

EVALUACIÓN DE FACTORES GEOMECÁNICOS PARA DETERMINAR AMENAZA DE MOVIMIENTOS EN MASA EN LA ZONA NOROESTE DE LA PENÍNSULA DE HUALPÉN, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.

Gonzalo Peña Rivas¹, José Montenegro Cooper², Robert King St-Onge³, Mauricio Espinoza Vargas⁴

RESUMEN: Este artículo presenta como abordar un problema recurrente en la Región del Biobío a partir de clasificaciones geomecánicas, donde se determina la amenaza de taludes y laderas en zonas topográficamente escarpadas que pueden afectar al bienestar de las personas e infraestructuras, así como la conectividad urbana y vial. El sector de estudio se ubica al noroeste de la Península de Hualpén, Región del Biobío, en el afloran macizos graníticos altamente fracturados y diaclasados, lo que implican una potencial desestabilización del macizo rocoso. Por lo tanto, se propone realizar un mapa de peligrosidad de la zona, integrando clasificaciones geomecánicas y características propias de cada talud y ladera mediante un sistema de información geográfica (Gis).

PALABRAS CLAVE: clasificaciones geomecánicas, estabilidad de taludes, Península de Hualpén.

ABSTRACT: This article presents how to address a recurring problem in the BioBío Region from geomechanical classifications, where the menace of slopes and slopes natural in areas of steep topography that may affect the safety of people and infrastructure, as well as urban and roads connectivity. The study sector is located northwest of the Hualpen Peninsula, Biobío Region, granite massifs outcrop is highly fractured and jointed, which implies a potential destabilization of the rock massif. Therefore, it is proposed to make a hazard map of the area, integrating geomechanical classifications and characteristics of each slope and slope natural through a geographic information system (Gis).

KEYWORDS: geomechanical classification, slope stability, Hualpen Peninsula.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, gpena@ing.ucsc.cl

² Profesor guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jmontenegro@ucsc.cl

³ Profesor informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

⁴ Profesor informante, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción, CHILE, mauricespinoza@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

La Península de Hualpén actualmente es amenazada por movimientos en masa. El Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), elaboró un mapa de zonificación del peligro de remociones en masa, identificando deslizamientos de roca y suelo, caída de rocas y flujos de detritos en las comunas de Concepción, Talcahuano, Hualpén y Chiguayante en el año 2010. Este trabajo indicó que las zonas de mayor incertidumbre y menor detalle se encuentran en la Península de Hualpén y la zona norte de la Península de Tumbes.

La descripción y caracterización de un macizo rocoso, es una labor necesaria en todos los estudios de ingeniería geológica, cuyo objetivo sea el conocimiento de sus propiedades y características geotécnicas (González de Vallejos et al., 2002). Estos a su vez nos permite evaluar su comportamiento y planificar investigaciones en base de la interpretación de resultados.

En sectores costeros las discontinuidades condicionan la resistencia del macizo rocoso, sus propiedades y comportamiento hidráulico, representando planos preferentes a la alteración, meteorización, fractura y flujo de agua (González de Vallejos et al., 2002).

Los macizos rocosos presentes en el sector de estudio se encuentran altamente fracturados y diaclasados, lo que implica una potencial amenaza. Un acontecimiento de procesos de remoción en masa cercano a la zona de estudio corresponde al ocurrido el 16 de junio del 2019 en el interior del Parque Pedro del Río Zañartu, comuna de Hualpén, Región del Biobío, Chile, donde se produjo una falla por volcamiento de bloques que, posteriormente se transformó en caídas de rocas (SERNAGEOMIN, 2019) (Figura 1).



Figura 1: Remoción en masa por volcamiento en el interior del Parque Pedro del Río Zañartu, comuna de Hualpén, Región del Biobío, Chile. (SERNAGEOMIN, 2019).

Para evaluar la estabilidad de los taludes y laderas en la zona de estudio; Se identifica el material que se encuentra compuesto, luego se realiza la estación geomecánica y posteriormente un análisis cinemático. Las clasificaciones geomecánicas utilizadas, corresponden a métodos empíricos que indican la calidad del talud de roca, así como su estabilidad.

Este estudio evalúa la calidad del macizo rocoso mediante cuatro métodos de clasificaciones geomecánicas: La clasificación *SMR* (*Slope Mass Rating*) de Romana (1985, 1993) que fue desarrollada como una modificación del sistema *RMR* (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1973, 1979, 1989) para la aplicación en taludes. El sistema *Q-Slope* ha sido desarrollado por Bar y Barton (2017) para suplementar el sistema *NGI Q* (Barton, Lien y Lunde, 1974), extensamente utilizado para caracterizar rocas expuestas, sondajes, y la construcción de túneles; el análisis cinemático se realiza mediante el uso de proyecciones estereográficas que predicen los potenciales mecanismos de falla (planar, cuña y/o volcamiento o “*toppling*”) (Basahel y Mitri, 2017) a partir del procesamiento de orientaciones extraídas del software STEORENET. Finalizando la investigación con la presentación de un mapa de peligro de la península de Hualpén, extrapolando la información de zonas aleañas realizadas por el equipo de Proyecto “NUCLEO” con el software QGIS.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Taludes y laderas

Talud corresponde a cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que adopta permanentemente una estructura de suelo, roca o ambas. Cuando la superficie inclinada se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina ladera; en cambio, cuando se produzca de forma artificial, se denomina talud (Inostroza, 2017). Estas a lo largo de los años pueden fallar de forma imprevista, debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua, cambios de resistencia, meteorización o factores antrópicos o natural que modifiquen su estado (Suárez, 1998).

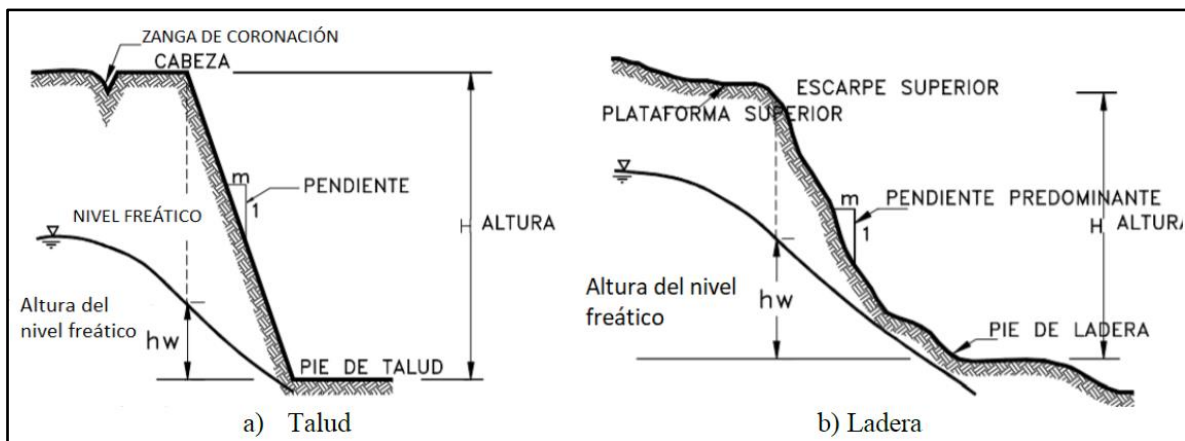


Figura 1: Composición de un a) Talud y b) Ladera (Modificado de Suárez, 1998).

2.2. Movimiento en masa

Los movimientos en masa o *landslide* en inglés, consisten en la movilización cuesta abajo de materiales de suelo o roca, principalmente producto de la gravedad (Cruden & Varnes, 1996). La velocidad del movimiento dependerá de las condiciones del medio, cantidad de material y el tipo de movimiento desencadenado (Figura 3) (Highland & Bobrowsky, 2008).

Las clasificaciones de los movimientos en masa han tenido diversas propuestas, las mejores aceptadas en la sociedad científica corresponden a Varnes (1978), Hauser (1993) y Cruden & Varnes (1996). Actualmente la más utilizada en literatura científica corresponde a la clasificación binominal de Cruden & Varnes (1996), donde agrupa al tipo de movimiento con el tipo de material. Los tipos de movimientos (Figura 3) corresponden: a) caída, b) volcamiento, c) deslizamiento, d) extensión lateral y e) flujo; Estos se relacionan a su vez con el tipo de material, siendo roca o suelo.

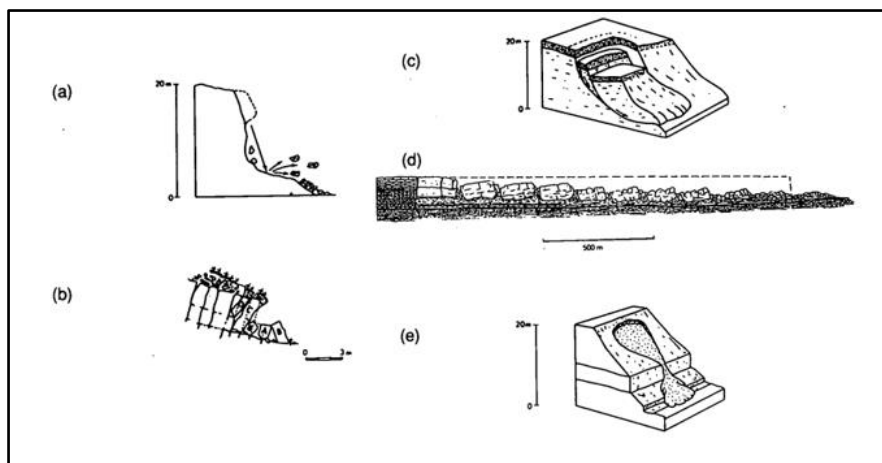


Figura 3: Tipos de movimiento en masa: a) Caída, b) Volcamiento, c) Deslizamiento, d) Extensión lateral y e) Flujo (Modificado de Cruden & Varnes, 1996).

2.3. Macizo rocoso

Macizo rocoso es aquella matriz de roca presente en la naturaleza afectada por una serie de planos de discontinuidad o debilidad, estando separadas la masa de roca en bloques (González de Vallejos et al., 2002). La naturaleza discontinua de los conjuntos rocosos implica un comportamiento anisótropo y heterogéneo, es decir las propiedades mecánicas y físicas varían a lo largo del macizo rocoso.

La descripción y caracterización de los macizos rocosos es una labor necesaria en todos los estudios de ingeniería geológica, cuyo objetivo sea evaluar el comportamiento geotécnico de los materiales rocosos. En la descripción se deben incluir todos los aspectos y parámetros que puedan ser observados, deducidos y medidos en los afloramientos rocosos (González de Vallejos et al., 2002). Estos datos son recolectados en cada estación geomecánica por parámetros para describir discontinuidades, estas corresponden a una ruptura de origen geológico en la continuidad de un cuerpo de roca sin desplazamiento visible (ISRM, 1978).

Las discontinuidades forman un grupo de uniones paralelas denominadas familias, estas se interceptan formando un sistema de familias de discontinuidades; las separaciones pueden estar abiertas, rellenas o cerradas, frecuentemente formadas paralelas a los planos de estratificación, foliación y hendiduras (ISRM, 1978). Los 10 parámetros para describir las discontinuidades y macizos rocosos según la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas e Ingeniería de Rocas (ISRM) son: 1) Orientación, 2) Espaciamiento, 3) Persistencia, 4) Rugosidad, 5) Resistencia a la compresión, 6) Abertura, 7) Material de relleno, 8) Filtración, 9) Número de familias, 10) Tamaño de bloque.

La resistencia de la matriz rocosa puede ser estimada en el afloramiento a partir de sencillos ensayos de campo, como ensayo de carga puntual o el martillo Schmidt (Tabla 1). El ensayo de carga puntual permite correlacionar una estimación de la resistencia de la roca a compresión simple. El Martillo Schmidt mide la resistencia al rebote de una superficie rocosa, que se correlaciona con la resistencia a compresión simple (González de Vallejos et al., 2002).

