación potencialmente inestable y por la cual se consigue la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico, con lo cual su importancia radicarán en identificar las zonas críticas y de generar eventos por remoción, a lo cual coincide Náquira Bazán, M. V. (2009) al referirse a la susceptibilidad, como la probabilidad de ocurrencia de remoción en masa, condicionada por factores internos (respecto a las condiciones físicas de la ladera) u externos.

Por lo descrito por Espinoza, C. (2014) los medios de defensa en casos de ocurrir desastres naturales funcionan de manera relativamente eficaz. Para países como Chile, se encuentra en vías de desarrollo al no contar con una adecuada planificación de asentamientos humanos, medidas de seguridad y sistematización de alertas tempranas. A causa de ello, se sostiene que para estos tipos de territorio significa la pérdida de

vidas. Una de las incidencias de estos fenómenos se encuentra en el riesgo natural, definiendo la ocurrencia en lugares y momentos determinados de fenómenos naturales que ameritan de una evaluación al riesgo natural (Espinoza Lizama, C. 2013).

Aun cuando la susceptibilidad como metodología puede ser considerada con elementos principalmente unánimes, en los estudios de Vera Rodríguez, J. M. y Albarracín Calderón, A. P. (2017), se observan elementos en exposición a una amenaza, tanto físicos, socioeconómicos y ambientales, ampliando el abanico de posibilidades para analizar las condiciones de resiliencia, recuperación, condiciones de vida y formas de adaptación, implicando este último la capacidad de ajustarse a variaciones sustanciales en su entorno frente a riesgos.

Para calcular dicha susceptibilidad enfocada como una metodología, existen métodos de evaluación que, mediante Sistemas de información Geográfica, dividen el área de estudio en polígonos de alrededor de 50 m, asignándole una calificación de los parámetros que considerarán para calcular la susceptibilidad final, además de factores de evaluación de cada uno junto con la suma de los valores y clasificación, son plasmadas en una simbología (Soto-Monroy, J. A., & Rojas-Gamba, N. I., 2015). Dentro de los métodos utilizados para calcular la susceptibilidad, algunos autores se han enfocado en métodos cualitativos, que se caracterizan por utilizar análisis de relaciones entre las causas de deslizamientos de tierra, diferenciándose de modelos más probabilísticos siendo estos últimos más populares dados los avances en la tecnológica informática. (Park, S. et al., 2013).

Los modelos de análisis heurístico también conocidos como mapeo directo, constan de superposición de mapas, representando vectores pasivos y activos. Para ello, se utiliza una evaluación directa, realizada con reconocimiento del terreno además de la obtención de datos por medio de fotointerpretación detallada. Preferido mayormente por los geomorfólogos para analizar fotografías aéreas en estudios de campo. En casos de estudios, los investigadores ponderan cada factor condicionante según su experiencia utilizando modelos semicuantitativos (Park, S. et al, 2013).

Por otra parte, los modelos probabilísticos determinan la frecuencia de factores para conseguir una ponderación que requiere de recopilación de datos de deslizamientos, lo cual no siempre es fácil de conseguir, utilizando modelos deterministas binarios, (**Ver. Tabla 2**) tales como la regresión logística, análisis jerárquico (AHP), u redes neuronales, los cuales se basan en leyes de conservación física y la creación de datos de entrada. Esta forma de análisis de seguridad de pendientes permite calcular valores cuantitativos expresados en grados tales como los utilizados por Chau S. A., et al. (2004); Godt et al. (2008) y Van Westen, C. J. y Terlien (1996). A la vez, otros autores han enfatizado en producir más de un modelo de susceptibilidad y comparar su precisión a través de algún método de validación estadístico, creando modelos comparativos como lo realizado por Park, S. et al, (2013).

Tabla 2. Metodologías binarias utilizadas en susceptibilidad de remociones en masa (RM) y sus autores.

Metodología	Autor(es)	Año
Modelo Estadístico Bivariado	Carrara et al.	1991
Peso de la Evidencia (WofE)	Bonham-Carter	1994
Valor de la Información (IV)	Ohlmacher y Davis	1993
Razón de Frecuencia (FR)	Chung y Fabbri	2003
Regresión Logística (LR)	Lee y Talib	1993
Máquinas de Vectores de Soporte (SVM)	Pham et al.	2005
Redes Neuronales Artificiales (ANN)	Lee et al.	2011
Árbol de Decisión (DT)	Lee y Pradhan	2003
Bosque Aleatorio (RF)	Pradhan et al.	2007
Lógica Difusa	Yilmaz	2010

Fuente: Elaboración propia, 2023

Los resultados obtenidos del mapa de susceptibilidad se fundamentan en la aplicación del peso relativo mediante factores ponderados, particularmente en el contexto de los desplazamientos en masa. Este enfoque revela segmentos específicos donde se concentra la inestabilidad de las laderas, afectando, en consecuencia, a infraestructuras críticas ubicadas en áreas habitadas (Álvarez, M et al., 2020). En contrapartida, Lara, M. et al. (2018) destaca que la preferencia por este método se fundamenta en la capacidad que ofrece para discernir con facilidad entre diversos tipos de deslizamientos. Este logro se alcanza al combinar la orientación de taludes con aspectos geológicos y propiedades geotécnicas, dando lugar a la elaboración de tablas individuales para cada categoría de remoción en masa, con sus ponderaciones específicas.

De cualquier modo, es importante destacar según Lara, M. et al. (2018) la susceptibilidad no se enfoca en las áreas de amenaza, ni en las zonas mayormente alcanzadas por deslizamientos, sino más bien en la fuente por la cual progresa el riesgo. Diferenciándose así los mapas de susceptibilidad de los mapas de riesgo, que constan de deslizamientos y escombros previos.

Existiendo una variedad metodologías de susceptibilidad, que varían en la aplicación diferentes territorios. Es desde dicho enfoque metodológico, Rodríguez Valdivia et al., (2014) explica que han llevado a generar clasificaciones de acuerdo con su valor de susceptibilidad desde muy baja a muy alta. En sus resultados, manifestaría como la susceptibilidad se ajusta a lo accidentado de los relieves, evidenciando una susceptibilidad correspondiente a cornisas en las partes altas de los taludes, donde existen vestigios de depósitos de derrubios. Pero para otras investigaciones como la susceptibilidad de piedemonte Andino de Santiago de Chile, no priorizan los sistemas SIG, sino que se utiliza un índice de Susceptibilidad ya

predefinido por Lara y Sepúlveda, S. A. (2010) donde se advierte, los mapas de susceptibilidad por RM representan áreas que reúnen el potencial o las características para sufrir su activación, por lo que no necesita localizar todas las áreas de peligro, sino se centrarse en las fuentes potenciales y no todos los sectores con peligro. No dejando de ser discutibles dada la extrapolación que consta de una calificación ponderada asignada a una lista de condicionantes, según el tipo de remoción: caídas de rocas, deslizamientos de rocas, deslizamientos de tierra y flujos de escombros.

3.2.1 Modelo de técnica por Análisis de Espacial Multicriterio

El análisis multicriterio consta del uso de imágenes, implementando en Raster, compuestos básicos de capas temáticas, tales como geomorfología, geología, pendiente y cobertura vegetal. De este modo se tendrá como principal finalidad clasificar la amenaza por medio de deslizamientos e indicadores morfo dinámicos del terreno (Álvarez, M et al, 2020).

Cada capa temática mediante el uso de Sistemas de información Geográfica utiliza tablas de atributos, en campos denominados, aplicando herramientas SIG como ArcGis. De este modo los resultados generados toman una clasificación heurística en 5 clases (escala de bajo, medio bajo, medio, medio alto y alto) acorde a lo ya monitoreado en terreno (Álvarez, M et al 2020).

Así, mediante la aplicación de diversas técnicas, trabajos e investigaciones centradas en la susceptibilidad a remociones en masa, se desarrollan cartografías temáticas clasificadas. Estas cartografías resultan en un mapa definitivo de susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa, con la implementación de algoritmos específicos en cada píxel. De esta manera, la categoría del nivel de susceptibilidad de acuerdo con las zonas correspondientes (Álvarez, M. et al., 2020).

3.2.2 Susceptibilidad de remoción en masa propuesta por Castro et al. 2001.

El modelo propuesto por Castro E. et al. (2001), se caracteriza por utilizar el análisis multicriterio que busca modelar las zonas y generar un análisis de la distribución espacial de la susceptibilidad, convirtiéndose en una propuesta Multivariada a través de Softwares SIG, integrando mapas clasificados mediante el método explícito empírico, tales como geología, geomorfología, pendiente media del terreno y conflictos de uso, se asignan puntajes ponderados para indicar el nivel de contribución e inestabilidad del terreno. La suma de estos valores, incorporada en formulaciones matemáticas que emplean análisis estadístico tanto univariado

como multivariado, constituirá una evaluación comprehensiva del entorno, permitiendo una apreciación más precisa y holística de las condiciones del terreno.

Su ponderación con la que cada variable influye en la susceptibilidad se produce por el grado de contribución a la inestabilidad del terreno, utilizando la fórmula propuesta por Castro E. et al, (2001) (**Ver Fórmula 1**) genera un mapa de distribución de susceptibilidad, contando con una muestra de estadística representativa de los procesos de remoción, evidenciando la susceptibilidad, al combinar mapas y representando las variables o factores involucrados. Se establecerá de manera semicuantitativa, relaciones de peso en los diferentes mapas, otorgándoles pesos a cada variable y recurriendo a la consulta de expertos.

Sin embargo, según Cartaya, S. et al, (2006) el método utilizado por Castro E., et al (2001) advierte su mapa de amenaza pone énfasis en la activación de laderas sin implicar detonantes como precipitaciones y/o sismicidad, requiriendo un mayor tiempo y un equipo multidisciplinario de trabajo (Castro E. et al, 2001).

Las Fases para realizar dicha metodología se estructurarán en:

- 1.-Estructuración de la información temática.
- 2.- Definición de las variables y generación de mapas temáticos digitalizados.
- 3.- Análisis geoestadístico, superposición de mapas y susceptibilidad final.

La susceptibilidad específica, otorga pesos ponderados para cada variable implicando reajuste de intervalos en 5 categorías desde muy baja, baja, media, alta, muy alta.

Los mapas de susceptibilidad final se elaboran mediante un análisis multivariado, en el cual se superpondrán los 4 mapas temáticos para conseguir la susceptibilidad final (Castro, E., et al. 2001).

Fórmula 1. Mapa de susceptibilidad

$$SF = \frac{SG_s(PP\%) + SGm(pp\%) + SPm(pp\%) + SCu(pp\%)}{Ntv}$$

Fuente: Castro E. et al. 2001

Según la formulación propuesta por Cartaya, S., Méndez, W., & Pacheco, H. 2023.

Donde:

SF: Susceptibilidad Final

pp%: Peso ponderado de la variable en porcentaje

SGs: Susceptibilidad de la variable Geología de Superficie

SGm: Susceptibilidad de la variable Geomorfología

SPm: Susceptibilidad de la variable Pendiente Media del Terreno

SCu: Susceptibilidad de la variable Conflictos de Uso

Ntv: Número total de variables

Esta metodología presenta la ventaja de calcular el peso o la superficie acumulada de deslizamiento por unidad cartografiada de la variable específica. Este cálculo se utiliza para expresar en porcentaje la susceptibilidad de cada unidad, permitiendo luego contrastar las superficies totales en kilómetros cuadrados (Castro E. et al., 2001). Asimismo, subraya la persistente necesidad de gestionar una gran cantidad de datos de diversas tipologías para la elaboración de cartografías mediante sistemas matemáticos. De este modo, para dicho enfoque se ha demostrado resultados significativos en el desarrollo de estrategias de manejo de riesgos en distintos niveles.

Serán las características Físico-geográficas similares, las que construyen una herramienta de análisis apropiada con acciones estratégicas a la comunidad y organismos locales, produciendo una herramienta oportuna y eficaz ante amenazas estudiadas, desarrollando resultados que se usen manejo de riesgos de diferentes niveles de planificación del desarrollo (Castro E. et al. 2001).

El proceso de ponderación puede ser uno de los más complejos dentro de los análisis de susceptibilidad de remoción en masa, ya que en ocasiones como la de Castro E. et al., (2001) los intervalos o categorías de susceptibilidad dependen de un análisis espacial y digital de los diferentes mapas de susceptibilidad temáticos de acuerdo con el juicio de expertos con técnicas de evaluación multicriterio: Alto, Medio, Bajo y sin conflicto.

3.2.3 Metodología de susceptibilidad por remociones en masa por sismicidad

Según lo descrito por Marcano, A. (2016), la elaboración de mapas temáticos utiliza los Sistemas de información Geográfico (SIG) para cartografiar los mapas temáticos, implementando variables a sus índices como geología superficial, geomorfología, conflictos de uso, pendiente media del terreno, entre otros.

De este modo, los mapas de susceptibilidad por sismicidad abordan variables con valores ponderados, superponiendo capas, pero con la integración del análisis de imágenes como Landsat y Spot 5, para obtener el área de cada unidad de la variable, generando datos básicos.

Para la obtención de las áreas sísmicas, se crea un mapa de amenaza utilizando el método utilizado por Marcano, A. (2016) originado por Saha, Gupta & Arora (2002) & Saha et al, (2005) en el cual se producen áreas que sean influenciadas por derrumbes y movimientos en masa de lo que cual se creará un buffer, que contemple el área de estudio. Mediante el uso de líneas de falla Marcano, A. (2016) y contactos litológicos pondera un buffer de sismicidad según la cercanía a la falla y contactos litológicos, con su valor de grado de intensidad medida de los resultados y representándolo en polígonos ocurridos, donde logra inclusive representar la extensión de fluviotorrenciales.

Tabla 3. clasificación de susceptibilidad en RM.

Código	Buffer (m)	Valor
1	500	5
2	1000	4
3	1500	3
4	2000	2
5	2500	1

Fuente: Marcano, A. (2016)

Al observar el mapeo utilizado, los resultados deben ser calibrados por una superposición de deslizamientos por acciones sísmicas, distribuyendo quebradas, amenazas homogéneas, y limitando cuencas bajas, abanicos aluviales entre otros movimientos de extensión. Algunos de los conflictos en su ejecución, pueden relacionarse con la fotointerpretación de tipos de deslizamientos que no tienen la suficiente extensión, distribuyendo la amenaza inclusive en áreas costeras debido a la presencia de fallas.

3.2.4 Metodología de susceptibilidad de remoción en masa por Soeters, R., y Van Westen, C. J. (1996).

Existen dentro de los métodos para evaluar la Susceptibilidad de remoción en masa, los modelos deterministas y no deterministas. De esta manera Hernández, J. M. A., (2012) ordena los métodos para determinar movimientos de laderas a través de la observación geológica. Según el principio no determinista, los procesos de inestabilidad siguen el principio del actualismo, en el que se producen y se generan procesos antiguos los cuales siguen actuando en el presente. Por otra parte, algunos métodos deterministas, calculan el movimiento en masa basándose en cálculos de estabilidad de laderas en sitios particulares, junto a leyes físicas y mecánicas universales, permitiendo ejecutar una predicción espacial y temporal. Dentro de esta última clasificación, Azañón, J. M., et al. (2008) comenta el análisis estadístico multivariante al caracterizarse por generar modelos satisfactorios de probabilidad de deslizamiento, proporcionando contribuciones a la susceptibilidad y determinando la unidad del terreno.

Dentro de ellas, se utilizan procesos actualmente utilizados, por Soren, R. y Westen. C. J (1996) quienes plantean un método semicuantitativo desarrollado para conducir el estudio científico e ingenieril que nos permite reconocer el peligro natural, es decir la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

Para ello, en su artículo *Slope instability recognition, analysis and zonation*, reconoce enfoques como el geomorfológico, teniendo un desarrollo de modelos deterministas y probabilísticos.

Su enfoque para la zonificación e identificación de variables como las áreas de Remociones en masa, basado en la foto interpretación, clasifica los tipos de movimiento esclareciendo una interpolación entre movimientos y factores causales, presentando la densidad de deslizamientos cuantitativamente.

Para Soeters, R., & Van Westen, C. J., (1996) los estudios de remoción en masa deben relacionarse con su precisión y fiabilidad a la hora de determinar áreas propensas a deslizamientos. Para ello, enfatizan en la necesidad de exactitud tanto del modelo como de los datos de entrada. Por lo que pese a la experiencia de diversos investigadores las ponderaciones suelen ser subjetivas, así como el tamaño de las áreas de estudio. Para otros métodos, los diversos factores de inestabilidad se mapean mapas temáticos individuales (Soeters, R., y Van Westen, C. J., 1996).

Para el caso expuesto de mapas geomórficos, se crearon sistemas convencionales de mediana y gran escala, diferenciando los tipos de deslizamientos junto a condiciones de drenaje y movimientos de masa, mediante símbolos. Para ello, Soeters, R., y Van Westen, C. J., (1996) afirman que la interpretación de deslizamientos

puede ser reconocida efectivamente por medio de la teledetección, asociando movimientos de pendiente con características de imagen satelital (ráster).

Pese que el mapeo, considera la trayectoria del material, su enfoque no se encuentra en la evaluación de todas las áreas junto a sus complejidades, sino en crear subdivisiones en el área de estudio, incorporando unidades según un accidente geográfico y diferenciándose según los distintos fenómenos y su clasificación de Varnes, D. J (1958 y 1978), para por último añadir a la unidad, los atributos condicionantes como el tamaño con los cuales se agrupan.

Dentro de las ponderaciones propuesta, Soeters, R., y Van Westen, C.J., (1996) utiliza un método de ponderación por Bonham-Carter. (1994) quien recolectando datos de cada factor en áreas de estudio permite mediciones de campo con información climática, geológica donde se analizan los parámetros según como contribuyan a la variabilidad de datos.

Aun cuando dicha metodología semicuantitativa, requiere de un análisis determinístico importante, Soeters, R., y Van Westen, C. J., (1996) reconocen algunos retos de efectividad, ya que la resolución de imágenes satelitales necesita identificar y caracterizar los movimientos de pendiente, requiriendo un contraste de fotografía foto-interpretativa con la teledetección, utilizando células de resolución terrestre (GRC) (Rengers, N. et al., 1992).

Algunos factores esenciales pueden integrar la comparación de fotografías en áreas desconocidas con remociones en masa y la identificación de áreas de contraste utilizando un número no determinado para reconocer antecedentes anteriores de RM con los cuales trabajar.

3.2.5. Metodología de susceptibilidad Mora & Vahrson, 1991.

La determinación de movimientos de remoción en masa estima una presentación de posibles escenarios, tomando en cuenta los procesos morfodinámicos, la creación modelos cartográficos que utilizan en general en América Central, permiten ubicar áreas u unidades con potencial de activar remociones en masa con el método de Mora, C y Vahrson, W. G. (1994).

Es decir, utilizando posibles sismos por medio de una combinación de variables se zonifican áreas susceptibles a deslizamientos con posibles sismos, combinando variables, establece índices con un peso relativo para cada uno de los parámetros.

Para Mora, C y Vahrson, W. G. (1994) una de las mayores ventajas de su metodología es su aporte, clasificando los factores condicionantes en 2 grupos, que inciden en la susceptibilidad, siendo la

geomorfología, grado de pendiente, cobertura vegetal y los factores desencadenantes como la sismicidad y las precipitaciones, relevantes para la toma de decisiones en procesos de planificación de uso de terreno, y útil para planificar el área urbana y trazar líneas vitales siempre y cuando se condicione a valores constantes en toda el área de estudio, las escalas 1:50.000, 1:25.000 1:10.000 son las más recomendadas por autores como Quesada, R. A, y Feoli Borashi, F. S (2018) ya que las escalas pequeñas son aplicables debido a los menores errores que generan. Más aún, Quesada Román, A., y Feoli Boraschi, F. S. (2018) aseguran que algunas variables desencadenantes como el uso de mapa de precipitaciones por mes y humedad de suelo son difíciles de obtener, significando un aumento en el presupuesto. De manera similar la variable sismológica del área de estudio es una tarea que conlleva la necesidad de al menos dos sismógrafos para el monitoreo sísmico.

Aún con ello, el uso del método de Mora, C y Vahrson, W. G. (1994) no sustituiría los estudios posteriores de análisis geotécnico, laboratorio, entre otros, sino más bien previene los deslizamientos. Por lo tanto, clasificarán los factores en factores pasivos: como todos aquellos factores morfodinámicos, que desestabilizan las laderas, el grado de susceptibilidad al deslizamiento producto de elementos pasivos, y de la acción de factores de disparo. Como factores activos, para aquellos que tienen una intensidad tal que perturban significativamente el equilibrio del material de la ladera (Barrantes Castillo. G., 2011).

Fórmula 2: La fórmula de susceptibilidad por remociones en masa, propuesto Mora, C & Varshon, W. G. (1994)

$$F_c = geo * 0.3 + (gmor * 0.2) + (cbve * 0.2) + (pen * 0.3)$$

Fuente: Lopez R. E. et al., 2020

Dónde: geo: Geología

gmor: Geomorfología

cbve: Cobertura

pen: Pendiente

Fórmula 3: Factores detonantes

$$Fd = (sis * o_3) + (Pre * 0.7)$$

Fuente: Lopez R. E. et al, 2020

Donde:

Fd: Factores detonantes

Sis: Sismicidad

Pre: Precipitación

Una vez se encuentren normalizados los datos de manera que sean aplicables en mapas temático, los datos puntuales son transformados en un mapa de superficie interpolando el método Kriging Ordinario.

Un mapa de deslizamiento en zonas pobladas, fotografía áreas locales las cuales forman deslizamientos en zonas, no obstante empinadas a problemas de acceso.

Algunas de las debilidades del método según Barrantes Castillo. G, (2011) se encuentra en los resultados, siendo efectivo en su precisión a escalas medias, de 1:50.000, además existe la dificultad de obtener información relevante como litología, altitud y meteorología de tal modo que se sustente una comparación en los deslizamientos, y la discriminación de áreas de mayor peligro. No es recomendable por tanto que se utilice en una escala mayor a 1:50.000 debido a la dificultad de conseguir información litológica y altitudes con mayor detalle.

Dentro de sus mayores ventajas, se encuentran el aporte a uso de terrenos, planificación urbana y líneas vitales. Es por ello que muchos métodos, ameritan la necesidad de un levantamiento de información física de los sectores junto con el rápido acceso, obteniendo como resultados la combinación de factores y estableciendo condiciones de área estudiada cualitativa y diferenciando diferentes niveles de amenaza con su caracterización.

3.2.6. Susceptibilidad de Lara M. et al. (2007)

Esta metodología se empleó con el fin de determinar la susceptibilidad específica a flujos de escombros en quebradas y cascadas. Propone un cálculo de índice de susceptibilidad, en el cual se asigna ponderación a varios factores, siguiendo la metodología propuesta por Sepúlveda S. A. (1998). Este enfoque considera parámetros geomorfológicos, geotécnicos y litológicos como las variables más significativas para evaluar la estabilidad de laderas, coincidiendo con la perspectiva de Lara, M. (2007). De acuerdo con esta clasificación, se identificarán cuatro tipos de remociones: desde eventos poco profundos de pequeño volumen en coluviones de suelo hasta grandes mega deslizamientos, como sugiere Leyton, F. et al. (2010).

De este modo, la metodología seleccionada desempeñó un papel crucial en la identificación de la susceptibilidad específica a flujos, escombros en quebradas y cascadas. Su aplicación implicó la formulación de un índice de susceptibilidad, cuyo cálculo se fundamentó en la ponderación de diversos factores, siguiendo el enfoque establecido por la tabla de ponderaciones de Sepúlveda S. A. (1998). Este marco considera parámetros geomorfológicos, geotécnicos y litológicos como las variables de mayor relevancia para evaluar la estabilidad de laderas, coincidiendo con la perspectiva presentada por Lara, M. (2007). Como resultado de esta evaluación, se procederá a la clasificación de las remociones en cuatro categorías distintas: desde eventos poco profundos de pequeño volumen en coluviones de suelo hasta grandes mega deslizamientos, conforme a la propuesta de Leyton, F. et al. (2010).

- Deslizamiento en Suelo
- Deslizamiento en roca
- Flujo
- Caída de Roca

La metodología original se aplicó en la cuenca de quebrada San Ramón en frentes montañosos de la ciudad de Santiago, con diversos procesos de deslizamiento de tierra en diferente génesis y presentando gran influencia de factores condicionantes para cada tipo de clasificación, definen los factores de acuerdo con la ocurrencia de la activación de las laderas para posteriormente agregar una ponderación de valores de peso ya propuestos por Lara & Sepúlveda, S. A. (2010).

Para la obtención del índice de Susceptibilidad (IS) por cada unidad asociada a distintos tipos de remociones estudiados. Conforme a lo que dichos autores proponen cada Índice de Susceptibilidad, clasifica la

Susceptibilidad (IS) entre 0% y 100% por cada unidad de análisis, considerando el IS mayor al 50% como zonas susceptibles a la activación de laderas por algún tipo de remoción en masa. La escala de trabajo a utilizada de entre los 1:20.000 y 1:50.000 por recomendaciones, utilizan algún modelo digital de elevación (MDE) con resolución de 9 metros. Los deslizamientos de mayor susceptibilidad son 50 <IS <75 restringen el área, la construcción y planificación urbana a más de 1.000 m sobre el nivel del mar teniendo en cuenta la unidad de geomorfológica en la que se dividirá en cada tipo de deslizamiento, realizando un porcentaje desarrollado por Sepúlveda, S. A. (2000) ponderado para cada variable (geomorfología, geología, clima-vegetación, antrópico y antecedentes) y complementada por tipos de deslizamientos como enfatiza Lara, M. et al., (2018), los flujos de escombros son los más riesgosos, dadas las largas distancias. En los primeros resultados se busca elaborar mapas temáticos donde en sus píxeles representen la información topográfica, pendientes, geología entre otros factores de importante relevancia.

- **Tabla 4.** Ponderaciones de Susceptibilidad, Sepúlveda & Lara, (2007)

FACTOR	ESPECIFICACIONES (no diferencia en esta etapa deslizamientos superficiales y profundos)	RANGOS	%
pendientes de laderas (f ₁)	Promedio de la unidad	15°-20°	9%
		20°-25°	15%
		25°-30°	21%
		30°-40°	26%
		>40°	30%
exposición al sol (f ₂)	Para el caso de Chile central, alta exposición: laderas mirando al N, al estar expuestas al sol durante todo el año. Parcial: laderas mirando al E-W. Baja: laderas mirando al S	alta	5%
		parcial	3%
		baja	1%
características geológicas-geotécnicas del material (f ₃)	Condiciones muy favorables para generación de deslizamiento son, entre otros, baja densidad (<-1,6-1,8 kN/m ³), baja resistencia, alta cantidad de material fino en su composición (>-50%); además de la estructura y estratificación del suelo. La generación de material removible a partir de roca se ve favorecido por alta meteorización y alteración.	muy favorable	20%
		favorable	14%
		medianamente favorable	10%
		poco favorable	6%
		muy poco favorable	2%
condiciones de humedad y saturación (f ₄)	Considerar: (1)Capacidad de saturación por abajo (profundidad nivel freático) y por arriba (infiltración por precipitación). (2) Capacidad de almacenaje de agua en la estructura de suelo (asociado a presencia de niveles impermeables). Saturación y mayor almacenaje favorecen generación de deslizamientos. La relación (profundidad N.F/espesor suelo) cercana a 0 indica condiciones muy favorables de generación, ~0,5 es favorable.	muy favorable	10%
		favorable	7%
		poco favorable	3%
		sin antecedentes	2%

acumulación de nieve (f ₅)	Según estacionalidad	siempre	5%
		estacional	2%
		esporádica	1%
		nula	0%
cobertura vegetal (f ₆)	Densidad en la ladera	nula a baja	5%
		moderada	2%
		alta	0%
desestabilización artificial de laderas (f ₇)	Por ejemplo cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	importante	10%
		poco importante	5%
		no observado	0%
deslizamientos declarados en la unidad geomorfológica (f ₈)	Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento.	presente	10%
		sin antecedentes	3%
		no observado	0%
deslizamientos declarados en la unidad geológica de suelo (f ₉)	Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento.	presente	5%
		sin antecedentes	2%
		no observado	0%
tipo de material (f ₁₀)	En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto pondera por 0 al resto de los factores	suelo	1
		Roca (cobertura aproximada <1m-1,5m de suelo)	0

Fuente: Lara, M. et al, 2007

Por último, los valores del SI representarán un color, utilizando los niveles de 25 puntos que proponen en la metodología un rango de evaluación de peligros (Lara M. et al., 2018); Lara, M. et al., (2007) por lo dicho en su metodología, fue específicamente aplicada a los tipos de deslizamiento en Chile Central, sin embargo, afirma que es posible adaptarla a otras latitudes. En cuanto a variables como las sísmicas se han puesto en optativo para este método, debido a que este tipo de eventos son dificultosos de determinar su recurrencia de eventos aleatorios, haciéndolo aún más difícil de adaptar para latitudes más bajas, por lo que ha debido confiar en las capacidades de observación obtenidas de Sepúlveda.

3.2.7. Método o geo morfométricos para determinar áreas susceptibles a deslizamientos (2018).

El modelo de Susceptibilidad de remoción en masa morfométrica corresponde a un análisis cuantitativo, geométrico de la superficie terrestre, así como de algunos parámetros de propensión a RM tales como:

- Altimetría o hipsometría
- Pendiente
- Densidad de drenaje

Para casos como los realizados por Quesada Román, A., y Barrantes Castillo, G., (2017) el área de estudio se divide en rejillas, o cuadros, utilizando variables como densidad y profundidad de disección, energía del relieve, erosión total calculada entre otras con curvas de nivel a escala de unos 1:10.000. Según Quesada Román y Barrantes Castillo, (2017). La densidad de disección y profundidad de disección del cauce se logra diferenciando tres grandes grupos de rango, densidad, disección a partir de clasificación realizada en todos los grupos de valores.

Quesada-Román, A., y Barrantes Castillo, (2017) además aclaran que la estabilidad de laderas puede verse interrumpidos por flujos de lodo entre otros fenómenos. Una de las ventajas del análisis morfodinámico, son los modelos de validación, a partir de los inventarios de procesos de ladera, obteniendo en sus estudios con 0.55%, 17.24%, y 82.20% de porcentaje de área movilizada por cada área estudiada, teniendo una buena referencia de coincidencia de movimientos gravitacionales con respecto a ruptura de deslizamientos.

El método morfométrico, en primer lugar, se dedicará a caracterizar el área de estudio de forma cuantitativa, con respecto a todo lo relacionado con la topografía de la zona, para luego reconocer a través de una investigación previa los elementos que componen el paisaje, llevando a índices numéricos bastante efectivo a la hora de limitar la geología e incidencia en áreas. Sin embargo, a diferencia de la demás metodología anteriormente descritas, estas metodologías carecerán de un mapeo de susceptibilidad para áreas de estudio que colaboren en aspectos como la planificación territorial (Ayala-Carcedo y Corminas 2003).

3.2.8. Metodología de mapeo de ángulo de alcance mínimo incorporado en susceptibilidad de RM

Orientado a áreas con desprendimientos de roca y cambios en los ángulos de alcance, se caracterizado por utilizarse en condiciones severas, distándose de otras metodologías al tomar los factores condicionantes mucho más complejos. Los procedimientos se aplican en base a líneas de Máximo alcance, Run-out, y se determinan las líneas de ángulo de alcance mínimo (MRA) prediciendo el alcance esperado en que puede ser evacuado el material rocoso (Ayala-Carcedo, F. J. et al .2003).

El resultado, son mapas de descanso máximo los cuales calculan el recorrido de la misma morfología, según al tamaño de los bloques de roca además de su morfología, determinando que cuanto más esférico sea el material, mayor es el agotamiento y trayectoria que los no cúbicos y no esféricos determinado por la MRL (Línea de agotamiento máximo). En base a ello, dicha propuesta metodológica determina la zonificación de zonas de seguridad con un buffer de 100 metros, llamada Zona de seguridad (Ayala-Carcedo, F. J. et al .2003). El ángulo de alcance es definido como ángulo de alcance mínimo, siendo primeramente utilizado por Heim, A. (1932) quien correlaciona los tipos de movimientos, ángulos de alcance, y volumen de movimiento. Por medio de programas como TOMAO y Geo & Soft, se evalúa velocidades, rebotes, energía cinética específica e isolíneas de energía específica y como resultado se obtiene un mapa de peligrosidad máxima evitando la incertidumbre preveniente (Ayala-Carcedo, F. J. et al, 2003).

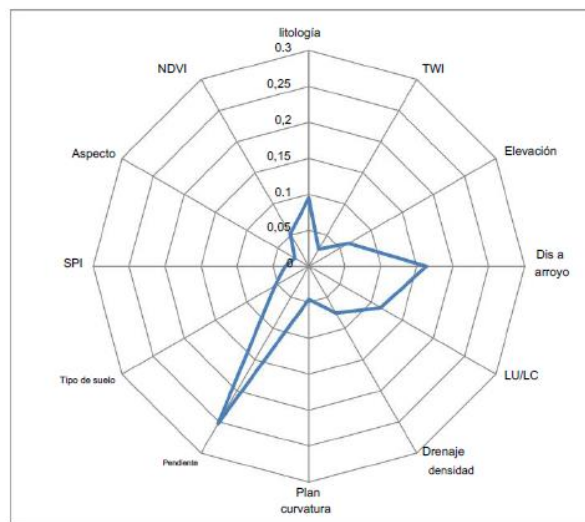
3.2.8. Proceso Jerárquico Analítico (AHP)

Es un método semicuantitativo, multicriterio y multiobjetivo utilizado para diferentes casos (Arabeira, A. 2016), sirviendo en estudios comparativos de métodos, evaluación y en el área industrial, desarrollándose en la década de los 70 por el matemático Saaty, T. L. (2005) se construyó un modelo jerárquico que posibilita la organización de información a través de la comparación binaria, comparando la prioridad de cada elemento.

El análisis Jerárquico de datos consta de identificar la ubicación geográfica del problema, definiendo el objetivo y seleccionando la localidad, consigue una calificación del factor cualitativo, análisis dimensional, ranking de factores y comparación de resultados. De este modo produce comparaciones binarias basándose en factores cuantitativos y cualitativos a la vez que mantiene aspectos que presenten su propia escala de medida (Arabeira, A. 2016). En algunos casos, la comparación estadística el criterio verifica la hipótesis estadística, por tanto, evalúa los factores cualitativos por separado para luego compararlos, y otorgarles una

calificación de la evaluación (Salas Bacalla, J. et al., 2019). Uno de los aportes más importante del AHP, se encuentra en su amplia aplicabilidad, incluyendo la validación y comparación de métodos, como los de Salas Bacalla, J. et al. (2019) quien compara resultados y sus medias en la validación. Mendoza, A. et al. (2019) por su parte optó por utilizar el método para reconocer y esquematizar los criterios y alternativas de cada opinión en la consulta de diferentes roles, consiguiendo tomar decisiones por medio de una estructura jerárquica. En dichas aplicaciones se calcula los vectores de prioridad y consistencia que presentaba cada uno de los roles, permitiendo reducir la incertidumbre de juicios subjetivos.

- **Figura 2.** Gráfico de distribución de variables utilizando modelo AHP.



Fuente: Arabeira, A. et al .2016

Según Arabeira, A. et al, (2016) para el análisis de remociones en masa, este método permitirá calcular los parámetros de discriminación de cada grupo dentro del conglomerado de grupos. Algunas de las ventajas mencionadas por Arabeira, A. et al, (2016) que caracterizan a este método, son la jerarquización de información, comparación emparejada, el uso de conocimientos de diferentes expertos, el grado de compatibilización e incompatibilizar, entre otros. Para dicho método, el resultado puede conseguir evidenciar que ciertos parámetros tengan una mayor ocurrencia, un ejemplo de ello son los resultados obtenidos por Rahadiano, H. et al, (2015) en AHP.

3.2.9. Regresión – Logística

Comúnmente utilizado por autores como Pradhan, B. et al., (2010) y Nandi, A. et al., (2016) es un método estadístico comúnmente utilizado para evaluar la efectividad de predicción de ocurrencia en áreas degradadas-deforestadas. Esta validación incluye la determinación de valores indicadores de la bondad del ajuste del modelo, dispersando los datos en una regresión lineal convencional, alrededor de la recta de regresión. De este modo, cuanto más cercano a 1, el valor del parámetro existente tendrá un buen ajuste y capacidad predictiva (Bravo Peña L. C. et al, 2017).

Para la obtención de datos la regresión logística puede comprender una diversidad de datos, tanto categóricos, es decir cualitativos que representan diferentes categorías (ejemplo litología), así como de diferentes categorías o grupos pudiendo asignar un valor de clase numérico de acuerdo con el criterio de ponderación. Budimir, M. E. A. et al., (2015) además, describe como variables independientes aquellas que puedan relacionarse con el desencadenamiento y deslizamiento. Estudios realizados por Etninger, S. et al., (2016) establecen una regresión logística de dispersión para relacionar la preparación de datos cualitativos como la altura de inundación, impermeabilidad del suelo las cuales se vinculan con el parámetro dependiente de daño observado. Cada variable es utilizada como un parámetro binario, es decir con 2 posibles condicionantes, tales como; permeabilidad o impermeabilidad. De este modo se ha conseguido un número de edificios en cada nivel de parámetro. Luego de ello se obtiene un análisis de correspondencia (AC Correspondence Analyst) la cual relaciona los parámetros según la contribución global maximizada de la probabilidad de deslizamientos dados los datos de entrada. Como resultados los coeficientes positivos indican un aumento en la variable y con ello la probabilidad de deslizamiento.

Finalmente, el enfoque metodológico de regresión logística realiza una evaluación estadística de las diferencias entre grupos identificados como estables e inestables. Este análisis garantiza, según lo postulado por Etninger, S. et al. (2016), la independencia de las variables, dado que, de lo contrario, se introduciría información redundante en el modelo. De acuerdo con esta metodología, si la correlación entre dos variables excede el umbral de 0.5, se concluye que ambas variables están altamente correlacionadas, proporcionando información similar. Este criterio establece una rigurosa consideración de la interdependencia entre las variables, evitando redundancias y asegurando una evaluación precisa en el análisis de la susceptibilidad a remociones en masa.

Fórmula 4. Regresión logística

$$Z = B_0 + B_1X_1 + \dots + B_nX_n$$

Fuente: Bornaetxea, T. et al, (2018)

3.2.10. Combinación lineal ponderada (WLC)

Introducido en primer lugar por Voogd, H. (1983) la combinación lineal ponderada, es un método de SIG dentro de los análisis de multicriterio utilizado por autores como Xiao, Y. et al, (2017), Malczewski, J. & Rinner, R. (2015) al ser un método simple y eficaz para conseguir índices de susceptibilidad estandarizados que afectan los deslizamientos de tierra (Wang, P. et al, 2018).

Consta de la ponderación de criterios tanto en la importancia percibida del criterio, así como de tomar decisiones en relación con los rangos de valores de criterios globales y locales. Por lo que en variadas ocasiones utiliza el principio de sensibilidad al alcance, donde se postula que cuanto mayor sea el rango de valores de cada criterio, mayor será el peso respectivo, dicho de otra manera, la sensibilidad alta al cambio se considera más crítica en términos de influencia de la susceptibilidad cuantificada.

Los valores de criterio estandarizados en consecuencia se utilizan en el enfoque de Malczewski, M. C. et al, (2016) obteniendo valores ponderados tanto globales (suma de valores de pesos) y locales produciendo valores (vecindarios), y ponderaciones e importancia y de orden, asignando valores de reordenamiento de valores ponderados con un peso mayor según se obtenga mayor ponderación. (Meghan, Mc. Et al 2016)

En él se aplica la ponderación de criterios en función del rango de valores de cada variable, por lo que se asume que, en su principio de sensibilidad, (propuesto por Fisher 1995; Malczewski.,2011) cuanto mayor sea el rango de valores de la variable, mayor será el peso.

Fórmula 5. Combinación lineal ponderada.

$$y = \sum_{j=1}^m w_j x_j$$

Fuente: Wang, P. et al., 2018

Donde:

y representa el valor integral de la susceptibilidad a RM.

w_j el peso del índice con un rango de 0 a 1.

j represente un valor dentro de **w**.

El valor de **x_j** debe ser normalizado, por lo que se obtienen mediante la siguiente fórmula.

Fórmula 6. Normalización de los datos.

$$X_j = \frac{x - \min}{X_{\max} - X_{\min}} : \text{or } x_j = \frac{X_{\max} - x}{X_{\max} - X_{\min}}$$

Fuente: Wang, P. et al., 2018

Donde **X_{min}** representa el valor mínimo y **X_{max}** el valor máximo.

Para los valores con menos unidades, cuantas menos unidades se contengan en un subconjunto local, más probable será que se estén compartiendo valores comunes para uno o más parámetros condicionantes (Meghan, Mc. Et al 2016).

Como resultado, se puede conseguir la tendencia espacial del área de estudio, destacando patrones espaciales de valores estandarizados, además de reconocer la variación significativa que no son posibles reconocer a simple vista ante aparentes valores homogéneos, establecen un valor umbral (de dispersión) para cada variable y así como maximizar la precisión.

