



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

ANÁLISIS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE SEDIMENTOS GLACIOLACUSTRES ASOCIADOS A LOS DESLIZAMIENTOS DEL RÍO SAN PEDRO, REGIÓN DE LOS RÍOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

ANDRÉS IGNACIO ZÚÑIGA ÁLVAREZ

PROFESORA GUÍA

MARISOL LARA CASTILLO

PROFESORA CO-GUÍA

SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

LENART GONZÁLEZ LAGOS

SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Andrés Ignacio Zúñiga Álvarez
FECHA: 21/11/2019
PROFESOR GUÍA: Marisol Lara

Análisis geológico-geotécnico de sedimentos glaciolacustres asociados a los deslizamientos del Río San Pedro, Región de Los Ríos

El 22 de mayo de 1960 ocurrió el terremoto más grande registrado en la era instrumental, el denominado Megaterremoto de Valdivia de 1960. Este desencadenó tres deslizamientos ocurridos en la ribera del río San Pedro, represándolo y tapando el desagüe del lago Riñihue, por lo que se realizaron labores de socavamiento en los deslizamientos de manera de controlar el vaciado del lago, ya que el aumento del nivel del agua podría haber generado una inundación en el valle y destruiría lo que quedaba de las ciudades de Los Lagos y Valdivia.

En este estudio se analizaron geológica y geotécnicamente los sedimentos glaciolacustres recolectados de la ribera, considerados como nivel base de estos deslizamientos. Además, una vez obtenidos los resultados del análisis geotécnico, se realizaron análisis de estabilidad de ladera ante diferentes escenarios sísmicos y diferentes alturas de nivel freático.

Los resultados de los análisis geológicos arrojaron que estos son sedimentos de grano fino, presentan laminación paralela y están compuestos de un 30% de arcillas y un 65% de limo, cuya composición predominante es de minerales de arcilla y feldespatos. Las muestras también presentan clastos cuyo tamaño oscilan entre 3 y 12 mm, que están compuestos principalmente de plagioclasas, cuarzo y vidrio.

Para la caracterización geotécnica, se obtuvo un índice de plasticidad aproximado de 27 y un límite líquido de 85, lo que clasifica a las muestras como un limo de alta plasticidad. Los datos de corte directo indican una cohesión aproximada de 36 kPa y un ángulo de fricción de 26°; mientras que los datos obtenidos de los ensayos triaxiales muestran sobreconsolidación de las muestras, dando como resultado en el estado crítico valores de fricción nula y cohesión de 213 kPa a tensiones normales bajo los 294 kPa, y parámetros de cohesión nula y ángulo de fricción de 36° a tensiones normales mayores.

Del análisis de estabilidad de ladera se concluyó que las condiciones ocurridas durante el terremoto de 1960 sobrepasan las mínimas para presentar inestabilidad en la zona de estudio, el escenario de equilibrio límite de acuerdo con los análisis realizados, resulta en un PGA crítico de 0,57g en la zona.

Se recomienda para posteriores estudios la caracterización de todos los sedimentos encontrados en la ladera.

痛みを伴わない教訓には意義がない。人は何かの犠牲なしには何も得ることはできないのだから。しかし、その痛みを耐え、乗り越えた時……人は何ものにも負けない、強靱な心を手に入れる。そう、鋼のような心を…

Itami o tomonawanai kyōkun ni wa igi ga nai. Hito wa nanika no gisei nashi ni wa nani mo eru koto wa dekinai nodakara. Shikashi, sono itami ni tae, norikoeta toki.... hito wa nanimono ni mo makenai, kyōjin'na kokoro o teniireru. Sō, -kō no yōna kokoro o...

Las lecciones sin dolor no tienen sentido. La gente no puede obtener nada sin sacrificar nada. Sin embargo, cuando soportas el dolor y lo superas... obtienes un corazón fuerte que no puede ser golpeado por nada. Sí, un corazón de acero...

Edward Elric

Dedicado a mi abuelo

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a la comisión a cargo de este trabajo: Marisol Lara, Sofía Rebolledo, Lenart González y Sergio Sepúlveda, especialmente a Marisol, que ha tenido una gran paciencia para todas las dudas que he tenido, y la orientación que me ha dado a lo largo de este proceso.

También a los funcionarios del IDIEM, específicamente a Ivanna y Rodrigo, y además a los del departamento de Geología: Blanca, Julio, Zaida y Christian, que me asistieron e hicieron posible la realización de esta memoria.

Quiero agradecer a mi familia: mi abuela, mis tíos, mis primos, mi papá y en especial a mi mamá, ya que fue de las que más me instó a avanzar en este trabajo. A Nicole, que me ha acompañado a lo largo de toda esta travesía durante la universidad apoyándome en todo lo necesario para que no mandara todo a la punta del cerro. Al pequeño Klaus, aunque me despierte por las noches con el movimiento de su rueda, fue una compañía en las noches mientras escribía este trabajo.

A los cabros de mis primeros años en el Nacional: Flaco, Chicoco y Joaquín, ya que cuando nos juntamos volvemos a hacer las mismas estupideces cuando éramos más chicos.

Al Byron, Panchi, Alejandro e Ian, aunque cueste bastante juntarnos es agradable pasar un largo rato escuchando sus temas variados.

A los chiquillos de Bachi: Tami, Maca, Danae, Vane, Jorge y Daniel; por apañar a las tonteras que hacía para despejarme de esos ramos incomprensibles para mí.

Al team Ñoñef (Vale, Cami, Lisper, Camilo, Pelao, Miguel, Nicole, Jose, Medina, Danko, Tomás, Ale) que hicieron ameno los primeros años en esta facultad. A los Feeders (Shesho, David, Javier, Mati y Terry) que aún nos entretenemos en algún juego rancio que se nos ocurre comprar en grupo.

A los Alejo Haters/lovers (Mati negro, Deivid, Tobal, Yorch, Kevin, Cristian, Seba, Mario, Rodri, Mati blanco, Lissy, Cami y Alejo) que acompañaron estos años de la carrera con el ánimo necesario para no estresarse por las tonteras que decía.

A las chiquillas y los chiquillos de la sala de memoristas.

Por último, agradezco a Nintendo y Steam por ocupar mi tiempo libre, gracias totales.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Exposición de Problema.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Área de estudio.....	3
1.3.1 Ubicación y accesos	3
1.3.2 Clima	4
1.3.3 Sismicidad	5
2. Marco Geológico	7
<i>Paleozoico</i>	8
<i>Carbonífero-Pérmico</i>	9
<i>Triásico</i>	9
<i>Jurásico</i>	10
<i>Oligoceno-Mioceno</i>	10
<i>Mioceno</i>	11
<i>Pleistoceno</i>	11
<i>Pleistoceno superior-Holoceno</i>	13
<i>Holoceno</i>	15
3. Marco teórico.....	17
3.1 Remociones en masa	17
3.1.1 Definición de remoción en masa.....	17
3.1.2 Clasificación de remociones en masa.....	17
3.1.3 Remociones en masa desencadenadas por sismicidad.....	19

3.1.4	Deslizamientos debido a actividad sísmica	20
3.2	Caracterización geológica del suelo	21
3.2.1	Descripción visual.....	21
3.2.2	FTIR	23
3.2.3	Granulometría láser	26
3.3	Caracterización geotécnica del suelo	28
3.3.1	Límites de Atterberg	28
3.3.2	Ensayo de corte directo consolidado - drenado	32
3.3.3	Ensayo triaxial consolidado - no drenado	37
3.4	Análisis de estabilidad de laderas	41
4.	Resultados	44
4.1	Muestras analizadas	44
4.2	Caracterización geológica del suelo	47
4.2.1	Descripción visual.....	47
4.2.2	FTIR	50
4.2.3	Granulometría láser	52
4.3	Caracterización geotécnica del suelo	56
4.3.1	Límites de Atterberg	56
4.3.2	Ensayo de corte directo consolidado – drenado	57
4.3.3	Ensayo triaxial consolidado – no drenado.....	62
4.4	Estabilidad de Laderas.....	68
5.	Discusión.....	80
5.1	Respecto a los resultados de la caracterización geológica.....	80
5.2	Respecto al origen de los sedimentos.....	81
5.3	Respecto a los resultados de la caracterización geotécnica.....	82

5.4	Respecto al análisis de estabilidad de ladera.....	84
6.	Conclusiones y recomendaciones	86
7.	Bibliografía	88
	Anexos.....	93
	Anexo A: Clasificación de deslizamientos desencadenados por terremotos, extraído y traducido de Keefer, 1984.	93
	Anexo B: Descripción visual.....	96
	B.1 Macroscópica	96
	B.2 Microscópica	101
	Anexo C: FTIR.....	104
	Anexo D: Granulometría	107
	Anexo F: Corte directo	119
	Anexo G: Ensayo Triaxial	123
	Anexo H: Análisis de estabilidad de Ladera	126

Índice de tablas

Tabla 1 Resultados de los análisis de FTIR.	52
Tabla 2 Resultados de los coeficientes de uniformidad y curvatura de la muestra SP1803.....	54
Tabla 3 Parámetros estadísticos promedio de la muestra SP1804	55
Tabla 4 Resultados de límite líquido de las muestras.....	56
Tabla 5 Resultados de límite plástico de las muestras	56
Tabla 6 Resumen de resultados de límites de Atterberg de las muestras.	57
Tabla 7 Datos de humedad y peso específico de las probetas utilizadas en los ensayos de corte directo.	59
Tabla 8 Parámetros de envolvente de falla obtenida por los datos de corte directo	61
Tabla 9 Parámetros de envolvente de falla obtenida por los datos de ensayo triaxial CU.	66
Tabla 11 Valores fijados para la unidad Qt.....	70
Tabla 12 Parámetros geotécnicos definidos para cada unidad	72
Tabla 13 Factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad ocupando la búsqueda de bloques para el caso estático (coeficiente sísmico nulo).....	76
Tabla 14 Coeficientes sísmicos mínimos para que una de las superficies de deslizamiento tenga sus FS menores a 1.....	76
Tabla 15 Factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad ocupando la búsqueda de bloques para un coeficiente sísmico horizontal de 0,5.	76
Tabla 16 Factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad en las superficies circulares fijadas para el caso estático (coeficiente sísmico nulo).	77
Tabla 17 Coeficientes sísmicos mínimos para que una de las superficies circulares fijadas tenga sus FS menores a 1, siendo destacadas con un sombreado anaranjado.....	78
Tabla 18 Factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad en las superficies circulares fijadas para un coeficiente sísmico horizontal de 0,5.....	79

Índice de Figuras

Figura 1.1 Mapa esquemático de los deslizamientos ocurridos en 1960, junto a deslizamientos antiguos encontrados en la zona; los números rojos se muestran para diferenciar los deslizamientos, denominándolos como “tacos” (Extraído de Davis y Karzulovic, 1963).....	1
.....	2
Figura 1.2 Mapa de la zona cercana al deslizamiento (Destacado en el rectángulo rojo), mostrando en amarillo el curso de agua principal que hubiese sido afectado por el rompimiento de la presa por deslizamiento (Fuente: Google Earth y DGA)..	2
Figura 1.3 Se indican las localidades cercanas a la zona de estudio, destacando la zona de estudio en el rectángulo rojo y los caminos a utilizar para llegar a la zona. Fuente: Google Earth y DGA.	4
Figura 1.4 Ubicación de donde se extrajeron las muestras, mostrando como referencia el lago Riñihue. Fuente: Google Earth.	4
Figura 1.5 Promedio de precipitaciones mensuales de la estación Riñihue, ubicada en la cabeza del río San Pedro. Datos obtenidos de (CR) ²	5
Figura 1.6 Representación de los valores de PGA percibidos en la zona de estudio. Fuente: Google Earth y USGS.	7
Figura 2.1 Mapa geológico de la zona, extraído de Duhart et al., 2003 y Rodríguez et al., 1999. El área delimitada por las líneas rojizas es la zona de estudio mostrada en la figura 1.4; el triángulo negro indica el lugar de extracción de las muestras. ..	8
Figura 2.2 Sección columnar de los sedimentos expuestos en la zona este del escarpe principal del deslizamiento mayor, asociada a los depósitos glaciofluviales y glaciolacustres de la Glaciación Llanquihue (Extraído de Davis y Karzulovic, 1963).	14
Figura 2.3 Secciones que muestran la interpretación del movimiento del deslizamiento de mayor tamaño. La escala y el perfil son aproximados. Extraído de Davis y Karzulovic (1963).....	16
Figura 3.1 Clasificación abreviada de los movimientos de ladera. Extraído de Varnes (1978).	19

Figura 3.2 Deformaciones típicas, grietas de tensión (tensile crack), las superficies de deslizamiento (crack-shear slip Surface) y modos de falla de una ladera de roca. (a) bajo condiciones normales de gravedad. (b) bajo condiciones sísmicas. Extraído de Huang, 2015.	21
Figura 3.3. a. Lupa binocular Olympus SZ61. b. Una de las tablas de colores de suelo de Munsell.	22
Figura 3.4 Microscopio petrográfico Olympus BX51.....	23
Figura 3.5 Instrumentos utilizados en la fabricación de los discos de KBr. a. Malla número 200. b. Agitador Specamill. c. molde de la pastilla. d. Prensa hidráulica manual Specac (b, c y d fueron extraídos de la página de venta de Specac).....	24
Figura 3.6 Efectos de la corrección de la línea base en el grafico absorbancia (%) vs longitud de onda (cm-1) (Espectrograma obtenido de la muestra SP1803-B)..	26
Figura 3.7. a. Granulómetro Laser Mastersizer 2000; a la izquierda de la foto se observa el equipo Hydro G. b. Malla n°18 utilizada para el tamizaje.	27
Figura 3.8 Carta de plasticidad de Casagrande (Extraída de la norma ASTM D2487).	29
Figura 3.9 Equipamiento necesario para los ensayos de límites de Atterberg. a. La imagen muestra de izquierda a derecha el acanalador, la espátula y la máquina de Casagrande. b. Malla 40 utilizada para tamizar la muestra.	30
Figura 3.10 La imagen muestra la división del suelo realizado por el acanalador. Fotografía obtenida al realizar el procedimiento a la muestra SP1803.	31
Figura 3.11 La imagen muestra las dimensiones de un bastoncito usado para definir el límite plástico. Fotografía obtenida al realizar el procedimiento a la muestra SP1803.	32
Figura 3.12 Representación del comportamiento de suelos en el grafico deformación vs tensión. a. Muestras con granos tamaño arena, mostrando el índice de poros correspondiente para cada curva. b. Muestras con granos tamaño arcilla; en donde también se muestra las envolventes de falla esperadas para cada dato (OC: Sobreconsolidado. NC: Normalmente consolidado). Extraído y traducido de Lambe y Whitman, 1969.....	34

Figura 3.13 Envolvente de falla del suelo, esta separa los estados posibles e imposibles que puede presentar un suelo. Extraído y modificado de González de Vallejo, 2002.	35
Figura 3.14 Máquina de corte directo; a la derecha se observa el motor que aplica la carga nominal, mientras que la parte central y superior de la imagen se encuentra la máquina que aplica la carga nominal.	35
.....	36
Figura 3.15 Máquina de corte directo; a la derecha se observa el motor que aplica la carga nominal, mientras que la parte central y superior de la imagen se encuentra la máquina que aplica la carga nominal.	36
Figura 3.16 Partes de la caja en donde se sitúa la muestra; esta se coloca entre las piezas que se indican con la letra c.	36
Figura 3.17 Representación de sucesivos estados de estrés con σ_3 constante y σ_1 en aumento. Los puntos A, B, etc. Representan la misma condición de estrés en ambos diagramas. a. Círculos de Mohr. b. diagrama p-q. Extraído de Lambe y Whitman (1969).	38
Figura 3.18 Representación de la línea Kf, en conjunto con su ecuación de la recta. Extraído de Lambe y Whitman (1969).	39
Figura 3.19 a. Célula triaxial. b. Representación gráfica de la maquina triaxial, extraída de la norma ASTM D4767.	39
Figura 3.20 Maneras de calcular el factor de seguridad. Extraído y traducido de Abramson et al. (2002).	41
Figura 3.21 División de una potencial masa deslizante en secciones. Extraído y traducido de Abramson et al. (2002).	42
Figura 3.22 Fuerzas que actúan en una sección típica. Extraído y traducido de Abramson et al. (2002).	43
Figura 3.23 Tabla resumen de algunos de los metodos de secciones utilizados en el software Slide. Extraído y traducido de Abramson et al. (2002).	44
Figura 4.1 Mapa de la zona de estudio que indica la ubicación de las muestras; se superpone el dibujo realizado por Davis y Karzulovic (1963) para mostrar la ubicación de los deslizamientos ocurridos en 1960. (Fuente: Google Earth).	45

Figura 4.2 Imagen de un fragmento de la muestra SP1803.	46
Figura 4.3 Imagen de la muestra SP1804.	47
Figura 4.4 Representación de los colores observados en la muestra SP1803. Se muestran las letras para facilitar su identificación.	48
Figura 4.5 Imagen representativa de la muestra SP1803; en la imagen de la derecha se indica la escala y la dirección hacia donde está el techo de la muestra mediante la flecha negra.	48
Figura 4.6 Imagen representativa de la muestra SP1804; la parte derecha se señalan las estructuras presentes, la escala de la imagen y la dirección hacia donde está el techo de la muestra mediante la flecha negra.....	49
Figura 4.7 Imagen representativa del corte SP1803-1, en ella se observan las franjas que se encuentran en la matriz.	50
Figura 4.8 Imagen representativa del corte SP1803-2, se observan dos clastos con cuarzo, plagioclasa y vidrio, uno de 1 mm de largo y el otro de 0,5 mm de largo.	50
Figura 4.9 Imagen ilustrativa del código ejecutable de Matlab. A la derecha se eligen los gráficos de referencia y su porcentaje; la combinación de estos gráficos se muestra en color verde, mientras que el grafico de la muestra se encuentra en azul.	51
Figura 4.10 Gráfico de porcentajes de granos por tamaño de la muestra SP1803. La línea intermitente verde divide los granos de arcilla y limo, mientras que la línea intermitente amarilla divide los granos de limo y arena.	53
Figura 4.11 Gráfico de porcentaje acumulativo de la muestra SP1803. La línea intermitente verde divide los granos de arcilla y limo, mientras que la línea intermitente amarilla divide los granos de limo y arena. Además, se muestra el tamaño de la malla 200 para la clasificación de las muestras.	53
Figura 4.12 Gráfico de porcentajes de granos por tamaño de la muestra SP1804. La línea intermitente verde divide los granos de arcilla y limo, mientras que la línea intermitente amarilla divide los granos de limo y arena.	54
Figura 4.13 Gráfico de porcentaje acumulativo de la muestra SP1804. La línea intermitente verde divide los granos de arcilla y limo, mientras que la línea	

intermitente amarilla divide los granos de limo y arena. Además, se muestra el tamaño de la malla 200 para la clasificación de las muestras.	55
Figura 4.14 Ubicación de las muestras en la carta de plasticidad, el punto rojo representa la muestra SP1803, mientras que el punto celeste representa la muestra SP1804.	57
Figura 4.15 Imagen que muestra uno de los testigos de la muestra SP1804 inserto en el molde. Se destaca con una circunferencia amarilla el clasto de mayor tamaño.	58
Figura 4.16 Diagrama de desplazamientos para los ensayos de corte directo	59
Figura 4.17 Diagrama de tensión vs desplazamiento de corte directo.....	60
Figura 4.18 Envoltentes de falla utilizando las tensiones máximas y de estado crítico obtenidas de los ensayos de corte directo.	60
Figura 4.19 Representación de las tensiones aplicadas en ciertas zonas de plano de falla. Extraído y modificado de Lancellotta (2009).	61
Figura 4.20 Imagen de la muestra antes y después de realizar el ensayo triaxial consolidado - no drenado, con una presión confinante de 1 kg/cm ³ , realizada a una probeta proveniente de la muestra SP1803.	62
Figura 4.21 Imagen de la muestra antes y después de realizar el ensayo triaxial consolidado - no drenado, con una presión confinante de 3 kg/cm ³ , realizada a una probeta proveniente de la muestra SP1804.	63
Figura 4.22 Imagen de la muestra antes y después de realizar el ensayo triaxial consolidado - no drenado, con una presión confinante de 6 kg/cm ³ , realizada a una probeta proveniente de la muestra SP1804.	63
Figura 4.23 Trayectoria de esfuerzos p-q de los ensayos triaxiales CU. Los rombos indican la tensión peak de cada ensayo, mientras que los círculos indican las tensiones de estado crítico.....	64
Figura 4.24 Gráfico de deformación vs diferencia de tensión para cada ensayo Los rombos indican la tensión peak de cada ensayo, mientras que los círculos indican las tensiones de estado crítico.	64

Figura 4.25 Regresión lineal de las tensiones peak obtenidas en los ensayos triaxiales CU. Se presentan las ecuaciones que representa cada regresión encima de su tabulación en la leyenda.	65
Figura 4.26 Regresión lineal de los puntos de estado crítico obtenidos en los ensayos triaxiales CU. Se presentan las ecuaciones que representa cada regresión encima de su tabulación en la leyenda.	65
Figura 4.27 Efectos de la sobreconsolidación / sobrecompactación en esfuerzos de cizalle en suelos. Extraído y traducido de Shahangian (2011)	67
Figura 4.28 Envoltente de falla de las muestras, la línea punteada representa la sobreconsolidación observada en las muestras, y la línea continua utiliza los valores de cohesión y ángulo de fricción obtenidos de la regresión lineal ocupando los datos de tensión de estado crítico. Datos representados en kPa.....	67
Figura 4.29 Ubicación del perfil a estudiar en el análisis de estabilidad de ladera. Fuente: Google Earth.....	68
Figura 4.30 Perfil AA', previa al terremoto de 1960.	69
.....	69
Figura 4.31 Envoltentes de falla obtenidas por los ensayos de corte directo y triaxial CU. La recta de color celeste muestra la envoltente obtenida por los ensayos de corte directo, mientras que la recta de color naranja muestra la envoltente obtenida por los ensayos triaxiales CU.....	69
.....	70
Figura 4.32 Valores de ángulo de rozamiento interno en suelos granulares no plásticos en función de la granulometría y la compacidad. Extraído de González de Vallejo (2002).....	70
.....	70
Figura 4.33 Valores típicos de pesos unitarios para suelos. Extraído de MATHalino (2019).	70
Figura 4.34 Expresiones para definir el coeficiente sísmico horizontal. Se elige la expresión encerrada por el polígono. Extraído de Abramson et al. (2002).	71
Figura 4.35 Análisis de estabilidad realizado a la ladera, representando la unidad Qt.....	71

Figura 4.36 a. Perfil representativo para un nivel freático que se encuentra a 10 m de profundidad. b. Perfil representativo para un nivel freático que satura 3/4 de la unidad Qt. c. Perfil representativo para un nivel freático que satura la mitad de la unidad Qt. 73

Figura 4.37 a. Perfil ilustrativo de la configuración A para el caso donde el nivel freático se ubica aproximadamente a 10 m de profundidad. Los polígonos en rojo indican las zonas en donde las superficies de falla varían su pendiente, mientras que las flechas indican los ángulos que pueden presentar los planos que sobrepasan los puntos indicados. b. Superficies de falla generadas por el análisis realizado mediante la configuración A, se observa que por el punto situado a la derecha pasan todas las superficies generadas..... 75

Figura 4.38 Perfil ilustrativo de la configuración B para el caso donde el nivel freático se ubica aproximadamente a 10 m de profundidad. Se muestran los números que se usan para indicar de mejor manera a cuál deslizamiento se puede referir. 75

Figura 5.1 Representación de la presión de sobreconsolidación (en azul) y la envolvente de falla obtenida por los puntos de estado crítico del ensayo triaxial CU (en naranja). Se destaca el punto que representa la presión de sobreconsolidación (294 kPa) donde se intersectan con el triángulo de color naranja. 83

Figura 5.2 Deslizamientos circulares observados al oeste de la zona de estudio, se destacan los escarpes con líneas amarillas. Se indica en la imagen inferior la ubicación de estos deslizamientos. Fuente: Google Earth. 85

1. Introducción

1.1 Exposición de Problema

Típicamente se consideran las zonas donde existe convergencia de placas como lugares que presentan una gran actividad sísmica, tanto en cantidad como magnitud de eventos sísmicos. Esto ocurre en Chile, donde se han registrado algunos de los sismos más grandes de la historia. En ocasiones los terremotos han desencadenado a lo largo del país diferentes remociones en masa, que pudieron haber significado un riesgo importante para las comunidades aledañas, dependiendo del volumen de material, la velocidad de la remoción desplazada y los efectos sobre la topografía de la zona. Tal es el caso del represamiento del lago Riñihue causado por el terremoto de 1575, debido al desplazamiento de material de la ribera del río San Pedro hacia donde se situaba el río, siendo este el desagüe del lago Riñihue, impidiendo el libre flujo del agua hacia el mar. Esto causó la acumulación de un gran volumen de agua en el lago Riñihue por 134 días y, cuando la represa cedió, se formó un flujo catastrófico aguas abajo, destruyendo gran parte de Valdivia (Davis y Karzulovic, 1963).

385 años después, la ribera del río San Pedro fue afectada nuevamente por grandes remociones en masa, desencadenadas por el terremoto de Valdivia de 1960. La más grande, denominada taco 3, desplazó alrededor de $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ de sedimentos pobremente consolidados, la intermedia (taco 2) una cantidad cercana a $6 \times 10^6 \text{ m}^3$, y la más pequeña (taco 1) transportó $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Davis y Karzulovic, 1963); tal cantidad de sedimento se depositó en el lecho del río, represándolo en 3 “tacos” diferentes (Figura 1.1).

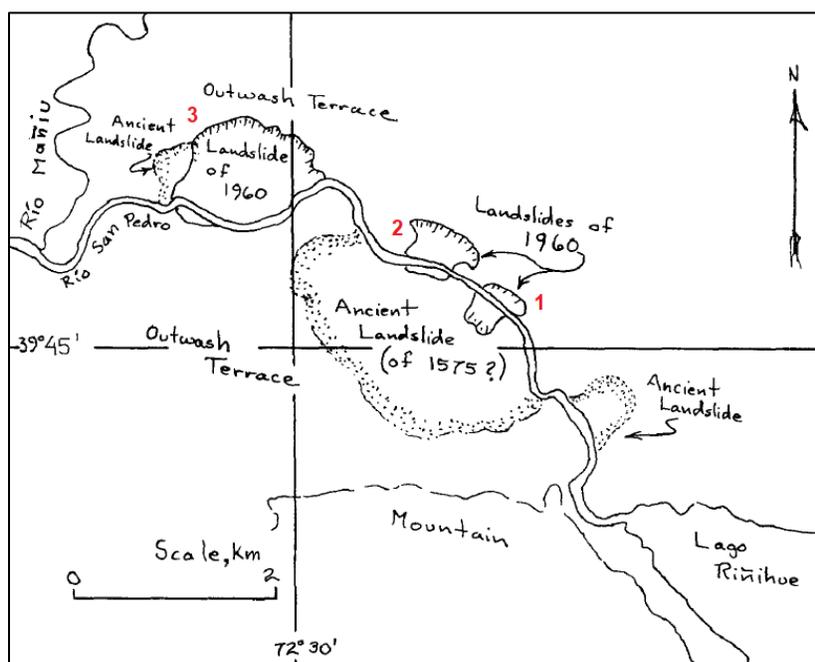


Figura 1.1 Mapa esquemático de los deslizamientos ocurridos en 1960, junto a deslizamientos antiguos encontrados en la zona; los números rojos se muestran para diferenciar los deslizamientos, denominándolos como “tacos” (Extraído de Davis y Karzulovic, 1963).

Este hecho pudo haber sido catastrófico para los pueblos y ciudades río abajo (Los Lagos y Valdivia, Figura 1.2) que ya habían sido muy afectadas por el terremoto, repitiendo los hechos ocurridos en 1575. La acción de empresas públicas, privadas y voluntarios lograron en un período de 2 meses formar cauces en las tres grandes remociones en masa generadas, controlando el caudal del río para que no se formara un deslizamiento destructivo, ocasionando solo inundaciones en las zonas bajas. Lo anteriormente mencionado se conoce informalmente como el "Riñihuzo", ya que los trabajos fueron toda una proeza, debido a las condiciones climáticas y del terreno (Castedo, 1961).



Figura 1.2 Mapa de la zona cercana al deslizamiento (Destacado en el rectángulo rojo), mostrando en amarillo el curso de agua principal que hubiese sido afectado por el rompimiento de la presa por deslizamiento (Fuente: Google Earth y DGA).

Los escarpes y depósitos presentes en la zona son evidencia de los grandes deslizamientos generados por el terremoto de 1960. Existen además rasgos geomorfológicos que evidencian deslizamientos mayores y más antiguos, el mayor de los cuales habría sido el generado en el año 1575 (Davis y Karzulovic, 1963).

Esta memoria se enfoca en la caracterización de los sedimentos ubicados en la base de los deslizamientos de 1960, específicamente el intermedio (taco 2), y la interpretación del mecanismo de falla de los procesos, utilizando la topografía reconstruida de la zona donde se generó la remoción de mayor tamaño (taco 3).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Caracterizar geológica y geotécnicamente los sedimentos glaciolacustres ubicados en la base de los deslizamientos del Río San Pedro.

1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del proyecto que son necesarios para cumplir el objetivo general son:

- Identificar y caracterizar geológicamente el sedimento glaciolacustre.
- Determinar los parámetros geotécnicos del sedimento glaciolacustre.
- Analizar posibles mecanismos de falla con el uso de los parámetros obtenidos.

1.3 Área de estudio

1.3.1 Ubicación y accesos

Para llegar a la zona estudiada se debe seguir el camino T-39 desde la localidad de Los Lagos hacia el este hasta el kilómetro 43,7, o desde Panguipulli por el mismo camino hacia el sur hasta el kilómetro 12,5. En ese punto se debe tomar el camino T-415 hacia el sur, hasta llegar a la ribera del lago Riñihue, cercana a la cabecera del río San Pedro. Desde ahí se debe tomar una lancha río abajo hasta el sitio del muestreo (Figura 1.3).

La zona de remoción en masa estudiada se encuentra entre los paralelos 39° 44' 15" S y 39° 46' 15" S y entre los meridianos 72° 27' 20" W y 72° 31' 00" W, mientras que las muestras extraídas fueron tomadas en el punto 39°45' 2,15" S y 72°28' 50,47" W. (Figura 1.4)



Figura 1.3 Se indican las localidades cercanas a la zona de estudio, destacando la zona de estudio en el rectángulo rojo y los caminos a utilizar para llegar a la zona. Fuente: Google Earth y DGA.



Figura 1.4 Ubicación de donde se extrajeron las muestras, mostrando como referencia el lago Riñihue. Fuente: Google Earth.

1.3.2 Clima

Basado en los estudios realizados en la cuenca del río Valdivia por Amphos 21 para el gobierno de Chile (2012), se tiene que el clima imperante en alturas bajo los 1200 m s.n.m. (condición que presenta la zona de estudio) es de *Clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea*, y bajo la clasificación de Köppen se denomina como Cfb (s). Este clima se caracteriza por presentar precipitaciones a lo largo de todo el año, aunque en los meses de verano la precipitación caída es menor en comparación con los meses de invierno.

En cuanto a la temperatura, la media del mes más cálido supera los 10°C, mientras que las temperaturas mínimas se alcanzan entre junio y agosto (invierno en el hemisferio sur). La diferencia entre la temperatura máxima absoluta y la mínima absoluta es de alrededor de 20°C (entre 18°C y -3°C), la cual es más evidente en los meses invernales. Como dato específico de la zona, se tiene que la estación meteorológica del lago Riñihue ha registrado entre 1997-2016 precipitaciones anuales de 2300 mm; concentrándose principalmente entre los meses de mayo y agosto (Figura 1.5)

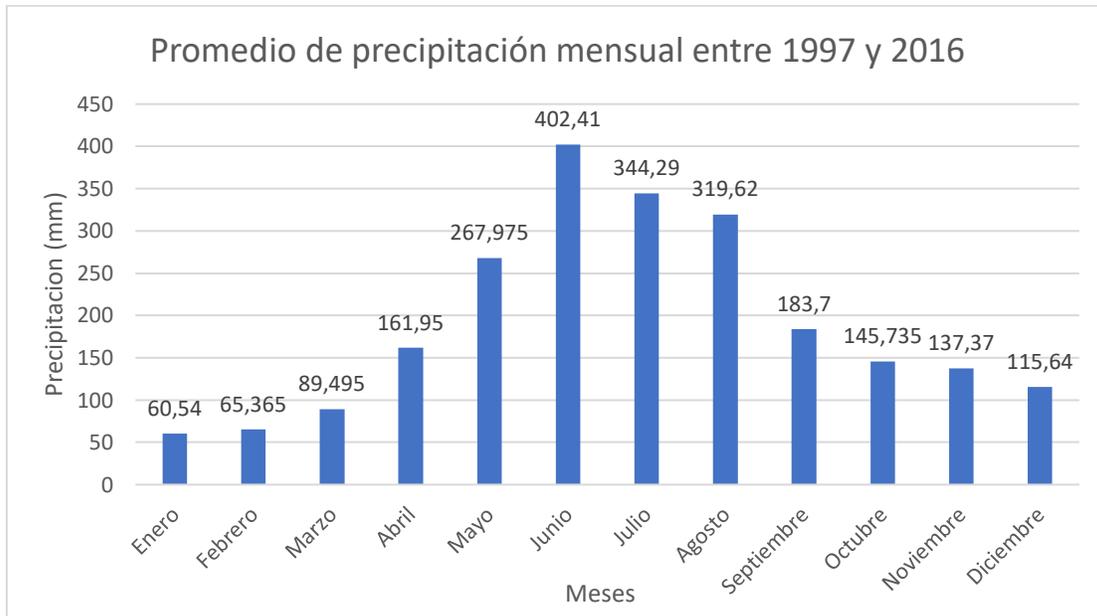


Figura 1.5 Promedio de precipitaciones mensuales de la estación Riñihue, ubicada en la cabeza del río San Pedro. Datos obtenidos de (CR)².

1.3.3 Sismicidad

En Chile fue registrado el sismo de mayor magnitud de momento en la era instrumental, el terremoto de Valdivia de 1960. Este fue precedido por 3 sismos de magnitud considerable; el primero, conocido como el terremoto de Concepción de 1960, sucedió a las 6.02 del 21 de mayo con epicentro en Cañete, región del Biobío, con una magnitud de 8,3 M_w . El segundo ocurrió a las 6.30 del 22 de mayo, con epicentro localizado en el parque nacional Nahuelbuta en la región de la Araucanía con una magnitud de 7,1 M_w . El último ocurrió a las 14.56, 15 minutos antes del gran terremoto de Valdivia, epicentro localizado en Purén, región de la Araucanía, con una magnitud de 7,8 M_w . Estos sismos generaron un daño considerable en la zona más cercana; sin embargo, fueron opacados por la magnitud y duración del terremoto ocurrido a las 15.11 del 22 de mayo, cuyo epicentro está localizado en las cercanías de Traiguén, con una magnitud de 9.5 M_w y 10 minutos de duración. Diversos estudios indican que el largo de la falla que generó este sismo tiene valores entre 850 y 950 kilómetros (Barrientos y Ward, 1990; Moreno et al., 2009; Fujii and Satake, 2013).

Tiempo de recurrencia de sismos de gran magnitud

Según Ruiz et al. (2017), el centro-sur de Chile fue una región del país con una escasa población en donde los eventos sísmicos de $M_w \sim 7.0$ pudieron no haber sido reportados por las crónicas históricas. De los grandes eventos sísmicos reportados (1575, 1737, 1837 y 1960), Cisternas et al. (2005) proponen que en esta zona se producen terremotos que presentan una variedad del tamaño de ruptura, por lo que no podrían agruparse, aunque se originen en la misma zona. Por lo tanto, la estimación de tiempo de recurrencia de los sismos propuestos por Nishenko (1985), a saber, de 128 ± 62 años, no estaría correcta debido a que este propone que estos eventos son similares y por ende deberían provenir de un mismo origen. Ruiz y Madariaga (2018) recopilaron los datos de grandes terremotos, concluyendo que la mayoría de Chile a excepción de la zona de Antofagasta y Atacama tiene un ciclo de terremotos de gran magnitud (sobre $M_w 8.4$) y tsunamigénicos, a razón de dos eventos por siglo.

Aceleración producida por el mega-evento de 1960

Ya que el evento sísmico se produjo en un momento donde no había medidores de aceleración, Ojeda (2018) basó su tesis de magister en modelar acelerogramas sintéticos del sismo en las ciudades principales del sur de Chile. Dentro de sus resultados, el acelerograma más cercano a la zona de estudio ubicado en Corral, a 15 km al oeste de Valdivia y a 82 km al sursuroeste de la zona de estudio, obtuvo aceleraciones sísmicas de $1057,4 \text{ cm/s}^2$ (1,078 g) en dirección EW, $1126,5 \text{ cm/s}^2$ (1,148 g) en dirección NS y $697,1 \text{ cm/s}^2$ (0,711 g) en la vertical. Con respecto a las aceleraciones en la zona de estudio, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) modeló las aceleraciones aproximadas percibidas en el territorio chileno, siendo la aceleración cercana a la zona de estudio un valor de 90% de g (980 cm/s^2) (Figura 1.6).

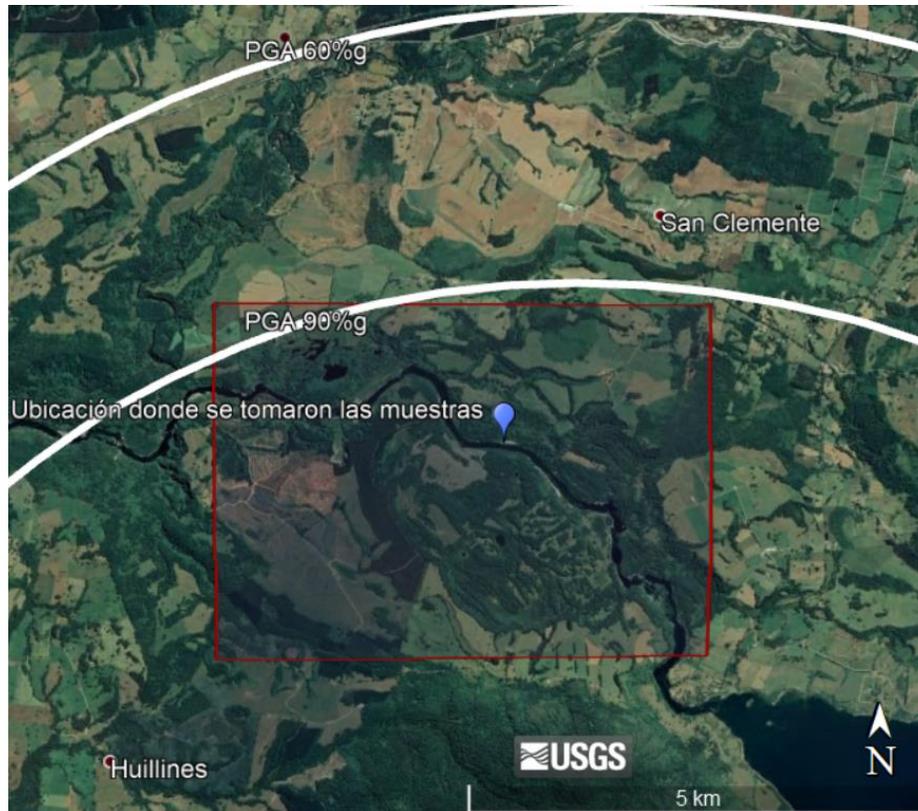
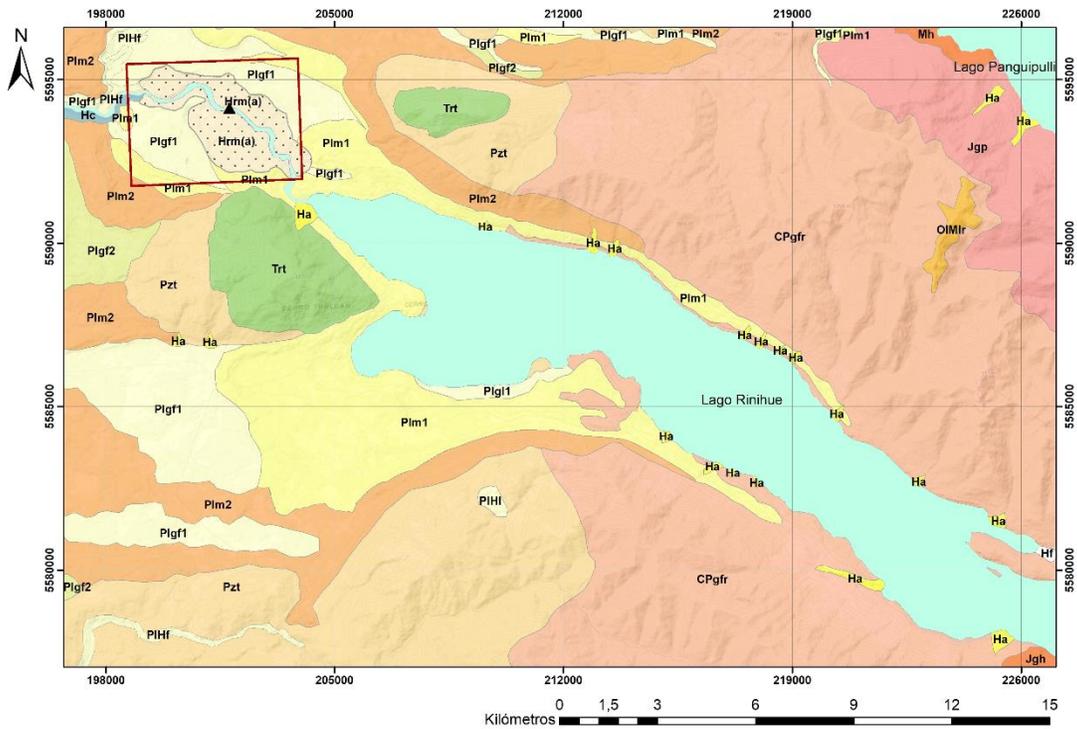


Figura 1.6 Representación de los valores de PGA percibidos en la zona de estudio. Fuente: Google Earth y USGS.

2. Marco Geológico

La composición y tamaño de grano de los sedimentos en que se originaron los deslizamientos influyen en su comportamiento geotécnico; por lo que es necesaria una revisión geológica de las rocas que afloran aguas arriba del Río San Pedro y, por ende, en las cercanías del lago Riñihue, las que aportaron material para estos depósitos.

De acuerdo con la carta geológica de la zona de Panguipulli-Riñihue (Rodríguez et al., 1999) en la zona de estudio se observan depósitos cuaternarios no consolidados de origen glaciofluvial, glaciolacustre, fluvial, lacustre y morrénico, stocks del mioceno, estratos volcanosedimentarios del oligoceno-mioceno, secuencia de rocas sedimentarias del triásico, rocas intrusivas del jurásico y del carbonífero pérmico, y un complejo metamórfico del paleozoico (Figura 2.1), los cuales se describen a continuación.



Leyenda

- | | |
|--|---|
| Deslizamientos multirrotacionales del Río San Pedro (Hrm(a)) | Glacifluviales de la Glaciación Santa María (Plgf2) |
| Abanicos aluviales del Holoceno (Ha) | Morrénicos de la Glaciación Santa María (Plm2) |
| Depósitos coluviales y conos de deyección (Hc) | Pórfidos andesítico-dacíticos hipabisales (Mh) |
| Fluviales del Holoceno (Hf) | Estratos de Lago Ranco (OIMlr) |
| Lacustres del Pleistoceno-Holoceno (PIHI) | Plutón Panguipulli (Jgp) |
| Fluviales del Pleistoceno-Holoceno (PIHf) | Plutón Huechulafquén (Jgh) |
| Glacilacustres de la Glaciación Llanquihue (Plgl1) | Formación Tralcán (Trt) |
| Glacifluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) | Batolito Futrono-Riñihue (CPgfr) |
| Morrénicos de la Glaciación Llanquihue (Plm1) | Complejo Metamórfico Trafún (Pzt) |

Figura 2.1 Mapa geológico de la zona, extraído de Duhart et al., 2003 y Rodríguez et al., 1999. El área delimitada por las líneas rojas es la zona de estudio mostrada en la figura 1.4; el triángulo negro indica el lugar de extracción de las muestras.

Paleozoico

Complejo Metamórfico Trafún (Campos et al., 1998) (Pzt)

Las rocas del complejo metamórfico Trafún que afloran en la cercanía de la zona estudiada se componen de metareniscas y pizarras, las cuales forman una secuencia rítmica constituida por niveles decimétricos. Estas presentan estructuras sedimentarias primarias, las cuales sugieren depositación subacuática, probablemente por corrientes turbidíticas.

Las metareniscas presentan tamaño de grano fino a grueso, con débil foliación. Presenta cuarzo, albita, titanita y moscovita como minerales primarios (detríticos), y presenta sericita y clorita como minerales secundarios. Las pizarras se presentan como capas delgadas de color gris a negro, con una marcada foliación dada por agregados de mica blanca y clorita; en menor proporción se encuentran cuarzo, epidota, titanita, minerales opacos y restos carbonosos. Las asociaciones mineralógicas presentadas en estas rocas definen a estas rocas como parte de la zona de clorita de la facies de esquistos verdes.

La edad mínima del protolito de este complejo está indicada por la relación de contacto que presenta con el Batolito Futrono-Riñihue (ca.300 Ma). Como edad máxima, se tiene una medición de edad U-Pb de 383 Ma. Ambos datos emplazan la edad de depositación del protolito como devónica-carbonífera.

Carbonífero-Pérmico

Batolito Futrono-Riñihue (Campos et al., 1998) (CPgr)

Es un intrusivo conformado por granitos, granodiorita y tonalitas de biotita-hornblenda, presenta grano medio a grueso. Este cubre un área total superior a 300 km². Intruye por el oeste al Complejo Metamórfico Trafún, mientras que al este está intruido por los plutones Panguipulli y Huechulafquén. Presenta orientación sinmagmática de minerales máficos y de inclusiones de tamaño centimétrico y de forma ovoide. Diversas dataciones de K-Ar y Ar-Ar en biotita y U-Pb en circones, con resultados entre 281,6±2.7/-4.2 Ma y 307,2±2,3 Ma, permiten asignar al batolito Futrono-Riñihue al intervalo Carbonífero Superior-Pérmico Inferior.

Triásico

Formación Tralcán (modificado de Aguirre y Levi, 1964) (Trt)

La formación Tralcán está compuesta por estratos de conglomerados de grano grueso de color rojo, intercalados con areniscas y lutitas; esta se presenta en los cerros Tralcán y Quilahuentru, donde se sitúa como un monoclinal, con un manto máximo de 20° al sur. El techo de esta secuencia es la actual superficie de erosión, mientras que su base contacta discordantemente sobre el Complejo Metamórfico Trafún. Los conglomerados, que se presentan en mayor medida en su base, son polimícticos, clasto soportados y presenta con mayor frecuencia dos tamaños de clastos, X₁ que va desde 4 a 7 cm y X₂ entre 10 y 15 cm, su matriz es arenosa; la coloración rojiza que presenta se asocia a la presencia de hematita tanto en los clastos como en la matriz; se intuye que estos clastos derivaron del Complejo Metamórfico Trafún, presentando metapelitas, metareniscas foliadas y cuarzo

lechoso. Estas secuencias de conglomerados presentan imbricación, las cuales indican direcciones de paleoflujos hacia el noreste (Blanco, 1998). Los niveles arenáceos más abundantes hacia el techo de esta formación incluyen areniscas, areniscas guijarrosas y en menor proporción conglomerados imbricados; los que señalan paleoflujos dirigidos hacia el noreste (N35E). Davis y Karzulovic (1961) reportaron flora fósil encontrada en los niveles sedimentarios finos; las cuales indican una edad rética (triásico superior).