Tabla 1: Clasificación base de la **resistencia de la roca** (Modificado de González de Vallejos et al., 2002).

Resistencia a compresión simple (MPa)	Descripción
1 - 5	Muy blanda
5 - 25	Blanda
25 - 50	Moderadamente dura
50 - 100	Dura
100 - 250	Muy dura
> 250	Extremadamente dura

El comportamiento mecánico del macizo rocoso y su mecanismo de falla están condicionados por el número de familias de discontinuidades y su orientación (figura 4). La intensidad o grado de fracturación y tamaño de los bloques estarán determinados por el número de familias de discontinuidades y por el espaciamiento de cada uno de ellos (González de Vallejos et al., 2002).

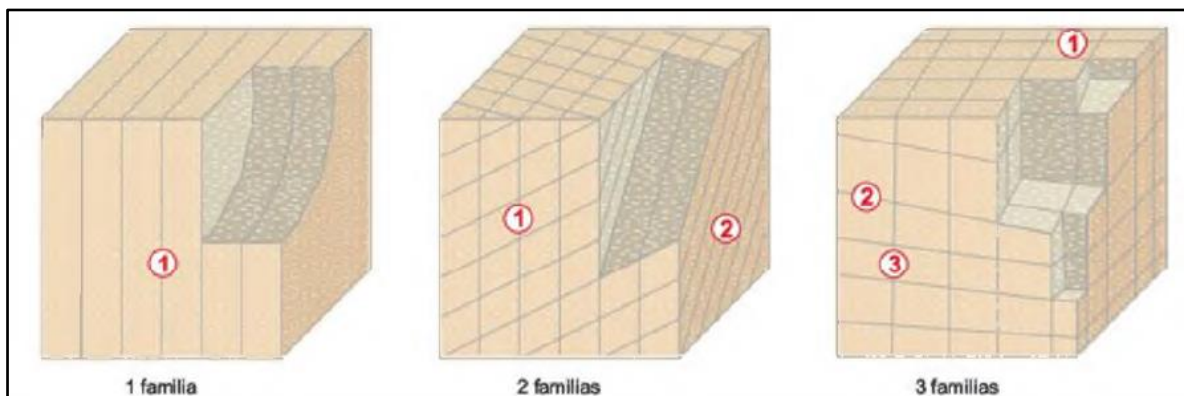


Figura 4: Representación del número de familias mediante bloques (Modificado de González de Vallejos et al., 2002).

La evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso se realiza por observación directa del afloramiento y comparación con los índices estándares descritos a continuación (Tabla 2).

Tabla 2: Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso (Modificado de ISRM, 1981).

Grado de meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No aparecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto o transformado en suelo.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto o transformado en suelo.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto o transformado en suelo. Se ha destruido la estructura original y la fábrica del material.

2.3.1 Martillo Schmidt

Este instrumento proporciona de forma rápida y económica la estimación de las propiedades de resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de materiales rocosos mediante ensayos no destructivos en condiciones de laboratorio, como “in situ”. El martillo Schmidt consta de un pistón cargado por un resorte que se libera cuando es presionado contra una superficie, el impacto transfiere la energía al material. Esta energía dependerá de la dureza (o penetración de impacto) de la roca (Aydin & Basu, 2005).

En la caracterización de macizos rocosos se utilizan dos tipos de martillo comúnmente, la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas e Ingeniería de Rocas (Aydin, 2009) los describen como: tipo N y tipo L, con energías de impacto de 2,207 Nm y 0.735 Nm respectivamente, donde se señala que estos deben ser utilizados con precaución cuando el UCS del material rocoso o paredes de discontinuidades están fuera del rango de 20 – 150 MPa. Los bloques de roca deben superar los 100 mm de grosor o testigos de sondaje de tamaño T2 (≥ 84 mm) para el martillo tipo N, y el martillo tipo L sondaje de tamaño NX ($\geq 54,7$ mm). La superficie ensayada o muestras deben estar intactas (libre de agrietamiento visible) y petrográficamente uniformes.

La normalización del valor de rebote (R) del martillo Schmidt con dirección de impacto horizontal se presenta en la Figura 5, donde esta relación es aplicable in situ y en cualquier dirección de prueba (Aydin, 2009).

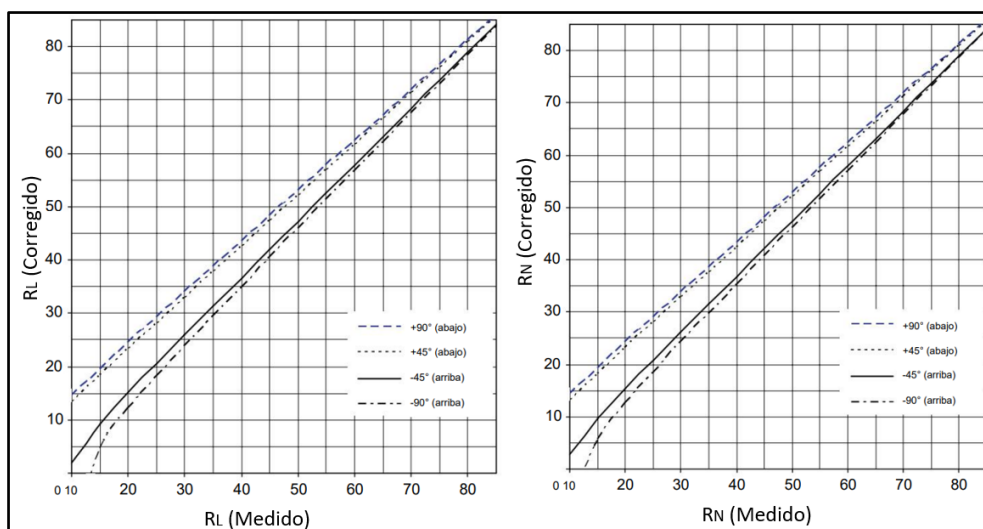


Figura 5: Normalización de los valores de rebote obtenidos por martillo Schmidt tipo L y N (Ángulos positivos y negativos se refieren a posiciones hacia abajo y hacia arriba del martillo Schmidt, respectivamente) (Modificado de Aydin, 2009).

La resistencia a la compresión simple del talud será estimada a partir del promedio del 50% superior de las 20 medidas obtenidos por el martillo Schmidt y la densidad de roca respectiva al talud (Figura 6) (ISRM, 1978). Además, se recomienda tener precaución de los revestimientos delgados de minerales que son bastantes persistentes sobre una superficie determinada, éstos reflejarán una estimación del macizo rocoso errónea.

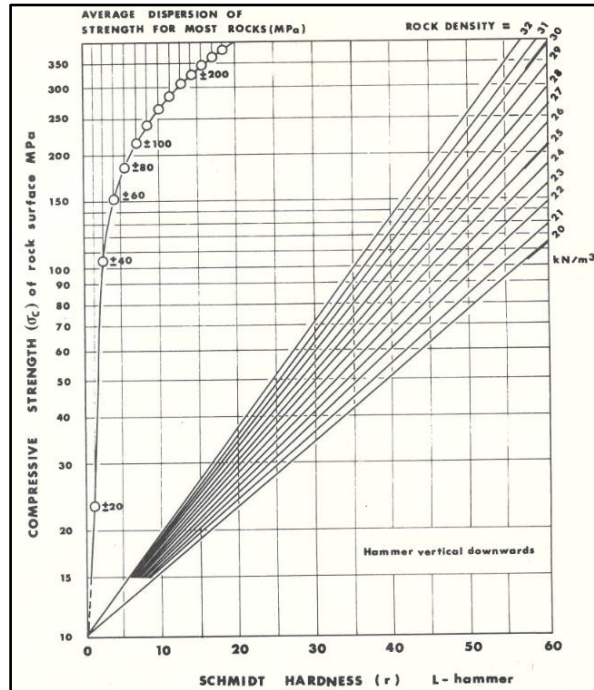


Figura 6: Correlación para martillo Schmidt tipo L, que relaciona la densidad de la roca, la resistencia a la compresión simple y el número de rebote. (Extraído de ISRM, 1978).

2.3.2 Rock Quality Designation (RQD)

Desarrollado por Deere (1964) es un índice para la evaluación de la calidad de la roca de forma cuantitativa, y está definido como el porcentaje de recuperación de un testigo de roca de longitud mínima 100 mm o mayor en el eje axial. La fórmula viene dada por (1):

$$RQD = \frac{\text{piezas del testigo} \geq 10 \text{ cm}}{\text{largo total del testigo}} \times 100\% \quad (1)$$

La Tabla 3 muestra la descripción de la calidad de la roca según el *RQD* obtenido.

Tabla 3: Calidad de la roca según índice *RQD* (Modificado de Deere, 1988).

<i>RQD</i>	Descripción de la calidad de la roca
0 – 25%	Muy pobre
25 – 50%	Pobre
50 – 75%	Razonable
75 – 90%	Buena
90 – 100%	Excelente

El índice *RQD* es un parámetro práctico para la descripción de los testigos de roca, pero no es suficiente para describir un macizo rocoso de forma adecuada (Bieniawski, 1984).

Según La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas e Ingeniería de Rocas (*ISRM*) (1978), uno de los métodos indirectos para obtener el índice *RQD* es definido por (2):

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad (2)$$

Donde J_v es el índice de discontinuidades por metro cúbico, definido por el número de discontinuidades que se intersecan en un volumen de 1 m^3 (3):

$$J_v = \sum_{i=1}^J \left(\frac{1}{S_i} \right) \quad (3)$$

S_i es el espaciamiento promedio en metros para el i -ésimo familia de discontinuidad y J es el total de familias de discontinuidades, sin considerar discontinuidades aleatorias. Las discontinuidades aleatorias con espaciamientos menores a 10m, no afectarán notablemente el valor de J_v (ISRM, 1978).

2.4 Clasificaciones Geomecánicas

2.4.1 Rock Mass Rating (RMR) (Bieniawski, 1989)

Desarrollado por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989. El *RMR* constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite relacionar índices de calidad con los siguientes parámetros geotécnicos: a) Resistencia a la compresión simple, b) Grado de fracturación en términos del *RQD*, c) Espaciamiento de las discontinuidades, d) Condiciones de las discontinuidades y e) Condiciones hidrogeológicas (Figura 7).

El índice de calidad del *RMR* se utiliza generalmente para la caracterización de macizos rocosos en taludes, excavaciones y túneles, este varía de 0 a 100 (Tabla 4). Para su aplicación es necesario dividir el macizo en tramos que presenten características geológicas más o menos uniformes de acuerdo con lo observado en campo (González de Vallejos et al., 2002).

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1
		Puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 %-100 %	75 %-90 %	50 %-75 %	25 %-50 %	< 25 %		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta				
	Puntuación	6	5	3	1	0			
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		

Figura 7: Clasificación geomecánica *RMR*, parámetros de clasificación. (Modificado de Bieniawski, 1989 en González de Vallejos et al., 2002).

Tabla 4: Clasificación del macizo rocoso determinado de las puntuaciones totales (Modificado de Bieniawski, 1989)

Puntuación	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	< 21
Clase	I	II	III	IV	V
Descripción de calidad	Roca muy buena	Roca buena	Roca aceptable	Roca pobre	Roca muy pobre

2.4.2 Método *Rock Mass Quality* (*NGI Q*) (Barton et al., 1974)

Este método ha sido desarrollado por Barton, Lien y Lunde en 1974 para la evaluación de la estabilidad de taludes rocosos y diseño de soporte de túneles. El valor numérico de Q oscila entre 0,001 para una calidad excepcionalmente mala y hasta 1000 para una calidad excepcionalmente buena (Tabla 5). Los parámetros para estimar el macizo rocoso son: 1) Designación de la calidad de la roca RQD , 2) Coeficiente asociado al número de discontinuidades (J_n), 3) Coeficiente asociado al grado de alteración de las estructuras (J_a), 4) Coeficiente de rugosidad de las discontinuidades (J_r), 5) Coeficiente de influencia del agua (J_w) y 6) Coeficiente de influencia de las tensiones en el macizo rocoso (SRF).