3.3. Riesgo por remoción en masa

De acuerdo con Aledo, A. y Sulaiman, S. (2023) el riesgo por remoción en masa, por entendimiento general; es la posibilidad de desastre en el futuro, y comprendiendo tanto la predisposición de activación de remociones en elementos antrópicos y naturales, a ser afectados. En oposición con ideas contemporáneas, es el autor mencionado quien afirma que el riesgo anterior a los 80, era concebido como proveniente de una naturaleza caprichosa y caótica, que carecía de todo tipo de control y la cual necesitaba de la solución tecnológica e intervención humana y sus avances.

Dicha propuesta habría sido puesta en duda una vez se reconoció el importante rol de la vulnerabilidad social en la producción del riesgo, de tal modo que las soluciones tecnológicas demostraron ser ineficaces, si lo que se buscaba era reconocer la producción del riesgo. Por tanto, Aledo, A. y Sulaiman, S., (2023) afirman que es necesario alejarse de la objetividad propia del riesgo socioambiental con el fin de actuar por un compromiso político, sino más bien observar el riesgo, diferenciado en grado según la desigualdad del desarrollo variable y cambiante en la sociedad, lo cual debería influir en los análisis de riesgo futuro.

Vilches, M. y Reyes, R. (2023) citando a Calvo (1983). pp 105. menciona: "*no existe el riesgo sin tener presente su trascendencia para el hombre y las modificaciones que este puede introducir. Iniciativa y acción humanas son componentes esenciales de peligro: si no hay población las inundaciones no son riesgos, los terremotos del Terciario tampoco lo son*".

Aún con ello, Aledo, A. y Sulaiman, S. (2023) sobre lo escrito por Mc. Entire, D. A., (2003) define el riesgo como aquel derecho de dominar la naturaleza, otorgando una confianza ilimitada en las ciencias, sumado a los desastres, que Dryzec., (2005) también menciona como carencias o errores del proyecto modernista humano por controlar una naturaleza caótica.

A raíz de dicho conflicto, surgen propuestas orientadas a una mayor construcción social, estrechamente vinculada con la funcionalidad de un sistema como modelo de desarrollo. Entendido de este modo, no todos los desastres condicionarían un verdadero riesgo, sino que las pérdidas generadas tengan una importante incidencia en el funcionamiento del sistema (Aledo, A. y Sulaiman, S. 2023).

Como asegura White, G. F., (1958) el gobierno norteamericano utilizaba sus recursos en construcciones de defensa fluvial, citando a grupos interdisciplinarios de ingenieros, hidrólogos, economistas, psicólogos sociólogos y geógrafos. De dicha visión, Lavell, A. (2001) define el riesgo al considerarlo como un contexto que se caracteriza por la probabilidad de pérdidas y daños en un futuro, teniendo consecuencias que afecten física, psicosocial y culturalmente a la población. Al mismo tiempo se señalaría que los riesgos corresponden a la posibilidad de que territorios y sociedades se vean afectados por fenómenos naturales de rango extraordinario.

La conceptualización de la "sociedad del riesgo", como la presenta Beck (2000), citado por Vilches y Reyes (2023), ha sido fundamental para comprender la naturaleza de los riesgos contemporáneos. Este enfoque destaca la conexión intrínseca entre el riesgo y su construcción social, haciendo hincapié en factores como la vulnerabilidad, la capacidad de anticipación, la supervivencia, la resistencia y la recuperación frente a amenazas específicas en un sector determinado.

La obra de Vera Rodríguez y Albarracín Calderón (2017) contribuye a este marco conceptual al identificar los "pilares" que sustentan la sociedad del riesgo. Estos pilares comprenden dimensiones económicas, políticas, culturales, entre otros, que influyen de manera significativa en la configuración y percepción de los riesgos en la sociedad actual.

En este contexto, la sociedad del riesgo no solo se entiende como una categoría teórica abstracta, sino como un constructo que emerge a partir de condiciones específicas dentro de un sector. Beck, U. (2000), a través de su obra, proporciona herramientas conceptuales que permiten analizar críticamente las dinámicas sociales y los elementos estructurales que contribuyen a la gestión, la respuesta y la adaptación ante los riesgos contemporáneos. La obra de Vilches y Reyes (2023) actúa como un eslabón que conecta las ideas de Beck, U. (2000) con la realidad contextual, profundizando en la aplicación y relevancia de la teoría de la sociedad del riesgo en situaciones concretas.

En Chile, la planificación de riesgos tiene alrededor de 20 años, por este motivo, se ha desarrollado definiciones entorno a ella, tales como; "zonas no edificables, áreas de riesgo u áreas de protección, etc. (Orellana Ossadón, A. et al, 2017).

Espinoza Lizama, E. (2013) opina que, en el caso de los riesgos, dentro del marco jurídico se carece de procedimiento metodológico con el cual establecer de forma segura las zonas de riesgo, por lo que los Planos Reguladores se transforman en instrumentos que delimitan de forma reactiva, con forma predictiva, y a causa de ello las áreas de riesgo carecen de información en zonas latentes a la ocurrencia.

De forma distinta, Fernández, R. & Núñez, E. G, et al., (2002) describe el riesgo como aquella zona que cuenta con características o factores que aumentan la probabilidad de consecuencias adversas, ello con relación a aumentar la probabilidad de que cierto grupo de la población padezca en ciertas circunstancias sin que esto se haya efectuado aún. Por ende, Fernández, R. & Núñez, E. G, et al., (2002) explican que el riesgo es una visión aumentada, es decir un sector o área que se encuentra predicha de que en un futuro acontecerá algún evento perjudicial.

Según la USGS el Riesgo, es la probabilidad de que ocurra una pérdida o el grado esperado de pérdidas, como resultado de la exposición a un peligro (Highland, L. y Bobrowsky, P. 2008). En esta misma postura, Vilches, M. y Reyes, R. (2023) comenta que existen autores que esperan un riesgo de probabilidad u ocurrencia de un peligro, incluyendo la valoración por parte del hombre en cuanto a efectos nocivos de datos que calculan las probabilidades de ocurrencia al contar con datos adecuados.

Por otra parte, existen autores como Aneas de Castro, S. (2000) que reafirman el riesgo como la probabilidad de ocurrencia de peligros, incluyendo a la definición con datos adecuados para calcular de probabilidad. Aun cuando el riesgo pareciera ser un evento que utiliza la probabilidad y lo previsto como conceptos, existen otros autores como Wilches-Chauz, (1993) quienes definen el riesgo como cualquier fenómeno natural o humano generando una alteración en el medio ambiente junto con la comunidad determinada, siendo vulnerable a ese fenómeno”. Los estudios de riesgo implican la integración de factores según modelos y análisis con los que se trabaja, conociéndose como factores, las condicionantes que deben darse para generar un daño esperable, peligrosidad, exposición y vulnerabilidad (Vilches, M. y Reyes, R. 2023).

3.4. Planificación urbana y estudios de riesgo

Cordero Quinzacara, E., (2007) identifica la planificación urbana dentro de los instrumentos de planificación como la fase de ejecución de planes reguladores mediante la parcelación preventiva de las edificaciones, escatimando la legalización de zonas urbanísticas donde su infracción permita efectuar alguna sanción. Por otra parte, la misma planificación urbana consiste en atribuir competencias. Por motivo de este trabajo, existe la administración central que atribuye roles a el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (órgano desconcentrado funcionalmente), Secretarías Regionales Ministeriales de Vivienda y Urbanismo y la Municipalidad.

Para Cordero Quinzacara, E., (2007) los instrumentos de planificación contemplan la legislación urbana Chilena, exponiendo los límites y extensión urbana, además de controlar su intervención por medio de licencias, ordenes de ejecución, ruina, protección de la legalidad urbanística, parcelación e inspección urbanística. En consonancia con ello, Cordero Quinzacara, E., (2007) reflexiona sobre la inviabilidad de un solo instrumento, por lo que se requeriría de diferentes instrumentos sectoriales que cumplan diversos objetivos.

Una de las áreas de estudio que considera el Plan regulador Comunal (PRC) son la *Evaluación de Riesgos*, conteniendo los estudios de peligro, donde se exponen las cartas de peligrosidad producida en la etapa de diagnóstico actualizado, orquestado por un equipo de especialistas.

Son las *cartas de Riesgos Naturales*, los instrumentos utilizados para representar los levantamientos generando una cartografía de zonas de riesgo, la cual proporciona resultados de identificación de rangos de riesgo estudiados (SEREMI. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014).

Dentro de la materia de especialización, Cordero Quinzacara, E., (2007) manifiesta que existen algunas dificultades al momento de elaboración de algún instrumento, así como su ejecución, surgiendo diferencias de intereses y competencias públicas.

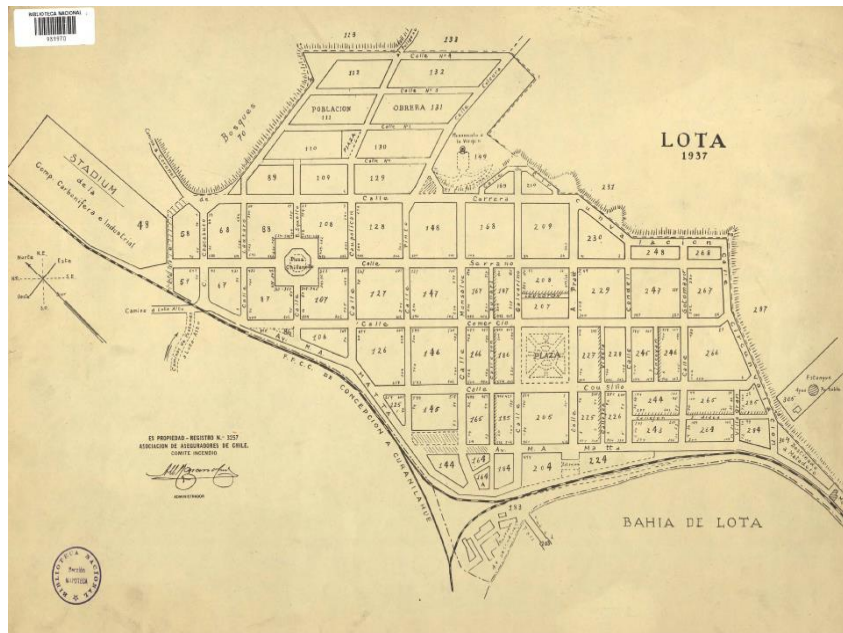
De similar forma Espinoza Lizama, C. (2013) cree firmemente en la importancia de la integración de herramientas técnicas ante riesgos dentro de la planificación, obteniendo la más completa información científica, para detener el sentido de incertidumbre de la población.

Motivado por ello, la Subsecretaría de Desarrollo Regional., (Minvu. 2010) alerta que debe existir una participación informada en su realización, definiendo las perspectivas de desarrollo, como un proceso de gestión territorial y de proyectos.

Al encontrarse la planificación urbana comunal dentro de un marco legislativo, la Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcción en su Artículo 41° entiende; *Planificación Urbana*, como aquel instrumento que incentiva y guía el desarrollo armónico del territorio comunal, paralelo a la dirección de las metas regionales y las dimensiones económicas y sociales predeterminadas. Hasta la última actualización de los archivos de zonificación de uso de suelo, para la construcción y uso de residencias, tanto en las zonas costeras de Colcura, como en pendientes (Minvu 2022), la zonificación no solo contempla áreas urbanas sino algunas restringidas (**Ver Figura. 6**)

El territorio, posee una dimensión espacial y temporal por lo que los instrumentos de planificación territorial utilizando los Sistemas de información Geográfica (SIG), constituyen una herramienta indispensable para la representación, e integración de la modelación de variables espaciales de interés junto a la gestión de un espacio geográfico determinado. De este modo los mapas reflejan áreas de conflicto de intereses, zonificando regiones en áreas orientadas a la sustentabilidad ambiental y los riesgos (Minvu. 2010).

- **Figura 3.** Plan regulador, Lota 1937

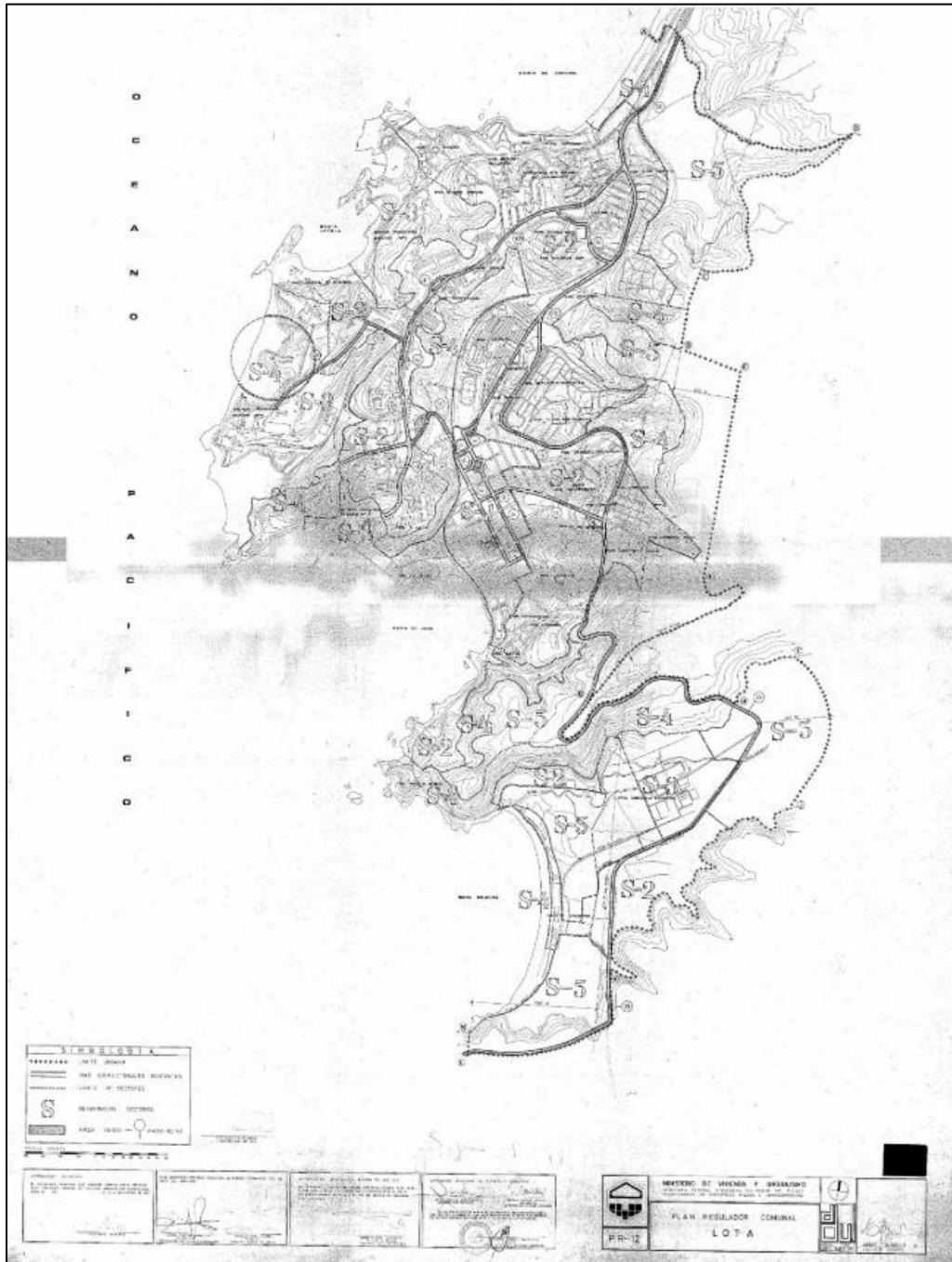


Fuente: Mapoteca. 2015

Conforme a lo expuesto por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu, 2014), el Plan Regulador emerge como un instrumento esencial en la contribución a la gestión integral del riesgo. Se destaca especialmente cuando la legislación incorpora nuevos fenómenos que previamente no habían sido considerados, pero que conllevan potenciales riesgos para la población.

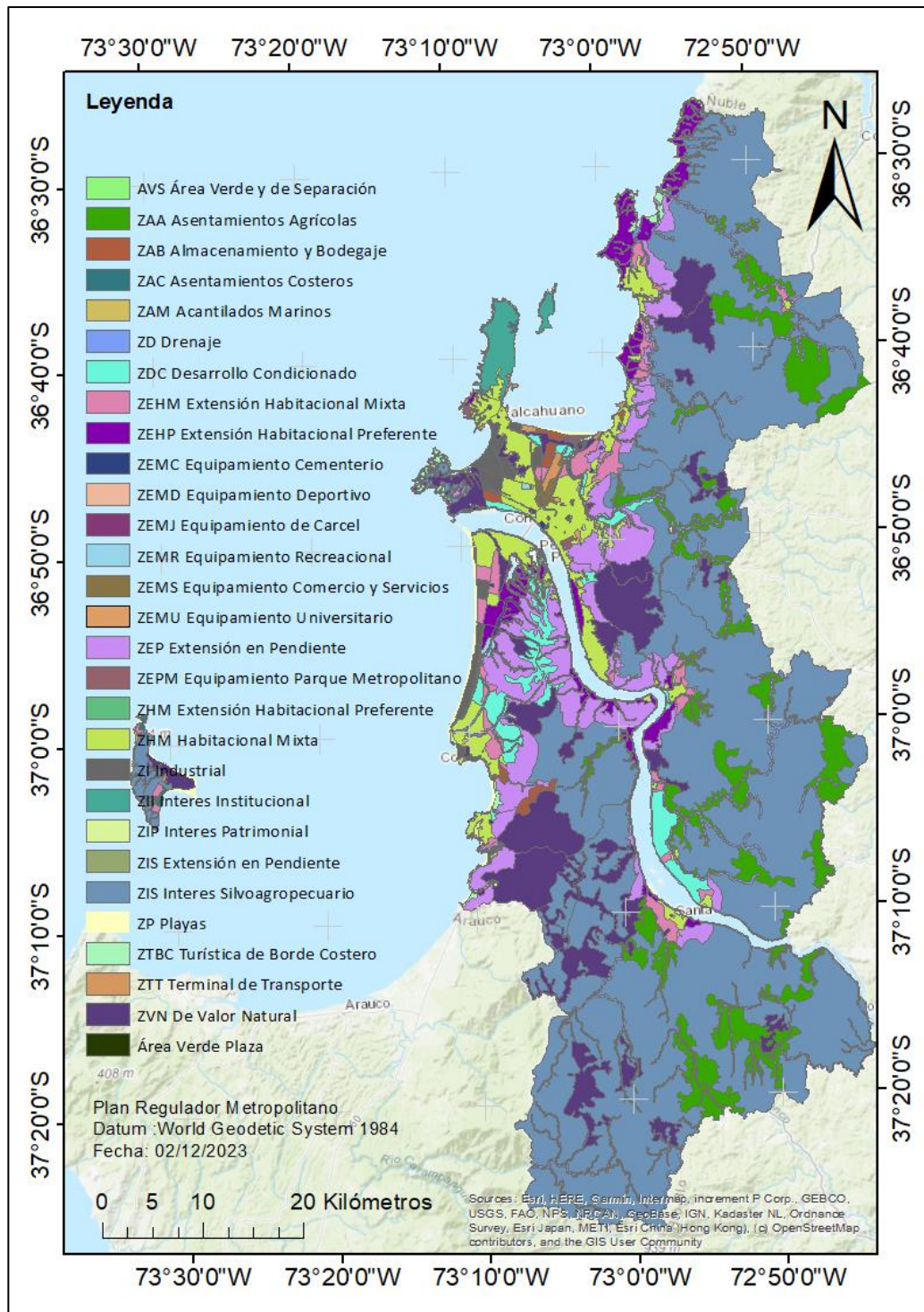
El Primer Plan regulador de la comuna de Lota, corresponde a el año 1937 (**Ver Figura. 3**), siendo reemplazada por la constitución de un PRC de Lota en 1982 realizándose en una proyección 1:5000 (**Ver Figura. 4**), y para 2003 un Plan regulador Metropolitano de 2003 (**Ver Figura.5**), aprobado en 1949 y teniendo 11 modificaciones, como parte del territorio se encuentra vigente en superficies totales aproximadas de 2.800 Km², caracterizando a el sistema urbano de Lota por un territorio metropolitano, restringido y acotado dadas las condiciones naturales, se estructuran por cuanto se lo permite el relieve accidentado, con sistemas de franjas montañosas discontinuas.

- **Figura 4.** Plan regulador de 1982 (Publicado en el Diario Oficial. 1981 del Decreto N° 141)



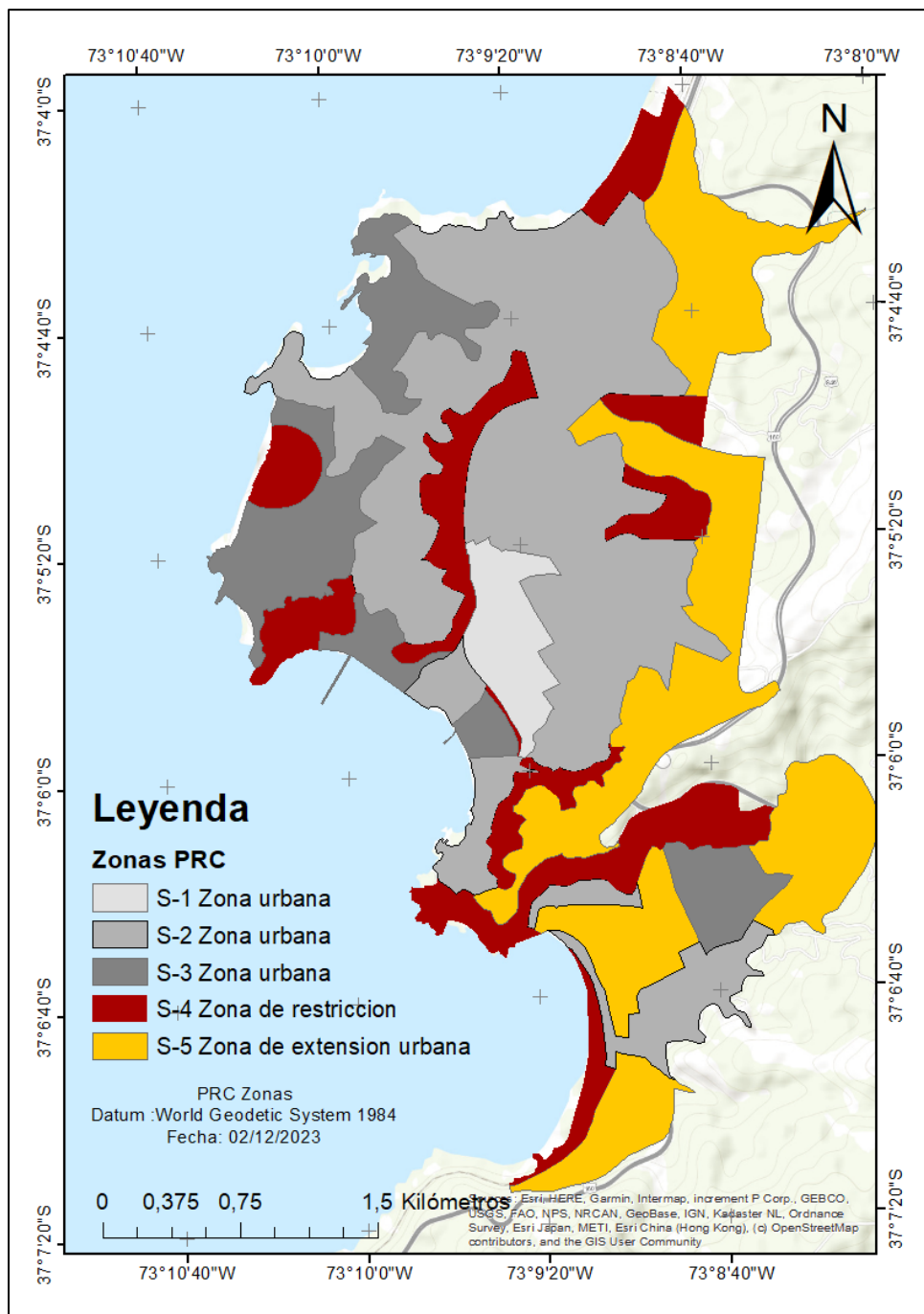
*Fuente: Biblioteca Nacional de Chile.
Departamento de Urbanización y construcción, 1982.*

- **Figura 5.** Plan Regulador Metropolitano de Concepción, (2003)



Fuente: Elaboración propia a partir de Minvu.

- **Figura 6.** Mapa de Zonificación del Plan Regulador Comunal., (Actual., 2022)



Fuente: Elaboración propia a partir de IDE Minvu / Instrumentos de planificación territorial.

3.4.1 Modelación para Amenazas de Remoción en masa de 2010, Laboratorio de Estudios Urbanos, (LEU) (Universidad del Bío-Bío).

La confección de la evaluación de riesgos por remoción en masa el 29 de Noviembre del 2010, fue llevada a cabo por el Laboratorio de Estudios Urbanos (LEU, (2010), como respuesta a la identificación de áreas particulares que acogen concentraciones residenciales significativas. El propósito fundamental de dicho estudio se centra en discernir los sectores que presentan una mayor susceptibilidad a las remociones en masa en la mencionada fecha siendo utilizado en el Estudios de Riesgos y Protección ambiental de 2014. Es por medio de su modelación de susceptibilidad, que contempla algunas variables como la exposición, vegetación, suelos y geología. Su metodología basada en autores, tales como; Ayala-Carcedo y Corominas, (2003) adquieren una metodología de mapeo geotécnico, constando de una evaluación de coeficientes de rebote y conocimiento de energía dinámicas.

Para la obtención de datos recurrieron a la recopilación de base de datos tales como: Mideplan, Conaf, Ciren, Quirckbird, Mapa Geológico de Chile y SERNAGEOMIN.

En este tipo de estudio, su metodología se basó en un diagnóstico de antecedentes y estudios desarrollados en terreno de las remociones en masa de la comuna de Lota complementada con una revisión bibliográfica. Para la segunda etapa se llevó a cabo por medio de la evaluación multicriterio utilizando información importante y relacionada con el tipo de fenómenos, por último, se generó una carta de susceptibilidad de remoción en masa. El análisis de metodológico que se utilizó en dicha propuesta materializó formas de mapa de susceptibilidad y se basó en el principio geológico de actualismo con un comportamiento futuro de laderas siguiendo pautas similares a las del presente, con situaciones geológicas, geomorfológicos e hidrológicos de inestabilidad.

Para el caso mencionado, por medio de Sistemas de información geográfico utiliza herramientas de ordenamiento de algoritmo ModelBuilder combinando variables y un Weighted Overlay (Superposición ponderada) con lo cual es posible tanto combinar u superponer capas de información geográfica, con una resolución espacial de 2,5 x 2,5 en una escala de 1: 10.000 mediante una metodología Multi-Criterio.

Para la inventarización, el Laboratorio de Estudios Urbano LEU (2010), buscó reconocer remociones en masa, caídas de escombros y flujos de barro aplicando el método de fotointerpretación, utilizando fotos aéreas pancromáticas a escala 1:20.000, otorgados por el servicio Aerofotogramétrico (SAF).

Para la ejecución de la suma de variables, implementaron la sumatoria lineal ponderada: citando autores como:

Fórmula 6: sumatoria lineal ponderada

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

Fuente: Laboratorio de Estudios Urbanos (LEU) 2010.

Donde: r_i es la aptitud de la alternativa,

w_j el peso del criterio o factor j

v_{ij} el valor ponderado de la alternativa en el criterio o factor

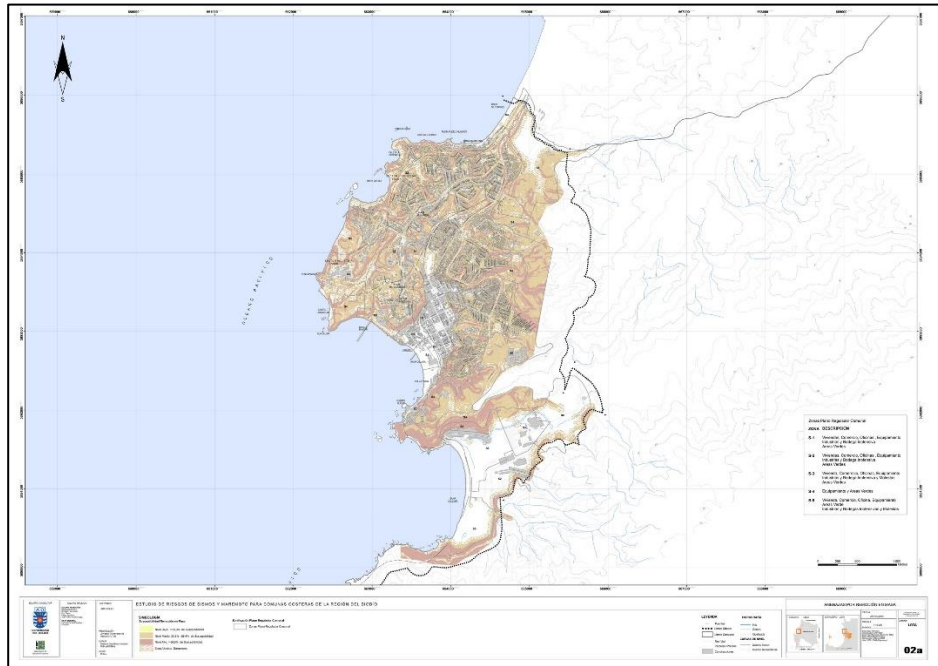
El mapa de susceptibilidad de LEU logra zonificar áreas de nivel alto y medio, haciendo responsables la incidencia de la pendiente en los niveles de amenaza.

Una de las características más importantes, es la modelización se caracteriza en que cada factor tiene una relevancia diferente al momento de zonificar la susceptibilidad (Mora. C & Varshon, W.G. 1994). Con lo cual los datos obtenidos se vinculan con cada sector del mapa ajustándose a una escala de 0 a 3 y ciertas áreas del mapa con excepciones lo que significa que pueden afectar la posibilidad de fenómenos. Junto con ello, el mapa de susceptibilidad realizado por LEU, consigue reconocer el posible desplazamiento del material, por medio de la estimación del Run-out, basándose en lo estimado por Glade, T., Anderson, M. G., & Crozier, M. J. (2005).

Es por ello por lo que posteriormente, se llevaron a a cabo el método Jerárquico analítico de acuerdo con el modelo presentado esta vez por Saaty, T. L., (2005) requiriendo la valoración comparativa e importancia entre pares. Dicho método, requiere de la valoración de comparativa entre pares, indicando cual es la importancia de factores en una escala del 1 al 9 donde 9 es mayor importancia y 1 es igual importancia a fin de clasificar por importancia las variables.

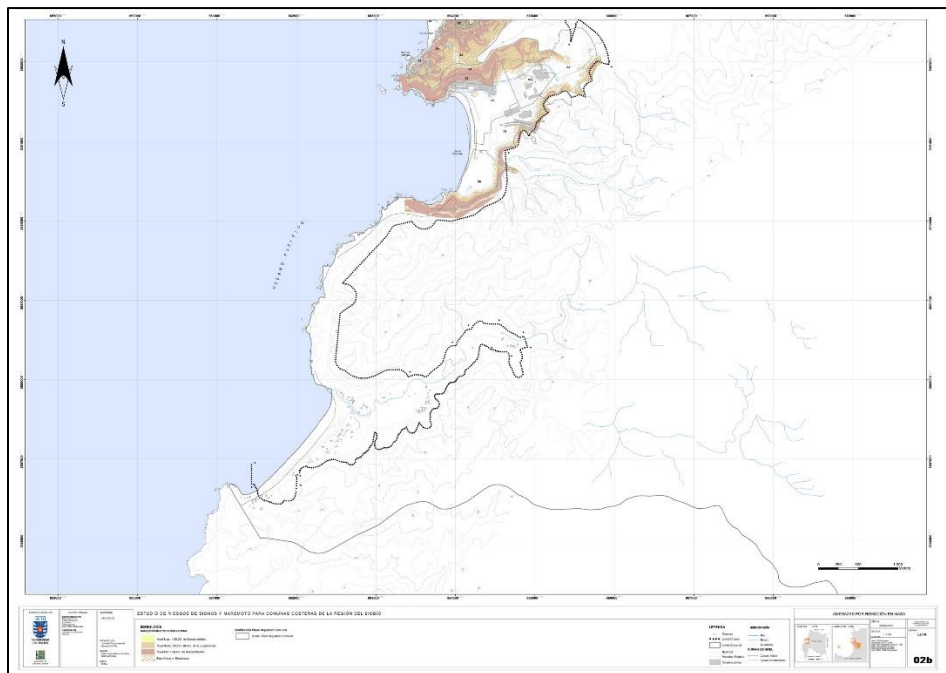
Se sumó el valor de cada una de las variables normalizándose para posteriormente llevar las coberturas a booleanas, es decir una normalización de valores para cada celda entre 0 a 1 de cada criterio. Como resultado se generó un mapa de susceptibilidad con valores de nivel de bajo, medio y alto (**Ver Figuras 7 y 8**).

- **Figura 7.** Modelo de amenaza por remoción en masa de la comuna de Lota.



Fuente: Laboratorio de Estudios Urbanos, Universidad del Bío-Bío, 2010.

Figura 8. Modelo de remoción en masa en sector Colcura-



Fuente: LEU Laboratorio de Estudios Urbanos, Universidad del Bío-Bío. 2010.

Según los estudios de LEU, (2010) el Plan Regulador Metropolitano Comunal (PRMC) regula el borde costero debido a la presencia de acantilados marinos. En cambio, la zona norte del área representada se extiende a una zona habitacional preferente.

(Color amarillo) Los niveles más bajos: <33,3% de Susceptibilidad.

(Color naranja) Niveles Medio: 33.3% - 66.6% de Susceptibilidad, con un alcance de 25 metros.

(Color rojizo) Niveles Alto: > 66.6% de Susceptibilidad con un alcance de 50 metros.

El color anaranjado: corresponde a zonas con alta posibilidad de remociones con mayor grado de pendiente (35°) presentando mayormente deslizamientos rotacionales, flujos y caídas de rocas. Con respecto al Plano Regulador Comunal desde 1983 zonifica el área de S-2, correspondiente a El Morro, habilitada para la construcción de viviendas, comercio, oficina, equipamiento, bodega y área verde, aun cuando la prescripción de carta de riesgo 2010, (**Figura. 10**) señalizada como de alto riesgo, mantiene un enfoque dirigido hacia los emplazamientos post Terremoto, cuyo principal objetivo según la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) es definir aquellos peligros reales o potenciales del emplazamiento humano (Municipalidad de Lota, 2018).

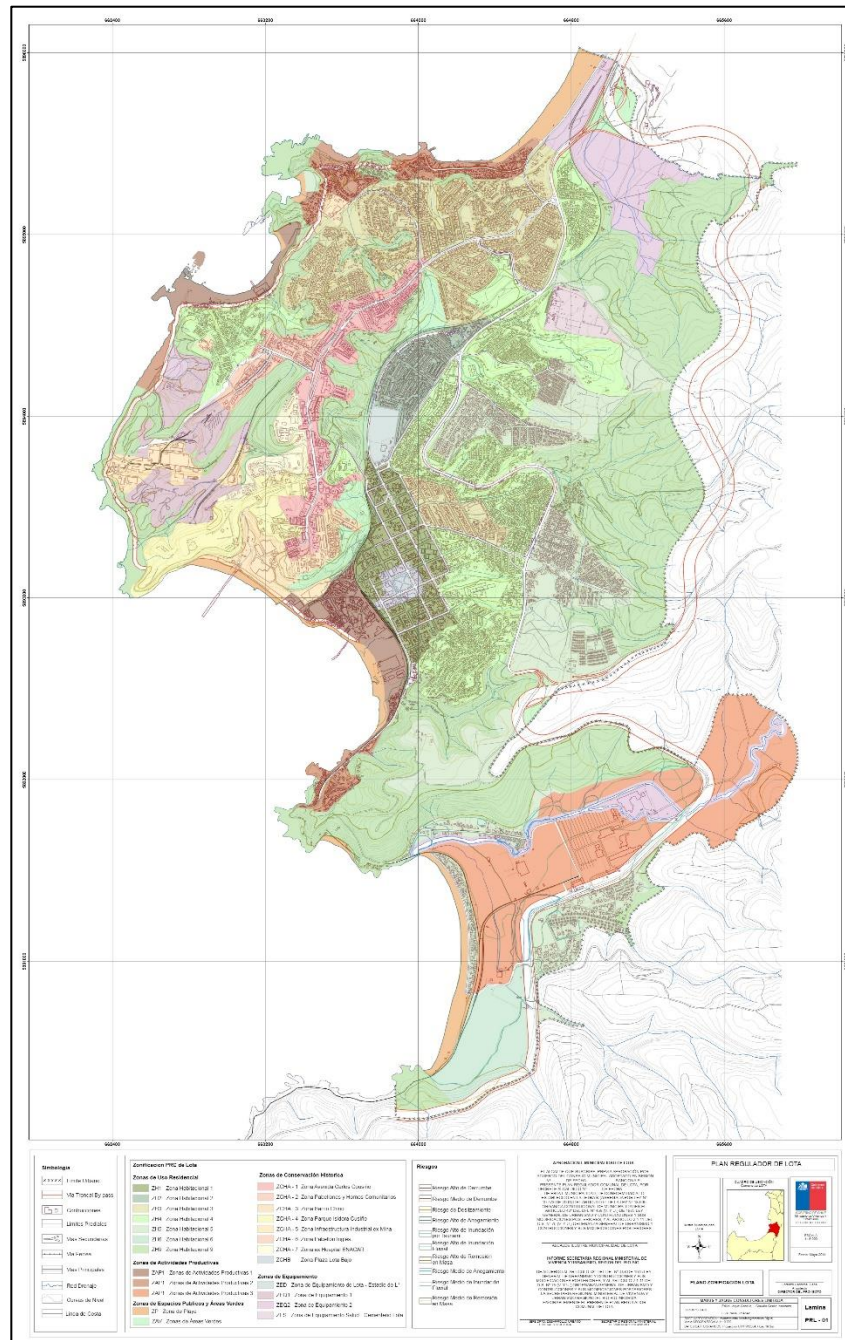
3.4.2 Propuesta de Plan regulador de la comuna de Lota, 2011

Realizado en mayo de 2011, la Municipalidad de Lota realizó una propuesta de Plan regulador (**Ver. Figura. 9**) según lo establecido en la Ley N° 19.778 de 2001 artículo 5° de la Ley 18.695 de la Constitución de Municipalidades el artículo 43°, buscando determinar nuevamente la zonificación de espacios a través del levantamiento Aero fotogramétrico Digital. En él se zonificó en diferentes usos de suelo tales como:

- Zona de Uso Residencial.
- Zona de Conservación Histórica.
- Zona de Actividades Productiva.
- Zonas de Equipamiento.
- Zona de Espacios Públicos y Áreas verdes.

Si bien un Plan Regulador no forma parte de los instrumentos ante amenaza de manera estricta, dicho instrumento propuesto incorporó la delimitación de sectores que presenten riesgos a deslizamientos, derrumbes, inundaciones, remociones en masa y anegamiento.

- **Figura. 9** Propuesta de Plan regulador comunal de la comunal de Lota (2011)

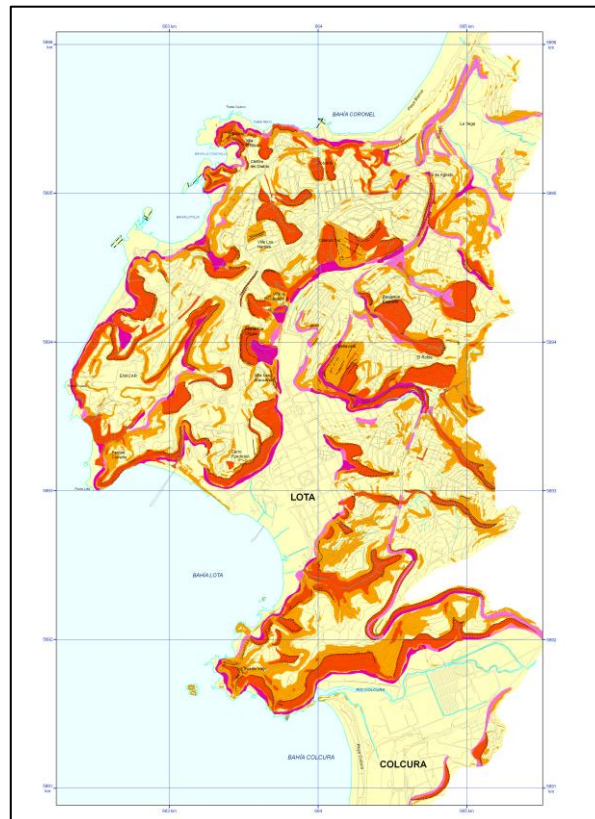


Fuente: Ilustre Municipalidad de Lota. Jaque, E. et al 2011

3.4.3. Mapa de susceptibilidad de SERNAGEOMIN, 2010.

Del mismo modo en la Actualización del plan de desarrollo Comunal (2014-2016), se enfatizó en los deslizamientos de áreas centrales al plano urbano, presentando una geomorfología elevada en sectores como Villas Las Araucarias, Villa Monte Los Olivos, Villa Ilusión y Villa Ricardo Lagos, (**Ver Figuras 11**) zonificando áreas de peligro por colapso de pendientes todas principalmente en zonas centrales, las cuales considera un estudio de zonificación de áreas de riesgo.