Jurásico

Plutón Panguipulli (180-160 Ma) (Rodríguez et al., 1999) (Jgp)

Intrusivo dispuesto en dirección noreste, compuesto por granitos, granodioritas y tonalitas, que aflora en la ribera del lago Panguipulli y cubre un área de 120 km². Este intruye el Batolito Futrono-Riñihue (CPgfr) y la Formación Panguipulli, que no se observa en la zona de estudio. Se constituye por granitos de biotita, con fábrica isótropa, y tamaño de grano medio; estos están subordinados por granodioritas de biotita y hornblenda y tonalitas de hornblenda y biotita, que presentan tamaño de grano medio a grueso y localmente presentan xenolitos de la Formación Panguipulli. La edad máxima obtenida fue de 180±4 Ma, realizando K-Ar en biotita (Rodríguez et al., 1999) a un granito de biotita, encontrado en la ribera norte del lago Panguipulli. La edad mínima obtenida para este plutón es de 142±5 Ma, realizando K-Ar en anfíbola (Rodríguez et al., 1999) a una tonalita de hornblenda y biotita ubicada en la zona sureste; sin embargo, la mayor cantidad de dataciones realizadas en este plutón le da una edad mínima aproximada de 160 Ma.

Plutón Huechulafquén (170-160 Ma) (Rodríguez et al., 1999) (Jgh)

Intrusivo compuesto por tonalitas de hornblenda y biotita, con tamaños de grano medio a grueso. Este aflora en la ribera sureste del lago Riñihue, y cubre una superficie aproximada de 40 km². Presenta orientación sinmagmática de minerales máficos y en sus inclusiones básicas; intruye el Batolito Futrono-Riñihue. A este intrusivo se le ha realizado dos dataciones por K-Ar en biotita, con valores de 171 ±4 Ma (Munizaga et al., 1988) y 167±4 Ma (Rodríguez et al., 1999).

Oligoceno-Mioceno

Estratos de Lago Ranco (Campos et al., 1998) (OIMlr)

Secuencia de origen volcanosedimentaria compuesta por conglomerados, tobas, brechas y andesitas porfídicas gris verde; sus afloramientos se distribuyen en el sector oriental del lago Riñihue; donde se apoya en discordancia sobre los

granitoides paleozoicos del Batolito Futrono-Riñihue, intrusivos jurásicos del Plutón Huechulafquén y sobre la formación Panguipulli, que no se observa en la zona de estudio. Las dataciones de esta secuencia fueron realizadas fuera del área Panguipulli-Riñihue, usando el método K-Ar en roca total y en plagioclasa en rocas situadas al este del Lago Ranco se obtienen edades de $13,7\pm 2,0$ y $13,1\pm 0,6$ Ma (García et al., 1988) para roca total, y $20,7\pm 2,4$ Ma (Campos et al., 1998) para la plagioclasa.

Mioceno

Pórfidos andesítico-dacíticos hipabisales (Mioceno medio a superior) (Rodríguez et al, 1999) (Mh)

Compuesta por pequeños stocks y diques que presentan composición andesítica a dacítica, los cuales intruyen las unidades mesozoicas. El cuerpo más importante observado en el mapa corresponde a un stock de 1 km^2 que aflora en la ribera sur del lago Panguipulli. Este cuerpo presenta una composición andesítica, con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y olivinos, incluidos en una masa fundamental con textura pilotaxítica. La datación K-Ar en roca total entregó una edad de $9,6\pm 0,7$ Ma (Rodríguez et al, 1999).

Pleistoceno

Glaciación Santa María (Pleistoceno medio) (Porter, 1981)

Morrénicos (Rodríguez et al., 1999) (Plm2)

Depósitos morrénicos en su mayoría macizos. Presentan mala selección y son matriz soportados, compuestos por gravas gruesas subredondeadas a redondeadas, en una matriz de limos y arenas finas. Los clastos, que presentan estrías y facetas glaciares, en general se presentan frescos, aunque en algunos de ellos existen cortezas concéntricas de meteorización de entre 1 a 3 mm de espesor. Están compuestos por depósitos cementados, compactos y con evidencias de oxidación de los minerales máficos situados en la matriz, lo que les da tonalidades pardo-rojizas. Su edad no está bien determinada, aunque por las características que presenta se diferencian de los depósitos de la glaciación Llanquihue. Las edades mínimas de la glaciación Santa María ($57.800 \pm 2.300/-3.200$ y >39.000 AP) provienen de restos de madera de un suelo desarrollado entre depósitos morrénicos de la glaciación Santa María y Llanquihue (Mercer, 1976; Porter, 1981). Estos depósitos pueden representar los productos de la última glaciación del pleistoceno medio, ocurrida posiblemente entre 132.000 y 262.000 AP (Clayton et al., 1997).

Glacifluviales (Rodríguez et al., 1999) (Plgf2)

Depósitos de gravas, tienen moderada a buena selección, clasto soportados, presentan una escasa matriz de arenas gruesas, lentes de arena y limos. También se observa estratificación planar horizontal y granodecreciente. Los clastos son bien redondeados, algunos presentan formas remanentes de facetas glaciarias. Los depósitos muestran una débil meteorización, cementados con óxidos de hierro hasta 3 m de profundidad. Se observan óxidos de manganeso en la matriz y en la superficie de algunos clastos.

Su edad no está bien determinada, pero teniendo en cuenta el espesor de suelo que ha desarrollado, las relaciones de contacto con los depósitos de la Glaciación Llanquihue y su grado de meteorización se han asignado a la Glaciación Santa María (Porter, 1981).

Glaciación Llanquihue (Pleistoceno superior) (Mercer, 1976)

Morrénicos (Rodríguez et al., 1999) (Plm1)

Depósitos morrénicos con facies variables, desde clasto soportadas a matriz soportadas; con tamaños de clastos que varían desde gravilla y bloques, y los tamaños de la matriz varían entre arena y limo. Estos clastos están subredondeados a redondeados, algunos presentando estrías y facetas glaciales.

La posición de estos depósitos, su débil meteorización y su morfología se asemeja a los depósitos glaciares del lago Llanquihue (Porter, 1981). Al norte del lago Calafquén estos depósitos se encuentran cubiertos por la ignimbrita Licán (Moreno, 1993), las cuales se encuentran datadas por carbono-14 entre 13.570 y 14.320 AP (Moreno, 1993; Clavero, 1996). En consideración con los dos antecedentes anteriores, se le atribuye una edad mínima pleistocena superior (Mercer, 1983; Lowell *et al.*, 1995; Clayton *et al.*, 1997).

Glacifluviales (Rodríguez et al., 1999) (Plgf1)

Depósitos de gravas con moderada a buena selección, clasto soportadas, con matriz de arena gruesa, subredondeadas a redondeadas, presentando estratificación planar horizontal, cruzada y granodecreciente a escala métrica. Se encuentran estratificadas con lentes de arena y en algunos lugares con limos grises laminados. En cuanto a la litología de los clastos, en estos predominan las dacitas y andesitas, granitoides y pómez. Los clastos se presentan frescos, sin cortezas de meteorización, excepto algunos que posiblemente hayan sido retrabajados. Davis y Karzulovic (1963) construyeron una columna estratigráfica que contiene estos depósitos, presentando una potencia aproximada de 50 metros desde la superficie; estos depósitos quedaron expuestos debido a los deslizamientos ocasionados por el terremoto de 1960 (Figura 2.2).

Estos depósitos rellenan los valles mayores del Río San Pedro. En cuanto a su datación, se ha datado madera inserta en estos depósitos, con edades de 28.800 ± 800 , 29.000 ± 700 y >34.000 AP, este último sin error reportado (Laugenie, 1982); al este del área, en la ribera sur del Lago Pullinque, se ha datado madera incluida en las facies arenosas de estos depósitos, dando resultados de 13.410 ± 100 AP, lo que indicaría la edad mínima del último avance de la Glaciación Llanquihue en la zona.

Glaciolacustres (Rodríguez et al., 1999) (Plgl1)

Depósitos de arcillas, limos y arenas finas de color gris, rítmicamente laminadas en capas milimétricas, con una potencia de 3 a 5 m. Su laminación y los escasos dropstones que presenta define el origen de estos sedimentos como glaciolacustre; estos depósitos también son observados en la columna estratigráfica elaborada por Davis y Karzulovic (1963) (Figura 2.2); con su techo ubicado en la base de los depósitos glaciofluviales (aproximadamente a 50 metros de profundidad).

Pleistoceno superior-Holoceno

Fluviales (Rodríguez et al., 1999) (PIHf)

Depósitos de gravas con moderada selección, inmersas en una matriz de arena gruesa. Los clastos están bien redondeados y en parte, imbricados. Estos depósitos presentan estratificación planar horizontal, cruzada y en algunos lugares granodecreciente, llegando hasta arenas finas y limos. Forman terrazas, las cuales están parcialmente erosionadas, de 1 a 10 m de altura.

Lacustres (Rodríguez et al., 1999) (PIHI)

Depósitos de limos y arenas finas, de color pardo gris, laminadas rítmicamente en secuencias de 2 a 20 m de espesor, situados en La Montaña, al sur del lago Riñihue, donde presentan manteo de 5°E de origen desconocido. La edad de este depósito es incierta y su origen se puede relacionar a la obstrucción del drenaje por derrumbes en zonas cercanas al depósito.

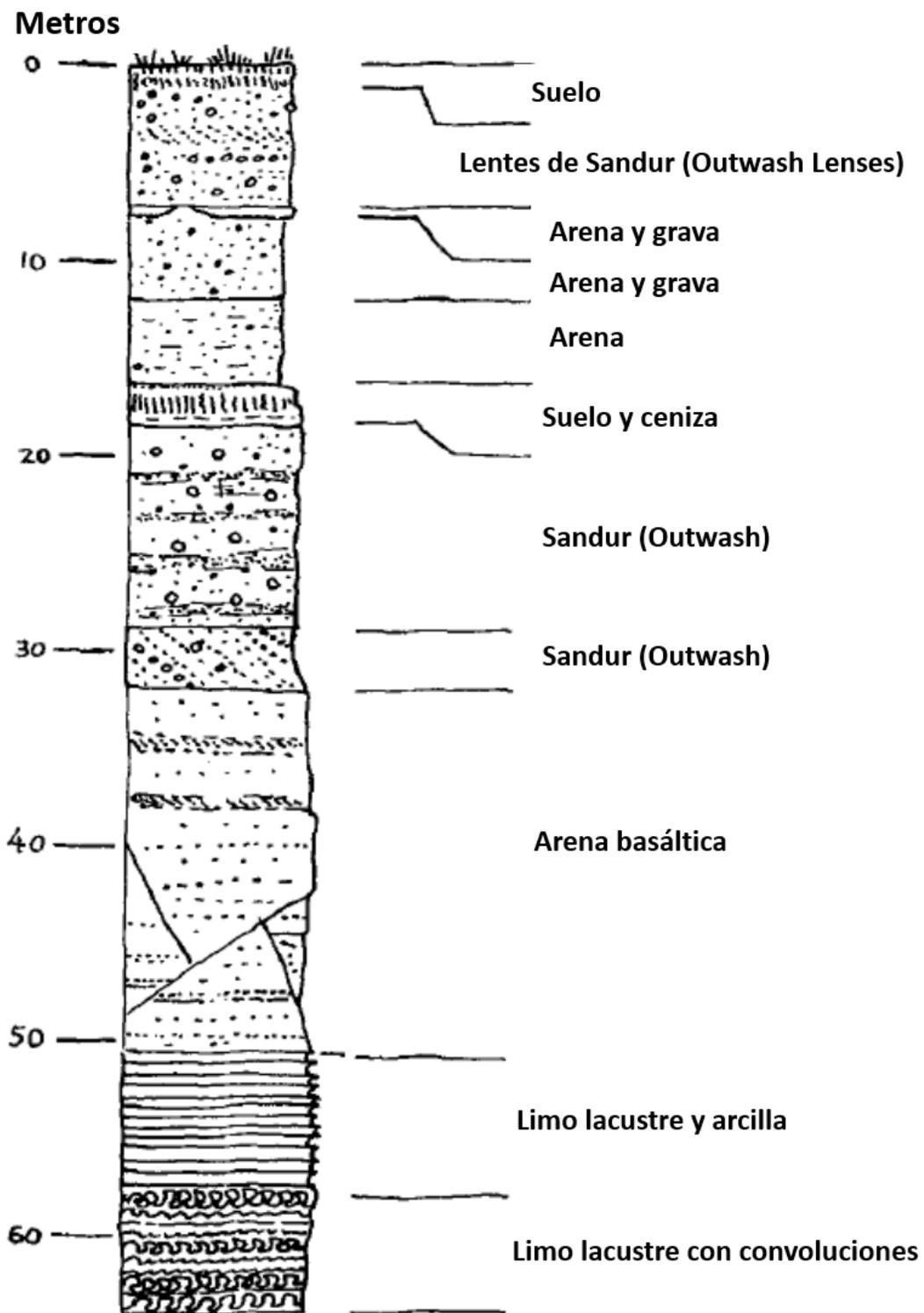


Figura 2.2 Sección columnar de los sedimentos expuestos en la zona este del escarpe principal del deslizamiento mayor, asociada a los depósitos glaciofluviales y glaciolacustres de la Glaciación Llanquihue (Extraído de Davis y Karzulovic, 1963).

Holoceno

Abanicos aluviales (Rodríguez et al., 1999) (Ha)

Depósitos de gravas clasto soportadas, con matriz arenosa y con escasos limos; poseen moderada a buena selección, con clastos subangulosos a subredondeados; presentan estratificación gruesa (de decenas de centímetros a metros) y estructuras de canales, las cuales presentaban estratificación cruzada planar. Estos depósitos poseen formas cónicas con inclinación igual o mayor a 10°, ubicados preferentemente en la desembocadura de ríos menores y contiguos al lago Riñihue.

Coluviales y conos de deyección (Rodríguez et al., 1999) (Hc)

Depósitos sedimentarios mal seleccionados, con bloques subangulosos a ángulos inmersos en una matriz de clastos finos (de tamaño arena a arcilla). Presentan una morfología de conos, y su inclinación supera en algunos casos los 30°. Se generan en las laderas de cerros abruptos, en escarpes rocosos y en la desembocadura de cauces de alta inclinación y recorrido corto.

Fluviales (Rodríguez et al., 1999) (Hf)

Depósitos de gravas, con moderada selección, clasto soportadas, redondeados a bien redondeados, y con algunos clastos imbricados. Localmente presentan intercalaciones lenticulares de arena y limos.

Deslizamientos multirrotacionales del río San Pedro (Rodríguez et al., 1999) (Hrm(a))

Depósitos mal seleccionados, matriz y clasto soportados, presentan clastos angulosos a subangulosos, con tamaños que oscilan entre gravas y bloques; sin estratificación. Presentan formas lobulares, y cordones de lomas que siguen la orientación del escarpe asociado al evento de remoción. Estos depósitos se atribuyen a los deslizamientos ocasionados por violentos sismos ocurridos en 1575 y 1960 (Davis y Karzulovic, 1963), los que desplazaron un volumen de material aproximado de 100 millones de metros cúbicos. Se ha interpretado que los movimientos principales observados en los deslizamientos son de deslizamiento en bloques (block gliding) y desplazamiento lateral (lateral spreading), también se observan movimientos secundarios como deslizamientos rotacionales (rotational slumping) y caída de detritos (debris fall) (Davis y Karzulovic, 1963).

También Davis y Karzulovic (1963) proponen una secuencia de eventos que sucedieron durante el movimiento del deslizamiento de mayor volumen, siendo representados en la figura 2.3. El deslizamiento comienza con el colapso de finas capas de limo y arena situadas en la base de la ladera producidos por el fuerte inicio de la actividad sísmica, haciendo que el material sobre ellas se encuentre soportado por una mezcla de limos, arenas y agua. La continua sismicidad desencadena que un gran bloque de sedimentos se mueva hacia el río, haciendo que las capas de

limo de la base se fracturen, haciéndose un material semifluido cuando se mezcla tanto con el agua del río como del agua de las capas colapsadas de limo y arena. Una vez que el bloque mayor se sobrepasa la zona donde se situaba el río, detrás de este bloque se separan bloques más pequeños, generando deslizamientos rotacionales. Mientras los eventos anteriores ocurrían, en el escarpe principal se generaban caídas de detritos, llenando el vacío dejado por el movimiento de los bloques. Una vez disminuida la velocidad de movimiento del bloque mayor, el peso de este provoca que el material semifluido subyacente fuera expulsado.

Hauser (1993) teoriza que estos deslizamientos se debieron a la saturación de estratos de origen lacustre no consolidados, de aproximadamente 80 m de espesor, situados sobre sedimentos impermeables, que colapsaron por fluidización debido a sollicitación sísmica.

Se han realizado estudios geomorfológicos del deslizamiento de mayor tamaño producido por el terremoto de 1960 (Araya et al., 2014), obteniéndose que, a pesar de la erosión del depósito, aún se distinguen sus partes principales; que el cuerpo del deslizamiento ha avanzado hacia el sur moviendo el lecho del río San Pedro, debido a un reajuste de los bloques y depósitos en la zona; y que el escarpe principal presenta el mayor grado erosivo, haciendo que disminuya considerablemente su pendiente.

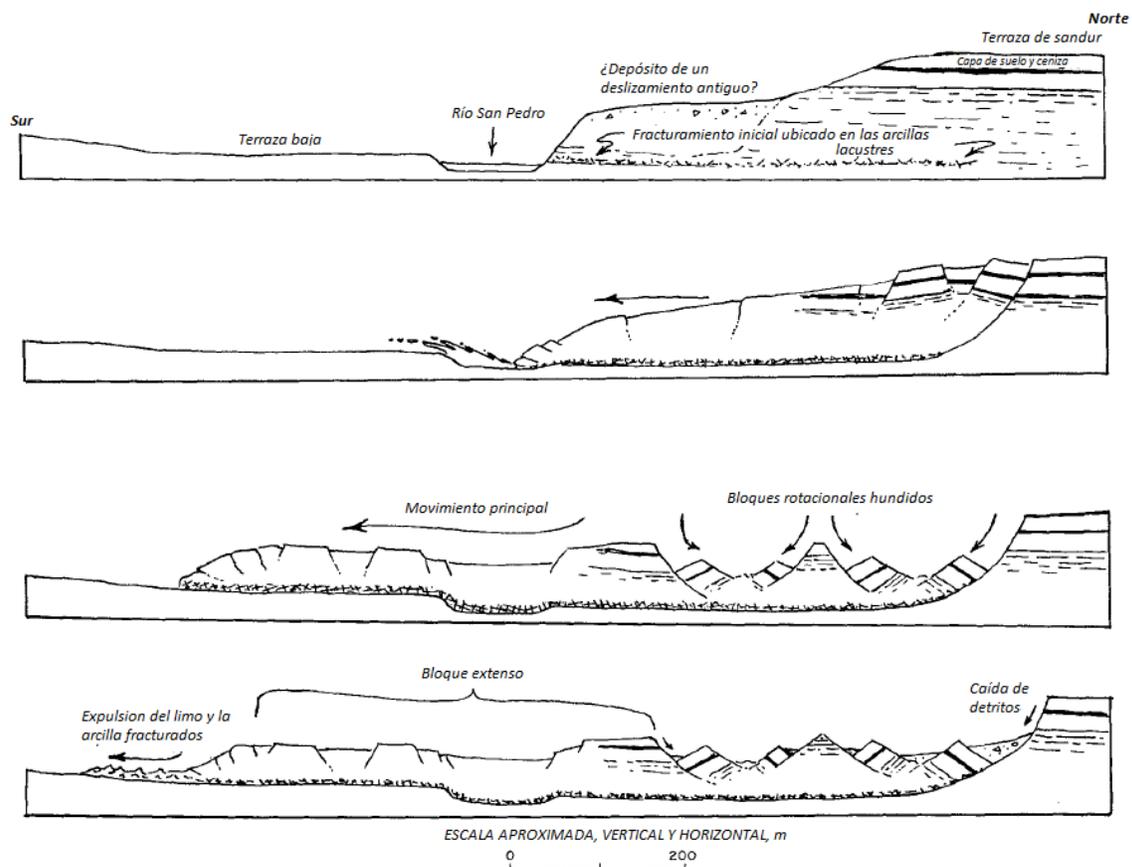


Figura 2.3 Secciones que muestran la interpretación del movimiento del deslizamiento de mayor tamaño. La escala y el perfil son aproximados. Extraído de Davis y Karzulovic (1963).

3. Marco teórico

En este capítulo se presentan los conceptos principales relacionados al estudio realizado, como también las metodologías utilizadas para determinar los parámetros geológicos y geotécnicos de las muestras estudiadas, presentando sus fundamentos, equipamiento y procedimientos asociados. Asimismo, se mencionan los fundamentos del software a utilizar para el análisis de estabilidad.

3.1 Remociones en masa

3.1.1 Definición de remoción en masa

Las remociones en masa se definen como el movimiento descendente de un volumen de suelo, roca o ambos (Cruden, 1991), producido por la inestabilidad de la zona en la cual se genera la remoción. Esta inestabilidad puede ser causada por diversos factores, tales como la presencia de agua ajena a las condiciones usuales de la zona (precipitación o variación de las aguas subterráneas), erosión y sismos (González de Vallejo, 2002). Este movimiento se considera como un proceso gravitacional, debido a que el volumen de material se desplaza a una cota inferior.

3.1.2 Clasificación de remociones en masa

Una de las bases para clasificar las remociones en masa es la clasificación formulada por Varnes en 1978 que ocupa dos términos para definir una remoción: el primer término se refiere al tipo de movimiento que realiza la remoción (caída, flujo, deslizamiento, dispersión, volcamiento y complejos), y el segundo se refiere al tipo de material que está compuesto (roca, tierra y detritos) (Figura 3.1). Esa clasificación fue posteriormente actualizada por Cruden y Varnes (1996); añadiendo nuevos atributos con que se pueda definir la remoción, tales como la actividad, velocidad de movimiento y contenido de humedad; y también eliminando la clasificación del tipo de movimiento "complejo", debido a que este término puede ser añadido a las nuevas características formuladas para describir la remoción, y también puede ser reemplazado al combinar los otros 5 tipos de movimiento disponibles.

Los tipos de movimiento se definen de la siguiente manera (Varnes, 1978):

- **Caída:** Son movimientos abruptos de masa de material geológico, como rocas y bolones, que se despegan de laderas escarpadas o de acantilados. Esta separación ocurre a lo largo de discontinuidades, como por ejemplo en fracturas. Las caídas están fuertemente influenciadas por la gravedad, la meteorización mecánica y la presencia de agua intersticial.

- Volcamiento: son definidas por la rotación hacia delante de una unidad o unidades sobre un punto de pivote; este movimiento está asociado a las fuerzas ejercidas por unidades adyacentes o por fluidos en las grietas.
- Deslizamiento: Se refiere al movimiento de masa donde existe una zona distintiva de debilidad que separa el material del deslizamiento del material estable. Los tipos principales de deslizamiento son los rotacionales y los traslacionales.
 - Deslizamiento rotacional: La superficie de ruptura es curva, cóncava hacia arriba y el movimiento del deslizamiento es rotacional sobre un eje que es paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento.
 - Deslizamiento traslacional: El material se desplaza por una superficie aproximadamente planar, con poca rotación o inclinación hacia atrás.
- Propagación lateral: Son distintivas a los demás tipos de movimiento debido a que usualmente ocurren en superficies con una baja pendiente o en terreno plano. Este ocurre por la licuefacción del material, generalmente desencadenado por un movimiento rápido; como el que ocurre por un terremoto.
- Flujo: Existen cinco categorías de flujos, que se diferencian entre ellos por características fundamentales:
 - Flujo de detritos: Es un movimiento rápido de masa, la cual es una combinación de suelo suelto, roca, materia orgánica, aire y agua que se mueve como un lodo, fluyendo hacia cotas inferiores de altura. Los flujos de detritos presentan un material fino, no superando el 50% del volumen total. Usualmente son causados por un esparcimiento de agua intenso en el terreno debido a altas precipitaciones o por un derretimiento rápido de nieve.
 - Avalancha de detritos: Es una variedad más rápida, de mayor extensión y de mayor envergadura de un flujo de detritos. Se caracteriza también por no presentar una canalización y es relativamente poco profundo.
 - Flujo de tierra: El material de la ladera es licuado y se desplaza, dejando una depresión en el terreno de origen. El flujo es elongado y usualmente ocurre en material de grano fino, en rocas que presenten arcillas o en laderas bajo condiciones saturadas de agua.
 - Flujo de barro: Es un flujo de tierra que presenta la humedad suficiente para fluir rápidamente y contiene al menos un 50% de granos de tamaño arena, limo y arcilla.
 - Reptación: es un movimiento extremadamente lento, estable y pendiente abajo del suelo o roca que se encuentra en la ladera. Este movimiento es causado por un estrés de cizalle suficiente para producir deformación permanente, pero no una fractura de cizalle. Este tipo de movimiento se puede dividir en tres tipos principales:
 - Estacional: El suelo que está en movimiento es afectado por los cambios de humedad y temperatura propias de la estación.
 - Continuo: El estrés de cizalle continuamente supera la resistencia del material.

- Progresivo: La ladera está alcanzando el punto de falla, para cambiar a otro tipo de movimiento de masa.

En cuanto a los materiales de las remociones, se definen mediante los siguientes conceptos (Varnes, 1978):

- Roca: Masa dura o firme que estaba intacta y estaba en su lugar natural antes de la iniciación de movimiento.
- Tierra: Se considera como el material en donde el 80% o más de las partículas que la componen tienen un tamaño inferior a 2 mm, el cual es el límite superior de las partículas de tamaño arena.
- Detritos: Contienen una proporción importante de material grueso, es decir, del 20 al 80% de las partículas tienen un tamaño mayor a 2 mm.

TIPO DE MOVIMIENTO		TIPO DE MATERIAL		
		ROCA BASE	SUELOS DE INGENIERIA	
			Predominantemente grueso	Predominantemente fino
CAIDAS		Caída de roca	Caída de detritos	Caída de tierra
VOLCAMIENTOS		Volcamiento de roca	Volcamiento de detritos	Volcamiento de tierra
DESPLAZAMIENTOS	ROTACIONAL	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detritos	Deslizamiento de tierra
	TRASLACIONAL			
DISPERSION LATERAL		Dispersión de roca	Dispersión de detritos	Dispersión de tierra
FLUJOS		Flujo de roca (arrastre profundo)	Flujo de detritos (arrastre de suelo)	Flujo de tierra
COMPLEJO		Combinación de dos o mas tipos principales de movimiento		

Figura 3.1 Clasificación abreviada de los movimientos de ladera. Extraído de Varnes (1978).

3.1.3 Remociones en masa desencadenadas por sismicidad

Keefe ha clasificado las remociones en masa desencadenadas por sismicidad: la realizada en 1984 y presentada en el Anexo A, indica el tipo de movimiento, profundidad, contenido de agua y disrupción del deslizamiento; mientras que en su trabajo de 2002 clasifica las remociones en masa desencadenadas por sismicidad en tres categorías:

- Desmembradas: La remoción se compone de fragmentos de variados tamaños de roca y suelo, desplazándose pendiente abajo, rodando y botando, por deslizamientos traslacionales o mecanismos complejos que presentan tanto deslizamiento como flujos. Las remociones de este tipo son típicamente delgadas, a excepción de las avalanchas de roca, que presentan un mayor volumen de material.
- Deslizamientos coherentes: Presentan deslizamientos del tipo rotacional y traslacional y flujos de tierra lentos. Este tipo de deslizamiento exhibe un leve desmembramiento interno y se constituye por bloques que se desplazan poca distancia. Estas remociones son de movimiento lento y alcance inferior a 100 m.

- Esparcimientos laterales y flujos: Tienen comportamiento predominante de flujo y ocurren solo en suelo; las cuales sufren licuefacción media superficial o total.

Diversos estudios discuten el uso de la aceleración peak (PGA) para relacionar la ocurrencia de remociones en masa y la magnitud del sismo (Keefer, 2002; Douglas, 2003; Khazai & Sitar, 2004); en general, los estudios indican que el uso del PGA puede ser engañoso, ya que la correlación obtenida por estos estudios puede estar sesgada debido a las características de los terrenos afectados por los terremotos, y además el PGA solo indica la agitación en las estructuras durante un corto periodo de tiempo (menor a 0,3 s). Por ello, para comprender la generación de las remociones en masa se toman en consideración otros factores relacionados, como la amplificación topográfica, la resistencia de los materiales, entre otros. Un factor que no destaca en este tipo de remociones es la presencia de vegetación y de suelo, ya que no tienen un impacto apreciable en el fallamiento producido por sismicidad, como sucede en el caso de los deslizamientos gatillados por precipitación (Khazai & Sitar, 2004).

3.1.4 Deslizamientos debido a actividad sísmica

Uno de los agentes más importantes para desencadenar deslizamientos son los sismos; estos modifican los esfuerzos aplicados a la ladera en un tiempo acotado, produciendo su inestabilidad.

Huang (2015) describe las diferencias que existen entre las remociones de gran escala gatilladas por sismos de las causadas por gravedad.

Para el caso de las remociones desencadenadas por sismicidad, el escarpe de la cabeza del deslizamiento es rugoso y de alto ángulo debido a la tensión de falla, en comparación con el escarpe suave y en forma de arco de los deslizamientos gravitacionales, ocasionados por la tensión de cizalle.

Lo anterior se debe a la distribución de esfuerzos en la ladera: en los deslizamientos gravitacionales el esfuerzo principal mayor se encuentra paralelo a la ladera y el esfuerzo principal menor se encuentra vertical a la superficie de la ladera, lo que provocan que la concentración de esfuerzos de cizalle se ubiquen en el plano de debilidad de la ladera, y una vez que se desarrolle la deformación de cizalle, se concentra la tensión de falla en la zona superior de la ladera, provocando grietas de falla.

En cambio, bajo condiciones sísmicas, el esfuerzo principal menor se aplica a la ladera como una secuencia de tracción y compresión por la influencia de las ondas sísmicas, y, considerando que la fuerza sísmica horizontal es mayor que la resistencia a la tracción de la roca, se generan grietas de falla. La continua sismicidad hace que las grietas se profundicen, se abren y, subsecuentemente, se genera la superficie de cizalle en la base de la ladera, gatillando el deslizamiento. La representación de las superficies de falla generadas por gravedad y por sismicidad se muestran en la Figura 3.2.

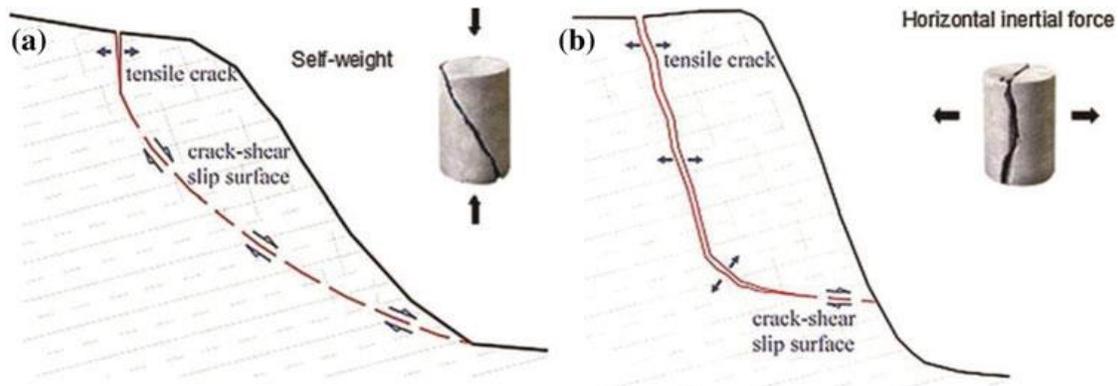


Figura 3.2 Deformaciones típicas, grietas de tensión (tensile crack), las superficies de deslizamiento (crack-shear slip Surface) y modos de falla de una ladera de roca. (a) bajo condiciones normales de gravedad. (b) bajo condiciones sísmicas. Extraído de Huang, 2015.

3.2 Caracterización geológica del suelo

3.2.1 Descripción visual

Descripción macroscópica

Para clasificar una muestra de suelo, se deben tener en cuenta las diferentes características que pueden ser observadas mediante lupas o a simple vista:

- **Color:** Es la percepción visual de las ondas electromagnéticas reflejadas por un objeto; en cuanto a la sedimentología, esta característica puede ser una indicadora de los procesos que ha sido sometido el suelo estudiado o de la presencia de ciertos compuestos (Owens y Rutledge, 2005). Existen múltiples codificaciones para definir un color determinado, específicamente para los suelos se ocupa la tabla de colores modificada de Munsell que solo incluye la porción necesaria para colores de suelos, que es aproximadamente un 20% de la tabla completa. Esta clasificación usa tres términos para definir un color: tono, que está relacionado a la longitud de onda dominante de la luz; luminosidad, que mide el valor de cantidad de luz definido mediante una función; y la saturación, que mide la pureza o fuerza del color, aumentando su valor si el color presenta menos tonos grisáceos (Owens y Rutledge, 2005)
- **Estructuras sedimentarias:** Son rasgos presentes en los estratos estudiados, que pueden ser formados en respuesta a los procesos que depositaron el sedimento, llamadas estructuras primarias, o modificados durante o posterior a la depositación, llamadas estructuras secundarias (Allen, 1983) (Einsele et al., 1991). Estos son indicios de que agentes transportaron a los sedimentos, como por ejemplo el aire o el agua. También pueden ser indicativos del ambiente en que se formaron los depósitos (McCarroll y Rijdsdijk, 2003) (Nichols, 2009).

Además de estas características, es posible estimar los diferentes tamaños de grano que presenta el suelo y definir la composición de los granos de tamaño apreciable.

Equipamiento

Para realizar la descripción macroscópica se utilizó una lupa binocular de marca Olympus y modelo SZ61 (Figura 3.3.a), la cual presenta aumentos de 6,7x a 45x; una regla con escala milimétrica; y las tablas de colores de Munsell (Figura 3.3.b).

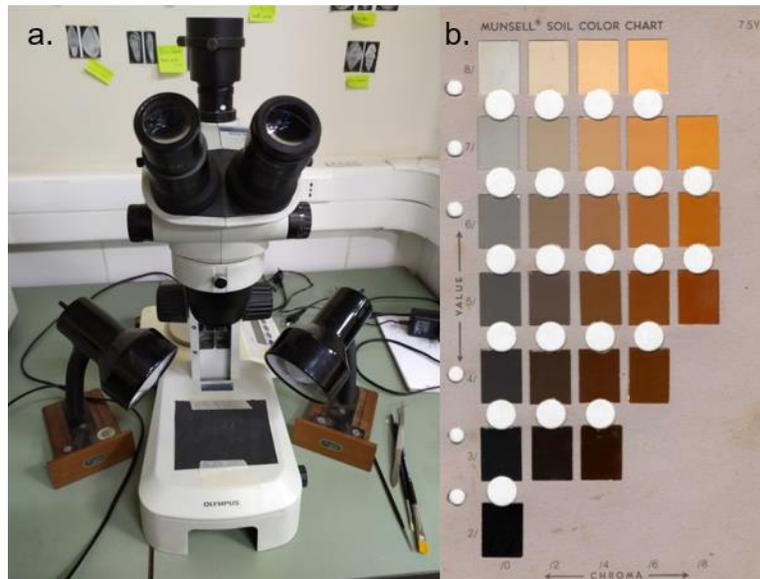


Figura 3.3. a. Lupa binocular Olympus SZ61. b. Una de las tablas de colores de suelo de Munsell.

Descripción microscópica

La descripción microscópica es una acción necesaria para la identificación de algunos de los minerales presentes en las muestras de suelo y roca, ya que estos pueden presentar tamaños muy pequeños para ser observados con una lupa de bajo aumento. La mayoría de los estudios petrográficos se enfoca en el reconocimiento de los silicatos presentes, los cuales si tienen un grosor muy pequeño pueden dejar pasar la luz por ellos; por lo tanto, si se conocen las propiedades ópticas que tiene cada mineral, pueden reconocerse con cierta facilidad. Esto último es realizado en un microscopio petrográfico, el cual presenta 2 polarizadores de luz cuya función es hacer que la luz transmitida por la fuente se propague en solo un eje, permitiendo la identificación de las propiedades que varían dependiendo de la orientación del cristal.

Equipamiento

El equipo utilizado para la realización de esta descripción consiste en un microscopio petrográfico marca Olympus modelo BX51 (Figura 3.4), el cual presenta un lente ocular de un aumento de 10x, y 4 diferentes lentes objetivos, con aumentos de 5x, 10x, 20x y 40x; la realización de las imágenes de las muestras fue realizada mediante una cámara externa, debido a que la cámara añadida al microscopio

abarcaba un tamaño muy pequeño para mostrar algunas características de la muestra.



Figura 3.4 Microscopio petrográfico Olympus BX51.

3.2.2 FTIR

La espectrometría infrarroja es un método en el cual se pueden identificar diferentes tipos de materiales, esta utiliza el espectro infrarrojo de la luz, la cual se emite al material. El material, dependiendo de los enlaces atómicos que presente, su disposición molecular y los elementos que presente absorberá diferentes longitudes de onda del espectro y en diferente proporción, ya que los enlaces presentes en el material tienen frecuencias de vibración específicas para cada radiación (Villaseñor, 2005); por lo que el espectro resultante es identificatorio, y único, del material estudiado.

Para los minerales, se ocupa la radiación infrarroja media (de 2,5 a 40 μm) en su análisis, ya que es la región donde la mayoría de los minerales formadores de roca tienen sus bandas fundamentales de vibración (Farmer 1974; Salisbury, 1993).

A las medidas realizadas por el equipo se les aplica una herramienta matemática conocida como transformada de Fourier (FT), la cual toma todas las señales y las representa en solo un gráfico, el cual puede ser comparado de forma más efectiva con otros análisis realizados.

El análisis realizado al espectrograma se basa en la comparación de diferentes espectrogramas de referencia, en donde se observan las longitudes de onda que presentan la mayor absorción; teóricamente, la muestra debería presentar los minerales que tengan una mayor coincidencia de estos peaks. En cuanto a la cantidad que presenten estos minerales en la muestra, se tiene que la absorción

observada es directamente proporcional a la cantidad de material que la muestra presente (Bertaux et al., 1998).

Por lo tanto, el análisis requiere de una combinación entre los espectrogramas de referencia para representar de la forma más fiel el espectrograma de la muestra analizada. Esto último tiene el limitante de que la suma de los porcentajes de los minerales no debe exceder el 100%.

Equipamiento

Este análisis se realizó en un espectrómetro, denominado Spectrum 100, de la marca Perkin Elmer, el cual se maneja mediante el software Spectrum. Sin embargo, este espectrómetro no realiza análisis al material puro, sino que se aplica a un material con una preparación previa. Esta preparación, denominada “método de disco de KBr”, está descrito en Bertaux et al. (1998).

El equipamiento necesario para la fabricación de los discos de KBr es el siguiente: una malla 200 (0,0075 mm de abertura) (Figura 3.5.a), vidrios parabólicos, un mortero de ágata, un agitador Specamill (Figura 3.5.b) con un pequeño mortero cilíndrico y esferas de ágata, al menos un gramo de KBr, un molde para el disco a formar (Figura 3.5.c), una prensa hidráulica Specac (Figura 3.5.d) y un horno que permita fijar la temperatura a 110 °C.



Figura 3.5 Instrumentos utilizados en la fabricación de los discos de KBr. a. Malla número 200. b. Agitador Specamill. c. molde de la pastilla. d. Prensa hidráulica manual Specac (b, c y d fueron extraídos de la página de venta de Specac).

Preparación y medición de la muestra

Para la preparación del disco de KBr, se debe tener al menos una masa de 0,03 g de la muestra que pase por la malla 200. Esta muestra se muele en un mortero de ágata hasta que se observe que se encuentra homogeneizada; de este producto se

extraen 0,01 a 0,02 g, los que se colocan dentro de un mortero cilíndrico con acetona y esferas de ágata, la que se sella y se instala en el agitador Specamill, el cual debe estar funcionando por al menos 2 horas y media. Después de finalizar la agitación, se deja secar la muestra en un vidrio parabólico para que se evapore correctamente la acetona alrededor de 1 hora. De la muestra resultante, la cual presenta tamaños de grano inferior a 2 μm , se extraen 0,0025 g, y a esta se le añade suficiente KBr para obtener una mezcla de 1 g. Se muele nuevamente con el mortero de ágata durante 10 minutos; de la mezcla resultante se extraen 0,3 g que se colocan en el molde de la pastilla, en donde se le aplica una presión de 0,5 bar durante 30 minutos; después de este tiempo al molde (que aún tiene la presión de 0,5 bar) se le aplica presión mediante la prensa hidráulica Specac hasta llegar a 10 ton/cm^3 , en donde se suelta la prensa inmediatamente. Finalmente se saca la pastilla formada, la cual debe estar por al menos 24 horas en un horno a 110°C.

Antes de realizar la medición a la pastilla elaborada, se realiza una medición sin muestra en el equipo Spectrum, la cual mide la absorbancia de fondo (background). La medición realizada a la muestra entrega un gráfico de absorbancia vs longitud de onda, la cual será analizada posteriormente. Si la medición no pasa los tests de calidad respectivos (QAC rojo), una de las opciones es moler la pastilla analizada en el mortero de ágata por más tiempo e intentar formar la pastilla nuevamente; si esto sigue dando malos resultados, se opta por realizar de nuevo todo el proceso descrito anteriormente.

Análisis cualitativo y cuantitativo de los datos

Los gráficos obtenidos presentan los datos de absorbancia para las longitudes de onda entre 4000 a 365 cm^{-1} , teniendo valores cada 1 cm^{-1} . Este espectro es el resultado del promedio de 10 mediciones efectuadas sucesivamente a la pastilla. Para realizar el análisis cuantitativo y cualitativo de las muestras, es necesario aplicar dos herramientas de Spectrum al gráfico generado: El suavizado, el cual disminuye la variación de las absorbancias medidas, haciendo que disminuyan la cantidad de peaks de la muestra y dejando los más notorios y por ende los más útiles para el análisis; y la corrección de línea base, donde los valores locales más bajos se desplazan a la absorbancia mínima observada, lo que mejora el aspecto del gráfico y facilita la labor de comparación con los gráficos de minerales de referencia a disposición (Figura 3.6).

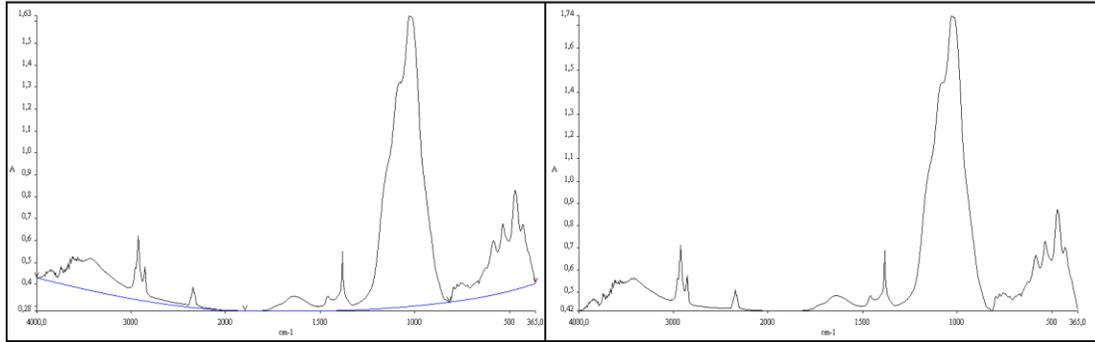


Figura 3.6 Efectos de la corrección de la línea base en el grafico absorbancia (%) vs longitud de onda (cm-1) (Espectrograma obtenido de la muestra SP1803-B).

3.2.3 Granulometría láser

La granulometría láser es un método alternativo para la cuantificación de tamaños de granos por muestra; esta toma en consideración la relación inversamente proporcional del tamaño del grano con respecto al ángulo de dispersión de la luz emitida, es decir, a mayor tamaño de grano se presenta un menor ángulo de dispersión, mientras que para tamaños menores se observa un mayor ángulo de dispersión. Para obtener la distribución de tamaño de grano, se analizan los patrones de dispersión obtenidos usando la teoría de Mie de la dispersión de la luz. Cabe destacar que para usar esta teoría es necesario saber el índice de refracción de la muestra y del dispersante del material.

Para el análisis granulométrico del suelo, se debe tener presente los siguientes conceptos, extraídos de las normas ASTM D-422 y la RAE:

1. Promedio (\bar{X}): También denominado media aritmética, se obtiene al sumar todos los valores del conjunto $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ y dividir por el número de sumandos n ; esto es representando en la ecuación 1.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

2. Mediana (M_e): Es el valor que ocupa la posición central en un conjunto de datos ordenados
3. Moda: Es el valor con mayor frecuencia en un conjunto de datos
4. D_x : Se refiere al diámetro que representa el porcentaje x más fino de la muestra; para entender de mejor manera esta definición se tiene, por ejemplo, $D_{10} = 100 \text{ nm}$: esto significa que el 10% de los granos de la muestra tienen un tamaño menor a 100 nm.
5. Coeficiente de uniformidad (C_U): Se define mediante la ecuación 2.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

Este indica que tan diferentes se encuentran los diámetros D_{10} y D_{60} ; sin embargo, este coeficiente solo indica la diferencia de tamaños, y no si existe entre ambos diámetros alguna inexistencia de granos de cierto tamaño.

6. Coeficiente de curvatura (C_c): Se define mediante la ecuación 3.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (3)$$

Este representa la “forma” de la curvatura que existe entre los diámetros D_{10} y D_{60} , si el valor obtenido es muy diferente de 1 indica una falta de granos de los tamaños que se encuentran entre D_{10} y D_{60} .

Equipamiento

El equipo que se utilizó para esta caracterización es un granulómetro laser Mastersizer 2000 de la marca Malvern (Figura 3.7.a), el cual se manipula mediante el software del mismo nombre. Al granulómetro se le adhiere un equipamiento adicional, llamado Hydro G, en donde se añade la muestra al medio dispersante elegido. Esta máquina puede bombear, agitar y aplicar ultrasonido a la muestra en diferentes magnitudes, dependiendo del método específico que se quiera seguir.

El granulómetro puede medir tamaños de grano entre $0,02 \mu\text{m}$ y $2000 \mu\text{m}$, presentando una precisión de $\pm 1\%$. Sin embargo por precaución la muestra por analizar debe pasar por la malla 18 (1 mm de abertura) (Figura 3.7.b) en vez de la malla 10 (2 mm de abertura); esto se debe a que, aunque el granulómetro sea capaz de medir tamaños hasta 2 mm, las mallas que se usan para separar los tamaños de grano son de aberturas cuadradas, y la abertura indicada por cada malla es la medida de los lados de los cuadrados, no de sus diagonales; por lo que si se añade tamaños superiores puede deteriorar la máquina.



Figura 3.7. a. Granulómetro Laser Mastersizer 2000; a la izquierda de la foto se observa el equipo Hydro G.
b. Malla n°18 utilizada para el tamizaje.

Consideraciones para la medición

Antes de efectuar la medida a la muestra, se debe añadir al software las propiedades ópticas del medio dispersante y el material a medir: para este estudio el medio dispersante fue agua, y el índice de refracción para todos los materiales fue el designado por defecto (1,52), ya que su valor es muy similar a los valores

presentes en los silicatos más comunes, por lo que se puede considerar como un promedio de estos.

Para efectuar a cabo la medida, fueron consideradas las observaciones hechas en Ryżak y Bieganowski (2011), en donde concluían que para la medición de suelos realizada en un Mastersizer2000 se debe elegir la velocidad de 2500 rpm para la bomba y el agitador, y que la dispersión de granos de suelo tiene dos métodos equivalentes: un método químico usando la solución de hexametáfosfato, o de manera física, el elegido para este trabajo, usando el ultrasonido. El artículo anteriormente nombrado también indica el tiempo de duración del ultrasonido, este se debe aplicar a la muestra durante 4 minutos.