La fórmula para estimar el *NGI Q* viene dada por (4):

$$NGI Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (4)$$

Tabla 5: Clasificación de *Rock Mass Quality* (*NGI Q*) (Barton et al., 1974)

Q	Calificación
1000-400	Excepcionalmente bueno
400-100	Extremadamente bueno
100-40	Muy Bueno
40-10	Bueno
10-4	Regular
4-1	Malo
1-0,1	Muy malo
0,1-0,01	Extremadamente malo
0,01-0,001	Excepcionalmente malo

2.4.3 Slope Mass Rating (*SMR*) (Romana, 1985)

La clasificación de taludes a través del índice *SMR* se obtiene del índice *RMR* (Bieniawski, 1989) básico al cual se le suman factores de ajustes en función de la orientación de las discontinuidades (tres subfactores $F_{1,2,3}$) y un cuarto factor de excavación (F_4), que depende del método utilizado siendo un valor fijado empíricamente. La fórmula para estimar el método viene dada por (5):

$$SMR = RMR_b + (F_1 F_2 F_3) + F_4 \quad (5)$$

Los factores de ajuste definidos según Romana *et al.* (2001) están dados por:

F_1 : Depende del paralelismo entre el rumbo de las discontinuidades y la cara del talud. Este varía entre 1.00 (cuando ambos son paralelos) y 0.15 (cuando el ángulo entre ambos rumbos resulta mayor de 30° y la probabilidad de falla es muy baja), donde α_j y α_s es la dirección de buzamiento de la discontinuidad y del talud.

F_2 : Depende del buzamiento de la discontinuidad en la rotura plana, donde señala que “En cierto sentido es una medida de la probabilidad de la resistencia a esfuerzo cortante de la junta”. El factor varía entre 1.00 (para discontinuidades con buzamiento mayor a 45°) y 0.15 (para discontinuidades con buzamiento inferior a 20°) donde β_j es el buzamiento de la discontinuidad. Para el caso de falla por *toppling* F_2 resulta igual a 1.00.

F_3 : Es la relación entre el buzamiento de la discontinuidad y el talud, donde se mantienen los valores propuestos por Bieniawski (1979) que son siempre negativos.

F_4 : factor que depende del método de excavación.

La Tabla 6 resume los factores de ajuste según Romana (1985), mientras que las expresiones ajustadas pueden ser encontradas en Romana et al. (2001).

Tabla 6: Factores de ajuste para el método *SMR* (Modificado de Romana, 1985).

Tipo de Falla	Ángulos auxiliares	Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable	
P	A	$ \alpha_j - \alpha_s $	> 30	$30 - 20^\circ$	$20 - 10^\circ$	$10 - 5^\circ$	
T		$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
W		$ \alpha_i - \alpha_s $					
P/T/W	F_1		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P/W	B	$ \beta_j $ o $ \beta_i $	$< 20^\circ$	$20 - 30^\circ$	$30 - 35^\circ$	$35 - 45^\circ$	$> 45^\circ$
P/W	F_2		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T			1.00				
P	C	$\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	$10 - 0^\circ$	0°	$0 - (-10^\circ)$	$< (-10^\circ)$
W		$\beta_i - \beta_s$					
T		$\beta_j + \beta_s$	$< 110^\circ$	$110 - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-
P/T/W	F_3		0	-6	-25	-50	-60
Método de excavación F_4							
Talud natural			+15	Voladura o mecanizada		0	
Precorte			+10	Voladura deficiente		-8	
Voladura suave			+8				

P: falla planar; T: falla por volcamiento o *toppling*; W: falla en cuña.

Como sugiere Romana et al. (2001), para el caso de diferentes sets de discontinuidades en el talud, se debe calcular el índice *SMR* para cada familia, y tomar el valor más desfavorable, esto también aplica en el caso de flujos de agua irregulares o meteorización parcial de la roca.

Las clases de estabilidad definidas por Romana (1993) se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Clases de estabilidad para el método *SMR* (Modificado de Romana, 1993).

Clases de estabilidad					
Clase	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Descripción	Muy pobre	Pobre	Aceptable	Bueno	Muy bueno
Estabilidad	Completamente inestable	Inestable	Parcialmente inestable	Estable	Completamente estable

*Se omite el tipo de soporte.

2.4.4 Método *Q-Slope* (Bar y Barton, 2017)

Este método ha sido desarrollado por Bar y Barton (2017) para la evaluación de la estabilidad de taludes rocosos, como una extensión al método *NGI Q* (Barton et al. 1974). Los parámetros que corresponden a: 1) Designación de la calidad de la roca *RQD*, 2) Coeficiente asociado al número de discontinuidades (J_n), 3) Coeficiente asociado al grado de alteración de las estructuras (J_a), 4) Coeficiente de rugosidad de las discontinuidades (J_r) se mantienen intactos en el método *Q-Slope*, aunque se agrega un factor de orientación de discontinuidades que formen potenciales cuñas a la proporción J_r/J_a , según la orientación y condición de las discontinuidades más desfavorables. En este método se agrega el parámetro llamado J_{wice} que toma en cuenta el efecto de la exposición a factores climáticos y ambientales, como lluvias intensas con efectos erosivos y acumulación de hielo. Además, se modifica el factor *SRF*, ahora llamado SRF_{slope} que se obtiene al usar las condiciones más desfavorables de los factores: SRF_a para las condiciones actuales o esperadas de la superficie del macizo con respecto a la meteorización; SRF_b para esfuerzos tensionales y resistencia; SRF_c condición de las discontinuidades principales.

La fórmula para estimar el Q -Slope viene dada por (6):

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right)_0 \times \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (6)$$

El índice de la calidad de la roca puede considerarse de igual forma al caso del método $NGI Q$ (Barton *et al.* 1974), donde los tres términos indican:

1. Tamaño de bloque: (RQD/J_n)
2. Resistencia al corte: el caso menos favorable de (J_r/J_a) o el promedio de la resistencia al corte en el caso de cuñas $(J_r/J_a)_1 \times (J_r/J_a)_2$
3. Factores externos y resistencia: (J_{wice}/SRF_{slope})

Añadiendo el O -factor la fórmula para estimar el Q -Slope está dada por (7):

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a} \times O - factor \right)_0 \times \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (7)$$

El O -factor depende de la disposición desfavorable de las familias de discontinuidades que generan falla por cuña, planar o *toppling*. Este valor interpreta las familias más perjudiciales para la estación geomecánica.

El sistema de clasificación Q -Slope permite obtener el máximo ángulo de estabilidad del talud sin necesidad de un soporte e independiente de la altura que alcance, dada por la siguiente fórmula (8):

$$\beta = 20 \log(Q_{slope}) + 65^\circ \quad (8)$$

2.5 Análisis Cinemático

La estabilidad de los taludes rocosos a menudo está influenciada por la geología estructural, referida a las rupturas naturales en la roca, como diaclasas y fallas, estas son denominadas discontinuidades. La importancia de las discontinuidades es indicar los planos de debilidad del macizo rocoso, por lo tanto, preferentemente tiende a fallar a lo largo de estas superficies (Wyllie, 2017).

El análisis cinemático permite identificar posibles modos de falla en taludes y laderas. La proyección estereográfica es la herramienta que permite representar y analizar las orientaciones de las discontinuidades presentes. Así, una vez que los conjuntos de discontinuidades, discontinuidades aisladas importantes y fallas se encuentran identificadas, se puede visualizar su densidad de polos. Los polos son la representación de un plano en forma de un único punto, son los medios más convenientes para examinar la orientación de un gran número de discontinuidades (Wyllie, 2017).

Wyllie (2017) define las fallas más frecuentes en taludes de roca como se muestra en la Figura 8:

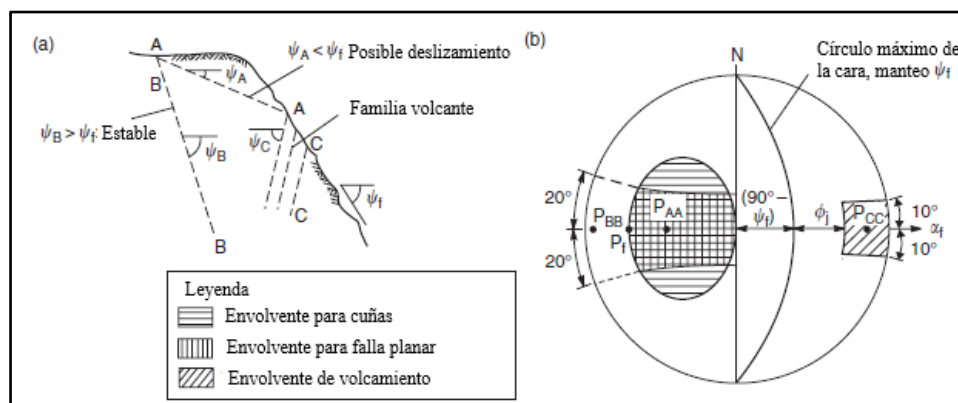


Figura 8: Análisis cinemático de bloques en talud de roca: a) familias de discontinuidades; y b) envolventes de falla en estereograma (Modificado de Wyllie, 2017).

Falla Planar: Se representa en la Figura 8a), un bloque de roca potencialmente inestable fallando por el segmento A-A, el cual su buzamiento es un ángulo más plano que el ángulo de la cara del talud ($\psi_A < \psi_f$).

El deslizamiento planar no es posible si la dirección de buzamiento de la familia de la discontinuidad difiere de la dirección de buzamiento de la cara del talud por más de 20° , por ende, el bloque será estable si $|\alpha_A - \alpha_f| > 20^\circ$. Cumpliendo esta condición, habrá mayor espesor de roca entre bloques, lo que tendrá resistencia suficiente ante la falla. En el estereograma de la Figura 8b) muestra esta restricción como dos líneas que definen la dirección de buzamiento de $(\alpha_f + 20^\circ)$ y $(\alpha_f - 20^\circ)$, designan los límites laterales de la envolvente para falla planar.

La falla en cuña es un deslizamiento que ocurre a lo largo de la línea de intersección de dos discontinuidades, en este caso el polo de la línea de intersección es trazada en el estereograma y el deslizamiento es posible si el polo cae dentro del área de falla, es decir, $(\psi_i < \psi_f)$. La dirección de deslizamiento es menos restrictiva que en el caso de falla planar, debido a que dos planos con un rango amplio de orientaciones forman la superficie de falla. La envolvente de falla para la línea de intersección como se muestra en Figura 8b), es más amplia que la envolvente para el caso de falla planar.

Para que ocurra una falla por volcamiento, la dirección de buzamiento de las discontinuidades que buza hacia la cara del talud debe estar cercana a los 20° de la dirección de buzamiento de la cara para que se formen “planchones” paralelos a la cara, como se muestra en la Figura 8a) segmento A-C y C-C. Se consideran dos tipos de falla por *toppling*: directo, ocurre cuando la separación de las familias de discontinuidades forma una escalera ascendente (Goodman & Bray, 1976); flexural, los estratos sufren fracturas parciales, generando bloques pequeños y desordenados.

3. DESCRIPCIÓN SITIO DE ESTUDIO

3.1 Geomorfología

La península de Hualpén se localiza en el litoral de la Región del Biobío, Centro-Sur de Chile. Este se conforma por el macizo peninsular de Hualpén (Vásquez, 2013) presentando un relieve irregular producto de la erosión marina, considerados desde abruptos acantilados a llanuras de sedimentación marina y fluvial (Figura 9). En la costa Oeste de la península se hallan pequeñas planicies que han sido utilizadas para la localización de caletas pesqueras (Torres, 2018).