- **Figura 10.** Mapa de peligro de remoción en masa Lota, SERNAGEOMIN. 2010

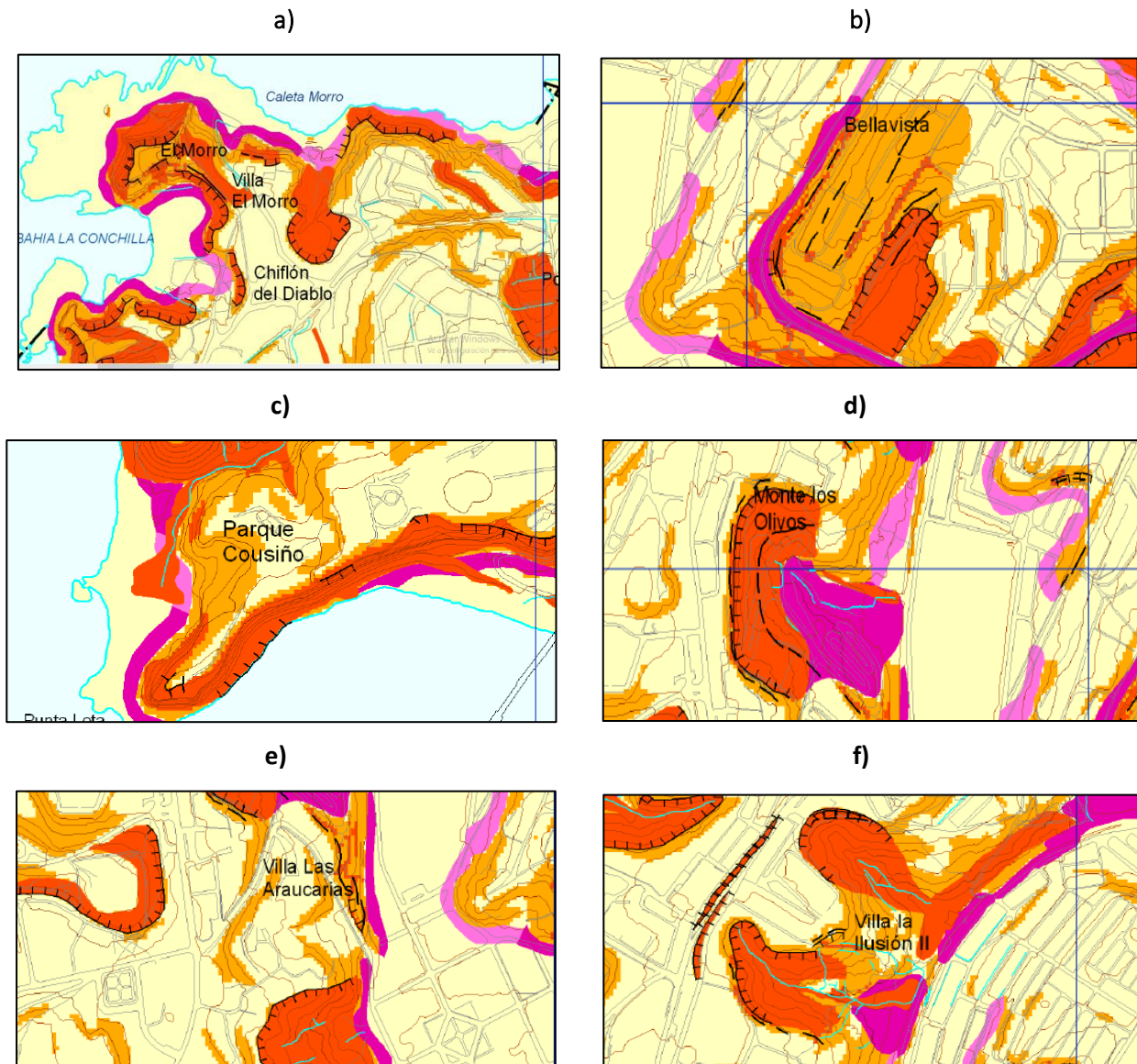


Fuente: Elaborado por SERNAGEOMIN, 2010.

Uno de los métodos con los cuales se han realizado la identificación áreas de riesgo, es el uso de antiguos mapeos utilizados en nuevas actualizaciones de amenaza por remoción en masa, como se evidencia en la Actualización del Plan de Desarrollo Comunal 2016-2020, reciclando la cartografía de susceptibilidad perteneciente a Sernageomin realizada en 2010, y utilizando la metodología de Soeters, R., y Van Westen, C. J. (1996), que considera como variables importantes para el sector, la geología, pendientes, uso de suelo

y catastro de remociones del año, actuales y antiguas por medio de un levantamiento foto intepretativo, e identificando las remociones en masa correspondientes a las remociones ocurridas el 27 de febrero de 2010 y movimientos por actividad minera. De este modo, las remociones visibles en las imágenes de satélite conseguidas por prácticas de teledetección fueron utilizadas para diseñar como producto final un mapa de susceptibilidad que concentra en remociones en masa, pero a la vez se enfoca en la activación de laderas por sismos, excluyendo otros detonantes.

- **Figura 11.** Sectores de Lota identificados en mapa de susceptibilidad de Sernageomin 2010



Fuente: Elaborado por SERNAGEOMIN, 2010. **a)** Villa el Morro **b)** Bella Vista **c)** Parque Cousiño **d)** Monte los Olivos **e)** Villa las Araucarias **f)** Villa la Ilusión II.

3.5. Inventarios de Remoción en masa.

Los inventarios de Remoción en masa (RM) pueden ser generados de diferentes maneras, en algunos casos llevando a cabo un análisis de fotointerpretación aérea, apareciendo un estudio de variables cualitativa que incluye un análisis de susceptibilidad, el cual luego puede ser clasificados por tipo de movimiento y sus partes (superficie de rotura, cabezal, pie, escalón, etc.) (Hernández, J. M. A., et al. 2012).

Gill, M. et al., (2006) menciona el reconocimiento de deslizamientos obteniendo una compilación de diferentes escalas, que utiliza una variedad de técnicas de fotografía aérea estereoscópica, junto a cartografía de campo geomorfológico, investigaciones de pendientes y el examen de archivos históricos.

Gill, M. et al., (2006) aclara que los inventarios pueden tener diversos fines en unas investigaciones, que van desde exponer la ubicación de deslizamientos de tierra en una cierta región determinada, los efectos desencadenantes de deslizamientos en un único evento, así como determinar la frecuencia con que un área de falla de taludes permite modelos de deslizamiento con estimaciones importantes.

Para ello, se ha establecido que es de suma importancia no solo obtener los datos de un inventario sino validar que estos inventarios, estableciendo la calidad de mapas de deslizamiento de tierra multitemporal y determinando la calidad del inventario.

En base a ello Gillm, M. et al., (2006) citando a diversos autores (Pelletier et al., 1997; Stark y Hovius, 2001; Guzzetti, F. et al., 2002; Brardinoni, F. et al., 2003; Guthrie y Evans, 2004a, 2004b; Malamud B. D. et al., 2004) han comprobado que en las áreas en donde existe mayor concentración de remociones, distribuye remociones en masa empíricas de deslizamientos y distribuyendo el área total utilizando la densidad de probabilidad.

4. Metodología

4.1 Enfoque metodológico

Para la presente investigación, se llevó a cabo la evaluación crítica de un modelo de riesgo para la comuna, generando una nueva propuesta de modelo con el cual contrastar resultados. Con este fin se realizó una investigación de fuentes bibliográficas de diversas fuentes tales como informes de Servicio Nacional de Geología y Minería y consulta por instrumentos de planificación actuales. Para la realización de la nueva propuesta, se generaron factores condicionantes que se relacionen con el aumento en la susceptibilidad de remociones en masa, obtenidos principalmente desde un Modelo digital de elevación (DEM) el cual a través de un Sistema de información Geográfico se llevó a cabo su digitalización.

En terreno, se reconocieron las zonas específicas con fuertes pendientes a cercanías de áreas de residencia, identificando la presencia de factores condicionantes en los sectores, y tomando registro fotográfico (**Ver anexo. 2**). De este modo, se hará posible a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG), concretar la zonificación y análisis de susceptibilidad, con el fin de obtener una herramienta con enfoque probabilístico, además de una propuesta comparativa de los antiguos instrumentos cartográficos del riesgo de susceptibilidades de remociones en masa, dentro de la propuesta de comparación, analizando la discusión de áreas con susceptibilidad.

4.1.1 Área de estudio

La comuna de Lota se encuentra ubicada en la región del Bío Bío y pertenece a la provincia de Concepción. Su superficie se encuentra alrededor de los 135.8 km^2 , representando una superficie total de 0,018% del país, a la vez que 0.37% de la superficie regional (Minvu. 2010).

Según lo informado por la actualización del Plano Regulador Comunal (2010 - 2016), su superficie predominante es rural, con un 90% de la superficie identificada como bosques destinados a la explotación comercial, predominantemente de pinos insignes y eucaliptos, los cuales son contrastados con el otro 10% de superficie orientada a un uso urbano.

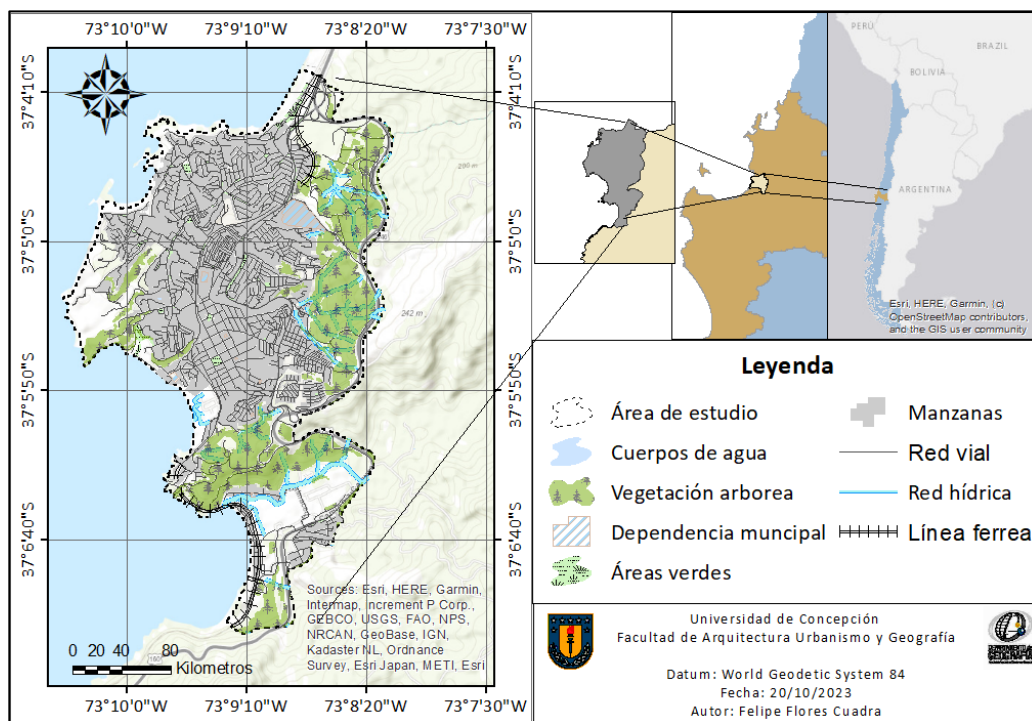
Tanto su área urbana como alrededores han conseguido una población de $361.48 \text{ Hab}/\text{km}^2$, creando con ello, una planificación que no se ha encontrado exenta de limitantes para su planificación territorial, destacando así los riesgos de carácter antrópico, así como los naturales, lo cual abre pasó a la zonificación de la peligrosidad y amenaza dentro de los instrumentos de planificación (Secretaría Regional Ministerial MINVU VIII Región., 2010).

Lota se encuentra en una transición demográfica, donde el número de habitantes y viviendas puede cambiar de año en año. Ligado a ello, el Censo de 2002 se calculó con alrededor de 49.098 habitantes en la comuna, disminuyendo la cifra para el año 2012 con 47.264 habitantes dentro de sus límites además de alertarse de la disminución de niveles de mortalidad y natalidad para el siglo XX. A raíz de ello, el envejecimiento de la población se ha proyectado para el 2050, con una población de 60 años de un 30%. La cifra según lo estimado por la Biblioteca Nacional (n.d) no habría cambiado:

- Año 2015 para 47.821 habitantes
- Año 2017 para 43.535 hab
- Año 2021 con 45.672 hab
- Y en el año 2023 una proyección de 45.490 hab (Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile, n.d).

Sobre ello, especifica la Evaluación de riesgo de 2010 una dinámica urbana expansiva, llevando consigo una fórmula urbana que cuenta con riesgos naturales junto con una localización costera frente a cursos de agua altamente erosionadas que promueven inundaciones o deslizamientos de tierra (Secretaría Regional Ministerial MINVU VIII Región. 2010)

Figura 12. Área de estudio

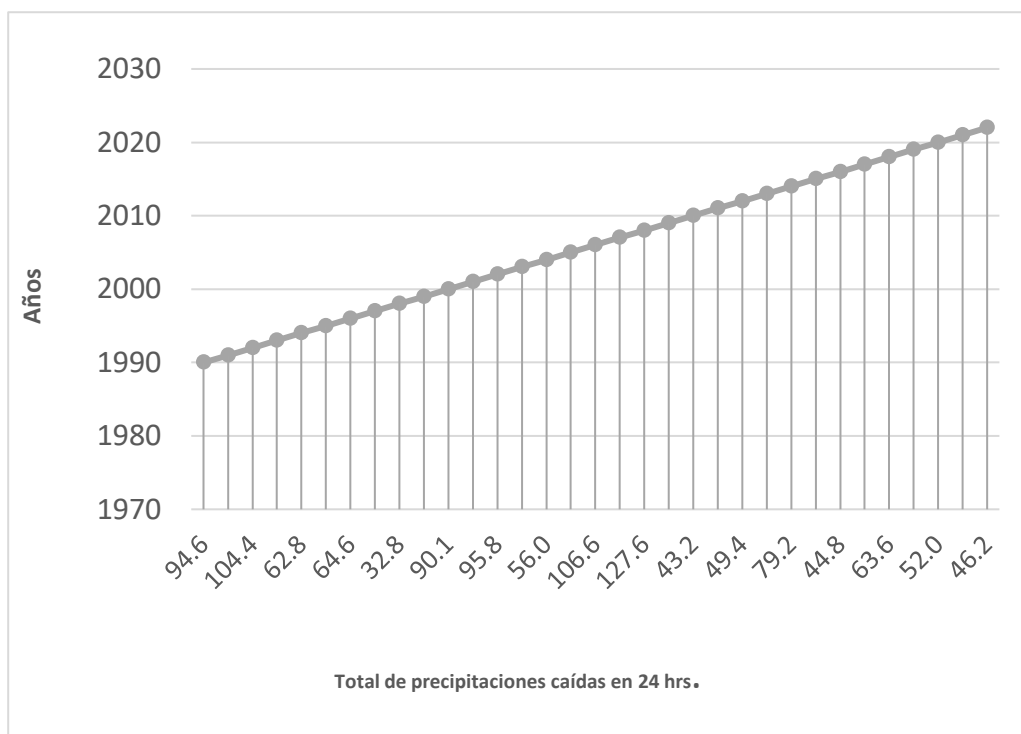


Fuente: Elaboración propia a partir de información espacial de Minvu. (2013)

4.1.2. Hidrogeología de la comuna de Lota

Las condiciones climáticas del área evalúan directamente relaciones con la meteorización y erosión de esta, obteniendo factores climáticos considerados de aporte de hidrológico del territorio de remociones en masa, cercanía a caudales, escorrentías, infiltración, posición del nivel freático, así resistencia a suelos, porosidad, e influencia de incorporación de suelos y macizos rocosos. En términos generales, el agua ejerce de manera continua efectos constantes en la resistencia de material (principalmente rocosos de gran granulometría)(Inostroza, D., 2017).

- **Figura 13.** Precipitaciones caídas en 24 hrs por año en Concepción.



Fuente: Dirección Meteorológica de Chile. Estación Carrier Sur.

Uno de los agentes más importantes dentro de la modelación del relieve es el agua, debido a poseer una capacidad incisiva en el material y su resistencia. Pese a ello, para el 2017 no existen estudios previos del cálculo de nivel freático, caracterizándose por una gran infiltración en grietas desde el material rocoso, para periodos de lluvia específicos, siendo llevado a cabo en periodos de lluvias, por lo que se prevé un paisaje en continuo desarrollo por su hidrogeología (Inostroza, D., 2017).

El área estudiada, se encuentra localizada en el área metropolitana de Concepción, lugar considerado una zona de clima templado mediterráneo, con estaciones invernales de precipitaciones copiosas y una variación de estación seca y cálida. Sus episodios de lluvia son excepcionales del sector litoral de Concepción, con anegamientos e inundaciones fluviales asociados a remociones en masa de una alta magnitud (Inostroza, D., 2017).

El clima mediterráneo transicional se ve influenciado por la presencia de anticiclones cálidos durante el verano y por patrones de precipitación concentrados, principalmente, en un lapso de 4 meses, representando un 67% a 75% del total de las lluvias, según se documenta en estudios como el realizado por Romero en 1985. Esta característica climática se atribuye, en gran medida, a la influencia del fenómeno climático ENOS (El Niño – Oscilación del Sur), cuya manifestación en años anteriores ha incidido en la variabilidad climática, evidenciada por tendencias notables en la cantidad de precipitación. Por ejemplo, se observa un aumento significativo en los milímetros caídos en un día, pasando de 115.7 mm en julio de 1978 a 148.9 mm en noviembre y 143.9 mm en junio (Inostroza, D., 2017).

El impacto de las precipitaciones se manifiesta en la cantidad de agua disponible, la cual puede infiltrarse en la pendiente y proporcionar la humedad necesaria para diversas formas de vegetación asociada. En este contexto, autores como Keller, E. A. y Blodgett, H. R. (2004) han examinado los efectos de la estabilidad de las laderas, destacando que estos se manifiestan durante temporadas de lluvias intensas, caracterizadas por saturación del suelo, erosión, infiltración y, consecuentemente, remociones en masa.

Dicho rango se vincula a una acumulación total diaria en el impacto de eventos de precipitación, considerando para algunos autores como (Naranjo et al., 2006) un número de episodios mucho mayor a 24 horas.

En referencia a las masas de aire que circulan dentro del sistema de isobaras, la llegada de un frente puede registrar un mínimo cercano a los 1000 Mb (milibares), acompañado de un núcleo ciclónico considerable y un fuerte gradiente de presión. Estos eventos tienen repercusiones significativas en la Región del Biobío, como detallan Mardones et al. (2004), mayormente cuando el sistema aumenta su cantidad de episodios de 24 horas cada año (**Ver Figura 13**). En el ámbito de las precipitaciones, se destaca su capacidad para elevar el nivel freático subterráneo y generar presión en los poros dentro del área de estudio, como ha sido detallado por Shahabi, H. et al. (2012). Estos investigadores atribuyen estos fenómenos a factores desencadenantes que inciden en la susceptibilidad a remociones, respaldando sus afirmaciones con un análisis exhaustivo de datos de precipitación recopilados en la estación meteorológica correspondiente.

Según Inostroza, D., (2017) su composición litológica, puede encontrarse en sistemas constituidos por 2 series (Serie Oriental y Serie Occidental) localizada en la unidad morfológica de la Cordillera de la Costa,

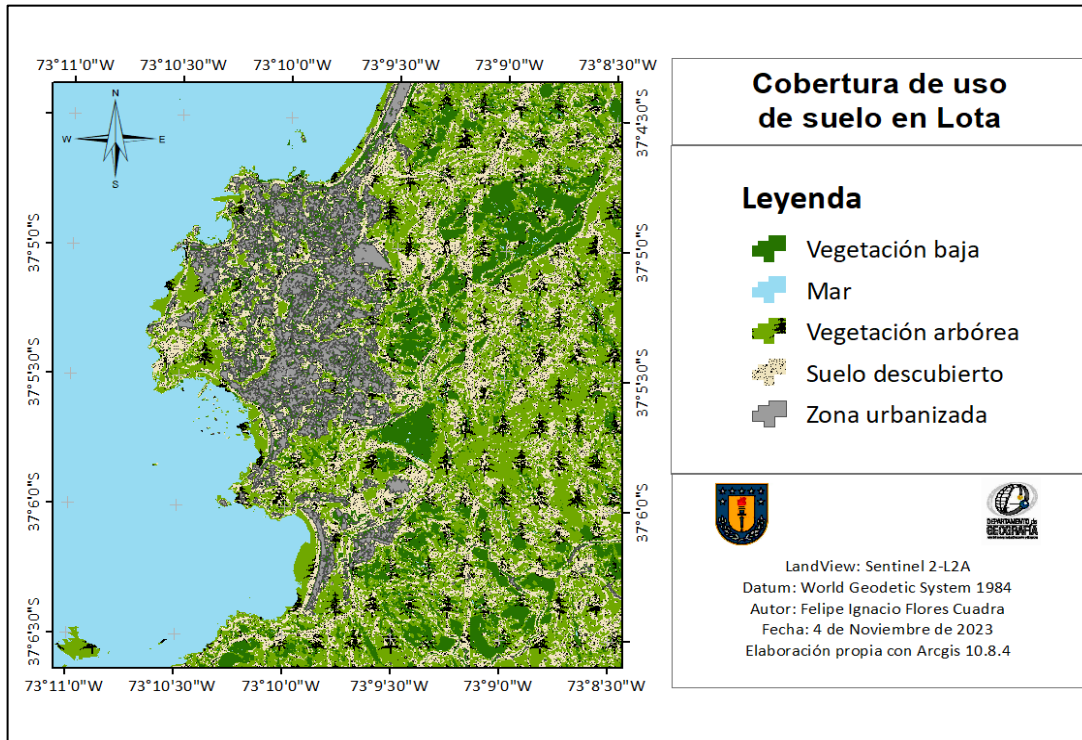
esta última caracterizándose con variedad de litología, mayormente esquisto micáceos, meta basitas y la serie Occidental de alto, compuesta principalmente por protofitos sedimentarios, sometidas a metamorfismo de contacto desde el Pérmico Inferior, donde encontramos Basamentos Metamórficos de la Cordillera de la Costa de la ribera sur del Río Bío-Bío.

Según Inostroza, D., (2017) su composición litológica, puede encontrarse en sistemas constituidos por 2 series (Serie Oriental y Serie Occidental) localizada en la unidad morfológica de la Cordillera de la Costa, esta última caracterizándose con variedad de litología, mayormente esquisto micáceos, meta basitas y la serie Occidental de alto, compuesta principalmente por protofitos sedimentarios, sometidas a metamorfismo de contacto desde el Pérmico Inferior, donde encontramos Basamentos Metamórficos de la Cordillera de la Costa de la ribera sur del Río Bío-Bío.

4.1.3. Vegetación del área de estudio

Caracterizada por tener zonas de taludes, aledañas de sectores de residencia y vegetación principalmente arbórea, concentra áreas verdes, predominando especímenes de Eucalipto. Por lo que variados problemas de estabilidad se asocian a una intensiva deforestación. Según Villagran, C. y Hinojosa, L. F. (1996) su vegetación se debe a la herencia de flora de bosques de Chile, con una resultante integración de sucesivas paleo floras provenientes del Terciarios, sustentando registros de fósiles del Paleógeno. La reconstrucción de su vegetación fue basada en antecedentes paleobotánicos del sur de Sudamérica y Antártida, componiendo 3 taofloras de elementos tropicales asignada a la Paleoflora Neotropical del Cretácico – Paleoceno, con numerosos géneros leñosos con hoja ancha de familias como Myrtaceae, Lauraceae, Sapindaceae, Bignoniaceae, Apocynaceae, Annonaceae, Flacourtiaceae, Boraginaceae, Urticaceae, Flacourtiaceae, Boraginaceae, Urticaceae, Erythroxylaceae, Rubiaceae, Rutaceae, Lecythidaceae, Palmeae y Vochysiaceae los cuales en su mayoría son géneros neotropicales propios de un cinturón climático tropical del hemisferio sur durante Cretácico-Eoceno, alcanzando máximas temperaturas y precipitaciones a niveles globales. Así mismo se encuentra compuesta exclusivamente por una tasa de afinidad tropical o subtropical, de las cuales algunas como Annonaceae y Lauraceae han dejado constancia (Villagran, C. y Hinojosa.L.F., 1996).

- **Figura 14.** Mapa de cobertura de uso de suelo.



Fuente: Séntinel, 2-L2A (2023)

4.2 Método y técnicas:

4.3.1 Metodología de susceptibilidad Frequency Ratio

El modelo de Frequency Ratio, es uno de los modelos probabilístico bivariado ampliamente utilizado por variados investigadores debido a su capacidad de proporcionar áreas con susceptibilidad a la activación de remociones en masa, así como a que no ocurra para atributos determinados. Debido a ello, Tri Dev Acharya y Dong Ha Lee. (2019) sostienen que corresponde a un modelo de aprendizaje automático, requiriendo un número considerable de datos de entrenamiento (datos de inventario de remociones en masa) para una mayor precisión. Además de ello, dicho método consta de la normalización de datos, obteniendo una relación de frecuencia (FR) con la cual a fin de evitar una interrelación mutua entre variables independientes, calcula la Tasa de predicción (PR) calificando a cada uno de los parámetros condicionantes en el conjunto de

entrenamiento. De este modo los datos limitados se utilizaron como modelos probabilísticos constando de un procedimiento simple de suma de parámetro de valores.

Varios autores como Amaliah, R. et al. (2021); Tri Dev Acharya y Dong Ha Lee, (2019); Karim, S., Jalileddin, S., & Ali, M. T. (2011); Khan, H. et al, (2019) calculan el peso de cada parámetro de acuerdo con la relación de frecuencia, y una ecuación establecida mediante un modelo de validación de resultados. Para ello, Rasyid, A. R., et al, (2016) identifica la relación preferida en función de la capacidad de predecir Remociones en masa como lo propuesto por Kannan, M. E. et al, (2013) quien combina el número de píxeles con remociones y los factores causales. La verificación del coeficiente apropiado es calculada mediante el uso de división de datos con deslizamientos y sin deslizamiento (non-landslide). Para la obtención de cada mapa de parámetros Kannan, M. E. et al, (2013) propone utilizar la superposición de subconjunto de datos de entrenamiento representando la ubicación de remociones en masa y el rango de cada factor, de tal manera que exista una distribución del número de los píxeles de ocurrencia por cada clase respectiva a cada uno de los parámetros utilizados. A dicho cálculo, autores como Podudyal et al. (2010), Lepore, C. et al. (2011), Shabanzadeh Karim et al, (2011) le llaman Relación de frecuencia, evaluando la ponderación según el área de remociones en masa y su relación con el área de estudio total expuesto en píxeles.

4.3.2 Aplicación de Metodología

Para la ejecución de modelado se utilizó la versión del Software Arcgis 10.8.2 utilizando un Modelo Digital de Elevación (DEM) (Minvu, 2013) de resolución de 5 x 5 m, producido con la técnica LIDAR proporcionado por el Ministerio de vivienda y urbanismo (Minvu, 2013). Se obtuvieron factores geomorfológicos como la pendiente, curvaturas, orientación de laderas, entre otros parámetros dentro del área de estudio.

Para esta investigación se utilizó el inventario de remociones en masa (RM), elaborado por Grupo de Estudios Multiamenazas del Biobío (2023) el cual se utilizó para conseguir un número de píxeles en el área de estudio. La técnica de Frequency Ratio, es una técnica de análisis y detección de susceptibilidad de remociones en masa probabilística, la cual debido a su simplicidad se ha ejecutado por numerosos autores. Basado en lo propuesto por Harp, E. L. et al., (2011), se asoció cada factor causante o parámetro con la combinación del inventario de deslizamiento. Para ello, al igual que Khan, H. et al, (2019) se buscó conseguir una relación entre el área en donde se produjeron las remociones en masa dentro del área de estudio (**Fig. 16**) asociándose con el área total como resultado del valor 1.

Fórmula 7. Frecuencia Relativa

$$FR = \frac{N_{pix}(LXi) / \sum_{j=1}^m N_{pix}(LXi)}{N_{pix}(x_j) / \sum_{j=1}^n N_{pix}(x_j)}$$

Fuente: Acharya, T. D., & Lee, D. H. (2019)

Donde **FR** es la Frecuencia Relativa, **i** para los parámetros, **N pix (LXi)** el número de píxeles con deslizamiento en una clase **i** la cual forma parte de la variable **(X j)**.

$\sum_{j=1}^m [N_{pix}(Lx_i)]$ Número de píxeles por clase en área de estudio.

m el número de clases que componen una variable (sea pendientes, TWI, curvatura estándar, etc..) en el área de estudio y **n** es el número de variables en el área de estudio. Donde $N_{pix}(x_j)$ es el número total de píxeles con deslizamiento y $\sum_{j=1}^n N_{pix}(x_j)$ como el número total de píxeles en el área de estudio.

Fórmula 8. Relación de Frecuencia

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

Fuente: Acharya, T. D., & Lee, D. H. (2019).

Por consiguiente, la fórmula consta de una división de la Frecuencia relativa por clase **FR_{ij}** dividido por

$\sum_{i=1}^m FR_{ij}$ correspondiente a el total de la sumatoria de todos los FR_{ij} pertenecientes a una variable.

Luego de la normalización, se obtiene una recopilación de datos según cada variable independiente. Para ello se calculó la tasa de predicción (**PR**) entregando una calificación condicionante para el conjunto de datos de entrenamiento.

Fórmula 9. PR. Tasa de predicción

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

Fuente: Acharya & Lee, (2019)

Donde RF_{max} la frecuencia relativa máxima y la RF_{min} frecuencia relativa mínima por cada clase. Los cálculos de cada variable ponderada fueron realizados en una tabla de Excel y la superposición de cada resultado de parámetros trabajando a una escala de 1:25.000, obteniendo para el área de estudio y cada parámetro 692 columnas y 1165 (píxeles) a fin de maximizar la precisión de cada variable obtenida.

- **Tabla 5.** Herramientas y funciones utilizados para la obtención de parámetros.

Variables	Algoritmo	Material	Año
Área de estudio	Spatial Analyst Tools - Extraction - Extract Mask	DEM	2013
Pendiente	Spatial Analyst Tools - Reclassify - Surface - Slope	DEM	2013
Altitud	Spatial Analyst Tools - Reclassify	DEM	2013
Orientación solar	Spatial Analyst Tools - Reclassify - Surface - Aspect - Majority Filter	DEM	2013
NDVI	Extract Mask - Raster Calculator - Reclassify	TIFF	4 de Nov -2023
Geología	Conversion Tools - To Raster - Polygon to Raster	TIFF	2013
Distancia a drenaje	Spatial Analyst Tools - Distance - Euclidean Distance - Reclassify	DEM	2013
Distancia a carreteras	Spatial Analyst Tools - Euclidean Distance - Reclassify	DEM	2013
Distancia a fallas	Spatial Analyst Tools - Euclidean Distance - Reclassify	DEM	2013
Plano de curvatura	Spatial Analyst Tools - Surface - Curvature - Reclassify	DEM	2013
Perfil de curvatura	Spatial Analyst Tools - Surface - Curvature - Reclassify	DEM	2013
Uso de suelo	Conversion Tools - Polygon to Raster - Reclassify	TIFF	2022
TWI	Spatial Analyst Tools - Hydrology - Flow Direction - Flow Accumulation - Raster Calculator - Reclassify	DEM	2013

Fuente: Elaboración propia, 2023

Para el cálculo de ponderado de cada factor y su grado de influencia en el modelo, se obtuvo el Índice de Frecuencia (FR), siendo uno de los modelos mayormente utilizados para zonificar la susceptibilidad por autores tales como, Yang, I. T. et al., (2016), Kayastha, P. (2015), Choi, J. et al., (2012) y Yilmaz, L. (2009). Posterior a ello se realizó un modelo de factor de certeza con el cual se validaron los resultados de susceptibilidad a remociones en masa en el área de estudio por medio de la obtención de datos de entrenamiento y prueba en el modelo.

4.3.3. Preparación de datos de remoción en masa para el área de estudio.

Los datos obtenidos por el Servicio Geológico y Minera (SERNAGEOMIN) son creados de acuerdo con informes con los cuales se catastran informes de remoción en masa, contando con 9 puntos disponibles en su visualizador (**ver Fig.15A**).

Para la obtención de puntos de prueba y entrenamiento se utilizaron los datos vectoriales de remociones en masa obtenidos por el cual consta de reportes de fuentes tanto de SERNAGEOMIN como de redes sociales, artículos periodísticos y catastros en terreno (**Fig. 15B**) recopilados por el Grupo de Estudio Multiamenaza de BioBío.

Para su uso en la metodología, se dividieron los puntos y se utilizó la herramienta *SVM-LSM* de Huang, W., et al, (2022), en su función *Non-Landslide* con la cual se separaron 47 puntos (**ver Fig. 15B**) dentro del área de estudio a una distancia de 1 km. Posterior a ello, con la herramienta de *Geoestatistical Analyst – Subset Features* se reagruparon los puntos en razón 7:3 con un 70% de datos de entrenamiento con el cual se calculó la exactitud y 30% para datos de prueba para la predicción del modelo como lo indica Huang, W., et al., (2022). Como resultado, se produjeron inventarios de datos de entrada vectoriales dentro del área de estudio (**Ver Figura. 16**).

- **Figuras 15.** Mapas de inventarios

Figura 15. A) Puntos de RM Sernageomin (2023)

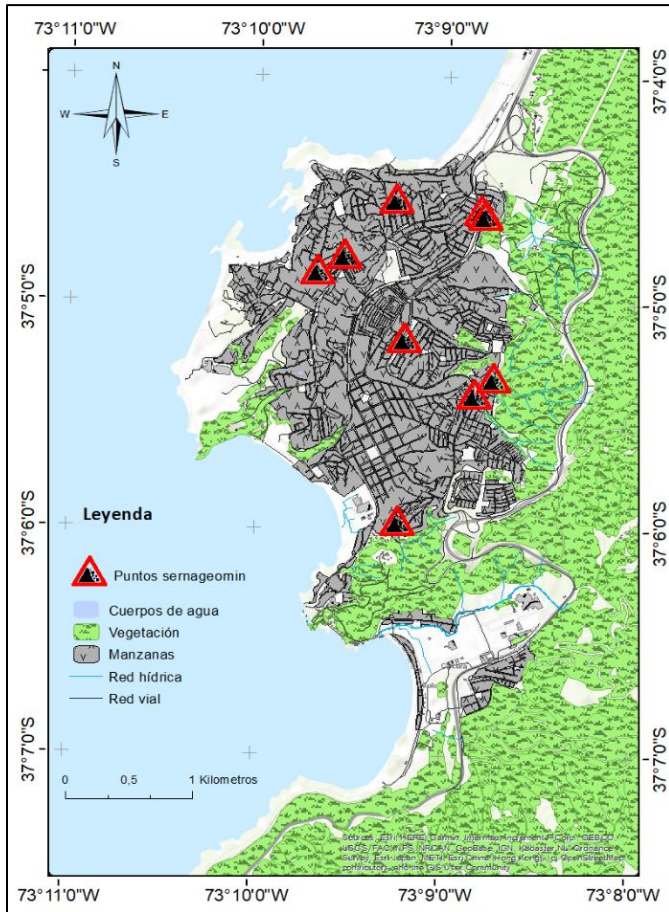
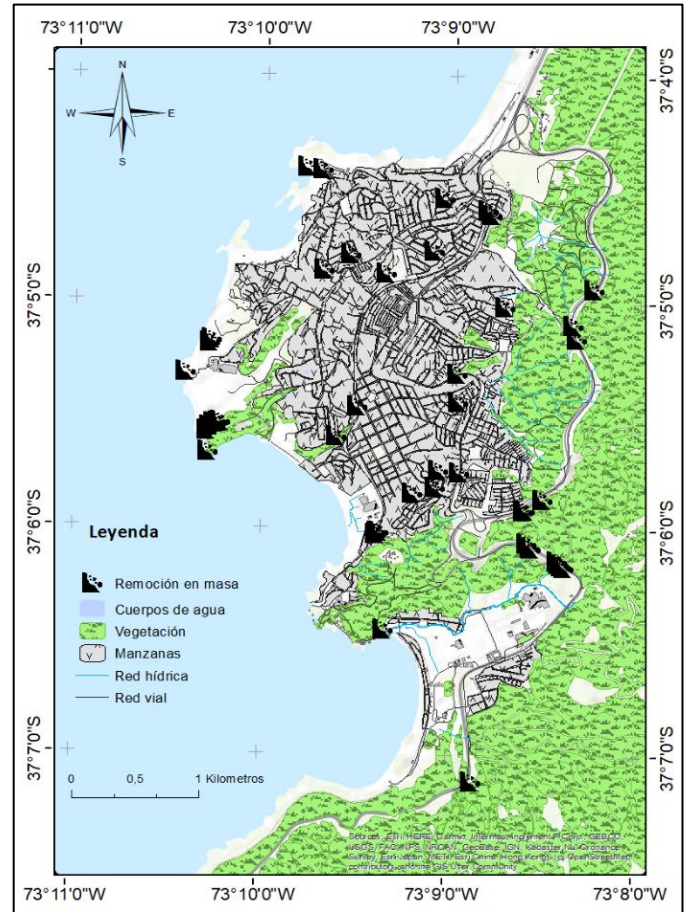


Figura 15. B) Puntos G. de Estudio Multiamenaza(2023)



Fuente: Inventarios de RM (a) Sitio web de Sernageomin (b) Inventario elaborado por Grupo de estudios Multiamenaza Bío-Bío. 2023

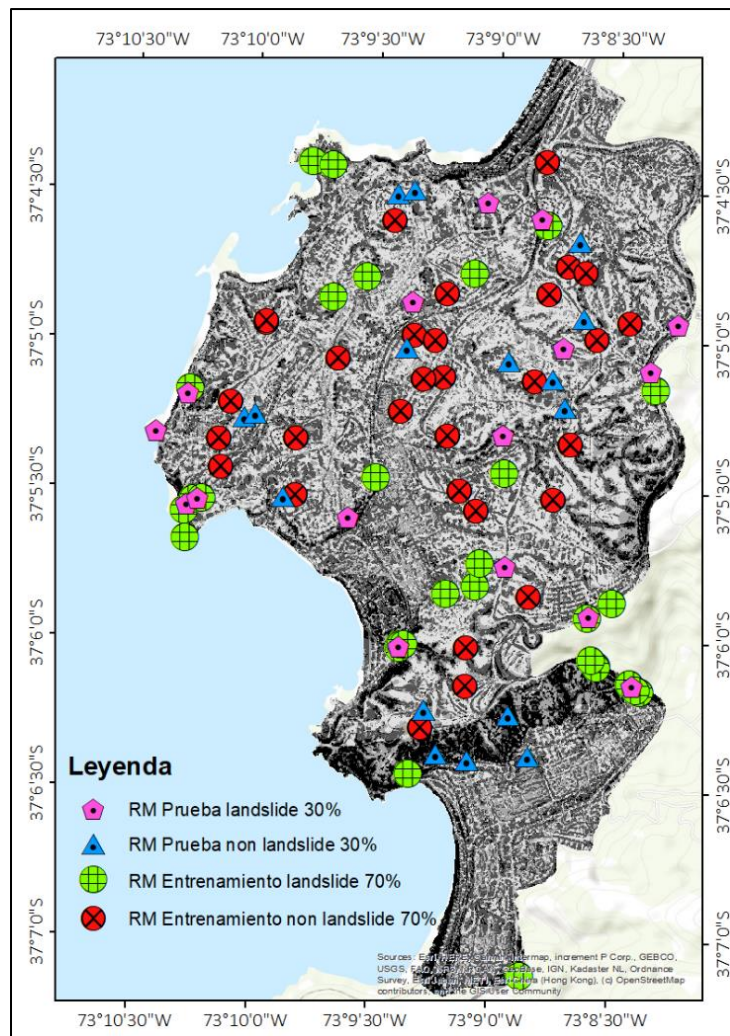
4.3.4. Inventario de tipos de datos de deslizamientos utilizados

Los datos utilizados en el cálculo de la susceptibilidad fueron recopilados en formato de puntos shape file por el Grupo de Estudio Multiamenaza del Bío-Bío (2023). Estos datos provienen de fuentes como Sernageomin, artículos periodísticos y prensa digital. Dicha base de datos sigue una relación bivariada, asignando el valor 1 para áreas propensas a remociones en masa y 0 para zonas sin antecedentes de este fenómeno.

El uso de estos datos permitirá identificar con precisión las instancias de remociones en masa que han ocurrido, alineándolas con el nivel de susceptibilidad. Además, se incorporaron datos seleccionados aleatoriamente en un radio de al menos 1 km.

En cuanto a las Regiones de Muestra (RM) utilizadas en el entrenamiento, estas representan el 70% del total de 47 puntos disponibles (31 puntos). El 30% (16 puntos) restante se apartaron específicamente para el desarrollo del modelo, asegurando así un proceso robusto y confiable.

- **Figura 16.** Mapa de puntos de entrenamiento y prueba.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados por Grupo de Estudio Multiamenaza del Bio-Bío. (2023)

4.4. Evaluación de mapas de susceptibilidad

En el marco de esta investigación, se llevó a cabo una evaluación básica de los mapas de susceptibilidad propuestos para el área de estudio. Con el objetivo de garantizar un análisis objetivo, se implementó un enfoque metodológico que incorpora las críticas más relevantes formuladas por algunos académicos en el campo de la evaluación de modelos de susceptibilidad. Este proceso se tradujo en la construcción de una tabla de evaluación, donde se asignaron puntajes de 0 (no cumple), 0,5 (cumplimiento parcial) y 1 (cumple) a cada una de las observaciones consideradas.