Procedimiento

Una vez añadidas las condiciones anteriormente mencionadas al software que maneja el equipo, se añade una porción de la muestra al Hydro G; observando que la oscuración (medida que indica que tanta muestra se encuentra en el granulómetro laser) se sitúe entre los valores referenciales, típicamente entre 10 y 20%.

Posterior a la aplicación del ultrasonido por 4 minutos, se inicia la medición de la muestra. De la medición se obtienen los valores porcentuales para todos los intervalos de tamaño de grano. Como observación, el software permite cambiar el número de mediciones realizadas a una misma muestra.

3.3 Caracterización geotécnica del suelo

3.3.1 Límites de Atterberg

Estos son parámetros inicialmente definidos por Albert Atterberg para delimitar el comportamiento de los suelos finos de acuerdo con su humedad; posteriormente fueron modificados por Arthur Casagrande al añadir un método que mida empíricamente estos límites. De acuerdo con la norma ASTM D4318, los límites son definidos de la siguiente manera:

1. Límite Líquido (LL): Humedad necesaria para pasar de un estado plástico a un estado líquido. Se define como la humedad que presenta el suelo cuando se juntan las mitades, separadas por el acanalador, al realizar 25 golpes en la máquina de Casagrande.
2. Límite Plástico (LP): Humedad necesaria para pasar de un estado semisólido a un estado plástico. En práctica, es la humedad máxima para formar cilindros de 3 mm con el suelo, sin que estos se fragmenten en trozos de 0,5 a 1 cm.
3. Índice de plasticidad (IP): El rango de humedad en donde el suelo se comporta de forma plástica, numéricamente es la diferencia entre el límite líquido y el plástico, como se observa en la ecuación 4.

$$IP = LL - LP \quad (4)$$

Donde LL y LP se estiman a números enteros.

Para el análisis adecuado de los límites de Atterberg, se grafican los datos de índice de plasticidad y límite líquido para cada muestra en la carta de plasticidad (Figura 3.8), esta clasifica los tipos de suelo fino de acuerdo con su tamaño de grano (limos y arcillas) y de acuerdo con su plasticidad (baja o alta), obteniéndose diferentes combinaciones de propiedades. Esta clasificación, en conjunto con la clasificación granulométrica del suelo, puede utilizarse para definir el suelo estudiado mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), estandarizado bajo la norma ASTM D2487.

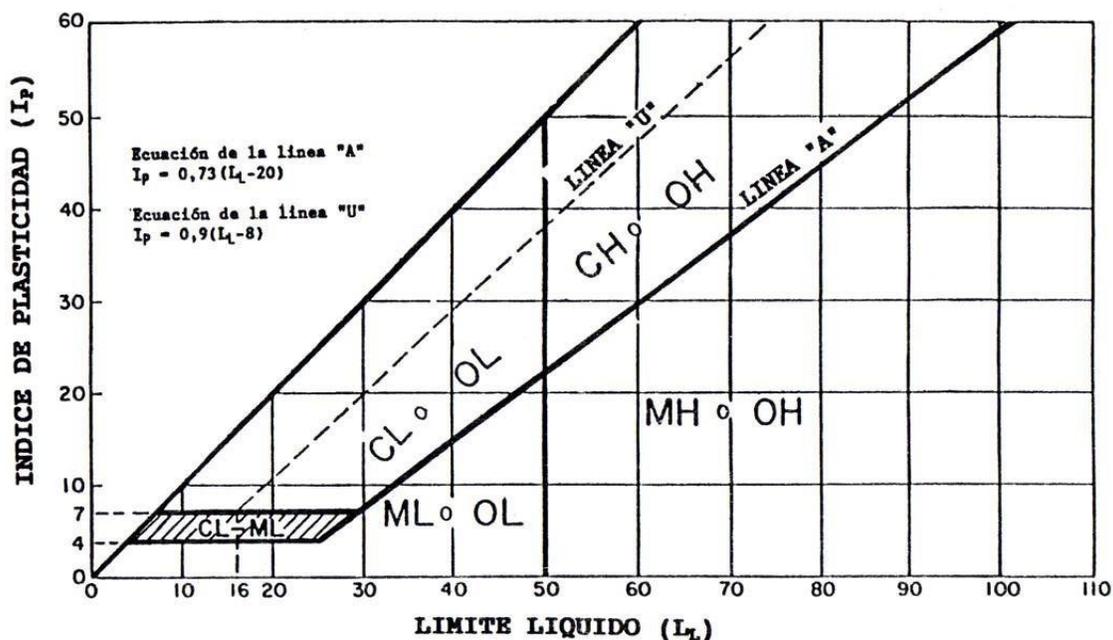


Figura 3.8 Carta de plasticidad de Casagrande (Extraída de la norma ASTM D2487).

Equipamiento

El equipamiento necesario para la realización de los ensayos que definen estos límites se componen de: una espátula, usada para manejar la muestra; 7 cápsulas de acero con su masa medida, en donde se ubicarán las porciones de la muestra para determinar su humedad; la máquina de Casagrande (Figura 3.9.a), donde se sitúa la muestra y se ensaya; un acanalador, el cual se utiliza para dividir la muestra, necesario para realizar el ensayo; una pesa con exactitud de 0,01 g y un horno para posteriormente secar la muestra más rápidamente. Además, el ensayo para obtener el límite plástico requiere de una placa de vidrio para manipular la muestra.

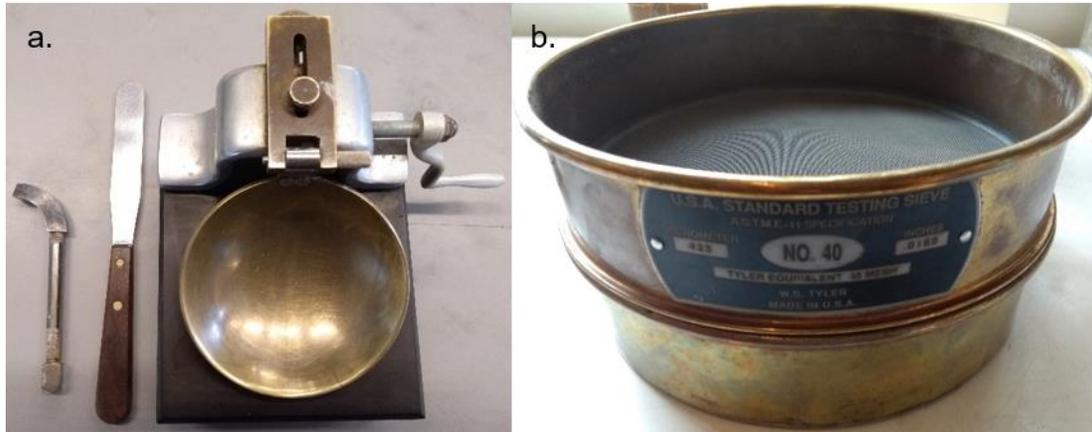


Figura 3.9 Equipamiento necesario para los ensayos de límites de Atterberg. a. La imagen muestra de izquierda a derecha el acanalador, la espátula y la máquina de Casagrande. b. Malla 40 utilizada para tamizar la muestra.

Preparación de la muestra

Para la preparación de la muestra a analizar, se recolectan 200 g de la porción de la muestra que pasa por la malla 40 (0,425 mm de abertura) (Figura 3.9.b). Esto se mezcla con agua destilada hasta obtener una masa uniforme. El material preparado se cubre para que no pierda humedad y se almacena al menos durante 16 horas previas al ensayo.

Procedimiento

Límite Líquido

El método utilizado para definir el límite líquido es el siguiente:

- 1) Se desmonta y se seca la máquina de Casagrande, asegurando que se encuentre limpia y seca antes de iniciar el procedimiento,
- 2) se monta la cápsula en su posición para el ensayo,
- 3) se extrae una cantidad entre 50 a 70 g de suelo con la espátula y se coloca en la cápsula, alisando la superficie y procurando no dejar burbujas de aire y no comprimir el suelo,
- 4) con el acanalador se separa el suelo en dos mitades siguiendo el eje de simetría de la capsula, para el tipo de suelo estudiado se requieren 2 a 3 pasadas suaves,
- 5) se gira la manivela a un ritmo constante de dos golpes por segundo; esto se continúa hasta que el surco se cierre media pulgada (Figura 3.10), en donde se anota el número de golpes,
- 6) se extrae alrededor de 5 g de la capsula para pesarla y así obtener la humedad de suelo para este número de golpes,
- 7) se vacía la capsula de Casagrande, dejando el suelo en el recipiente inicial, la cual se hace que pierda humedad revolviéndolo con la espátula,

- 8) se realizan nuevamente las etapas 1) a 7), hasta obtener 5 datos de número de golpes que se sitúen entre 15 y 35.



Figura 3.10 La imagen muestra la división del suelo realizado por el acanalador. Fotografía obtenida al realizar el procedimiento a la muestra SP1803.

Para calcular el límite líquido, se grafican los datos de humedad con su número de golpes respectivo en un gráfico en donde las abscisas (número de golpes) se encuentren en escala logarítmica. Los puntos se utilizan para realizar una regresión lineal, y usando la ecuación obtenida por la regresión se determina la humedad donde se ha definido el límite líquido, que es cuando se realizan 25 golpes.

Límite plástico

El método para determinar el límite plástico es el siguiente:

- 1) Se seleccionan 20 g del material preparado para definir el límite líquido,
- 2) se reduce la humedad del suelo hasta llegar a una consistencia donde se puede manipular sin que se quede pegada a la mano o a la placa de vidrio,
- 3) se enrolla la masa entre las palmas y el vidrio aplicando la suficiente presión hasta que quede como un cilindro de diámetro uniforme, esto se continua hasta que los cilindros presenten un diámetro de 3 mm y se fracturen en trozos de 0,5 a 1 cm de largo (Figura 3.11),
- 4) se pesan los cilindros formados,
- 5) se deja secar los cilindros y se pesa nuevamente, obteniéndose para cada uno el contenido de humedad definido como límite plástico; estos resultados no deben alejarse más de un 2% del promedio obtenido.



Figura 3.11 La imagen muestra las dimensiones de un bastoncito usado para definir el límite plástico. Fotografía obtenida al realizar el procedimiento a la muestra SP1803.

3.3.2 Ensayo de corte directo consolidado - drenado

Este ensayo es utilizado para determinar la tensión de cizalle en una muestra de suelo. Esto se obtiene al deformar la muestra a una velocidad constante, obligando a la muestra cizallarse por un plano definido por el aparato utilizado. El testigo ocupado para este ensayo requiere que este tenga una forma prismática cuadrangular, por lo que se necesita tallar la muestra para encajar el testigo a la caja donde debe permanecer durante el ensayo.

La realización de solo un ensayo no logra definir completamente la fuerza de cizalle, se requiere al menos dos ensayos con diferente tensión nominal normal para la obtención de la envolvente de falla del suelo.

Para comprender de mejor manera este ensayo, se tienen las definiciones de los siguientes conceptos, extraídos de las normas ASTM D653 y D3080:

1. Test en condición consolidado-drenado: Es una prueba en donde la consolidación completa realizada por la presión confinante elegida es seguida por la aplicación adicional de un esfuerzo de cizalle, de tal manera que hasta incluso un suelo saturado de baja permeabilidad puede adaptarse completamente, es decir, mantener su consolidación y la presión intersticial del agua, a los cambios de esfuerzo producto de este esfuerzo adicional. Usualmente esta condición se obtiene al realizar el test lentamente y permitiendo el movimiento del agua del testigo.
2. Estado saturado: Se considera cuando todos los intersticios entre las partículas del suelo se encuentran llenados con agua a una presión superior

a una atmosfera ($1 \text{ atm} = 101,3 \text{ kPa}$). Este estado se obtiene al sumergir el suelo en agua.

3. Estado consolidado: Es la máxima reducción de volumen de suelo causado por la aplicación de una carga sostenida a la muestra.
4. Falla: Para efectos de este ensayo, es usualmente considerado como la tensión máxima de cizalle, o en ausencia de una condición "peak", la tensión de cizalle al 10 % de desplazamiento lateral relativo.
5. Tensión normal nominal: Es la fuerza normal (vertical) aplicada, dividida por el área de la caja de cizalle. El área de contacto del espécimen en el plano de cizalle disminuye a medida que se cizalla y por ende la tensión normal real es desconocida.
6. Tensión de cizalle nominal: Es la fuerza de cizalle aplicada, dividida por el área de la caja de cizalle. El área de contacto del espécimen en el plano de cizalle disminuye a medida que se cizalla y por ende la tensión de cizalle real es desconocida.
7. Tensión de Estado crítico: es la tensión observada cuando la probeta presenta la máxima deformación aplicable por el ensayo. Es el estado que se encuentra posterior a la falla (tensión peak) y anterior al residual.

Para comprender los resultados obtenidos de este ensayo, también se añaden los siguientes conceptos:

- Curva de tensión vs deformación horizontal: De él se obtienen los datos máximos o residuales para utilizar en la elaboración de la envolvente de falla; además de mostrar el comportamiento de la muestra con respecto a su índice de poros (para arenas) (Figura 3.12.a) o a su grado de consolidación (para arcillas) (Figura 3.12.b). Para las arenas, en el ensayo que presente un alto índice de poros (baja densidad) se obtendrá un valor máximo de tensión, el cual variará en baja cantidad o no variará hasta que finalice el ensayo; mientras que las arenas con bajo índice de poro (alta densidad) su gráfico presenta una pendiente mayor, llegando a un valor máximo o peak, el cual disminuirá hasta un valor residual, convergiendo con los datos de la muestra de baja densidad. En el caso de las arcillas, funciona de manera similar que las arenas, aunque la variable que maneja la forma del gráfico es el grado de consolidación: a mayor consolidación que se encuentre la arcilla, se observarán pendientes mayores, obteniéndose un valor máximo; y disminuyendo el valor de tensión a medida que se prosigue con el ensayo.

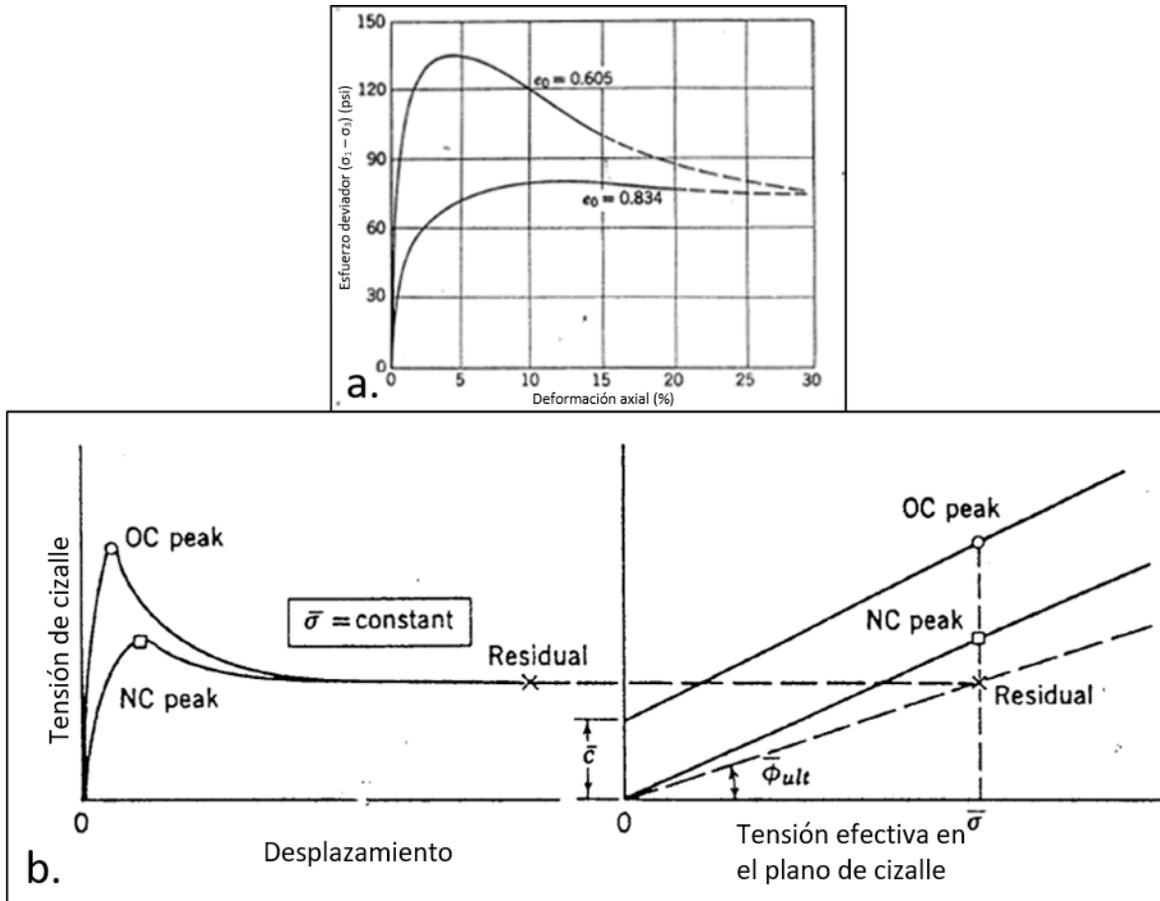


Figura 3.12 Representación del comportamiento de suelos en el gráfico deformación vs tensión. a. Muestras con granos tamaño arena, mostrando el índice de poros correspondiente para cada curva. b. Muestras con granos tamaño arcilla; en donde también se muestra las envolventes de falla esperadas para cada dato (OC: Sobre-consolidado. NC: Normalmente consolidado). Extraído y traducido de Lambe y Whitman, 1969.

- Envolvente de falla del suelo: Es la representación gráfica de la relación que existe entre las tensiones efectivas normales y tangenciales en cualquier plano del suelo, representado en la Figura 3.13 y expresado en la ecuación 5 (González de Vallejo, 2002):

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) * \tan \phi' \quad (5)$$

Donde τ = resistencia al corte a favor de un determinado plano,

σ_n = tensión total normal actuando sobre el mismo plano,

u = presión intersticial

c' = cohesión efectiva

ϕ' = ángulo de rozamiento interno efectivo

Esta representa las combinaciones de tensión normales y tangenciales en las cuales la muestra presenta una falla, las combinaciones debajo de la envolvente son las tensiones posibles que puede aguantar la muestra, mientras que las combinaciones sobre la envolvente son imposibles de obtener debido a que la muestra ya ha fallado antes de llegar a esas tensiones. La envolvente de falla

usualmente se traza al dibujar una recta tangente a los círculos de Mohr; para el caso de los datos de corte directo, se utilizan los valores de tensión de cizalle obtenidos para cada tensión normal; el criterio para elegir qué tensión de cizalle se utiliza será posteriormente mencionado en la sección de resultados del ensayo de corte directo.

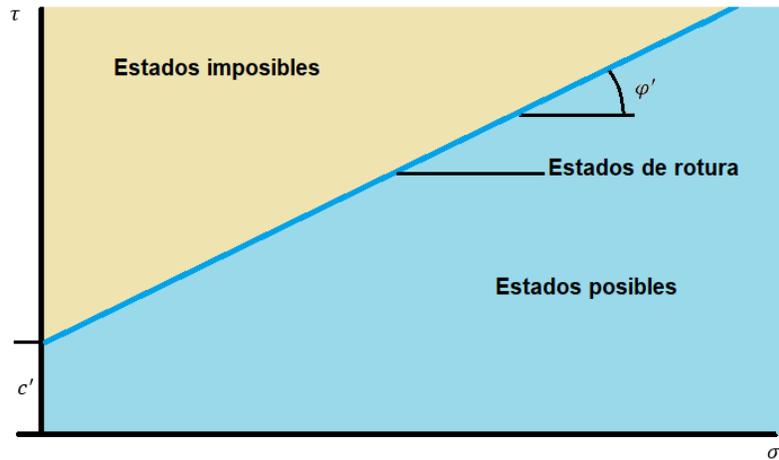


Figura 3.13 Envolvente de falla del suelo, esta separa los estados posibles e imposibles que puede presentar un suelo. Extraído y modificado de González de Vallejo, 2002.

Equipamiento

Para la realización del ensayo se utilizó un equipo de corte directo (Figura 3.14), el cual debe tener una maquina neumática diseñada para aplicar la tensión normal a la muestra, mostrando en todo momento la tensión aplicada mediante un visor; y un motor para aplicar la tensión de cizalle horizontal, manejado mediante el número de revoluciones por minuto (rpm) que realiza.



Figura 3.14 Máquina de corte directo; a la derecha se observa el motor que aplica la carga nominal, mientras que la parte central y superior de la imagen se encuentra la máquina que aplica la carga nominal.

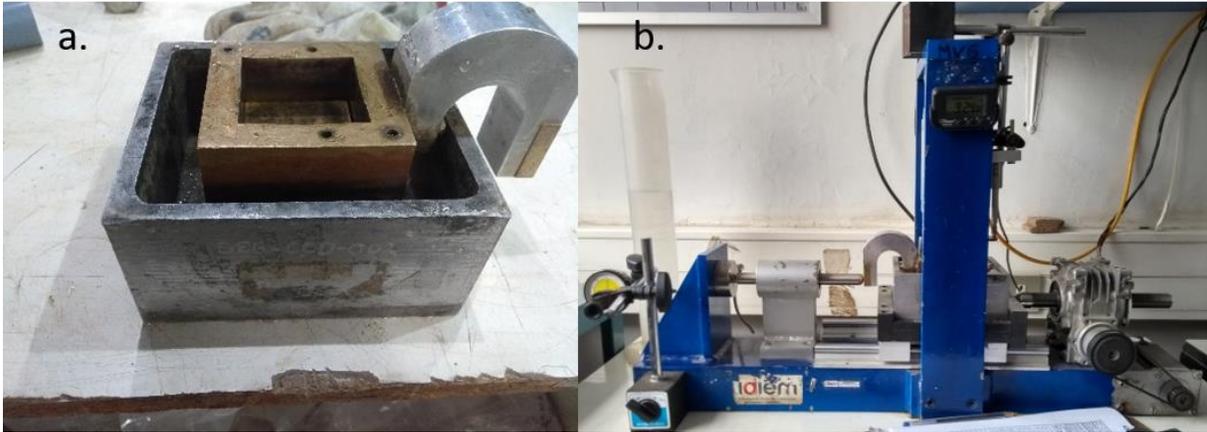


Figura 3.15 Máquina de corte directo; a la derecha se observa el motor que aplica la carga nominal, mientras que la parte central y superior de la imagen se encuentra la máquina que aplica la carga nominal.

Al equipo se le coloca la caja en donde se sitúa la muestra (Figura 3.15.a), dejándolo como se observa en la figura 3.15.b; esta presenta diferentes piezas removibles, y cada una está diseñada para una cierta función. En la figura 3.16 se observan las partes de la caja, las cuales se colocan en orden de abajo hacia arriba. La función para cada una de estas partes es la siguiente:

- Caja en donde se ubica la muestra, esta presenta un orificio en la parte interna, para que pueda moverse el agua ingresada a la muestra.
- Pieza con muescas, usada para facilitar el ingreso de agua.
- Piezas que están en contacto con la muestra, las cuales son idénticas; presentan agujeros para el ingreso de agua.
- Pieza que presenta una concavidad, en donde es situado el dispositivo para realizar la carga nominal.
- Pieza con un brazo en donde es aplicada la carga horizontal.

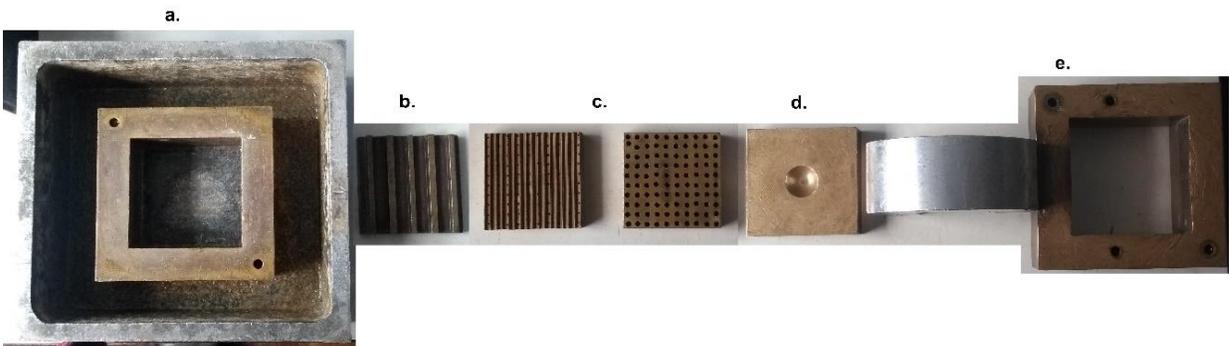


Figura 3.16 Partes de la caja en donde se sitúa la muestra; esta se coloca entre las piezas que se indican con la letra c.

Además de lo anteriormente mencionado, se requiere de medidores de deformación horizontal y vertical, y un cronómetro.

Preparación de la muestra

Para realizar el ensayo correctamente, se debe obtener un testigo correctamente dimensionado. Esto fue realizado tallando la muestra original usando un molde, el cual tiene una forma de prisma con dimensiones de 5 cm de largo y ancho, y una altura aproximada de 2,15 cm.

Procedimiento

Previo a la realización de los ensayos, se necesita obtener la humedad inicial del testigo. Para ello se pesa una porción del material restante del testigo, la cual posteriormente se coloca en el horno durante un día y se pesa. Con ambos datos de masa inicial y masa seca se obtiene su humedad inicial.

Para iniciar el ensayo, se coloca el testigo en la caja que lo alberga en conjunto con los seguros que impiden su movimiento, y se instala en la máquina de corte directo. Una vez que se extraen los seguros, se procede a saturar el testigo, llenando la caja con agua y anotando los datos de variación de deformación vertical hasta el momento que no se observe una variación. Posteriormente se procede a consolidar el testigo, aplicando la tensión normal nominal y anotando la variación de deformación vertical que sufre, hasta el momento que deje de variar. Finalmente, se procede a aplicar la tensión de cizalle con una máquina que está configurada para que se mueva a una velocidad constante, anotando la deformación vertical y la tensión de cizalle sufrida por el testigo; esto se realiza hasta cuando el testigo presenta un desplazamiento horizontal relativo de un 10%.

Finalmente, se extrae el testigo de la caja de corte para obtener el contenido de agua presente, por lo cual se realizan las mismas acciones que se hicieron para obtener la humedad inicial.

Una vez realizado el procedimiento, se obtiene el valor de tensión peak y el valor de tensión de estado crítico, los que se relacionan con el valor de tensión normal aplicada a la muestra. El punto obtenido (Tensión normal, Tensión de cizalle) representa uno de los puntos que se sitúan en la envolvente de falla.

Para poder trazar la envolvente, se repite la medición a otra probeta bajo otra tensión normal nominal, así obteniéndose otro punto de la envolvente y con ello realizar una regresión lineal, de la que se obtienen los parámetros de la envolvente de falla buscada. Es recomendable repetir más de dos veces el procedimiento, para evitar errores sistemáticos.

3.3.3 Ensayo triaxial consolidado - no drenado

Este ensayo es utilizado para determinar la resistencia al corte de un suelo; la diferencia entre este ensayo y el de corte directo radica en las condiciones controlables que se le pueden aplicar al material ensayado, como por ejemplo aplicarle una presión confinante en múltiples direcciones, permitir o denegar el drenaje, y no obliga al testigo cizallar por un plano definido.

Se añaden los siguientes conceptos para comprender este ensayo, obtenidos de la norma ASTM D4767:

1. Prueba en condición “consolidado-no drenado”: Es una prueba realizada a un suelo que ha sido consolidado bajo un set de esfuerzos, y es sujeto a cambios en la tensión, sin permitir que el agua salga o entre a la muestra debido al aumento de presión intersticial.
2. Falla: Condición de máximo esfuerzo o el esfuerzo en una deformación definida para un espécimen de prueba. Esta usualmente se considera como la máxima diferencia de esfuerzos principales (máximo esfuerzo desviador) alcanzada, o la diferencia de esfuerzos principales (esfuerzo desviador) cuando el espécimen presenta un 15% de deformación axial, dependiendo cual es la que se obtiene primero en el desarrollo de la prueba.
3. Trayectoria de esfuerzos: Es una representación gráfica alternativa al diagrama de tensión normal y de cizalle, formulada por Lambe y Whitman (1969), la cual grafica el recorrido de esfuerzos que han sido aplicados a una muestra (Figura 3.17); esta utiliza los siguientes parámetros:

$$\text{abscisa: } p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (6)$$

$$\text{ordenada: } q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (7)$$

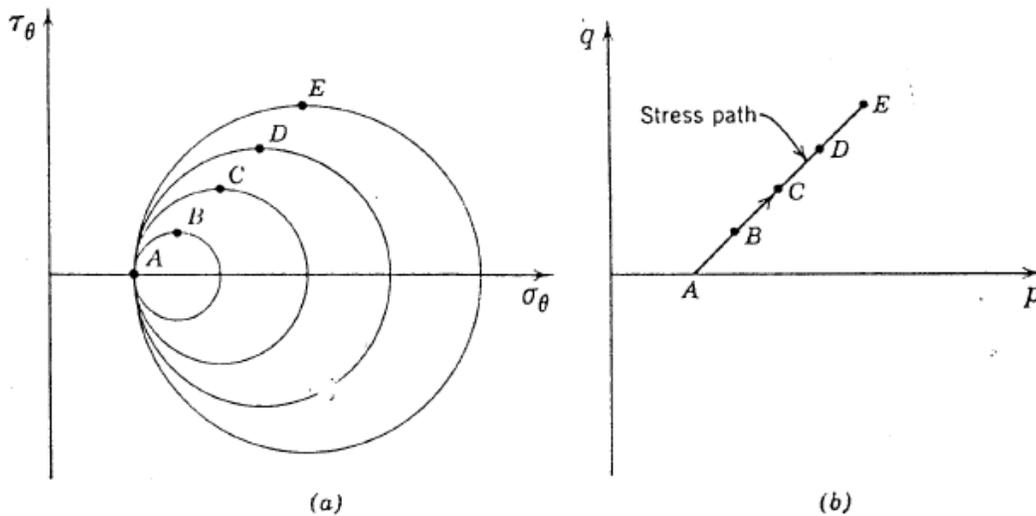


Figura 3.17 Representación de sucesivos estados de estrés con σ_3 constante y σ_1 en aumento. Los puntos A, B, etc. Representan la misma condición de estrés en ambos diagramas. a. Círculos de Mohr. b. diagrama p-q. Extraído de Lambe y Whitman (1969).

Con este diagrama también puede obtenerse una recta (K_f) (Figura 3.18); sus parámetros se relacionan con los parámetros de la envolvente de falla mediante las ecuaciones 8 y 9:

$$q_f = a + p_f * \tan \alpha \quad (\text{Ec. de la recta de } K_f)$$

$$\text{sen } \varphi = \tan \alpha \quad (8)$$

$$c = \frac{a}{\cos \varphi} \quad (9)$$

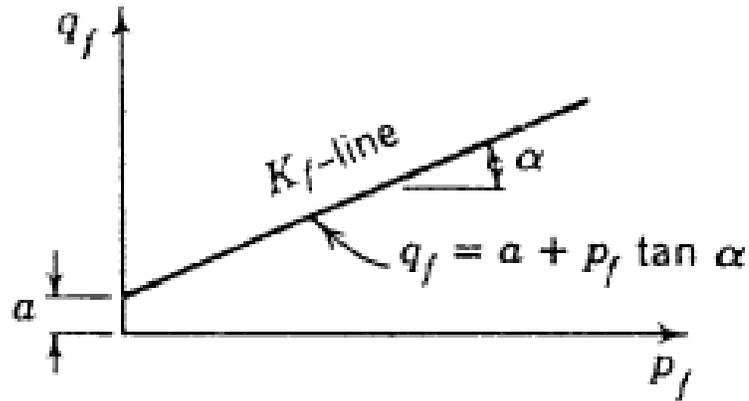


Figura 3.18 Representación de la línea K_f , en conjunto con su ecuación de la recta. Extraído de Lambe y Whitman (1969).

Equipamiento

Para la realización del ensayo triaxial se utilizó una célula triaxial (Figura 3.19.a), en donde se coloca la muestra y tiene entradas para la entrada de fluidos a la cámara y la entrada y salida de fluidos a la muestra; una maquina triaxial (Figura 3.19.b), la cual controla la presión confinante, la presión intersticial de la muestra y la presión de carga que efectúa la deformación al testigo; una membrana impermeable para cubrir el testigo; seguros para impedir el movimiento de fluidos de la cámara al testigo; CO₂ para retirar el aire de los poros del testigo y agua para rellenar la cámara y saturar al testigo.

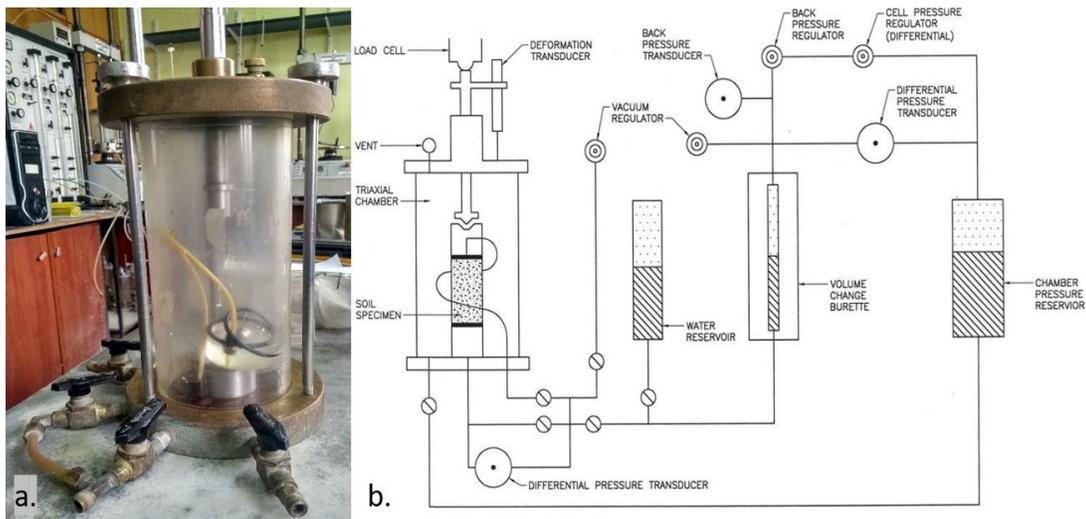


Figura 3.19 a. Célula triaxial. b. Representación gráfica de la maquina triaxial, extraída de la norma ASTM D4767.

Preparación de la muestra

La realización del ensayo requiere de un testigo con forma y dimensiones limitadas, por lo que es necesario tallarlo. La forma requerida es de un cilindro, por lo que se talla ocupando un molde cilíndrico de dimensiones de 3,6 cm de diámetro y 7 cm de alto.

Procedimiento

Para poder ensayar al testigo se debe cubrir con una membrana de látex, debido a que la presión confinante aplicada a la muestra será realizada con agua y esta no debe interactuar con el testigo, ya que la saturación y medición de presión de poros es realizada por otras válvulas ajenas a la válvula que controla la presión confinante.

Una vez cubierto el testigo con la membrana de látex, este se coloca en la célula triaxial (Figura 3.19.a), en donde se sella de ambos extremos a las válvulas de presión intersticial con bandas elásticas. Luego, se cierra la célula y se procede a llenar el entorno del testigo con agua, a una presión de 35 kPa, para después colocarlo en la máquina triaxial.

Antes de saturar con agua al testigo, debe removerse el aire presente en los poros debido a que el aire puede mezclarse con el agua que será ubicada en la muestra, retardando el tiempo necesario para saturar el testigo; para ello, se le inyecta dióxido de carbono (CO₂) por la válvula de entrada; el cual desplazará las partículas de aire presentes. Posterior a la extracción del aire, se debe remover el CO₂ presente, por lo que es ingresado agua al testigo, hasta que la presión de poros se estabilice.

Ahora, para saturar el testigo, se debe aplicar presión al agua presente (denominada contrapresión). Esto se realiza aumentando gradualmente, entre 35 kPa (0,357 kg/cm²) y 140 kPa (1,43 kg/cm²) la presión de cámara y la contrapresión, procurando que su diferencia no supere los 35 kPa. También se debe tener en consideración que la diferencia que exista entre las presiones debe mantenerse en un margen de $\pm 5\%$ mientras se está aumentando la presión, y en un margen de $\pm 2\%$ cuando las presiones se mantienen constantes (al cerrar las válvulas después de un aumento de presión). Si el cambio en la presión de poros es menor a un 5% de la diferencia entre la presión de cámara y contrapresión, se es aplicado otro aumento a la contrapresión o se mide el parámetro B que mide cuanta saturación presenta el testigo, si este es igual o superior a 0,95 se puede confirmar que la saturación fue completada.

Ya con el testigo saturado el paso siguiente es su consolidación, para esto se configura la presión de cámara y de poros para que la diferencia entre ambas sea la presión confinante considerada para el ensayo, siendo la presión mayor la aplicada por la cámara; para comprender de mejor manera esta etapa del ensayo se toma como ejemplo el ensayo con presión confinante de 6 kg/cm², la presión de cámara fijada para este ensayo es de 10 kg/cm², y la presión de poros se fija en 4 kg/cm². En esta etapa se registran los datos de variación de volumen presentados por el testigo.

Finalmente, con la presión confinante ya aplicada, se le aplica al testigo una deformación vertical constante de 0,13 %/min; en donde se toman los datos de la

variación de la presión de poros y los valores de p' y q , hasta que la deformación haya llegado a un 20% del largo inicial. Con el ensayo realizado, se remueve el testigo y se fotografía su estado, para registrar si presentó alguna irregularidad.

Los datos de importancia para trazar la envolvente de falla son las tensiones máximas y mínimas (σ_1 y σ_3) percibidas cuando la tensión ' q ' presenta un peak o cuando se observa la máxima deformación (estado crítico); estas tensiones son utilizadas para construir un círculo de Mohr, necesario para trazar la envolvente. También puede ser utilizado el valor de tensión ' q ' peak o la que se observa cuando la probeta presenta la máxima deformación. De todos modos, es necesario repetir al menos una vez el ensayo bajo otra presión de confinamiento para obtener otro círculo de Mohr o la tensión ' q ' para poder realizar una regresión lineal y así obtener la envolvente de falla buscada. Es recomendable repetir más de dos veces el procedimiento, para evitar errores sistemáticos.

3.4 Análisis de estabilidad de laderas

El análisis de estabilidad de ladera es utilizado en ingeniería para estimar que tan probable sea la ocurrencia de una remoción en masa de una ladera particular, definida mediante el factor de seguridad (FS o FOS); el cual puede ser definido por tres propiedades de la zona: Tensiones, fuerzas y momentos (Figura 3.20); en todos estos casos se evalúan las propiedades que equilibran el talud estudiado versus las que lo desequilibran, dando una razón entre estas. Usualmente para diseños típicos de ladera se requiere que el FS en condiciones estáticas tenga valores entre 1,25 a 1,5, si se exigen valores de FS es debido al alto riesgo de pérdida de vidas humanas o por las incertezas que puede tener los parámetros de diseño (Abramson et al., 2002).

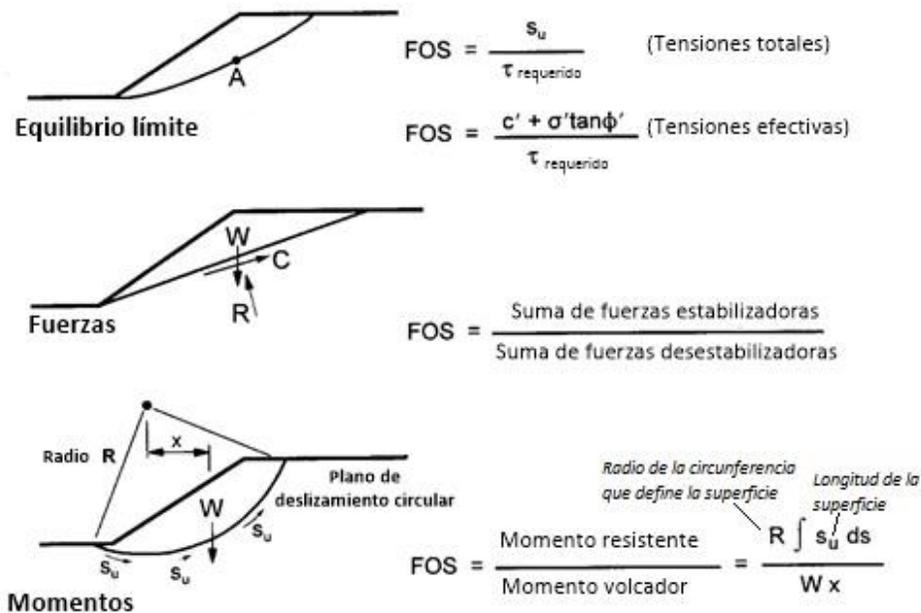


Figura 3.20 Maneras de calcular el factor de seguridad. Extraído y traducido de Abramson et al. (2002).

Uno de los parámetros que influyen en el cálculo del factor de seguridad es la aceleración sísmica que puede percibir la ladera. Este puede ser representado por vectores de fuerzas horizontales y verticales, que se superponen a fuerzas gravitacionales. Usualmente el componente vertical es inferior con respecto al horizontal, y a menudo no se considera en los análisis. Esta fuerza es representada a menudo con el coeficiente sísmico (k) definida como la razón entre la aceleración sísmica máxima y gravitacional. Debido a que el valor máximo de aceleración (PGA) no define completamente a la aceleración percibida, ya que este solo se obtiene en un instante mientras sucede la actividad sísmica, se utilizan diferentes criterios para ponderar el valor de PGA, y así tener un coeficiente sísmico representativo para el análisis que se requiera realizar.

También para poder realizar el análisis de estabilidad se debe tener en cuenta las características de la ladera; la topografía, el nivel piezométrico, la disposición de las unidades de roca y suelo y sus propiedades mecánicas.

Las propiedades anteriormente mencionadas son utilizadas para obtener las fuerzas aplicadas a la ladera estudiada; sin embargo, esto puede resultar complicado si se considera a la superficie de deslizamiento como un bloque completo, por lo que una opción para facilitar los cálculos es discretizar la masa contenida en el plano de deslizamiento en bloques pequeños, denominados como secciones (Figura 3.21).

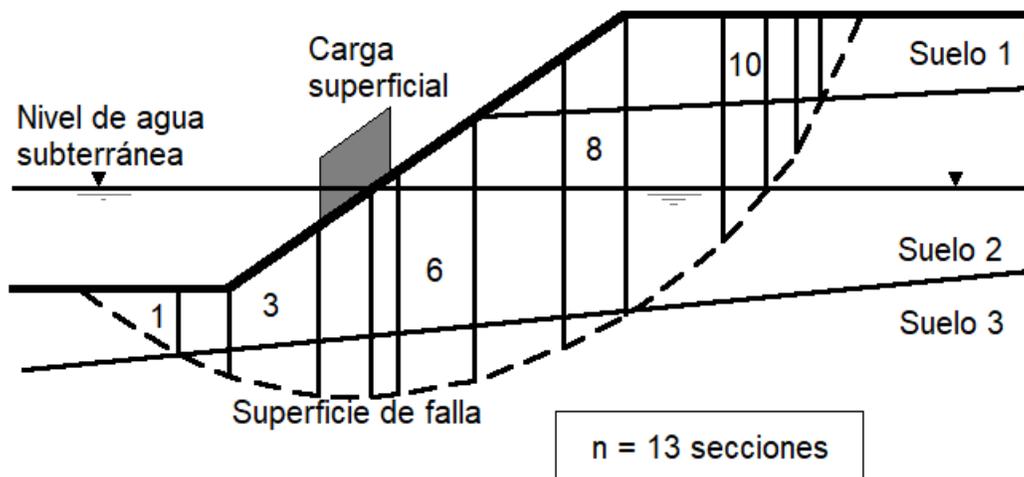


Figura 3.21 División de una potencial masa deslizante en secciones. Extraído y traducido de Abramson et al. (2002).

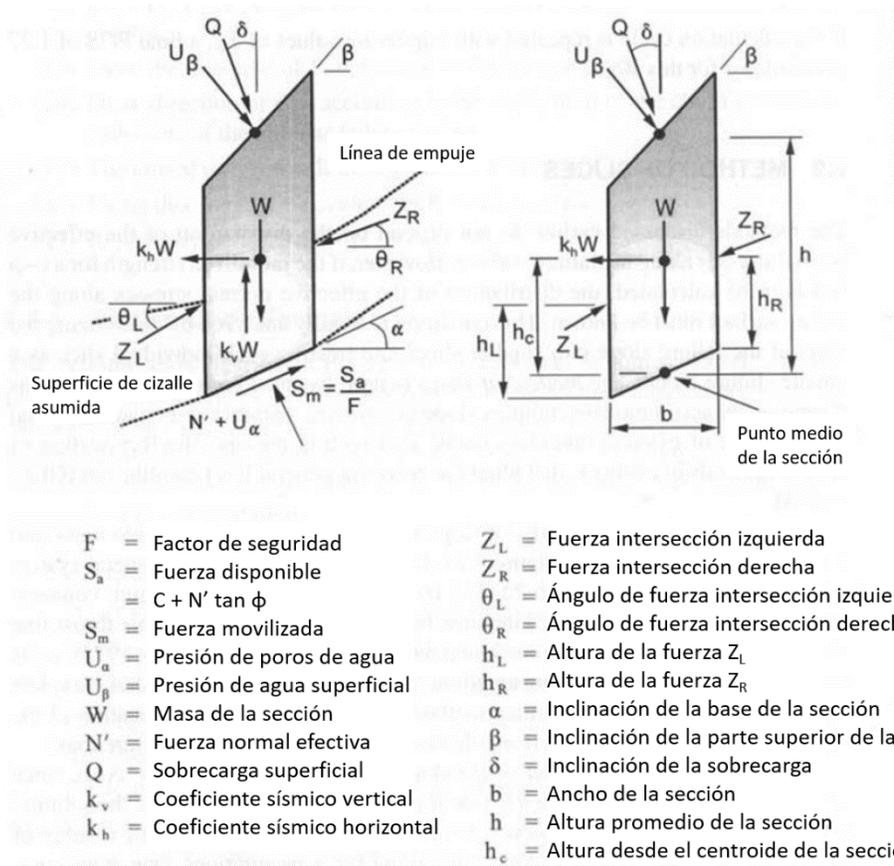


Figura 3.22 Fuerzas que actúan en una sección típica. Extraído y traducido de Abramson et al. (2002).

Este método es el más utilizado en modelos computacionales, existiendo múltiples variedades de este método dependiendo de las condiciones impuestas por los creadores de cada método a las fuerzas que actúan en las secciones (Figura 3.22). Alguno de los métodos utilizados en el Software Slide, además de las condiciones de cada uno, son los siguientes (Abramson et al., 2002):

- Simplificado de Bishop (Bishop's Simplified): El autor de este método asume que las fuerzas de cizalle entre las secciones es de cero, por lo que el equilibrio de fuerzas horizontales es el factor primordial de este método.
- Simplificada de Janbu (Janbu's Simplified): Como en el método simplificado de Bishop, se asume la fuerza de cizalle entre las secciones como cero; sin embargo, asigna un factor de corrección f_0 , para corregir los problemas que resultan de asumir lo anterior.
- Cuerpo de ingenieros (Corps of Engineers) (#1 y #2): Estos métodos asumen que la inclinación de las fuerzas que actúan entre las secciones (1): son paralelas a la superficie de la ladera o (2): igual al ángulo de la pendiente que se hace al tomar los puntos extremos de la superficie de falla.
- Spencer: El autor asume que la fuerza resultante entre secciones presenta una inclinación constante, pero desconocida.