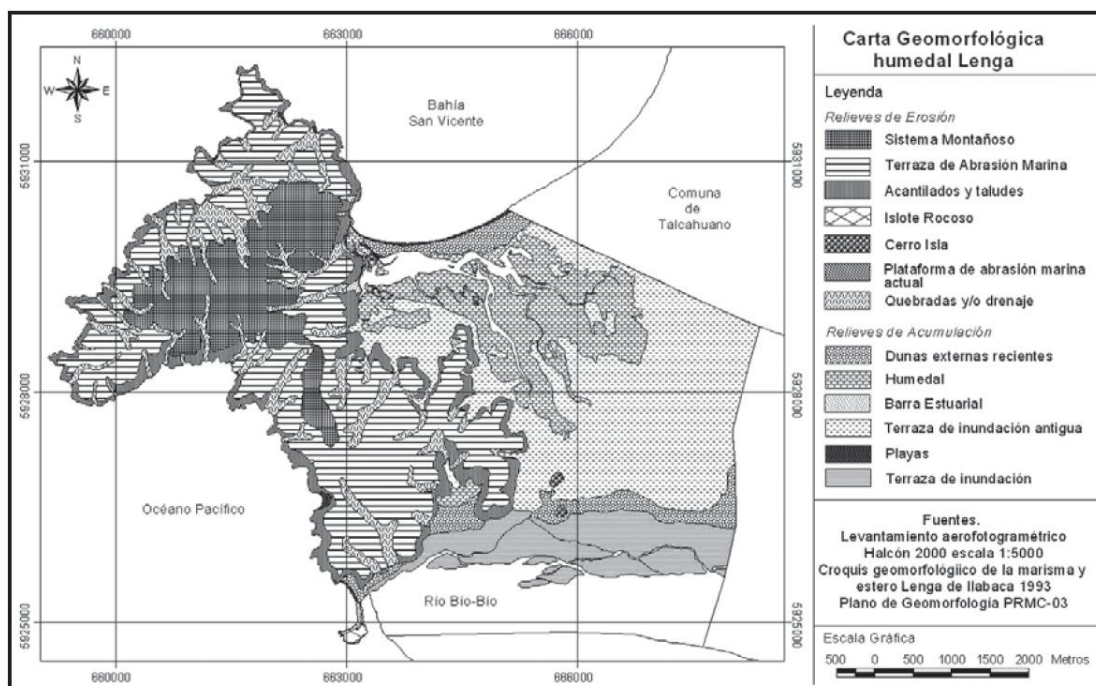


Figura 9: Carta geomorfológica de la Península de Hualpén (Extraído de Vásquez, 2013).

3.2 Geología

En la zona de estudio, ubicada al norte de la Península de Hualpén y al noreste de Caleta Lengua se extienden taludes de roca granítica pertenecientes a la Unidad Hualpén (Figura 10), definidos por Creixell el año 2001 como monzogranito leucocrático de grano medio con cuarzo, ortoclasa perítica, plagioclasa, biotita y en menor proporción mica blanca, turmalina y cordierita, esta última formando intercrecimiento con cuarzo. Al sureste de la Península de Hualpén se encuentra el basamento metamórfico paleozoico de la Cordillera de la Costa (Figura 10), segmentados en la serie Oriental y Occidental. La serie Occidental está compuesta por esquistos de cuarzo, feldespatos, micaesquistos, esquistos verdes (metabasitas) y serpentinitas (Aguirre et al., 1972).

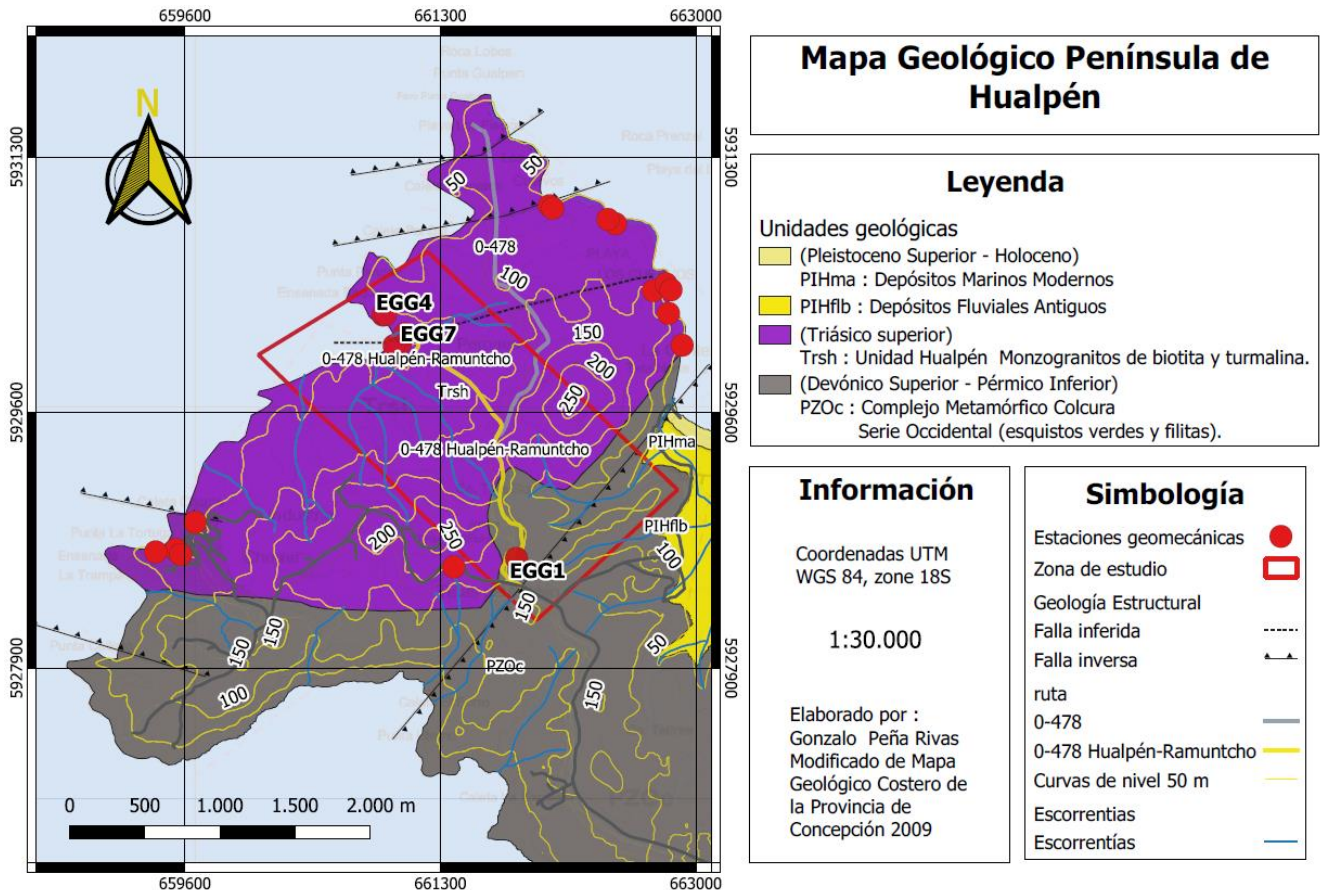


Figura 10: Mapa geológico de la Península de Hualpén (Modificado de mapa geológico del sector costero Provincia de Concepción, 2009).

3.3 Clima y vegetación

La zona de estudio se localiza en una transición entre los climas mediterráneo cálido de la zona central y templado húmedo del sur de Chile (Torres, 2018). La temperatura anual alcanza 12,7 °C y la precipitación media anual que alcanza la Península de Hualpén es de 1328,8,8 mm (Municipalidad de Hualpén, 2018), lo que se debe a la humedad relativa elevada sobre el 80% que alcanza por ubicarse frente al Océano Pacífico.

La vegetación que predomina en el sitio de estudio está compuesta por un abundante bosque hidrófilo destacado por peumos, olivillo, litre, boldo y en menor presencia el canelo, ulmo y laurel (Municipalidad de Hualpén, 2018). Además, en las quebradas que son zonas de escurrimientos estacionales en forma de arroyos activados en época invernal se desarrollan lianas, epifitas y arbustos de rosa mosqueta y colihues.

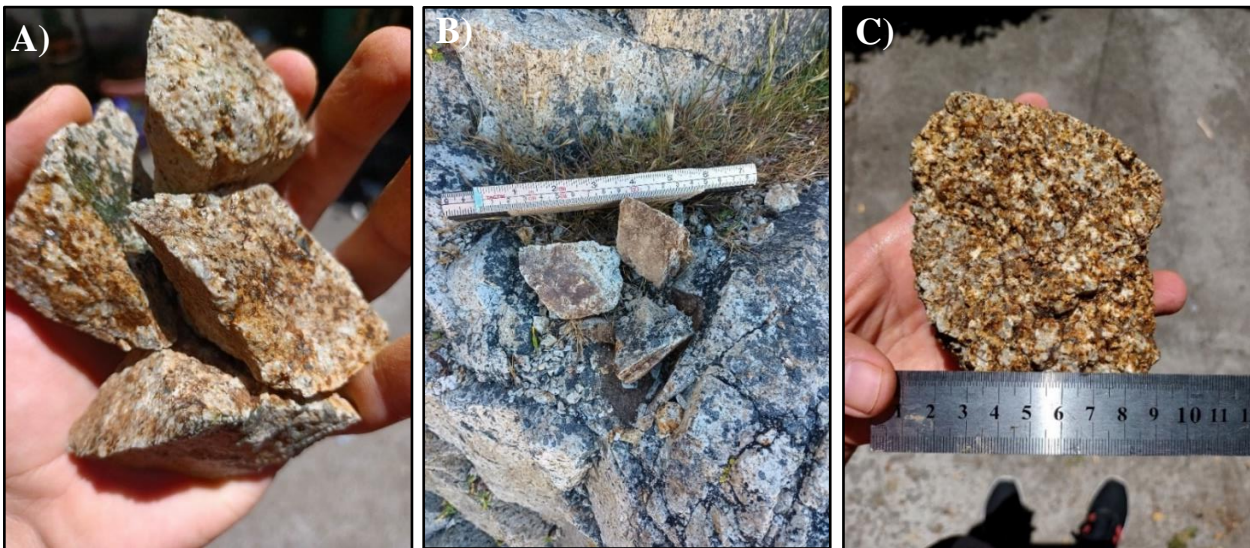
3.4 Pendiente y meteorización

La zona de investigación se sitúa en Caleta Perone y sus alrededores, esta se localiza en la ladera de exposición noreste, con pendientes entre los 10° y 20°, también existe pendientes sobre la máxima mencionada donde no se registran viviendas (Municipalidad de Hualpén, 2018).

La meteorización de una roca se debe al constante cambio que sufre el ambiente (Tarbuck & Lutgens, 1999), esta puede ser física y química; la meteorización física corresponde a una fragmentación o desintegración de la roca, en cambio, la meteorización química es una alteración o descomposición de ella.

El proceso natural de meteorización transforma las rocas y minerales expuestos al agua y aire, en nuevos productos químicos (minerales arcillosos) (Naranjo y otros, 2006). Esta característica se desarrolla principalmente en suelos provenientes de rocas graníticas, generando un material conocido como “maicillo”.

La zona de investigación (Figura 10) compuesta mayoritariamente de monzogranitos de biotita y turmalina en el sector costero, posee una meteorización moderada y alta según lo establecido en terrero por la normativa de *ISRM, 1978* (Tabla 2) (Fotografía 1).



Fotografía 1: (A) y (B) Muestran monzogranitos de Hualpén moderadamente meteorizado. (C) Muestra monzogranito de Hualpén altamente meteorizado.

3.5 Remoción en masa

Según lo señalado por Naranjo y otros, 2005, el principal factor pasivo o latente que causa las remociones en masa en la zona del Biobío es la extensiva presencia de un relieve con una potente cubierta de material meteorizado, cuyo espesor varía entre 2 a 8 metros.

La remoción en masa está asociada a dos procesos morfogenéticos, estos son vinculados a la presencia de laderas inestables. Los que corresponden a factores litológicos (grado de alteración de la roca y cobertura vegetal) y morfométricos o estructurales (sismos) (Municipalidad de Hualpén, 2018). Sin embargo, los factores climáticos se destacan las lluvias intensas que producen en su mayoría flujos y deslizamientos.