La ponderación de puntajes se llevó a cabo con el propósito de reflejar fielmente las dimensiones críticas identificadas por la literatura especializada. Al emplear esta metodología, se buscó otorgar una calificación a cada mapa de susceptibilidad, destacando las fortalezas y debilidades de cada enfoque.

La sumatoria de puntajes proporcionó una calificación final para cada mapa, ofreciendo así una evaluación cuantitativa que permite obtener una percepción inicial sobre el estado de eficacia y fiabilidad de cada modelo en consideración. Este enfoque metodológico, basado en la objetividad y la consideración de las críticas fundamentales en el ámbito académico, contribuye a proporcionar una visión integral de la calidad y utilidad de los mapas de susceptibilidad.

4.4.1. Evaluación de mapa de susceptibilidad de LEU. 2010

Criterio	Descripción	Puntaje (0-0,5 -1)	Referencia
Precisión del Modelo	¿El modelo ha sido validado con datos observados?	0,5	(Lee and Pradhan, 2007)
Complejidad del Modelo	¿El modelo utiliza un enfoque robusto y adecuado?	1	(Oh et al., 2015)
Calidad de los Datos de Entrada	¿Los datos de entrada son confiables y precisos?	0,5	(Van Westen et al., 2003)
Resolución Espacial	¿La resolución del mapa es suficientemente fina?	1	(Zêzere et al., 2003)
Validación Independiente	¿El mapa ha sido validado por estudios externos?	0	(Ayalew and Yamagishi, 2004)
Inclusión de variables relevantes	¿Se han considerado todas las variables importantes?	1	(Pradhan, 2010)
Claridad de la Comunicación	¿La presentación del mapa es clara y comprensible?	1	(Lee et al., 2003)
Facilidad de manejo en la toma de decisiones	¿El mapa es práctico para la toma de decisiones?	1	(Van Westen et al., 2005)
Sensibilidad y Especificidad	¿El mapa logra equilibrar la sensibilidad y la especificidad?	0	(Guzzetti, F. et al., 1999)
Ponderación mayormente objetiva de los parámetros	"¿Se ha desarrollado el mapa empleando ponderaciones objetivas para cada una de las variables?"	1	Saaty, T. L. (1980)
Total		7	

Fuente : Elaboración propia, 2023

4.4.2. Evaluación de mapa de susceptibilidad de remociones en masa de SERNAGEOMIN, 2010

Criterio	Descripción	Puntaje (0-0,5 -1)	Referencia
Precisión del Modelo	¿El modelo ha sido validado con datos observados?	1	(Lee and Pradhan, 2007)
Complejidad del Modelo	¿El modelo utiliza un enfoque robusto y adecuado?	1	(Oh et al., 2015)
Calidad de los Datos de Entrada	¿Los datos de entrada son confiables y precisos?	1	(Van Westen et al., 2003)
Resolución espacial	¿La resolución del mapa es suficientemente fina?	1	(Zêzere et al., 2003)
Validación Independiente	¿El mapa ha sido validado por estudios externos?	0	(Ayalew and Yamagishi, 2004)
Inclusión de variables relevantes	¿Se han considerado todas las variables importantes?	0	(Pradhan, 2010)
Claridad de la Comunicación	¿La presentación del mapa es clara y comprensible?	1	(Lee et al., 2003)
Facilidad de manejo en la toma de decisiones	¿El mapa es práctico para la toma de decisiones?	1	(Van Westen et al., 2005)
Sensibilidad y Especificidad	¿El mapa logra equilibrar la sensibilidad y la especificidad?	0	(Guzzetti, F. et al., 1999)
Ponderación mayormente objetiva de los parámetros	"¿Se ha desarrollado el mapa empleando ponderaciones objetivas para cada una de las variables?"	1	Saaty, T. L. (1980)
Total		7	

Fuente: Elaboración propia, 2023

4.4.3 Evaluación de propuesta de mapa de susceptibilidad con modelación FR (Frequency Ratio)

Criterio	Descripción	Puntaje (0-0,5 -1)	Referencia
Precisión del Modelo	¿El modelo ha sido validado con datos observados?	1	(Lee and Pradhan, 2007)
Complejidad del Modelo	¿El modelo utiliza un enfoque robusto y adecuado?	1	(Oh et al., 2015)
Calidad de los Datos de Entrada	¿Los datos de entrada son confiables y precisos?	1	(Van Westen et al., 2003)
Resolución Espacial	¿La resolución del mapa es suficientemente fina?	1	(Zêzere et al., 2003)
Validación Independiente	¿El mapa ha sido validado por estudios externos?	0	(Ayalew and Yamagishi, 2004)
Inclusión de variables relevantes	¿Se han considerado todas las variables importantes?	1	(Pradhan, 2010)
Claridad de la Comunicación	¿La presentación del mapa es clara y comprensible?	1	(Lee et al., 2003)
Facilidad en la toma de decisiones	¿El mapa es práctico para la toma de decisiones?	1	(Van Westen et al., 2005)
Sensibilidad y Especificidad	¿El mapa logra equilibrar la sensibilidad y la especificidad?	1	(Guzzetti, F. et al., 1999)
Ponderación mayormente objetiva de los parámetros	"¿Se ha desarrollado el mapa empleando ponderaciones objetivas para cada una de las variables?"	1	Saaty, T. L. (1980)
Total			9

Fuente: Elaboración propia (2023)

4.5. Preparación de parámetros de entrada

4.5.1. Descripción y preparación de parámetro: Pendientes

El término "pendientes" hace referencia al gradiente o inclinación de la superficie, donde pendientes más pronunciadas conllevan una fuerza impulsora mayor que incrementa la evacuación de material al alcanzar su saturación (Ching-Y. T., 2010). La evolución de deformaciones gravitacionales resulta en movimientos de masa, siendo determinada por las condiciones de deformación de la pendiente y los ángulos de inclinación, lo que induce un aumento en el esfuerzo cortante en el suelo y otros materiales consolidados (Ching-Y. T., 2010).

Observaciones de Mohammady, M. et al., (2012) indican que en pendientes suaves se registra una baja frecuencia de deslizamientos de tierra debido a las reducidas inclinaciones, en contraste con áreas de pendientes más pronunciadas. Por lo tanto, se considera esencial para la investigación abordar la relación entre la extensión vertical y horizontal. Esta

relación guarda estrecha vinculación con la escorrentía, así como con la cantidad de infiltración, de manera que pendientes de menor inclinación favorecen una mayor captación del agua, a diferencia de las pendientes más elevadas. Este contraste se traduce en una notable diferencia en la susceptibilidad, donde las pendientes altas presentan una mayor vulnerabilidad debido a los complejos mecanismos hidrogeológicos, destacando así la importancia de comprender esta dinámica en análisis asociados a movimientos en masa. Por otra parte, en estudios previos de Pradhan, B. et al (2010) indican que las pendientes superiores a 26° indicaron una alta probabilidad a deslizamiento, debido a que, a el aumento de la pendiente, la tensión en el corte del suelo aumenta, teniendo una reducida frecuencia de remociones en masa junto a pendientes suaves. Otros autores como Varnes, D. J (1978), destacan la importancia de las pendientes, teniendo en cuenta algunas de los parámetros como eventos de reducción en la capilaridad del suelo, reducción de la resistencia al corte, aumento en la socavación de los bancos y eliminación del soporte basal, a la vez que aumenta la erosión. A ello, relaciona diferentes prácticas que provocan pronunciadas pendientes, como la eliminación u/o escasa vegetación, además de prácticas agrícolas (Crozier, M. J. 2010).

Las observaciones de Mohammady, M et al., (2012) revelan que en áreas de pendientes suaves se observa una baja frecuencia de deslizamientos de tierra, atribuible a las inclinaciones reducidas en contraste con zonas de pendientes más pronunciadas. En consecuencia, resulta imperativo para la investigación abordar la relación entre la extensión vertical y horizontal. Dicha relación guarda estrecha vinculación con la escorrentía y la cantidad de infiltración, de modo que pendientes con menores inclinaciones favorecen una mayor captación del agua en comparación con las pendientes más elevadas. Esta disparidad se traduce en una diferencia significativa en la susceptibilidad, siendo las pendientes altas más vulnerables debido a la complejidad de los mecanismos hidrogeológicos. Esto subraya la importancia de comprender esta dinámica en análisis asociados a movimientos en masa.

Varnes, D. J. (1978), cree importante considerar dicho parámetro debido a su relación como eventos de reducción en la capilaridad del suelo y descarga del material, disminución de la resistencia al corte, aumento en la socavación de los bancos y eliminación del soporte basal, simultáneamente con un aumento en la erosión. Además, vinculan estas condiciones a prácticas que provocan pendientes pronunciadas, como la eliminación o escasez de vegetación, así como prácticas agrícolas Crozier, M. J (2010). Hong, H. (2016); Kannan, M. E. et al 2012 y Pourghasemi, H.R. (2013) debido a que se busca representar de mejor manera una ocurrencia en ángulos de pendiente inferiores a los 40°.

4.5.2. Descripción y justificación de parámetro: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI)

La importancia del estado de vegetación se debe a el factor de cubierta protectora y amortiguación ante el impacto de la lluvia caída y a la reducción de impacto de la lluvia. Las raíces y plantas promueven la fuerza y cohesión de los materiales de ladera, teniendo un efecto similar a barras de acero de refuerzo para las obras de hormigón, aumentando la resistencia de la ladera (Mediavilla Pérez, J. 2014). Por otra parte, son los sistemas radiculares los que hacen posible que exista una buena infiltración del agua en el sistema, provocando una disminución en la resistencia de laderas abruptas.

Según Mediavilla Pérez, J. (2014) en su cita a Welch, Ullman, (1993) ha comprobado que en casos como los de California, los deslizamientos del suelo tengan un vínculo con factores como la rápida meteorización de algunas rocas. Para territorios compuestos por rocas basálticas de granitos, es posible que la vegetación libere ácidos orgánicos (acético u/o cítrico) derivados de raíces de las plantas y líquenes que tienen efectos de aceleración de hidrólisis en las acidificando el suelo (Mediavilla Pérez, J. 2014). De manera análoga, se observa un fenómeno similitud en la emisión de gases, como el dióxido de carbono (CO_2), juntamente con los fluidos emanados de la vegetación, tales como el ácido carbónico. Este proceso, que implica la exhumación de ácido carbónico por parte de las raíces, posibilita la disolución preferencial de áreas predominantemente compuestas por rocas carbonatadas, como las calizas y dolomías. Este evento influye en la alteración de minerales silicatados, dando lugar a la formación de arcillas, enriquecidas con la presencia adicional de aniones y bicarbonatos en el proceso, como señala Mediavilla Pérez (2014). Este complejo mecanismo ilustra la interacción dinámica entre la actividad biogeoquímica y la génesis de materiales en el entorno geológico, resaltando la contribución significativa de las plantas en la transformación y modelado del sustrato geológico circundante (Mediavilla Pérez, 2014).

Algunas observaciones propuestas por Keller, E. A. y Blodgett, H. R. (2004), indican que una vegetación densa y espesa puede ser perjudicial al aumentar la probabilidad de eventos de remoción, otros estudios sostienen perspectivas divergentes al destacar los beneficios potenciales de una cobertura vegetal abundante. Autores como Geymen y Baz (2008), mencionados por Pineda, M. C. et al. (2016), señalan que, en áreas con cobertura vegetal nativa, ya sea boscosa o destinada a uso forestal, existe una tendencia a experimentar menos deslizamientos, atribuible a los efectos protectores de la vegetación. En este contexto, se destaca la mejora en la cohesión de la matriz del suelo, así como el aumento de la evapotranspiración e intercepción.

En el caso de cobertura vegetal principalmente utilizada para el uso de deslizamientos en tierra están asociados a comunidades Fagio Parrio Carpinetum betulus y Parrio-Carpinetum betu-lus. En dicha área las comunidades vegetales se asocian a pendientes de mayor estabilidad tales como Parrotia Persia y Carpinus betulus además de ser utilizadas en la restauración debido a que su copa es relativamente escasa, existiendo inclusive una relación en el volumen de la madera (Ghimire, M. 2011). Para ecosistema forestales, el dosel de las copas de los árboles actúa como protección ante

la erosión de las gotas de agua en el suelo, debido principalmente a precipitaciones, disminuyendo la erosión en los suelos (Ghimire, M. 2011).

No obstante, Ghimire, M. (2011) alerta acerca de los posibles impactos adversos derivados de la presencia de árboles de considerable tamaño en áreas de estudio. En este contexto, la existencia de árboles voluminosos de madera dura puede ocasionar consecuencias significativas, ya que la energía cinética del viento transmitida desde estos árboles hacia la pendiente puede ejercer fuerzas considerables. Este fenómeno resulta en la generación de grietas y en un incremento de la carga lateral en terrenos intrínsecamente vulnerables. Esta perspectiva enfatiza la necesidad de una evaluación integral del papel específico de la vegetación, que incluya no solo la consideración de su densidad, sino también de sus características particulares, como un aspecto fundamental en la gestión de riesgos asociados a remociones en masa. El cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (**Ver Fórmula 9**) se llevó a cabo mediante la aplicación de la fórmula propuesta por Tucker, C. J. (1979), la cual se asocia con la estimación de la biomasa de hojas verdes. Esta técnica ha sido previamente utilizada por investigadores como Li, Z. y Guo X. (2013) en estudios de áreas con pastizales mixtos, espacios forestales y áreas urbanas.

Fórmula 10. El valor se calculó por medio de la fórmula.

$$NDVI = \frac{(IR - R)}{(IR + R)}$$

Fuente: Myneni, R. B., & Tucker, C. J. (1984).

4.5.3. Descripción y justificación de parámetro: Orientación de laderas.

La orientación de laderas debe su importancia a la exposición de diferentes formas de iluminación y exposición en laderas, teniendo como consecuencia que la luz solar afecte la erosión de las rocas y combinando la lluvia como causa de derrumbes a largo plazo (Amaliah, R. et al. 2021).

Para algunos autores citados por Pourghasemi, H.nR. et al., (2012) parámetros como la lluvia, cantidad de luz solar, morfología aérea, remociones en masa y porosidad, vinculan la capacidad de infiltrado del agua, así como la, humedad e ingredientes orgánicos en la cobertura que terminan por modificar la capacidad de contención de agua. En cambio, otros autores como Larsen y Torres – Sánchez (1998) y Kamal, S. (2008) estimaban la orientación de la pendiente y su correlación con la dirección de las laderas, con la dirección de

vientos alisios. Si bien los resultados pueden variar en dificultades Gorokhovich, Y., & Vustianiuk, A. (2021). Argumenta dentro de su caso de estudio, que la orientación de las laderas y las remociones en masa mantienen una fuerte relación al considerar el papel de los fuertes vientos y la erosión que implican.

Por otra parte, algunos otros autores como Ayalew, L. y Yamagishi, H. (2005) mencionan una concentración de remociones vinculándose con la dirección de los vientos, tormentas estructura rocosa e inclusive erosión costera, pero que con el tiempo no se ha logrado conseguir una relación significativa de remociones.

4.5.4. Descripción y justificación de parámetro: Distancia a drenaje

Por lo descrito por Gorum, T. et al., (2011), afirma que los arroyos tienen un importante desempeño en la erosión base de la pendiente, lo que en consecuencia socaba la base y se activan las laderas por remociones debido al aumento de la infiltración de agua. Para la distancia a redes hídricas, Chen, W. et al., (2017) considera a los ríos como importantes factores para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos de tierra, utilizando el algoritmo *Distance Euclidenan*. De acuerdo con Amaliah, R. et al., (2021) la oportunidad de deslizamientos de tierra es mayor cuanto más cerca de los cauces se encuentra el área estudiada, esto se debería a que la alta humedad que condicionaría la fortaleza del terreno aumentando cada vez más la posibilidad de deslizamiento a causa del nivel de saturación del agua en pendientes, afectando directamente su estabilidad. De este modo, se afirmaría que existe una relación entre la distancia o proximidad a cauces con el grado de saturación del material del terreno, controlando directamente la resistencia de las laderas y seleccionando intervalos más extensos que escatiman una gran extensión de saturación dentro del área de estudio, emulando ejemplos de autores como Ding, Q. et al., (2017) y Pourghasemi, H. R. et al., (2012).

Con respecto a ello Duo Guo-liang, et al., (2017) en su estudio advierte sobre la relevancia de los ríos y su incisión en la inestabilidad de las laderas, cambiando el nivel del agua subterránea, y erosión de pies de la ladera, lo que, sumado a numerosos estudios, han comprobado la frecuencia de RM a lo largo de extensiones de drenajes. Teniendo en cuenta ello, existen variados autores tales como; Pourghasemi, H. R. et al., (2012); Amaliah, R. et al., (2021), Duo Guo-lianj, et al., (2017); Park, S. et al., (2013), Chen, W. et al., (2017), Thongley, T. (2020) y Zhang, G. et al, (2016) quienes han propuesto diferentes intervalos con los cuales agrupar y aplicarse en un modelo probabilístico.

4.5.5. Descripción y justificación de parámetro: Distancia a carreteras

Las construcciones en carreteras y zonas aledañas son comúnmente utilizadas para estudios de susceptibilidad, sugiriendo que se asocian con la desestabilización de laderas. De tal manera que la proximidad a carreteras se podría vincular con la localización de sectores antropológicamente activos, aumentando su relación con remociones en masa (Thongley, T. y Vansarochana, C. 2021). Esto se debería a la acelerada implementación de las redes de transporte, motivo por el cual se ha decidido construir un acuerdo de distancia de caminos conocido como longitud de buffer, el cual demuestra que la frecuencia de remociones se encuentra en al menos unos 40 metros de las carreteras de montaña, hasta unos 100 metros en el caso de autopistas y 150 m de buffer para sectores de túneles Ayalew, L. & Yamagishi, H. (2004). Según Yalcin, A. (2008) las remociones en masa pueden ocurrir tanto en carretera de laderas como en altas pendientes, provocadas en la disminución de carga en topografía de pie de pendiente, obteniendo como resultado del aumento de estrés en la pendiente, cambios en la topografía y disminución de carga, con lo cual se originan grietas tensionales. Las distintas carreteras y ferrocarriles conducen a la desestabilización, es por ello por lo que Khan, H. et al., (2019) ha optado por considerar para estudios de susceptibilidad las distancias desde la carretera en intervalos divididos en rangos en variable de continuación de intervalos de acuerdo con las características de distribución de densidad en el área de estudio.

Por consiguiente, Duo Guo-liang (2017) propone una clasificación en seis clases, estableciendo un rango de 200 metros en relación con la activación de remociones en zonas de amortiguamiento. No obstante, para ciertos sectores, Ayalew, L. & Yamagishi, H. (2004), sostienen que la frecuencia de remociones en masa y su vinculación con actividades antrópicas en vías, pueden ser categorizada en intervalos que abarcan desde más de 40 metros de la carretera hasta aproximadamente 100 metros en autopistas y 150 metros en túneles.

En áreas con una marcada inclinación de montaña, Quinzio, L. et al. (2010), explican que la pérdida de soporte en laderas se origina a partir de cortes realizados al pie de la ladera para la construcción de infraestructuras y vialidades, generando alteraciones topográficas y modificaciones en la morfología de las pendientes. Estos cambios resultan en una mayor tensión en la cabeza de la estructura y, consecuentemente, en la generación de grietas tensionales.

De manera similar, Pradhan, B. et al. (2010) argumentan que es imperativo considerar los segmentos de carretera debido a su impacto como barreras, así como su contribución al escurrimiento y flujo de agua,

convirtiéndose en factores desencadenantes de fallas y agrietamientos en las pendientes. Este enfoque recalca la necesidad de abordar integralmente la influencia de la infraestructura vial en la estabilidad del terreno, considerando tanto la distancia desde las vías como los aspectos topográficos y uso del suelo en la evaluación de riesgos asociados a movimientos en masa.

4.5.6. Descripción y preparación de parámetro: Índice topográfico de humedad (TWI)

El Índice topográfico de humedad (TWI) corresponde a el factor que expone las áreas de captación de agua en ángulos de pendiente en grados. Moore, I.D. et al., (1991) la define como la zonificación de zonas con mayor acumulación en la pendiente de drenaje sobre un punto del ángulo dependiente en el punto. Como resultado, la predisposición a fuerzas gravitacionales se encargará de dirigir el flujo del agua hacia áreas de menor elevación, conforme destacado por Pourghasemi, H.R. et al. (2012). La relevancia de este fenómeno radica en su condición como modelo de escorrentía, que cuantifica la acumulación de agua y humedad en áreas específicas, según lo establecido por Beven, K.J. et al., (1979). Este modelo genera índices que capturan la dinámica del agua y su acumulación desde puntos elevados de la topografía hasta áreas más bajas, donde la fuerza gravitacional propicia el deslizamiento pendiente abajo.

Por consiguiente, la infiltración del aporte hídrico bajo pendientes se ve condicionada por variables adicionales como la permeabilidad, la presión de agua en los poros del suelo y los efectos de resistencia del suelo. Puntos críticos se identifican en áreas por las cuales se evacua el contenido hídrico.

Adicionalmente, la tasa de infiltración en toda el área implica una recarga de agua subterránea, distribuyéndose uniformemente a lo largo de la zona. En este contexto, la pendiente de la superficie refleja el nivel freático del agua. Además, se postula una conductividad exponencial que se manifiesta cuesta abajo, según lo señalado por Moore I.D. et al. (1991). Este enfoque integral permite comprender la compleja interacción entre la topografía, la escorrentía y la recarga de agua subterránea, elementos cruciales en la evaluación de la dinámica hídrica en el terreno.

Fórmula 11. Índice topográfico de humedad.

$$TWI = \ln\left(\frac{S}{\tan \alpha}\right)$$

Fuente: Moore I.D. et al., (1991)

En resumen, la relación matemática expresada por \ln , donde \ln representa el logaritmo natural, y S es el resultado de la pendiente dividida por la tangente del ángulo (α), se revela como una herramienta significativa en el análisis topográfico. Conforme a las investigaciones de Zhongquian, T. (2017), el Índice de Inclinación Topográfica (TWI) emerge como un indicador clave del estado topográfico que caracteriza los procesos hidrológicos. Este índice proporciona una representación espacial detallada de la distribución de la humedad del suelo y la saturación de la superficie. Fundamentándose en la elevación cuadrática, la pendiente drena desde un punto inicial hasta un punto final en la unidad de longitud de curva dentro de la pendiente local. Esta conceptualización del TWI, respaldada por la investigación citada, permite una comprensión más profunda y precisa de los patrones hidrológicos asociados con la topografía de la región de estudio.

4.5.7. Descripción y preparación de parámetro: Geología del área de estudio

Las variaciones litológicas son las propiedades de suelos y rocas que componen un talud, lo que conduciría a una variabilidad en disponibilidad litológica y junto con ello, diferenciación de la resistencia y permeabilidad en el área de estudio. Esto se debe a la disparidad de susceptibilidad a RM que presenta cada geología (Ding, Q. et al., 2016). Al respecto, Cristi, J. M. (1946) describe el sector de Lota de acuerdo con algunas composiciones litológicas, describiendo su origen en depósitos límnicos sedimentarios junto con un avance hacia el mar, recubriéndolos de sedimentos que conforman un horizonte de Pilpilco. En base a ello, explica como la regresión de movimientos tectónicos establece alrededor de lagunas costaneras con deposiciones de arcilla. Su espesor, de alrededor de 170 metros, presenta un desarrollo fluvial junto con conos rodados y un manto de carbón. De manera similar, la transición marina está compuesta por un horizonte de Intercalación. Donde la Veta Alta es el manto más constante de Lota, poseyendo una distribución local, que sigue un complejo de areniscas, arcillas y mantos de carbón con variaciones de

diversos elementos petrográficos y algunas areniscas verdosas fosilíferas, e inclusive algunos fósiles tales como la *Mastra fosilaria*, *Turritela Angusta*, entre otros Cristi, J. M. (1946).

4.5.8. Justificación de parámetro en área de estudio: Fallas Geológicas

Las fallas normales reconocidas en las costas de Lota por trabajos previos de Asenjo C. F. et al. (2018), presentan una orientación principal en dirección NO^oE y N^oW asociados a extensiones llenas de cuarzo con textura masiva, orientando la dirección N-S y diaclasas.

La distancia a fallas es un factor con una fuerte correlación a remociones en masa, debido la fracturación de roca en zonas fallas, creando zonas mayormente débiles, de una reducida resistencia y falta de permeabilidad (Ding, Q. et al., 2016).

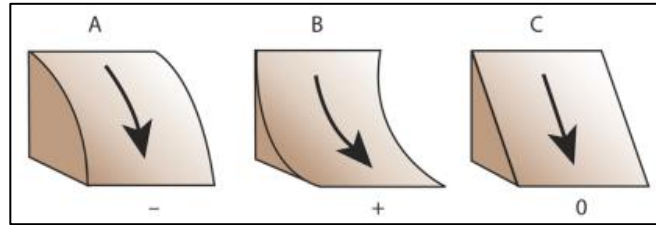
Investigadores dentro de los estudios de susceptibilidad como Shahram, B. et al (2019); Pourghasemi, H. R. et al (2013); Zhang, G. et al (2016); Golami et al (2019) y Du Guo-Liang et al 2017. han utilizado la distancia a fallas, calculando la correlación entre las fallas y remociones en masa, lo que en términos generales ha demostrado que ha mayor distancia menor es el número de remociones. Por esto, Pourghasemi, H. R. et al., (2012) sostiene que se debe a la erosión selectiva del material, así como a movimiento de agua a lo largo del plano de falla que se producen inestabilidades en zonas aledañas. En algunos otros casos reportados, se ha reconocido como la presencia de fallas generadas por cabalgamientos, lo que sumado a planos de debilidad por rocas fracturadas forman un escenario con mayor susceptibilidad (Zhang et al, 2016). En otros casos la proximidad a fallas contribuye a inestabilidad u susceptibilidad debido a la permeabilidad de capas creando zonas de rápida saturación cercanos al plano de falla, por lo que las fallas serían un actor determinante en zonas con precipitaciones frecuentes (Zhang et al, 2016). Algunos estudios en zonas de falla incluyen parámetros de susceptibilidad, convirtiéndose en un tema de discusión entre fallas de 0 y 100 metros, obteniendo una tasa de efectividad de 1,30, y de forma similar entre los 200 a 300 m, pero dentro de los 400 metros de distancia la relación de frecuencia cae por debajo de 1 por lo que sugiere que a mayor proximidad las fallas se correlacionan con deslizamientos. Además de esto, Yin, Y. et al., (2009) respecto a zonas de ruptura sísmica, frecuentan relacionarse a datos de edificaciones localizada en cercanías a fallas para superficies. Las fallas aledañas a taludes pueden controlar los factores internos y el desarrollo de fracturas en macizos rocosos y otros factores internos. Debido a esto, Kilburn C.R. & Petley, D. N. (2003), Korup, O. (2004), Petley, D.N. et al, (2005) describen el proceso catalizador de la circulación del agua en los macizos rocosos cercanos a fallas reiterando la porosidad de agua explicando que, al generarse una falla, aumentan

los eventos en comportamiento que aplican remociones en masa profundas. En base a lo ya descrito, se asumió que los planos de falla pueden presentar características de disminución abrupta y desequilibrio, aumentando la probabilidad de desencadenamiento y movimientos catastróficos de la ladera. Al mismo tiempo, sobre el sector de la ruta- 160 cercanas a las fallas geológicas, estiman áreas de tensión, por lo que los defectos del material producen pequeñas grietas tensionales (Inostroza, D., et al., 2017).

4.5.9. Justificación de parámetro en área de estudios: Perfil de curvatura

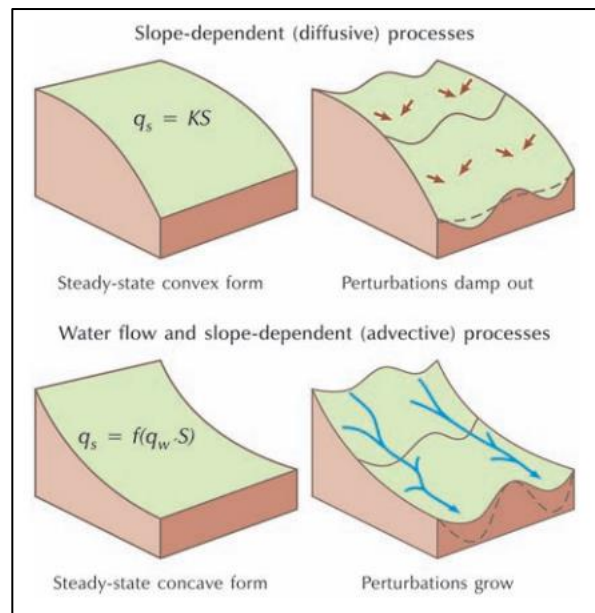
El parámetro condicionante denominado "perfil de curvatura" se refiere a la tasa de cambio en la aceleración de flujo y la erosión potencial a lo largo de una superficie inclinada en dirección descendente. Es un componente esencial en estudios relacionados con la erosión y se clasifica en tres categorías: valores negativos menores a $-0,001$ y valores positivos mayores a $0,001$ (Dalrymple, J. B. et al., 1968). Dada su conexión con la pendiente, el perfil de curvatura se obtiene al medir los ángulos y distancias de la ladera en un corte perpendicular, revelando irregularidades como concavidades o convexidades. La morfología resultante es el producto tanto de las características litológicas como de los procesos morfológicos de la ladera, influenciados por el ambiente morfo-climático (Peucker, T.K Douglas, D. H, 1975). La importancia del perfil de curvatura radica en su papel preponderante en los deslizamientos activos y el lavado de suelos, que contribuyen al adelgazamiento del suelo y, por ende, afectan el desarrollo topográfico. La morfología de las laderas convexas, en particular, ejerce una influencia significativa en la configuración topográfica, especialmente en áreas con pendientes moderadas donde se observa una suavización del relieve. Este fenómeno genera dos modos de transporte distintos: el transporte difusivo, dominante en laderas convexas, y el transporte advectivo, que implica la migración de sedimentos y agua pendiente abajo, (**Ver Figura. 18**) dando forma a pendientes cóncavas y revelando patrones concentrados de flujo (Hugget, R. J., 2022). En el marco de esta situación, Curtis y colaboradores (1965) resaltan la capacidad distintiva del perfil de curvatura para discernir unidades superficiales en laderas mediante la representatividad de cada píxel en imágenes satelitales (**Ver Figura 19**). Esta diferenciación se basa en la premisa de que el relieve es divisible en unidades morfológicas, respaldada por técnicas de clasificación propuestas por Dalrymple, J. B. et al. (1968), lo que permite una discriminación efectiva de las características de la topografía.

- **Figura 17.** Aspectos de la pendiente (Perfil de curvatura)



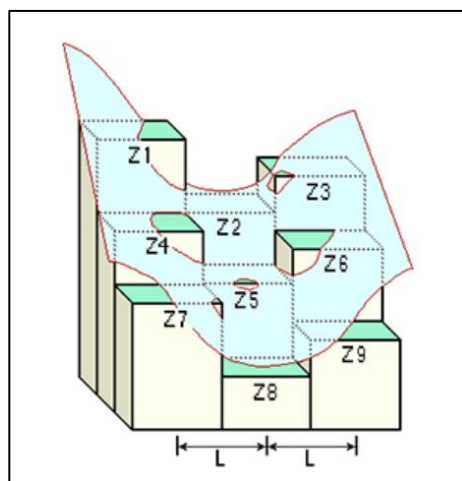
Fuente: Arcmap, Curvatura Funtion (2021): Donde A; indicará que la superficie es convexa hacia arriba de la celda y el flujo desacelera. B; Para superficies cóncavas hacia arriba de cada celda con un flujo que acelera. C; para valores 0 que indican superficies lineales.

- **Figura 18.** Procesos de desarrollo topográfico



Fuente: Hugget. J.R (2022) en *Fundamentals Geomorphology*. El transporte difusivo (diffusive) conduce laderas convexas, con una topografía alterada lateralmente y dirección de transporte (negro líneas) haciendo alta la topografía. El transporte advectivo (advective) depende de flujos de agua y las pendientes cóncavas con lo cual se producen líneas discontinuas por incisión.

- **Figura 19.** Diagrama de valores de curvatura



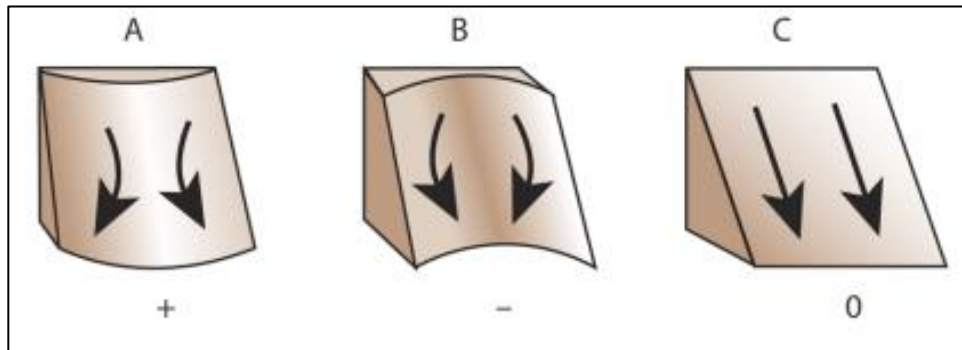
Fuente: Crosby D.A., (2006)

4.5.10. Justificación de parámetro en área de estudio: Plano de curvatura

Corresponde a la tangencial de contorno indicando la divergencia o concentración negativa de flujo en valores positivos indicando la distribución exponencial (Esri., 2023). Por ende, Crosby, S.A (2006) estima que el Plano de curvatura obtiene por el contorno de la curvatura un flujo convergente y divergente del contenido de agua en el suelo.

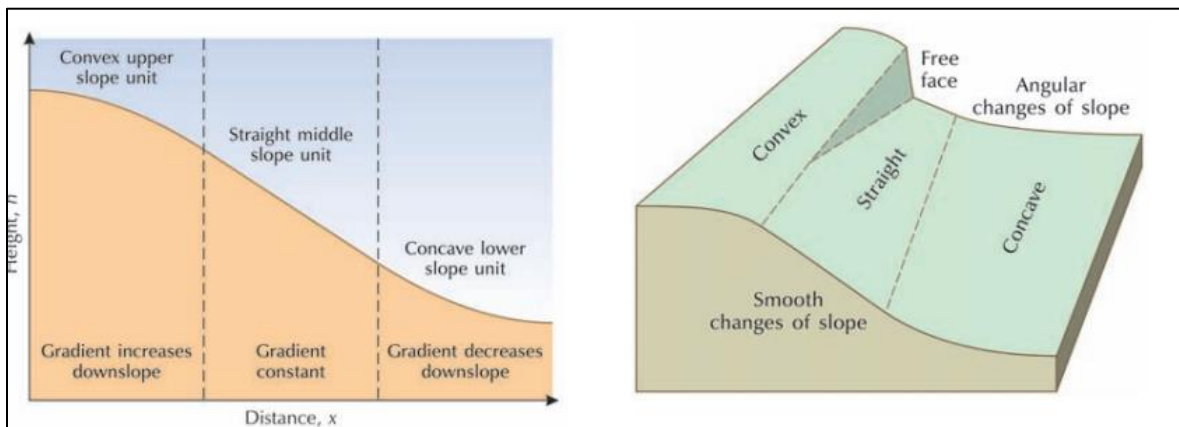
En primer lugar, la curvatura del plano ayuda a identificar áreas propensas a la acumulación de agua, ya que las concavidades actúan como puntos de acumulación y pueden indicar la presencia de depresiones donde el agua tiende a congregarse (Zêzere, J. L. et al., 2003). Este acumulo de agua puede debilitar la estabilidad del suelo, aumentando la probabilidad de deslizamientos. En segundo lugar, la curvatura del plano permite detectar cambios bruscos en la pendiente, lo que es fundamental para evaluar la estabilidad del terreno. Áreas con curvaturas positivas pronunciadas pueden indicar crestas o salientes, mientras que curvaturas negativas señalan valles o depresiones. Estos cambios abruptos en la topografía pueden influir significativamente en la susceptibilidad a deslizamientos de tierra (Lee y Pradhan, 2007). Por último, la curvatura del plano contribuye a la identificación de áreas con formas topográficas características asociadas a deslizamientos, como rellenos y escarpes (Van Westen et al., 2003). Estos elementos morfológicos indican zonas donde las fuerzas gravitacionales pueden tener un impacto sustancial en la estabilidad del terreno.

- **Figura 20.** Aspecto de pendiente (Plano de curvatura)



Fuente: Esri. (2023). Donde A; son las superficies convexas lateralmente en cada celda. B; para la superficie cóncava lateralmente en cada celda. C; para los valores ceros de superficie lineal.

- **Figuras 21.** Unidades de la pendiente



Fuente: Elaborado por Hugget. J.R (2022) en Fundamentals Geomorphology. La Fig.25. A; Unidades de pendiente superior convexa (contiene los 3 elementos de una pendiente con unidades convexas, , media y unidades de pendiente cóncava).

4.5.11. Justificación de parámetros en área de estudio: Área de uso de suelo.

A pesar de la limitada cantidad de investigaciones que actualmente incorporan el análisis del uso del suelo, se ha constatado que los cambios en la cobertura, predominantemente atribuibles a actividades humanas como la deforestación, la construcción de nuevas carreteras, y los incendios, entre otras, ejercen notables influencias en las condiciones naturales de las laderas (Westen C. J. et al., 2008).

La confección de mapas de uso del suelo comúnmente se lleva a cabo mediante la utilización de imágenes satelitales capturadas por sensores como LandSat, Spot, Aster, IRS 1-D, entre otros. Aunque los cambios en la comparación y clasificación por reflectancia de imágenes multiespectrales pueden ser evidentes, Mantovani, F. et al., (1996) resalta la importancia de considerar la variabilidad temporal en los cambios de cobertura mediante herramientas ópticas. Los cambios de origen antropogénico, derivados de diversas actividades, revelan una frecuencia más elevada en aquellas zonas que experimentan transformaciones significativas en la vegetación y en los factores ambientales que inciden en la estabilidad del paisaje. Estos cambios, a su vez, contribuyen a una mayor carga en ciertas áreas, así como a una exposición intensificada a actividades antrópicas que incrementan los procesos erosivos (Glade, T., 2003).

Akgun, A. et al., (2008) emplean métodos como AHP y WLC, sustentando que la cobertura alcanza el mayor peso ponderado en tales métodos. Pese a que para países desarrollados la urbanización suele reducir la frecuencia de deslizamientos de tierra, para casos de países en desarrollo la prevención de remociones en masa significa un aumento de los deslizamientos de tierra, aumentando la prevención de deslizamientos de tierras (Li, G., et al., 2017). La construcción de zonas urbanas reduce la cubierta vegetal, en variados casos cambian las condiciones hidrológicas, cambiando los contenidos de humedad circundante. De forma similar, la actividad humana, aumenta el número de remociones en masa (RM), cambiando las condiciones geológicas y estructurales con planos de desprendimiento, mientras que los deslizamientos de tierra poco profundos con frecuencia ocurren en rocas y suelos impermeables o semipermeables (Borgomeo, E. et al., 2014).

En variados de los suelos inestables, se logran observar matorrales formados por pastos y malezas de rápido crecimiento, en cambio el cambio de cobertura por labranza agrícola, se asocian a un mayor número de deslizamientos, mientras que una cobertura de zonas arboladas, con especies como pinos, robles y nogales, se correlacionan con zonas más estables (Borgeomeo, E. et al., 2014).

5. Cálculo de susceptibilidad de RM

Por último, para obtener el índice de Susceptibilidad a Remociones en Masa (**Fig.35**) fue calculado por la sumatoria del **PR** (Prediction Rate o Tasa de predicción) (**Ver. Tabla 6**) por cada factor de **RF** (Frequency ratio o Frecuencia relativa) para cada clase, a fin de realizar el **Fr**, por autores como Acharya & Lee, (2019); Amaliah, R. et al, (2021) y Khan, H. et al., (2018); Lee, S. et al, (2017). De este modo producto de los PR, se obtuvo valores objetivos con los cuales utilizando la Calculadora Raster se realizó la multiplicación de cada porcentaje de FR (Frecuencia relativa) por PR en cada variable.

En el método de Frequency Ratio, la multiplicación del número de variables se realiza al establecer la relación entre la frecuencia de ocurrencia de un evento (como deslizamientos) en diferentes categorías de cada variable y la frecuencia total de ocurrencia. Este método implica evaluar la contribución de cada variable a la susceptibilidad al dividir la frecuencia de eventos ocurridos en cada categoría de la variable por la frecuencia total de eventos. Posteriormente, estos valores se multiplican entre sí para obtener un índice de susceptibilidad acumulado.

De manera más específica, si tenemos "*n*" variables, el cálculo se realiza multiplicando las razones de frecuencia para cada categoría de cada variable. La fórmula general sería:

Esta multiplicación acumulativa refleja la contribución conjunta de todas las variables consideradas en el modelo de susceptibilidad. Cabe destacar que este enfoque asume independencia entre las variables y puede ser ajustado según las características específicas del área de estudio y la disponibilidad de datos.

6. Validación de modelo de susceptibilidad

Los resultados de la validación fueron obtenidos a través del método de evaluación de precisión conocido como ROC (Receiver Operating Characteristic) o Curva Operativa del Receptor. Cada clase de susceptibilidad representa un porcentaje de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, acumulando el porcentaje correspondiente.