- Generalizada de Janbu (Janbu's Generalized): En este método se fija la ubicación de las fuerzas que actúan entre las secciones.
- Morgenstern-Price: Es similar al método de Spencer, aunque asume que la inclinación de la fuerza resultante entre las secciones se asume que varía de acuerdo con una función arbitraria.
- Equilibrio límite general (GLE): Desarrollado posteriormente de los anteriores, fija una función que describe la variación de los ángulos de las fuerzas entre secciones para satisfacer el equilibrio completo; por lo que se puede asumir que este método modela una versión discreta del método de Morgenstern y Price.

Las condiciones que cumple cada método están resumidas en la Figura 3.23:

Método	Equilibrio de fuerzas		Equilibrio de momentos
	x	y	
Simplificado de Bishop	Si	No	Si
Simplificado de Janbu	Si	Si	No
Cuerpo de Ingenieros	Si	Si	No
De Spencer	Si	Si	Si
Generalizado de Janbu	Si	Si	No
Morgenstern-Price	Si	Si	Si

Figura 3.23 Tabla resumen de algunos de los metodos de secciones utilizados en el software Slide. Extraído y traducido de Abramson et al. (2002).

4. Resultados

4.1 Muestras analizadas

Para el presente estudio se trabajará con dos muestras, SP1803 y SP1804, las que fueron extraídas para este estudio en la ribera del río San Pedro. Estas muestras corresponderían a una misma unidad de sedimentos lacustres que se correlacionan a la unidad de glaciolacustres de la glaciación Llanquihue (Plgl1) mencionada en el marco geológico, por lo que se utilizarán ambas para la caracterización de dicha unidad. La Figura 4.1 muestra la ubicación de la extracción de las muestras.

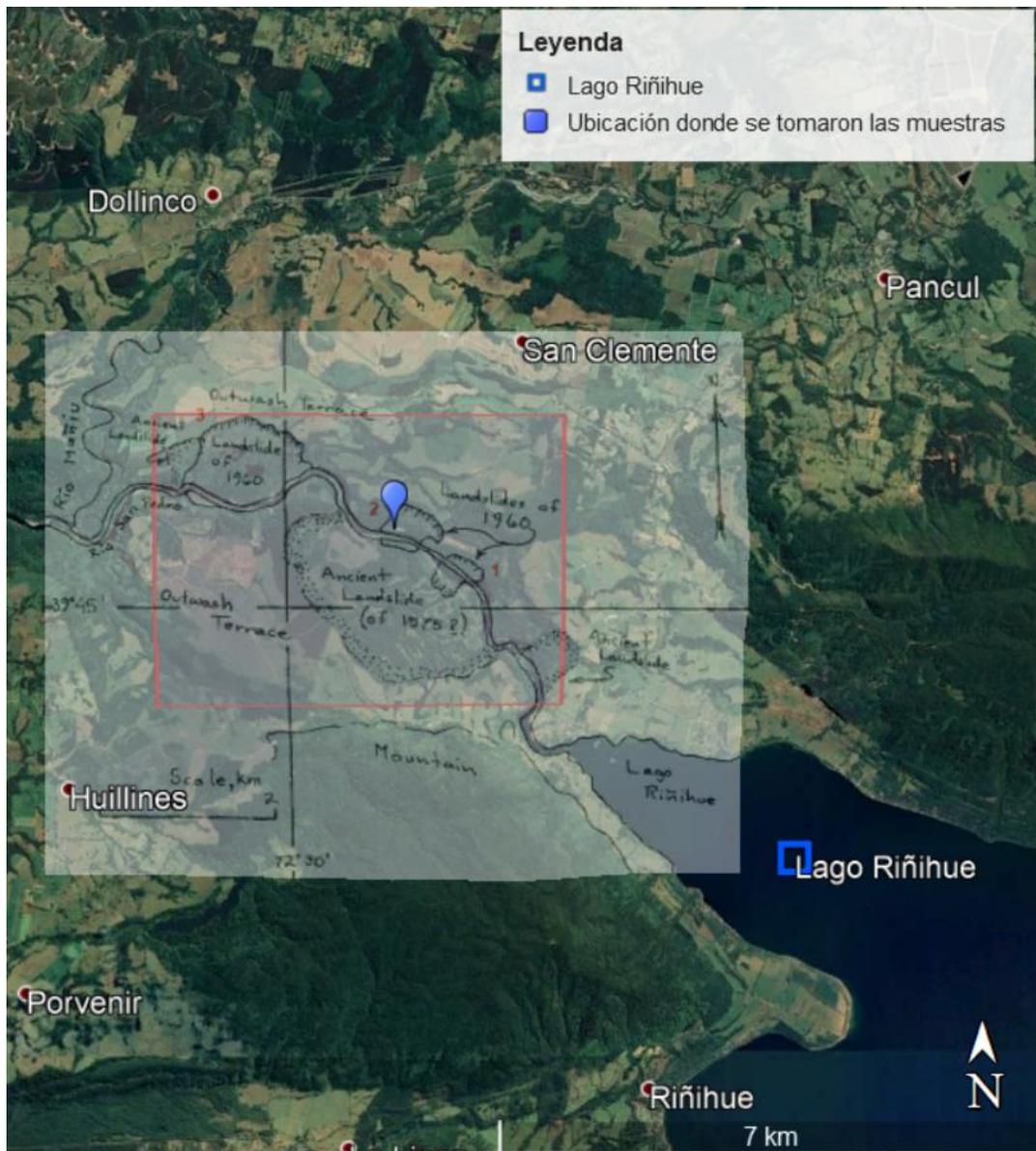


Figura 4.1 Mapa de la zona de estudio que indica la ubicación de las muestras; se superpone el dibujo realizado por Davis y Karzulovic (1963) para mostrar la ubicación de los deslizamientos ocurridos en 1960. (Fuente: Google Earth).

Las muestras fueron almacenadas en el laboratorio de sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, cada una estaba en un recipiente plástico y cubierta por papel aluminio para aminorar la pérdida de humedad.

La muestra SP1803 presentaba varias irregularidades de diferentes grosores (Figura 4.2), las que al tallar la muestra generaban fracturas indeseadas. De dicha muestra se lograron obtener especímenes para los análisis de FTIR, granulometría y límites de Atterberg. En cuanto a las descripciones y los ensayos en donde se requieren que la muestra se encuentre intacta (descripción macroscópica, descripción microscópica, ensayo de corte directo y ensayo triaxial), se lograron obtener los especímenes para las descripciones, pero solo se pudo tallar un testigo de dimensiones 2,15 cm de alto, 5 cm de largo y 5 cm de ancho, el cual fue utilizado en ensayo de corte directo consolidado-drenado.



Figura 4.2 Imagen de un fragmento de la muestra SP1803.

En cuanto a la muestra SP1804, esta presentaba una menor cantidad de irregularidades de bajo grosor (Figura 4.3). Esta muestra fue entregada al laboratorio del IDIEM y donde se talló para obtener los dos testigos utilizados en el ensayo triaxial consolidado-no drenado, los cuales son de forma cilíndrica y presentan dimensiones de 3,6 cm de radio y 7 cm de alto; y dos de los tres testigos utilizados en el ensayo de corte directo consolidado-drenado. El material restante de los tallados fue utilizado para los análisis de FTIR, granulometría y límites de Atterberg. Los testigos que en el transcurso de su tallado se fracturaron, fueron utilizados para la descripción macroscópica.



Figura 4.3 Imagen de la muestra SP1804.

4.2 Caracterización geológica del suelo

4.2.1 Descripción visual

4.2.1.1 Descripción Macroscópica

Para realizar la descripción macroscópica, se observaron secciones perpendiculares a la laminación presentada en las muestras. El enfoque de la descripción realizada a ambas muestras fue sobre la disposición de las capas del suelo presente en ella, las estructuras presentes, los tipos de clastos y la proporción, ya que la mayoría de la muestra presentaba un tamaño de grano considerablemente pequeño, por lo que no se pudo caracterizar la porción más fina.

La muestra SP1803 presenta dos colores principales: en escala de Munsell serían 5Y 6/2 (Gris oliva claro, denominado con la letra A) y 5Y 7/2 (Gris claro, denominado con la letra B) (Figura 4.4); tiene estratificación laminada, encontrándose en la muestra franjas de 1 a 2 centímetros de grosor. Además, presenta una gran cantidad de fracturas rellenas con un material de color similar al color A (Figura 4.5). En cuanto a los clastos, se encuentran en la muestra en una baja proporción (aproximadamente un 7%), estos son subangulosos a subredondeados, su tamaño varía entre arena fina y grava (4 mm); en general se encuentran dispuestos en forma aleatoria en la muestra; a excepción de un grupo de clastos que están dispuestos en una capa de 2 mm de grosor.



Figura 4.4 Representación de los colores observados en la muestra SP1803. Se muestran las letras para facilitar su identificación.

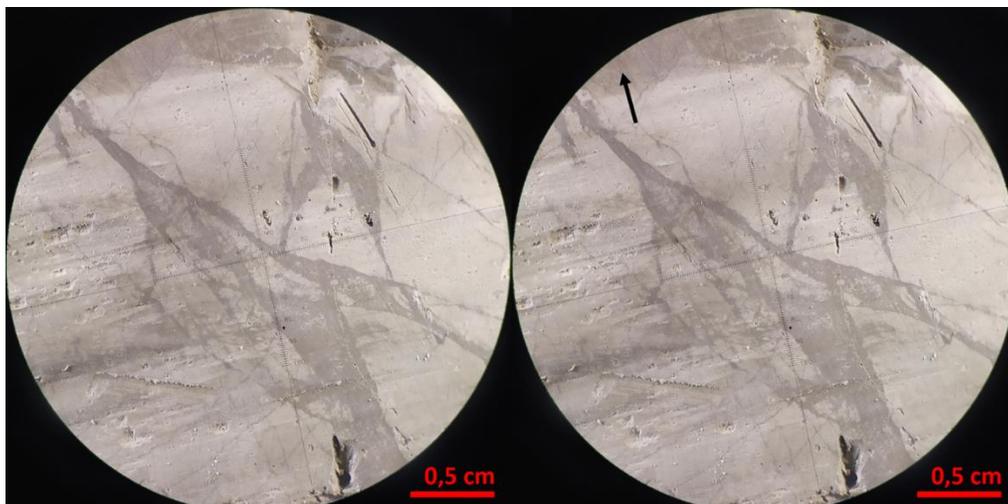


Figura 4.5 Imagen representativa de la muestra SP1803; en la imagen de la derecha se indica la escala y la dirección hacia donde está el techo de la muestra mediante la flecha negra.

La muestra SP1804 presenta en su mayoría sedimentos de color gris claro (B); tiene estratificación laminada; y presenta fracturas de grosor fino en comparación con las observadas en la muestra SP1803, rellenas por sedimentos más oscuros. Dentro de la muestra se observan desplazamientos de capas más oscuras, las cuales indican que las fracturas rellenas fueron planos de falla de tipo normal, con desplazamientos aproximados de 0,2 mm (Figura 4.6). Con respecto a los clastos, se encuentran en una baja proporción (menor a 5%), de forma subangulosa a subredondeada. Estos se sitúan aleatoriamente en la muestra y son de mayor tamaño en comparación con la muestra SP1803: sus diámetros oscilan entre los 2 mm y 12 mm. De los clastos observados, estos tienen un color negro y son ligeros para el tamaño que presentan.

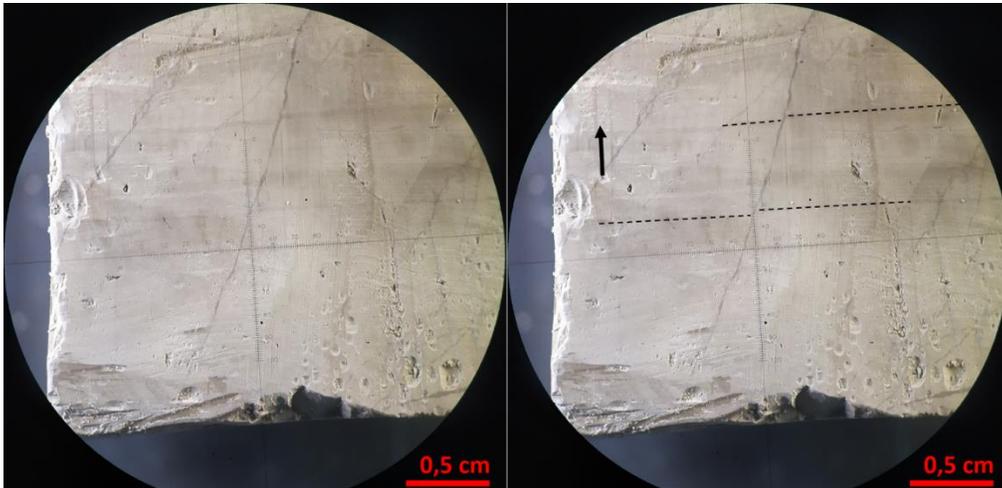


Figura 4.6 Imagen representativa de la muestra SP1804; la parte derecha se señalan las estructuras presentes, la escala de la imagen y la dirección hacia donde está el techo de la muestra mediante la flecha negra.

En el anexo B.1 se encuentran imágenes adicionales a las presentadas.

4.2.1.2 Descripción Microscópica

Para realizar la descripción microscópica, fueron preparados cortes transparentes que presentaban la sección perpendicular a la laminación presentada en las muestras. El enfoque de este método es la descripción mineralógica de los clastos que se encuentran presentes en la muestra SP1803, además de observar si existen microestructuras en ella.

Ambos cortes (SP1803-1, SP1803-2) presentan una matriz de grano fino, compuesta por granos de color negro y de diversas tonalidades de marrón; estos granos no presentan una disposición preferente entre los granos de un mismo color.

El corte SP1803-1 está compuesto en su mayoría por matriz (99%); en él se observan franjas de color marrón más oscuro de los granos que componen la matriz, con grosor variable (hasta 0,3 mm) (Figura 4.7). El único clasto observable del corte es de un clasto de dimensiones 2 mm x 1 mm, compuesto por cuarzo anhedral, plagioclasa subhedral y un material negro, presumiblemente vidrio.

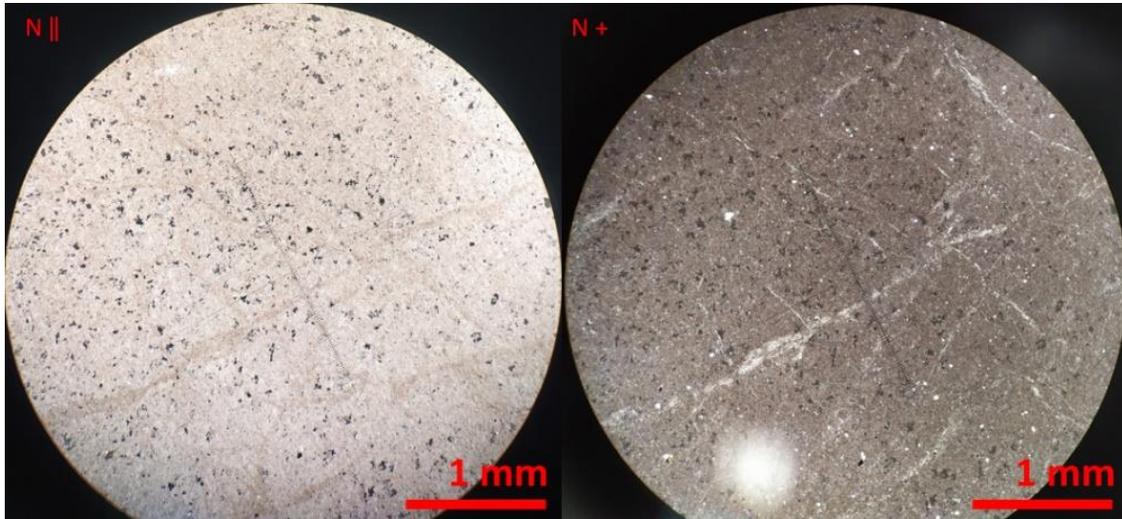


Figura 4.7 Imagen representativa del corte SP1803-1, en ella se observan las franjas que se encuentran en la matriz.

El corte SP1803-2 presenta una mayor cantidad de clastos (10%), de forma subangulosa a subredondeada; con presencia de cuarzo anhedral con extinción ondulante, plagioclasa subhedral, biotita y clorita alterando a biotita; además de que la mayoría de estos clastos presenta vidrio envolviendo los minerales (Figura 4.8).

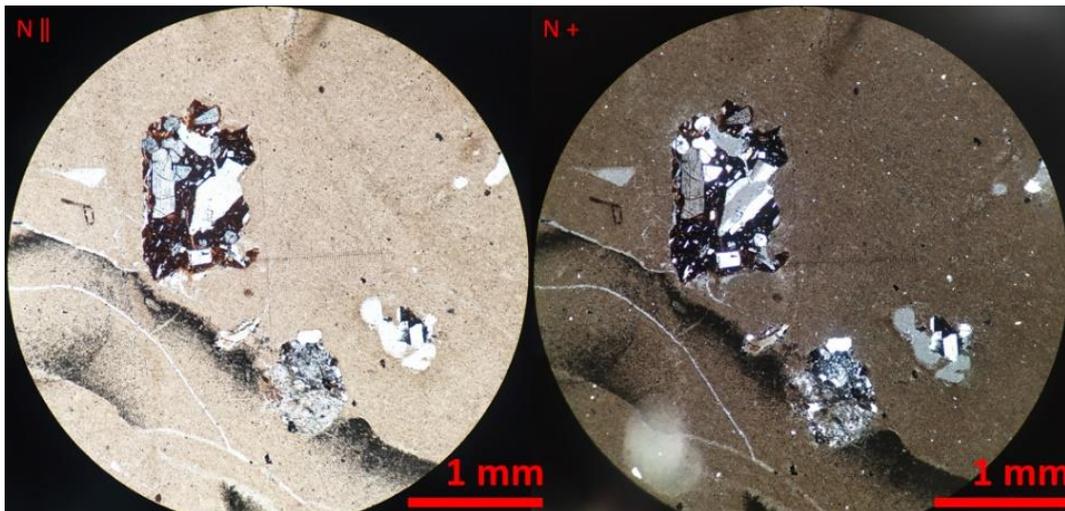


Figura 4.8 Imagen representativa del corte SP1803-2, se observan dos clastos con cuarzo, plagioclasa y vidrio, uno de 1 mm de largo y el otro de 0,5 mm de largo.

En el anexo B.2 se encuentran imágenes adicionales, mostrando algunos clastos encontrados en la muestra.

4.2.2 FTIR

El análisis de las muestras por FTIR fue realizado en el laboratorio de sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, en donde fue aplicado el “método de disco de KBr”, el cual está descrito en Bertaux et al. (1998). Fueron analizadas 3 muestras, dos realizadas para la muestra SP1803

donde fueron diferenciados los suelos de color gris oliva claro (A) y gris claro (B) (Figura. 4.4) y una realizada en la muestra SP1804. Cabe destacar que la realización del análisis fue aplicada en la porción más pequeña de las muestras, que presentaban la mayor proporción (aproximadamente un 95% del volumen total); por lo que, para una descripción completa de los minerales encontrados en las muestras, se utiliza este análisis y la descripción visual realizada.

En específico para este estudio se tomó en consideración 6 minerales diferentes, los cuales eran los que presentaban la mayor cantidad de peaks similares a todas las muestras analizadas y concordaban con la mineralogía de los cuerpos de roca cercanos a la zona de estudio. Los minerales elegidos, desde el que presenta una mayor cantidad de peaks concordantes al que presenta menos peaks son la illita, feldespato potásico, albita, montmorillonita, moscovita y biotita. La cuantificación de los porcentajes de los minerales fue realizada usando un código ejecutable mediante el software MatLab, en el cual se eligen las muestras y los gráficos de referencia para cada mineral. Posteriormente, se ejecuta una ventana donde se observa el gráfico de la muestra y otro generado por la combinación de los diferentes gráficos de referencia; mediante esta ventana se modifican los valores porcentuales de cada mineral, intentando reproducir el mismo espectro que la muestra analizada (Figura 4.9), procurando que el espectrograma generado ocupando los porcentajes elegidos no presente una absorbancia mayor que el espectrograma de la muestra. Debido a lo anterior, puede que la suma de porcentajes de los minerales elegidos no sea un 100%, por lo que habrá una porción sin categorizar.

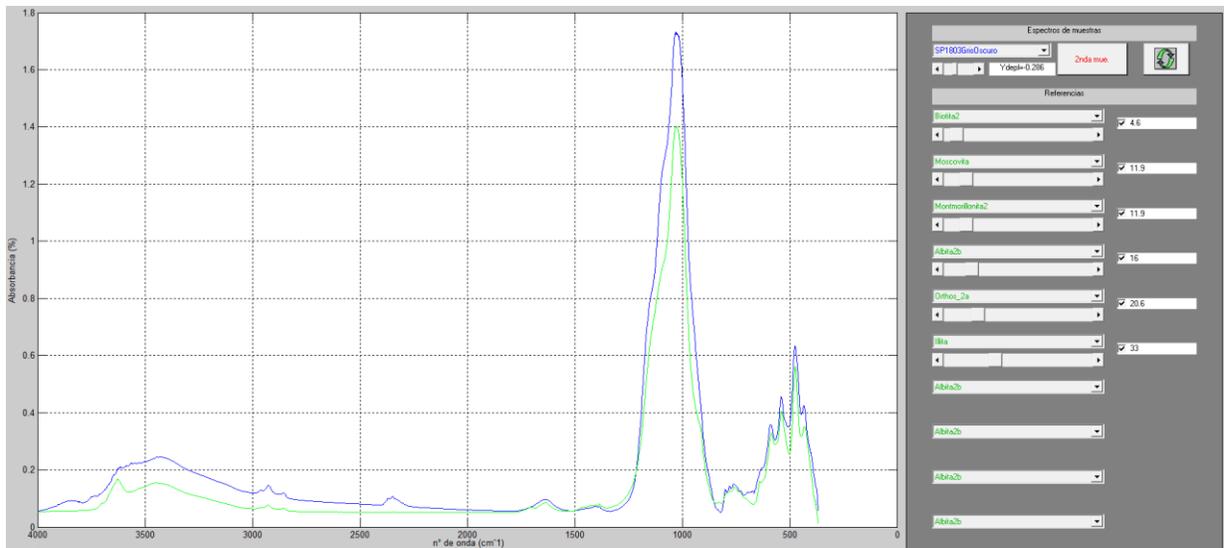


Figura 4.9 Imagen ilustrativa del código ejecutable de Matlab. A la derecha se eligen los gráficos de referencia y su porcentaje; la combinación de estos gráficos se muestra en color verde, mientras que el gráfico de la muestra se encuentra en azul.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, los resultados del análisis de FTIR para las muestras analizadas son los siguientes (Tabla 1):

Tabla 1 Resultados de los análisis de FTIR.

Muestra	Biotita (%)	Moscovita (%)	Montmorillonita (%)	Albita (%)	Ortosa (%)	Illita (%)	Total (%)	Proporción sin categorizar (%)
SP1803-A	4,6	11,9	11,9	16	20,6	33	98,0	2,0
SP1803-B	6,7	18,1	13,4	16	17,5	20,6	92,3	7,7
SP1804	5,2	11,4	11,9	15	20,1	26,8	90,4	9,6

Los gráficos comparativos entre las muestras y las combinaciones de minerales se encuentran en el anexo C.

4.2.3 Granulometría láser

Este análisis fue realizado en el laboratorio de sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Se realizó el análisis a 4 muestras diferentes, de las cuales una correspondía a la muestra SP1804 y tres a la muestra SP1803. Las 3 muestras anteriormente mencionadas se diferenciaban por el color del suelo presente: una tenía los sedimentos de color gris oliva claro (5Y 6/2), denominado SP1803 A, otra presentaba el suelo de color gris claro (5Y 7/2), denominada SP1803 B, y la última presentaba la mezcla de ambos suelos.

Como ya había sido mencionado en la unidad de descripción visual, ambas muestras presentaban clastos de un tamaño superior a 2 mm, aunque se encontraban en baja cantidad, por lo que serán considerados como un porcentaje menor con respecto a los resultados obtenidos mediante el granulómetro láser.

Para obtener un análisis de granulometría representativo, cada muestra fue dividida en 3 porciones, y cada una de estas porciones fue medida en 3 ocasiones (opción elegida en el Software), por lo que fueron obtenidos 3 promedios representativos de la muestra. Los parámetros estadísticos de las mediciones fueron calculados usando el Software Excel.

De las muestras analizadas, se presentan los gráficos promedio obtenidos para cada una (Figura 4.10 a 4.13), además de presentar los parámetros estadísticos de interés (Tabla 2 y 3).

- Para la muestra SP1803, se tienen los gráficos promedio de sus porciones:

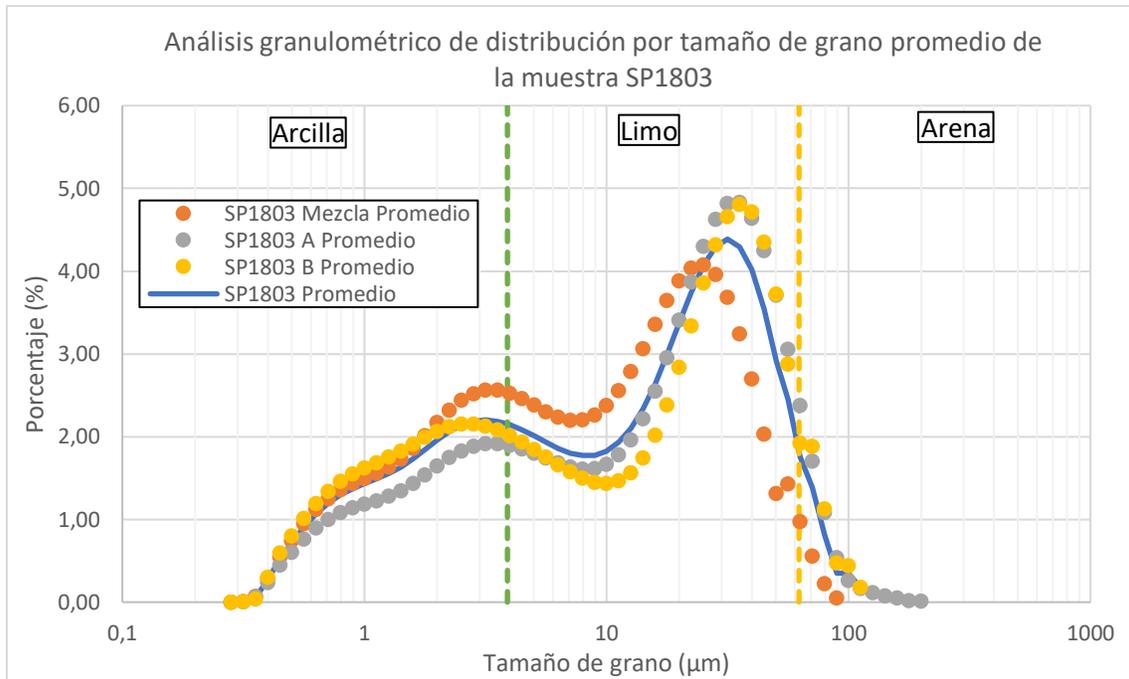


Figura 4.10 Gráfico de porcentajes de granos por tamaño de la muestra SP1803. La línea intermitente verde divide los granos de arcilla y limo, mientras que la línea intermitente amarilla divide los granos de limo y arena.

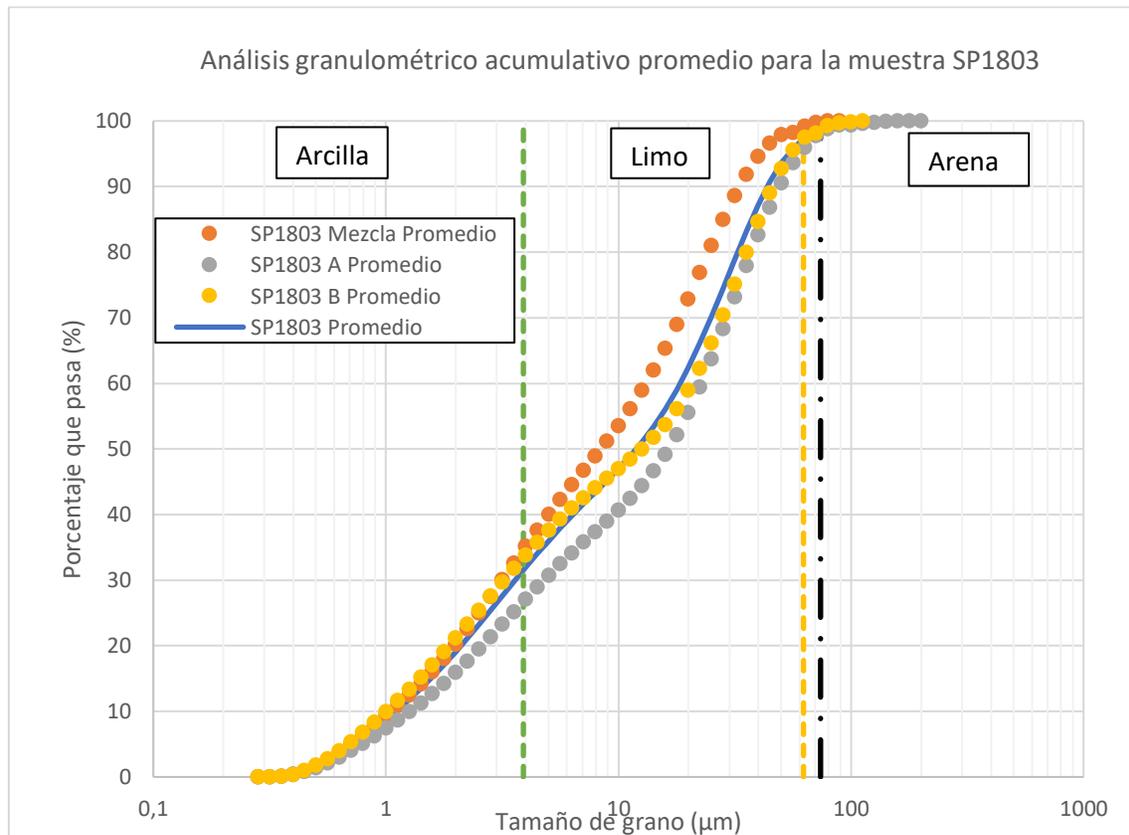


Figura 4.11 Gráfico de porcentaje acumulado de la muestra SP1803. La línea intermitente verde divide los granos de arcilla y limo, mientras que la línea intermitente amarilla divide los granos de limo y arena. Además, se muestra el tamaño de la malla 200 para la clasificación de las muestras.

Los datos de los gráficos anteriores se obtuvieron al promediar los porcentajes por tamaño de grano de las 3 mediciones de cada porción de la muestra, y el promedio final de la muestra SP1803 (destacado con color azul) se obtuvo al promediar estos promedios.

Los parámetros estadísticos obtenidos se presentan en la tabla 2; para obtenerlos se tomaron en cuenta los datos promediados de los análisis granulométricos hechos a cada muestra viendo que diámetro de grano correspondía al D_x buscado, en vez de promediar los diámetros para cada D_x .

Tabla 2 Resultados de los coeficientes de uniformidad y curvatura de la muestra SP1803

Muestra	Cu	Cc	Moda (μm)	Mediana (μm)	Porcentaje que pasa por la malla 200 (%)
SP1803 Mezcla Promedio	12,589	0,631	25,179	8,934	99,836
SP1803 A promedio	17,783	0,708	35,566	17,825	98,058
SP1803 B promedio	19,953	0,501	35,566	12,619	98,484
SP1803 Promedio	17,783	0,708	31,698	12,619	98,791

➤ Para la muestra SP1804, se tienen los gráficos:

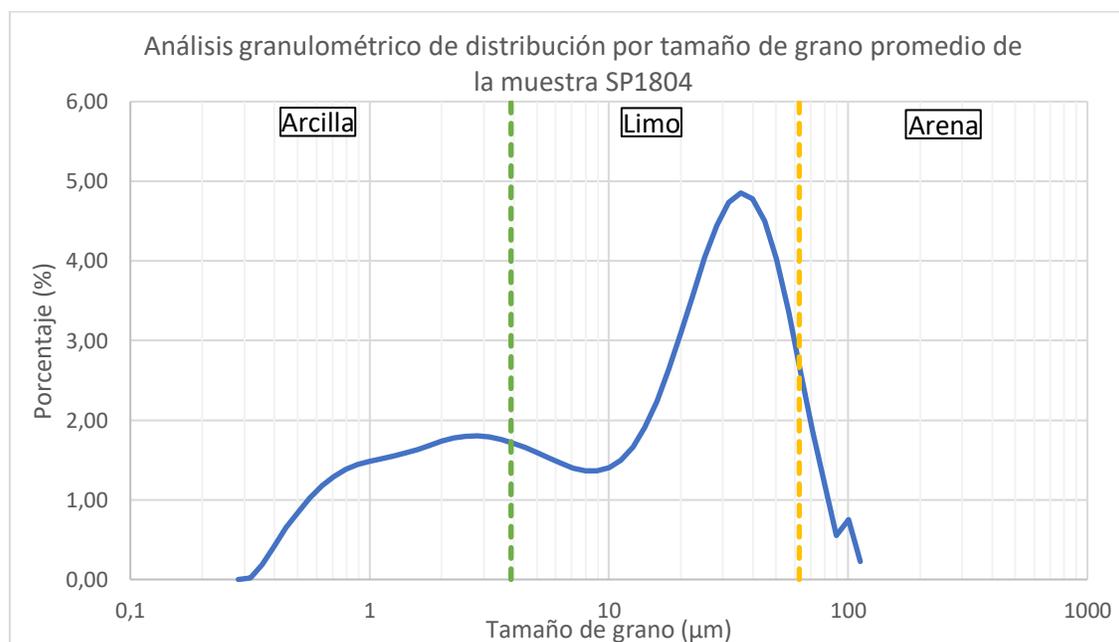


Figura 4.12 Gráfico de porcentajes de granos por tamaño de la muestra SP1804. La línea intermitente verde divide los granos de arcilla y limo, mientras que la línea intermitente amarilla divide los granos de limo y arena.

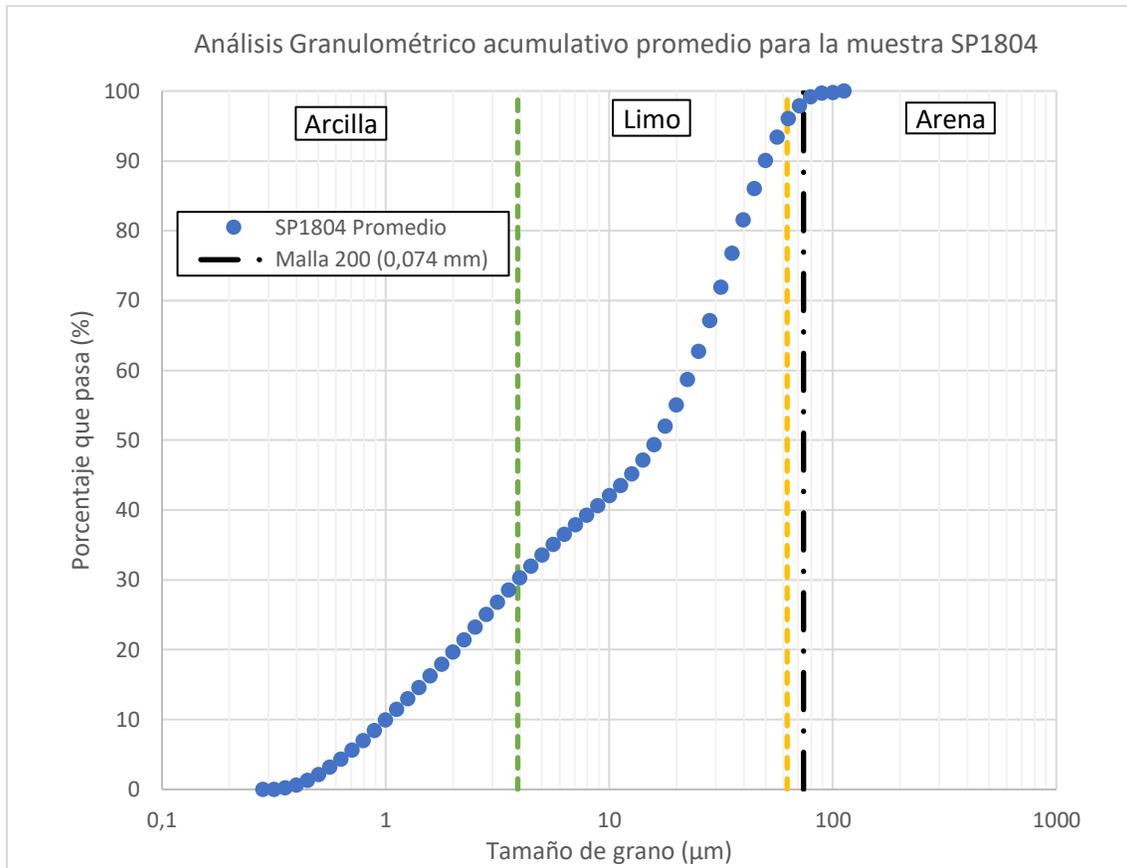


Figura 4.13 Gráfico de porcentaje acumulativo de la muestra SP1804. La línea intermitente verde divide los granos de arcilla y limo, mientras que la línea intermitente amarilla divide los granos de limo y arena. Además, se muestra el tamaño de la malla 200 para la clasificación de las muestras.

Los parámetros estadísticos para la muestra SP1804 se presentan en la tabla 3; teniendo las mismas consideraciones que para la muestra SP1803.

Tabla 3 Parámetros estadísticos promedio de la muestra SP1804

Muestra	Cu	Cc	Moda (µm)	Mediana (µm)	Porcentaje que pasa por la malla 200 (%)
SP1804 Promedio	22,387	0,562	35,566	17,825	98,325

Tomando en cuenta los resultados obtenidos mediante las descripciones visuales realizadas a cada muestra, se tiene que la porción de granos de tamaño mayor a los estudiados por la granulometría láser para la muestra SP1803 es de un 8%; y para la muestra SP1804 es de un 3%. Si se agregan estos valores a la granulometría obtenida, los porcentajes obtenidos por el granulómetro láser disminuyen levemente, por lo que los volúmenes no son recalculados.

Ahora, para clasificar las muestras mediante el sistema unificado de suelos, se debe observar que tanto porcentaje de las muestras pasa la malla 200 (74 μm). Este definirá si la muestra es gruesa (<50% pasa) o fina ($\geq 50\%$ pasa). En ambas muestras se tiene que más de un 90% de los granos pasa por la malla 200, por lo que son clasificadas como suelos de grano fino. Como es necesario tener el límite líquido de ambas muestras para poder continuar la clasificación, esto se continúa en la unidad 4.3.1, donde se definen los límites de Atterberg para cada muestra.

Los gráficos y parámetros obtenidos para cada medición se encuentran en el anexo D.

4.3 Caracterización geotécnica del suelo

4.3.1 Límites de Atterberg

De los 3 límites definidos en el marco teórico (Líquido, plástico y de contracción), solo serán obtenidos los límites líquido y plástico, ya que estos delimitan el estado plástico, el cual es de interés para este estudio.

Este ensayo fue efectuado en el laboratorio de Sólidos, Medios Particulados y Estructuras de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Se realizó un ensayo para cada muestra (SP1803 y SP1804). Las tablas 4 y 5 presentan los resultados de los límites líquido y plástico respectivamente

Límite líquido

Los límites líquidos de las muestras son los siguientes:

Tabla 4 Resultados de límite líquido de las muestras

Muestra	Límite líquido
SP1803	83
SP1804	89

Límite plástico

Los límites plásticos obtenidos para cada muestra son los siguientes:

Tabla 5 Resultados de límite plástico de las muestras

Muestra	Límite plástico
SP1803	55
SP1804	63

Una vez obtenidos los límites líquido y plástico, se procede a calcular el índice de plasticidad con la ecuación 4:

- SP1803: $IP = LL - LP = 83 - 55 = 28$
- SP1804: $IP = LL - LP = 89 - 63 = 26$

Los datos obtenidos se resumen en la tabla 6:

Tabla 6 Resumen de resultados de límites de Atterberg de las muestras.

Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad
SP1803	83	55	28
SP1804	89	63	26

Finalmente, se procede a graficar el límite líquido y el índice de plasticidad en la carta de plasticidad de Casagrande (Figura 3.8) definida en la norma ASTM D2487.

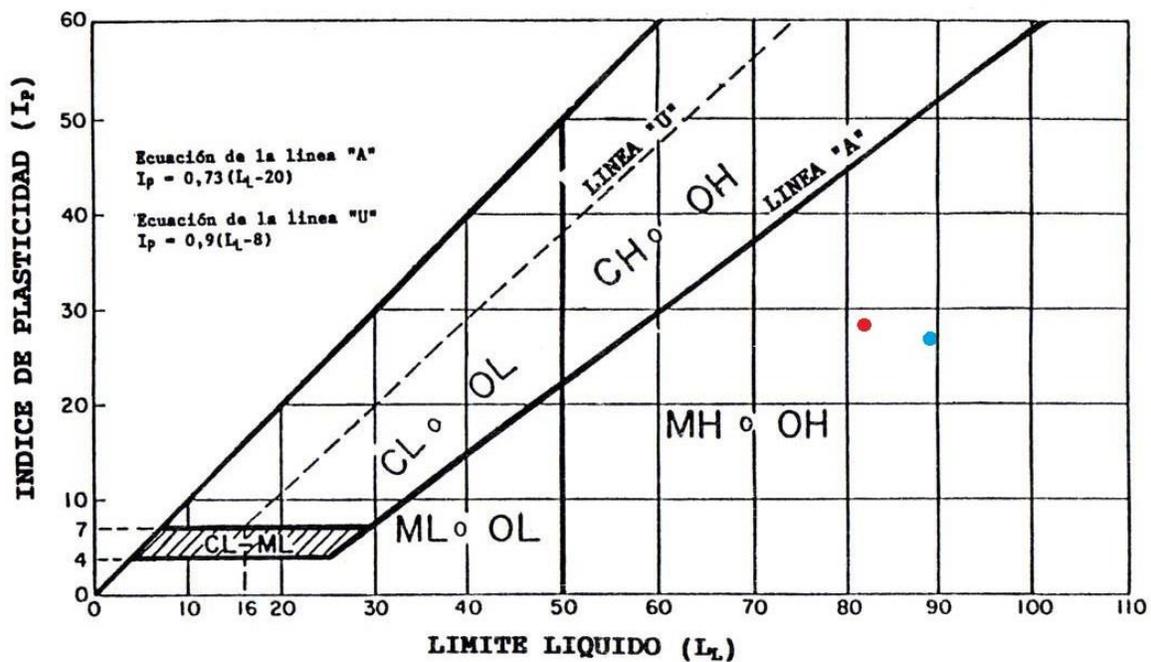


Figura 4.14 Ubicación de las muestras en la carta de plasticidad, el punto rojo representa la muestra SP1803, mientras que el punto celeste representa la muestra SP1804.

De acuerdo con lo observado en la carta de plasticidad (Figura 4.14), y retomando la clasificación de los suelos mencionada en el apartado 4.2.3, ambas muestras se clasifican como limos de alta plasticidad.

Los datos de masas requeridas para obtener las curvas de flujo requeridas para el límite líquido y el límite plástico de cada muestra se encuentran en el anexo E.

4.3.2 Ensayo de corte directo consolidado – drenado

Los ensayos fueron realizados en el departamento de geotecnia del IDIEM. Rodrigo Jara fue el encargado de tallar las muestras para el ensayo e Ivanna Sarpi fue la encargada de supervisar la realización de los ensayos de corte.

Se tallaron 3 probetas para realizar los ensayos: dos de los provienen de la muestra SP1804, y el restante de la muestra SP1803.

Las tensiones normales fueron elegidas de acuerdo con el valor máximo de tensión que puede aplicar la máquina de corte directo, siendo este una tensión de 2,5 kg/cm². Los otros valores de tensión fueron elegidos para obtener un espaciamiento igualitario entre los datos consiguientes (1,5 y 0,5 kg/cm²).

Los ensayos fueron realizados en orden decreciente; es decir, el primer ensayo que fue aplicado a un testigo de la muestra SP1804, fue bajo una tensión normal nominal de 2,5 kg/cm². El siguiente, también aplicado a un testigo de la muestra SP1804, fue realizado bajo una tensión normal nominal de 1,5 kg/cm². Por último, el testigo originado de la muestra SP1803 fue ensayado bajo una tensión normal nominal de 0,5 kg/cm².

Cabe destacar que los ensayos originados de la muestra SP1804 tenían clastos de un tamaño considerablemente mayor (0,5 mm de diámetro aproximadamente) a los presentados en la mayoría de la muestra (Figura 4.15) y además no había suficiente material para elaborar nuevas probetas, por lo que los ensayos en los que fueron ocupados estos testigos tuvieron que realizarse bajo la advertencia de presentar esfuerzos anómalos que pudieran entorpecer la obtención de la tensión peak, la cual es necesaria para poder interpolar la envolvente de falla del suelo en condición peak. Además, es importante mencionar que la superficie de corte en los ensayos realizados coincide con la laminación de las muestras.



Figura 4.15 Imagen que muestra uno de los testigos de la muestra SP1804 inserto en el molde. Se destaca con una circunferencia amarilla el clasto de mayor tamaño.

Los datos preliminares de las probetas utilizadas para realizar los ensayos de corte se muestran en la tabla 7.

Tabla 7 Datos de humedad y peso específico de las probetas utilizadas en los ensayos de corte directo.