SERNAGEOMIN realizó un estudio el año 2010 basado en los principales factores que intervienen en la inestabilidad de las laderas; geología, pendiente y remociones en masa observadas en terreno. En la comuna de Hualpén se identifica dos niveles de amenaza: alta y media (Figura 11A). La amenaza alta de remoción en masa está asociada a los acantilados costeros de la Península de Hualpén vinculadas a la zona alta, donde producto del terremoto del 27/F de 2010, se observaron procesos de remoción en masa.

También, la Universidad del Bío-Bío (UBB) realizó una modelación Multi-Criterio (EMC) de la susceptibilidad a movimientos en masa (Municipalidad de Hualpén, 2018). Las variables consideradas son: geología, clima, sismos, pendientes, exposición de laderas y cobertura vegetal. Así, el resultado final expuesto reconoce niveles de susceptibilidad baja, media y alta (Figura 11B).

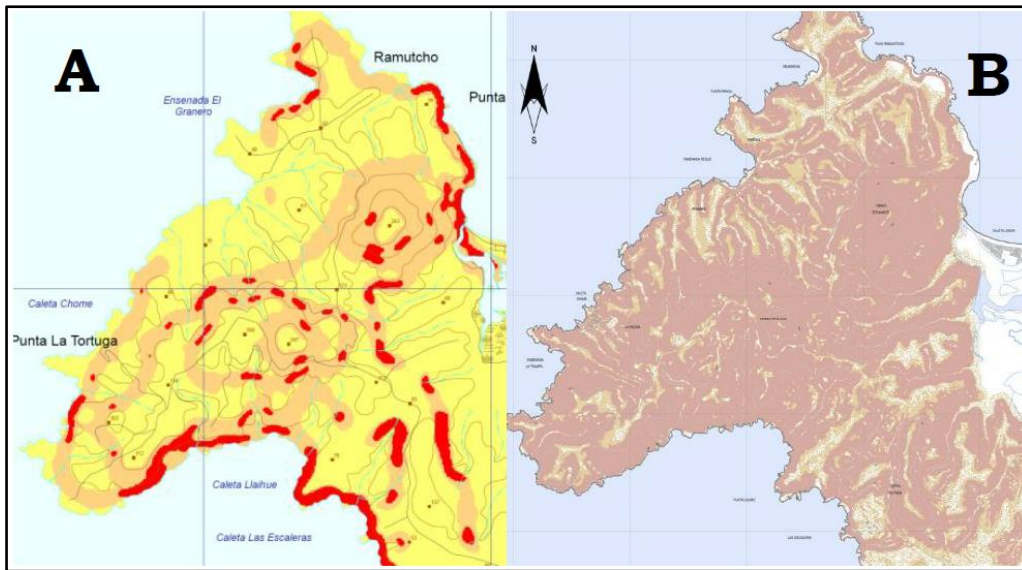


Figura 11: Comparación de mapas para procesos de remoción en masa para la Península de Hualpén. (A) Mapa SERNAGEOMIN. (B) Mapa Universidad del Bío-Bío. (Extraído de Municipalidad de Hualpén, 2018).

4. METODOLOGÍA

4.1 Estaciones geomecánicas

La zona de estudio se emplaza en la Península de Hualpén, específicamente en las cercanías de Caleta Perone y su ruta de acceso principal 0-478 Hualpén-Ramuntcho. La descripción de cada talud de estudio se basa en la clasificación *ISRM, 1978* resumida en Wyllie (2017). El trabajo en terreno fue dividido en dos etapas preliminares, reconocimiento de potenciales amenazas de laderas y taludes (Figura 12), y recolección de parámetros geotécnicos, geológicos y geomecánicos de cada estación geomecánica.

Mapa ubicación de estaciones geomecánicas

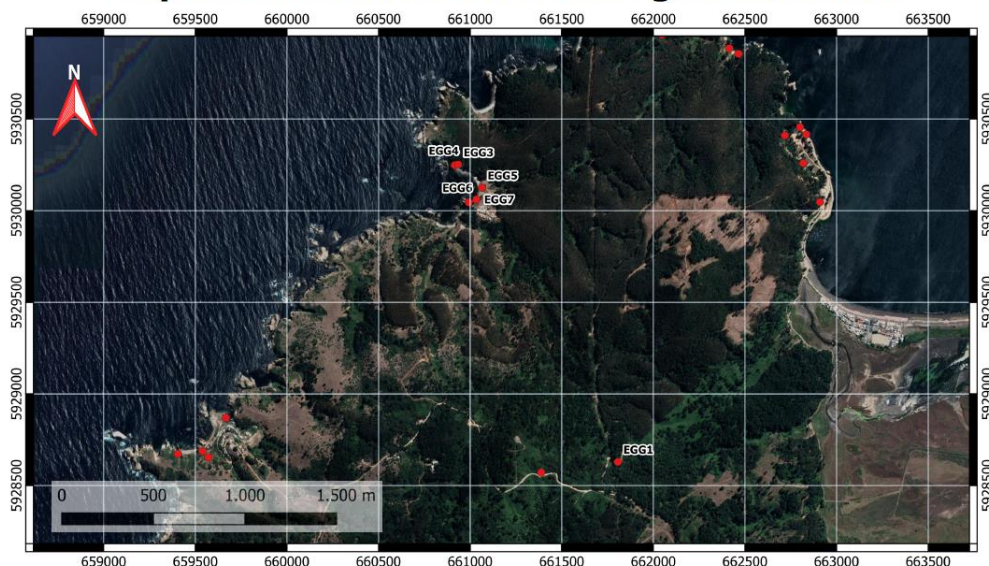


Figura 12: Mapa de ubicación de estaciones geomecánicas en la Península de Hualpén.

Los parámetros extraídos de cada estación geomecánica corresponden a resistencia de compresión simple, calidad de macizo rocoso, orientación y buzamiento del talud o ladera junto con sus respectivas familias de discontinuidades y los datos necesarios para aplicar de forma adecuada las clasificaciones *RMR*, *NGI Q*, *SMR* y *Q-Slope*.

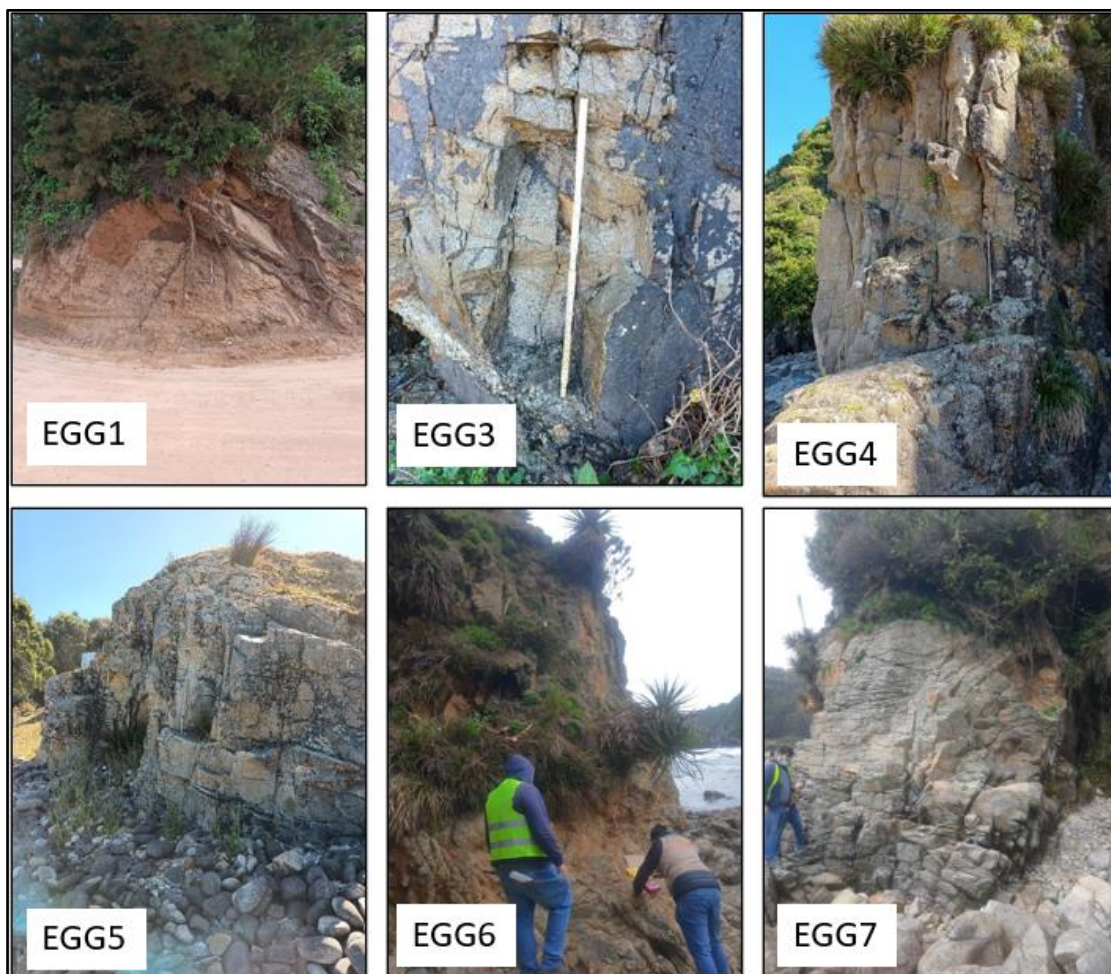
Los materiales utilizados en esta investigación fueron proporcionados por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de la Santísima Concepción y profesor guía José Miguel Montenegro. Las herramientas consisten en: martillo Schmidt, brújula geomecánica, rugosímetro, cinta métrica, regla milimétrica, GPS GARMIN y martillo geológico (Figura 13).



Figura 13: Materiales utilizados en investigación, brújula geomecánica, rugosímetro, cinta métrica y regla milimétrica.

4.2 Reconocimiento de estaciones geomecánicas

La zona de estudio abarca el sector noroeste de la Península de Hualpén, donde se realizan seis estaciones geomecánicas en las cercanías de Caleta Perone y una en la ruta principal 0-478 Hualpén-Ramuntcho.



Fotografía 2: Estaciones geomecánicas evaluadas en terreno con sistemas de clasificación geomecánica.

EGG1: Coordenadas UTM 18H / 0661824 / 5928629. El talud es escogido estratégicamente, debido a su ubicación en la principal ruta que conecta Caleta Perone con la ruta 0-478 Hualpén. Además, es el único talud compuesto de roca metamórfica (Figura 9) cerca del contacto con la roca ígnea. Es un talud importante en el ámbito científico, ya que está fuertemente intervenido por un factor antrópico en el pie del talud y su meteorización es considerada de tipo IV – V (“altamente meteorizado – completamente meteorizado”) según lo señalado por ISRM, 1981 (Tabla 2). Posee 3 familias de discontinuidades.

EGG3: Coordenadas UTM 18H / 0661822 / 5923628. Es una ladera de 12 metros de altitud cubierta de óxido de magnesio casi en su totalidad, se encuentra al frente de la costa marina impactando la brisa de forma directa. Posee 3 familias de discontinuidades, 2 en forma vertical y una horizontal con una meteorización moderada (Tabla 2).

EGG4: Coordenadas UTM 18H / 0661822 / 5923628. Ladera ubicada de forma perpendicular a la costa marina y a la estación EGG3. Sin embargo, posee una meteorización tipo IV muy fácil disgregable con los dedos (Fotografía 1C). Es considerada como un monzogranito con 3 familias de discontinuidades.

EGG5: Coordenadas UTM 18H / 0660933 / 5930182. La ladera pertenece a una zona costera de uso pesquero. Cercana a ella se encuentran los botes de pesca de los residentes de Caleta Perone. Posee bloques de roca bien definidos producto de la erosión constante de la brisa marina. Se reconoce 3 familias de discontinuidades, siendo un macizo rocoso de monzogranito con meteorización moderada (fotografía 1A y 1B) que no presenta minerales de relleno.