La curva ROC se genera mediante la comparación de los valores del índice de susceptibilidad para remociones en masa con el porcentaje acumulado de eventos de remociones en masa. Los valores de Frequency Ratio se calcularon empleando el índice de susceptibilidad que considera todos los factores

causantes, junto con el valor de la frecuencia de relación. La determinación de la relación de frecuencia se basó en la cuantificación de inventarios de pequeñas dimensiones y factores causantes de diversos tamaños, respaldada por investigaciones de autores como Akgun, A. et al. (2017) y Khan, et al. (2017).

6.1. Relación de curvatura operativa (ROC)

Para mejorar la validez de los resultados obtenidos mediante el modelo predictivo, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de la precisión del mapa de susceptibilidad por medio de la técnica de Modelado de Umbral de Decisión Binario. Este proceso implicó la utilización del inventario utilizado, así como la generación de conjuntos de datos de entrenamiento y prueba.

La validación se realizó mediante la construcción de una Curva Operativa del Receptor (ROC), en la cual se empleó el inventario de deslizamientos como base de datos. Con dicho propósito se empleó la herramienta de *Support Vector Machine – Non landslide* (Huang, W. 2022) y la tasa de falsos positivos se representó en el eje X (porcentaje de área acumulada), mientras que la tasa de verdaderos positivos se representó en el eje Y (valor de susceptibilidad). Para la creación tanto de la exactitud como precisión se integraron los datos de entrada en la herramienta *Arc Spatial Data Model (ArcSDM)* en su función *Calculate ROC Curves and AUC Values*. La interpretación de la superficie bajo la línea de referencia aleatoria, el triángulo inferior derecho revierte decisiones de clasificación donde tanto las clasificaciones positivas se vuelven falsas y los falsos positivos en verdaderos negativos, proporcionando una indicación de la capacidad del modelo para predecir la ocurrencia o no ocurrencia de eventos de remoción en el terreno. Este enfoque se fundamenta en la metodología propuesta por Fawcett, T. (2006). Youssef et al. (2015), Chen, W. et al. (2017), Shahabi, H. et al. (2015), Thongley, T. y Vansarochana, C. (2021).

Para la obtención de valores positivos, fue necesario obtener datos de corte entre la sensibilidad del modelo (TPR) es decir los verdaderos positivos divididos por los positivos totales (**Ver fórmula 12 y 13**) los cuales son representados en el eje Y y la especificidad (TNR) como la capacidad que tiene un modelo de identificar correctamente los casos negativos y su relación con el total de casos negativos representados en el eje X (Healy, R. M., & Pepe, R. J. 2004).

Fórmula 12: Tasa de verdaderos positivos.

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

Fuente: Fawcett, T. 2006

Donde:

TP: (Verdaderos Positivos) representa el número de casos positivos que fueron correctamente identificados.

FN: (Falsos negativos) representa el número de casos positivos que fueron incorrectamente negativos.

Fórmula 13: Tasa de verdaderos negativos.

$$TNR = \frac{vn}{nt}$$

Fuente: Healy, R. M., & Pepe, R. J. (2004).

Donde:

TNR: Tasa de verdaderos negativos

vn: Verdaderos negativos

nt: Negativos totales

Del mismo modo la Tasa de precisión fue obtenida mediante la fórmula

Fórmula 14: Precisión.

$$E_s = \frac{vn}{Fp + Tn}$$

Fuente: Fawcett, T. 2006

Donde:

Vn: Verdaderos negativos

Fp: Falsos positivos

Tn: verdaderos negativos

La curva exhibe la tasa de éxito obtenida mediante el porcentaje acumulado de remociones (sensibilidad o tasa de verdaderos positivos), representando la proporción de instancias positivas correctamente clasificadas, contrastada con el porcentaje acumulado de valores decrecientes (falsos positivos) para valores de especificidad o instancias incorrectamente clasificadas como positivas ambos en cuantificados desde 0 a 1. Estos datos se agrupan de manera puntual y aleatoria, sin pertenecer a la susceptibilidad intrínseca, lo cual se traduce en la generación de un porcentaje de área acumulada con valores crecientes dentro del índice de susceptibilidad de remociones en masa, según lo propuesto por Shahram, B. et al. (2019). En consecuencia, el área bajo la curva (AOC) obtenida con datos de entrenamiento refleja la calidad del modelo. Los modelos de entrenamiento, evaluados en términos de exactitud, constituyen una medida global que clasifica las instancias, calculándose como el cociente entre el número total de predicciones correctas y el número total de predicciones incorrectas, respecto al total de instancias.

Fórmula 15: Exactitud

$$Ex = \frac{v_p + v_n}{Total}$$

Fuente: Fawcett, T. 2006

Donde **Ex** corresponde a la exactitud del modelo

v_p: Verdaderos positivos

v_n: Verdaderos negativos

Para la validación se utilizaron, un 70% de los datos totales del inventario para datos de entrenamiento, al igual que lo realizado por autores como Nachappa, T. G., et al, (2020) y un 30% del inventario para validar la predicción del modelo. De este modo, la precisión, utilizando el 30% de datos de prueba con y sin deslizamientos respectivamente, se obtuvo una correlación siguiendo un modelo de área operativa bajo la curva (AUC). De modo que el rendimiento superior del modelo, utiliza valores de evaluación y comparación cuantitativa de métodos de mapeo de susceptibilidad, considerando que un modelo ideal de curva, varía entre los 0,5 lo que representaría la mitad de aspectos negativos y la mitad de aspectos positivos, para una predicción aleatoria de representación en el área (línea de no discriminación), y un valor de 1,0 para una predicción perfecta), la validación del operativa del receptor ROC, evalúa la precisión de los modelos en áreas de estudio (Yesilnacar y y Topal 2005; Mahommady et al., 2012). Se entenderá, por un AUC moderada

según Thongley, T. y Vansarochana, C. (2021) a los valores del (0,6 - 0,7) Buena (0,7 – 0,8) Muy buena (0,8 – 0,9), y (0,9-1) en categoría excelente.

7. RESULTADOS

7.1 Resultados de parámetros

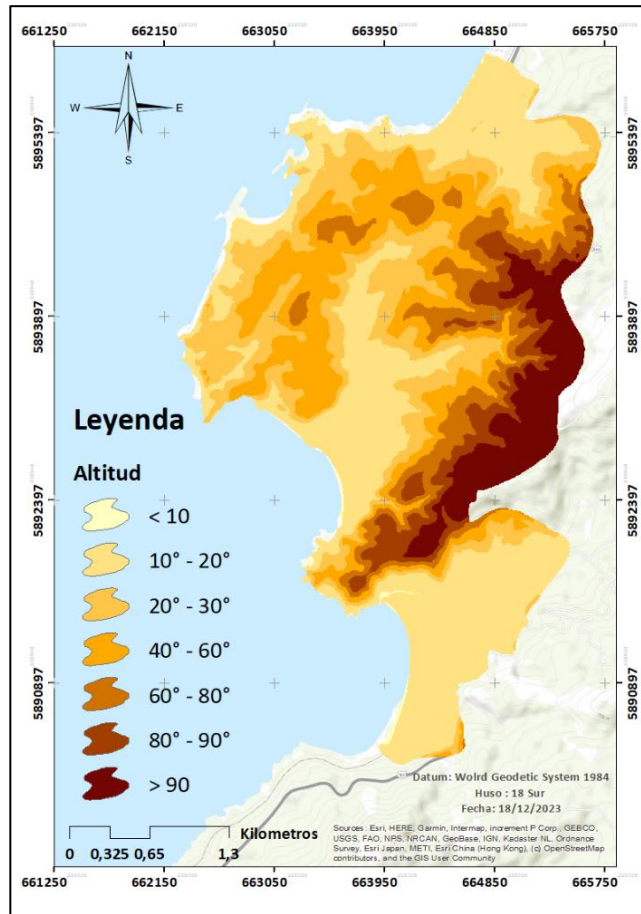
7.1.1 Altitud

Para la delimitación del área de estudio, se empleó el Modelo Digital de Elevación (DEM) proporcionado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu, 2013). Utilizando el *software ArcGis, 10.8.2*, con la herramienta *Spatial Analysis Tools - Reclassify* se subdividió el DEM en categorías de 5, 10 y 30 metros, buscando distinguir la mayor cantidad de pendientes agrupadas por cada clase similar al aplicado por otros investigadores como Demir, G. et al., (2012), Chen, W. et al., (2012), Hong, H. (2016), y Pourghasemi, H. R. et al. (2013). Se aplicaron valores de quiebre de intervalos o bins, logrando así una clasificación precisa de las alturas según las medidas correctas (**Ver Figura 23**).

La elección de los intervalos específicos de altura en el parámetro de susceptibilidad se fundamenta en una rigurosa consideración de la variabilidad altimétrica del terreno, buscando representar de manera precisa y abarcadora la diversidad de alturas presentes en el área de estudio.

A partir del Modelo Digital de elevación (DEM) se establecieron intervalos de 5, 10 y 30 metros. Su estratificación se justifica con el propósito de capturar una gama significativa de alturas, desde microtopografías sutiles hasta características geomorfológicas más pronunciadas. La elección de un intervalo de 5 metros se orienta a captar variaciones altimétricas finas y detalles topográficos de menor escala, permitiendo discernir cambios sutiles en la pendiente y la configuración del terreno. Mientras tanto, el intervalo de 10 metros aborda variaciones altimétricas de una escala intermedia, capturando características geomorfológicas más notables, pero aún sensibles a cambios locales. La frecuencia relativa asociada a cada clase se distribuyó de manera equitativa, revelando valores que oscilan entre 0,10 en las alturas de 40 m a 60 m y de 0,008 (FR) en 60 m a 80 m. Es destacable que las frecuencias más elevadas de (FR) respecto al área total se registraron en estos intervalos altitudinales, sugiriendo que el parámetro en cuestión adquiere valores significativos en dichas alturas. Por último, el intervalo de 30 metros se dirige a representar cambios altimétricos de mayor envergadura, incorporando las elevaciones que pueden ejercer un impacto considerable en la susceptibilidad a deslizamientos. Esta estrategia de intervalos graduados busca conciliar la necesidad de capturar tanto las pequeñas variaciones altimétricas que, así como los valores de frecuencia distribuidas en el terreno.

Figura 23. Mapa de pendientes



Fuente: Elaboración propia. (2023) a partir de DEM (Minvu. 2013)

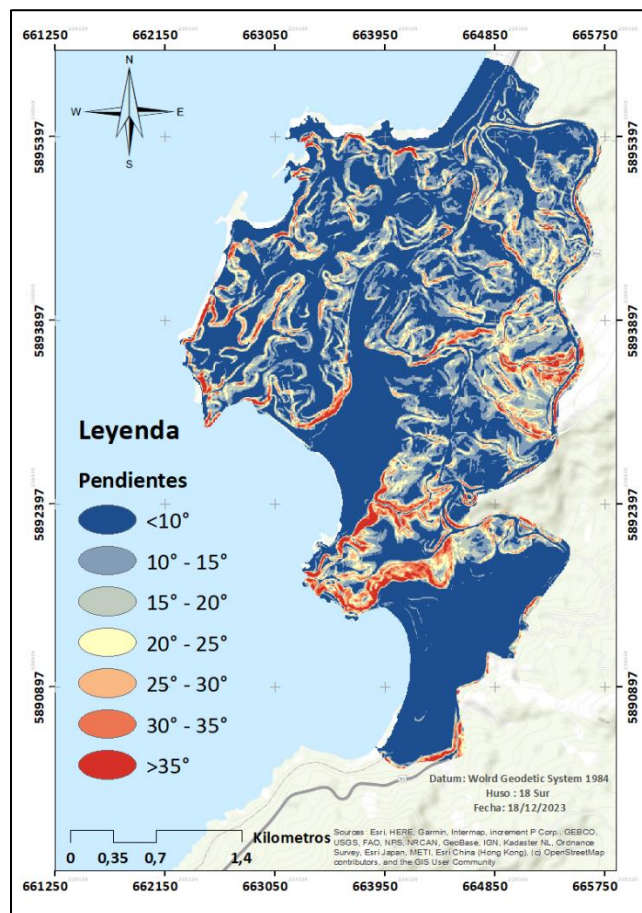
7.1.2 Pendiente

La estratificación en intervalos se realizó con el propósito de facilitar la interpretación, permitiendo describir patrones específicos de susceptibilidad a deslizamientos en función de diferentes rangos de pendientes. Este enfoque se asemeja a la metodología aplicada por Yalcin, A., (2008), y Pradhan, B. (2010), quienes han empleado una técnica similar para mejorar la interpretación de la susceptibilidad al deslizamiento al segmentar el terreno en intervalos específicos de pendientes. Esta subdivisión en clases potencia la sensibilidad del modelo, al identificar distintos rangos de tendencias y patrones, contribuyendo así a una evaluación más detallada y específica de la susceptibilidad en el área de estudio.

Para llevar a cabo la evaluación de dicho parámetro, se prescindió del Modelo Digital de Elevación (DEM) proporcionado por Minvu (2013). Mediante las herramientas disponibles en ArcGIS, específicamente *Spatial Analyst Tools – Surface – Slope*, se generó un mapa de pendientes (**Ver Figura 24**). Este mapa fue sometido a un proceso de clasificación utilizando la herramienta *Reclassify*, dividiendo las pendientes en intervalos de 5 y 30, siguiendo la distribución inherente de los elementos de pendiente.

En el proceso de recopilación de datos, se observó un incremento en la relación de frecuencia a medida que se incrementa el grado de pendiente del terreno. Específicamente, se registraron valores de 0,046 para pendientes entre 25° y 30°, 0,060 para pendientes de 30° a 35°, y 0,079 como el punto máximo de la relación de frecuencia en pendientes superiores a 35°. Estos resultados indican un aumento progresivo de eventos de remoción a medida que la pendiente del terreno se incrementa, destacando la influencia significativa de la pendiente en la frecuencia de tales eventos.

- **Figura 24.** Mapa de pendientes



Fuente: Elaboración propia. (2023) a partir de DEM (Minvu. 2013)

7.1.3 NDVI Índice de Vegetación de diferencia Normalizado

Para reconocer la vegetación y su estado de salud en el área de estudio, se generó el Índice Normalizado de Diferencias Vegetaciones (NDVI), como lo propuso Sánchez Rodríguez E., et al. (2000) correspondiendo al índice mayormente utilizado para discriminar un rango de variación fijo (entre valores 1 y +1) por lo que según Rodríguez Valdivia A. (2014), permite identificar suelos de cubierta vegetal que representan cobertura y clasificación de cuatro rangos. Para valores de índice >1 , normalizados a 0 – 0,5 (colores más cálidos) representan principalmente áreas de suelo desnudo o urbanizados, a la vez frecuentan una alta probabilidad de ocurrencia de deslizamiento de tierra y los valores de NDVI inferiores a < 1 normalizados de 0,5 a 1 (Colores frescos) correspondieron a áreas verdes como bosques a alta pendiente y con una menor frecuencia de remociones en masa de deslizamiento.

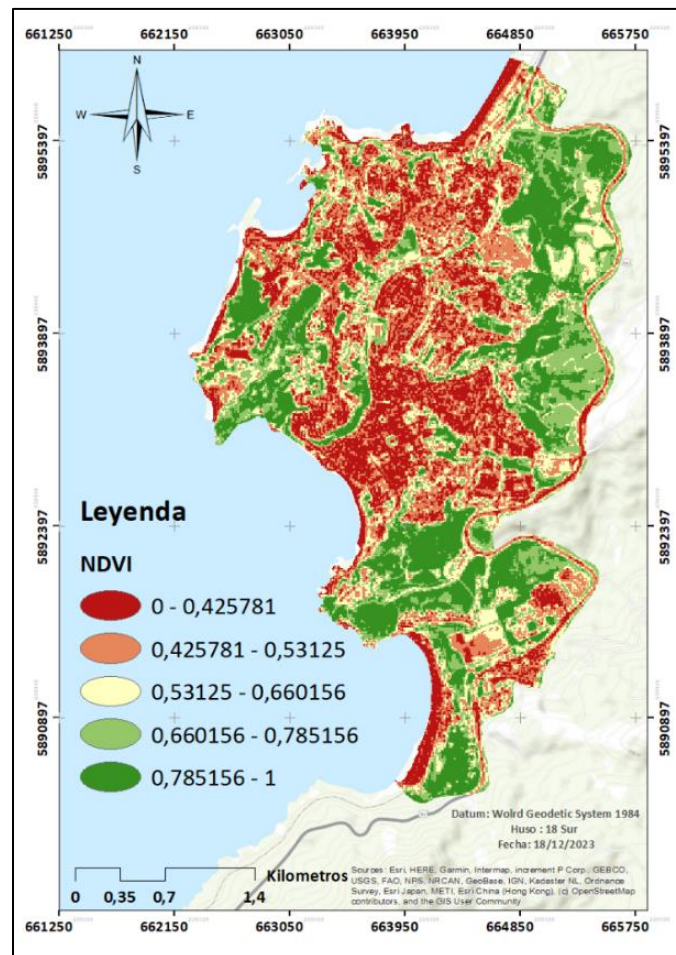
La imagen empleada en el presente estudio fue obtenida a través del repositorio Landview, utilizando imágenes capturadas por el satélite Sentinel-2 L2A en la fecha del 4 de octubre de 2023. El conjunto de datos correspondiente al área de investigación se descargó con una resolución espacial inicial de 10 x 10 metros. Con el propósito de integrar esta imagen en la metodología, se llevó a cabo una reproyección mediante la función "*Resample*", ajustándola a una resolución espacial de 5 x 5 metros. Esta acción se realizó con el objetivo de igualar el número de píxeles que se utilizarían en cada parámetro de análisis dentro del método en ejecución.

Para la generación del NDVI, se seleccionaron las bandas B8 y B4 de la imagen, siguiendo el enfoque propuesto por Li, Z., & Guo, X. (2013). Esta elección permitió obtener un resultado que resalta valores menores en tonos rojos y anaranjados, identificando áreas con baja actividad de clorofila, especialmente notables en las zonas urbanas. En contraste, se observaron valores más altos representados en colores cercanos al verde, indicativos de una mayor actividad fotosintética y vegetación en estado saludable. La reclasificación del NDVI, se llevó a cabo utilizando el método de ruptura natural para clasificarlo en cinco categorías, siguiendo la metodología aplicada por autores como Kavzoglu, T. et al. (2015), Bournatxea, T. (2018) y Hong, H. (2016).

En lo que respecta a la frecuencia relativa del parámetro analizado, se observó una concentración en prácticamente todos los intervalos, con la excepción de los sectores caracterizados por valores elevados, específicamente en el rango de 0,8 a 1 de NDVI, donde se registró una frecuencia relativa de 0,2 en comparación con el resto del área. Este descenso en la frecuencia relativa sugiere una disminución en la

salud de la vegetación en áreas donde se manifiestan estos valores más altos, proporcionando así información relevante sobre la relación entre el parámetro estudiado y el estado de salud vegetal.

- **Figura 25.** Mapa de Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI)



Fuente: Elaboración propia partir de Dem (Minvu, 2013)

7.1.4 Orientación de ladera

El mapa adjunto (**Ver. Figura. 26**) ilustra la orientación predominante de las laderas en el área de estudio, destacando una notable concentración en las direcciones norte y noroeste.

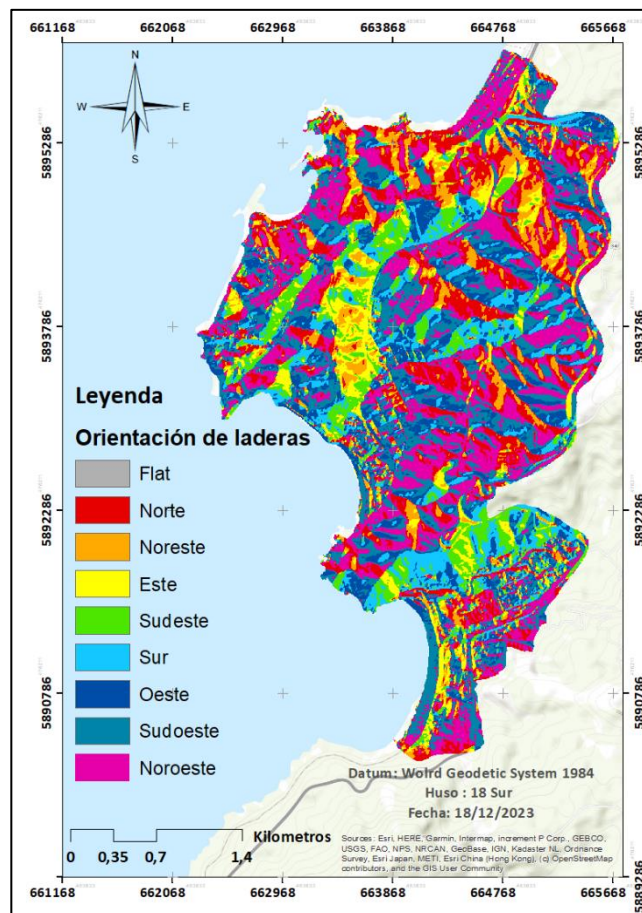
La obtención del mapa de orientación solar se llevó a cabo mediante el uso del Modelo Digital de Elevación (DEM) y la herramienta *Spatial Analyst Tools - Aspect*. Este proceso proporcionó información detallada sobre la orientación de las laderas, la cual fue reclasificada en nueve clases, comprendiendo planos (-1°), Norte (,

0° - 22.5°, 337.5 – 360°), Noreste: (22.5° - 67.5°), Este (67.5°-112.5°), Sureste (112.5°-157.5°), Sur (157°-202.5°), Suroeste (202.5° - 247.5°) Oeste (247.5°- 292.5°) y Noroeste (292.5° - 337.5°). Con el objetivo de mitigar posibles distorsiones en los patrones espaciales, se implementó el filtro de mayorías (*Majority Filter*) en cada celda, utilizando celdas circundantes al centro del núcleo del filtro.

Este enfoque de procesamiento y clasificación proporciona una representación visual clara de la disposición de las laderas en relación con las principales direcciones cardinales, ofreciendo así información valiosa sobre la topografía y la exposición solar en el área de interés. La utilización de técnicas como el filtro de mayorías contribuye a la mejora de la coherencia espacial de los resultados obtenidos.

En cuanto a la frecuencia relativa, se observó una distribución equitativa de los valores, fluctuando entre 0,012 y 0,05 en las direcciones Norte y Sudoeste, respectivamente. Esto resultó en una distribución más uniforme del parámetro, caracterizándose por una menor concentración de frecuencia relativa.

- **Figura 26.** Mapa de orientación de laderas



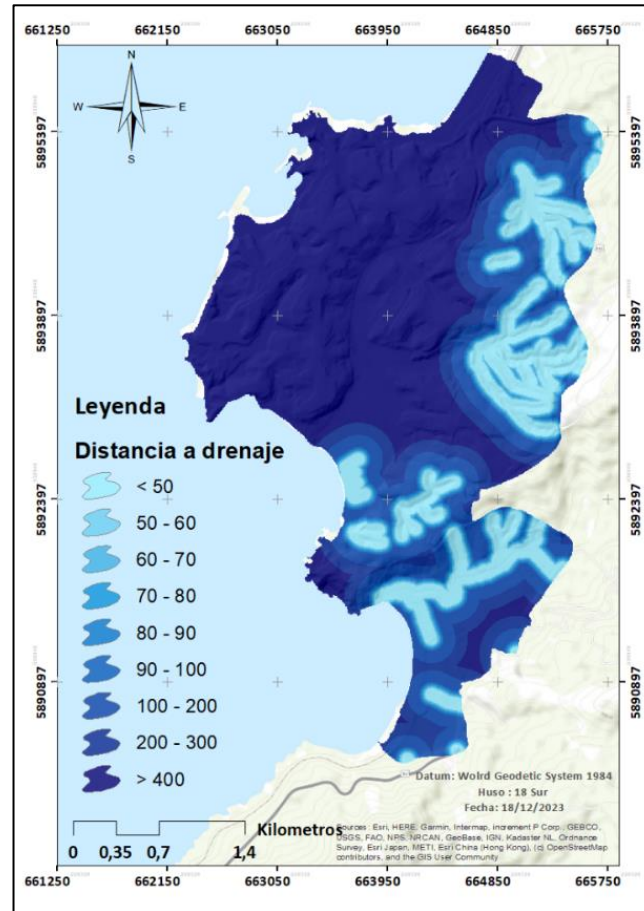
Fuente: Elaboración propia (2023) a partir de Dem (Minvu, 2013).

7.1.5 Distancia a red hídrica

Para la realización del mapa de parámetro, se obtuvieron las redes hídricas obtenidas de Dem (Minvu, 2013), utilizándose con la herramienta de *Arcgis, Spatial Analyst Tools; Distance – Euclidean Distance*, en intervalos de distancia con quiebres según la discretización en un proceso de binning basado en las características del histograma, como lo realizado por autores como Pourghasemi, H. R. et al., (2017).

La evaluación de la distancia a los ríos revela un coeficiente de relación y una frecuencia <1 , lo cual sugiere una probabilidad de RM mayor en distancias comprendidas entre 30 y 400 metros. Este hallazgo podría indicar una elevada posibilidad de que las RM ocurran debido a la saturación del suelo por la proximidad al curso de agua, afectando directamente la estabilidad de la pendiente. En relación con la frecuencia relativa, se observó una concentración particular en los primeros 50 a 60 metros, alcanzando un valor de 0,031 en proximidad a los cauces. Esto revela una relación significativa entre las remociones y la cercanía al parámetro, manifestándose consecuentemente valores inferiores para las clases más distantes de los cauces, los cuales oscilan entre 0,003, 0,005 y 0,007. Este patrón indica una disminución en la frecuencia de remociones a medida que aumenta la distancia respecto a los cauces.

- **Figura 27.** Mapa de distancia a ríos en área de estudio.



Fuente: Elaboración propia (2023) en base a DEM. Minvu, 2013.

7.1.6 Distancia a carreteras

La presente descripción aborda un mapa de parámetro de susceptibilidad en relación con la distancia a carreteras, cuya construcción se llevó a cabo mediante un proceso de Benning. Este método implica una discriminación meticulosa para identificar la distribución óptima que mejor represente tanto la frecuencia como la naturaleza de las remociones observadas.

Autores como Porghasemi et al. (2012), Acharya-Lee & Dong, Ha Lee (2019), y Chen, W. et al. (2017) han destacado la relevancia de la variable de proximidad a carreteras en análisis de susceptibilidad, respaldando la elección de esta variable en el presente estudio. En este contexto, la susceptibilidad se refiere a la propensión de una determinada área a experimentar remociones en función de su proximidad a las carreteras. La distancia a las carreteras se ha dividido en intervalos para facilitar la representación visual y

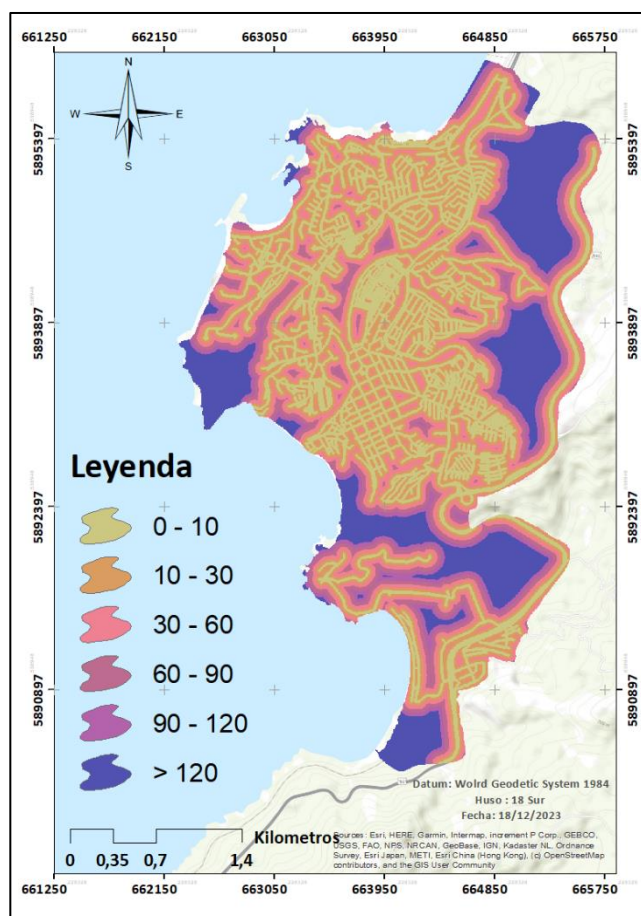
analítica. La elección de estos intervalos de 10 y 30 metros basándose en el proceso de Benning, implica la evaluación de diversas distribuciones para determinar la más adecuada y representativa relación entre la distancia a las carreteras y la frecuencia de remociones.

Es crucial destacar que el enfoque de Benning se buscó no solo identificar la distribución que mejor se ajusta a los datos, sino también seleccionar aquella que capture de manera óptima la variabilidad en las remociones en función de la distancia a las carreteras. Este proceso garantiza una representación precisa y confiable de la susceptibilidad en el contexto analizado, permitiendo así una comprensión más profunda de los patrones espaciales de riesgo asociados con la proximidad a las infraestructuras viales.

La medición de la distancia a vías y carreteras se derivó de la generación de un buffer a partir de datos vectoriales de vías en la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE). Siguiendo la metodología propuesta por Chen, W. et al. (2017) y Pourghasemi, H. R et al. (2017), se empleó la caja de herramientas *Spatial Analyst Tool – Distance - Euclidean Distance*. Aunque algunos investigadores, como Yalcin, A. (2008), han propuesto clasificar intervalos equidistantes en 2, en este estudio se optó por una estrategia de agrupación de datos, utilizando un proceso de binning que se ajusta mejor a la distribución y facilita la interpretación clara del histograma.

En lo referente a la frecuencia relativa se distribuye de manera equitativa en diversos intervalos, con valores que fluctúan entre 0,05 y 0,08 de frecuencia relativa (FR). Esta distribución muestra un incremento progresivo al acercarse más a la red vial. Tal observación sugiere una relación significativa entre la distancia a la carretera y la frecuencia de remociones en masa, indicando que la proximidad a la infraestructura vial puede influir en la incidencia de dichos eventos.

- **Figura 29.** Mapa de distancia a carreteras



Fuente: Elaboración propia (2013) por medio de un DEM (Minvu. 2013)

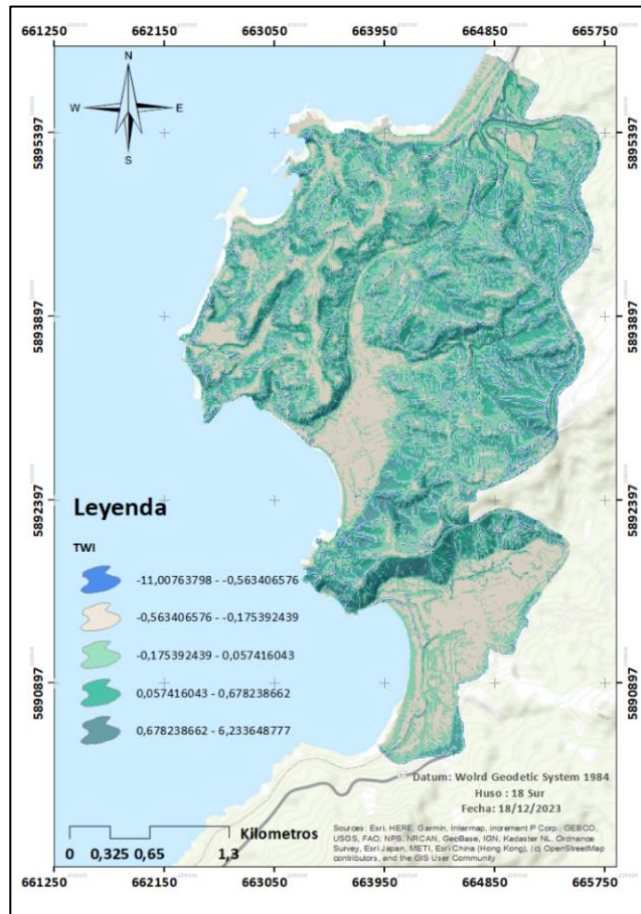
7.1.7 Índice topográfico de humedad (TWI)

Para el resultado del mapa de temático, en el software ArcGis, se obtuvo tanto un Flow Direction (por medio de la función de *Spatial Analyst Tools – Hydrology*) así como un *Flow Accumulation*, con los cuales, por medio de la calculadora Raster, aplican la fórmula de $Flow\ Accumulation + 0,001 / (resultado\ de\ pendientes\ graduados / 100 + 0,001)$. Por último, se reclasificó en 6 intervalos.

Garbecht y Martz (2000) resumen el enfoque mediante un modelo hidrológico de escorrentía, que incorpora canales de áreas contribuyentes a través de la topología, utilizando la indexación de canales con una

secuencia de enrutamiento. El algoritmo empleado estima los patrones de drenaje al calcular la topografía, a veces visualizada con flechas, para representar las áreas de drenaje desde aguas arriba. Este método identifica valores negativos para señalar áreas menos propensas a la acumulación de agua, correspondientes a zonas más elevadas con topografía más inclinada, donde el agua tiende a escurrir rápidamente. En contraste, los valores positivos (**Ver. Figura 30**) indican áreas más susceptibles a retener agua, refiriéndose a depresiones en el terreno o regiones con una topografía más plana, facilitando la acumulación de agua. La clasificación del Índice de Pendiente de Flujo (TWI) ha sido previamente empleada por Moore, I.D. et al. (1991), así como en modelos de susceptibilidad de remoción en masa, como se evidencia en los estudios de Chen, w. et al. (2017), Hong, H. et al. (2016), Arabameri et al. (2017), Thongley, T. y Vansarochana, C. (2020), y Nachappa, T.G. (2020). Este enfoque proporciona una herramienta valiosa para comprender la variabilidad espacial del riesgo asociado con las características topográficas en el contexto de la susceptibilidad a la remoción en masa. La frecuencia relativa del Índice Topográfico de Humedad (TWI) exhibió una concentración significativa en los intervalos superiores, los cuales corresponden a valores positivos. Estos valores positivos denotan áreas que poseen una mayor propensión a la acumulación de agua, sugiriendo que el terreno exhibe una probabilidad elevada de estar húmedo o saturado. Este fenómeno se atribuye a las características topográficas que dificultan un drenaje eficaz del agua en superficies con pendientes más pronunciadas. Se observó una frecuencia relativa de 0,010 en estos intervalos, en contraste con valores negativos, que oscilan entre 0,004 y 0,006 en otras zonas.

- **Figura 30.** Mapa de índice de topográfico de humedad



Fuente: Elaboración propia. (2023) a partir de DEM (Minvu. 2013)

7.1.8 Geología

Se elaboró considerando la geología como un parámetro fundamental, y la información geológica del área de estudio se obtuvo a partir del trabajo de Quinzio, L. et al. (2010). Para integrar esta información geológica en el análisis, se utilizó la herramienta de recorte ("clip") de ArcGIS, específicamente dentro de las funciones de Analyst Tools, mediante el proceso Extract-Clip. Posterior a esta fase, se llevó a cabo una rasterización de los datos geológicos. El proceso de rasterización resultó en la creación de un conjunto significativo de zonas diferenciadas en términos de estructura y disposición de minerales en el área de estudio. Este enfoque permitió incorporar la complejidad geológica del terreno, identificando de manera más detallada las

variaciones en la composición geológica y su influencia en la susceptibilidad a fenómenos específicos, como remociones en masa. La disposición y estructura geológica desempeñan un papel crucial en la determinación de la susceptibilidad, y la técnica empleada facilita una representación más precisa de las características geológicas en el contexto del análisis de riesgos asociados a movimientos de masa.

Hf Depósitos fluviales actuales (Holoceno)

También conocidas por Galli., (1967) como formación Huachipato, se encuentran compuestas principalmente de arenas negras distribuidas por fragmentos líticos de basalto y granos de feldespatos subordinados, aunque también se pueden encontrar fragmentos de magnetita, hematita, vidrio volcánico, micas, olivino y cuarzo. Según Quinzio, L. et al., (2010) los depósitos fluviales contienen pequeñas cantidades de limo, situadas por las bahías de Concepción, y ribera del Río Biobío además de escarpes de cordillera de la Costa y península de Tumbes. Las arenas presentes son principalmente de una granulometría de grano medio a fino, estratificación planar horizontal, y cruzada. En algunos sectores, se afirma una matriz de arena gruesa, clastos y en ocasiones presentará depósitos de arenas fina y limo (Galli, C. 1967) a la vez que, para la generación de barras y material de canales, predominará notablemente la grava policíclica de andesita y granitoides (Paez, D.D et al 2010).

Pgcc: Formación Cosmito – (Paleógeno-Eoceno)

Galli (1976) localiza a la formación de cosmitos en la Estación de Ferrocarril Cosmito, ubicada a 5km al Norte de Concepción. Su litología se encuentra conformada de lutitas, areniscas pardas, con conglomerados y mantos de carbón.

Dicha composición, es concordante e infra yacente a la discordancia angular, formando depósitos cuaternarios principalmente costaneros asociados a pantanos dunares litorales, formados en un ambiente de baja energía.

Sin embargo, para Galli, C. (1967) pueden corresponder a una formación del Eoceno, debido a la presencia de algunos fósiles guías como *Paraorthacodus* (Jurásico Superior y el Paleoceno), *Rhombodus* e *Ischyrrhiza* en el cretácico que facilitan una datación relativa.

PlhHfm (Pleistoceno – Holoceno)

La formación Huachipato propuesta por Galli, C. (1967), propone depósitos con un uso de denominación genética de materiales principalmente transportados por el río Biobío, formado por arenas, fragmentos líticos, hematitas, vidrio volcánico, micas, olivinos y cuarzos, distribuidas en discordancias angulares y unidades pre cuaternarias; además de interestratificados con depósitos litorales, aluviales y coluviales (Galli, 1967).

Su geografía se encuentra dado principalmente en el río de desembocadura en la bahía de Concepción y Talcahuano, con materiales provenientes de remociones de arenas basálticas y depósitos de remociones depositadas tales como; piroclásticos turbulentos de una erupción freatomagmática (Galli, C. 1967).

Pgcc Formación Cosmito (Curanilahue)

Dominan sedimentos alternados continentales y marinos de areniscas, arcillas, mantos de carbón que según lo publicado por se caracterizan por una estratigrafía de basamento Paleozoico y concordante con la Formación Quiriquina u/o F. Pilpico. Su extensión se encuentra representada a lo largo de una franja en dirección paralela al oeste de afloramientos cretácicos en la costa de bahía Arauco (Lota y parte de Coronel) alcanzando en gran parte las zonas del Morro de Lota, Parque de Lota, corte de carretera (ruta 160), Paleógeno. Cristi, J. M. (1946) clasifica esta formación en: Horizonte de Pilpico – marino; Horizonte de Lota – continental; Horizonte de Intercalación – marino y Horizonte de Cólico – continental.

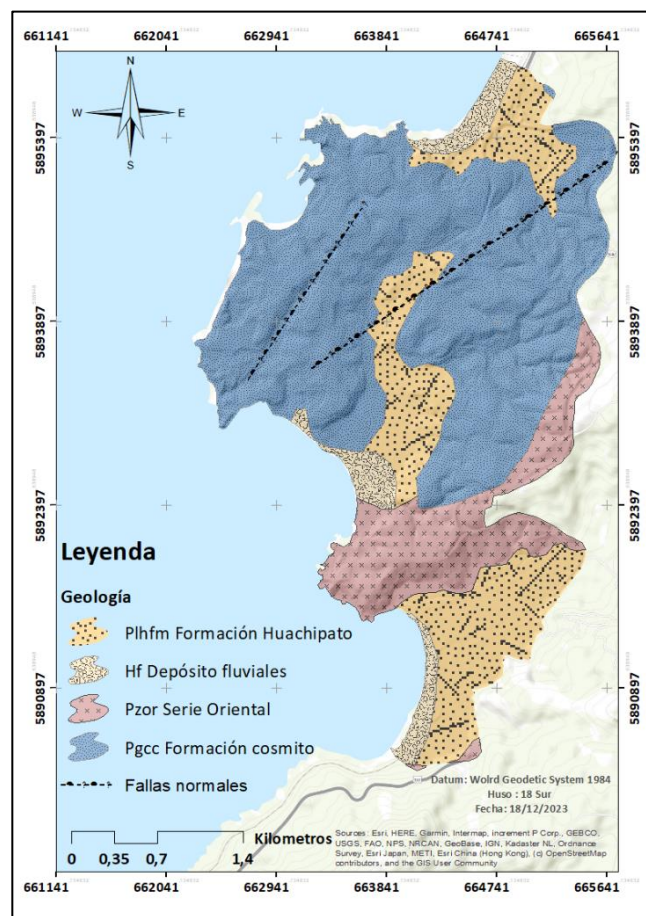
Pzor. Serie oriental

La formación oriental se encuentra conformada con predominancia e Andalucita(a), la cual es un complejo de rocas con metamorfismo regional de rocas sedimentarias como la lutita u rocas mayormente arcillosas. Toloza, V et al., (2017) sobre la serie oriental compuesta, menciona pertenecer a una composición la cual sufrió acreción frontal y basal durante el Paleozoico, produciéndose una foliación compuesta por; meta grauvaca, pizarra, filitas, esquistos, rocas córnenas y, gneises magmáticas granitoides y rocas silicatadas (Aguirre, L. et al., 1972). Dicha litología se encuentra distribuida por todo el margen nororiental hasta Penco. Cisterna, M.E. (2017) menciona que es debido a un metamorfismo de contacto, que se presentan por piroclastos de andalucita y biotita (pudiendo ser pseudomórfica de clorita), entre algunos esquistos. Dicha composición litológica se habría depositado en el periodo del Carbonífero inferior, perteneciendo

ligeramente de una serie Occidental que, dada su posición geográfica y similitudes petrográficas geoquímicas, y estructurales representa una retro cuña de subducción influenciada por el metamorfismo regional de tipo Barroviano, produciendo consigo una instrucción de batolito (Tolosa, V. et al., 2017). En la zona comprendida ente Tomé e Isla Quiriquina la mineralogía se compone por cuarzo, mica blanca, seriecita clorita y biotita (mineral folisilicatados).