Datos de Confección	Probeta 1 (SP1803)	Probeta 2 (SP1804)	Probeta 3 (SP1804)
Tensión Normal de ensayo (kg/cm ³)	0,5	1,5	2,5
Humedad de confección (%)	53,1	57,79	57,79
Densidad de probeta húmeda (g/cm ³)	1,438	1,429	1,515
Densidad de probeta seca (g/cm ³)	0,939	0,906	0,960

Luego de ejecutado el ensayo de corte y una vez obtenidos los datos, estos se grafican utilizando la deformación horizontal como abscisa, y, dependiendo del gráfico que se quiera obtener, se utiliza la deformación vertical o la tensión de cizalle sufrida por cada ensayo como la ordenada. Los gráficos asociados a este ensayo se muestran en las figuras 4.16 y 4.17

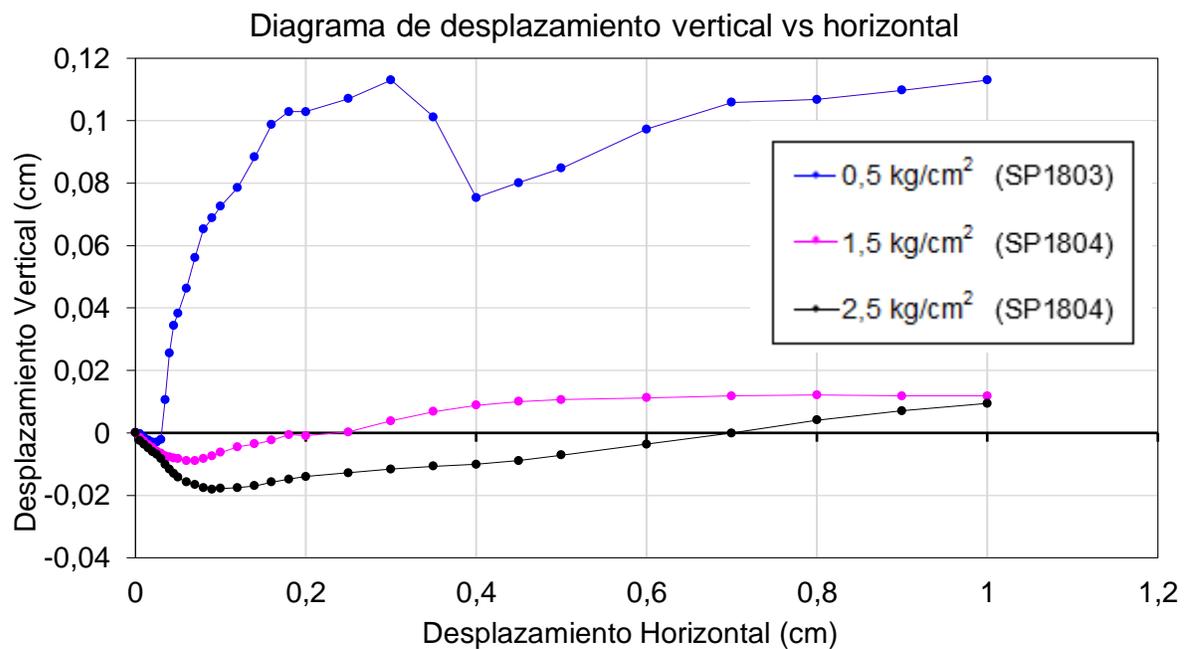


Figura 4.16 Diagrama de desplazamientos para los ensayos de corte directo

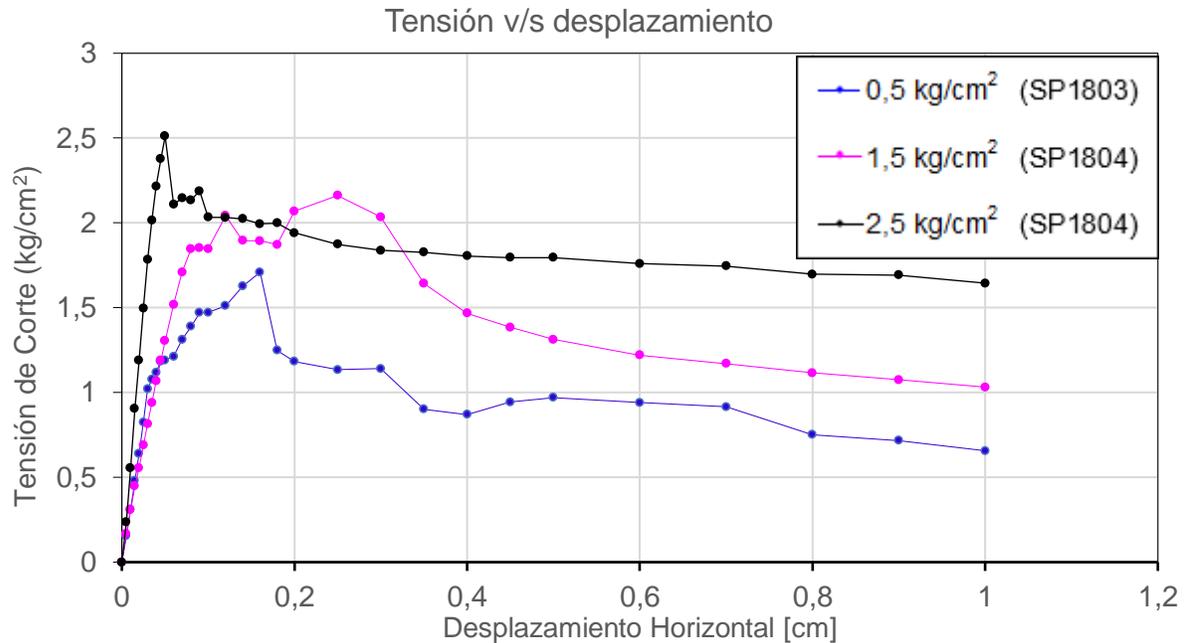


Figura 4.17 Diagrama de tensión vs desplazamiento de corte directo.

Además de los gráficos anteriores, se presentan las envolventes de falla de suelo obtenidas para los valores máximos y de estado crítico (o último) de tensión (Figura 4.18):

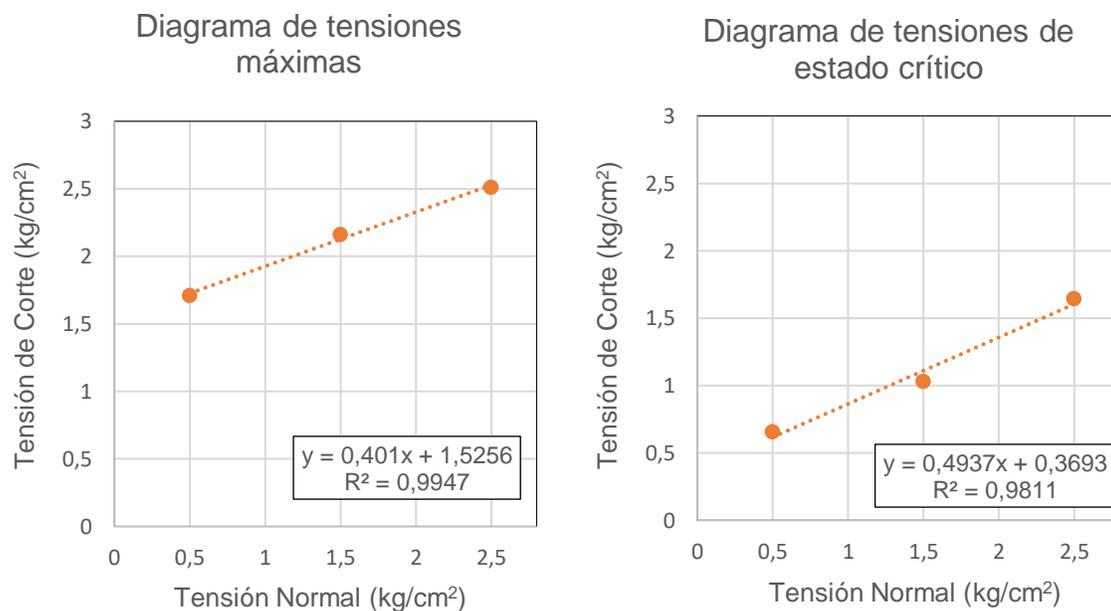


Figura 4.18 Envolventes de falla utilizando las tensiones máximas y de estado crítico obtenidas de los ensayos de corte directo.

Las envolventes de falla obtenidas por las regresiones lineales aplicadas a los puntos peak y de estado crítico son las siguientes:

$$\tau \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 0,4010 * \sigma' \left(\frac{kg}{cm^2} \right) + 1,5256 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \quad (Peak) \quad (10)$$

$$\tau \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 0,4937 * \sigma' \left(\frac{kg}{cm^2} \right) + 0,3693 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \quad (Estado crítico) \quad (11)$$

Como resumen, se tienen los parámetros de las envolventes de falla en la tabla 8.

Tabla 8 Parámetros de envolvente de falla obtenida por los datos de corte directo

Puntos utilizados	Ecuación (kg/cm ²)	Cohesión (kg/cm ²)	Ecuación (kPa)	Cohesión (kPa)	φ (°)
Peak	$\tau = 0,40\sigma + 1,53$	1,53	$\tau = 0,40\sigma + 149,61$	150	19
Estado crítico	$\tau = 0,49\sigma + 0,37$	0,37	$\tau = 0,49\sigma + 36,22$	36	26

Con respecto a la envolvente de falla que represente de mejor manera el comportamiento del suelo estudiado; varios autores (Atkinson, 1993; Lancellotta, 2009) mencionan que la mejor elección sería modelar la zona de estudio usando la envolvente de falla del estado crítico, ya que se busca modelar los planos de deslizamiento del taco 3 y estos presentan una deformación considerable en su base, por lo que el material ubicado en esa zona de la superficie de falla ya se habría aplicado la tensión peak, y, por lo tanto, el régimen de tensiones de estado crítico representaría más fielmente las tensiones aplicadas durante el deslizamiento (Figura 4.19); por ello, la envolvente de falla del suelo elegida para realizar el análisis de estabilidad es la del estado crítico, representada en la ecuación 11.

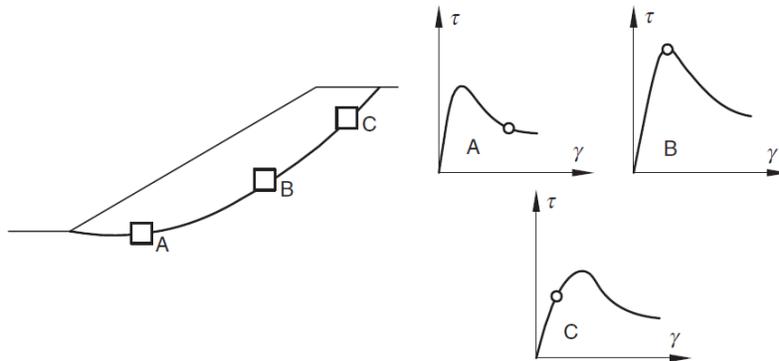


Figura 4.19 Representación de las tensiones aplicadas en ciertas zonas de plano de falla. Extraído y modificado de Lancellotta (2009).

Los puntos usados para elaborar los gráficos de las figuras 4.16 y 4.17 se ubican en el anexo F.

4.3.3 Ensayo triaxial consolidado – no drenado

Los ensayos fueron realizados en el laboratorio del IDIEM. El ensayo se realizó a tres probetas, dos de ellas provenían de la muestra SP1804 y la restante de la muestra SP1803.

Las presiones de confinamiento elegidas para realizar los ensayos fueron elegidas en base a las especificaciones técnicas de la maquina triaxial. Esta puede ejercer una presión de confinamiento máximo de 6 kg/cm^2 ; por lo que esta fue la primera presión elegida. Los otros valores (1 y 3 kg/cm^2) fueron elegidos para obtener 3 ensayos con una diferencia apreciable entre las presiones de confinamiento.

El primer ensayo fue aplicado a uno de los testigos de la muestra SP1804; en donde se le aplicó una presión de confinamiento de 6 kg/cm^2 ; el segundo ensayo también fue aplicado a uno de los testigos provenientes de la muestra SP1804, con una presión de confinamiento de 1 kg/cm^2 . Por último, el tercer ensayo fue aplicado al testigo proveniente de la muestra SP1803, con una presión de confinamiento aplicada de 3 kg/cm^2 .

Las probetas antes y después de los ensayos se observan en las figuras 4.20, 4.21 y 4.22, en la que se observa que las muestras no presentan una irregularidad notoria posteriormente a los ensayos realizados. En este caso la laminación de las muestras es perpendicular al eje de la probeta y por lo tanto del esfuerzo principal ejercido.



Figura 4.20 Imagen de la muestra antes y después de realizar el ensayo triaxial consolidado - no drenado, con una presión confinante de 1 kg/cm^3 , realizada a una probeta proveniente de la muestra SP1803.



Figura 4.21 Imagen de la muestra antes y después de realizar el ensayo triaxial consolidado - no drenado, con una presión confinante de 3 kg/cm³, realizada a una probeta proveniente de la muestra SP1804.



Figura 4.22 Imagen de la muestra antes y después de realizar el ensayo triaxial consolidado - no drenado, con una presión confinante de 6 kg/cm³, realizada a una probeta proveniente de la muestra SP1804.

La figura 4.23 representa los datos obtenidos para cada ensayo en términos de p y q , mostrando las tensiones efectivas y totales; y la figura 4.24 representa la diferencia de tensiones ($\Delta\sigma$) con respecto a la deformación experimentada por las muestras.

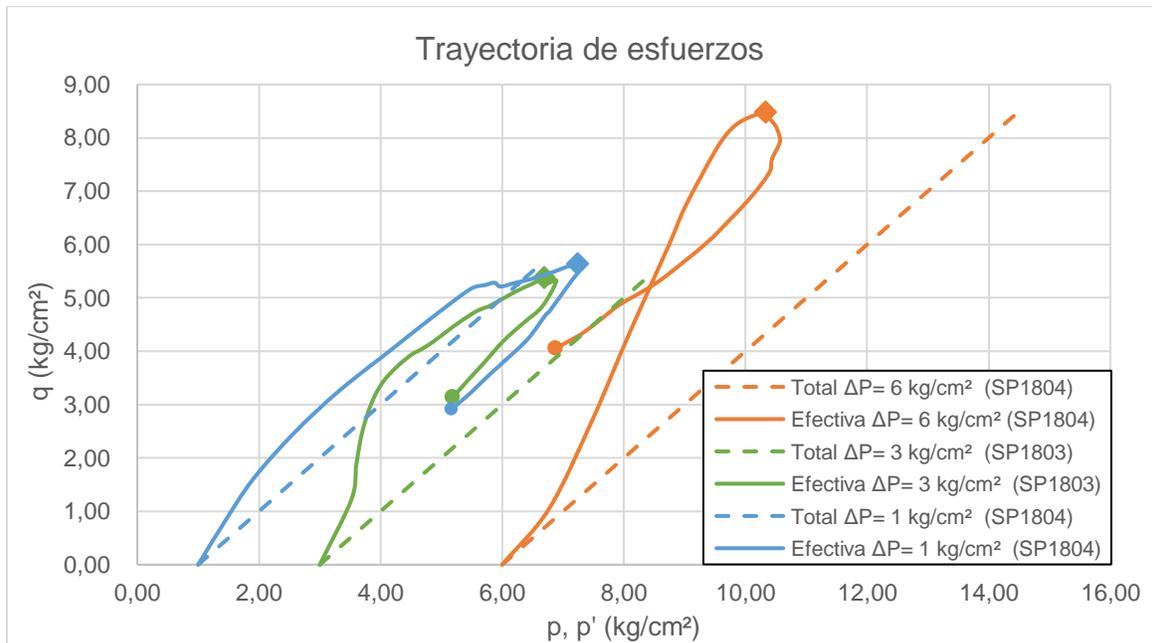


Figura 4.23 Trayectoria de esfuerzos p - q de los ensayos triaxiales CU. Los rombos indican la tensión peak de cada ensayo, mientras que los círculos indican las tensiones de estado crítico.

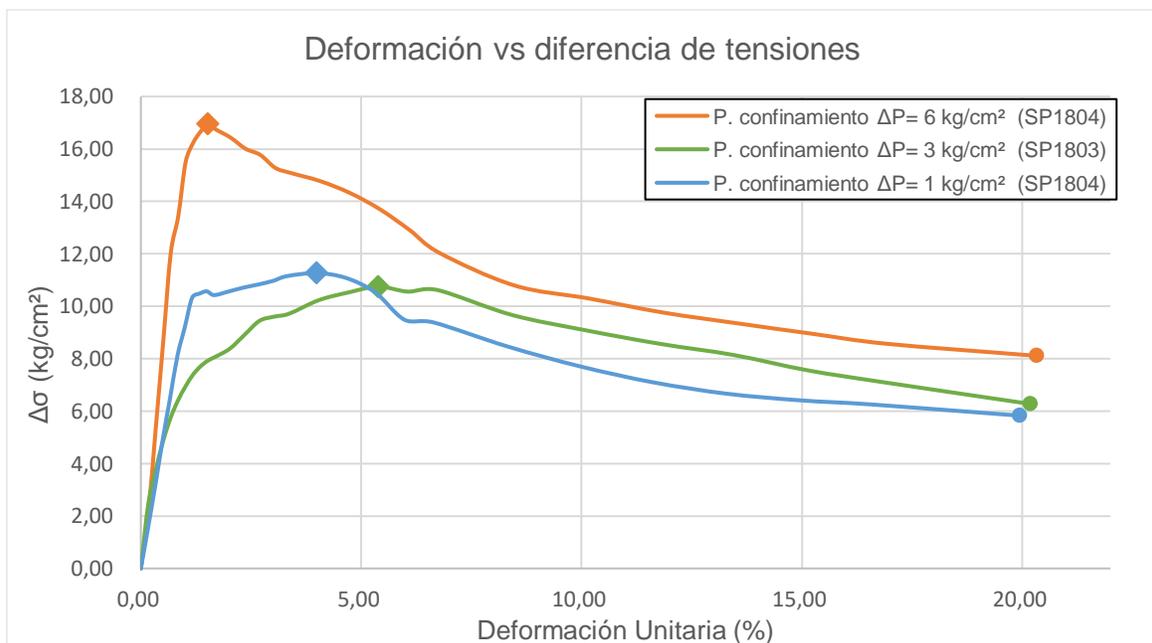


Figura 4.24 Gráfico de deformación vs diferencia de tensión para cada ensayo. Los rombos indican la tensión peak de cada ensayo, mientras que los círculos indican las tensiones de estado crítico.

Para obtener la envolvente de falla de las muestras, se consideran los datos destacados en la figura 4.23 y 4.24, los cuales están divididos en dos grupos: uno contiene las tensiones peak (máximas) experimentadas por las probetas,

destacándose por los rombos; y el otro contiene las últimas tensiones obtenidas (estado crítico), destacándose por los círculos. A ambos grupos de datos se les aplica la regresión lineal, mostradas en la figura 4.25 y 4.26.

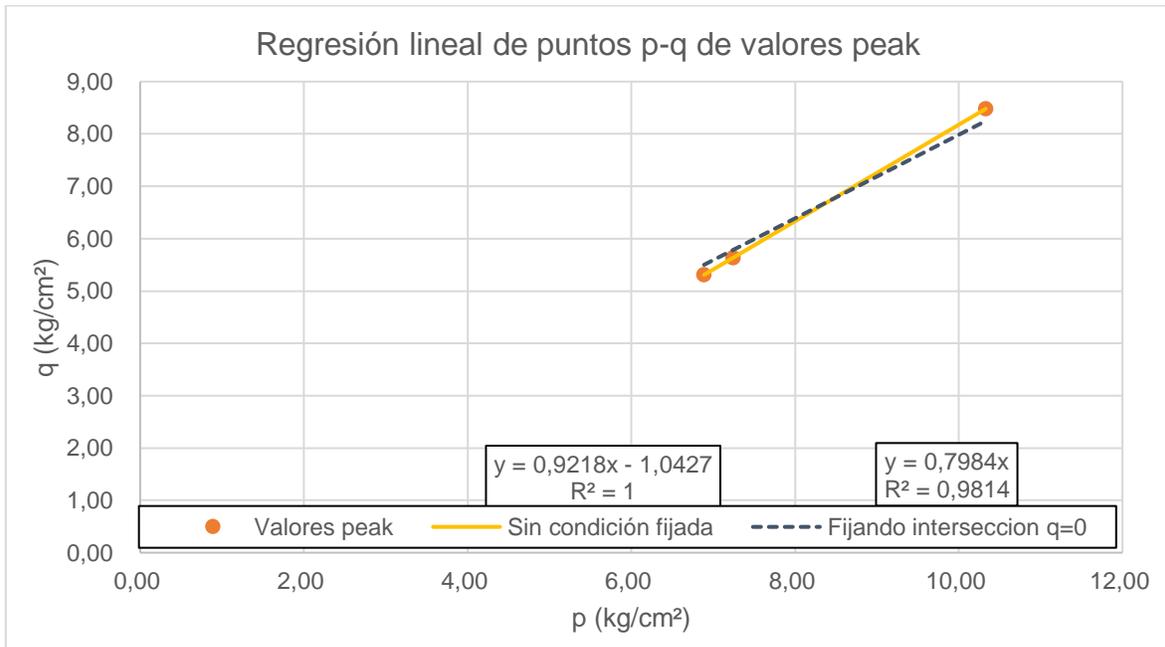


Figura 4.25 Regresión lineal de las tensiones peak obtenidas en los ensayos triaxiales CU. Se presentan las ecuaciones que representa cada regresión encima de su tabulación en la leyenda.

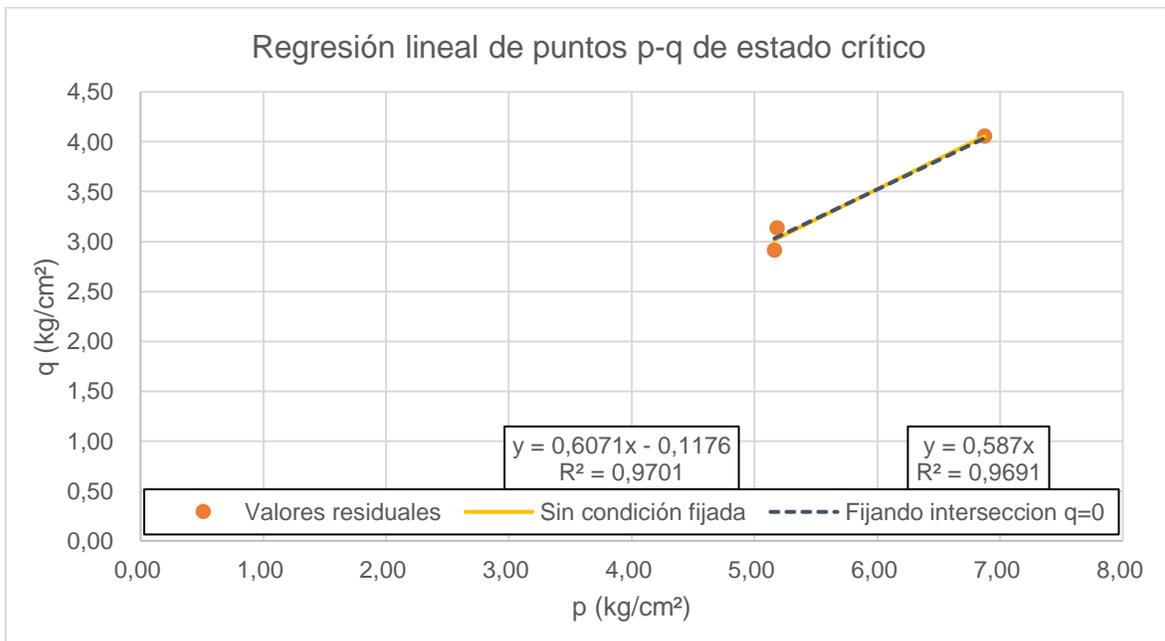


Figura 4.26 Regresión lineal de los puntos de estado crítico obtenidos en los ensayos triaxiales CU. Se presentan las ecuaciones que representa cada regresión encima de su tabulación en la leyenda.

Ya que las rectas obtenidas por la regresión lineal sin imponer alguna condición cortan al eje 'q' en valores negativos y esto no representaría un estado real (no

existe cohesión negativa), se fija que la intersección con el eje 'q' sea en el punto $q=0 \text{ kg/cm}^2$, obteniéndose las ecuaciones 12 y 13.

$$q \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0,7984 * p \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \quad (\text{Peak}) \quad (12)$$

$$q \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0,5870 * p \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \quad (\text{Estado crítico}) \quad (13)$$

A partir de estas expresiones, transformándolas en términos de σ y τ , se obtienen las envolventes de falla mostradas en la ecuación 14 y 15.

$$\tau \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = \sigma \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) * 1,3260 \quad (\text{Peak}) \quad (14)$$

$$\tau \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = \sigma \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) * 0,7251 \quad (\text{Estado crítico}) \quad (15)$$

En la tabla 9 se presentan los parámetros de las envolventes de falla.

Tabla 9 Parámetros de envolvente de falla obtenida por los datos de ensayo triaxial CU.

Puntos utilizados	Ecuación (kg/cm ² y kPa)	ϕ (°)
Peak	$\tau = 1,33\sigma$	52,98
Estado crítico	$\tau = 0,73 \sigma$	35,94

De la misma manera que para el caso de los ensayos de corte directo, hay que tener en consideración que la envolvente de falla buscada es la que presente las tensiones de estado crítico de la muestra, ya que el objetivo de este estudio es analizar el caso de la zona afectada por deslizamientos provocados por el terremoto de 1960, por lo que se utilizará la envolvente de falla obtenida usando los datos de tensión de estado crítico, representada en la figura 4.26 y por la ecuaciones 13 y 15.

Se debe destacar el hecho de que los valores de tensión de estado crítico dos de los ensayos realizados llegan a valores de p y q muy similares, que corresponden a aquellos realizados a presiones de 1 y 3 kg/cm², diferenciándose en aproximadamente 0,03 kg/cm² (2,94 kPa). Esto sugiere que la muestra que se le realizó el ensayo a una presión de confinamiento de 1 kg/cm² presentaba una presión de consolidación mayor a este valor, posiblemente cercana a la presión de confinamiento elegida para el segundo ensayo (3 kg/cm²). Esta sobreconsolidación puede ser representada en la envolvente de falla como una recta horizontal, ya que no hay más datos para representar de mejor manera este estado de la muestra. Considerando lo expuesto por Shahangian (2011) (Figura 4.27), se obtiene la

envolvente de falla para las muestras, que se presenta en la Figura 4.28, en donde se grafica la recta horizontal que representa la zona de sobreconsolidación desde el punto de la envolvente de falla que presenta la presión de sobreconsolidación interpretada, es decir, una tensión normal de 3 kg/cm² o 294 kPa.

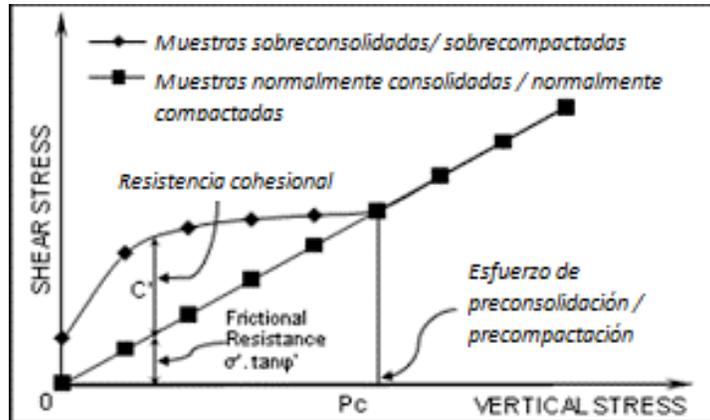


Figura 4.27 Efectos de la sobreconsolidación / sobrecompactación en esfuerzos de cizalle en suelos. Extraído y traducido de Shahangian (2011)

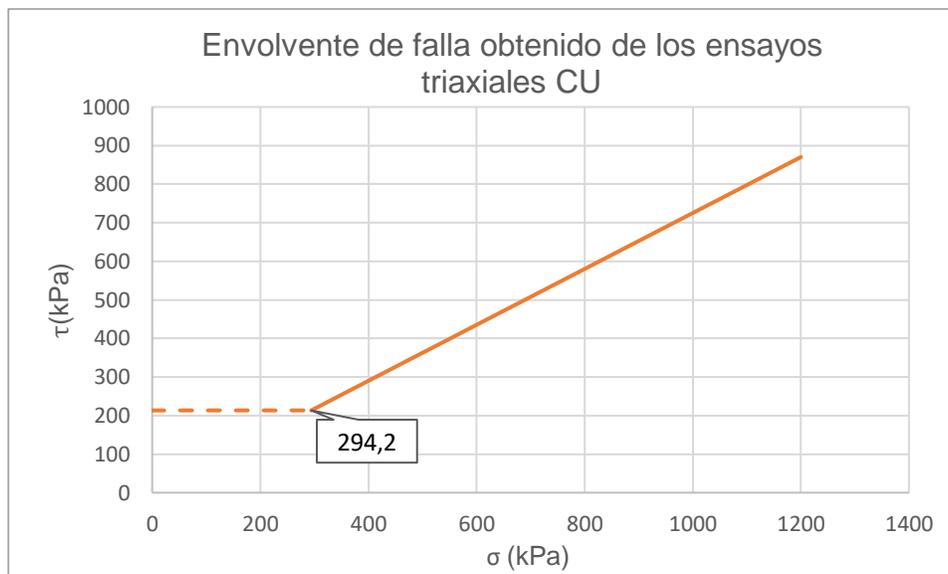


Figura 4.28 Envolvente de falla de las muestras, la línea punteada representa la sobreconsolidación observada en las muestras, y la línea continua utiliza los valores de cohesión y ángulo de fricción obtenidos de la regresión lineal ocupando los datos de tensión de estado crítico. Datos representados en kPa.

En resumen, se presentan los parámetros de la envolvente de falla que caracteriza a las muestras en la tabla 10.

Tabla 10 Parámetros de envolvente de falla obtenida por los datos de ensayo triaxial CU.

Ecuación (kg/cm ²)	Cohesión (kg/cm ²)	Ecuación (kPa)	Cohesión (kPa)	ϕ (°)
$\tau = 2,18(\text{hasta } 3 \text{ kg/cm}^2)$	2,18	$\tau = 213,3$ (hasta 294,2 kPa)	213,3	0
$\tau = 0,73\sigma$ (desde 3 kg/cm ²)	0	$\tau = 0,73\sigma$ (desde 294,2 kPa)	0	35,94

Los puntos usados para elaborar los gráficos de las figuras 4.23 y 4.24 se ubican en el anexo G.

4.4 Estabilidad de Laderas

Parámetros y condiciones fijadas para el análisis

Ya con los parámetros de la envolvente de falla definidos, se realiza el análisis de estabilidad de ladera, utilizando el software Slide versión 5.0 de Rocscience. Para ello se requiere obtener los perfiles de la ladera a estudiar, la estratigrafía de la zona y las propiedades geotécnicas de cada unidad.

El perfil utilizado para el análisis es el perfil AA' (figura 4.29), el cual corta el taco de mayor tamaño generado por el terremoto de 1960 y fue utilizado para evaluar las condiciones pre-terremoto. Este perfil fue reconstruido utilizando la descripción realizada por Davis y Karzulovic (1963), siendo representado en la figura 4.30.



Figura 4.29 Ubicación del perfil a estudiar en el análisis de estabilidad de ladera. Fuente: Google Earth.

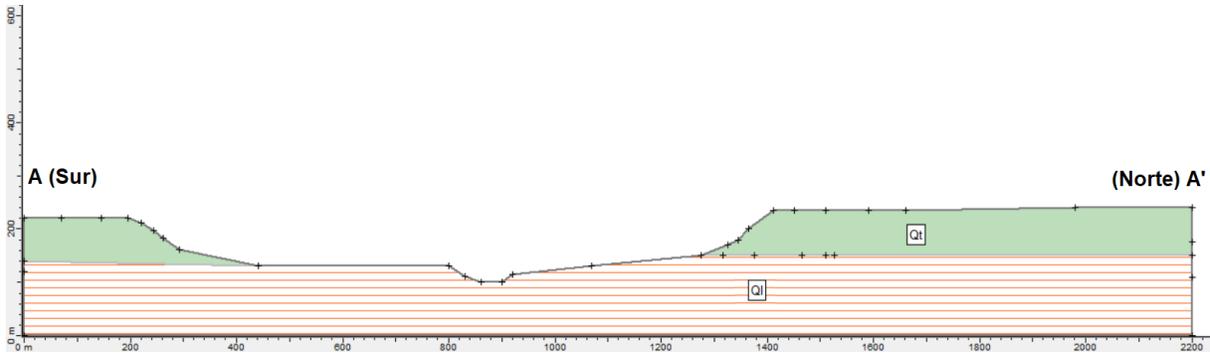


Figura 4.30 Perfil AA', previa al terremoto de 1960.

En la figura que representa el perfil estudiado se observan 2 unidades diferentes (Ql y Qt). La unidad que contiene el material estudiado corresponde a Ql, esta unidad se analizará con los parámetros obtenidos de dos envolventes de falla distintas: uno de ellos obtenido por los ensayos de corte directo y el otro obtenido por los ensayos triaxiales CU (Figura 4.31).

La razón de repetir el análisis para cada envolvente de falla en vez de elegir una de ellas se debe al hecho que cada ensayo representa una condición importante de los sedimentos; mientras que la envolvente obtenida por el corte directo muestra las tensiones experimentadas al cizallar el sedimento por un plano paralelo a la laminación de las muestras, la envolvente obtenida por el ensayo triaxial representa las condiciones no drenadas que sufrió el sedimento, ya que la velocidad de deslizamiento de la remoción ocurrida sería mayor a la velocidad de expulsión del agua presente en los sedimentos, por lo que lo más probable es que la respuesta del sedimento ante este escenario sea en condición no drenada.

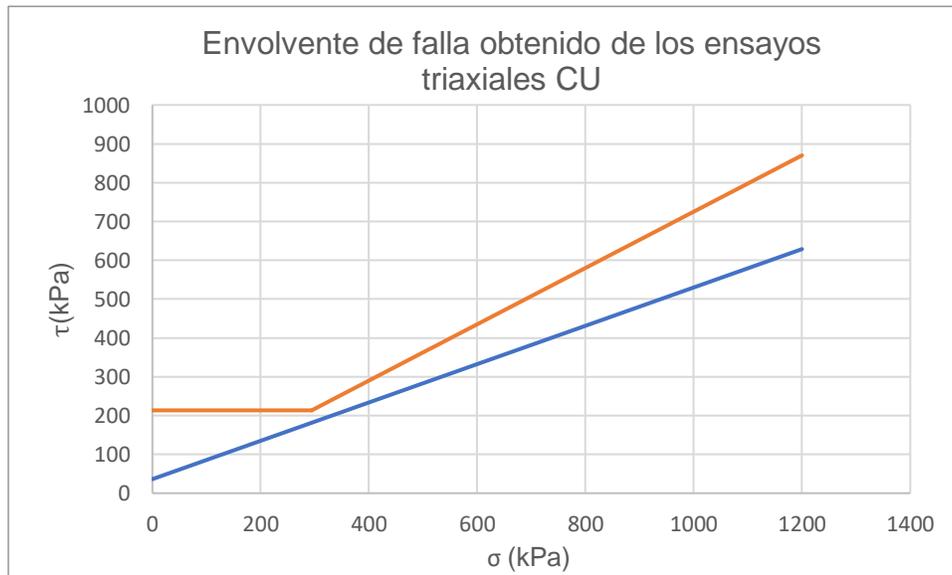


Figura 4.31 Envolventes de falla obtenidas por los ensayos de corte directo y triaxial CU. La recta de color celeste muestra la envolvente obtenida por los ensayos de corte directo, mientras que la recta de color naranja muestra la envolvente obtenida por los ensayos triaxiales CU.

Para las demás propiedades que no fueron obtenidas mediante las metodologías aplicadas a las muestras (γ_{sat} y γ_d), fueron utilizados intervalos de valores de referencia encontrados en González de Vallejo (2002) (Figura 4.32) y MATHalino (2019), para los distintos suelos presentes (Figura 4.33).

La unidad Qt representa la intercalación de sedimentos descritos por Davis y Karzulovic (1963) correspondiente a los depósitos glaciofluviales de la glaciación Llanquihue que se sitúan sobre el limo ensayado, presentando capas de arenas basálticas, ceniza, gravas y arena (mezclada con grava). Como no se tienen datos geotécnicos de ese material, el valor de cohesión (c) de Qt se obtuvo al realizar un back-analysis, fijando los valores del ángulo de fricción y peso unitario (seco y saturado, Tabla 11) de acuerdo con los intervalos de valores de referencia encontrados en González de Vallejo (2002) (Figura 4.32) y MATHalino (2019) (Figura 4.33), respectivamente, considerando que esta unidad presenta varios tipos de suelo.

Tipo de suelo	Ángulo de rozamiento interno en función de la densidad inicial (°)		
	Flojo	Medianamente denso	Denso
Limo no plástico	26 a 30	28 a 32	30 a 34
Arena uniforme fina a media	26 a 30	30 a 34	32 a 36
Arena bien graduada	30 a 34	34 a 40	38 a 46
Mezclas de arena y grava	32 a 36	36 a 42	40 a 48

Figura 4.32 Valores de ángulo de rozamiento interno en suelos granulares no plásticos en función de la granulometría y la compacidad. Extraído de González de Vallejo (2002).

Tipo de suelo	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)
Grava	20 - 22	15 - 17
Arena	18 - 20	13 - 16
Limo	18 - 20	14 - 18
Arcilla	16 - 22	14 - 21

Figura 4.33 Valores típicos de pesos unitarios para suelos. Extraído de MATHalino (2019).

Tabla 10 Valores fijados para la unidad Qt.

Unidad	ϕ (°)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)
Qt	38	19	18

El back-analysis fue realizado mediante análisis de estabilidad en Slide a la ladera actual del perfil estudiado, presentando la unidad Qt, en estado seco. Considerando el hecho de que para el terremoto del 27 de febrero de 2010 no fueron notificadas remociones en masa en el sector, se puede asumir que estos estratos resistieron esta perturbación sísmica.

De esta forma, en los análisis de estabilidad para esta ladera se incorpora un coeficiente sísmico asociado a las aceleraciones del terremoto del 2010 para la zona de estudio, que se puede calcular mediante la expresión de Hynes-Griffin y Franklin (1984, figura 4.34) ocupando los datos de PGA estimados para el sismo por el USGS (aproximadamente 0,01 g en la zona de estudio), resultando un coeficiente sísmico aproximado de 0,005.

<i>Coefficiente sísmico</i>	<i>Observaciones</i>
0.10	Sismo importante. FS > 1.0
0.15	Sismo de gran magnitud, FS > 1.0
0.15–0.25	Japón, FS > 1.0
0.05–0.15	Estado de California
0.15	Seed (1979), con FS > 1.15 y un 20% de reducción de resistencia
$\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \text{PGA}^a$	Marcuson y Franklin (1983), FS > 1.0
$\frac{1}{2} \text{PGA}$	Hynes-Griffin y Franklin (1984), FS > 1.0 y un 20% de reducción de resistencia

^aPGA = Aceleración peak sísmica, en unidades de g

Figura 4.34 Expresiones para definir el coeficiente sísmico horizontal. Se elige la expresión encerrada por el polígono. Extraído de Abramson et al. (2002).

Utilizando los valores anteriormente expuestos, la cohesión mínima para que la ladera presente un factor de seguridad superior a 1 es de 36 kN/m². La figura 4.35 muestra este resultado y la ladera escogida para el análisis.

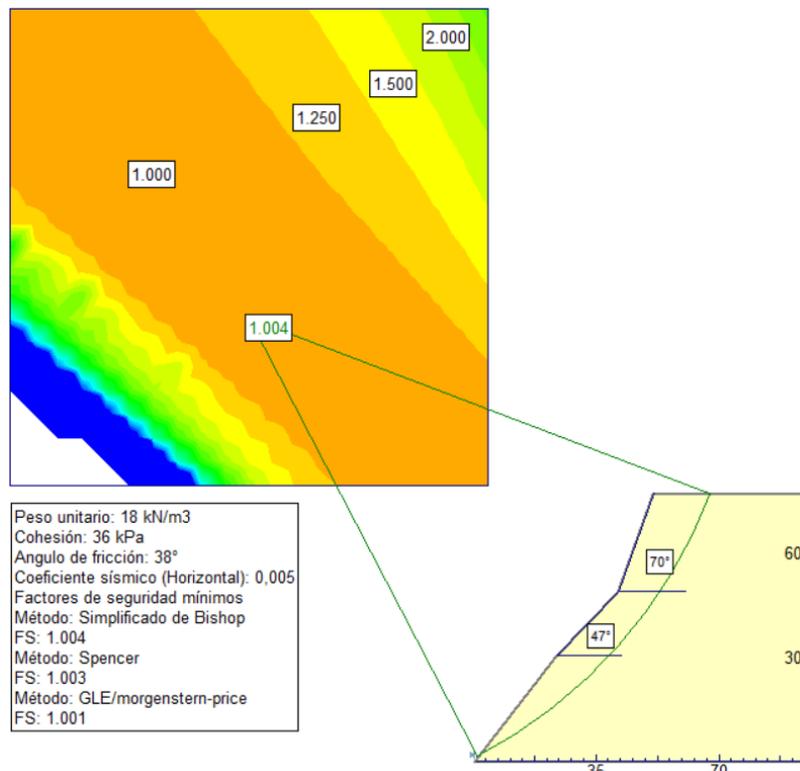


Figura 4.35 Análisis de estabilidad realizado a la ladera, representando la unidad Qt.

El valor de cohesión obtenido por el back-analysis solo puede ser utilizado para secciones no saturadas de la unidad Qt, y ya que la zona de estudio presenta una alta precipitación, sería incorrecto haber realizado el análisis de estabilidad sin un nivel freático y sin castigar la cohesión presentada por la unidad Qt. Por ello, se divide la unidad Qt en dos subunidades: la unidad Qt1, representando la zona no saturada y con su cohesión igual al obtenido por el back-analysis; y la unidad Qt2, representando la zona saturada y con su cohesión igual a 0 kPa, Este último valor se asume, ya que no hay más valores de referencia que indiquen que tanto disminuye la cohesión de esta unidad cuando se encuentra saturada, fundamentado en que esta unidad corresponde a intercalaciones de suelos más gruesos, y que por lo tanto ante un estado saturado pierde la cohesión, por lo que la cohesión obtenida del back-analysis sería más bien una cohesión aparente.

Los parámetros utilizados para cada unidad se agrupan en la tabla 12.

Tabla 11 Parámetros geotécnicos definidos para cada unidad

Unidad	ϕ (°)	Cohesión (kPa)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)
QI (Triaxial CU)	0 (hasta $\sigma = 294,2$ kPa)	213,3	18,5	17,5
	35,94 (desde $\sigma = 294,2$ kPa)	0		
QI (Corte directo)	26,28	36,22	18,5	17,5
Qt1	38	36	19	18
Qt2	38	0	19	18

Ya que la estabilidad de ladera depende del nivel freático que se encuentre en la zona, se debe tener en consideración para los casos estudiados. De acuerdo con un informe realizado para el ministerio de obras públicas (Conic BF ingenieros, 2010) los niveles freáticos que presentan los depósitos glaciofluviales de la glaciación Llanquihue (Qt) se ubican entre 1 y 5 m de profundidad. Este caso está representado en la figura 4.36.a, donde el nivel freático varía entre 3 y 20 m de profundidad.

Ya que no se tienen datos sobre que tanto ha variado el nivel freático desde 1960, se estudian dos casos adicionales para observar que tanto podría variar los factores de seguridad dependiendo de la altura del nivel: uno donde el nivel se ubica a $\frac{3}{4}$ de la altura total desde la base de la unidad Qt (Figura 4.36.b), y el otro donde el nivel se ubica en la mitad de la altura total de la unidad Qt (Figura 4.36.c).

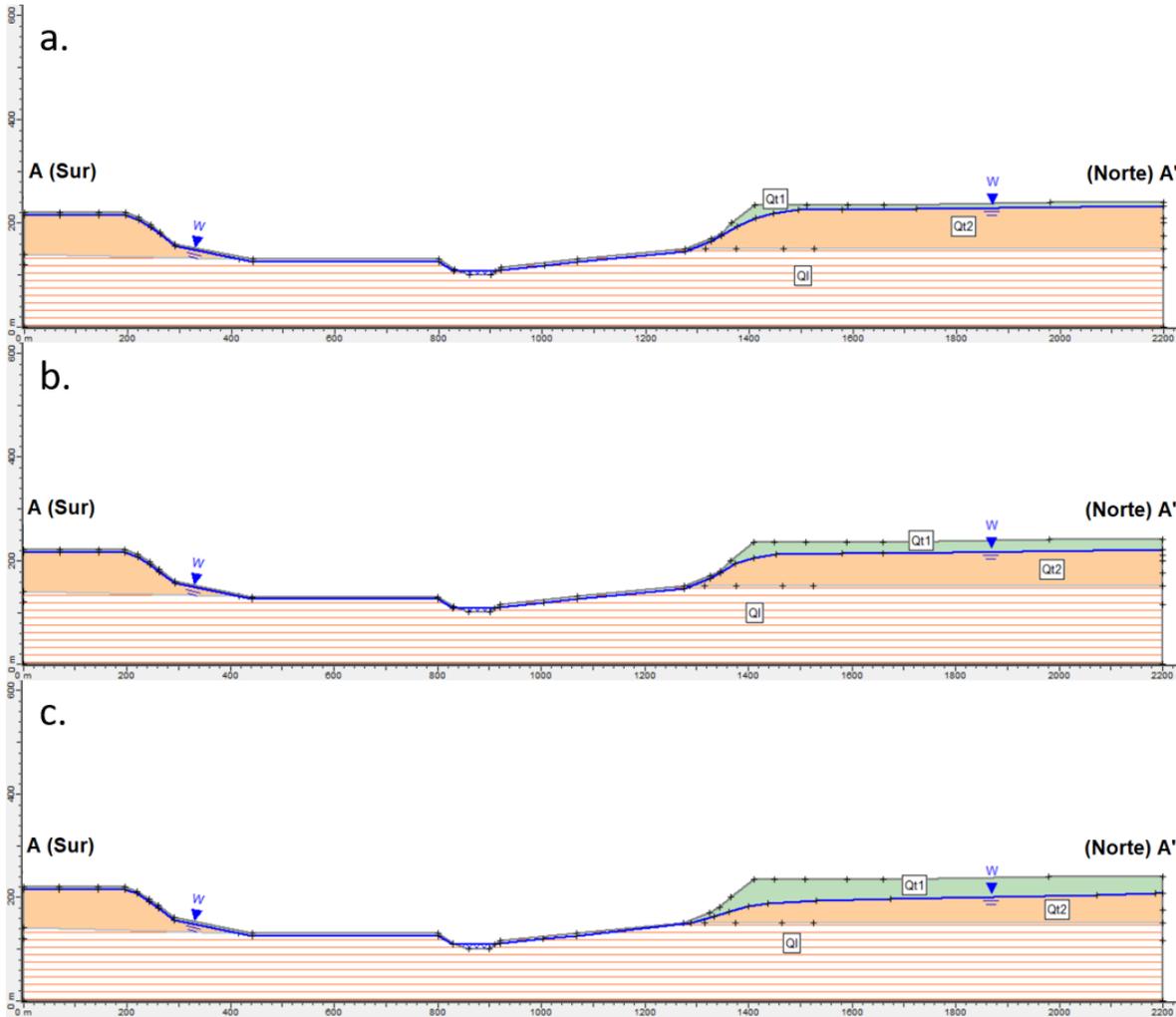


Figura 4.36 a. Perfil representativo para un nivel freático que se encuentra a 10 m de profundidad. b. Perfil representativo para un nivel freático que satura 3/4 de la unidad Qt. c. Perfil representativo para un nivel freático que satura la mitad de la unidad Qt.

El último parámetro por variar en este estudio es el coeficiente sísmico horizontal usado para el análisis de estabilidad de la ladera completa. Su valor es fijado utilizando la expresión Hynes-Griffin y Franklin (Figura 4.34) y considerando el hecho que, según la USGS, los valores de PGA horizontal modelados en la zona de estudio son aproximadamente 0,9-1,0 g (980 cm/s²); su resultado (0,5) sería el representativo para modelar las condiciones ocurridas en el terremoto de 1960 en la zona de estudio. Además del análisis realizado con este coeficiente, se estudian los casos donde no existe sismicidad (0) y el coeficiente sísmico mínimo para obtener un factor de seguridad menor a 1.

Finalmente, para el análisis se utiliza el modelo simplificado de Bishop, el de Spencer y el de Morgenstern-Price. El de Bishop se elige debido a que es de los más utilizados; y el de Spencer y Morgenstern-Price se eligen porque son de los que presentan una mejor fiabilidad a las condiciones reales, ya que se fijan menos condiciones impuestas a las secciones.

Factores de seguridad obtenidos

Modelamiento de la superficie de falla ocurrida en 1960

Para encontrar las condiciones que desencadenaron los deslizamientos ocurridos en la zona de estudio, se realizaron dos configuraciones de análisis diferentes, ya que la configuración de búsqueda libre del software no mostraba los factores de seguridad de las superficies de falla más profundas:

- Búsqueda libre de bloques (Configuración A): Consiste en colocar polígonos y puntos dentro de la sección de la ladera (Figura 4.37) en donde las superficies de deslizamiento generadas por el software pueden variar en su ángulo de pendiente. Además, en los polígonos/puntos que se ubican en los extremos de la ladera estudiada se puede indicar la orientación que deberían seguir las superficies, acotando las variaciones que pueden tener. La ubicación de las zonas impuestas está basada en la superficie sugerida por Davis y Karzulovic (1963) (Figura 2.3).
- Superficies circulares impuestas (Configuración (B)): Se imponen 4 superficies circulares (Figura 4.38), con el objetivo de observar qué tanto varían los factores de seguridad para el caso de que sucedan deslizamientos sucesivos.