EGG6: Coordenadas UTM 18H / 0660997 / 5930209. Emplazado al frente de la zona residencial de Caleta Perone. Posee bloques bien definidos golpeados constantemente por el oleaje de la costa marítima, siendo un monzogranito con meteorización moderada (fotografía 1A y 1B) con 3 familias de discontinuidades.

EGG7: Coordenadas UTM 18H / 0661051 / 5930110. Es escogida por ser la ladera más cerca de residencias en Caleta Perone. Sufre variación constante en el nivel del mar según horario. El macizo rocoso posee diaclasas horizontales y verticales bien marcadas producto del permanente oleaje marítimo. Es un monzogranito con meteorización moderada (fotografía 1A y 1B) con 3 familias de discontinuidades.

4.3 Análisis de datos

Los datos proporcionados por cada estación geomecánica son ordenados, promediados, y utilizados para reconocer los parámetros más desfavorables de cada familia de discontinuidad.

Las orientaciones de las familias de discontinuidades y cara de talud o ladera son obtenidas con la brújula geomecánica y trasladados a una proyección Stereonet. En él obtenemos el promedio de *dip* y *dip direction* de cada familia de discontinuidad y aplicarlo en la clasificación de macizos rocosos de taludes y laderas.

El análisis cinemático se implementó a través del software DIPS; programa de interpretación de porcentajes de rotura en las familias de discontinuidades presentes en cada estación geomecánica. El peso específico de roca utilizado corresponde a 27 KN/m^3 y un ángulo de fricción de 30° .

Los datos obtenidos por cada clasificación geomecánica en la investigación, son utilizados para generar un mapa georreferenciado de interpolaciones en el software QGIS representando sus respectivas clasificaciones. Estos resultados permiten establecer las áreas de amenaza de remoción en masa en las cercanías de Caleta Perone y complementarlo con Proyecto “NUCLEO” para toda la Península de Hualpén.

5. RESULTADOS

5.1 Martillo Schmidt

El ensayo fue realizado el 24/08/2022 con un martillo Schmidt estándar tipo L, marca PROCEQ, donde se tomaron 20 medidas según lo indicado por ISRM, 1978 y se redujo las lecturas más bajas atribuidas a la presencia de grietas ocultas. Se promedió el 50% superior de las 20 medidas y se calculó las medidas de tendencia central (mediana y moda) para expresar completamente las variaciones de dureza a escala microestructural (Tabla 8).

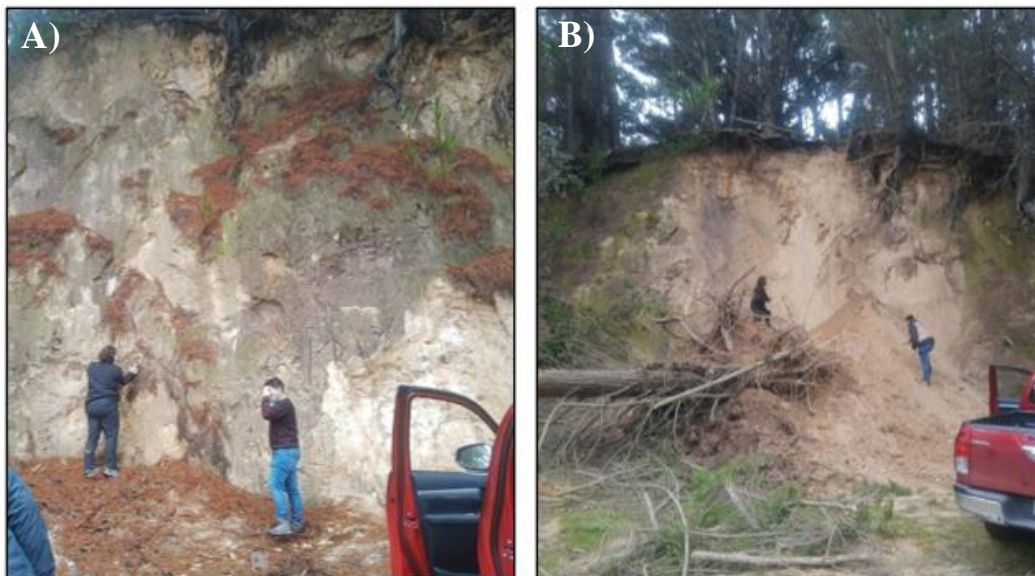
Tabla 8: Valor de rebote normalizado Martillo Schmidt tipo L (R_n) junto a su resistencia a la compresión simple correspondiente.

Estación Geomecánica	Valores del 50% más alto de Martillo Schmidt			Resistencia a la compresión simple (Mpa)
	Promedio	Mediana	Moda	
EGG1	13,6	13,8	14	18 - 22
EGG3	46,4	36,5	35,5	70 - 120
EGG4	42,5	40,5	38,5	80 - 105
EGG5	55	52	48,5	130 - 200
EGG6	44,7	35,5	33	55 - 115
EGG7	47,4	50,5	39,5	90 - 160

5.2 Orientaciones extraídas en terreno

En esta investigación se realizaron 4 salidas a terreno con el profesor tutor José Montenegro Cooper, profesor Robert King St-Onge, Profesor Mauricio Espinoza y 2 compañeros de carrera, Sebastián Antinao y Miguel Abarzúa (Fotografía 3A).

El día 9 de mayo del año 2022, se recorre la zona de estudio a cargo del profesor tutor. Se identificaron 7 potenciales taludes y laderas para realizar estaciones geomecánicas en ruta 0-478 Hualpén-Ramuntcho hacia Caleta Perone, donde el día 24 de agosto se elimina la estación EGG2 por desestabilización y caída de árbol de la coronación del talud (Fotografía 3B).


Fotografía 3: Identificación de taludes en zona de estudio.

Las orientaciones de las tres familias de discontinuidades y cara de talud o ladera fueron ajustadas a través del promedio extraído de la utilización del software Stereonet. Mostrando buzamiento (*dip*), dirección de buzamiento (*dip direction*) con incorporación de la declinación magnética respectiva, Tabla 9.

Tabla 9: Orientación de familias de discontinuidades y cara de talud o ladera de la zona de estudio.

Estación geomecánica	Familia de discontinuidad	<i>Dip direction</i> (°)	<i>Dip</i> (°)	Estación geomecánica	Familia de discontinuidad	<i>Dip direction</i> (°)	<i>Dip</i> (°)
EGG1	Familia 1	109	42	EGG5	Familia 1	326	41
	Familia 2	347	75		Familia 2	242	16
	Familia 3	179	78		Familia 3	261	75
	Cara de talud	176	69		Cara de ladera	278	44

EGG3	Familia 1	117	79	EGG6	Familia 1	021	42
	Familia 2	025	12		Familia 2	107	10
	Familia 3	334	86		Familia 3	103	66
	Cara de ladera	207	44		Cara de ladera	105	53
EGG4	Familia 1	070	42	EGG7	Familia 1	018	77
	Familia 2	103	01		Familia 2	118	10
	Familia 3	107	77		Familia 3	108	79
	Cara de ladera	111	36		Cara de ladera	115	69

5.3 Análisis Cinemático

Utilizando el software *DIPS* 6.008 se analizaron las tres formas de falla más frecuentes en macizos rocosos fracturados: falla planar, en cuña y volcamiento o *toppling*, mostradas en la Tabla 10. *DIPS* permite el reconocimiento automático de la envolvente de falla a través de la asignación de parámetros de entrada: a) buzamiento del talud (*dip*); b) dirección de buzamiento (*dip direction*) del talud; c) ángulo de fricción de las discontinuidades y d) límites laterales que se mantiene por defecto $\pm 20^\circ$.

Tabla 10: Análisis de falla más frecuentes de la zona de estudio.

Estación geomecánica	% Porcentaje que ocurra la falla			
	Falla Planar	Falla por cuña	falla por <i>toppling</i> directo	falla por <i>toppling</i> flexural
EGG1	0	44,4	24,4	90
EGG3	0	2,22	30	0
EGG4	0	0	60	20
EGG5	0	11,1	100	0
EGG6	20	11,1	100	0
EGG7	20	17,8	100	0

El análisis cinemático de las estaciones geomecánicas fue obtenido a partir de las orientaciones en terreno y considerando las respectivas familias de discontinuidades y cara de talud de cada estación. Al representar todas las familias de discontinuidades en un solo estereograma de Caleta Perone (Figura 14B), es posible establecer que son valores representativos de la Península de Hualpén (Figura 14A).

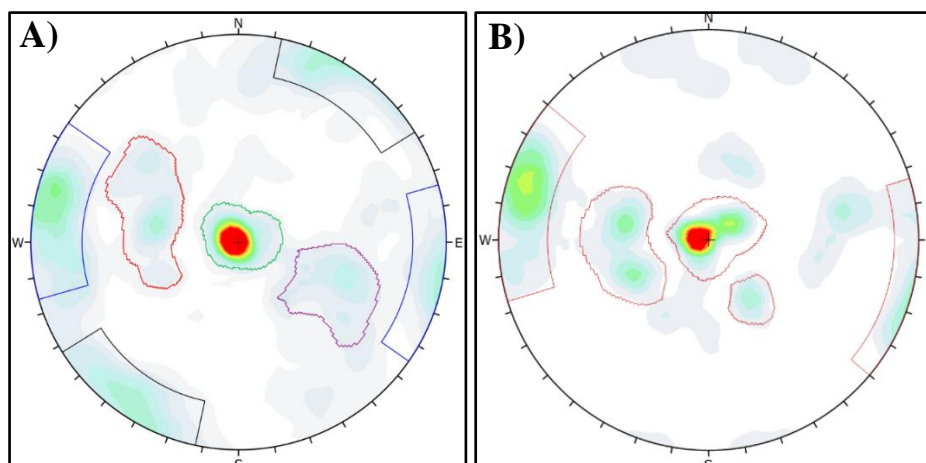


Figura 14: (A) Familias de discontinuidades de la Península de Hualpén. (B) Familias de discontinuidades de Caleta Perone.

5.4 Limitaciones de estudio

La Península de Hualpén posee dos tipos de litologías; roca ígnea y roca metamórfica (Figura 10). La mayor cantidad de estaciones geomecánicas realizadas se limita a roca ígnea en sus diferentes estados de meteorización, por lo tanto, los mapas de interpolaciones se realizan solo en la litología de rocas ígneas, logrando una litología homogénea para la Península de Hualpén.

Algunas de las estaciones geomecánicas de la zona de estudio presentan fallas visibles en su estructura, estas fueron señaladas por los profesores informantes en terreno el día 17 de enero del 2023. La presencia de una falla en una estación geomecánica puede contribuir a mostrar parámetros no representativos de la zona de estudio.

Las estaciones EGG3 y EGG4, como se observa en la Figura 15B y 15C, muestra una falla de rumbo dextral que las separa. Aproximadamente el diámetro de la falla es de 2,5m, reconociendo que presenta minerales arcillosos en su interior. La falla al presentarse entre las dos estaciones genera variación en las orientaciones extraídas en terreno, parámetros geotécnicos y toma de datos de martillo Schmidt, por consiguiente, no se consideró en los mapas de interpolación.

La Estación EGG1, es un talud compuesto por roca metamórfica presentando un grado de meteorización tipo IV – V (“altamente meteorizado – completamente meteorizado”), es de color marrón y posee foliaciones con orientación 110/42 SE como se muestra en la Figura 15A.



Figura 15: Estaciones geomecánicas no consideradas en mapas de interpolación de la Península de Hualpén. (A) Estación geomecánica EGG1. (B) y (C) Estaciones geomecánicas EGG3 y EGG4.