En la mineralogía de la Formación Quiriquina, los constituyentes principales comprenden cuarzo, mica blanca, sericita, clorita y biotita, siendo estos últimos minerales folisilicatados. En el contexto de la frecuencia relativa (FR), se observa una fuerte correlación con la Formación Cosmito, evidenciada por un valor de FR de 0,016 en relación con remociones en masa (**Ver Tabla. 6**). Este resultado subraya la relevancia del parámetro en cuestión y señala una concentración significativa de remociones asociadas a la mencionada formación, indicando una correlación entre su composición mineral y la activación de diversos fenómenos.

- **Figura 31.** Mapa de complejos geológicos



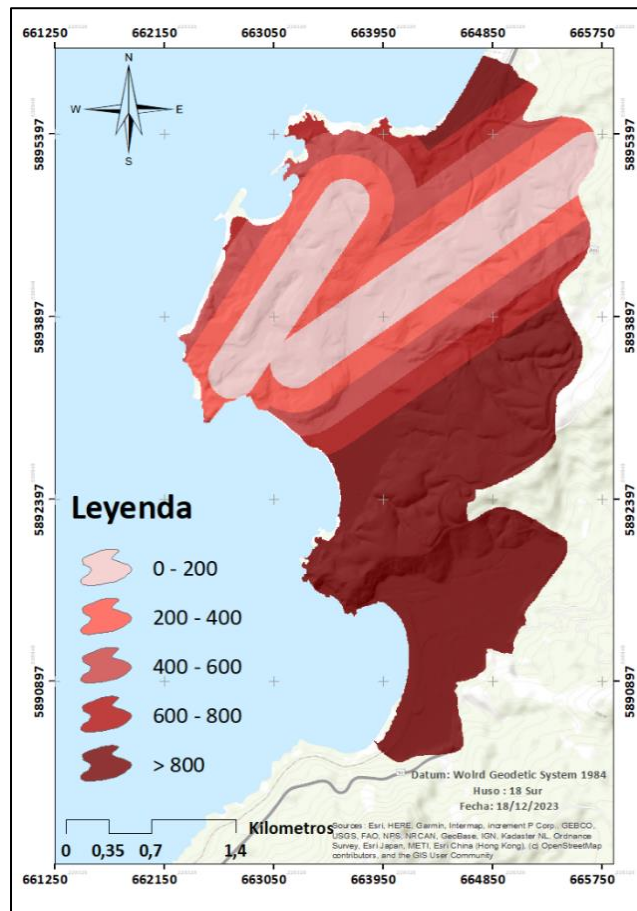
Fuente: Elaboración propia (2023) a partir de Quinzio, L. et al., (2010).

7.1.9. Distancia a falla geológica

Las fallas geológicas utilizadas para la realización del parámetro, (**Ver. Fig 32**) fueron identificadas por Molina Jiménez. P. A., (2017) y luego llevadas a una vectorización por medio de la herramienta de *Argis; Editor - Create Features* – (vectorización sobre la cartografía). Posterior a ello, se utilizó la caja *Spatial Analyst Tools - Distance) Euclidean Distance*, y por último el resultado se reclasificó con la función *Reclassify* considerando la distancia utilizada en diferentes estudios de monitoreo, los cuales han revelado que las remociones en masa aumentaron a los 200 metros de distancia siempre y cuando se presenten características de fracturación de roca con diferencias de resistencia, grietas tensionales, entre otros (Kilburn, C. R., y Petley, D. N. 2003).

Los resultados obtenidos posibilitaron evidenciar una distribución relativamente uniforme en cada categoría en lo que respecta a la frecuencia de remociones en masa. Se obtuvo una relación de frecuencia (FR) de 0,010 en distancias superiores a 400 metros, indicando una proporción constante de eventos en dicha distancia. Por otro lado, se observó que más del 60% de la relación de frecuencia (FR) se registró en intervalos que van desde los primeros 0 hasta los 300 metros de distancia con respecto a las fallas. Este hallazgo sugiere una concentración significativa de eventos de remoción en masa en proximidades más cercanas a las fallas geológicas dentro de este rango específico de distancias.

- **Figura 32.** Mapa de distancia a fallas geológicas.



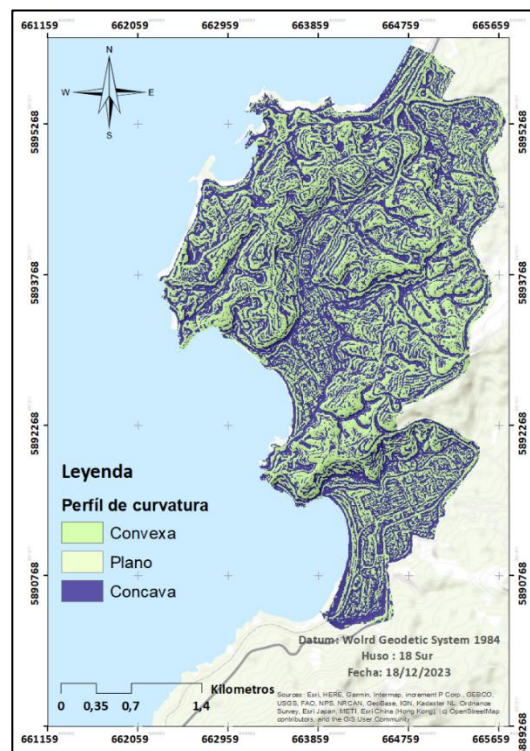
Fuente: Elaboración propia 2023 a partir de DEM (Minvu. 2013) y Molina Jiménez, P.A. (2017)

7.1.10. Perfil de curvatura

El perfil de curvatura en terreno es la superficie en dirección con la pendiente, indicando que el paralelo a la pendiente obtiene la dirección y curvatura de plano perpendicular a la dirección, relacionándose una aceleración y desaceleración de flujo, de tal modo que, para valores negativos, el flujo a través de la superficie tendrá valores negativos indicando convexidad y por tanto desaceleración del flujo, a la vez que en un perfil positivo la superficie es cóncava hacia arriba, acelerando el flujo. Por último, los valores de 0 indicarán una superficie lineal. Para obtener los resultados de curvatura (de plano, perfil y estándar) se utilizó la herramienta de *ArcToolBox en Spatial Analyst Tools – Surface – Curvature*.

La distribución de la frecuencia relativa reveló valores de 0,008 para las caras convexas, 0,006 para las cóncavas y ninguna incidencia (0) para las caras planas (**Ver Tabla. 6**) Este patrón evidencia una relación destacada de remociones en masa en áreas caracterizadas por caras convexas y cóncavas, mientras que las zonas predominantemente planas exhiben una ausencia de este fenómeno. Este hallazgo sugiere una asociación más fuerte entre la presencia de remociones en masa y las configuraciones geomorfológicas convexas y cóncavas, acentuando la influencia de la topografía en la dinámica de procesos de remoción en masa.

- **Figura 33.** Mapa de perfil de curvatura



Fuente: Elaboración propia (2023) a partir de DEM (2013)

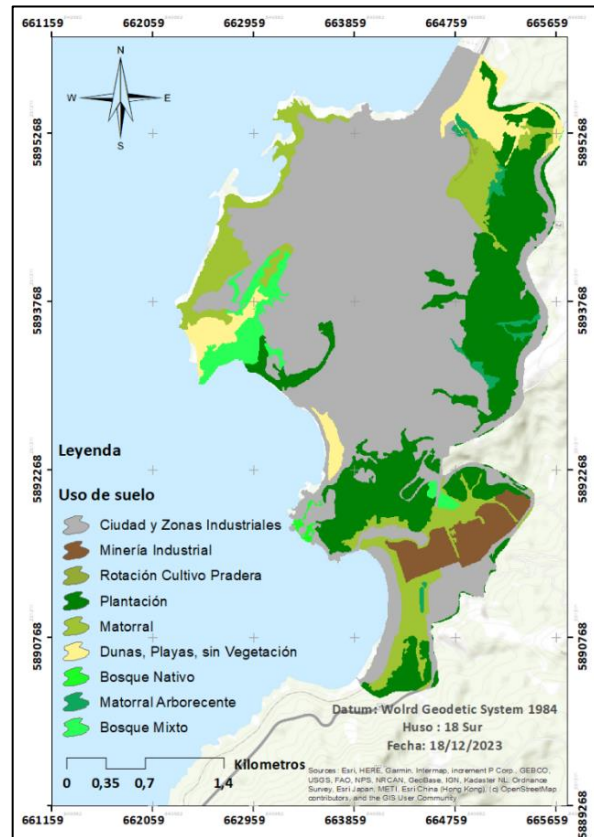
7.1.11 Plano de curvatura

El mapa de plano de curvatura, indica las superficies perpendiculares a la dirección de la pendiente dentro del área de estudio, proporcionando valores positivos para superficies convexas, en dirección hacia arriba de la celda. El plano negativo indica la superficie cóncava hacia arriba de la celda manteniendo un valor de 0 para las superficies planas. Para las unidades convexas el gradiente aumentará con la longitud y en unidades cóncavas el gradiente disminuirá con la longitud (ESRI, 2021). Para la realización del mapa de plano de curvatura se utilizó el Dem (Minvu. 2013) utilizando la herramienta *Spatial Analyst Tools - Surface – Curvature* en el cual el área de estudio se subdividió en 3 clases, con pendientes cóncavas, convexas y de zonas planas similar a lo realizado por autores como Crosby, D. A (2006) y Gholami, M. et al., (2017).

Para dicho parámetro la distribución de su frecuencia relativa (FR) de 0,006 (Convexo) y 0,008 (cóncavas) y 0 (FR) para las zonas planas corroborando que en áreas planas existe un bajo valor de FR, con lo cual se obtienen valores contrarios a lo conseguido por el perfil de curvatura en valores de FR. Este resultado de PR con un valor de 2,70 (**Ver Tabla. 6**) sugiere que los cambios en la curvatura del plano desempeñan un papel crítico en la identificación de áreas propensas al evento en estudio. Por lo tanto, al considerar la influencia de la curvatura del plano en el modelo de susceptibilidad, los responsables de la evaluación de riesgos deben prestar una atención especial a este parámetro, ya que su mayor prediction ratio indica una capacidad predictiva más fuerte en relación con el evento de interés.

evidencian en menor medida. Adicionalmente, se aprecian praderas y matorrales en los márgenes del área de estudio. Este enfoque cartográfico busca proporcionar una representación clara y eficiente del uso del suelo, condensando clases similares para mejorar la legibilidad del mapa y eliminar redundancias innecesarias.

- **Figura 35.** Mapa de cobertura de uso de suelo Comuna de Lota.



Fuente: Elaboración propia. (2023), a partir de datos de Minagri, 2022.

Estas representaciones cartográficas ofrecen una visión detallada y contextualizada de la distribución del uso del suelo en la región, aspecto esencial para comprender la dinámica del paisaje y respaldar la planificación y gestión eficiente de los recursos. La frecuencia relativa reveló un aumento significativo, alcanzando un valor notable de 0,033 (FR) para el bosque Mixto. En contraste, se identificaron valores bajos de 0,00 para bosque nativo y pradera, y un modesto 0,009 para las zonas urbanas e industriales. Estos resultados sugieren una correlación elevada entre las remociones en masa y la presencia de bosques mixtos en la zona de estudio,

destacando la importancia de considerar estos elementos en la evaluación de riesgos y la toma de decisiones en la gestión del territorio.

Para dicho parámetro su valor de Prediction ratio o razón de predicción (3,09 PR), explica una mayor capacidad predictiva y mayor correlación de ocurrencia con los eventos de remociones, por lo que es de los parámetros mayormente responsable del modelado de susceptibilidad.

7.2. Resultado de Susceptibilidad ante Remociones en Masa Comuna de Lota

Con el propósito de individualizar el análisis, se procedió a la representación cartográfica de algunos sectores de la localidad de Lota. Esto se llevó a cabo mediante la elaboración de un Modelo de Terreno (Tin), que incluyó la superposición de información relativa a caminos y residencias, con el fin de exponerlos en relación con los niveles de susceptibilidad identificados en el área de estudio.

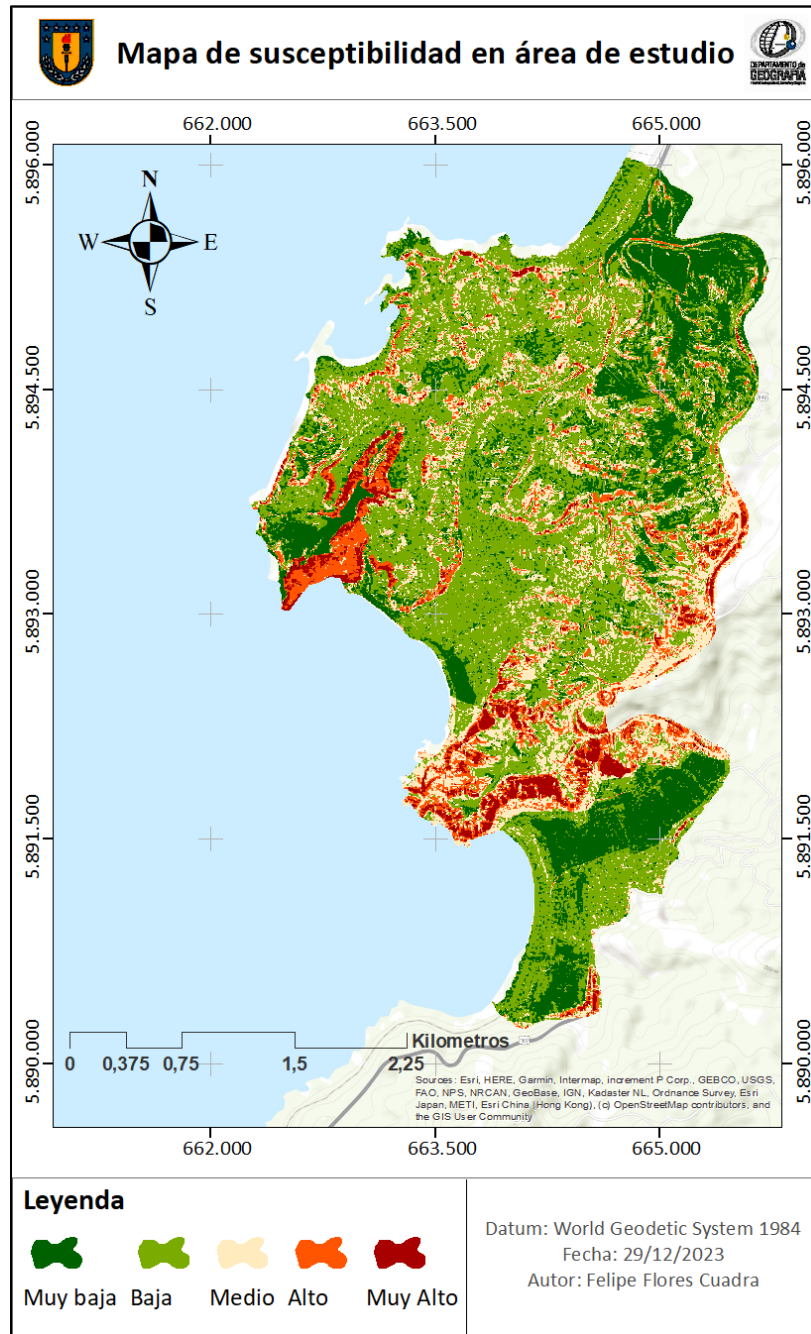
La comparación de estos mapas permitió visualizar diferencias significativas en las áreas específicas con distintas características de susceptibilidad. Del modelo propuesto para la región de estudio, se derivó que aproximadamente el 4% del área (46,279 hect) presenta una susceptibilidad muy alta, mientras que un 9% (95,902 hect) exhibe una susceptibilidad alta (**Ver Fig. 37 y 38**). Ambas categorías se relacionan principalmente con laderas y sectores por donde se produce la evacuación y escorrentía de agua de lluvia, con un aumento significativo en los valores asociados a cada sector.

En los niveles medios de susceptibilidad, que representan alrededor del 20%, (202 hect) se sigue en gran medida el patrón de deslizamiento, especialmente en las zonas de despegue de escarpes y pies de pendientes. Los niveles de susceptibilidad considerados bajos y muy bajos abarcan aproximadamente el 45% (231 hect) y el 22% (478 hect) del área de estudio, respectivamente. Estas categorías se asocian principalmente con sectores que han experimentado urbanización, pavimentación, y se encuentran ubicados en playas con pendientes moderadas y áreas de baja elevación.

No obstante, es importante destacar que, incluso en áreas que han sido sometidas a procesos intensivos de urbanización y pavimentación, como Bellavista y Lota Alto, se han registrado valores intermedios, bajos y muy bajos de susceptibilidad. Este fenómeno indica que, a pesar de la influencia significativa de la urbanización, pavimentación y otras intervenciones antropogénicas, ciertos sectores en altitudes específicas, como los mencionados, han logrado mantener niveles moderados, bajos y muy bajos de susceptibilidad. Esto

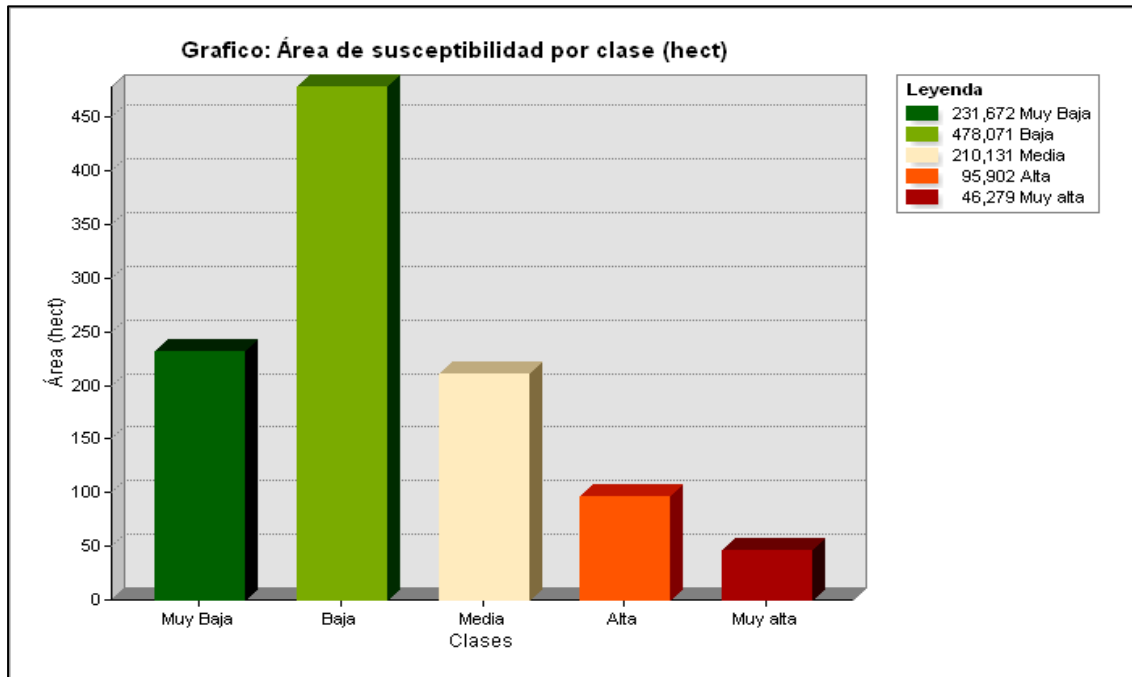
resalta la efectividad de las medidas adoptadas en la reducción de la susceptibilidad en estas áreas, reconociendo la importancia de la relación entre las prácticas antropogénicas y la disminución de susceptibilidad a eventos adversos al menos en el modelo propuesto.

- **Figura 36.** Modelo de susceptibilidad por Remosiones en masa en la Comuna de Lota.



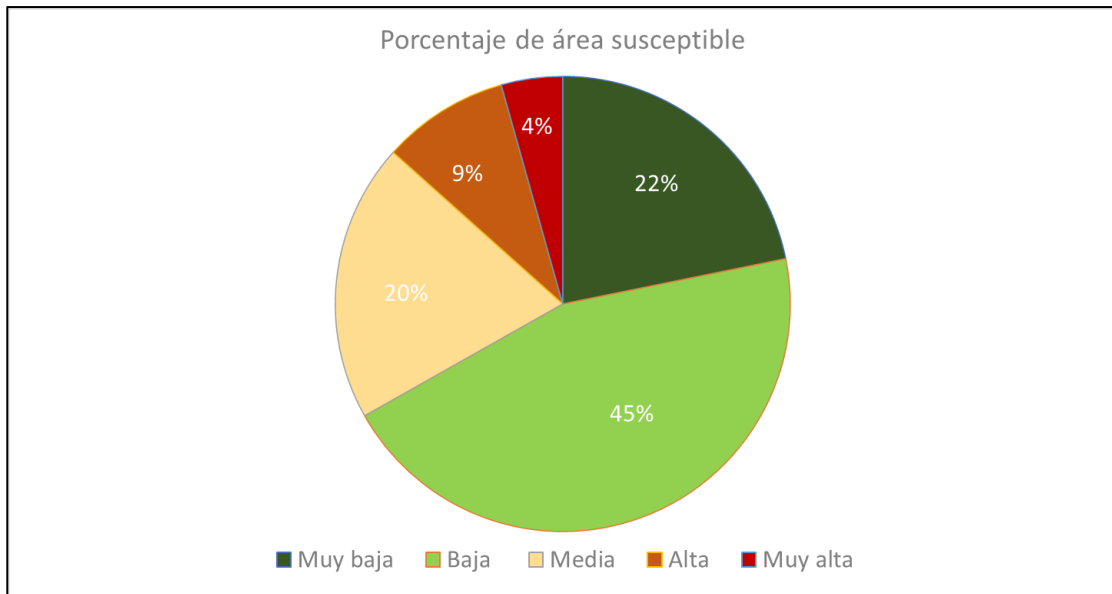
Fuente: Elaboración propia a partir de parámetros condicionantes. 2023

- **Figura. 37.** Gráfico. Porcentaje de susceptibilidad por clase, en área de estudio.



Fuente: Elaboración propia con ArcGis., 2023

- **Figura. 38.** Gráfico de porcentaje en área de susceptibilidad

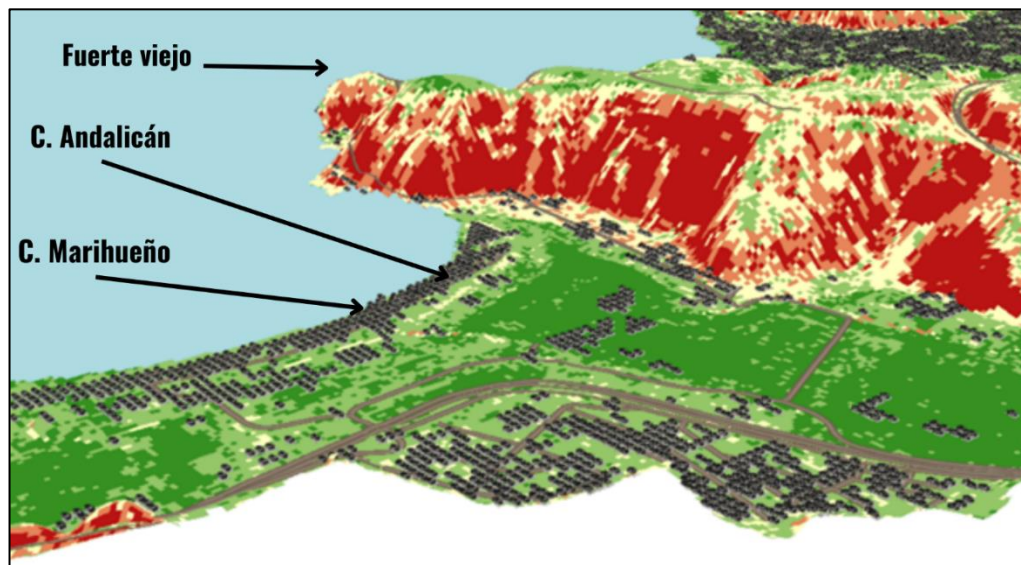


Fuente: Elaboración propia con ArcGis., 2023.

7.2.1. Sector Colcura

Los elevados niveles de susceptibilidad registrados en el área de Colcura se concentran alrededor del procesador de madera Tuisa. La proximidad de la calle Balmaceda (residencias al pie de cerro Fuerte Viejo) a zonas con alta susceptibilidad se evidencia en áreas de pendiente, donde se observan valores muy altos y altos, con una baja densidad de construcciones. La clase de susceptibilidad, representada por el color rojo oscuro, alcanza niveles muy altos en sectores con mayor incidencia de deslizamientos y fuertes pendientes, coincidiendo con coberturas principalmente boscosas y la presencia del estero Colcura. Los sectores predominantemente planos presentan valores de susceptibilidad que varían entre bajo y muy bajo. Estas áreas incluyen parte de las residencias a lo largo de las calles Andalicán y Marihueño, cerca de la Bahía de Colcura, reconociendo la posible presencia de zonas con superficies bajas y mayormente llanas, caracterizadas por una curvatura reducida. Las mediciones indican que las viviendas ubicadas en áreas cercanas a valores muy altos de susceptibilidad se encuentran en sectores con mayor número de construcciones. Sin embargo, la zona de Colcura exhibe valores elevados de susceptibilidad debido a su ubicación en áreas con densa vegetación arbórea y arbustiva, aunque, como se ha observado, prevalecen valores bajos de susceptibilidad en la mayor parte de la zona.

- **Figura 39.** Sector Colcura.

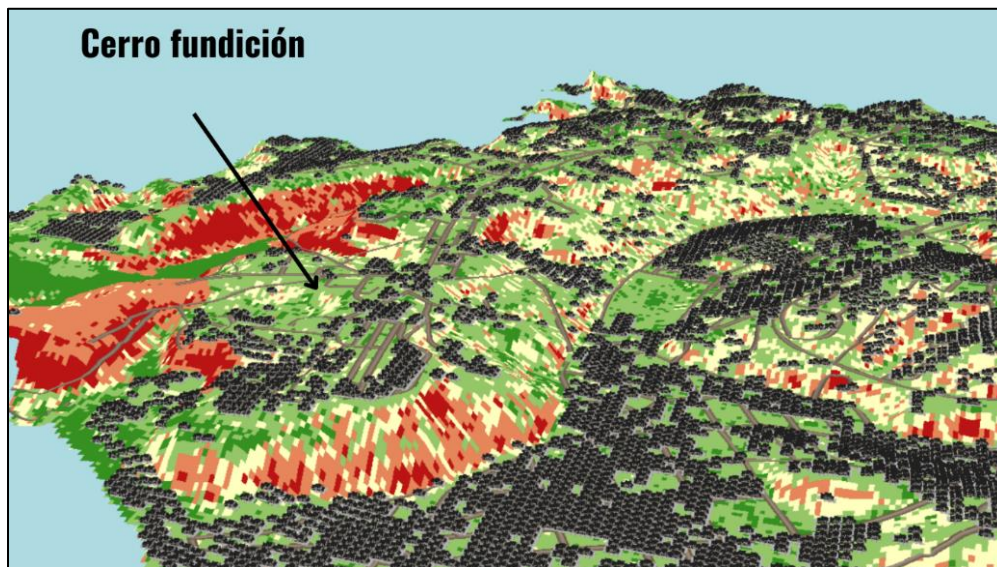


Fuente: Elaboración propia, (2023) a partir de Dem (Minvu, 2013) y imagen Séntinel para el área urbana (2023)

7.2.2 Sector Cerro Fundición

Las zonas de Cerro fundición (**Ver Fig.40**), concentra una población tanto al pie de la pendiente como en el cabezal, como de parte de la plataforma superior, consiguiendo una morfología muy escarpada, que obtiene concentraciones de deslizamiento y evacuación del material, exponiendo áreas cercanas a suelo inclinado y buscando su concentración. Pese a que la mayor cantidad de zonas urbanas del sector no obtiene valores altos algunos sectores se localizan en áreas de media y alta susceptibilidad además de los riesgos de desplazamiento de material ladera abajo.

- **Figura. 40.** Sector: Cerro Fundición.

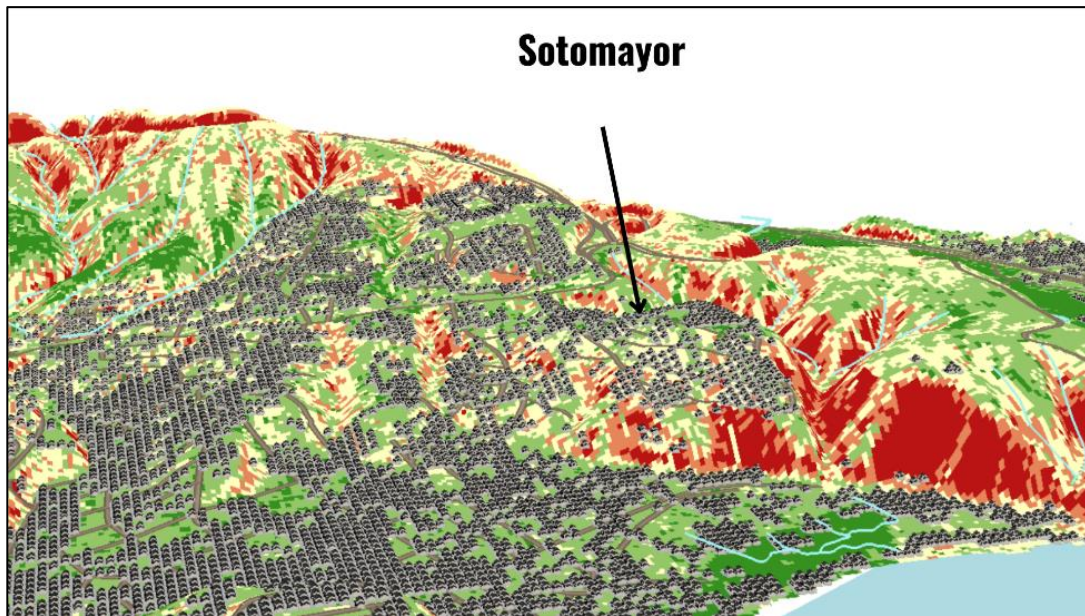


*Fuente: Elaboración propia, (2023) a partir de Dem (Minvu, 2013)
Imagen Séntinel para el área urbana (2023)*

7.2.3 Sector Soto Mayor

En el sector de Cerro Fuerte Viejo, se registran valores moderados y bajos de susceptibilidad en áreas predominantemente habitadas al pie de la pendiente. La probabilidad de riesgo aumenta en zonas de mayor pendiente, cercanas a redes hídricas, y donde la distribución de áreas residenciales se sitúa en terrenos de inclinación reducida y baja susceptibilidad. Sin embargo, en las proximidades a pendientes altas los valores aumentan. En contraste con otros sectores, la población Sotomayor se encuentra en áreas con susceptibilidad moderada (**Ver Figura. 41**). La concentración urbana está adyacente a sectores con niveles de susceptibilidad altos y medios, particularmente en escarpes de la pendiente cubiertos de vegetación arbórea.

- **Figura 41.** Sector; Matta Cerro Villagran Marihueñu arriba - Fuerte viejo

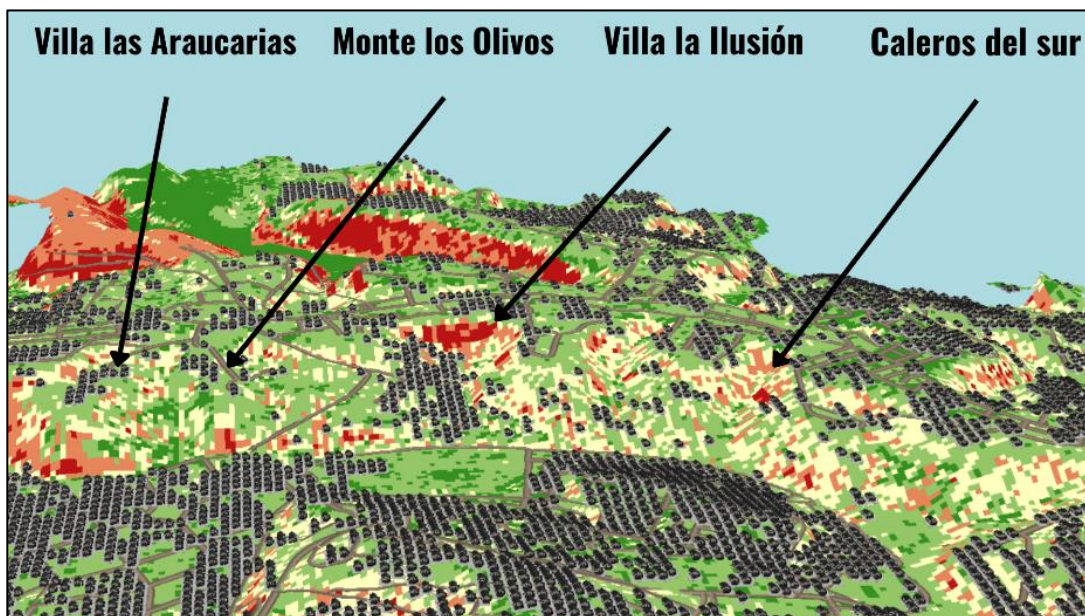


*Fuente: Elaboración propia, (2023) a partir de Dem (Minvu, 2013);
Imagen Séntinel para el área urbana (2023)*

7.2.4 Sector Lota Alto

Tanto Villa las Araucarias como Monte de los Olivos constituyen asentamientos ubicados dentro de una zona de susceptibilidad elevada. En dicha área, se encuentra una población que reside en terrenos con pendientes marcadas, caracterizadas por valores medios y altos de susceptibilidad. Por otro lado, las viviendas en Calero del Sur albergan a una cantidad significativa de habitantes en áreas con pendientes de susceptibilidad media-alta. De manera análoga, aunque con una población reducida, Caleros Sur exhibe la presencia de población en terrenos con fuertes pendientes, principalmente en aquellas áreas por donde evacúa el agua de lluvias lo que implica una consideración importante frente a amenazas potenciales y posibles eventos de desprendimiento que podrían involucrar una carga sustancial de sedimentos.

- **Figura 42.** Sector Lota Alto, Monte los Olivos y Villa Ilusión.



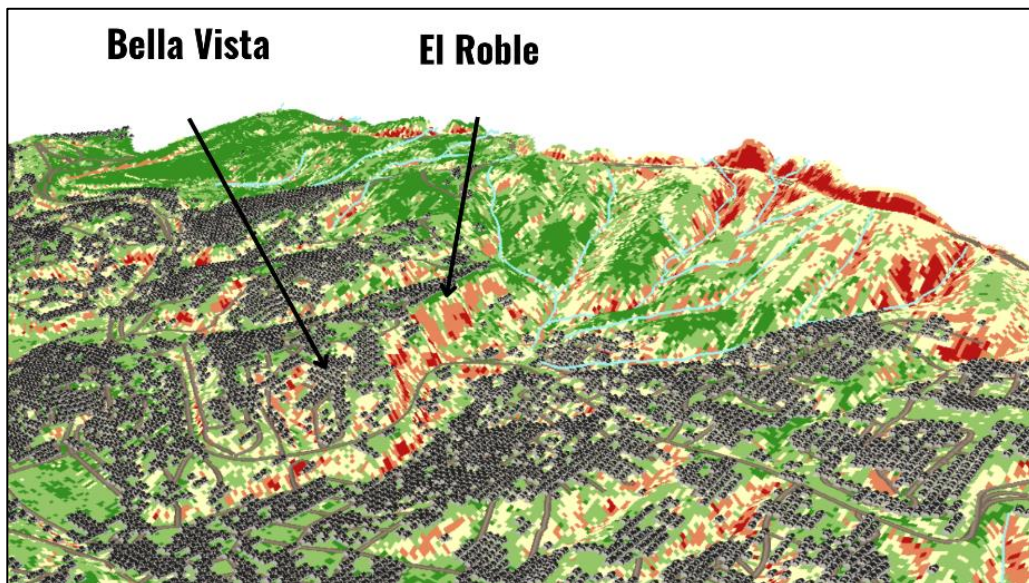
Fuente: Elaboración propia a partir de Dem (Minvu, 2013)

7.2.5 Sector Bellavista

El sector de Bella Vista, integrante de la región de Lota Norte, se caracteriza por la concentración de población en laderas de baja pendiente, específicamente en escarpes que exhiben una susceptibilidad notablemente elevada. La topografía de estas áreas, combinada con la presencia de construcciones en la base o pie de las laderas, (Sector Villa los Aromos) posiciona a este sector como uno de alta susceptibilidad según el modelo analizado.

La accesibilidad a estas zonas, junto con la intensa actividad de construcción en las faldas de las laderas, contribuye significativamente a la evaluación de mayor susceptibilidad. La interacción de estos factores destaca la importancia de considerar medidas de mitigación y planificación del uso del suelo en Bella Vista para reducir posibles riesgos asociados con eventos adversos. Por otra parte, es relevante señalar que las redes hídricas que inciden en el terreno se encuentran mayormente ausentes en el contexto de la urbanización de Bella Vista. Este aspecto puede tener implicaciones tanto para la gestión del agua como para la susceptibilidad del terreno a eventos relacionados con el agua. La ausencia de una integración efectiva de estas redes en la planificación urbana resalta la necesidad de abordar cuestiones relacionadas con la infraestructura hídrica en la región.

- **Figura 43.** Sector de Bellavista.



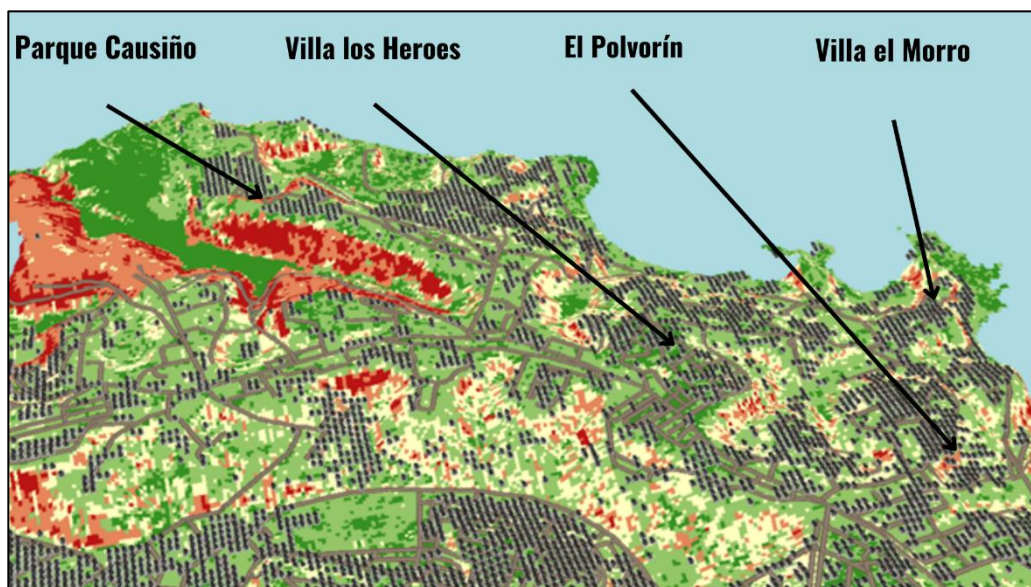
Fuente: Elaboración propia (2023) a partir de Dem (Minvu, 2013)

7.2.6. Sector Parque Cousiño y Punta Pique

En las áreas geográficas específicas del Chiflón y el Morro, se encuentra una densa concentración de población que, según el presente modelo de análisis, no exhibe valores significativos de susceptibilidad en las zonas residenciales. Sin embargo, se observan algunos registros de susceptibilidad que pueden ser atribuidos a la rugosidad del relieve, manifestándose especialmente en ciertos sectores donde se correlaciona con la presencia de vegetación.

Es importante destacar que, a pesar de esta dinámica en las áreas mencionadas, la red de vías urbanas abarca rangos variables de valores de susceptibilidad, que comprenden desde niveles bajos hasta niveles altos. Este fenómeno contribuye a una distribución heterogénea de la población en el territorio, caracterizada por evitar las pendientes más pronunciadas en determinadas áreas. Asimismo, se destaca la presencia de una red vial que conecta diversos sectores de la región, algunos de los cuales poseen un valor patrimonial significativo. Este análisis sugiere la existencia de patrones complejos de interacción entre la topografía del terreno, la presencia de vegetación, la red de vías urbanas y la distribución de la población. Dichos elementos, en conjunto, delimitan la configuración espacial de las comunidades en estudio, revelando una planificación urbana que tiene en cuenta las características del relieve.