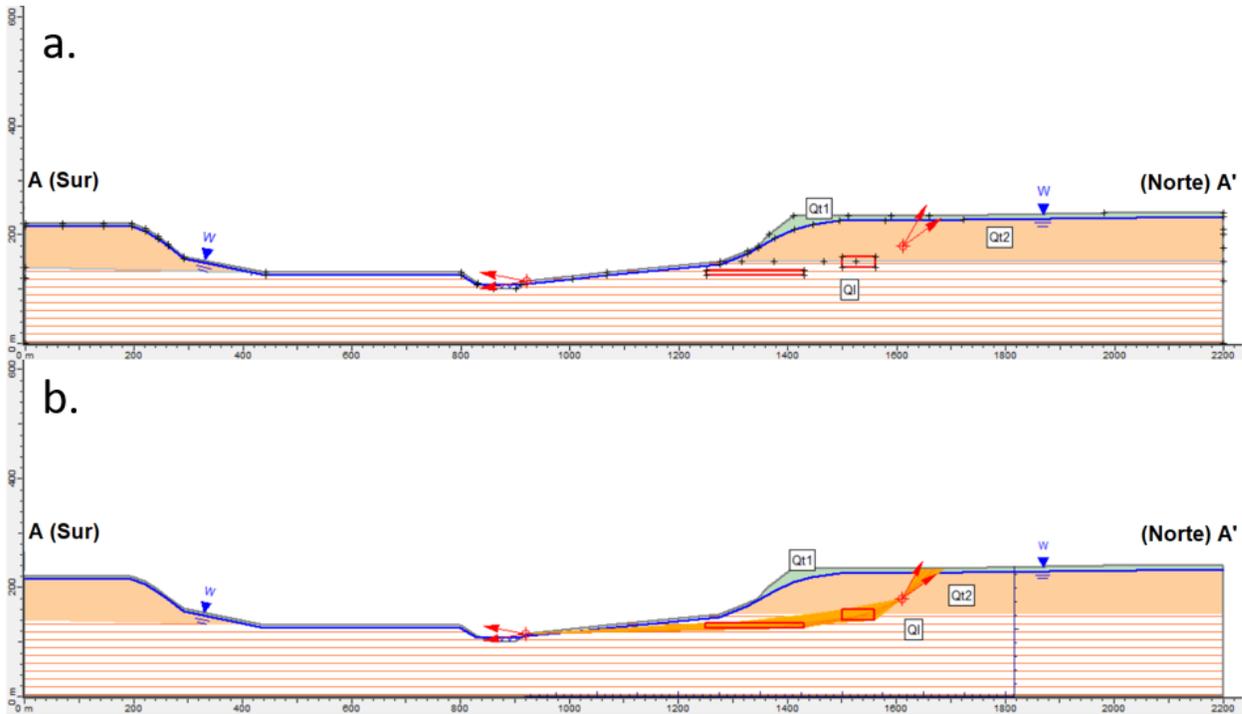


Figura 4.37 a. Perfil ilustrativo de la configuración A para el caso donde el nivel freático se ubica aproximadamente a 10 m de profundidad. Los polígonos en rojo indican las zonas en donde las superficies de falla varían su pendiente, mientras que las flechas indican los ángulos que pueden presentar los planos que sobrepasan los puntos indicados. b. Superficies de falla generadas por el análisis realizado mediante la configuración A, se observa que por el punto situado a la derecha pasan todas las superficies generadas.

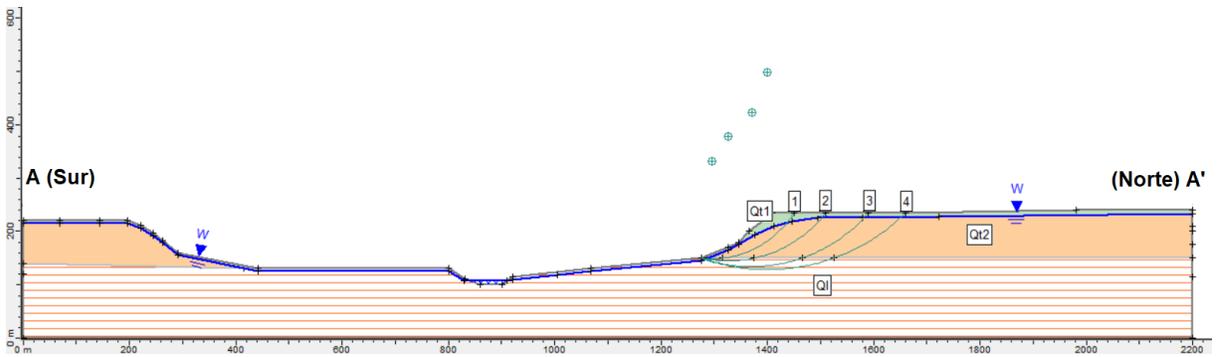


Figura 4.38 Perfil ilustrativo de la configuración B para el caso donde el nivel freático se ubica aproximadamente a 10 m de profundidad. Se muestran los números que se usan para indicar de mejor manera a cuál deslizamiento se puede referir.

Configuración A (Búsqueda libre de bloques)

En las tablas 13, 14 y 15 se muestran los factores de seguridad obtenidos mediante la búsqueda de bloques: la tabla 13 indica los factores de seguridad obtenidos para el caso estático, la tabla 14 muestra los coeficientes sísmicos necesarios para que del análisis de estabilidad se obtenga una superficie que tenga factores de seguridad menores a 1, y la tabla 15 además de los factores de seguridad obtenidos indica los factores de seguridad obtenidos cuando se asume un coeficiente sísmico horizontal de 0,5.

Tabla 12 Factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad ocupando la búsqueda de bloques para el caso estático (coeficiente sísmico nulo).

Corte directo			
Profundidad de nivel freático	Superficie con menor FS		
	Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
10 m de profundidad	1,903	1,899	1,885
$\frac{3}{4}$ del espesor de Qt (desde la base)	2,061	2,065	2,048
$\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	2,385	2,388	2,371
Triaxial			
Saturación de la unidad Qt	Superficie con menor FS		
	Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
10 m de profundidad	2,581	2,553	2,521
$\frac{3}{4}$ del espesor de Qt (desde la base)	2,808	2,783	2,753
$\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	3,249	3,228	3,192

Tabla 13 Coeficientes sísmicos mínimos para que una de las superficies de deslizamiento tenga sus FS menores a 1.

Corte directo				
Profundidad de nivel freático	Coeficiente sísmico para obtener FS < 1,0	Superficie con menor FS		
		Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
10 m de profundidad	0,159	0,997	0,989	0,982
$\frac{3}{4}$ del espesor de Qt (desde la base)	0,188	0,998	0,988	0,983
$\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	0,235	0,999	0,990	0,985
Triaxial				
Profundidad de nivel freático	Coeficiente sísmico para obtener FS < 1,0	Superficie con menor FS		
		Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
10 m de profundidad	0,285	0,997	0,943	0,921
$\frac{3}{4}$ del espesor de Qt (desde la base)	0,320	0,999	0,943	0,921
$\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	0,390	0,998	0,945	0,923

Tabla 14 Factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad ocupando la búsqueda de bloques para un coeficiente sísmico horizontal de 0,5.

Corte directo			
Profundidad de nivel freático	Superficie con menor FS		
	Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
10 m de profundidad	0,460	0,457	0,454
$\frac{3}{4}$ del espesor de Qt (desde la base)	0,501	0,497	0,489
$\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	0,573	0,570	0,563
Triaxial			
Saturación de la unidad Qt	Superficie con menor FS		
	Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
10 m de profundidad	0,660	0,601	0,591
$\frac{3}{4}$ del espesor de Qt (desde la base)	0,713	0,653	0,641
$\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	0,821	0,765	0,748

Observando los datos obtenidos de los análisis de estabilidad, se puede señalar que el coeficiente sísmico estimado para el gran terremoto de Valdivia (0,5) en esta zona supera en todos los casos al coeficiente mínimo necesario para obtener factores de seguridad inferiores a 1. También puede mencionarse que a mayor saturación de la unidad Qt se necesita un menor coeficiente sísmico para obtener factores de seguridad menores a 1.

Configuración B (Superficies circulares fijadas)

En las tablas 16, 17 y 18 se muestran los factores de seguridad obtenidos mediante el análisis a las superficies circulares fijadas: la tabla 16 indica los factores de seguridad obtenidos para el caso estático, la tabla 17 muestra los coeficientes sísmicos necesarios para que del análisis de estabilidad se obtenga al menos una superficie circular que tenga factores de seguridad menores a 1, y la tabla 18 indica los factores de seguridad obtenidos cuando se asume un coeficiente sísmico horizontal de 0,5.

Tabla 15 Factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad en las superficies circulares fijadas para el caso estático (coeficiente sísmico nulo).

Corte directo					
Profundidad de nivel freático	Métodos	Deslizamientos			
		1	2	3	4
10 m de profundidad	Simplificado de Bishop	1,051	1,241	1,500	1,843
	Spencer	1,048	1,226	1,484	1,828
	Morgenstern-Price	1,052	1,223	1,480	1,827
$\frac{3}{4}$ del espesor de Qt (desde la base)	Simplificado de Bishop	1,204	1,327	1,558	2,059
	Spencer	1,194	1,315	1,546	2,046
	Morgenstern-Price	1,188	1,314	1,544	2,043
$\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	Simplificado de Bishop	1,539	1,665	1,865	2,437
	Spencer	1,526	1,650	1,852	2,421
	Morgenstern-Price	1,522	1,651	1,855	2,421
Triaxial					
Profundidad de nivel freático	Métodos	Deslizamientos			
		1	2	3	4
10 m de profundidad	Simplificado de Bishop	1,223	1,397	1,845	2,316
	Spencer	1,161	1,358	1,832	2,306
	Morgenstern-Price	1,177	1,371	1,841	2,315
$\frac{3}{4}$ del espesor de Qt (desde la base)	Simplificado de Bishop	1,601	1,538	1,925	2,569
	Spencer	1,515	1,495	1,908	2,555
	Morgenstern-Price	1,504	1,500	1,917	2,568
$\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	Simplificado de Bishop	1,934	1,903	2,308	3,047
	Spencer	1,857	1,867	2,286	3,036
	Morgenstern-Price	1,846	1,870	2,294	3,043

Tabla 16 Coeficientes sísmicos mínimos para que una de las superficies circulares fijadas tenga sus FS menores a 1, siendo destacadas con un sombreado anaranjado.

Corte directo						
Profundidad de nivel freático	Coeficiente sísmico para obtener FS < 1,0	Métodos	Deslizamientos			
			1	2	3	4
10 m de profundidad	0,023	Simplificado de Bishop	0,998	1,162	1,374	1,651
		Spencer	0,993	1,145	1,358	1,635
		Morgenstern-Price	0,994	1,142	1,353	1,634
¼ del espesor de Qt (desde la base)	0,082	Simplificado de Bishop	0,999	1,059	1,175	1,445
		Spencer	0,988	1,047	1,166	1,435
		Morgenstern-Price	0,985	1,041	1,163	1,429
½ del espesor de Qt	0,212	Simplificado de Bishop	0,999	0,998	0,998	1,149
		Spencer	0,984	0,987	0,999	1,148
		Morgenstern-Price	0,981	0,980	0,995	1,137
Triaxial						
Profundidad de nivel freático	Coeficiente sísmico para obtener FS < 1,0	Métodos	Deslizamientos			
			1	2	3	4
10 m de profundidad	0,097	Simplificado de Bishop	0,999	1,083	1,329	1,552
		Spencer	0,924	1,042	1,326	1,551
		Morgenstern-Price	0,948	1,063	1,339	1,561
¼ del espesor de Qt (desde la base)	0,177	Simplificado de Bishop	1,139	0,998	1,126	1,338
		Spencer	1,036	0,930	1,118	1,343
		Morgenstern-Price	1,023	0,959	1,136	1,347
½ del espesor de Qt	0,291	Simplificado de Bishop	1,155	0,999	1,056	1,208
		Spencer	1,054	0,935	1,047	1,220
		Morgenstern-Price	1,040	0,970	1,062	1,229

Tabla 17 Factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad en las superficies circulares fijadas para un coeficiente sísmico horizontal de 0,5.

Corte directo					
Profundidad de nivel freático	Métodos	Deslizamientos			
		1	2	3	4
10 m de profundidad	Simplificado de Bishop	0,402	0,433	0,456	0,482
	Spencer	0,437	0,474	0,505	0,530
	Morgenstern–Price	0,476	0,451	0,483	0,506
$\frac{3}{4}$ del espesor de Qt (desde la base)	Simplificado de Bishop	0,465	0,460	0,476	0,531
	Spencer	0,473	0,483	0,520	0,568
	Morgenstern–Price	0,460	0,462	0,507	0,553
$\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	Simplificado de Bishop	0,623	0,596	0,575	0,637
	Spencer	0,615	0,614	0,610	0,670
	Morgenstern–Price	0,613	0,589	0,595	0,657
Triaxial					
Profundidad de nivel freático	Métodos	Deslizamientos			
		1	2	3	4
10 m de profundidad	Simplificado de Bishop	0,514	0,506	0,573	0,619
	Spencer	Inválido	0,584	0,665	0,698
	Morgenstern–Price	0,522	0,556	0,651	0,704
$\frac{3}{4}$ del espesor de Qt (desde la base)	Simplificado de Bishop	0,711	0,563	0,600	0,680
	Spencer	0,587	0,586	0,677	0,753
	Morgenstern–Price	0,572	0,580	0,660	0,754
$\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	Simplificado de Bishop	0,868	0,712	0,730	0,818
	Spencer	0,755	Inválido	0,774	0,867
	Morgenstern–Price	0,738	0,707	0,773	0,873

Observando los factores de seguridad obtenidos en la tabla 17, se puede asumir que el coeficiente sísmico estimado para el gran terremoto de Valdivia en esta zona es suficiente para provocar alguna superficie circular inestable. Se puede destacar que, aunque en la mayoría de los casos solo una de las superficies presentaba todos los factores de seguridad menores a 1, las otras superficies no presentaban factores de seguridad muy alejados. De la misma manera que para la configuración A, a mayor saturación de la unidad Qt se necesita un menor coeficiente sísmico para obtener factores de seguridad menores a 1.

Las superficies obtenidas mediante la búsqueda libre se encuentran en el anexo H.

5. Discusión

5.1 Respecto a los resultados de la caracterización geológica

De los resultados de la caracterización geológica se observa que tanto los resultados del granulómetro laser como del corte transparente permiten clasificar el suelo como limo arcilloso para la muestra SP1803. Esta similitud en los resultados también puede extrapolarse a la muestra SP1804, ya que las diferencias apreciables entre ambas muestras se encuentran en el tamaño y disposición de los clastos y el ancho de las fracturas rellenadas; mientras que las distribuciones de tamaño de granos son prácticamente idénticas.

En cuanto a la confiabilidad de los resultados obtenidos por el granulómetro laser, se repitieron en varias oportunidades los análisis realizados, procurando que la oscuración medida al depositar el material estudiado en la máquina se encuentre entre los valores recomendados (de un 10% a un 20%). Además, fue asumido un valor promedio de índice de refracción de 1,52, ya que las muestras se componían principalmente de silicatos y este valor impuesto es similar al promedio de los índices de refracción de los silicatos comúnmente encontrados en depósitos sedimentarios. Considerando todo lo anterior, se obtuvo varias mediciones cuyos resultados no variaban en gran medida, por lo que son representativos de las muestras analizadas.

Los resultados obtenidos del análisis de FTIR en todas las muestras (SP1803-A, SP1803-B y SP1804) exponen que la porción más fina se compone principalmente de arcillas y feldspatos, destacando la presencia de montmorillonita; ya que esta presenta propiedades expansivas en presencia de agua (González de Vallejo, 2002). Mediante la descripción microscópica de las muestras SP1803 y SP1804 se puede observar la composición de los clastos, siendo el mineral mayoritario el cuarzo. Esta diferencia de composición puede ser debido al hecho de que los clastos no sufrieron un retrabajo suficiente para meteorizar el cuarzo contenido en ellos, y con ello aportar a los sedimentos más finos una proporción de este mineral.

Cabe comentar el hecho de que el análisis cuantitativo de los minerales obtenidos por el análisis de FTIR no son tan confiables, ya que los porcentajes mostrados para cada mineral fueron obtenidos al realizar tanteos de las proporciones de cada mineral bajo dos condiciones: que la suma de los porcentajes no supere el 100% y que el porcentaje asignado a cada mineral sea proporcional al número de peaks que se encuentren simultáneamente entre el espectrograma del mineral con la muestra analizada. El tanteo fue realizado intentando asemejar lo más posible el espectrograma de referencia a los espectrogramas obtenidos por el análisis y por ello se debe tener cuidado en sobreestimar estos resultados, siendo solo indicativos aproximados de la proporción de minerales presentes.

5.2 Respecto al origen de los sedimentos

En cuanto al origen de las muestras extraídas de la capa de limo, estas presentan las características propias de un depósito sedimentario de grano fino originado por de origen glaciolacustre, específicamente del subambiente de fondo de lago (Ashley, 2002), ya que presenta una gran porción de clastos de tamaño limo a arcilla formando capas de 2 cm de espesor, capas delgadas de clastos de tamaño arena, que pueden representar un cambio estacional en la depositación, y una baja proporción de clastos de gran tamaño en comparación con la porción mayoritaria del sedimento que se encuentran dispuestos aleatoriamente en las muestras, y pueden denominarse como dropstones.

Sobre la proveniencia de los sedimentos más finos y mayoritarios, se puede mencionar que estos se originan de las rocas que se encuentran aledañas al lago Riñihue, a saber, las metaareniscas y pizarras del complejo metamórfico Trafún y los granitos, granodioritas y tonalitas del batolito Futrono Riñihue, ya que estas unidades presentan una mineralogía similar a la obtenida por los análisis de FTIR. Sin embargo, las descripciones de cada unidad indican que estas presentan minerales que se pueden observar a simple vista, mientras que en las muestras solo se podían identificar mediante una observación bajo microscopio petrográfico, por lo que se puede intuir que las rocas que sirvieron como material para formar la unidad estudiada fueron afectadas por varios procesos de retrabajo realizados por el glaciar para obtener el tamaño de sedimentos observados en las muestras.

Para el caso de los clastos presentes en las muestras, es probable que provengan de las unidades más cercanas a la zona de estudio, ya que algunos de los minerales que componen estos clastos no se encontraron en los análisis de FTIR, por lo que no sufrieron. También se debe destacar que los clastos de mayor tamaño presentaban una mayor angulosidad y se componían principalmente de vidrio, por lo que es probable que estos clastos provengan de zonas volcánicas cercanas al lago Riñihue, como por ejemplo el complejo Volcánico Mocho-Choshuenco, ubicado al este del lago.

5.3 Respecto a los resultados de la caracterización geotécnica

A pesar de que los métodos para obtener los límites de Atterberg sean accionados manualmente y requieran tener una experiencia suficiente para realizar correctamente los métodos, se observa que los resultados obtenidos de ambas muestras presentan una pequeña variación, hecho esperable ya que los sedimentos finos de ambas muestras presentan pequeñas diferencias composicionales y son casi idénticas en cuanto a la distribución de tamaño de grano.

En cuanto al ensayo de corte directo, en los gráficos de deformación horizontal vs tensión de corte se observan puntos que presentan un valor mayor o menor de tensión al esperado en ese punto (no siguen la tendencia general de los valores). Estas irregularidades pueden deberse al hecho que la muestra presenta clastos de gran tamaño denominados dropstones y característicos de sedimentos de origen glaciolacustre (Ashley, 2002) que dificultaban el movimiento generado por la máquina de corte directo, haciendo que la muestra presentara variaciones repentinas de la tensión de corte. Sin embargo, las rectas obtenidas mediante regresión lineal que representan la envolvente de falla con los valores peak y estado crítico presentan un alto coeficiente de correlación ($R^2 > 0,9$) por lo que las irregularidades observadas en el ensayo no afectaron a las tensiones máximas y a las tensiones obtenidas al realizar la máxima deformación posible por la máquina de corte directo (tensiones de estado crítico).

Se observó en los ensayos triaxiales bajo condiciones consolidadas-no drenadas una variación de comportamiento del sedimento, ya que el ensayo realizado bajo la presión de confinamiento de 1 kg/cm^3 presentaba valores negativos de presión de poros, implicando que esta muestra se comporta como un sedimento dilatante bajo esta presión de confinamiento, mientras que en los otros ensayos que fueron aplicadas presiones de confinamiento de 3 y 6 kg/cm^3 presentaba valores positivos de presión de poros, implicando que a presiones de confinamiento mayores se comporta como un sedimento contractante. Lo anterior pudo haberse producido debido a la presencia de montmorillonita, que pudo expandirse en el caso donde no había una alta presión de confinamiento.

Además, se observó que la muestra ensayada presentaba sobreconsolidación, ya que el valor de estado crítico del ensayo realizado bajo una presión de confinamiento de 1 kg/cm^3 se asemeja al valor obtenido del ensayo realizado bajo una presión de confinamiento de 3 kg/cm^3 . Esta condición de la muestra es esperable debido al empaquetamiento observado y además que de acuerdo con la geología del área estos corresponden a sedimentos de origen glaciar.

Debido al hecho de que no había disponibilidad de muestras para realizar más ensayos triaxiales a diferente presión, solo se puede asumir que la presión de confinamiento mayor entre los ensayos que tuvieron el mismo resultado (1 y 3 kg/cm^3), es decir, 3 kg/cm^2 (294 kPa), es la presión de sobreconsolidación de la muestra que divide a la envolvente que caracteriza a la muestra en el estado

sobreconsolidado, representado por la recta horizontal; y el estado normalmente consolidado, que es donde se encuentra la envolvente de falla obtenida mediante la regresión lineal (Figura 5.1).

Con respecto a qué envolvente de falla representa con mayor fidelidad a las condiciones del sedimento durante los deslizamientos, se puede decir que la envolvente obtenida mediante los ensayos triaxiales consolidados-no drenados es más fiable, ya que esta representa las condiciones no drenadas que suceden mediante un evento sísmico, y la “anisotropía” de los esfuerzos que sufrió la unidad en el momento del terremoto. La envolvente de falla obtenida por los ensayos de corte directo, si bien representa un cizalle horizontal paralelo a la laminación de las muestras, que es probable que pudo haber ocurrido en la zona por la laminación paralela que presenta esta unidad (extrapolando los resultados obtenidos de las muestras analizadas a toda la unidad), se realizó en condiciones drenadas, por lo que no representaría las condiciones que ocurrieron durante el desarrollo del deslizamiento.

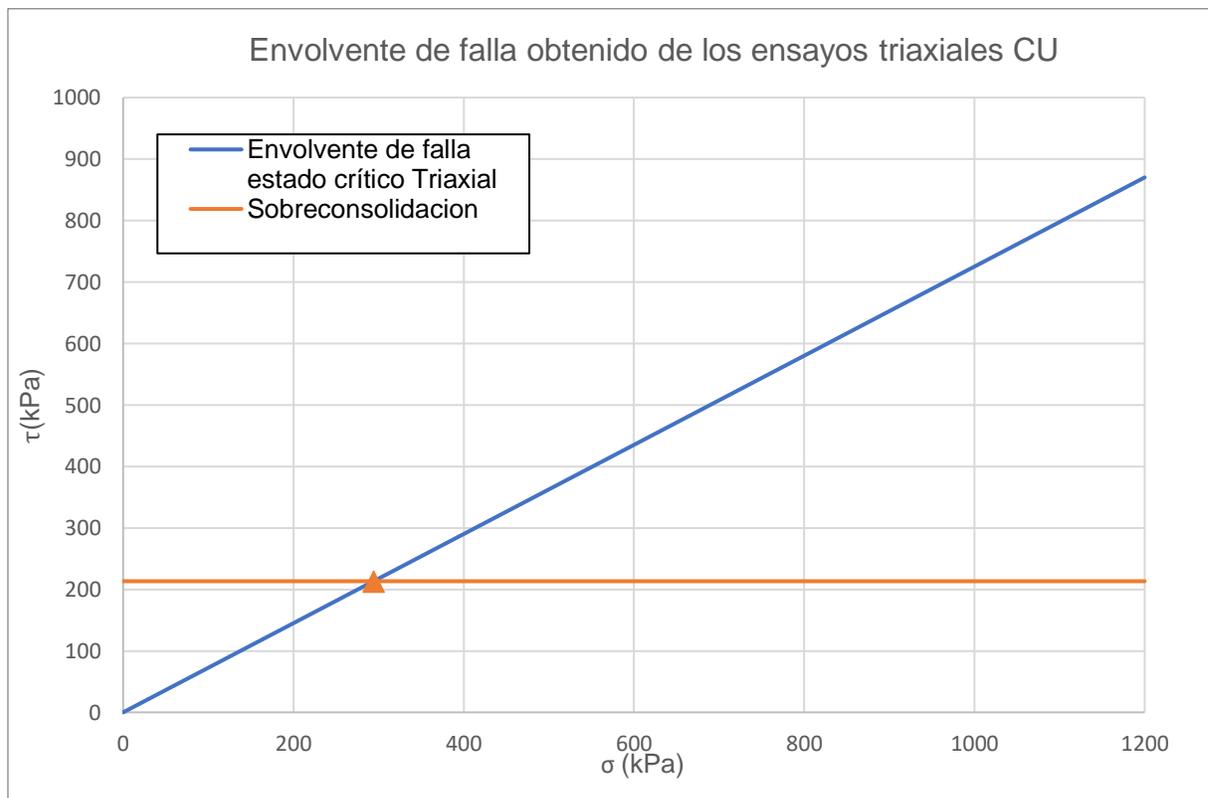


Figura 5.1 Representación de la presión de sobreconsolidación (en azul) y la envolvente de falla obtenida por los puntos de estado crítico del ensayo triaxial CU (en naranja). Se destaca el punto que representa la presión de sobreconsolidación (294 kPa) donde se intersectan con el triángulo de color naranja.

5.4 Respecto al análisis de estabilidad de ladera

Con respecto a las configuraciones de las superficies, la configuración que representa el deslizamiento ocurrido en 1960 es la que ocupa el deslizamiento en bloques, ya que en ella se asume una remoción con una superficie inferior plana y con una superficie distal con una pendiente pronunciada, teniendo una superficie de falla similar a los deslizamientos desencadenados por sismicidad. En cuanto a la otra configuración, que asume 4 superficies circulares, representa la morfología de remociones observadas al oeste de la zona de estudio (Figura 5.2) por lo que sirve como antecedente para proponer otros tipos de deslizamiento que ocurren en la zona.

En cuanto a los niveles freáticos considerados en el análisis, el que se encuentra más superficial sería el caso realista tomando en consideración los datos de acuíferos de la zona (Conic Bf, 2010) y asumiendo que el nivel de aguas subterráneas no ha disminuido su profundidad desde ocurrido el terremoto. Los otros niveles se ocupan como referencia para observar que tanto varían los factores de seguridad con respecto a la saturación de las unidades estudiadas.

Observando los factores de seguridad obtenidos, se puede deducir que en los casos donde se asume un deslizamiento de bloque (en donde varía el nivel freático) el coeficiente sísmico asociado al Gran terremoto de Valdivia sobrepasa al mínimo necesario para obtener factores de seguridad inferiores a 1. También se puede mencionar que mientras más superficial se encuentre el nivel freático, se necesita un menor coeficiente sísmico para obtener factores de seguridad inferiores a 1.

En cuanto al caso que representa las condiciones mínimas necesarias para propiciar el deslizamiento ocurrido en 1960, es la que presenta el nivel freático a pocos metros de profundidad. Esta necesita un coeficiente sísmico mínimo de 0,285, que se puede traducir a valores de aceleración sísmica máxima mediante el criterio de Hynes-Griffin y Franklin, obteniéndose un valor de 0,57g. Este valor puede ser obtenido en la zona si es que ocurren terremotos de gran magnitud a latitudes similares de la zona de estudio.

Las deducciones realizadas a los deslizamientos en bloque pueden ser extrapoladas a los casos donde se asumieron deslizamientos circulares, con la salvedad de que estos necesitan un coeficiente sísmico menor a los deslizamientos planos, y que en los casos donde se ocupó la envolvente de falla de los ensayos triaxiales se encontró una variación de que superficie era la que presentaba los factores de seguridad menores a 1 (Tabla 17), hecho que no ocurre para los deslizamientos circulares que fueron analizados utilizando la envolvente de falla obtenida por los ensayos de corte directo. Esto puede ser debido a las secciones en que se divide cada superficie impuesta, haciendo que a mayor coeficiente sísmico se desestabilicen con mayor facilidad las superficies que presenten una mayor proporción de secciones con unidades que presenten baja cohesión y ángulo de fricción.

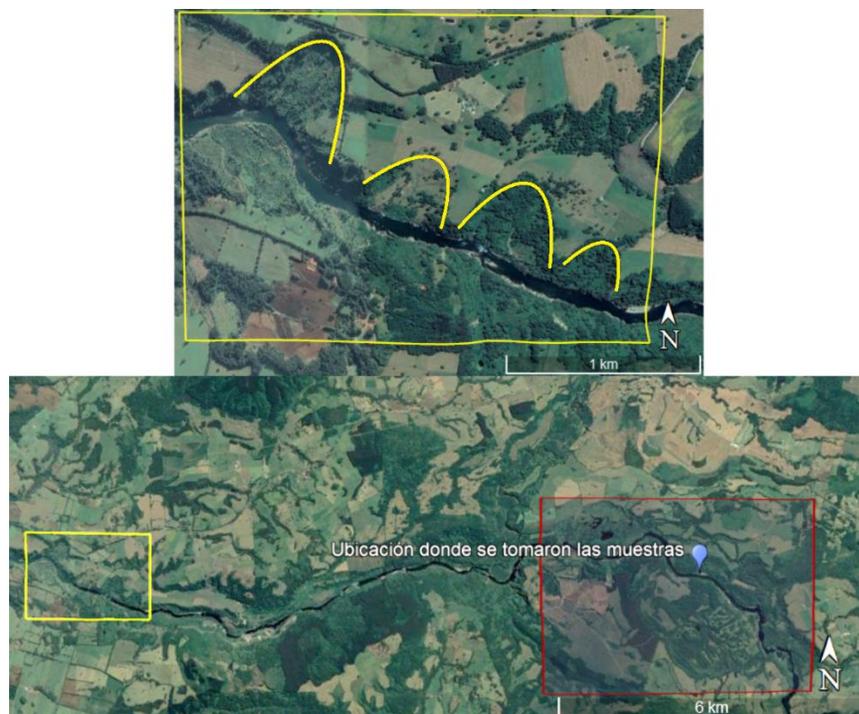


Figura 5.2 Deslizamientos circulares observados al oeste de la zona de estudio, se destacan los escarpes con líneas amarillas. Se indica en la imagen inferior la ubicación de estos deslizamientos. Fuente: Google Earth.

En cuanto a la confiabilidad de resultados, cabe destacar que el análisis realizado impone casi todas las variables de la unidad superior que se sitúa sobre la unidad que contenía las muestras caracterizadas en este estudio, haciendo que solo una de ellas, la cohesión, se obtenga mediante un back-analysis. Además, este dato solo se ocupa en la zona seca de la unidad, y ya que no se sabe qué tanto disminuye la cohesión de la unidad en presencia de agua, también se asumió una cohesión nula para la zona saturada, siendo esta la parte mayoritaria de la unidad. También cabe destacar que esta unidad está compuesta por varias capas de sedimentos de diferente tamaño y composición asociadas a los depósitos glaciofluviales de la glaciación Llanquihue (Rodríguez et al., 1999), por lo que se estaría generalizando las propiedades asumidas para toda una columna de sedimentos.

Considerando todo lo anteriormente expuesto, los factores obtenidos mediante los análisis de estabilidad de ladera pueden variar respecto a las condiciones reales en que sucedieron los deslizamientos de 1960, probablemente se necesiten coeficientes sísmicos mayores a los mínimos obtenidos para tener factores de seguridad inferiores a 1, pero estos coeficientes sísmicos no superarían al estimado para el gran terremoto de Valdivia.

Finalmente, los análisis de estabilidad realizados pueden servir como base para replicar estos estudios en la misma zona utilizando las características geotécnicas medidas de todos los sedimentos considerados, y también como referencia para poder replicar este tipo de análisis en otros sitios que presenten las mismas características que la zona estudiada, para intentar prever los posibles deslizamientos que puedan ocurrir debido a un terremoto de gran magnitud, recurrentes en territorio Chileno.

6. Conclusiones y recomendaciones

De la caracterización geológica y geotécnica de los sedimentos estudiados, y la realización de análisis de estabilidad de ladera ocupando los datos obtenidos mediante la caracterización, se tienen las siguientes conclusiones.

Los resultados de los métodos aplicados a las muestras para obtener sus características geológicas indican que ambas muestras son sedimentos de grano fino, presentando en promedio un 30% de volumen granos de tamaño arcilla, 65% de granos de tamaño limo y un 5% de granos de tamaño arena. Además, se observan clastos cuyo tamaño oscila entre 3 mm y 12 m: los que presentan menor tamaño se disponen mayoritariamente en un plano; mientras que los clastos de mayor tamaño se disponen aleatoriamente. Estos clastos de mayor tamaño fueron reconocidos como dropstones, siendo comunes en depósitos sedimentarios glaciolacustres. La proporción de los clastos de mayor tamaño (entre 3 a 12 mm) no supera el 10% de la muestra total. Las estructuras principales encontradas son la laminación paralela y la presencia de fracturas rellenadas por el mismo sedimento.

En cuanto a la composición de los sedimentos finos, estos se tratan en su mayoría de minerales de arcilla y feldespatos, presentándose en mayor proporción la illita, el feldespato potásico, albita y montmorillonita; mientras que los clastos observados presentan principalmente cuarzo, plagioclasa y vidrio.

Para las características geotécnicas, se tiene que el índice de plasticidad y límite líquido obtenido para cada muestra clasifican a las muestras en la zona de limos de alta plasticidad.

Los valores de tensión en estado crítico obtenidos de los ensayos de corte directo definen la cohesión de la muestra en aproximadamente 36 kPa, y el ángulo de fricción en 26°.

En cuanto a los ensayos triaxiales consolidados- no drenados, estos muestran sobreconsolidación de las muestras, dando como resultado en el estado crítico valores de fricción nula y cohesión de 213 kPa, a tensiones normales bajo los 294 kPa, y parámetros de cohesión nula y ángulo de fricción de 36° a tensiones normales mayores. La envolvente más representativa de las condiciones en las que se produjo el deslizamiento en 1960 es la obtenida por los ensayos triaxiales CU, debido a que este presenta las condiciones no drenadas que surgen durante un evento sísmico.

Finalmente, los análisis de estabilidad de ladera indican que la sismicidad producida por el terremoto de Valdivia supera a la sismicidad necesaria para que las superficies de deslizamiento estudiadas presenten inestabilidad, es decir, factores de seguridad menores a 1. También se puede concluir que, a medida que aumenta la altura del nivel freático se necesita un evento sísmico de menor magnitud para obtener los coeficientes sísmicos necesarios para que exista inestabilidad en la zona.

Observando el análisis de estabilidad para los deslizamientos circulares, se necesitan coeficientes sísmicos menores a los necesarios en los deslizamientos planos para obtener la inestabilidad en alguna de las superficies analizadas.

Para el caso representativo de las condiciones en las que se produjeron los deslizamientos de 1960, es decir, presentar un nivel freático cercano a la superficie y modelando las superficies de deslizamiento como deslizamientos planos, se necesita de un coeficiente mínimo de 0,285 o en valores de PGA 0,57g en la zona para presentar inestabilidad y desencadenar deslizamientos con superficies similares a los deslizamientos ocurridos en la ribera del río San Pedro.

Se recomienda para estudios posteriores realizar análisis de nivel freático a nivel local para delimitar las condiciones actuales de los acuíferos y, si es posible, el estudio de la variación estacional que pueden tener para modelar de mejor manera los factores de seguridad que se pueden obtener en la ladera actual. Además, se recomienda el estudio de los sedimentos mayoritarios de la zona para modelar de mejor manera las superficies posibles de deslizamiento que se puedan generar en esta zona.

7. Bibliografía

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York: Wiley.
- Aguirre, L.; Levi, B. (1964). *Geología de la Cordillera de los Andes de las Provincias de Cautín, Valdivia, Osorno y Llanquihue*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, No. 17, 37 p. Santiago.
- Amphos 21 Consulting Chile Ltda. (2012). *Estudio cuencas principales Región de los Ríos*. Recuperado de <http://documentos.dga.cl/SUB5432v1.pdf>
- Allen, J. (1983). *Studies in fluvial sedimentation: Bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the brownstones (L. devonian), welsh borders*. *Sedimentary Geology*, Vol. 33, No. 4, pp 237-293.
- Araya, C.; Cisternas, M.; González, F. (2014). *Evolución morfológica del principal deslizamiento del "Riñihuazo", generado por el terremoto de 1960*. IV SIAGF – Simposio Ibero-Americano de Geografía Física, Santiago, Chile, pp. 1018-1026.
- Araya, C.; Cisternas, M.; Gorioitía, N. (2013). *Deslizamientos generados por el terremoto gigante de Chile de 1960 en el río San Pedro, Región de Los Ríos: antecedentes históricos y datación geomorfológica de sus predecesores*. *Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas*, Chillán, Chile, pp. 24-31.
- Ashley, G. (2002). *Glaciolacustrine environments*. In *Modern and Past Glacial Environments*, pp. 335-359.
- ASTM International. (2007). *ASTM D422-63 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. West Conshohocken, United States of America.
- ASTM International. (2008). *ASTM D653-08 Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids*. West Conshohocken, United States of America.
- ASTM International. (2017). *ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, United States of America.
- ASTM International. (2011). *ASTM D3080 / D3080M-11 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. West Conshohocken, United States of America.
- ASTM International. (2017). *ASTM D4318-17e1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, United States of America.
- Atkinson, J. (1993). *The Mechanics of Soils and Foundations*. London: McGraw-Hill. 360 p.
- Barrientos, S.; Ward, S. (1990). *The 1960 Chile earthquake: inversion for slip distribution from surface deformation*. *Geophys. J. Int.*, Vol 103, No. 3, pp 589–598.

- Bertaux, J.; Fröhlich, F.; Ildefonse, P. (1998). Multicomponent analysis of FTIR spectra: quantification of amorphous silica and crystallized mineral phases in synthetic and natural sediments. *Journal of Sedimentary Research* 68 (3), pp 440-447.
- Blanco, N. (1998). Informe de terreno Formación Panguipulli, Región de los Lagos, Chile (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería, 15 p.
- Campos, A; Moreno, H.; Muñoz, J.; Antinao, J.; Clayton, J.; Martin, M. (1998). Área de Futrono-Lago Ranco, Región de los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, No. 8, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Castedo, L. (Productor y director). (1961). *La Respuesta Terremoto en Valdivia 1960*. Chile: Universidad de Chile.
- Cisternas, M.; Atwater, B.F.; Torrejón, F.; Sawai, Y. (2005). Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature* 437 (7057), 404.
- Clavero, J. (1996). Ignimbritas andesítico-basálticas postglaciales del volcán Villarrica, Andes del Sur (39°25' S). Tesis de Magister (Inédito). Universidad de Chile. Departamento de Geología, 112 p. Santiago.
- Clayton, J.; Clapperton, C.; Antinao, J. (1997). Las glaciaciones pleistocenas de la cuenca del lago Villarrica, Andes del Sur. In Congreso Geológico Chileno, No. 8, Actas, Vol. 1, p 307-311. Antofagasta.
- Conic Bf Ingenieros Civiles Consultores Ltda. (2010). Mejoramiento y ampliación de red de aguas subterráneas, regiones VII a X. Recuperado de <http://documentos.dga.cl/FLU5240v1.pdf>
- Cruden D. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin IAEG*, No. 43, Pag. 27–29.
- Cruden, D.; Varnes, D. (1996). *Landslide Types and Processes*. (A. K. Turner, & R. L. Schuster, Edits.) *Landslides: investigation and mitigation*, 247, 36-75.
- Davis, S.; Karzulovic, J. (1961). Deslizamientos en el valle del río San Pedro, Provincia de Valdivia, Chile. Universidad de Chile, Instituto de Geología, Publicación, No. 20, p 55-104. Santiago.
- Davis, S.; Karzulovic, J. (1963). Landslides of Lago Riñihue, Chile. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 53, No. 6, pp 1403-1414.
- Douglas, J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinate. *Earth-Science Reviews*, Vol. 61, No. 1-2, pp 43-104.
- Duhart, P.; Antinao, J.; Clayton, J.; Elgueta, S.; Crignola, P.; McDonough, M. (2003). Geología del área Los Lagos-Malalhue, región de Los Lagos, Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, No. 81, 1 mapa Escala 1:100.000. Santiago.

- Einsele, G.; Ricken, W.; Seilacher, A. (1991). *Cycles and events in stratigraphy*. Berlin; New York: Springer-Verlag. 955 p.
- Farmer, V. C. (1974). *The Infrared spectra of minerals*. London: Mineralogical Society.
- Fujii, Y., Satake, K., 2013. Slip distribution and seismic moment of the 2010 and 1960 Chilean earthquakes inferred from tsunami waveforms and coastal geodetic data. *Pure Appl. Geophys.*, Vol 170, No. 9-10, pp 1493–1509.
- García, A.; Beck, M.; Burmester, R.; Munizaga, F.; Hervé, F. (1988). Paleomagnetic Reconnaissance of the Region de los Lagos, Southern Chile, and its tectonic implications. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 15, No. 1, pp 13-30.
- García, A. (1994). Espectrofotometría infrarroja de minerales. Tesis para optar al título de Ingeniero Químico Industrial. Instituto Politécnico Nacional, México. 204 p.
- González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall. 715 p.
- Hauser, A. (1970) Geología. *In Estudio integrado de los recursos naturales Cautín*. Instituto de Recursos Naturales, Publicación, No. 29, Tomo II, pp 13-72. Santiago.
- Hauser, A. (1993) Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, pp 7-29.
- Huang, R. (2012). Mechanisms of large-scale landslides in China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 71, pp 161-170.
- Huang R. (2015) Understanding the Mechanism of Large-Scale Landslides. In: Lollino G. et al. (eds) *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2*. Springer, Cham.
- Keefer, D.K. (2002) Investigating landslides caused by earthquakes: A historical review. *Surveys in Geophysics*, Vol. 23, pp 473–510.
- Khazai, B., & Sitar, N. (2004). Evaluation of factors controlling earthquake-induced landslides caused by Chi-Chi earthquake and comparison with the Northridge and Loma Prieta events. *Engineering Geology*, Vol. 71, pp 79-95.
- Lambe, T.; Whitman, R. (1969). *Soil mechanics*. New York: Wiley. 553 p.
- Lancellotta, R. (2009). *Geotechnical engineering*. London: Taylor & Francis. 499 p.
- Laugenie, C. (1982). *La Région Des Lacs Chili Méridional, recherches sur l'évolution géomorphologique d'un piémont glaciaire quaternaire andin*. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux III, 822 p.
- Lowell, T.; Heusser, C.; Andersen, B.; Moreno, P.; Hauser, A.; Heusser, L.; Schlüchter, C.; Marchant, D.; Denton, G. (1995). Interhemispheric Correlation of Late Pleistocene Glacial Events. *Science*, Vol. 269, pp 1541-1549.

- MATHalino. (2019). Unit Weights and Densities of Soil. Obtenido de <https://www.mathalino.com/reviewer/geotechnical-engineering/unit-weights-and-densities-soil>
- McCarroll, D; Rijdsdijk, K. (2003). Deformation styles as a key for interpreting glacial depositional environments. *Journal of Quaternary Science*, Vol. 18, pp 473-489.
- Mercer, J. (1976). The last glaciation in Chile: a radiocarbon-dated chronology. In *Congreso Geológico Chileno*, No. 1, Actas, Vol. 1, pp D56-D68. Santiago.
- Mercer, J. (1983). Cenozoic Glaciation in the Southern Hemisphere. *Annual Review Earth Planetary Sciences*, Vol. 11, pp 99-132.
- Moreno, H. (1993). Volcán Villarrica: Geología y Evaluación del Riesgo Volcánico, Regiones IX y X (Inédito). Proyecto FONDECYT, No. 1247, 112 p.
- Moreno, M.; Bolte, J.; Klotz, J.; Melnick, D. (2009). Impact of megathrust geometry on inversion of coseismic slip from geodetic data: application to the 1960 Chile earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 36.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy* (2nd ed.). Chichester, UK ; Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell. 432 p.
- Nishenko, S. (1985). Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and Southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal. *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, pp 3589–3615.
- Munizaga, F.; Hervé, F.; Drake, R.; Pankhurst, R.J.; Brook, M; Snelling, N. (1988). Geochronology of the Lake Region of south-central Chile (39°–42°S): Preliminary results. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 1, No. 3, pp 309-316.
- Ojeda, J. (2018). Generación de acelerogramas artificiales a partir de nuevos modelos de ruptura de los terremotos Mw 8.1 y Mw 9.5 ocurridos en mayo de 1960. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, Mención Geofísica. Universidad de Chile, Chile, 135 p.
- Owens, P; Rutledge, E. (2005). Morphology. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, pp 511-520.
- Porter, S. (1981). Pleistocene Glaciation in the Southern Lake District of Chile. *Quaternary Research*, No. 16, pp 263-292.
- Rodríguez, C.; Pérez, Y.; Moreno, H.; Clayton, J.; Antinao, J.; Duhart, P.; Martín, M. (1999). Geología del área de Panguipulli-Riñihue, región de Los Lagos, Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, No. 10, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Ruiz, S.; Moreno, M.; Melnick, D.; del Campo, F.; Poli, P.; Baez, J.C.; Leyton, F.; Madariaga, R. (2017). Reawakening of large earthquakes in South-Central Chile: the 2016 Mw 7.6 Chiloé event. *Geophys. Res.*

- Ruiz, S.; Madariaga, R. (2018). Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics*, Vol. 733, pp 37-56
- Ryżak, M.; Bieganski, A. (2011). Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser diffraction method. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, Vol. 174, pp 624-633.
- Salisbury, J.W. (1993). Mid-infrared spectroscopy: Laboratory data, *in* Pieters, C.M., and Englert, P.A.J., eds., *Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition*, Cambridge University Press, pp 79-98.
- Shahangian, S (2011). Variable Cohesion Model for Soil Shear Strength Evaluation. 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference.
- Sepúlveda, S. A.; Murphy, W.; Jibson, R. W.; Petley, D. N. (2005). Seismically induced rock slope failures resulting from topographic amplification of strong ground motions: The case of Pacoima Canyon, California. *Engineering Geology*, Vol. 80, pp 336-348.
- Varnes, D. (1978). Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., *Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences, pp 11-33.
- Villaseñor, T. (2005). Estratigrafía del relleno sedimentario holoceno tardío y variabilidad climática durante los últimos 200 años en Bahía Mejillones (23°S), Norte de Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, Mención Geología. Universidad de Chile, Chile, 135 p.

Anexos

Anexo A: Clasificación de deslizamientos desencadenados por terremotos, extraído y traducido de Keefer, 1984.