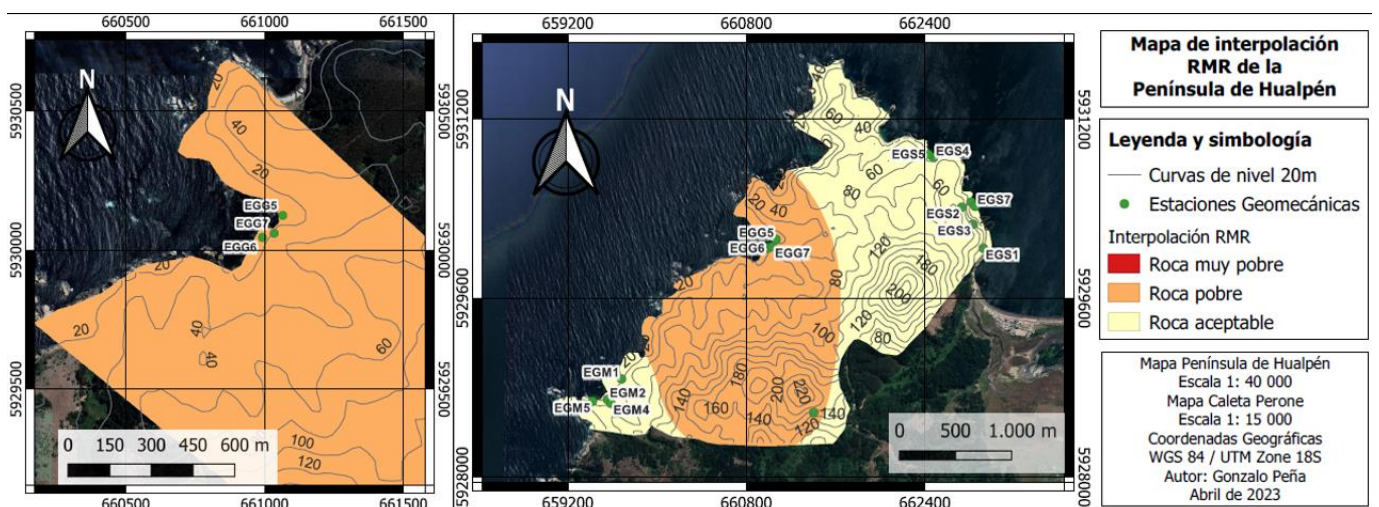
5.5 RMR

Según la clasificación propuesta por Bieniawski de 1989 (Figura 7), el índice de calidad de la zona de estudio corresponde a la Tabla 11. La clasificación *RMR* considera los siguientes parámetros geotécnicos: a) Resistencia a la compresión simple, b) Grado de fracturación en términos del *RQD*, c) Espaciamiento de las discontinuidades, d) Condiciones de las discontinuidades y e) Condiciones hidrogeológicas.

Tabla 11: Índice de calidad de RMR medido en los afloramientos de la zona de estudio.

Parámetros geotécnicos		Estaciones Geomecánicas					
		EGG1	EGG3	EGG4	EGG5	EGG6	EGG7
Resistencia de la matriz rocosa (MPa)		22	128	105	200	120	132
RQD		17,3	26,4	28,9	39,5	34,8	25,7
Separación entre diaclasas (m)		0,015	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03
Estado de las discontinuidades	Persistencia (m)	20	10	10	3	3	5
	Abertura (mm)	1,6	2	1,5	1,6	2	1,8
	Rugosidad (mm)	0,5	0,5 - 2	0,5 - 2	0,2 - 1,9	0,3 - 1,5	0,4 - 1,6
	Relleno	Blando <5mm	Blando <5mm	Blando <5mm	Blando <5mm	Blando <5mm	Blando <5mm
	Alteración	Muy alterada	Moderadamente alterada	Moderadamente alterada	Moderadamente alterada	Moderadamente alterada	Moderadamente alterada
Estado general (condiciones hidrológicas)		Húmeda	Goteando	Goteando	Goteando	Húmeda	Húmeda
RMR		22	36	35	37	35	38

La clasificación *RMR* de la zona de estudio corresponde a la descripción de una “Roca pobre” según lo señalado por Bieniawski en 1989 (Tabla 4). Este resultado se debe principalmente al valor deficiente de *RQD*, la separación de las diaclasas, rugosidad; de forma contraria, la persistencia de la discontinuidad y abertura son elevadas amenazando la zona de estudio. Además, el tipo de relleno y su estado de alteración contribuyen a inestabilidad de las laderas (Figura 16).


Figura 16: Mapa de interpolación para el método *RMR* de la península de Hualpén.

5.6 Q de Barton ($NGI Q$)

Los parámetros utilizados para estimar el método $NGI Q$ en taludes y laderas son: 1) Designación de la calidad de la roca RQD , 2) Coeficiente asociado al número de discontinuidades (J_n), 3) Coeficiente asociado al grado de alteración (J_a), 4) Coeficiente de rugosidad de las discontinuidades (J_r), 5) Coeficiente de influencia del agua (J_w) y 6) Coeficiente de influencia de las tensiones en el macizo rocoso (SRF). Los resultados de la estimación del índice de calidad se reflejan en la Tabla 12.

Tabla 12: Índice de calidad de $NGI Q$ medido en los afloramientos de la zona de estudio.

Parámetros geotécnicos	Estaciones geomecánicas					
	EG1	EG3	EG4	EG5	EG6	EG7
RQD	20	30	30	40	35	30
Coeficiente asociado al número de discontinuidades (J_n)	12	12	12	12	12	12
Coeficiente asociado al grado de alteración (J_a)	4	4	4	2	4	2
Coeficiente de rugosidad de las discontinuidades (J_r)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Coeficiente de influencia del agua (J_w)	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Coeficiente de influencia de las tensiones en el macizo rocoso (SRF)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
$NGI Q$	0,11	0,25	0,25	0,66	0,25	0,66

La zona de estudio mostró poca variabilidad entre los parámetros geotécnicos obtenidos de la Península de Hualpén, por lo tanto, el índice de calidad de roca que fue señalado por Barton, Lien y Lunde en 1974 ejemplifica una zona “Muy malo” (Figura 17). Esto se debe principalmente a los valores bajos obtenidos en RQD y la cantidad de familias de discontinuidades que hay en el macizo rocoso.

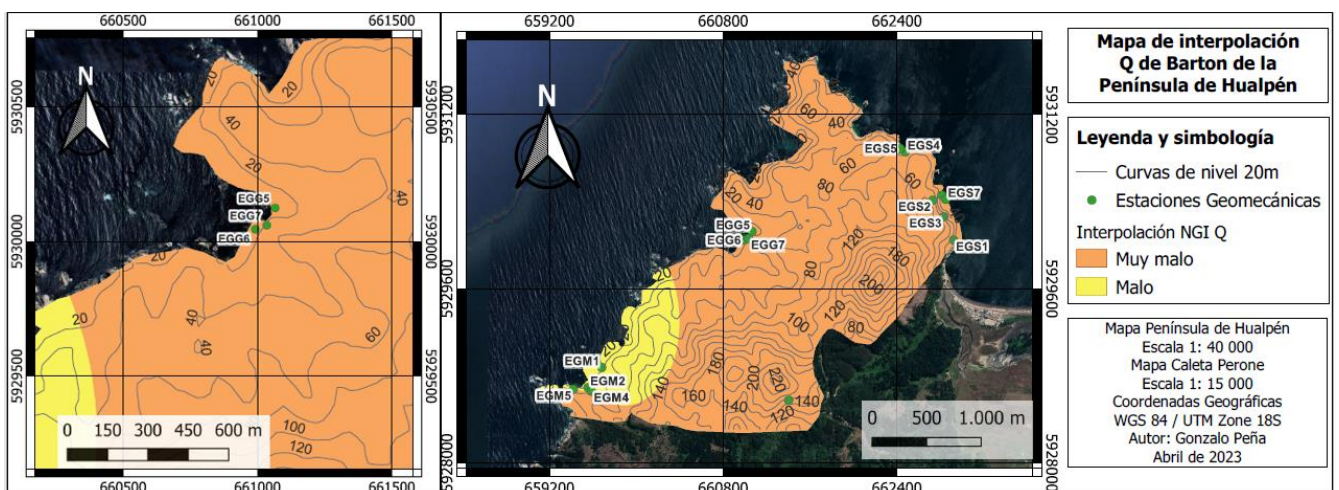


Figura 17: Mapa de interpolación para el método $NGI Q$ de la península de Hualpén.

5.7 Slope Mass Rating (SMR) (Romana, 1985)

Los factores de ajuste han sido calculados con los valores presentados en la Tabla 6. Los resultados de la valoración de los tres subfactores F_1 , F_2 y F_3 se consideró siempre el caso más desfavorable (Tabla 13).

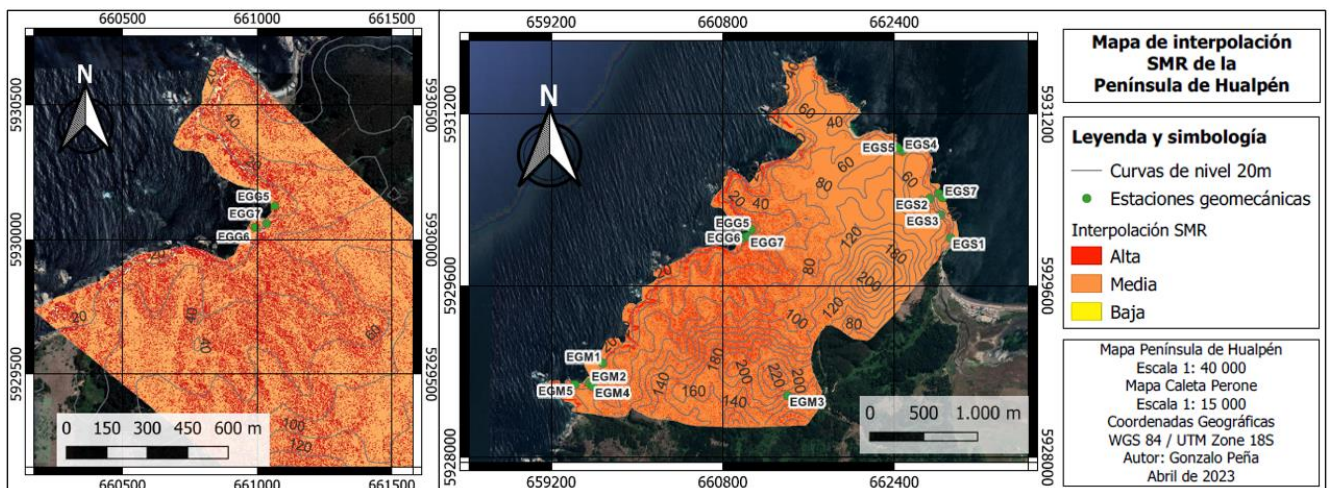
Tabla 13: Resultados de valoración factor F_1 , F_2 y F_3 para las tres familias de discontinuidades por SMR.

Estación geomecánica	Familia de discontinuidad	RMR	Factores de ajuste			SMR
			F1	F2	F3	
EG5	Familia 1	37	0,15	0,85	-50	<u>31</u>
	Familia 2		0,15	0,15	-60	36
	Familia 3		0,7	1	-6	33
EG6	Familia 1	35	0,15	0,85	-60	27
	Familia 2		1	0,15	-60	<u>26</u>
	Familia 3		1	1	-6	29
EG7	Familia 1	38	0,15	1	-25	34
	Familia 2		1	0,15	-60	29
	Familia 3		0,85	1	-25	<u>17</u>

Los resultados presentados en la Tabla 13 muestran la utilización del método *SMR* propuesto por Romana en 1985, donde cada familia de discontinuidad posee sus propios parámetros geotécnicos; por consiguiente, cada familia de discontinuidad tendrá un valor de *SMR*. Para representarlos se escoge la familia más desfavorable de cada estación geomecánica con tres rangos de valores en el mapa de interpolación: 0-33 alta, 34-66 media y 66-100 baja (Figura 18).