Figura. 44. Sector Parque Cousiño y Punta Piquete.



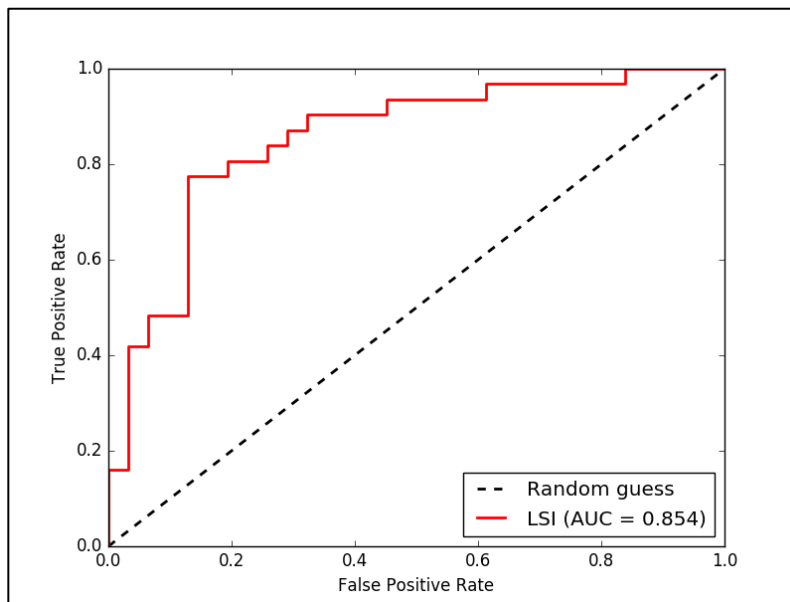
Fuente: Elaboración propia (2023) a partir de Dem (Minvu, 2013)

7.3. Resultados de validación

7.3.1 Resultado de exactitud

De lo expuesto, para la propuesta de modelo se obtuvo; la exactitud del modelo de susceptibilidad obtendrá la tasa general de datos de predicciones correctas con un AUC de 0.854 (**Ver. Figura 45**), sugiriendo que el modelo tiene la capacidad de distinguir las clases positivas y negativas en términos de clasificación (Fawcett, T. 2006). Donde para su interpretación la curva para 0,0 (inferior izquierdo) representa no falsos positivos ni verdaderos positivos y 0,1 y -0,6 los valores izquierdos de la curva un dominio de casos negativos (no deslizamientos) de tipo conservador. A la vez, el recorrido de la curva hacia la derecha aporta resultados altos valores de cercanos a los 0,8 indicando una alta tasa de verdaderos positivos (remociones en masa en sectores con alta susceptibilidad) y algunos falsos positivos (remociones en masa falsas coincidiendo en áreas de alta susceptibilidad) obteniendo un 85% de exactitud para el modelo propuesto.

- **Figura 45.** Exactitud de modelo de susceptibilidad con datos de entrenamiento.

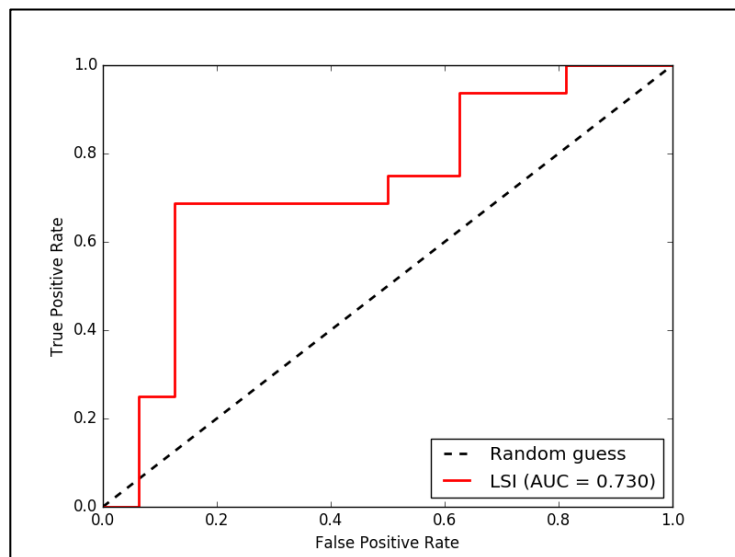


Fuente: Elaboración propia, 2023.

7.3.2 Resultado de precisión

Para la evaluación del rendimiento predictivo, se obtuvo un valor de 0.730 para el Área bajo la Curva (AUC) (**Ver Figura.46**), siendo un valor relativo razonable en una métrica comúnmente empleada en el análisis de la Curva ROC. Este resultado denota una evaluación altamente conservadora del modelo, sugiriendo simultáneamente cierta capacidad de discriminación y rendimiento entre las clases. Sin embargo, se evidencia que existen oportunidades para mejoras con miras a alcanzar un rendimiento más robusto. La utilización de datos de prueba desempeñó un papel crucial en esta evaluación, ofreciendo una estimación más realista del rendimiento del modelo. Estos datos, por diseño, no fueron incorporados durante la fase de entrenamiento del modelo. Esta estrategia facilitó una evaluación que no solo considera la habilidad del modelo para ajustarse a los datos de entrenamiento, sino, de manera más significativa, su capacidad para generalizar y realizar predicciones precisas en situaciones inéditas. Adicionalmente, la aplicación de datos de prueba permitió adaptar el modelo de manera efectiva según lo expone (Fawcett, T. 2006). Esta adaptación fue particularmente valiosa al evitar que el modelo se sobreajuste a los datos de entrenamiento, asegurando así que las predicciones sean más confiables en contextos más amplios y diversos. En consecuencia, la evaluación del rendimiento a través de datos de prueba contribuyó a una comprensión más completa de la capacidad predictiva y de generalización del modelo, sirviendo como una herramienta esencial en el proceso de mejora continua.

- **Figura 46.** Precisión del modelo de susceptibilidad con datos de prueba, LSI.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

7.4 Comparación de resultados.

7.4.1 Contraste propuesto bivariada / Mapa de susceptibilidad LEU (2010)

Para ambos modelos de obtuvieron datos principalmente mapeables, sin embargo, el modelo elaborado en 2010, al no contar con un número significativo de variables, corre el peligro de omitir o sesgar información del terreno importante a considerar. Por otra parte, es necesario reconocer que la susceptibilidad puede o no concentrarse en áreas.

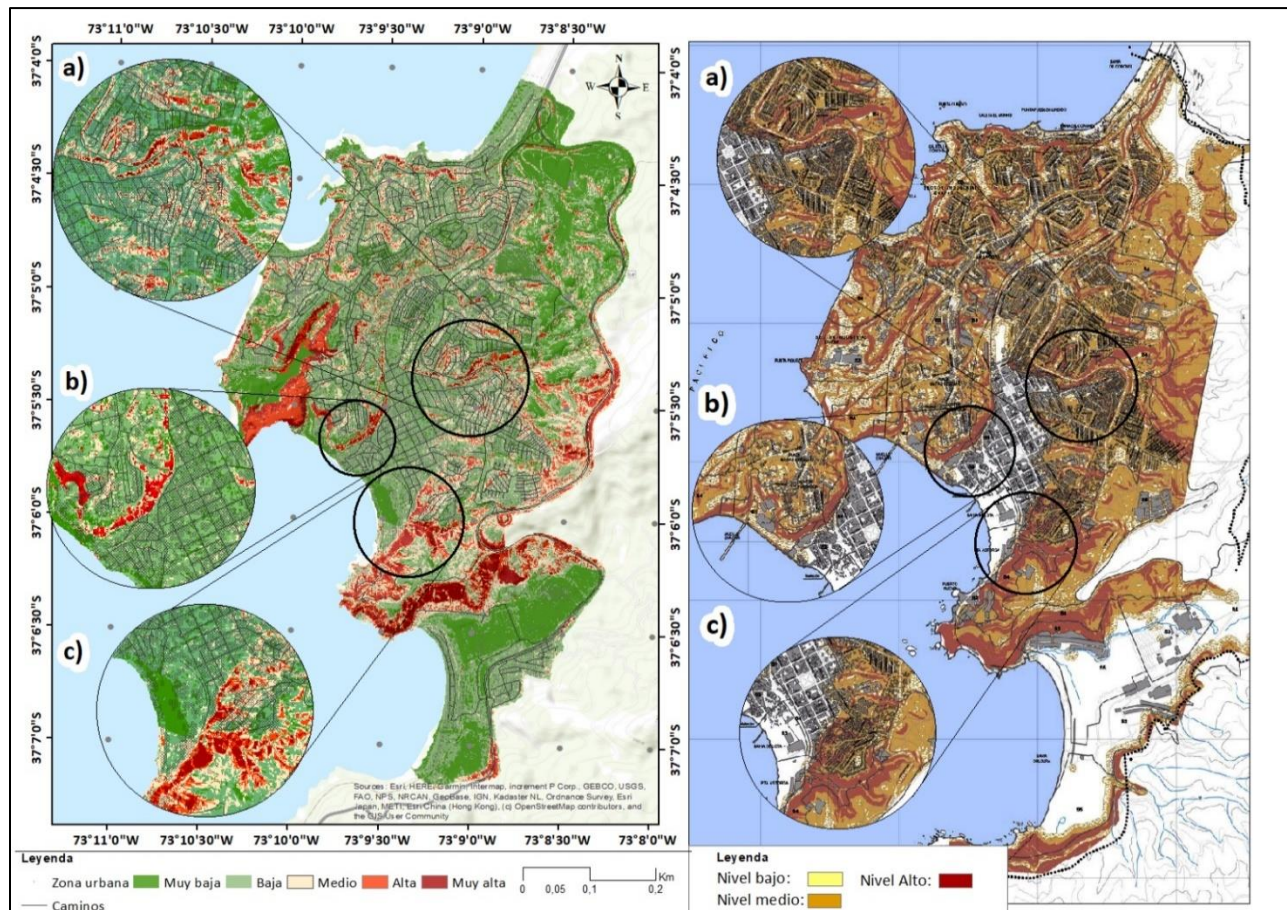
Para ambos modelos, la susceptibilidad más alta sigue patrones similares, reconociendo pendientes fuertemente inclinadas y cercanías a cauces. Es por ello por lo que para zonas de Soto mayor (**Fig. 47 c**) y Bella vista, (**Fig. 47 a**) las áreas cercanas a redes hídrica pueden aumentar la escorrentía considerando relevante para futuros análisis.

En referencia al área correspondiente a Cerro Fundición (**Fig. 47 b**), se observa un patrón espacial continuo en la distribución de la población, aunque con notables diferencias en el mapeo propuesto mediante la Frecuencia Relativa (FR) actual. Se evidencian algunas irregularidades y rugosidades en áreas elevadas con densidad poblacional, las cuales muestran un incremento en la susceptibilidad a remociones. Estas áreas se identifican específicamente como sectores propensos a la acumulación de eventos de remoción en masa.

En el modelo elaborado por LEU (2010), los patrones identificados se delinearon en consonancia con fuertes pendientes y quebradas en elevaciones considerables, evidenciados por el color carmesí. Asimismo, los patrones correspondientes al nivel naranja, asociados a valores medios de susceptibilidad, siguieron un trazado en sectores de litología Cosmito Pgcc a mayores altitudes, destacando áreas densamente pobladas como el sector Bellavista y Lota Alto. Esto sugiere que la construcción en altitudes, a priori, no representa un riesgo sustancial. En determinadas situaciones, se busca obtener estimaciones a través de consultas realizadas a grupos de investigadores para generar una ponderación.

Es importante además resaltar que el modelo propuesto por LEU (2010) exhibe la capacidad de discernir el desplazamiento anticipado de material, manifestándose en valores significativos en áreas residenciales, una habilidad que la presente propuesta no ha logrado igualar hasta el momento.

- **Figura 47.** Comparación: Propuesta de Índice de susceptibilidad de deslizamiento (Frequency ratio) (2023) / Mapa de susceptibilidad de Remoción en masa, LEU 2010. Lota.



Fuente: Modelo propuesto de susceptibilidad aplicado con Frequency Ratio / susceptibilidad LEU, 2010. Elaboración propia, 2023 Donde a) Bellavista y Lota. b) Cerro fundición c) Sector Sotomayor y Calle Matta.

7.4.2 Contraste propuesta bivariada / Mapa de susceptibilidad SERNAGEOMIN (2010)

El modelo propuesto se fundamenta en datos de inventario hasta el año 2023, a diferencia del modelo de Sernageomin, basado en remociones derivadas del terremoto del 27 de Febrero de 2010. Los datos de entrada desempeñan un papel crucial tanto en la generación como en la validación de modelos. Es relevante señalar que el modelo de susceptibilidad utilizado en 2010 considera el recorrido posible al que se encuentra expuesta el área, presentando una diferenciación significativa en las regiones expuestas. Ambos modelos tienen en cuenta las zonas de escorrentía, donde la susceptibilidad puede tener efectos temporales a largo

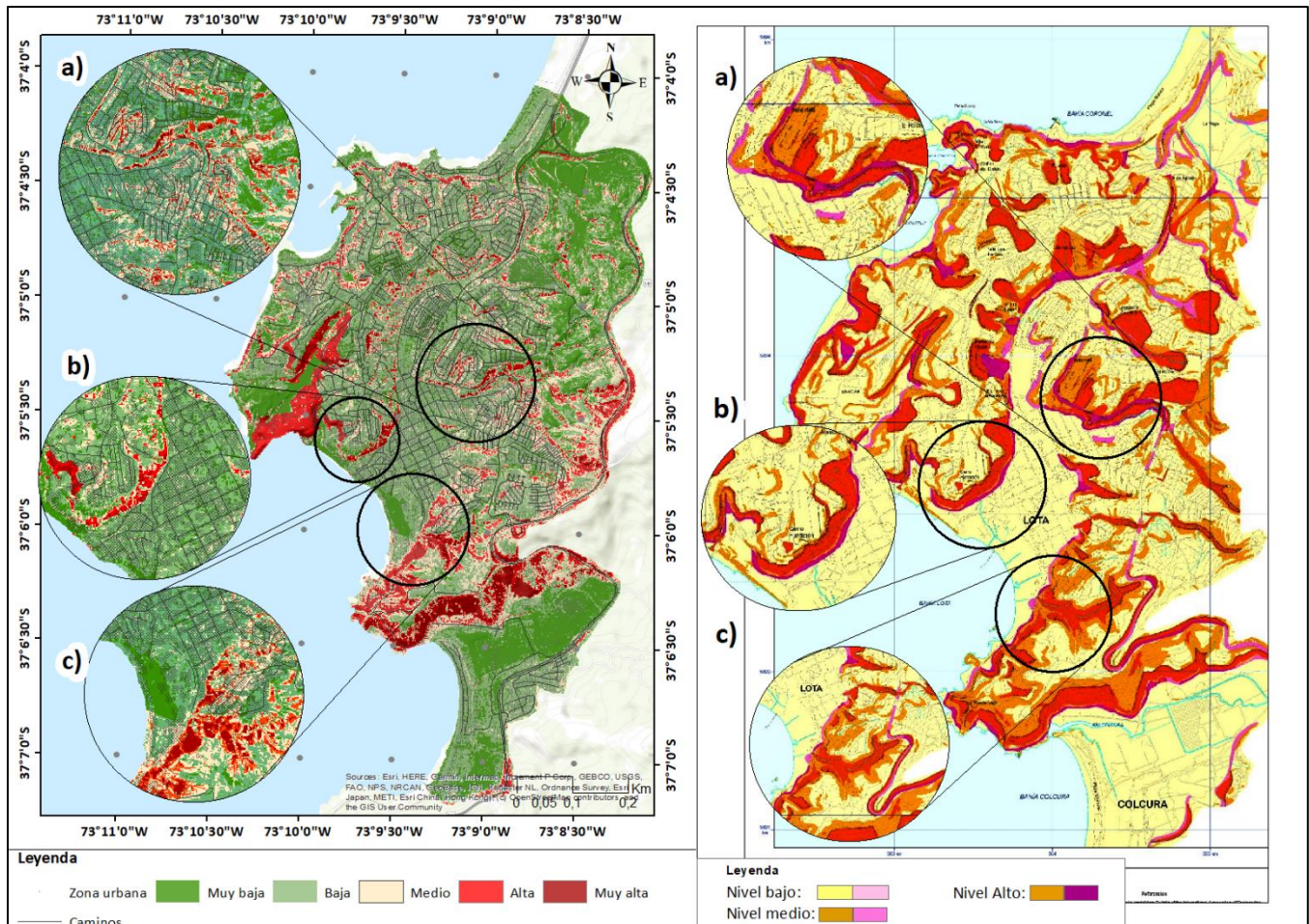
plazo. Sin embargo, los resultados revelan una marcada disparidad en la identificación de las zonas más propensas a deslizamientos. Se observa que en áreas cercanas a cauces con alta pendiente y marcada curvatura, los valores de susceptibilidad tienden a aumentar.

Por otro lado, ambos modelos coinciden mayormente en las zonas altas con un plano más pronunciado y menos densamente urbanizadas, donde no se registran valores significativos. Es importante señalar que los modelos desarrollados desde 2010 han conservado parámetros reconocibles desde una perspectiva cualitativa, tales como elevadas pendientes y procesos de erosión del terreno. Estas circunstancias destacan la importancia de interrelacionar instrumentos dentro de la planificación, fomentando el desarrollo de una mayor predicción y precisión en los modelos, donde la objetividad se vuelve fundamental. Se busca optimizar la ocupación y el uso de áreas urbanas, ponderando el desarrollo de las ciudades y adaptándose a cambios impredecibles debido al constante estado de alteración provocado por factores persistentes.

Dentro del alcance de la cartografía realizada, se observa que la susceptibilidad en los niveles bajos y medios, representados mediante el color amarillo, exhibe una distribución predominante en áreas topográficamente llanas. Este patrón es evidente tanto en las zonas de mayor elevación, como en los sectores de menor. Es relevante destacar que esta disposición espacial se asemeja a los resultados derivados de la propuesta binaria que en sus niveles bajos de susceptibilidad también sigue el mismo patrón, con la diferencia de que la propuesta presentada consigue un mayor detalle en la identificación de fracturas de geomorfológicas y la irregularidad de la topografía.

A pesar de esto, el modelo propuesto para el año 2010, en relación con los valores elevados, exhibe la capacidad de identificar la migración de elementos mediante procesos de escorrentía, anticipando la potencial evacuación de una cantidad sustancial de material. Este logro contrasta con la actual propuesta, que aún no ha conseguido prever tal fenómeno.

- **Figura 48.** Comparación de Índice de susceptibilidad por remoción en masa propuesto (LSI) / Mapa de amenaza por Remoción en Masa 2010 Lota.



Fuente: Elaboración propia a partir de parámetros utilizados / Sernageomin, 2010. Donde a) Bellavista y Lota. b) Cerro fundición c) Sector Sotomayor y Calle Matta.

8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En resumen, la persistente dificultad en los modelos de susceptibilidad radica en la toma de decisiones al seleccionar variables y en la incertidumbre asociada a la ponderación al superponer variables, lo que puede dar lugar a la multicolinealidad. Es esencial reconocer que cada variable contribuye a la susceptibilidad a remociones en masa, y aunque estas variables no representan necesariamente la causa principal, cada evento de remoción está intrínsecamente relacionado con diversos factores que influyen en su naturaleza. Esta complejidad subraya la necesidad de abordar la incertidumbre y la interconexión de variables de manera cuidadosa en la construcción y evaluación de modelos de susceptibilidad.

La urbanización constante complica la zonificación, omitiendo sectores con fuertes pendientes y grietas en áreas elevadas, lo que requiere estudios de flujo específicos. Aunque la propuesta de modelo planteada aporta elementos valiosos, enfrenta desafíos susceptibles de mejora, como la presencia de multicolinealidad en los parámetros, lo que puede hacer que ciertos datos sean menos robustos y aumente la probabilidad de sobreajuste a diferentes conjuntos de datos de entrenamiento.

La atención cuidadosa a estas limitaciones y la implementación de estrategias de mitigación son esenciales para fortalecer la integridad y aplicabilidad del modelo bivariado propuesto en el contexto de la planificación del uso del suelo. Es probable que, como en diversos trabajos revisados, no se deba excluir a un solo modelo, sino a varios modelos, a medida que se avanza en la creación e integración de diversos parámetros no considerados inicialmente.

La zona urbana de Lota se caracteriza por la concentración de sectores en terrenos de alta pendiente, coincidiendo principalmente con áreas propensas al escurrimiento de laderas. Esto destaca la necesidad de estudios futuros orientados hacia el análisis detallado de sectores específicos, con énfasis en las pendientes y las zonas de escurrimiento. Se reconoce la importancia de un análisis más detallado de sectores prioritarios y su monitoreo continuo, especialmente en áreas con mayor escorrentía.

A pesar de la propuesta realizada con FR, que se diferencia al incorporar parámetros hídricos (TWI), tanto esta como otros modelos carecen de la integración de factores antropogénicos y la capacidad de prever áreas expuestas a múltiples fenómenos. Persisten ciertas incertidumbres en estos modelos.

Las evaluaciones realizadas arrojaron puntajes de 7 para ambos mapas de susceptibilidad originados en años anteriores, lo que indica retos pendientes en cuanto a una visión más crítica y la necesidad de nuevas propuestas que replanteen modelos mayormente estadísticos y validados.

Los valores de frecuencia relativa (FR) en el uso del suelo se concentran en bosques mixtos, evidenciando una alta susceptibilidad. Se sugiere la concientización de estos sectores y la orientación de nuevos estudios dirigidos a estos lugares para prevenir riesgos asociados a eventos adversos, como remociones en masa.

A pesar de las diversas alternativas contempladas en los modelos, se observa un aumento notable en la urbanización en las laderas escarpadas de alta montaña en la localidad de Lota. Esta tendencia se acentúa en los sectores próximos a laderas inclinadas, donde la infraestructura vial aún no ha alcanzado su pleno desarrollo. Esto destaca la importancia de una evaluación minuciosa de los procesos de construcción y la necesidad de llevar a cabo estudios detallados en estas áreas específicas.

En el contexto de la planificación del uso del suelo, a pesar de la existencia de instrumentos regulatorios que supervisan la zonificación y gestionan la creación de espacios, se torna imperativo llevar a cabo comparaciones entre diversos mapas. Estas comparaciones no solo permiten reconsiderar las obras de rehabilitación en áreas específicas, sino que también posibilitan la integración de nuevos trabajos que aborden la disponibilidad actualizada de datos geospaciales.

Estos mapas, concebidos como herramientas fundamentales deben cumplir con criterios de sustentabilidad desde una perspectiva económica. Además, deben facilitar un análisis exhaustivo de los riesgos asociados, sustentado en comparaciones validadas mediante rigurosos métodos estadísticos. La adopción de enfoques binarios se revela como un imperativo, ya que posibilitará la recreación de diversos escenarios que coincidan con los cambios geomorfológicos además de la evolución en la distribución de infraestructuras en sectores específicos. La validación de estos escenarios, mediante métodos de evaluación robustos, adquiere un papel crucial para asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Paralelamente, se destaca la necesidad de incorporar nuevas tecnologías que evolucionen de manera simultánea con los métodos actuales. La implementación de tecnologías emergentes se erige como un mecanismo para potenciar la capacidad predictiva de los modelos y superar las limitaciones de los enfoques

tradicionales. Este proceso continuo de actualización y adaptación contribuirá significativamente a la comprensión más cercana de la incertidumbre inherente a algunos modelos obtenidos.

Por consiguiente, se postula que el monitoreo continuo, la colaboración interdisciplinaria y la implementación concomitante con mejoras en la disponibilidad de datos constituyen prácticas esenciales. Este enfoque holístico no solo fortalecerá la robustez de los modelos de susceptibilidad, sino que también respaldará la toma de decisiones informadas en el ámbito de la planificación del uso del suelo, proporcionando una base sólida para abordar la complejidad inherente a la dinámica ambiental y geoespacial.

En última instancia, la diversidad en el uso actual de distintos criterios de susceptibilidad se condensa en su aplicabilidad al territorio integrando un modelo de validación de precisión a la vez que demuestra un acierto del 70% en el caso del modelo propuesto, emergiendo como un componente esencial en la toma de decisiones para la planificación. Este enfoque contribuirá a lograr la verdadera objetividad.

9. ANEXOS.

9.1. Tabla de resultados con modelo de Frecuency Ratio

Tabla. 6. Resultado de fórmulas aplicadas

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	P R
Pendiente	>10	232637	55%	50	2	6%	0,001	0,004	0	0,000	0,391	0,391	0,205	1,90
	10° - 15°	72126	17%	0	0	0%	0,000	0,000	0					
	15° - 20°	48713	11%	75	3	10%	0,006	0,031	3					
	20° - 25°	31434	7%	75	3	10%	0,010	0,047	5					
	25° - 30°	19426	5%	225	9	29%	0,046	0,230	23					
	30° - 35°	11684	3%	175	7	23%	0,060	0,297	30					
	35°<	8895	2%	175	7	23%	0,079	0,391	39					
Total	424915	100%	775	31	100%	0,201	1,000	100						
Altitud	< 10	2097	0%	0	0	0%	0,000	0,000	0	0,000	0,266	0,266	0,205	1,30
	10 - 20	149302	35%	300	12	39%	0,008	0,220	22					
	20 - 40	83944	20%	175	7	23%	0,008	0,228	23					
	40 - 60	82284	19%	200	8	26%	0,010	0,266	27					
	60 - 80	42261	10%	25	1	3%	0,002	0,065	6					
	80 - 90	27967	7%	0	0	0	0,000	0,000	0					
	> 90	37060	9%	75	3	10%	0,008	0,221	22					
Total	424915	100%	775	31	100%	0,037	1,000	100						
NDVI	0 - 0,425781	81491	19%	200	8	26%	0,010	0,258	26	0,058	0,280	0,223	0,205	1
	0,425781 - 0,53125	99770	23%	125	5	16%	0,005	0,132	13					
	0,53125 - 0,660156	75068	18%	200	8	26%	0,011	0,280	28					
	0,660156 - 0,785156	77385	18%	200	8		0,010	0,272	27					
	0,785156 - 1	91201	21%	50	2	6%	0,002	0,058	6					
Total	424915	100%	775	31	100%	0,038	1,000	100						
Dist. Drenajes	50	60852	14%	50	2	6%	0,003	0,028	3	0,000	0,268	0,268	0,205	1,30
	50 - 60	9621	2%	75	3	10%	0,031	0,268	27					
	60 - 70	10749	3%	50	2	6%	0,019	0,160	16					
	70 - 80	9081	2%	50	2	6%	0,022	0,189	19					
	80 - 90	8677	2%	50	2	6%	0,023	0,198	20					
90 - 100	8496	2%	0	0	0%	0,000	0,000	0						

	100 - 200	62667	15%	75	3	10%	0,0 05	0,0 41	4					
	200 - 300	42675	10%	75	3	10%	0,0 07	0,0 60	6					
	400>	212097	50%	350	14	45%	0,0 07	0,0 57	6					
	Total	424915	100%	775	31	100%	0,1 17	1,0 0	100					
Geología	Fm. Curanilahue (Hf)	20542	5%	25	1	3%	0,0 05	0,1 53	15	0,13 1	0,514	0,383		1, 8 7
	Serie Oriental (Plhfm)	95694	23%	100	4	13%	0,0 04	0,1 31	13					
	Pgcc	60993	14%	250	10	32%	0,0 16	0,5 14	51					
	Pzor	247686	58%	400	16	52%	0,0 06	0,2 02	20					
	Total	424915	100%	775	31	100%	0,0 32	1,0 00	100					
Orientación de laderas	Flat	17	0%	0	0	0%	0,0 00	0,0 00	0	0,00 0	0,208	0,208		1, 0 1
	Norte	58167	14%	175	7	23%	0,0 12	0,2 08	21					
	Noreste	35433	8%	75	3	10%	0,0 08	0,1 47	15					
	Este	29382	7%	50	2	6%	0,0 07	0,1 18	12					
	Sudeste	35960	8%	25	1	3%	0,0 03	0,0 48	5					
	Sur	43609	10%	100	4	13%	0,0 09	0,1 59	16					
	Oeste	50378	12%	75	3	10%	0,0 06	0,1 03	10					
	Sudoeste	76309	18%	100	4	13%	0,0 05	0,0 91	9					
	Noroeste	95660	23%	175	7	23%	0,0 07	0,1 27	13					
Total	424915	100%	775	31	100%	0,0 58	1,0 00	100						
Distancia a carreteras	0 - 10	110393	26%	225	9	29%	0,0 08	0,2 22	22	0,00 00	0,254	0,254		1, 2 4
	10 - 30	107462	25%	250	10	32%	0,0 09	0,2 54	25					
	30 - 60	67320	16%	125	5	16%	0,0 07	0,2 02	20					
	60 - 90	37454	9%	50	2	6%	0,0 05	0,1 46	15					
	90 - 120	24851	6%	0	0	0%	0,0 00	0,0 00	0					
	120<	77435	18%	125	5	16%	0,0 06	0,1 76	18					
	Total	424915	100%	775	31	100%	0,0 37	1,0 00	100					
TWI	-11,00763798 - - 0,563406576	29637	7%	25	1	3%	0,0 03	0,0 56	6	0,03 08	0,589	0,558		2, 7 2
	-0,563406576 - - 0,175392439	122171	29%	75	3	10%	0,0 02	0,0 41	4					
	-0,175392439 - 0,057416043	162444	38%	75	3	10%	0,0 02	0,0 31	3					
	0,057416043 - 0,678238662	82374	19%	350	14	45%	0,0 17	0,2 83	28					
	0,678238662 - 6,233648777	28289	7%	250	10	32%	0,0 35	0,5 89	59					
	Total	424915	100%	775	31	100%	0,0 60	1,0 00	100					
Distancia a falla	0 - 100	82899	20%	75	3	10%	0,0 04	0,1 14	11	0,11 429	0,319 534	0,205		1, 0 0
	100 - 200	76059	18%	125	5	16%	0,0 07	0,2 08	21					
	200 - 300	52775	12%	75	3	10%	0,0 06	0,1 80	18					
	300 - 400	35278	8%	50	2	6%	0,0 06	0,1 79	18					

	> 400	177904	42%	450	18	58%	0,0 10	0,3 20	32					
	Total	424915	100%	775	31	100%	0,0 32	1,0 00	100					
Curvatura de planta	Convexo	200729	47%	325	13	42%	0,0 06	0,4 46	45	0,00 00	0,553 741	0,554		2, 7 0
	Flat	201	0%	0	0	0%	0,0 00	0,0 00	0					
	Cóncavo	223985	53%	450	18	58%	0,0 08	0,5 54	55					
	Total	424915	100%	775	31	100%	0,0 15	1,0 00	100					
Curvatura de perfil	Cóncavo	215724	51%	350	14	45%	0,0 06	0,4 44	44	0,00 00	0,556 146	0,556		2, 7 1
	Float	131	0%	0	0	0%	0,0 00	0,0 00	0					
	Convexo	209060	49%	425	17	55%	0,0 08	0,5 56	56					
	Total	424915	100%	775	31	100%	0,0 15	1,0 00	100					
Cobertura de uso de suelo	Áreas Urbanas e Industriales	242064	57%	525	21	68%	0,0 09	0,1 66	17	0,00 0	0,633	0,633		3, 0 9
	Minería Industrial	15521	4%	0	0	0%	0,0 00	0,0 00	0					
	Rotación Cultivo y Pradera	512	0%	0	0	0%	0,0 00	0,0 00	0					
	Plantación boscosa	86875	20%	75	3	10%	0,0 03	0,0 66	7					
	Pradera - Matorral	42928	10%	75	3	10%	0,0 07	0,1 34	13					
	Playa Dunas vegetación	19693	5%	0	0	0%	0,0 00	0,0 00	0					
	Bosque Nativo	866	0%	0	0	0%	0,0 00	0,0 00	0					
	Matorral Arborescente	4344	1%	0	0	0%	0,0 00	0,0 00	0					
	Bosque Mixto	12112	3%	100	4	13%	0,0 33	0,6 33	63					
Total	424915	100%	775	31	100%	0,0 52	1,0 00	100						

Fuente : Elaboración propia., (2023)

Anexo 9.2. Fotografías de terreno

Localización: Pedro Aguirre Cerda

Coordenadas:

Lat : -37.097888°

Long: -73.304749°



Fecha: 8 de noviembre del 2023

Localización: Calle Causiño. (final)

Coordenadas:

Lat: -37.097466°

Long: -73.154992°



Fecha: 8 de noviembre del 2023

Localización: Sector Sotomayor

Coordenadas

Lat: -37.097752°

Long: -73.154811°



Fecha: 8 de noviembre del 2023

Localidad: Pasaje. Sargento Aldea con Villagrán.

Coordenadas:

Lat: -37.098184°

Long: -75.155215°



Fecha: 8 de Noviembre del 2023

Localidad: Pedro Aguirre Cerda 297, Lota Biobío

Localización Matta al cerro

Coordenadas:

Lat: -37.0947582

Long: -73.155572



Fecha: 8 de Noviembre del 2023

Localización: Calle Rahue

Coordenadas:

Lat: -37.097761°

Long: -73.154850°



Fecha: 8 de noviembre del 2023

Localización: Calle Matta cerro alto

Coordenadas:

Lat -37.100919°

Long: -73.155100°



Localización: Calle Matta cerro alto

Fecha: 8 de Noviembre del 2023

Localización: Matta cerro arriba

Coordenadas:

Lat: -37.100371°

Long:-73.153940°



Fecha: 8 de noviembre del 2023

Localización: Matta cerro arriba

Coordenadas:

Lat: -37.100356°

Long: -73.155165°



Fecha: 8 de noviembre del 2023

Localidad: Matta cerro abajo

Coordenadas:

Lat: -37.100320°

Long: -73.156099°



Fecha: 8 de noviembre del 2023

Localidad: Calle Matta al final (Antiguas vías del tren)

Coordenadas:

Lat: -37.100421°

Long: -73.156304°



Fecha: 8 de Noviembre del 2023

Localización: Sector Sotomayor

Coordenadas

Lat: -37.097747°

Long: -73.154426°



Fecha: 8 de noviembre del 2023

Caída de detritos (Debris falls)

Coordenadas:

Lat: -37.100508°

Long: -73.156458°



Localidad: Matta al Cerro al final (Antiguas Vías del tren)

Fecha: 8 de noviembre del 2023

Caída de detritos (Debris falls)

Coordenadas:

Lat: -37.100421°

Long: -73.156372°



Localidad: Calle final de Matta (Sin dirección)

Fecha: 8 de Noviembre del 2023

Caída de rocas (Rockfalls)

Coordenadas:

Lat: -37.100708°

Long: -73.154384°



Localidad: Calle Matta final (por vía ferroviaria)

Fecha: 8 de noviembre del 2023

Caída de rocas (Rockfalls)

Coordenadas:

Lat: -37.100708°

Long: -73.154384°



Localidad: Matta al final (Antigua vía de ferrocarril)

Fecha: 8 de noviembre del 2023

Caída de tierra Earth falls

Coordenadas:

Lat : -37.097888°

Long: -73.154749°



Localidad: Entrada a Sector Sotomayor Calle Pedro Aguirre Cerda al final

Fecha: 8 de noviembre del 2023

Deslizamiento rotacional

Coordenadas:

Lat: -37.100160°

Long:-73.156091°



Fecha: 8 de noviembre del 2023

Localidad: Matta cerro alto.

Caída de detritos (Debris falls)

Coordenadas:

Lat: -37.100822°

Long: -73.153850°



Localidad: Matta cerro arriba.

Fecha: 8 de noviembre del 2023

Localización: Matta, cerro adentro

Coordenadas:

Lat: -37.100455°

Long: -73.155909°



Fecha: 8 de noviembre del 2023

Caída de tierra (Earth fall)

Coordenadas:

Lat: -

37.100220°

Long: -

73.156078°



Localización:

Fecha: 8 de noviembre del 2023

Caída de detritos (Debris fall)

Coordenadas:

Lat: -37.100504°

Long: -73.156477°



Localización: Sector Soto mayor al cerro

Fecha: 8 de noviembre del 2023

Caída de rocas (rockfalls)

Coordenadas:

Lat: -37.1003282°

Long:-73.1562563°



Localización: Final de calle Matta (Antiguas vías del tren)

Fecha: 8 de noviembre del 2023

Caída de rocas (Rockfalls)

Coordenadas:

Lat: -37.0947582°

Long:-73.155572°



Localización: Calle Matta al final

Fecha: 8 de noviembre del 2023

Caída de detritos (Debris falls)

Coordenadas:

Lat: -37.100659°

Long: -73.156530°



Fecha: 8 de noviembre del 2023

Caída de tierra (Earth falls)

Coordenadas:

Lat: -37.100351°

Long: - 73.156437°



Localización: Calle Matta al final (antiguas vías del tren)

Fecha: 8 de noviembre del 2023

Caída de detritos (Debris falls)

Coordenadas:

Lat: -37.100386°

Long: -73.155463°

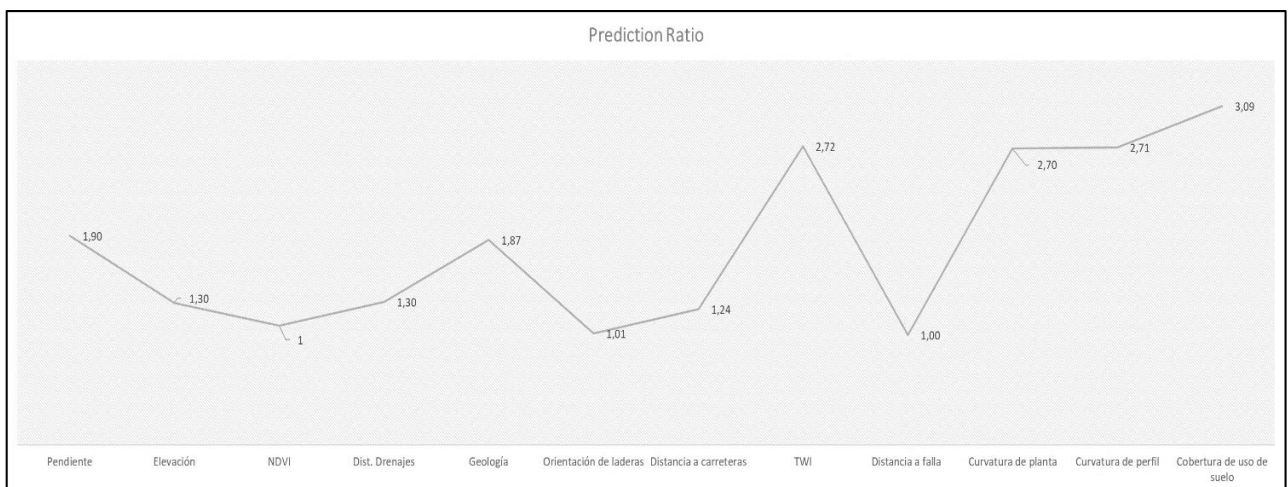


Localización: Matta al Cerro

Fecha: 8 de noviembre del 2023

11. Prediction ratio

Figura. 44. Razón de predicción: (PR)



12. BIBLIOGRAFÍA

1. Acharya, T. D., & Lee, D. H. (2019). Landslide susceptibility mapping using relative frequency and predictor rate along Araniko Highway. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 763-776.
2. Akgun, A., Dag, S., & Bulut, F. (2008). Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54, 1127-1143.
3. Alcantara Ayala, I. (1999). Investigaciones Geograficas, Bolefin del Instituto de Geografía, UNAM num 41. 2000, Revisado el 20 de Julio (2023):
<https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n41/n41a2.pdf>
4. Aledo, A., y Sulaiman, S. (2023). La incuestionabilidad del riesgo. *Ambiente y Sociedades*. Universidad de Sao Paulo. v. XVII, n. 4 n p. 9-16. Revisado el 29 de Junio de (2023):
<https://www.scielo.br/j/asoc/a/wjtmy67Np4RXjHbmcTgTwrH/?lang=es&format=pdf>
5. Álvarez, M., Oñate-Valdivieso, F., Esparza, C., & Oñate-Paladines, A. (2020). Evaluación multicriterio aplicada al análisis de movimientos en masa en carreteras de montaña: un caso de estudio en los Andes del sur del Ecuador. *Revista Avances: Investigación en Ingeniería*, 17(2).
6. Amaliah, R., Soma, A. S., Mappangaja, B., & Mambela, F. (2021, November). Analysis of the landslide susceptibility map using frequency ratio method in sub-sub-Watershed Mamasa. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 886, No. 1, p. 012088). IOP Publishing.
7. Andrés, A. A. P. (1998). La ordenación del territorio, una encrucijada de competencias planificadoras. *Revista de Administración Pública*, (147), 97-138.