Tipo de remoción	Tipo de movimiento	Disrupción lateral	Contenido de agua				Velocidad	Profundidad
			Seco	Húmedo pero insaturado	Parcialmente saturado	Saturado		
Caídas de roca	Rodando, rebotando, caída libre	Alto o muy alto	X	X	X	X	Extremadamente rápido (>3 m/s)	Superficiales (<3 m)
Deslizamientos de roca	Deslizamiento traslacional de fragmentos de rocas y bloques en superficies	Alto	X	X	X	X	Rápido a extremadamente rápido (1,5 m/día - >3 m/s)	Superficiales (<3 m)
Avalanchas de roca	Deslizamiento y/o flujo como una corriente de fragmentos de roca, de largo recorrido	Muy alto	X	X	X	X	Extremadamente rápido (>3 m/s)	Profundos (>3 m)
Caídas de suelo	Deslizamiento traslacional sobre la superficie de corte basal, con rotación hacia adelante.	Leve o moderado	?	X	X	X	Extremadamente rápido (>3 m/s)	Superficiales (<3 m)
Suelo perturbado	Deslizamiento traslacional sobre la superficie de corte basal	Leve o moderado	?	X	X	X	Moderado a rápido (1,5 m/mes - 0,3 m/min)	Superficiales (<3 m)

Tipo de remoción	Tipo de movimiento	Disrupción lateral	Contenido de agua				Velocidad	Profundidad
			Seco	Húmedo pero insaturado	Parcialmente saturado	Saturado		
Avalanchas de suelo	Rodando, rebotando, caída libre	Alto o muy alto	X	X	X	X	Muy rápido a extremadamente rápido (0,3 m/min - >3 m/s)	Superficiales (<3 m)
Subsidencias de roca	Deslizamiento traslacional sobre la superficie de corte basal o en una zona de arcillas susceptibles y debilitadas	Alto	X	X	X	X	Lento a rápido (1,5 m/año – 0,3 m/min)	Profundos (>3 m)
Deslizamientos de roca en bloque	Deslizamiento traslacional con flujo subsidiario	Muy alto	X	X	X	X	Lento a rápido (1,5 m/año – 0,3 m/min)	Profundos (>3 m)
Subsidencias de suelo	Deslizamiento sobre la superficie de corte basal, con rotación hacia adelante.	Leve o moderado	?	X	X	X	Lento a rápido (1,5 m/año – 0,3 m/min)	Profundos (>3 m)
Deslizamientos de suelo en bloque	Deslizamiento sobre la superficie de corte basal.	Leve o moderado	?	?	X	X	Lento a rápido (1,5 m/año – 0,3 m/min)	Profundos (>3 m)

Tipo de remoción	Tipo de movimiento	Disrupción lateral	Contenido de agua				Velocidad	Profundidad
			Seco	Húmedo pero insaturado	Parcialmente saturado	Saturado		
Flujos lentos de tierra	Deslizamiento sobre la superficie de corte basal con un flujo interno menor	Leve			X	X	Muy lento a moderado (0,6 m/año – 1,5 m/día)	Generalmente superficiales, ocasionalmente profundos
Extensiones laterales de suelo	Deslizamiento sobre la zona basal o en un suelo licuado	Generalmente moderado, ocasionalmente leve, ocasionalmente alto			X	X	Muy rápido (0,3 m/min – 3 m/s)	Variable
Flujos rápidos de suelo	Flujo	Muy alto	?	?	?	X	Muy rápido a extremadamente rápido (0,3 m/min - >3 m/s)	Superficiales (<3 m)
Deslizamientos subacuáticos	Complejo, generalmente considera propagación lateral/ flujos /deslizamiento	Generalmente alto o muy alto, ocasionalmente moderado o leve			X	X	Generalmente rápidos a extremadamente rápidos (~1,5 m/día - >3 m/s)	Variable

Para la disrupción lateral: “leve” significa que el deslizamiento está compuesto de uno o pocos bloques coherentes; “moderado” implica varios bloques coherentes; “alto” implica numerosos bloques pequeños y granos de suelo individuales y fragmentos de roca; “muy alto” implica una casi completa desagregación en granos de suelo individual o pequeños fragmentos de roca.

Anexo B: Descripción visual

B.1 Macroscópica

SP1803

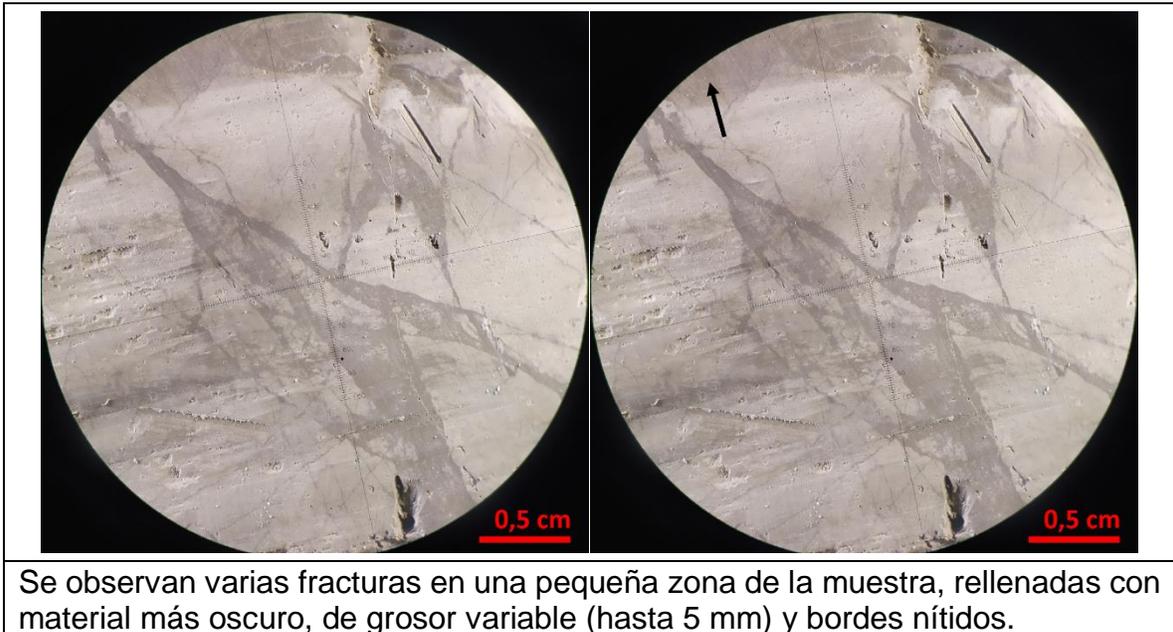
Fotos de la muestra, dirección del techo y dimensiones





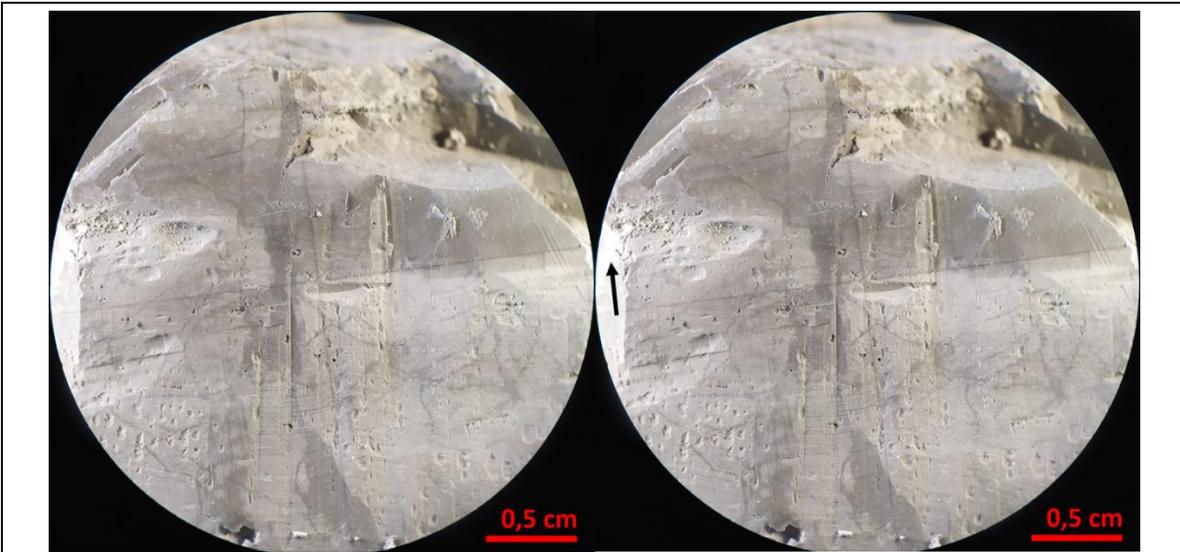
Descripciones de la muestra

SP1803-A



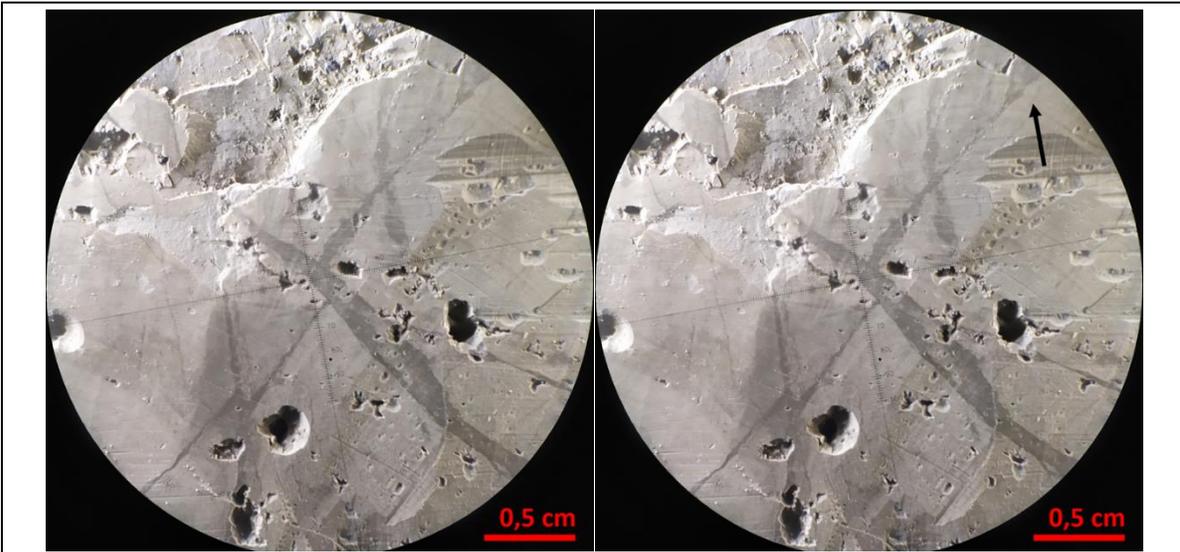
Se observan varias fracturas en una pequeña zona de la muestra, rellenas con material más oscuro, de grosor variable (hasta 5 mm) y bordes nítidos.

SP1803-B



Se observa el techo de la muestra, donde el color de uno de los estratos coincide con el relleno de las fracturas rellenadas.

SP1803-C



Se observan fracturas de grosor variable (hasta 3 mm), cortando la muestra.

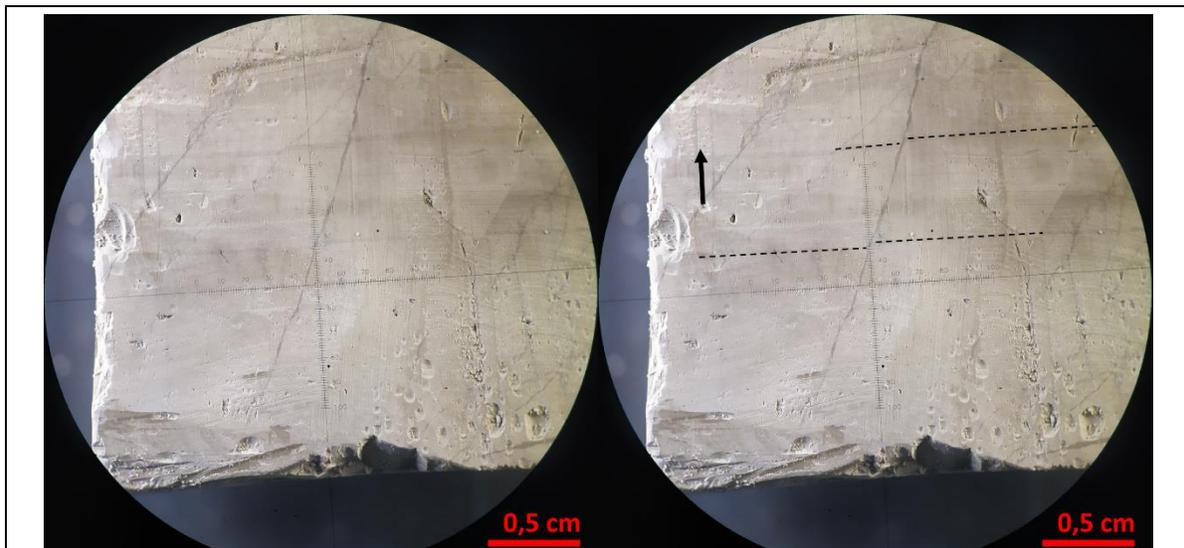
SP1804

Fotos de la muestra, dirección del techo y dimensiones



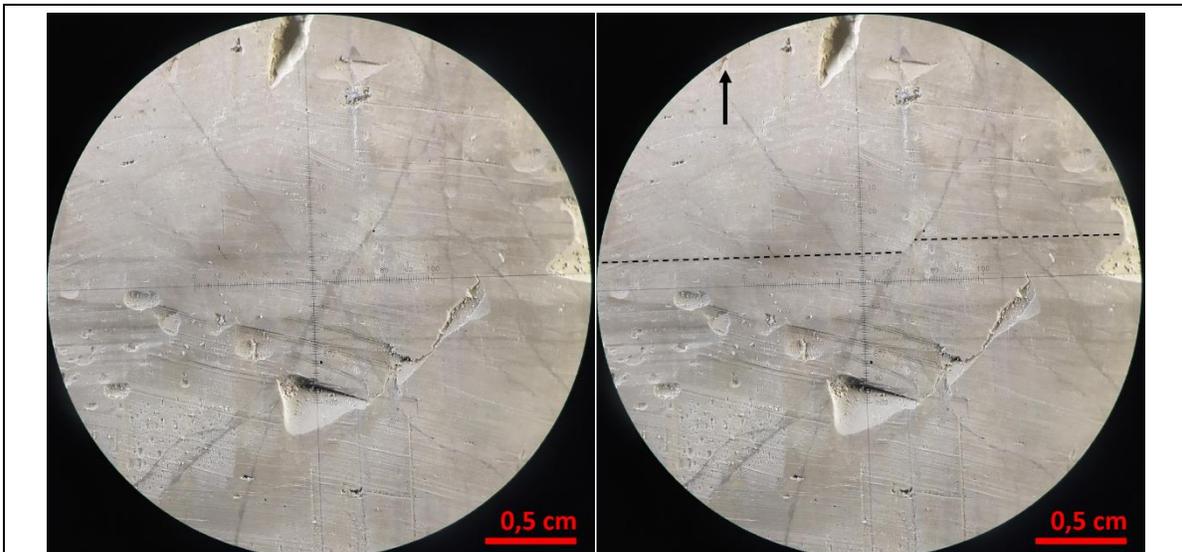
Descripciones de la muestra

SP1804-A



Se observa un corrimiento de los estratos de suelo que componen la muestra, considerándose el plano de ese corrimiento como la fractura diagonal que se ubica al centro de las imágenes; con un desplazamiento de 2 mm como máximo.

SP1804-B



Se observa un corrimiento de los estratos, en este caso con un desplazamiento aproximado de 3 mm.

SP1804-C

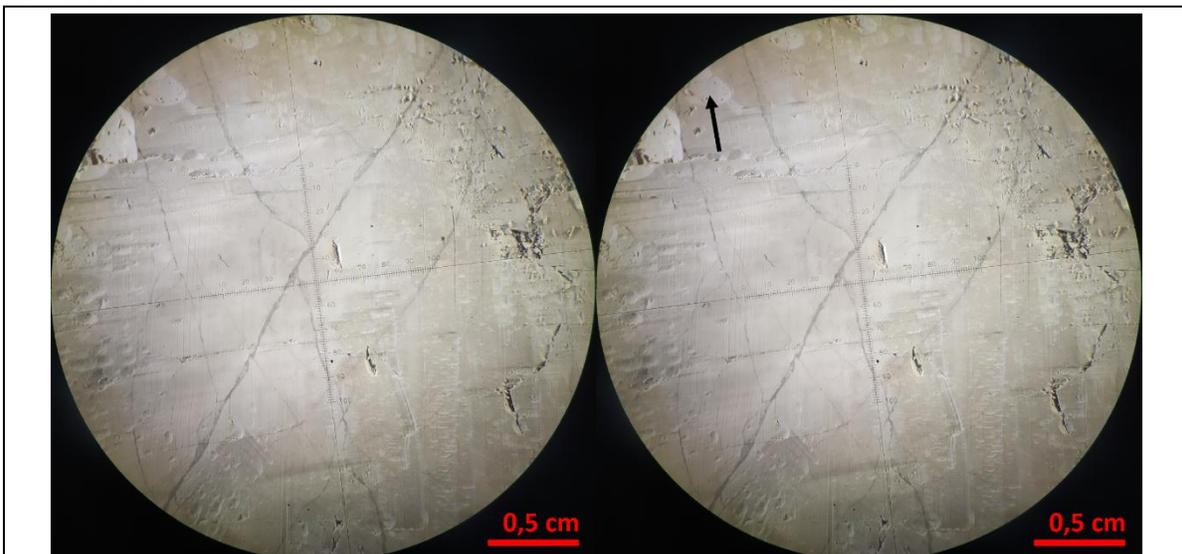


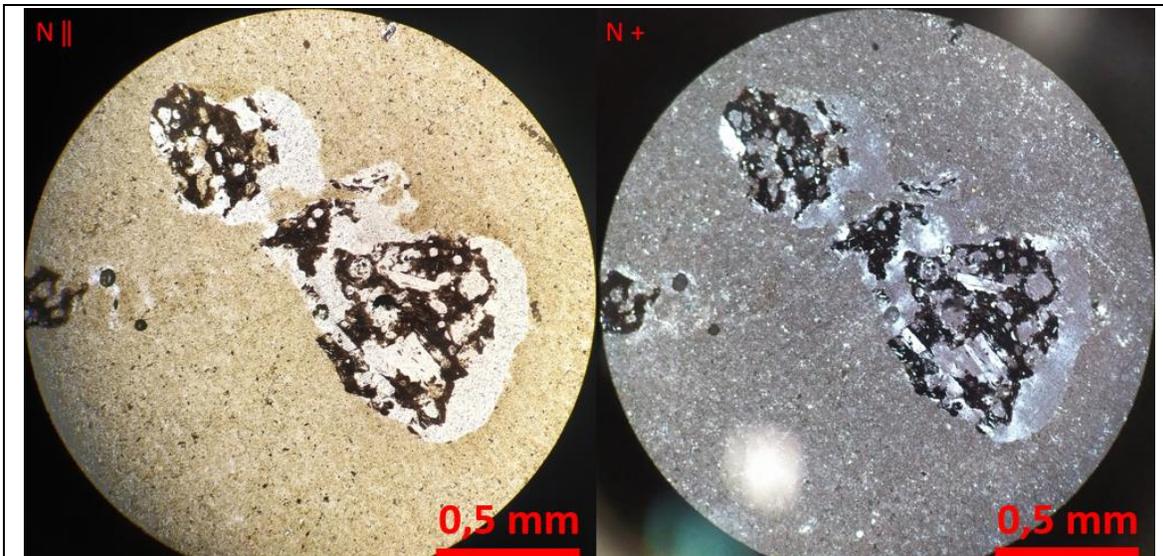
Imagen tomada para representar las fracturas encontradas en esta muestra: la mayoría es de bajo grosor.

En todas las imágenes tomadas de la lupa binocular la flecha negra indica la dirección del techo de la muestra

B.2 Microscópica

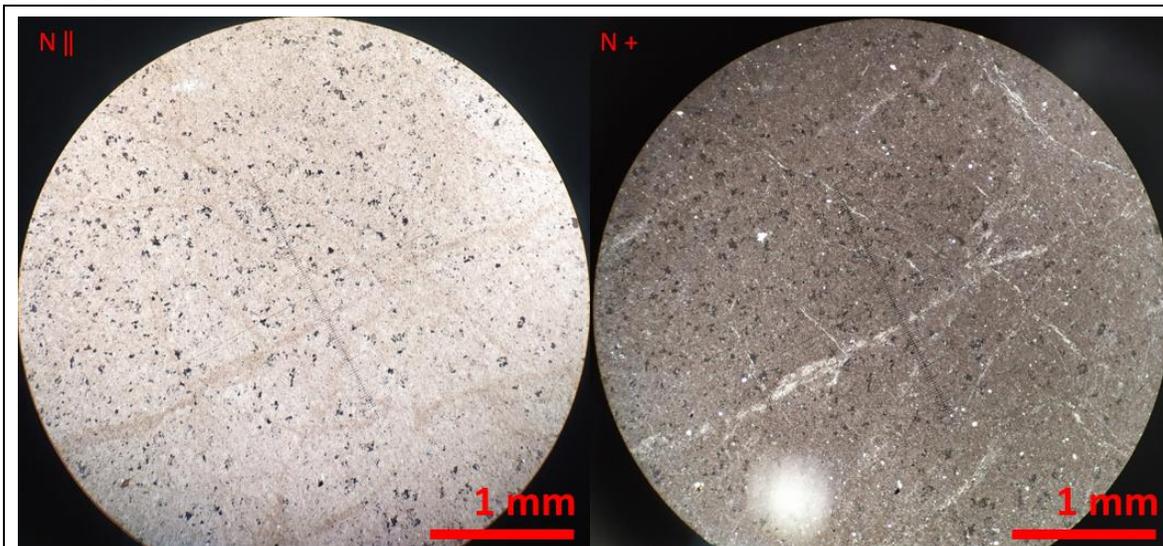
SP1803-1

SP1803-1A



El grano de la imagen presenta bordes subredondeados de dimensiones de 2 mm de largo y 1 mm de ancho, presenta cuarzo anhedral con extinción ondulante, plagioclasas subhedrales y material opaco, presuntamente vidrio.

SP1803-1B



Se observa en la matriz franjas de color marrón oscuro, con grosor variable y dispuestas sin dirección preferente.

SP1803-2

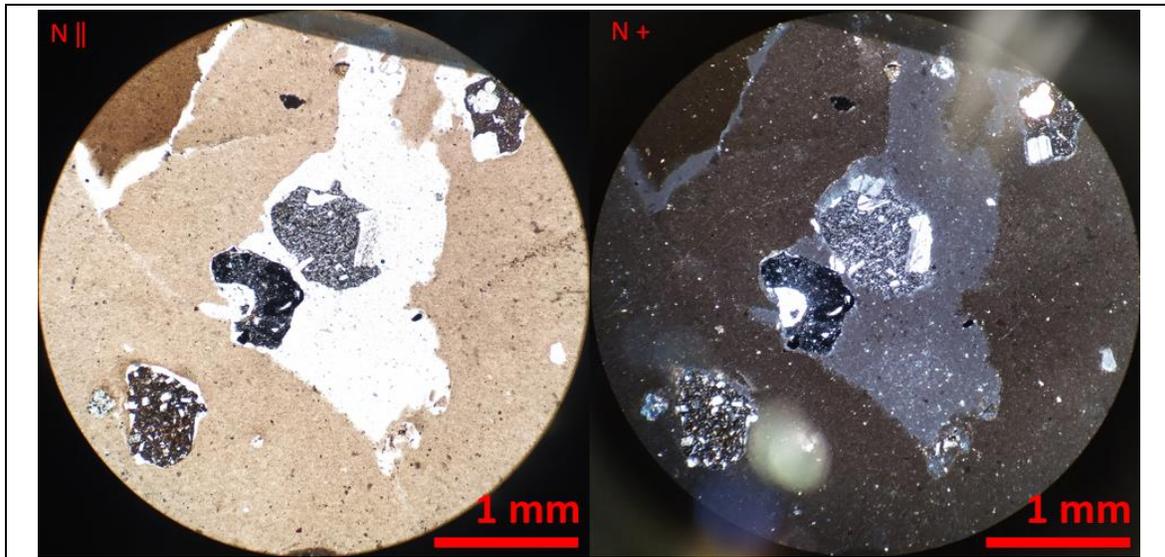
SP1803-2A



SP1803-2B



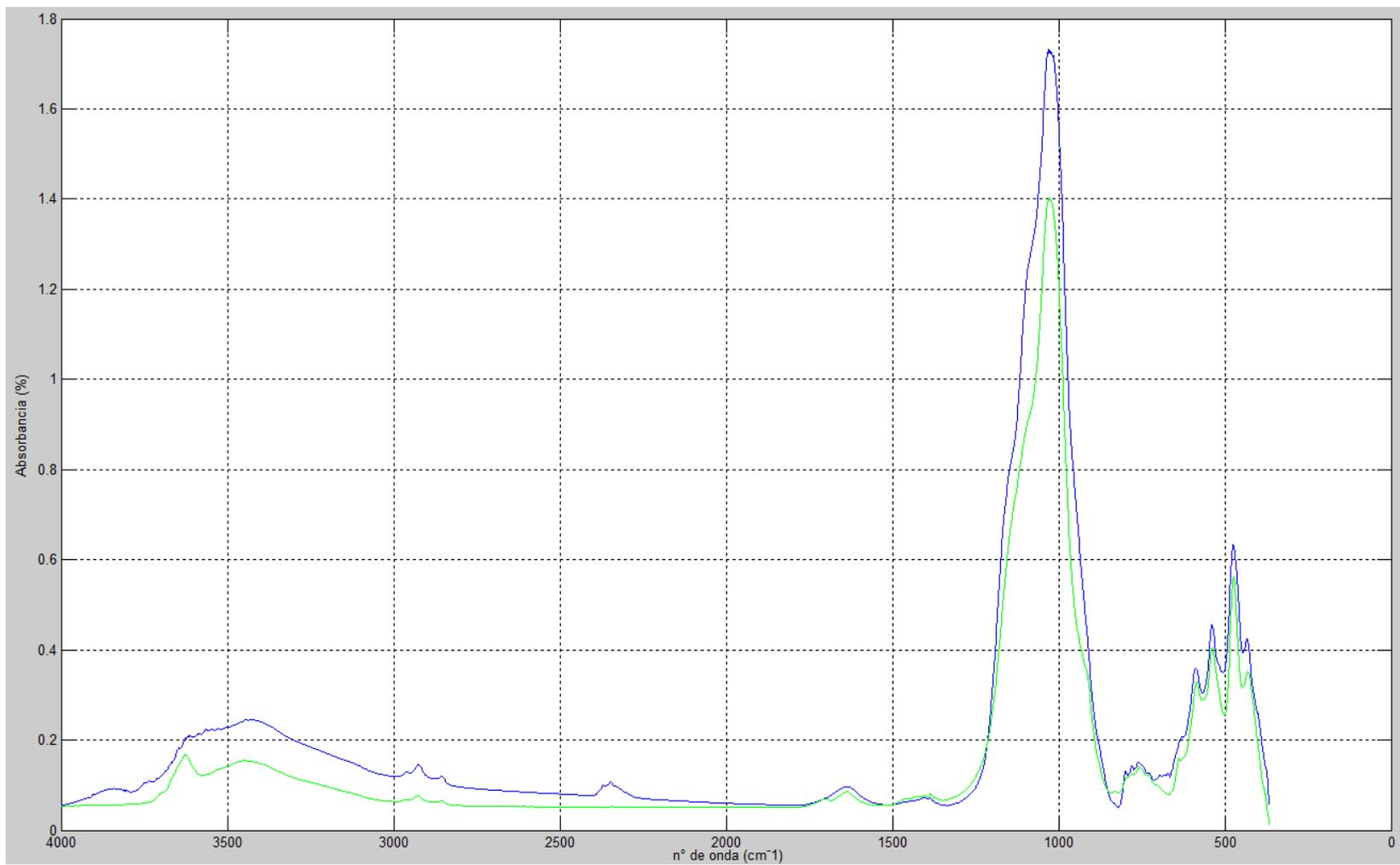
SP1803-2D



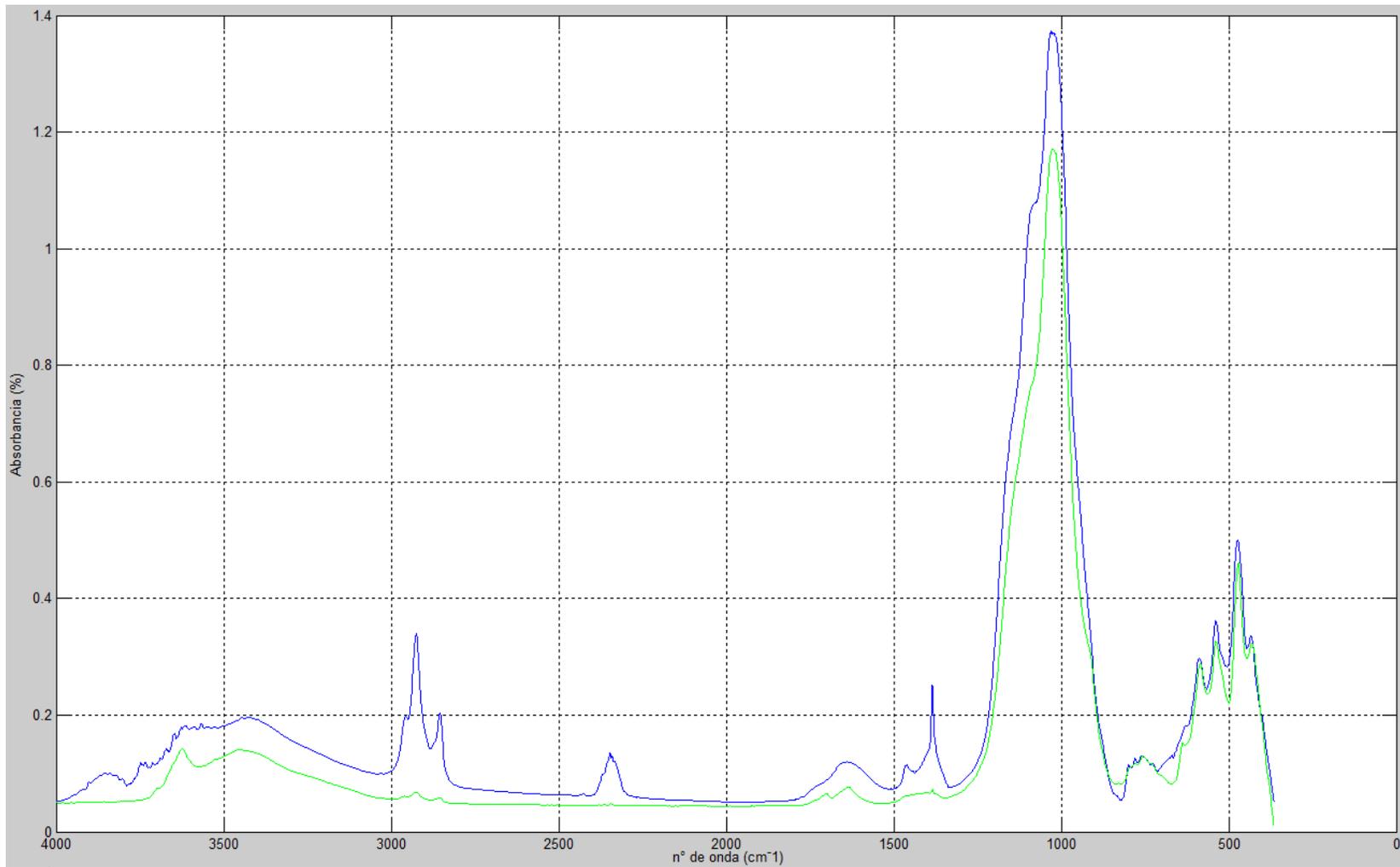
Se observan cuatro clastos de tamaño similar (sus dimensiones rondan los 0,7 mm x 0,5 mm), subangulosos a subredondeados, con presencia de plagioclasa y cuarzo, con una alta presencia de material negro visto en nicoles paralelos y cruzados, presumiblemente vidrio.

Anexo C: FTIR

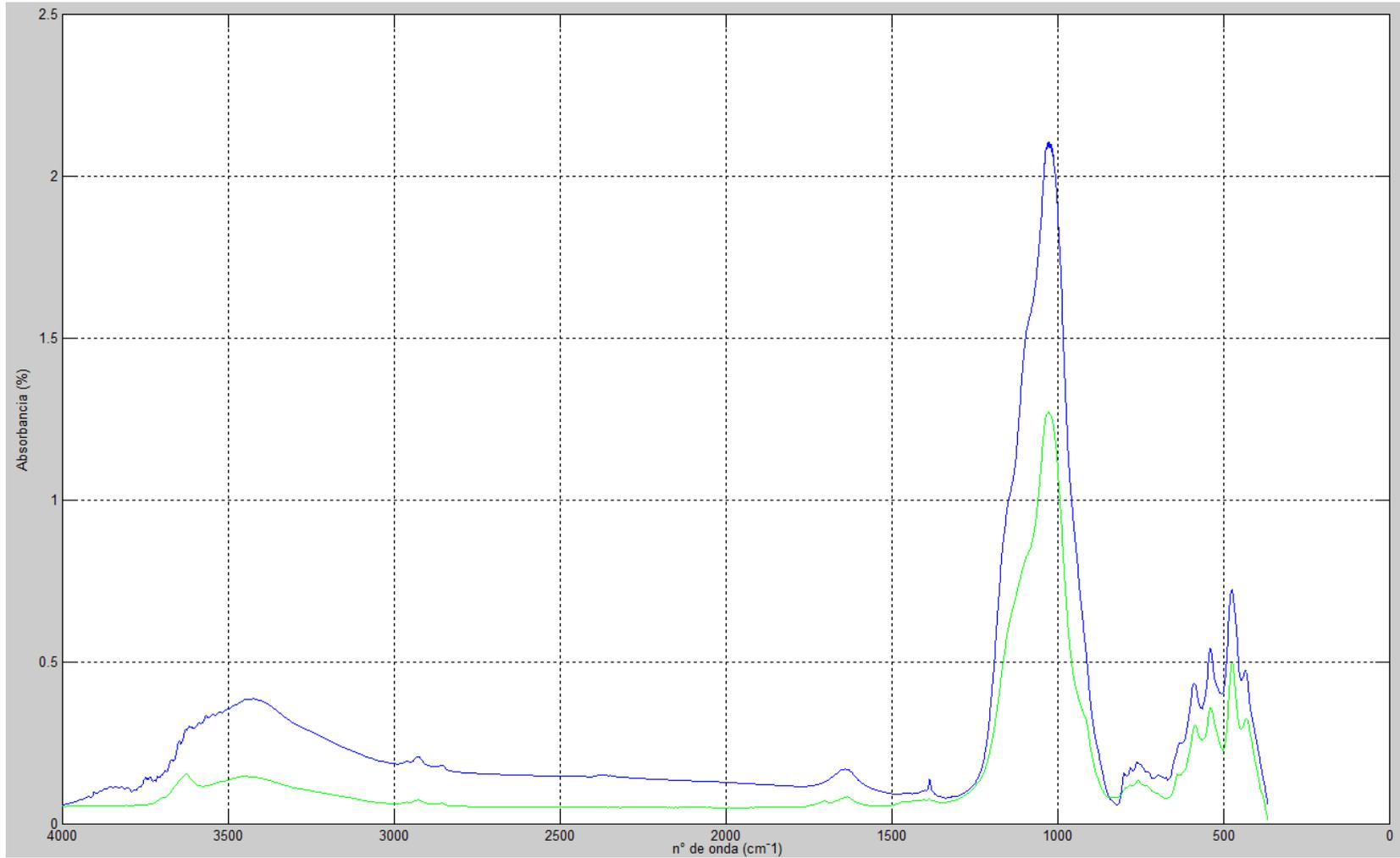
Espectrograma de SP1803-A



Espectrograma de SP1803-B



Espectrograma de SP1804



Anexo D: Granulometría

SP1803-Mezcla¹

Tabla de distribución por tamaño de grano y acumulativa

Tamaño de grano (µm)	0,28	0,32	0,36	0,40	0,45	0,50	0,56	0,63	0,71	0,80	0,89	1,00	1,12	1,26	1,42	1,59	1,78
SP1803 Mezcla 1 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,00	0,03	0,20	0,41	0,58	0,76	0,91	1,02	1,12	1,19	1,24	1,31	1,38	1,49	1,63	1,79
SP1803 Mezcla 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,00	0,03	0,22	0,63	1,22	1,98	2,88	3,91	5,02	6,21	7,45	8,76	10,14	11,64	13,26	15,05
SP1803 Mezcla 2 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,01	0,07	0,28	0,53	0,73	0,94	1,11	1,24	1,35	1,42	1,48	1,53	1,60	1,70	1,83	1,99
SP1803 Mezcla 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,01	0,08	0,35	0,88	1,61	2,55	3,65	4,90	6,24	7,66	9,14	10,67	12,27	13,98	15,81	17,80
SP1803 Mezcla 3 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,01	0,10	0,38	0,69	0,92	1,15	1,33	1,48	1,60	1,69	1,76	1,83	1,90	2,00	2,12	2,26
SP1803 Mezcla 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,01	0,12	0,50	1,19	2,11	3,26	4,59	6,07	7,68	9,36	11,12	12,95	14,85	16,85	18,97	21,23
SP1803 Mezcla promedio Distribución por tamaño	0,00	0,01	0,07	0,29	0,54	0,74	0,95	1,12	1,25	1,35	1,43	1,49	1,56	1,63	1,73	1,86	2,01
SP1803 Mezcla promedio Porcentaje acumulativo	0,00	0,01	0,07	0,36	0,90	1,65	2,59	3,71	4,96	6,31	7,74	9,24	10,79	12,42	14,15	16,01	18,03

Tamaño de grano (µm)	2,00	2,24	2,52	2,83	3,17	3,56	3,99	4,48	5,02	5,64	6,32	7,10	7,96	8,93	10,02	11,25	12,62
SP1803 Mezcla 1 (Prom.) Distribución por tamaño	1,95	2,10	2,23	2,31	2,34	2,33	2,28	2,20	2,11	2,02	1,96	1,92	1,94	2,02	2,16	2,38	2,67
SP1803 Mezcla 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	17,00	19,10	21,33	23,63	25,97	28,31	30,59	32,79	34,91	36,93	38,89	40,81	42,75	44,76	46,92	49,31	51,97
SP1803 Mezcla 2 (Prom.) Distribución por tamaño	2,16	2,32	2,45	2,54	2,59	2,59	2,56	2,49	2,41	2,34	2,28	2,25	2,26	2,33	2,45	2,63	2,86
SP1803 Mezcla 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	19,96	22,28	24,72	27,26	29,85	32,44	35,00	37,49	39,90	42,24	44,52	46,76	49,02	51,35	53,80	56,43	59,28
SP1803 Mezcla 3 (Prom.) Distribución por tamaño	2,40	2,53	2,64	2,71	2,75	2,76	2,73	2,68	2,61	2,54	2,48	2,43	2,42	2,45	2,52	2,66	2,84
SP1803 Mezcla 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	23,63	26,17	28,81	31,52	34,27	37,03	39,76	42,44	45,05	47,59	50,06	52,49	54,91	57,35	59,88	62,54	65,38
SP1803 Mezcla promedio Distribución por tamaño	2,17	2,32	2,44	2,52	2,56	2,56	2,52	2,46	2,38	2,30	2,24	2,20	2,20	2,26	2,38	2,56	2,79
SP1803 Mezcla promedio Porcentaje acumulativo	20,20	22,51	24,95	27,47	30,03	32,59	35,12	37,57	39,95	42,25	44,49	46,69	48,89	51,15	53,53	56,09	58,88

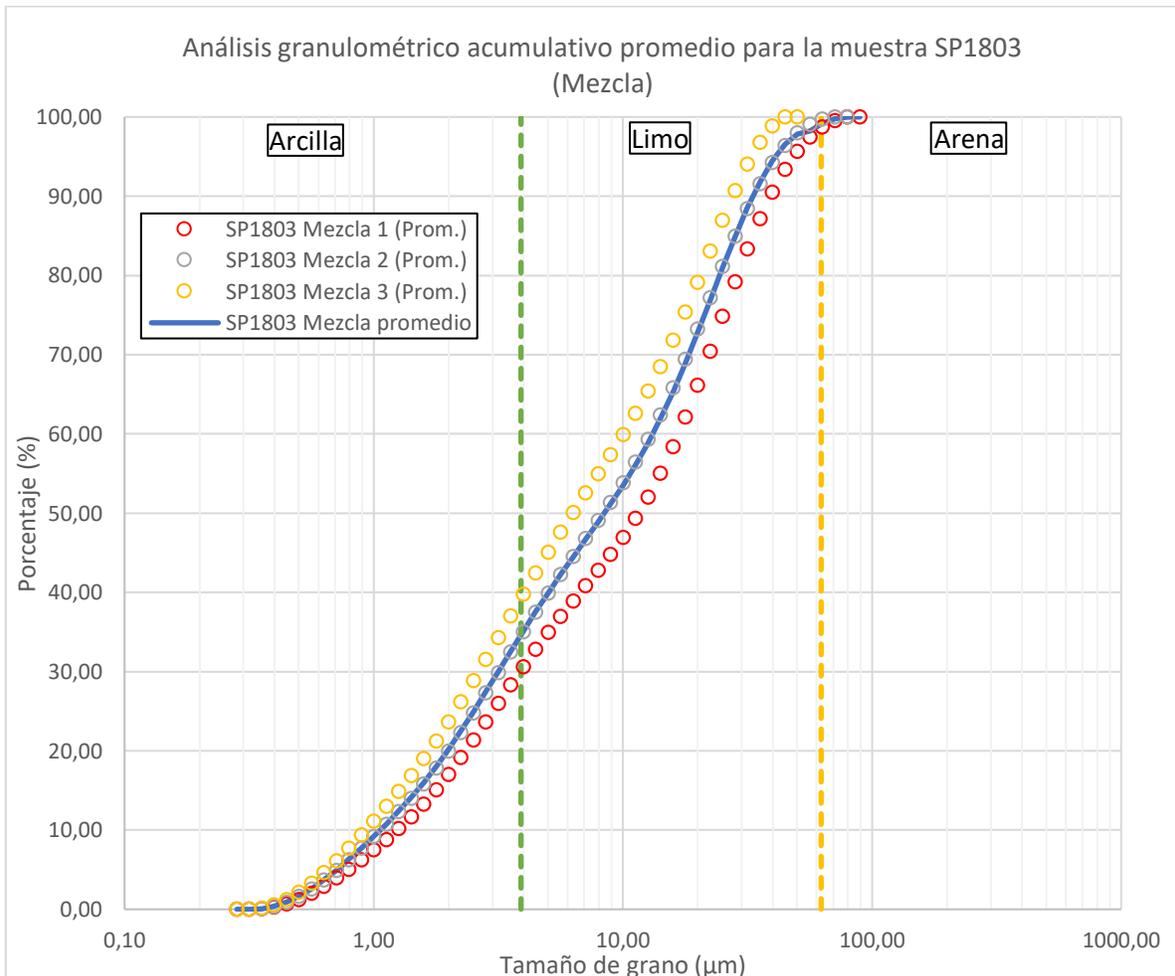
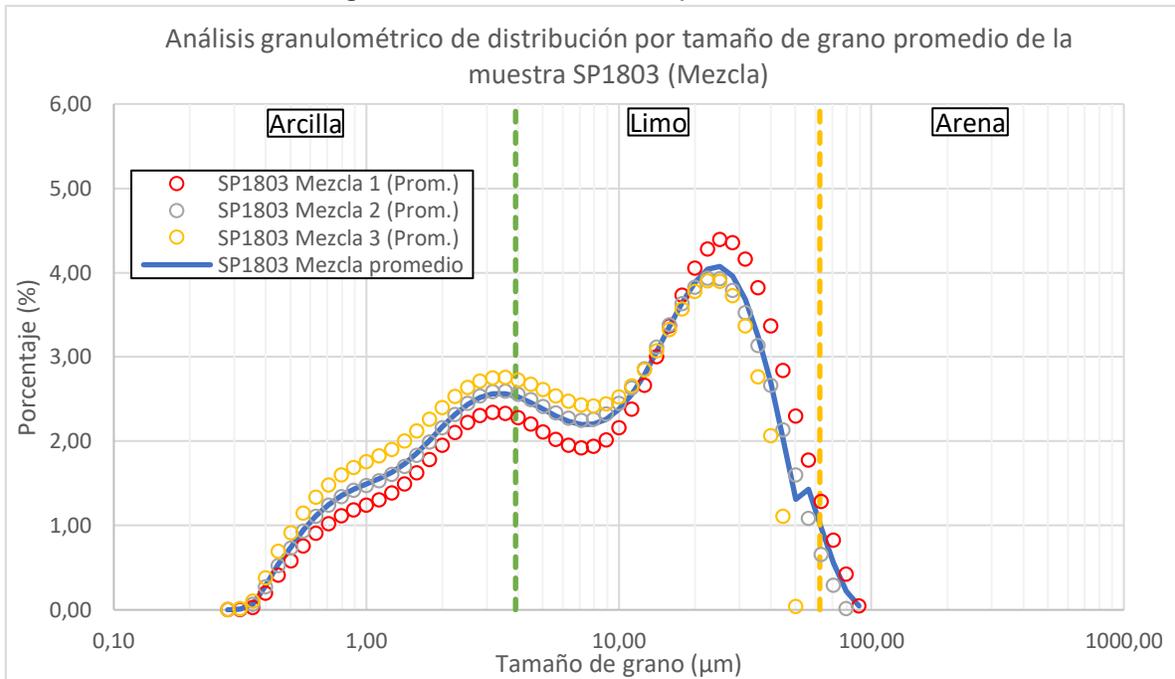
¹ Los datos mostrados (Mezcla 'x') son el promedio de tres mediciones realizadas a una misma porción de la muestra.