La zona de estudio se considera “muy mala” y muy propensa a fallar por volcamiento o *toppling* directo principalmente, esto se debe a la dirección de buzamiento de las discontinuidades que buza hacia la cara de la ladera, es decir, forma una escalera ascendente paralela a la cara de la ladera (Tabla 10). La clasificación *RMR* es parte de la fórmula para la obtención del índice *SMR* (Fórmula 7), esta relación proporciona la consideración de los parámetros geotécnicos propuestos por Bieniawski en 1989 con el complemento de un análisis cinemático representado por los subfactores F_1 , F_2 y F_3 (Figura 18).

Según lo planteado por Romana en el año 2001, existe una valoración muy acertada en la estimación del comportamiento de una ladera o talud a partir de la clasificación *SMR*.


Figura 18: Mapa de interpolación para el método *SMR* de la península de Hualpén.

5.8 Método *Q-Slope* (Bar y Barton, 2017)

La asignación de parámetros para el cálculo del *Q-Slope* se puede considerar de forma similar al caso del método *NGI Q* (Barton et al. 1974). Estos han sido establecidos mediante observaciones de terreno, donde se ha elegido la familia de discontinuidad más desfavorable para cada estación geomecánica (Tabla 14).

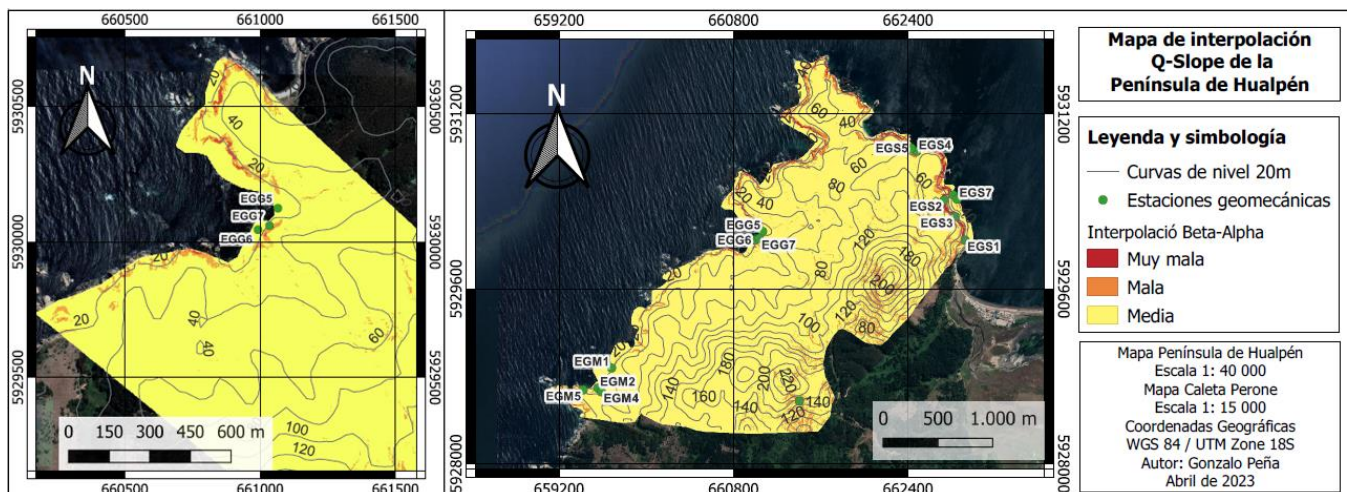
Tabla 14: Índice de calidad de *Q-Slope* medido en los afloramientos de la zona de estudio.

Parámetros geotécnicos	Estaciones geomecánicas		
	EGG5	EGG6	EGG7
<i>RQD</i>	40	35	26
Coficiente asociado al número de discontinuidades (J_n)	9	9	9
Coficiente asociado al grado de alteración (J_a)	4	2	2
Coficiente de rugosidad de las discontinuidades (J_r)	1,5	1,5	1,5
Coficiente de influencia del agua (J_{wice})	0,7	0,7	0,7
Coficiente de influencia de las tensiones en el macizo rocoso (SRF_a)	2,5	2,5	2,5
<i>Q-Slope</i>	0,04	0,15	0,11

La clasificación O-factor señalado en Bar y Barton (2017) muestra una zona de estudio compuesta de macizos rocosos con orientaciones que promueve la rotura en la ladera (Tabla 15). El análisis cinemático de las estaciones geomecánicas (Tabla 10) respalda la clasificación de Bar y Barton (2017), por lo tanto, el color rojo que muestra el mapa de interpolación *Q-Slope* (Figura 19) representa laderas en la costa de Caleta Perone con un índice de calidad “Muy mala”. Los índices de calidad representados varían: -10 a 0 “Muy mala”, 0 a 10 “Mala” y sobre 10 “Media”.

Tabla 15: Clasificación O-factor para las laderas consideradas en mapa de interpolación.

Estación geomecánica	Familia de discontinuidad	Clasificación O-factor	Set A	Set B
EG5	Familia 1	Orientación favorable	1	1
	Familia 2	Rotura	0,25	0,5
	Familia 3			
EG6	Familia 1	Orientación favorable	1	1
	Familia 2	Rotura	0,25	0,5
	Familia 3	Orientación favorable	1	1
EG7	Familia 1	Orientación favorable	1	1
	Familia 2	Rotura	0,25	0,5
	Familia 3	Orientación favorable	1	1


Figura 19: Mapa de interpolación para el método *Q-Slope* de la península de Hualpén.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de las clasificaciones *SMR*, *Q-Slope*, *NGI Q* y *RMR* muestran una mala calidad de macizo rocoso para la península Hualpén, principalmente la zona de estudio presenta laderas con un diaclasado de tres familias de discontinuidades con rellenos en sus aberturas de un material blando.

La amenaza de inestabilidad de las laderas se encuentra cerca de las residencias de Caleta Perone, principalmente todo el borde costero. Las estaciones geomecánicas evaluadas presentan un uso cotidiano de los residentes del sector, visualizando botes pesqueros y turistas en la cercanía de los macizos rocosos.

Los resultados reflejan una rotura o un fallo del 100% de los macizos rocosos en la zona de estudio, estos están compuestos mayoritariamente de monzogranito de biotita y turmalina con una meteorización moderada. Específicamente la familia 2 que corresponde a la discontinuidad horizontal es la responsable de provocar la rotura, esta corresponde al tipo de falla por *toppling* directo que ocurre cuando la separación de las familias de discontinuidades forma una escalera ascendente (Goodman & Bray, 1976).

A modo de comparación con los mapas recopilados de SERNAGEOMIN y UBB (Figura 11) sobre la amenaza de remoción en masa de la Península de Hualpén, podemos observar que SERNAGEOMIN no muestra inestabilidad de laderas cercanas a la costa de Caleta Perone, pero sí la UBB. Es decir, una modelación Multi-Criterio (EMC) con variables consideradas como la geología, clima, sismos, pendientes, exposición de laderas y cobertura vegetal es similar a la interpolación de las clasificaciones geomecánicas de *SMR* y *Q-Slope*.

La diferencia del trabajo realizado por la UBB y este estudio es el análisis in-situ y específico de 20 estaciones geomecánicas de forma individual, descartando taludes y laderas que pueden generar variación en los mapas de interpolación. Los resultados muestran macizos rocosos inestables y una amenaza inminente, considerando que el tiempo se encuentra a favor de la meteorización y los climas presentan condiciones cada vez más desfavorables, esto generará movimientos en masa en estaciones invernales donde se destacan las lluvias intensas que producen en su mayoría flujos y deslizamientos.

7. REFERENCIAS

- Aguirre, L; Hervé, F. y Godoy, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile - An outline. *Krystalinikum*. Vol. 9: 7-19.
- Aydin, A. (2009). ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), 627-634. doi: 10.1016/j.ijrmms.2008.01.020
- Aydin, A. y Basu, A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81(1), 1-14. doi: 10.1016/j.enggeo.2005.06.006
- Bar, N. y Barton, N. (2017). The *Q-Slope* Method for Rock Slope Engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(12), 3307-3322. doi: 10.1007/s00603-017-1305-0
- Barton, N., Lien, R. y Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189-236
- Basahel, H. y Mitri, H. (2017). Application of rock mass classification systems to rock slope stability assessment: A case study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(6), 993-1009. doi: 10.1016/j.jrmge.2017.07.007
- Bieniawski, Z. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Transaction of the South African Institution of Civil Engineers*, 15(12), 353-343.
- Bieniawski, Z. (1979). The Geomechanics Classification in rock engineering applications. Proc. 4th Congress on Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics, Montreux.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Nueva York, Estados Unidos: John Willey and Sons.

- Campo II, 2009. Mapa geológico del sector costero provincia de Concepción. Universidad de Concepción.
- Creixell, C. (2001). “Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30' S y 38°00'”. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra. 139 pp. Inédito.
- Cruden, D; Varnes, D. (1996). “Landslides types and processes”. En Landslides. Investigation and mitigation (Turner, A.K.; Schuster, R.L.; editores). Transportation Research Board, National Research Council. P 36-71. Washington.
- Deere, D. (1964). Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1(1), 16-22.
- Deere, D. U. y Deere, D. W. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM STP 984.
- Dips (2013). Versión 6.008, Rocscience Inc., Toronto.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. T. (2008). “The landslide handbook: a guide to understanding landslides”. Reston: US Geological Survey. p 129.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslides types, an update. *Landslides* (2014) 11: pp. 167-194.
- Inostroza, D; King, R & Montenegro, J. (2017). “Aplicación del modelo conceptual para procesos de remoción en masa a un talud de la ruta CH-160, Lota, Región del Biobío” (Tesis de Pregrado). Universidad Católica del Santísima Concepción, Concepción
- ISRM. (1978). Suggest methods. *Int. Jour Rock Mech. And Min.Sci y geomech.* Abs Pergamon Press.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., (2002). *Ingeniería Geológica*. (1º. Edición). Madrid, España.: Editorial Pearson-Prentice Hall.
- Goodman, R., & Bray, J. (1976). Toppling of Rock Slopes. *Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*, 2, 201-234.
- Municipalidad de Hualpén. (2018). Plan Regulador Comunal de Hualpén, Estudio de Riesgos y de Protección Ambiental. Memoria Explicativa. Hualpén: Municipalidad de Hualpén.
- Naranjo, J., Clavero, J., Hauser, A., Ramírez, P., (2005). Informe geológico sobre las remociones en masa causadas por las lluvias torrenciales de los días 26 y 27 de junio 2005 en Concepción, VIII Región. Subdirección Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Naranjo, J., Arenas, M., Ramirez, P., (2006). Remociones en masa causadas por las precipitaciones de los días 9 al 11 de julio de 2006, en algunos sectores de la provincia de Concepción. Subdirección Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *International Symposium on the Role of Rock Mechanics*, International Society for Rock Mechanics. Salzburg.
- Romana, M., Serón, J. y Montalar, E. (2001). La clasificación Geomecánica SMR: Aplicación, Experiencias y Validación. V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Madrid.
- SERNAGEOMIN, 2010. Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área de Concepción – Talcahuano – Hualpén – Chiguayante, Región del Bio Bio, Chile.
- SERNAGEOMIN, 2019. Evaluación de remoción en masa en Parque Pedro del Río Zañartu, comuna de Hualpén, región del Biobío.
- Suarez Diaz, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Bucamaranga: ingeniería de Suelos Ltda.

Tarbuck, E., & Lutgens, L. (2010). *Ciencias de la tierra: introducción a la geología física*. (8° ed). España: Pearson Educación.

Torres, C. (2018). *Elementos para el diseño de un plan de Gestión Ambiental en el Santuario de la Naturaleza Península de Hualpén*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.

Varnes, DJ. (1978). "Slope movement types and processes". In: Eckel EB (ed) *Landslides and engineering practice, special report 28*. Highway research board. National Academy of Sciences, Washington, DC, pp. 20-47.

Vásquez, D. (2013). *Metodología para la Delimitación y Zonificación de Humedales Costeros de Tipo Mediterráneo*. Concepción: Universidad de Concepción.

Wyllie, D. (2017). *Rock Slope Engineering: civil applications*. Boca Ratón, Estados Unidos: Taylor & Francis, CRC Press.