8. Aneas de Castro, S. Riesgos y peligros: una visión desde la Geografía. *SCRIPTA NOVA* [en línea] Barcelona: Universidad de Barcelona, noviembre de 2000, N° 60. ISSN:1138-9788.
<http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-60-htm>>
9. Arabameri, A., Pourghasemi, H. R. y Yamani, M. Aplicación de diferentes escenarios para el modelado espacial de deslizamientos de tierra utilizando métodos de inteligencia computacional. *Environ Earth Sci* **76** , 832 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7177-5>
10. Arabameri, A., Rezaei, K., Cerdà, A., Conoscenti, C., & Kalantari, Z. (2019). A comparison of statistical methods and multi-criteria decision making to map flood hazard susceptibility in Northern Iran. *Science of the Total Environment*, *660*, 443-458.
11. Asenjo Fernandoy. C. S. Beltrán Iglesias, J.A., Hernández Olivares, C.F. y Muñoz Sepúlveda, J.I. (2018). Geología del Área comprendida entre 36°58'-37° 13'S y 72°57'-73°33' Región del BioBío, Chile.
12. Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, *65*(1-2), 15-31.
13. Azañon, J. M., Pérez-Peña, J., Yesares, J., Rodríguez-Peces, M., Roldán, F., Mateos, R., ... & Martínez-Martínez, J. M. (2008). Metodología para el análisis de la susceptibilidad frente a deslizamientos en el parque nacional de Sierra Nevada mediante SIG. *Proy. De Investig En Parq Nac Convoc, 2011*, 7-24.
14. Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O., & Nuñez Román, O. (2011). Efectividad de la metodología Mora-Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, *42*(2), 141-162.
15. Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O., & Nuñez Roman, O. (2011). Effectiveness of the modified Mora-Vahrson methodology in the case of landslides caused by the Cinchona earthquake, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, *1*(47), 141-162.

16. Beck, U. (2000) Retorno a la teoría de la «sociedad del riesgo [versión electrónica]. Boletín de la A.G.E., N.º 30, pp. 9-20.
17. Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological sciences journal*, 24(1), 43-69.
18. Bonnard, C., & Noverraz, F. (2001). Influence of climate change on large landslides: assessment of long-term movements and trends. In *International Conference on landslides-Causes, impacts and countermeasures* (pp. 121-138).
19. Borgomeo, E., Hebditch, K. V., Whittaker, A. C., & Lonergan, L. (2014). Characterising the spatial distribution, frequency and geomorphic controls on landslide occurrence, Molise, Italy. *Geomorphology*, 226, 148-161.
20. Borja Baeza, R. C., y Alcántara Ayala, I. (2004). Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla. *Investigaciones Geográficas*, (53), 7–26. Revisaado el 17 de Julio: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112004000100002
21. Bornaetxea, T., Antigüedad, I., & Ormaetxea, O. (2018). Mapas de susceptibilidad de deslizamientos a partir del modelo de regresión logística en la cuenca del río Oria (Gipuzkoa). Estrategias de tratamiento de variables. *Cuaternario y Geomorfología*, 32.
22. Brardinoni, F., Slaymaker, O., & Hassan, M. A. (2003). Landslide inventory in a rugged forested watershed: a comparison between air-photo and field survey data. *Geomorphology*, 54(3-4), 179-196.
23. Bravo Peña L. C., Torres Olave M. E., Alatorre Cejudo L. C., CastellanosVillegas A. E., Moreno MurrietaR. L, Granados Olivas A., Uc Campos M., González LeónM., Wiebe QuintanaL. C. (2017): “Áreas probables de degradación-deforestación de la cubierta vegetal en Chihuahua, México. Una exploración mediante regresión logística para el período 1985-2013”, *GeoFocus* (Artículos), n° 20, p. 109-137. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.545>

24. Budimir, M. E. A., Atkinson, P. M., & Lewis, H. G. (2015). A systematic review of landslide probability mapping using logistic regression. *Landslides*, 12, 419-436.
25. Bustamante, L. P., Rebolledo, M. D. M., & Contreras, R. S. (2004). El patrimonio industrial en la estimulación del desarrollo: Intervenciones y revitalización urbana en Lota Alto (1997-2000). *Urbano*, 7(10), 9-18.
26. Calvo, F. La Geografía de Los Riegos [versión electrónica]. Universidad de Barcelona, 1984.
27. Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(5), 427-445.
28. Cartaya, S., Méndez, W., & Pacheco, H. (2006). Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un sistema de información geográfica. *Interciencia*, 31(9), 638-646.
29. Castro E., Valencia A., Ojeda J., Muñoz F., Fonseca S. (2001) *Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa: Guía metodológica*. INGEOMINAS / Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca / Escuela Colombiana de Ingeniería. Santa Fé de Bogotá, Colombia. 166 pp
30. Chau, A. S., Mendrick, C. A., Sabatelli, F. J., Loebenberg, D., & McNicholas, P. M. (2004). Application of real-time quantitative PCR to molecular analysis of *Candida albicans* strains exhibiting reduced susceptibility to azoles. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 48(6), 2124-2131.
31. Chen, W., Xie, X., Wang, J., Pradhan, B., Hong, H., Bui, D. T., ... & Ma, J. (2017). A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *Catena*, 151, 147-160.
32. Choi, J., Oh, H., Lee, H., Lee, C., and Lee, S. (2012). "Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS." *Eng. Geol.*, Vol. 124, pp. 12-23, DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.09.011.

33. Cordero Quinzacara, E. (2007). “El Derecho Urbanístico: Los Instrumentos de Planificación Territorial Y El Régimen Jurídico de Los Bienes Públicos,” no. 29 (July). Revisado el 14 de Julio: <https://doi.org/10.4067/s0718-68512007000100009>.
34. Cristi, J. M. (1946). Estado actual del conocimiento sobre la geología de la provincia de Arauco. In *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas* (Vol. 3, No. 3, pp. ág-30).
35. Crosby, D. A. (2006). The effect of DEM resolution on the computation of hydrologically significant topographic attributes.
36. Curtis, L. F., Doornkamp, J. C., & Gregory, K. J. (1965). THE DESCRIPTION OF RELIEF IN FIELD STUDIES OF SOILS. *The Journal of Soil Science*, 16(1), 16–30. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1965.tb01417.x>.
37. Dahal, R. K., Hasegawa, S., Masuda, T., & Yamanaka, M. (2006). Roadside slope failures in Nepal during torrential rainfall and their mitigation. *Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides*, 503-514.
38. Dalrymple, J. B., Blong, R. J., and Conacher, A. J. (1968) A hypothetical nine-unit landsurface model. *Zeitschrift für Geomorphologie NF* 12, 60–76
39. Decreto 1506 de 2005 [con fuerza de ley] APRUEBA MODIFICACION PLAN REGULADOR COMUNAL LOTA SECTOR LOS AROMOS NO. 21 de Junio de 2004. DS N° 111 de 29.07.1983.
40. Demir, G., Aytekin, M., Akgün, A., Ikizler, S. B., & Tatar, O. (2013). A comparison of landslide susceptibility mapping of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) by likelihood-frequency ratio and analytic hierarchy process methods. *Natural hazards*, 65, 1481-1506.
41. *Descarga IPT y documentos*. (2015). Minvu.cl. <https://ide.minvu.cl/pages/descargas>.
42. *Dirección Meteorológica de Chile*. (2019). Recuperado en el 10 de Diciembre de 2023 desde; <https://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/index.xhtml>
43. DRYZEK, J. S. (2005): *The politics of the earth: environmental discourses*. Oxford University Press.

44. Duo GL, Zhang YS, Iqbal J, et al. (2017) Mapeo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra utilizando un modelo integrado de método de valor de información y regresión logística en la cuenca de Bailongjiang, provincia de Gansu, China. *Revista de Ciencias de la Montaña* 14 (2). DOI: 10.1007/s11629-016-4126-9
45. Ercanoglu, M., & Gokceoglu, C. (2002). Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental geology*, 41, 720-730.
46. Espinoza Lizama, C. (2013). Propuesta metodológica para establecer áreas de riesgo por remoción en masa, Chile. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 22(2), 145-169. Revisado el 19 de Julio (2023): <https://www.redalyc.org/pdf/2818/281826970006.pdf>
47. Espinoza Lizama, E. (2013). Propuesta metodológica para establecer áreas de riesgo por remoción en masa, Chile. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 22(2), 145-169. Revisado el 17 de Julio (2023) http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2013000200009
48. Esri ArcGIS Pro | Documentación. (2023). Arcgis.com. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/curvature.htm>.
49. Esri. ArcMap, Curvature Function. (2021) Available online: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm> (accedido el 09 de Diciembre del 2023)
50. Ettinger, S., Mounaud, L., Magill, C., Yao-Lafourcade, A. F., Thouret, J. C., Manville, V., ... & Llerena, N. M. (2016). Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology*, 541, 563-581.
51. Ettinger, S., Mounaud, L., Magill, C., Yao-Lafourcade, A. F., Thouret, J. C., Manville, V., ... & Llerena, N. M. (2016). Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage

- probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology*, 541, 563-581.
52. Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, 27(8), 861-874.
53. Fernández, R., & Núñez, E. G. (2002). *Evaluación de la vulnerabilidad de estructuras ante la ocurrencia de eventos sísmicos* (Bachelor's thesis).
54. Fonseca, H., y Derch, F., (2019) Minuta técnica por remociones en masa en la ciudad de Lota sector Cousiño al cerro y el Morro. Servicio Nacional de Geología y Minería. SERNAGEOMIN. SS Revisado el 19 de Julio (2023): <https://catalogobiblioteca.sernageomin.cl/Archivos/15672.pdf>
55. Fonseca, H., y Derch, F., (2019). Informe por remoción en masa Población Gabriela Mistral, ciudad de Lota. Servicio Nacional de Geología y Minería. SERNAGEOMIN. SS (2019). Revisado el 19 de Julio (2023): <https://catalogobiblioteca.sernageomin.cl/Archivos/15671.pdf>
56. Galli, C. 1967. Geología Urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano, Chile. Universidad de Concepción. Informe final del Proyecto de Investigación N° 75 de la Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción (Inédito): 248 pp. Concepción.
57. Garbrecht, J. y Martz, LW (2000). Problemas del modelo de elevación digital en el modelado de recursos hídricos. *Soporte de modelización hidrológica e hidráulica con sistemas de información geográfica*, 1-28.
58. Geymen A, Baz I (2008) The potential of remote sensing for monitoring land cover changes and effects on physical geography in the area of Kayisdagi Mountain and its surroundings (Istanbul). *Environ. Monit. Asses.* 140: 33-42.
59. Ghimire, M. (2011). Ocurrencia de deslizamientos de tierra y su relación con factores del terreno en las colinas de Siwalik, Nepal: estudio de caso de evaluación de susceptibilidad en tres cuencas. *Peligros naturales*, 56 (1), 299-320.

60. Gholami, M., Ghachkanlu, E.N., Khosravi, K. *et al.* Landslide prediction capability by comparison of frequency ratio, fuzzy gamma and landslide index method. *J Earth Syst Sci* **128**, 42 (2019).
<https://doi.org/10.1007/s12040-018-1047-8>.
61. Glade, T. (2003). Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena*, *51*(3-4), 297-314.
62. Glade, T., Anderson, M. G., & Crozier, M. J. (Eds.). (2005). *Landslide hazard and risk* (Vol. 807). Chichester: Wiley.
63. Godt, J. W., Baum, R. L., Savage, W. Z., Salciarini, D., Schulz, W. H., & Harp, E. L. (2008). Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Engineering Geology*, *102*(3-4), 214–226.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.019>
64. Gonzáles Muzzio. C, 2015. Metodología para la evaluación rápida de la vulnerabilidad de instalaciones esenciales y edificios patrimoniales. Actas del Worckshop. Concepción 5-6 de octubre 2015. Chile.
65. Gorokhovich, Y., & Vustianiuk, A. (2021). Implications of slope aspect for landslide risk assessment: A case study of Hurricane Maria in Puerto Rico in 2017. *Geomorphology*, *391*, 107874.
66. Gorum T. Fan, X van Westen, C., Huang, R, Xu Q., Tang, Wang, G., 2011. Patrón de distribución de deslizamientos de tierra incluidos por terrenos provocados por el terremoto de Wenchuan del 12 de mayo de 2008. *Geomorgología* *133*(3-4), 152-167.
67. Guthrie, R. H., & Evans, S. G. (a)(2004). Analysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system, coastal British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, *29*(11), 1321-1339.

68. Guthrie, R. H., & Evans, S. G.(b) (2004). Magnitude and frequency of landslides triggered by a storm event, Loughborough Inlet, British Columbia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(3), 475-483.
69. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216.
70. Guzzetti, F., Malamud, B. D., Turcotte, D. L., & Reichenbach, P. (2002). Power-law correlations of landslide areas in central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 195(3-4), 169-183.
71. Harp, E. L., Keefer, D. K., Sato, H. P., & Yagi, H. (2011). Landslide inventories: the essential part of seismic landslide hazard analyses. *Engineering Geology*, 122(1-2), 9-21.
72. Hauser, A., (1993). *Remociones en Masa en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 45, Santiago de Chile.
73. Hauser. A., (2000). Servicio Nacional de Geología y Minería - Chile. Boletín. No 59. Santiago de Chile. Revisado el 17 de Julio, 2023: https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RAR-002.pdf
74. Heim A (1932) Landslides and human lives (Bergsturz and Menschenleben). In: Skermer, N. (ed) Bi-Tech Publishers, Vancouver, BC, 196p.
75. Hernández, J. M. A., Peña, J. V. P., Yesares-García, J., Peces, M. J. R., Roldán, F. J., Ruiz, R. M. M., ... & Martínez, J. M. M. (2012). Metodología para el análisis de la susceptibilidad frente a deslizamientos en el Parque Nacional de Sierra Nevada mediante SIG. In *Proyectos de investigación en parques nacionales: 2008-2011* (pp. 7-24). Organismo Autónomo Parques Nacionales.
76. Herzer, M. (2011). *Construcción del riesgo, desastre y gestión ambiental urbana: Perspectivas en debate*. Unq.edu.ar. Instituto de investigaciones Gino Germani. Facultad de Ciencias Sociales Universidad de Buenos Aires. <http://www.mundourbano.unq.edu.ar/index.php/ano-2015/81-numero-45/257-articulo-hilda>

77. Highland, L., y Bobrowsky, P., (2008.). *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes*. <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2665/doc2665-contenido.pdf>
78. Huang, W., Ding, M., Li, Z., Zhuang, J., Yang, J., Li, X., ... & Dong, Y. (2022). An efficient user-friendly integration tool for landslide susceptibility mapping based on support vector machines: Svm-lsm toolbox. *Remote Sensing*, 14(14), 3408.
79. Hutchinson, J. (1998). Principios de Geotecnia. XYZ Editorial.
80. IDIGER. (2023). Instituto Distral de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. [Idiger.gov.co](http://www.idiger.gov.co).
<https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>
81. Inventario de Remociones en Masa del Área Metropolitana de Concepción - Grupo de Estudios Multiamenazas Biobío (2023).
82. Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H. R. *et al.* GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **11**, 909–926 (2014). <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0464-0>.
83. Jaque Castillo, E. D. C., Lara San Martin, A., y Merino González, C. (2017). Fortaleciendo el uso de los instrumentos de planificación urbana, para la gestión de riesgos. Ciudad de Coronel, Región del Biobío. *Revista Invi*, 32(90), 107-124. Revisado el 19 de Julio (2023):
<https://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/62726>
84. Jaque.E. Cerda. C. y Parra, L. 2011. Plan Regulador de Lota. Ilustre Municipalidad de Lota.
85. Jiménez-Perálvarez, J. D., Irigaray, C., El Hamdouni, R., & Chacón, J. (2009). Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS. *Natural hazards*, 50, 571-590.
86. Jordi Corominas. 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*. **33**(2): 260-271. <https://doi.org/10.1139/t96-005>.

87. Kannan, M., E. Saranathan, and R. Anabalagan. 2013. Landslide vulnerability mapping using frequency ratio model: a geospatial approach in Bodi-Bodimettu Ghat section, Theni district, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences* 6: 2901–2913. doi: 10.1007/s12517-012-0587-5.
88. Karim, S., Jalileddin, S., & Ali, M. T. (2011). Zoning landslide by use of frequency ratio method (case study: Deylaman Region). *Middle-East Journal of Scientific Research*, 9(5), 578-583.
89. Kavzoglu, T., Sahin, E. K., & Colkesen, I. (2015). Selecting optimal conditioning factors in shallow translational landslide susceptibility mapping using genetic algorithm. *Engineering Geology*, 192, 101-112.
90. Kayastha, P. (2015). "Landslide susceptibility mapping and factor effect analysis using frequency ratio in a catchment scale: A case study from Garuwa sub-basin, East Nepal." *Arabian Journal of Geosciences*, pp. 1-13, DOI: 10.1007/s12517-015-1831-6.
91. Keller, E. A., y Blodgett, R. H. (2007). *Riesgos Naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. Pearson Educación, Madrid.
92. Khan, H., Shafique, M., Khan, M. A., Bacha, M. A., Shah, S. U., & Calligaris, C. (2019). Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1), 11-24.
93. Kilburn C.R.J, Petley, D.N. (2003) Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, northern Italy. *Geomorphology* 54:21–32.
94. Kilburn, C. R., & Petley, D. N. (2003). Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, Northern Italy. *Geomorphology*, 54(1-2), 21-32.
95. Korup, O. (2004) Geomorphic implications of fault zone weakening: slope instability along the Alpine fault, south Westland to Fiordland, New Zealand. *J Geol Geophys* 47:257–267.
96. Lagos, M., Hidalgo, R. y Arenas, F. (2010). *Los riesgos naturales en la planificación territorial*. Instituto de Geografía. Centro de políticas públicas UC. Revisado el 17 de Julio:
<https://repositorio.uc.cl/xmlui/bitstream/handle/11534/1765/587388.pdf>

97. Lara, C. M. y Sepúlveda, V. S. (2008). Departamento de Geología U de Chile. Revisado el 19 de Julio (2023): https://www.ucursos.cl/ingenieria/2008/1/GL62C/1/material_docente/bajar?id=159913
98. Lara, M. (2007). Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. *Santiago de Chile: Universidad de Chile.*
99. Lara, M., & Sepúlveda, S. A. (2010). Landslide susceptibility and hazard assessment in San Ramón Ravine, Santiago de Chile, from an engineering geological approach. *Environmental earth sciences, 60*, 1227-1243.
100. Lara, M., Sepúlveda, S. A., Oliveros Celis, C., Rebolledo, S., y Andrés, P. (2018). *Landslide susceptibility maps of Santiago city Andean foothills, Chile. 45(3)*, 433–433. Revisado el 19 de Julio (2023): <https://doi.org/10.5027/andgeov45n3-3151>.
101. Larsen, MC, Torres-Sanchez, AJ, 1998. La frecuencia y distribución de deslizamientos de tierra recientes en tres regiones tropicales montañosas de Puerto Rico. *Geomorfología 24 (4)*, 309–331.
102. Lavell, A. Sobre la Gestión del Riesgo: Apuntes hacia una Definición [versión electrónica]. (2001). De: <http://www.ceprode.org.sv/staticpages/pdf/spa/doc15036/doc15036.htm>
103. Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides, 4(1)*, 33-41.
104. Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using Frequency Ratio and logistic regression models. *Landslides, 4(1)*, 33-41.
105. Lee, S., Ryu, J. H., & Won, J. S. (2003). A GIS-based automated floodplain mapping using DEMs. *Computers, Environment and Urban Systems, 27(2)*, 151-171.
106. Lepore, C., Kamal, S. A., Shanahan, P., & Bras, R. L. (2012). Rainfall-induced landslide susceptibility zonation of Puerto Rico. *Environmental Earth Sciences, 66*, 1667-1681.

107. Leyton, F., Ruiz, S., & Sepúlveda, S. A. (2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean geology*, 37(2), 455-472.
108. Li, G., Lei, Y., Yao, H., Wu, S., & Ge, J. (2017). The influence of land urbanization on landslides: An empirical estimation based on Chinese provincial panel data. *Science of the total environment*, 595, 681-690.
109. Li, Z., & Guo, X. (2013). Leaf area index estimation in semiarid mixed grassland by considering both temporal and spatial variations. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1), 073567-073567.
110. López, R. E., Zuluaga, A. D., Gómez, F., & Tapia, L. (2020). Aplicación del método Mora-Vahrson para evaluar la susceptibilidad a deslizamiento en el municipio de Manaure, Cesar, Colombia. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 4(2), 57-70.
111. Lota [material cartográfico] Asociación de Aseguradores de Chile, Comité Incendio. - BND: Mapoteca. (2015). BND: Mapoteca. <http://www.bibliotecanacionaldigital.gob.cl/bnd/631/w3-article-311682.html>
112. M.J. Crozier (2010). *Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review.* , 124(3-4), 0-267. doi:10.1016/j.geomorph.2010.04.009
113. Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711.
114. Malczewski, A., Pillans, B., Morris, F., & Newstrom, R. (2011, June). A family of MEMS tunable filters for advanced RF applications. In *2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium* (pp. 1-4). IEEE.
115. Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science* (Vol. 1, pp. 55-77). New York: Springer.
116. Mantovani, F., Soeters, R., y Van Westen, C. J. (1996). Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, 15(3-4), 213-225.

117. Marcano, A. (2016). Metodología para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa desencadenados por la sismicidad. *Revista de Investigación*, 40(87), 149-174.
118. Mardones, M. y Vidal, C. (2001) La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *EURE (Santiago)*. 27 (81). Revisado el 17 de Julio, (2023): doi:<https://doi.org/10.4067/s0250-71612001008100006>
119. Mardones, M., Echeverría, F., & Jara, C. (2004). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción. *Investigaciones Geográficas*, (38), ág-1.
120. Marín, M. V., Muñoz, A. A., y Naranjo, J. A. (2018). Víctimas fatales causadas por remociones en masa en Chile (1928-2017). In *XV Congreso Geológico Chileno "Geociencias hacia la comunidad"*. PRIN-SG: Sesión General Peligros y Riesgos Naturales (pp. 216-2019).
121. Mc. ENTIRE, D. A. (2003): «Causation of catastrophe: lesson from Hurricane George», *Journal of Emergency Management*, vol. 1, n° 2, pp. 22-29.
122. Mella, M.; Duhart, P.; Ramírez, P.; Constanzo, H. 2010. Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área de Lota, Región del BíoBío. Mapa 8-1: Peligro de remociones en masa. In *Geología para la reconstrucción y la gestión del riesgo*, 1. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-10- 43: 12p., 21 mapas diferentes escalas. Santiago.
123. Mendoza, A., Solano, C., Palencia, D., & Garcia, D. (2019). Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 27(3), 348-360.
124. Mergili, M., Santiago, C. I. M. y Moreiras, S. M. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 113-131. Revisado el 19 de Julio de 2023: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/59564>

125. Mohammady, M., Pourghasemi, H. R., & Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: a comparison between frequency ratio, Dempster–Shafer, and weights-of-evidence models. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61, 221-236.
126. Molina Jimenez, P. A. (2017). Estudio Geológico estructural en el área carbonífera de Coronel, VIII Región del BíoBío, Chile. (Memoria de título).URL:
Tesis_Estudio_Geologico_estructural.Image.Marked.pdf (udec.cl)
127. Montero, J. C. (2008). Los conceptos actuales de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, en la prevención de movimientos de ladera, con ejemplos de aplicaciones prácticas. Revisado en Julio 3, 2023, ResearchGate website:
https://www.researchgate.net/publication/258856593_Los_conceptos_actuales_de_susceptibilidad_peligrosidad_y_riesgo_en_la_preencion_de_movimientos_de_ladera_con_ejemplos_de_aplicaciones_practicas
128. Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, 5(1), 3-30.
129. MORA, C. & VAHRSON, W. G. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 31(1), 49-58.
130. Moris Iturrieta, R. (2023). Modelos de planificación y gestión integrada para el fortalecimiento de la resiliencia: casos de Chile. Granada: Universidad d Granada, 2023.Vol 29. Num 1, pp. 103 - 114.
Reviado el 17 de Julio: [<https://hdl.handle.net/10481/80344>]
131. Moris, R., Contrucci, P., y Ortega, A. (2017). El riesgo en la actualización post-desastre de instrumentos de planificación territorial comunales en Chile 2010–2014. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 1(1), 85-100.Revisado el 19 de Julio (2023): <https://www.revistareder.com/ojs/index.php/reder/article/view/6>
132. Municipalidad de Lota. 2018. Plan Regulador de Lota 1983. Lotatransparente.cl. 2018. Revisado el 18 de Julio (2003):

http://www.lotatransparente.cl/index.php?action=plantillas_generar_plantilla&ig=320&m=6&a=2018&ia=25424.

133. Muñiz-Jauregui, M., Arturo, J., Hernández-Madrigal, J., y Manuel, V. (2012). Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas (RMGG)*. Revisado el 17 de Julio <https://www.redalyc.org/pdf/572/57224778007.pdf>
134. Myneni, R. B., & Tucker, C. J. (1984). Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89(D4), 529–536. <https://doi.org/10.1029/JD089iD04p0529>
135. Nachappa, T. G., Piralilou, S. T., Gholamnia, K., Ghorbanzadeh, O., Rahmati, O., & Blaschke, T. (2020). Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster Shafer Theory. *Journal of hydrology*, 590, 125275.
136. Nachappa, T. G., Piralilou, S. T., Gholamnia, K., Ghorbanzadeh, O., Rahmati, O., & Blaschke, T. (2020). Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster Shafer Theory. *Journal of hydrology*, 590, 125275.
137. Nacional, Universidad, Mayor San, Marcos Perú, Salas Bacalla, Julio Leyva Caballero, and Calenzani Fiestas. n.d. "Industrial Data." <https://www.redalyc.org/pdf/816/81640856014.pdf>.
138. Nandi, A., Mandal, A., Wilson, M., & Smith, D. (2016). Flood hazard mapping in Jamaica using principal component analysis and logistic regression. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-16
139. Náquira Bazán, M. V., (2009). Susceptibilidad de Remociones en Masa en las Costas de Fiordos Cercanos a Hornopirén, X Región. *Uchile.cl*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103473>
140. Naranjo, J., Arenas, M., & Geólogos, P. (2006). *Subdirección Nacional de Geología*. https://portal-geo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RBIO-103.pdf
141. Naranjo, J., Clavero, J., Hauser, A., y Geólogos, P., (2005). Servicio Nacional de Geología y Minería Subdirección Nacional de Geología Informe Geológico sobre las remociones en masa causadas por lluvias torrenciales de los días 26 y 27 de Junio de 2005 en Concepción, VIII Región.

Revisado el 17 de Julio de 2023. Revisado el 19 de Julio (2023):

https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RBIO-055.pdf

142. Obeso, J.R., Laiolo, P. 2021. Cambio climático y variación de los ciclos vitales con la altitud. *Ecosistemas* 30(1): 2145. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2145>
143. Oh, H. J., Pradhan, B., & Buchroithner, M. F. (2015). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence model. *Journal of Mountain Science*, 12(3), 607-625.
144. Orellana Ossandón, A., Vicuña del Río, M. M., & Moris Iturrieta, R. (2017). Planificación urbana y calidad de vida: Aproximación al estado de la planificación local en Chile
145. Ortiz, J. F. H. y Montón, G. C. (2013). Zonificación de amenazas por remoción en masa, sector La Nohora-Montecarlo: Recomendaciones al plan de ordenamiento territorial POT. *Cap&Cua*, 10(1), 1-12. Revisado el 19 de Julio (2023): <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4763037>
146. Pachauri, A. K., & Pant, M. (1992). Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering geology*, 32(1-2), 81-100.
147. Páez, D., David Quiroz, D., Feuker, P., Derch, P., & Paul, P. (2010). *2996-1 Servicio Nacional de Geología y Minería. Chile subdirección Nacional de Geología territorio para el área ordenamiento de castro región de los Lagos Carta Geológica ambiental*. . https://catalogobiblioteca.sernageomin.cl/Archivos/13996_TEXTO_MAPAS.pdf.
148. Park, S., Choi, C., Kim, B., & Kim, J. (2013). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea. *Environmental earth sciences*, 68, 1443-1464.
149. Parsons, A. J. (1988): Hillslope form. Routledge. London. 212 págs.
150. Patiño-Murillo, M. y Cruz-Cerón, G., (2018). Reconocimiento de actores, causas y acciones frente al problema de remoción en masa en el transepto vial Maltería-Las Margaritas, Manizales-

Caldas. *Revista Luna Azul*, (46), 235-257. Revisado el 19 de Julio
(2023): <https://www.redalyc.org/journal/3217/321759619013/>

151. Pelletier, J. D., Malamud, B. D., Blodgett, T., & Turcotte, D. L. (1997). Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides. *Engineering Geology*, 48(3-4), 255-268.
152. Peshevski, I., Jovanovski, M., Papic, J., & Abolmasov, B. (2015, April 22). (PDF) MODEL FOR GIS LANDSLIDE DATABASE ESTABLISHMENT AND OPERATION IN REPUBLIC OF MACEDONIA. Retrieved January 17, 2024 from https://www.researchgate.net/publication/281274236_MODE
153. Peucker, T. K., & Douglas, D. H. (1975). Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. *Computer Graphics and image processing*, 4(4), 375-387.
154. Pineda, M. C., Martínez Casasnovas, J. A., & Vilorio, J. (2016). Relación entre los cambios de cobertura vegetal y la ocurrencia de deslizamientos de tierra en la Serranía del Interior, Venezuela.
155. Plan extraordinario para Mineros. Diario el Sur (1990).
156. Plan regulador comunal de Lota [material cartográfico] / Ministerio de Vivienda y Urbanismo Secretaría Regional Ministerial VIII Región del Bío-Bío Departamento de Desarrollo Urbano e Infraestructura. [Lota]: Desarrollo Urbano e Infraestructura, 1982. 1 plano; 110 x 164 cm.
157. Poudyal, C. P., Chang, C., Oh, H. J., & Lee, S. (2010). Landslide susceptibility maps comparing frequency ratio and artificial neural networks: a case study from the Nepal Himalaya. *Environmental Earth Sciences*, 61, 1049-1064.
158. Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural hazards*, 63, 965-996.

159. POURGHASEMI, H.R., JIRANDEH, A.G., PRADHAN, B. *et al.* Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran. *J Earth Syst Sci* **122**, 349–369 (2013). <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0282-2>
160. Pradhan, B. (2010). Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility analysis and its cross-validation in the Klang valley, Malaysia. *Environmental Modeling & Assessment*, 15(3), 167-177.
161. Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software*, 25(6), 747-759.
162. Qingfeng Ding, Wei Chen & Haoyuan Hong (2017) Application of frequency ratio, weights of evidence and evidential belief function models in landslide susceptibility mapping, *Geocarto International*, 32:6, 619-639, DOI: 10.1080/10106049.2016.1165294
163. Quesada Román, A., & Feoli Boraschi, S. (2018). Comparación de la metodología Mora-Vahrson y el método morfométrico para determinar áreas susceptibles a deslizamientos en la microcuenca del río Macho, Costa Rica.
164. Quesada-Román, A., & Gustavo Barrantes Castillo. (2017). Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, 94. <https://doi.org/10.14350/rig.57318>
165. R.J. Huggett book: *Fundamentals of Geomorphology* (3rd ed.), 2011
166. Rahadiano, H., Fariza, A. & Hasim, J.A.N (2005). Hasim, "Risk-level assessment system on Bengawan Solo River basin flood prone areas using analytic hierarchy process and natural breaks: Study case: East Java". In *International Conference on Data and Software Engineering (ICoDSE)*, pp. 195-200,
167. Ramos, A. M., Mario Germán Trujillo-Vela, y Prada. L. F., (2015) "Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá." *Obras y proyectos* 18: 63-75.

168. Ramos, C. A. M., Trujillo-Vela, M. G., y Prada S, L. F. (2015). Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá. *Obras Y Proyectos*, (18), 63–75. Revisado el 17 de Julio:
<https://doi.org/10.4067/s0718-28132015000200006>
169. Rasyid, A. R., Bhandary, N. P., & Yatabe, R. (2016). Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 3, 1-16.
170. Rengers, N., Soeters, R., & Van Westen, C. J. (1992). Remote sensing and GIS applied to mountain hazard mapping. *Episodes Journal of International Geoscience*, 15(1), 36-45.
171. Rodríguez Valdivia, A., Tapia Tosetti, A. y Albornoz Espinoza, C., (2014). Susceptibilidad de movimientos en el Valle de Socoroma, precordillera Andina de Arica y Parinacota. Universidad de Tarapacá, Departamento Ciencias Históricas y Geográficas, Arica, Chile. 44, 25–39. Revisado el 18 de Julio (20023): <https://doi.org/10.4067/s0719-26812014000200004>
172. Saaty, T. L. (1980). "The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation." McGraw-Hill.
173. Saaty, T. L. (2005). Making and validating complex decisions with the AHP/ANP. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 14, 1-36.
174. Saha, A. K., Arora, M. K., Gupta, R. P., Viridi, M. L., & Csaplovics, E. (2005). GIS-based route planning in landslide-prone areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(10), 1149-1175.
175. Saha, A. K., Gupta, R. P., & Arora, M. K. (2002). GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. *International journal of remote sensing*, 23(2), 357-369.
176. Salas Oyarzo, M. A. (2022). Zonificación y análisis de susceptibilidad de procesos de remoción en masa en las comunas de Coronel, Lota y San Pedro de la Paz.
177. Sanchez Rodriguez, E., Torres Crespo, M. Á., Fernández-Palacios Carmona, A., Aguilar Alba, M., Pino Serrato, I. L., & Granado Ruiz, L. (2000). Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como

indicadores para la asignación de modelos de combustible para la estimación del riesgo de incendios en Andalucía. In *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible: Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativo, SIG y Teledetección (9°. 2000. Alcalá de Henares)*. Universidad de Alcalá. Asociación de Geógrafos Españoles.

178. Secretaría Regional Ministerial MINVU VIII Región – Depto. (2010) De Desarrollo Urbano e Infraestructura – Municipalidad de Lota, Plan Regulador Comunal de Lota Estudio de Riesgos y de Protección Ambiental.
179. Secretaría Regional Ministerial MINVU VIII Región. (2010). Estudio de Riesgo y Protección Ambiental. Depto. de Desarrollo Urbano e Infraestructura – I. Municipalidad de Lota. Lota, Chile. Revisado el 19 de Julio (2023):
http://www.lotatransparente.cl/index.php?action=plantillas_generar_archivo&ig=358&m=10&a=2019&ia=40795
180. Secretaría Regional Ministerial. MINVU. (2014-2016). Actualización de Plan de Desarrollo Comunal. Lota. PLADECO. Lota, Chile. Revisado el 19 de Julio (2023):
http://lotatransparente.cl/index.php?action=plantillas_generar_archivo&ig=207&m=9&a=2021&ia=15595
181. Sepúlveda, S. (1998). *Metodología para estimar el nivel de desarrollo sostenible en espacios territoriales* (No. 4). iica.
182. Shahabi, H., Khezri, S., Ahmad, B. B., & Zabihi, H. (2012). Application of artificial neural network in prediction of municipal solid waste generation (Case study: Saqqez City in Kurdistan Province). *World Applied Sciences Journal*, 20(2), 336-343. *Interciencia*, 31(9), 638–646. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442006000900006&script=sci_arttext
183. Soeters, R., y Van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. *Landslides: investigation and mitigation*, 247, 129-177.

184. Soto-Monroy, J. A., & Rojas-Gamba, N. I. (2015). Evaluación de susceptibilidad de fenómenos de remoción en masa y uso de sistemas de información geográfica. *Ingenio Magno*, 6, 22-38.
185. Stark, C. P., & Hovius, N. (2001). The characterization of landslide size distributions. *Geophysical research letters*, 28(6), 1091-1094.
186. Suarez, D. J. (1998). Deslizamiento y estabilidad de taludes en zona tropical. Instituto de Investigación sobre Erosión y Deslizamientos. Profesor Escuela de Ingeniería Civil Universidad Industrial de Santander. Colombia – Bucaramanga. Ingeniería de suelos Ltda. Revisado el 19 de Julio (2023)
187. T. Fung & W. Siu (2000) Calidad ambiental y sus cambios, un análisis utilizando NDVI, *International Journal of Remote Sensing*, 21:5, 1011-1024, DOI:10.1080/014311600210407
188. Thongley, T., & Vansarochana, C. (2021). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model at Ossey watershed area in Bhutan. *Engineering and applied science research*, 48(1), 56-64.
189. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
190. Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2005). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering Geology*, 83(3-4), 112-128.
191. Van Westen, C. J., Van Asch, T. W., & Soeters, R. (2003). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(1), 167-184.
192. Van Westen, C. J., Van Asch, T. W., & Soeters, R. (2003). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(1), 167-184.
193. Van Westen, C.J., Castellanos Abella, & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3-4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>

194. Varnes, D. J. (1958), "Landslides types and processes", in Eckel, E. B. (ed.), *Landslides and Engineering Practice*. Highway Res. Board Special Report 29, pp. 20- Varnes, D. J. (1978), "Slope movements, types and processes", *Landslides: Analysis and control*, GI WPNVLI (1993), "A suggested method for transportation search board, Spec. Rep. 176, describing the activity of a landslide". *Bulletin of the 11-33, National Academy of Science, Washington*
195. Vera Rodríguez, J.M. y Albarracín Calderón, A. P. (2017). "Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, no. 2, p. 109-136. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2309>
196. Vilches, O. R., Flores, M. M., Quezada, C. R., Reyes, C. M., y Flores, L. F., (2016) DESASTRES POR INUNDACIONES FLUVIALES EN UN ÁREA DE EXPANSIÓN URBANA: CURSO INFERIOR DE LA CUENCA DEL RÍO ANDALIÉN-CHILE CENTRAL (1943-2011). Revisado el 19 de Julio (2023).
197. Vilches, R., y Reyes, M. (2023). Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía*, 20(1), 83–116. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652011000100005
198. Voogd, H. (1983). Multi-criteria evaluations for urban and regional planning. Pion, London Zadeh, LA, 1965 Fuzzy sets *Inf Control*, 338–353.
199. Wang, P., Bai, X., Wu, X., Yu, H., Hao, Y., & Hu, B. X. (2018). GIS-Based Random Forest Weight for Rainfall-Induced Landslide Susceptibility Assessment at a Humid Region in Southern China. *Water*, 10(8), 1019–1019. <https://doi.org/10.3390/w10081019>.
200. Westen, C. V., & Terlien, M. J. T. (1996). An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia). *Earth surface processes and landforms*, 21(9), 853-868.
201. White, G. F. (1958). *Introductory graduate work for geographers*.

202. Whittow, J., (1968). Dictionary of Physical Geography. Ediciones The Penguin. 591 p. New York.
203. Wilches-Chaux, G. (1993). La vulnerabilidad global. *Los desastres no son naturales*, 1144.
204. Xiao, Y., Yi, S., & Tang, Z. (2017). Integrated flood hazard assessment based on spatial ordered weighted averaging method considering spatial heterogeneity of risk preference. *Science of the Total Environment*, 599, 1034-1046.
205. Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *catena*, 72(1), 1-12.
206. Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, AC, Yomralioglu, T., 2011. Un estudio comparativo basado en SIG de la relación de frecuencia, el proceso de jerarquía analítica, la estadística bivariadas y los métodos de regresión logística para el mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en Trabzon, noreste de Turquía.
207. Yang, I. T., Acharya, T. D., and Lee, D. H. (2016). "Landslide susceptibility mapping for 2015 earthquake region of Sindhupalchowk, Nepal using frequency ratio." *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 34, No. 4, pp. 443-
208. Yesilnacar, E., & Topal, T. A. M. E. R. (2005). Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*, 79(3-4), 251-266.
209. 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)." *Comput. Geosci.*, Vol. 35, No. 6, pp. 1125-1138, DOI: 10.1016/j.cageo.2008.
210. Zêzere, J. L. et al. (2003). Landslide susceptibility assessment in the Azores Islands (Portugal): a GIS-based approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(1-2), 77-97.
211. Zêzere, J. L., Rodrigues, M. L., & Garcia, R. A. C. (2003). Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *Engineering Geology*, 69(1-2), 169-187.

212. Zhang, G., Wang, G., Liu, Y., Liu, H., Qu, J., & Li, J. (2016). Highly active and stable catalysts of phytic acid-derivative transition metal phosphides for full water splitting. *Journal of the American Chemical Society*, 138(44), 14686-14693.
213. Aguirre, L., Hervé, F., Godoy, E. 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile: an outline. *Krystallinikum*, 9, 7– 19.
214. Cruden, D. M. & Varnes, D. J. 1996. Landslide Types and Processes. In Special Report 247 Landslides Investigation and Mitigation. Turner, A. K. and Schuster R. L. (eds.) TRBNRC, National Academy Press: Washington, pp. 36-75. Revisado el 19 de Julio (2023):
https://www.academia.edu/28667276/Cruden_D_M_Varnes_D_J_1996_Landslide_Types_and_Processes_Special_Report_Transportation_Research_Board_National_Academy_of_Sciences_247_36_75
215. Pierson. T. C. y Scott, K.M, 1998. Surficial Hydrologic Hazard at Volcaones. U.S. Geological Survey, Open File No. 98, 314 p.
216. Kamal, S., 2008. Desarrollo de un mapa de peligro de deslizamientos de tierra para la Isla de Puerto Rico. MIT (Tesis, Maestría en Ingeniería en Ingeniería Civil y Ambiental)
217. Quezada, J. Diestro Fernández, A. y Vasquez, D. 2012. “Cambios En El Relieve Generados Como Consecuencia Del Terremoto Mw = 8,8 Del 27 de Febrero de 2010 En El Centro-Sur de Chile,” no. 53 (December): 35–55. Revisado en: <https://doi.org/10.4067/s0718-34022012000300003>.
218. Toloza, V. Cisterna, M.E., Dupré, A. 2017. Instituto Geología Económica Aplicada, Universidad de Concepción, Chile.
219. *Land Viewer* | EOS. (2023). Land Viewer. Retrieved December 10, 2023 from <https://eos.com/landviewer/>
220. SERNAGEOMIN. (2010). Mapa 8-1 Peligros de remociones en masa. Mapa. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/407907327/8-1-Lota-Remociones-Masa>.