Tamaño de grano (μm)	14,16	15,89	17,83	20,00	22,44	25,18	28,25	31,70	35,57	39,91	44,77	50,24	56,37	63,25	70,96	79,62	89,34
SP1803 Mezcla 1 (Prom.) Distribución por tamaño	3,00	3,37	3,73	4,05	4,28	4,39	4,36	4,16	3,82	3,36	2,84	2,30	1,77	1,29	0,83	0,42	0,05
SP1803 Mezcla 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	54,98	58,35	62,08	66,13	70,41	74,80	79,16	83,32	87,14	90,50	93,34	95,64	97,41	98,70	99,53	99,95	100,00
SP1803 Mezcla 2 (Prom.) Distribución por tamaño	3,11	3,38	3,63	3,83	3,93	3,93	3,79	3,52	3,14	2,66	2,13	1,60	1,09	0,66	0,29	0,02	
SP1803 Mezcla 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	62,40	65,78	69,41	73,24	77,17	81,10	84,89	88,42	91,55	94,21	96,35	97,95	99,03	99,69	99,98	100,00	
SP1803 Mezcla 3 (Prom.) Distribución por tamaño	3,07	3,32	3,57	3,78	3,90	3,90	3,73	3,37	2,77	2,06	1,11	0,04					
SP1803 Mezcla 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	68,46	71,78	75,35	79,12	83,02	86,92	90,65	94,02	96,78	98,85	99,96	100,00					
SP1803 Mezcla promedio Distribución por tamaño	3,06	3,36	3,64	3,88	4,04	4,07	3,96	3,68	3,24	2,70	2,03	1,31	1,43	0,97	0,56	0,22	0,05
SP1803 Mezcla promedio Porcentaje acumulativo	61,94	65,30	68,95	72,83	76,87	80,94	84,90	88,58	91,82	94,52	96,55	97,86	98,22	99,20	99,76	99,98	100,00

Tabla resumen de coeficientes obtenidos de las mediciones

Coeficientes	D_{10} (μm)	D_{30} (μm)	D_{60} (μm)	Moda (μm)	Mediana (μm)	Cu	Cc
SP1803 Mezcla 1 (Prom.)	1,262	3,991	17,825	25,179	12,619	14,125	0,708
SP1803 Mezcla 2 (Prom.)	1,125	3,557	14,159	22,440	8,934	12,589	0,794
SP1803 Mezcla 3 (Prom.)	1,002	2,825	11,247	22,440	6,325	11,220	0,708
SP1803 Mezcla Promedio	1,125	3,170	14,159	25,179	8,934	12,589	0,631

Gráficos resumen de la granulometría obtenida para la muestra SP1803 Mezcla



SP1803-A²

Tabla de distribución por tamaño de grano y acumulativa

Tamaño de grano (µm)	0,28	0,32	0,36	0,40	0,45	0,50	0,56	0,63	0,71	0,80	0,89	1,00	1,12	1,26	1,42
SP1803 A 1 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,00	0,04	0,19	0,39	0,54	0,70	0,84	0,95	1,03	1,09	1,14	1,20	1,26	1,35
SP1803 A 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,00	0,04	0,23	0,62	1,16	1,87	2,70	3,65	4,68	5,77	6,92	8,11	9,37	10,72
SP1803 A 2 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,01	0,08	0,27	0,49	0,67	0,84	0,99	1,11	1,20	1,26	1,31	1,36	1,42	1,49
SP1803 A 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,01	0,09	0,36	0,85	1,52	2,36	3,35	4,45	5,65	6,91	8,22	9,58	11,00	12,49
SP1803 A 3 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,01	0,06	0,25	0,45	0,60	0,74	0,86	0,94	1,01	1,06	1,09	1,12	1,16	1,21
SP1803 A 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,01	0,07	0,32	0,77	1,37	2,11	2,97	3,91	4,92	5,97	7,06	8,18	9,34	10,55
SP1803 A promedio Distribución por tamaño	0,00	0,01	0,06	0,24	0,44	0,60	0,76	0,89	1,00	1,08	1,14	1,18	1,23	1,28	1,35
SP1803 A promedio Porcentaje acumulativo	0,00	0,01	0,07	0,30	0,75	1,35	2,11	3,01	4,00	5,08	6,22	7,40	8,63	9,90	11,25

Tamaño de grano (µm)	1,59	1,78	2,00	2,24	2,52	2,83	3,17	3,56	3,99	4,48	5,02	5,64	6,32	7,10	7,96
SP1803 A 1 (Prom.) Distribución por tamaño	1,45	1,58	1,71	1,84	1,94	2,00	2,04	2,04	2,01	1,96	1,90	1,83	1,78	1,75	1,75
SP1803 A 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	12,17	13,75	15,47	17,30	19,24	21,24	23,28	25,32	27,33	29,29	31,19	33,02	34,80	36,55	38,30
SP1803 A 2 (Prom.) Distribución por tamaño	1,58	1,69	1,80	1,90	1,98	2,03	2,05	2,04	2,00	1,93	1,85	1,76	1,68	1,60	1,55
SP1803 A 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	14,07	15,75	17,55	19,45	21,42	23,45	25,50	27,54	29,53	31,47	33,32	35,09	36,76	38,36	39,91
SP1803 A 3 (Prom.) Distribución por tamaño	1,27	1,35	1,43	1,50	1,57	1,62	1,65	1,67	1,67	1,66	1,65	1,62	1,59	1,55	1,52
SP1803 A 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	11,82	13,17	14,60	16,10	17,67	19,28	20,93	22,60	24,27	25,94	27,58	29,20	30,79	32,34	33,87
SP1803 A promedio Distribución por tamaño	1,43	1,54	1,65	1,75	1,83	1,88	1,91	1,91	1,89	1,85	1,80	1,74	1,68	1,63	1,61
SP1803 A promedio Porcentaje acumulativo	12,69	14,22	15,87	17,62	19,44	21,33	23,24	25,15	27,05	28,90	30,70	32,44	34,12	35,75	37,36

Tamaño de grano (µm)	8,93	10,02	11,25	12,62	14,16	15,89	17,83	20,00	22,44	25,18	28,25	31,70	35,57	39,91
SP1803 A 1 (Prom.) Distribución por tamaño	1,80	1,91	2,09	2,33	2,64	3,00	3,40	3,80	4,15	4,43	4,58	4,57	4,39	4,04
SP1803 A 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	40,11	42,02	44,11	46,44	49,07	52,07	55,47	59,27	63,42	67,85	72,43	77,00	81,39	85,42
SP1803 A 2 (Prom.) Distribución por tamaño	1,54	1,58	1,69	1,89	2,18	2,56	3,01	3,53	4,04	4,51	4,85	5,02	4,97	4,68
SP1803 A 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	41,44	43,02	44,72	46,61	48,78	51,34	54,35	57,88	61,91	66,42	71,27	76,30	81,26	85,94
SP1803 A 3 (Prom.) Distribución por tamaño	1,50	1,51	1,56	1,66	1,83	2,10	2,45	2,90	3,41	3,95	4,45	4,87	5,13	5,20
SP1803 A 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	35,37	36,88	38,43	40,09	41,93	44,02	46,48	49,38	52,79	56,73	61,18	66,05	71,18	76,38
SP1803 A promedio Distribución por tamaño	1,62	1,67	1,78	1,96	2,22	2,55	2,95	3,41	3,87	4,30	4,63	4,82	4,83	4,64
SP1803 A promedio Porcentaje acumulativo	38,97	40,64	42,42	44,38	46,59	49,14	52,10	55,51	59,37	63,67	68,30	73,12	77,94	82,58

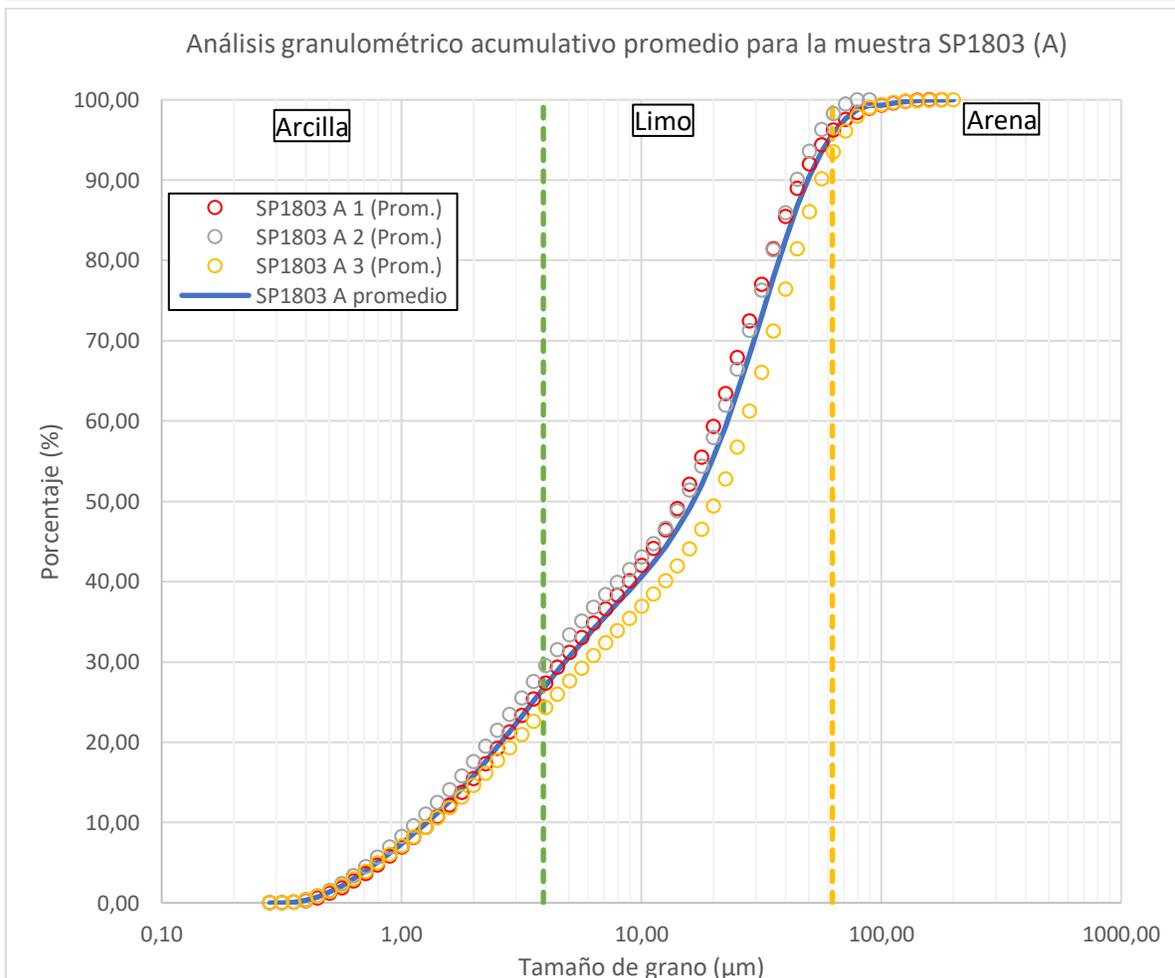
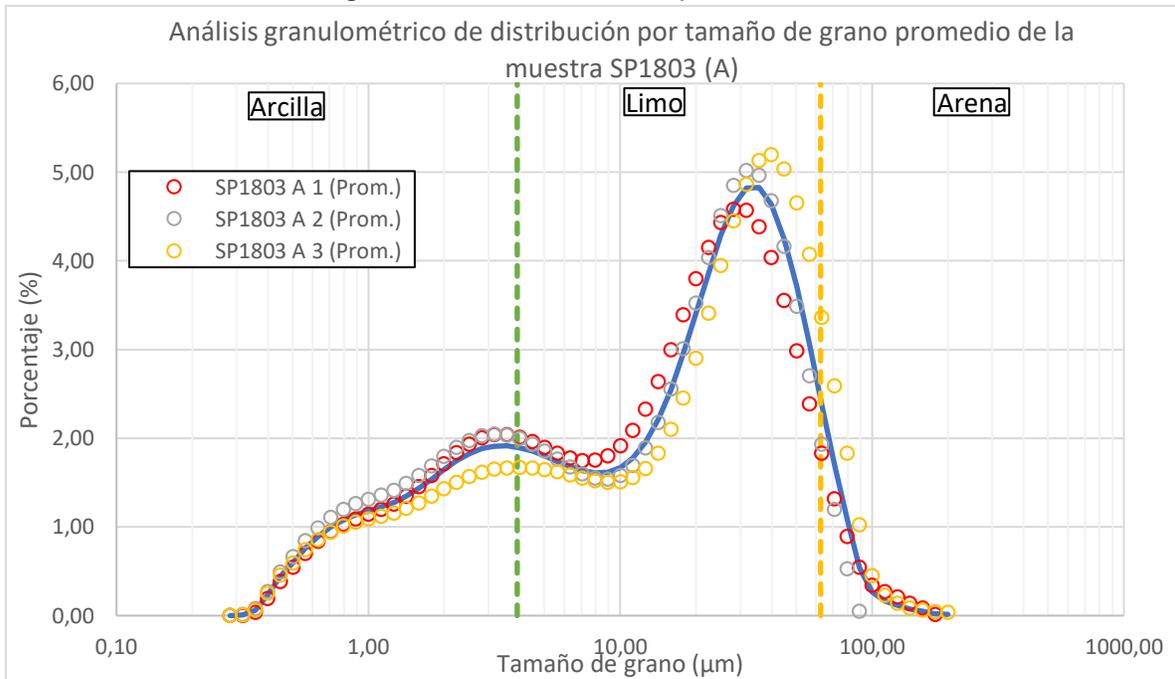
² Los datos mostrados (A 'x') son el promedio de tres mediciones realizadas a una misma porción de la muestra.

Tamaño de grano (μm)	44,77	50,24	56,37	63,25	70,96	79,62	89,34	100,24	112,47	126,19	141,59	158,87	178,25	200,00
SP1803 A 1 (Prom.) Distribución por tamaño	3,55	2,99	2,39	1,83	1,32	0,89	0,55	0,34	0,27	0,21	0,14	0,08	0,01	0,00
SP1803 A 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	88,98	91,96	94,35	96,18	97,50	98,40	98,94	99,28	99,55	99,76	99,90	99,99	100,00	
SP1803 A 2 (Prom.) Distribución por tamaño	4,16	3,49	2,71	1,93	1,20	0,53	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SP1803 A 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	90,10	93,58	96,29	98,23	99,42	99,95	100,00							
SP1803 A 3 (Prom.) Distribución por tamaño	5,04	4,66	4,07	3,37	2,59	1,83	1,02	0,45	0,23	0,14	0,08	0,06	0,05	0,04
SP1803 A 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	81,41	86,07	90,14	93,51	96,10	97,93	98,95	99,41	99,63	99,77	99,86	99,92	99,96	100,00
SP1803 A promedio Distribución por tamaño	4,25	3,71	3,06	2,38	1,70	1,08	0,54	0,26	0,17	0,12	0,08	0,05	0,02	0,01
SP1803 A promedio Porcentaje acumulativo	86,83	90,54	93,59	95,97	97,67	98,76	99,30	99,34	99,59	99,77	99,88	99,95	99,98	100,00

Tabla resumen de coeficientes obtenidos de las mediciones

Coeficientes	D ₁₀ (μm)	D ₃₀ (μm)	D ₆₀ (μm)	Moda (μm)	Mediana (μm)	Cu	Cc
SP1803 A 1 (Prom.)	1,416	5,024	22,440	28,251	15,887	15,849	0,794
SP1803 A 2 (Prom.)	1,262	4,477	22,440	31,698	15,887	17,783	0,708
SP1803 A 3 (Prom.)	1,416	6,325	28,251	39,905	22,440	19,953	1,000
SP1803 A Promedio	1,416	5,024	25,179	35,566	17,825	17,783	0,708

Gráficos resumen de la granulometría obtenida para la muestra SP1803-A



SP1803-B³

Tabla de distribución por tamaño de grano y acumulativa

Tamaño de grano (µm)	0,28	0,32	0,36	0,40	0,45	0,50	0,56	0,63	0,71	0,80	0,89	1,00	1,12	1,26	1,42	1,59	1,78	2,00
SP1803 B 1 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,00	0,00	0,29	0,63	0,85	1,10	1,30	1,46	1,60	1,70	1,78	1,86	1,94	2,03	2,13	2,23	2,33
SP1803 B 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,00	0,00	0,29	0,91	1,76	2,86	4,16	5,62	7,22	8,91	10,70	12,56	14,49	16,52	18,65	20,88	23,21
SP1803 B 2 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,01	0,07	0,30	0,55	0,72	0,91	1,06	1,18	1,28	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,62	1,69	1,76
SP1803 B 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,01	0,08	0,38	0,92	1,65	2,56	3,61	4,79	6,07	7,42	8,82	10,26	11,76	13,31	14,93	16,62	18,38
SP1803 B 3 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,00	0,04	0,31	0,61	0,82	1,04	1,22	1,38	1,50	1,60	1,68	1,75	1,82	1,89	1,97	2,05	2,11
SP1803 B 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,00	0,04	0,36	0,96	1,78	2,82	4,04	5,41	6,91	8,52	10,20	11,95	13,77	15,66	17,63	19,68	21,79
SP1803 B promedio Distribución por tamaño	0,00	0,00	0,04	0,30	0,59	0,80	1,01	1,19	1,34	1,46	1,55	1,62	1,69	1,75	1,82	1,91	1,99	2,06
SP1803 B promedio Porcentaje acumulativo	0,00	0,00	0,04	0,34	0,93	1,73	2,74	3,94	5,28	6,73	8,28	9,90	11,59	13,34	15,17	17,07	19,06	21,13

Tamaño de grano (µm)	2,24	2,52	2,83	3,17	3,56	3,99	4,48	5,02	5,64	6,32	7,10	7,96	8,93	10,02	11,25	12,62	14,16	15,89
SP1803 B 1 (Prom.) Distribución por tamaño	2,39	2,42	2,41	2,36	2,28	2,17	2,05	1,92	1,79	1,69	1,60	1,56	1,55	1,58	1,66	1,79	1,95	2,16
SP1803 B 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	25,60	28,03	30,44	32,80	35,08	37,25	39,29	41,21	43,00	44,69	46,29	47,85	49,40	50,98	52,64	54,42	56,38	58,54
SP1803 B 2 (Prom.) Distribución por tamaño	1,81	1,85	1,86	1,86	1,83	1,80	1,74	1,68	1,61	1,54	1,46	1,39	1,34	1,32	1,36	1,46	1,67	1,98
SP1803 B 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	20,19	22,04	23,90	25,76	27,60	29,39	31,14	32,82	34,43	35,96	37,42	38,81	40,15	41,47	42,82	44,29	45,96	47,94
SP1803 B 3 (Prom.) Distribución por tamaño	2,16	2,18	2,18	2,16	2,12	2,07	2,01	1,93	1,85	1,76	1,66	1,56	1,46	1,39	1,37	1,43	1,60	1,90
SP1803 B 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	23,95	26,13	28,31	30,48	32,60	34,67	36,68	38,61	40,46	42,22	43,88	45,44	46,91	48,30	49,67	51,11	52,70	54,60
SP1803 B promedio Distribución por tamaño	2,12	2,15	2,15	2,13	2,08	2,01	1,93	1,84	1,75	1,66	1,57	1,50	1,45	1,43	1,46	1,56	1,74	2,01
SP1803 B promedio Porcentaje acumulativo	23,25	25,40	27,55	29,68	31,76	33,77	35,70	37,55	39,30	40,96	42,53	44,03	45,48	46,91	48,38	49,94	51,68	53,69

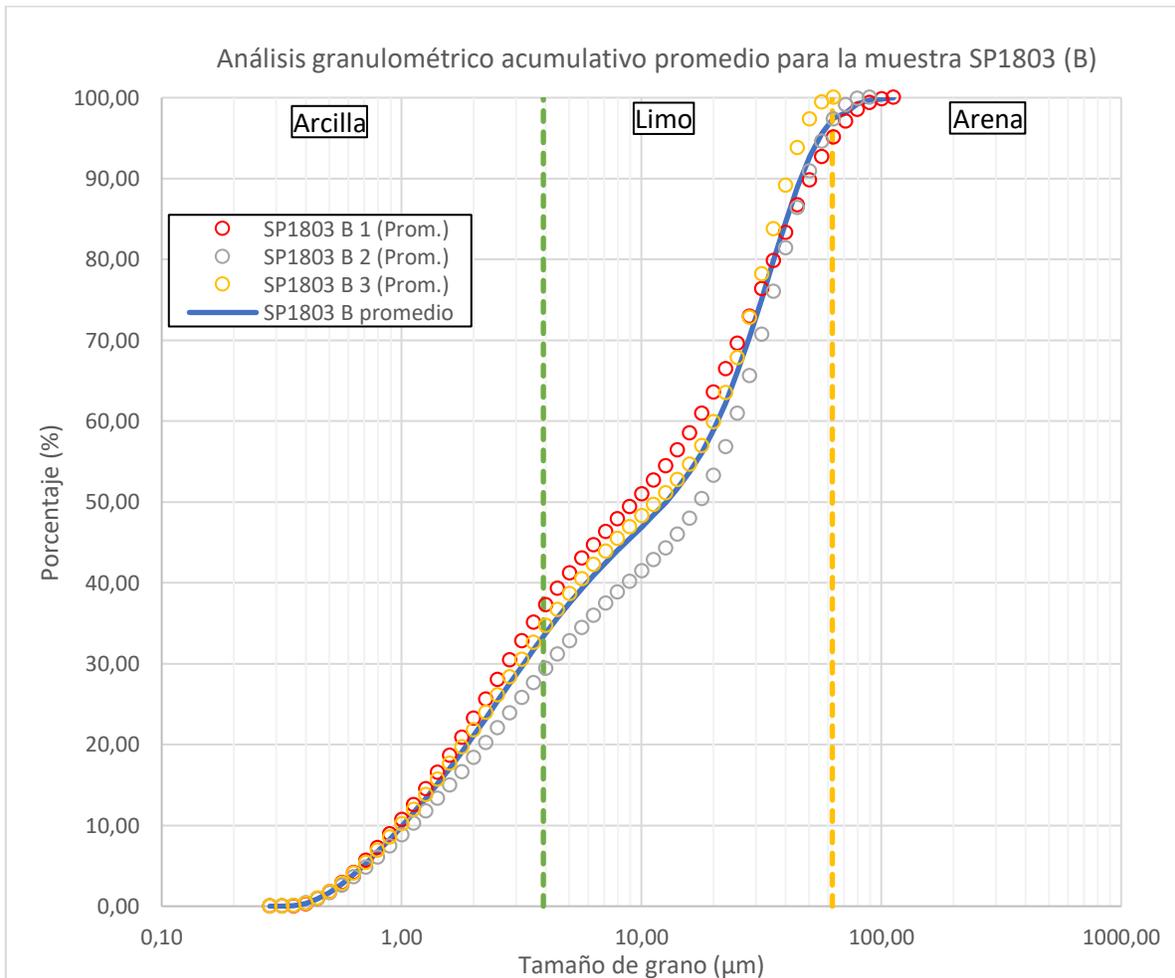
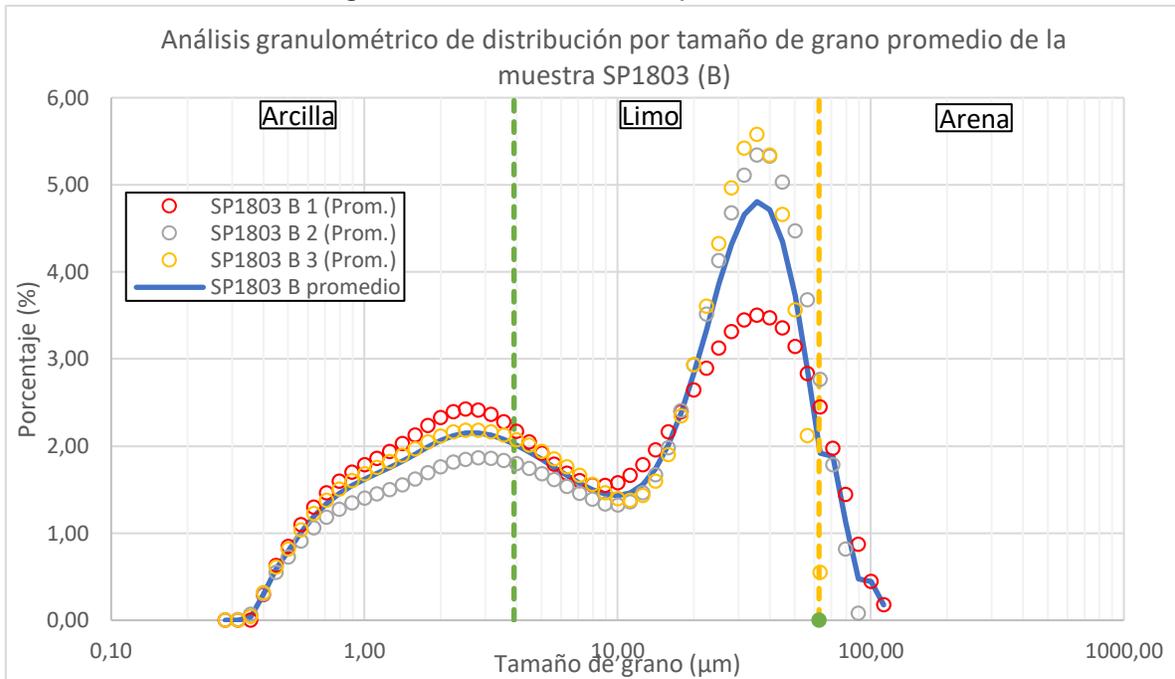
³ Los datos mostrados (B 'x') son el promedio de tres mediciones realizadas a una misma porción de la muestra.

Tamaño de grano (μm)	17,83	20,00	22,44	25,18	28,25	31,70	35,57	39,91	44,77	50,24	56,37	63,25	70,96	79,62	89,34	100,24	112,47
SP1803 B 1 (Prom.) Distribución por tamaño	2,39	2,65	2,89	3,12	3,31	3,45	3,50	3,47	3,35	3,14	2,83	2,45	1,97	1,44	0,87	0,44	0,17
SP1803 B 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	60,93	63,58	66,47	69,59	72,91	76,35	79,85	83,33	86,68	89,82	92,65	95,10	97,07	98,51	99,38	99,83	100,00
SP1803 B 2 (Prom.) Distribución por tamaño	2,40	2,93	3,52	4,13	4,68	5,11	5,34	5,33	5,03	4,47	3,68	2,77	1,79	0,82	0,08		
SP1803 B 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	50,34	53,27	56,79	60,92	65,60	70,71	76,05	81,37	86,40	90,88	94,55	97,32	99,11	99,92	100,00		
SP1803 B 3 (Prom.) Distribución por tamaño	2,34	2,93	3,61	4,32	4,96	5,42	5,58	5,34	4,66	3,56	2,12	0,55					
SP1803 B 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	56,95	59,88	63,49	67,81	72,77	78,20	83,77	89,11	93,77	97,33	99,45	100,00					
SP1803 B promedio Distribución por tamaño	2,38	2,84	3,34	3,86	4,32	4,66	4,81	4,71	4,35	3,72	2,88	1,92	1,88	1,13	0,47	0,44	0,17
SP1803 B promedio Porcentaje acumulativo	56,07	58,91	62,25	66,11	70,43	75,08	79,89	84,61	88,95	92,68	95,55	97,47	98,09	99,22	99,69	99,83	100,00

Tabla resumen de coeficientes obtenidos de las mediciones

Coeficientes	D ₁₀ (μm)	D ₃₀ (μm)	D ₆₀ (μm)	Moda (μm)	Mediana (μm)	Cu	Cc
SP1803 B 1 (Prom.)	1,002	2,825	17,825	35,566	10,024	17,783	0,447
SP1803 B 2 (Prom.)	1,125	4,477	25,179	35,566	17,825	22,387	0,708
SP1803 B 3 (Prom.)	1,002	3,170	22,440	35,566	12,619	22,387	0,447
SP1803 B Promedio	1,125	3,557	22,440	35,566	14,159	19,953	0,501

Gráficos resumen de la granulometría obtenida para la muestra SP1803-B



SP1804⁴

Tabla de distribución por tamaño de grano y acumulativa

Tamaño de grano (µm)	0,28	0,32	0,36	0,40	0,45	0,50	0,56	0,63	0,71	0,80	0,89	1,00	1,12	1,26	1,42	1,59	1,78	2,00	2,24
SP1804 1 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,01	0,22	0,42	0,62	0,81	0,97	1,10	1,21	1,29	1,34	1,38	1,40	1,43	1,46	1,50	1,54	1,58	1,61
SP1804 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,01	0,23	0,65	1,28	2,08	3,05	4,16	5,37	6,66	8,00	9,38	10,78	12,21	13,67	15,17	16,70	18,28	19,89
SP1804 2 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,02	0,16	0,40	0,67	0,86	1,06	1,22	1,35	1,44	1,51	1,55	1,59	1,62	1,66	1,71	1,77	1,83	1,88
SP1804 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,02	0,18	0,59	1,25	2,12	3,18	4,40	5,74	7,18	8,69	10,24	11,83	13,46	15,12	16,84	18,61	20,44	22,32
SP1804 3 (Prom.) Distribución por tamaño	0,00	0,01	0,19	0,43	0,66	0,87	1,05	1,20	1,33	1,42	1,48	1,53	1,56	1,60	1,64	1,69	1,74	1,80	1,84
SP1804 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	0,00	0,01	0,20	0,63	1,29	2,15	3,20	4,41	5,73	7,15	8,63	10,16	11,73	13,32	14,96	16,65	18,39	20,18	22,02
SP1804 Promedio Distribución por tamaño	0,00	0,02	0,19	0,42	0,65	0,85	1,03	1,18	1,29	1,38	1,44	1,49	1,52	1,55	1,59	1,63	1,68	1,73	1,77
SP1804 Promedio Porcentaje acumulativo	0,00	0,02	0,20	0,62	1,27	2,12	3,14	4,32	5,61	7,00	8,44	9,93	11,45	13,00	14,58	16,22	17,90	19,64	21,41

Tamaño de grano (µm)	2,52	2,83	3,17	3,56	3,99	4,48	5,02	5,64	6,32	7,10	7,96	8,93	10,02	11,25	12,62	14,16	15,89
SP1804 1 (Prom.) Distribución por tamaño	1,62	1,62	1,60	1,57	1,52	1,47	1,41	1,35	1,30	1,25	1,21	1,19	1,21	1,27	1,38	1,57	1,83
SP1804 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	21,51	23,12	24,72	26,29	27,81	29,28	30,69	32,04	33,34	34,59	35,80	36,99	38,20	39,47	40,85	42,42	44,26
SP1804 2 (Prom.) Distribución por tamaño	1,91	1,92	1,91	1,88	1,83	1,76	1,68	1,60	1,51	1,45	1,41	1,41	1,48	1,62	1,84	2,15	2,55
SP1804 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	24,23	26,15	28,06	29,94	31,77	33,53	35,21	36,80	38,31	39,76	41,17	42,58	44,06	45,68	47,52	49,67	52,22
SP1804 3 (Prom.) Distribución por tamaño	1,86	1,87	1,86	1,83	1,79	1,74	1,68	1,62	1,56	1,51	1,48	1,48	1,52	1,61	1,77	2,01	2,33
SP1804 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	23,89	25,76	27,62	29,45	31,25	32,98	34,66	36,28	37,84	39,35	40,83	42,30	43,82	45,43	47,20	49,21	51,55
SP1804 Promedio Distribución por tamaño	1,80	1,80	1,79	1,76	1,71	1,66	1,59	1,52	1,46	1,40	1,37	1,36	1,40	1,50	1,67	1,91	2,24
SP1804 Promedio Porcentaje acumulativo	23,21	25,01	26,80	28,56	30,27	31,93	33,52	35,04	36,50	37,90	39,26	40,62	42,03	43,53	45,19	47,10	49,34

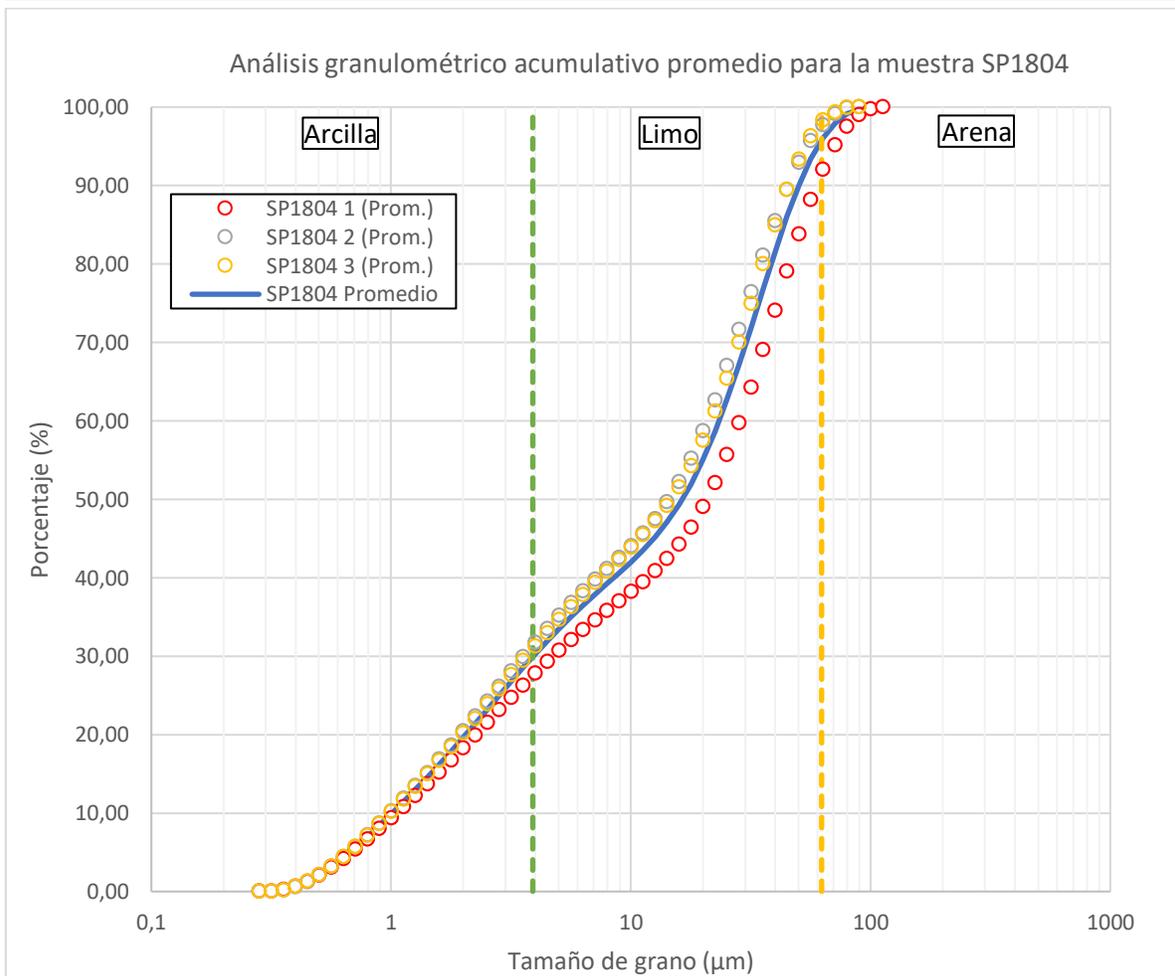
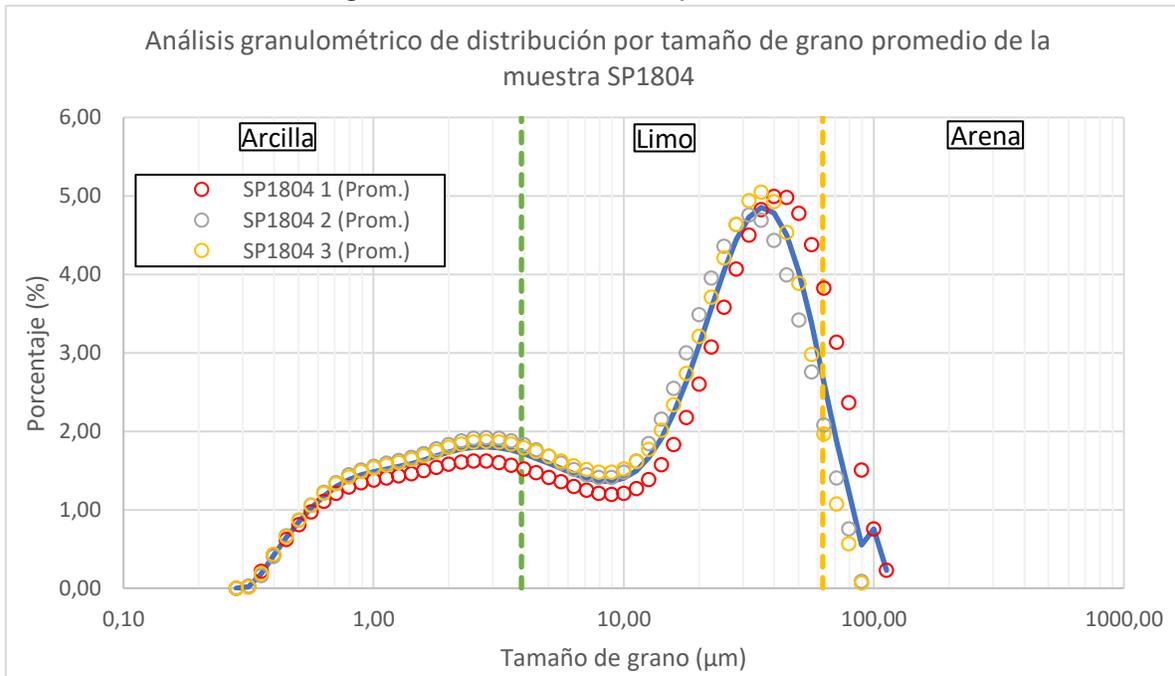
⁴ Los datos mostrados (B 'x') son el promedio de tres mediciones realizadas a una misma porción de la muestra.

Tamaño de grano (μm)	17,83	20,00	22,44	25,18	28,25	31,70	35,57	39,91	44,77	50,24	56,37	63,25	70,96	79,62	89,34	100,24	112,47
SP1804 1 (Prom.) Distribución por tamaño	2,17	2,60	3,07	3,58	4,07	4,50	4,82	4,99	4,98	4,77	4,38	3,82	3,13	2,36	1,51	0,75	0,23
SP1804 1 (Prom.) Porcentaje acumulativo	46,43	49,03	52,10	55,68	59,75	64,25	69,07	74,06	79,04	83,81	88,19	92,02	95,15	97,51	99,02	99,77	100,00
SP1804 2 (Prom.) Distribución por tamaño	3,00	3,48	3,95	4,35	4,64	4,76	4,69	4,43	3,99	3,42	2,75	2,08	1,40	0,76	0,09		
SP1804 2 (Prom.) Porcentaje acumulativo	55,22	58,70	62,65	67,00	71,64	76,40	81,09	85,52	89,50	92,92	95,68	97,75	99,16	99,91	100,00		
SP1804 3 (Prom.) Distribución por tamaño	2,73	3,21	3,71	4,21	4,63	4,94	5,05	4,92	4,53	3,88	2,98	1,96	1,07	0,56	0,07		
SP1804 3 (Prom.) Porcentaje acumulativo	54,28	57,49	61,19	65,40	70,03	74,97	80,02	84,94	89,47	93,36	96,34	98,30	99,37	99,93	100,00		
SP1804 Promedio Distribución por tamaño	2,64	3,10	3,57	4,05	4,45	4,73	4,85	4,78	4,50	4,03	3,37	2,62	1,87	1,23	0,55	0,75	0,23
SP1804 Promedio Porcentaje acumulativo	51,98	55,07	58,65	62,69	67,14	71,87	76,72	81,51	86,01	90,03	93,40	96,02	97,89	99,12	99,67	99,77	100,00

Tabla resumen de coeficientes obtenidos de las mediciones

Coeficientes	D ₁₀ (μm)	D ₃₀ (μm)	D ₆₀ (μm)	Moda (μm)	Mediana (μm)	Cu	Cc
SP1804 1 (Prom.)	1,125	5,024	31,698	39,905	22,440	28,184	0,708
SP1804 2 (Prom.)	1,002	3,991	22,440	31,698	15,887	22,387	0,708
SP1804 3 (Prom.)	1,002	3,991	22,440	35,566	15,887	22,387	0,708
SP1804 Promedio	1,125	3,991	25,179	35,566	17,825	22,387	0,562

Gráficos resumen de la granulometría obtenida para la muestra SP1804



Anexo F: Corte directo

1. Ensayo con una tensión nominal normal de 0,5 kg/cm².

Probeta 1					
Saturación			Consolidación		
Tiempo	Deform. Vert.	Deform. Vert.	Tiempo	Deform. Vert.	Deform. Vert.
min	div	cm	min	div	cm
0.00	-8.75	0.260	0.00	-8.980	0.266
0.10	-8.86	0.263	0.10	-8.740	0.259
0.25	-8.88	0.263	0.25	-8.740	0.259
0.50	-8.9	0.264	0.50	-8.730	0.259
1.00	-8.92	0.265	1.00	-8.720	0.259
2.25	-8.94	0.265	2.25	-8.720	0.259
4.00	-8.96	0.266	4.00	-8.720	0.259
6.25	-8.96	0.266	6.25	-8.720	0.259
9.00	-8.97	0.266	9.00	-8.720	0.259
12.25	-8.97	0.266	12.25	-8.720	0.259
16.00	-8.98	0.266	16.00	-8.710	0.258
20.25	-8.98	0.266	20.25	-8.710	0.258
25.00	-8.98	0.266	25.00	-8.710	0.258
			60.00	-8.710	0.258
			240.00	-8.680	0.257

Ensayo Probeta 1						
Lectura Def. Horizontal divisiones	Lectura Fuerza de Corte divisiones	Lectura Def. Vertical divisiones	Desplazam. Horizontal cm	Fuerza de Corte kf	Tensión de Corte kg/cm ²	Desplazam. Vertical cm
0.000	0.000	-8.680	0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	4.060	-8.670	0.005	4.010	0.155	0.000
10.000	8.170	-8.630	0.010	8.099	0.313	-0.001
15.000	12.510	-8.600	0.015	12.417	0.479	-0.002
20.000	16.730	-8.580	0.020	16.615	0.641	-0.003
25.000	21.530	-8.580	0.025	21.391	0.825	-0.003
30.000	26.630	-8.610	0.030	26.465	1.021	-0.002
35.000	28.050	-9.040	0.035	27.877	1.076	0.011
40.000	29.150	-9.540	0.040	28.972	1.118	0.026
45.000	30.870	-9.840	0.045	30.683	1.184	0.034
50.000	31.030	-9.970	0.050	30.842	1.190	0.038
60.000	31.620	-10.240	0.060	31.429	1.213	0.046
70.000	34.200	-10.570	0.070	33.996	1.312	0.056
80.000	36.220	-10.880	0.080	36.006	1.389	0.065
90.000	38.330	-11.000	0.090	38.105	1.470	0.069
100.000	38.350	-11.130	0.100	38.125	1.471	0.073
120.000	39.370	-11.330	0.120	39.140	1.510	0.079
140.000	42.420	-11.660	0.140	42.174	1.627	0.088
160.000	44.550	-12.010	0.160	44.293	1.709	0.099
180.000	32.530	-12.150	0.180	32.334	1.248	0.103
200.000	30.820	-12.150	0.200	30.633	1.182	0.103
250.000	29.570	-12.290	0.250	29.390	1.134	0.107
300.000	29.720	-12.490	0.300	29.539	1.140	0.113
350.000	23.500	-12.090	0.350	23.351	0.901	0.101
400.000	22.700	-11.220	0.400	22.555	0.870	0.075
450.000	24.620	-11.380	0.450	24.465	0.944	0.080
500.000	25.290	-11.540	0.500	25.131	0.970	0.085
600.000	24.540	-11.960	0.600	24.385	0.941	0.097
700.000	23.880	-12.250	0.700	23.729	0.916	0.106
800.000	19.610	-12.280	0.800	19.480	0.752	0.107
900.000	18.690	-12.380	0.900	18.565	0.716	0.110
1000.000	17.110	-12.490	1.000	16.993	0.656	0.113
				Critico	0.656	

2. Ensayo con una tensión nominal normal de 1,5 kg/cm².

Probeta 2			Consolidación		
Saturación			Consolidación		
Tiempo	Deform. Vert.	Deform. Vert.	Tiempo	Deform. Vert.	Deform. Vert.
min	div	cm	min	div	cm
0.00	-9.47	0.281	0.00	-9.680	0.287
0.10	-9.58	0.284	0.10	-9.030	0.268
0.25	-9.59	0.284	0.25	-9.020	0.268
0.50	-9.6	0.285	0.50	-9.020	0.268
1.00	-9.62	0.285	1.00	-9.010	0.267
2.25	-9.64	0.286	2.25	-9.000	0.267
4.00	-9.66	0.287	4.00	-8.990	0.267
6.25	-9.67	0.287	6.25	-8.980	0.266
9.00	-9.67	0.287	9.00	-8.970	0.266
12.25	-9.68	0.287	12.25	-8.970	0.266
16.00	-9.68	0.287	16.00	-8.960	0.266
20.25	-9.68	0.287	20.25	-8.960	0.266
25.00	-9.68	0.287	25.00	-8.960	0.266
			40.00	-8.950	0.265
			180.00	-8.930	0.265

Ensayo Probeta 2						
Lectura Def. Horizontal divisiones	Lectura Fuerza de Corte divisiones	Lectura Def. Vertical divisiones	Desplazam. Horizontal cm	Fuerza de Corte kf	Tensión de Corte kg/cm ²	Desplazam. Vertical cm
0.000	0.000	-8.930	0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	4.370	-8.880	0.005	4.318	0.167	-0.001
10.000	8.050	-8.840	0.010	7.979	0.308	-0.003
15.000	11.690	-8.800	0.015	11.601	0.448	-0.004
20.000	14.510	-8.770	0.020	14.406	0.556	-0.005
25.000	17.970	-8.730	0.025	17.849	0.689	-0.006
30.000	21.290	-8.710	0.030	21.152	0.816	-0.007
35.000	24.500	-8.680	0.035	24.345	0.939	-0.007
40.000	27.820	-8.670	0.040	27.649	1.067	-0.008
45.000	31.000	-8.660	0.045	30.812	1.189	-0.008
50.000	34.030	-8.650	0.050	33.827	1.305	-0.008
60.000	39.590	-8.630	0.060	39.358	1.519	-0.009
70.000	44.560	-8.630	0.070	44.303	1.710	-0.009
80.000	48.130	-8.650	0.080	47.855	1.847	-0.008
90.000	48.310	-8.680	0.090	48.034	1.854	-0.007
100.000	48.150	-8.720	0.100	47.875	1.847	-0.006
120.000	53.230	-8.780	0.120	52.929	2.042	-0.004
140.000	49.420	-8.810	0.140	49.138	1.896	-0.004
160.000	49.380	-8.850	0.160	49.099	1.895	-0.002
180.000	48.800	-8.910	0.180	48.522	1.872	-0.001
200.000	53.920	-8.900	0.200	53.615	2.069	-0.001
250.000	56.320	-8.940	0.250	56.003	2.161	0.000
300.000	53.010	-9.060	0.300	52.710	2.034	0.004
350.000	42.810	-9.160	0.350	42.562	1.642	0.007
400.000	38.250	-9.230	0.400	38.025	1.467	0.009
450.000	36.110	-9.270	0.450	35.896	1.385	0.010
500.000	34.220	-9.290	0.500	34.016	1.313	0.011
600.000	31.800	-9.310	0.600	31.608	1.220	0.011
700.000	30.520	-9.330	0.700	30.335	1.171	0.012
800.000	29.070	-9.340	0.800	28.892	1.115	0.012
900.000	28.010	-9.330	0.900	27.838	1.074	0.012
1000.000	26.880	-9.330	1.000	26.713	1.031	0.012
				Critico	1.031	

3. Ensayo con una tensión nominal normal de 2,5 kg/cm².

Probeta 3			Consolidación		
Saturación			Consolidación		
Tiempo	Deform. Vert.	Deform. Vert.	Tiempo	Deform. Vert.	Deform. Vert.
min	div	cm	min	div	cm
0.00	-8.07	0.239	0.00	-8.350	0.248
0.10	-8.31	0.246	0.10	-6.890	0.204
0.25	-8.32	0.247	0.25	-6.870	0.204
0.50	-8.33	0.247	0.50	-6.840	0.203
1.00	-8.34	0.247	1.00	-6.820	0.202
2.25	-8.34	0.247	2.25	-6.800	0.202
4.00	-8.34	0.247	4.00	-6.780	0.201
6.25	-8.34	0.247	6.25	-6.770	0.201
9.00	-8.34	0.247	9.00	-6.760	0.201
12.25	-8.35	0.248	12.25	-6.750	0.200
16.00	-8.35	0.248	16.00	-6.740	0.200
20.25	-8.35	0.248	20.25	-6.730	0.200
			25.00	-6.730	0.200
			40.00	-6.710	0.199
			1020.00	-6.610	0.196

Ensaye Probeta 3						
Lectura Def. Horizontal divisiones	Lectura Fuerza de Corte divisiones	Lectura Def. Vertical divisiones	Desplazam. Horizontal cm	Fuerza de Corte kf	Tensión de Corte kg/cm ²	Desplazam. Vertical cm
0.000	0.000	-8.930	0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	4.370	-8.880	0.005	4.318	0.167	-0.001
10.000	8.050	-8.840	0.010	7.979	0.308	-0.003
15.000	11.690	-8.800	0.015	11.601	0.448	-0.004
20.000	14.510	-8.770	0.020	14.406	0.556	-0.005
25.000	17.970	-8.730	0.025	17.849	0.689	-0.006
30.000	21.290	-8.710	0.030	21.152	0.816	-0.007
35.000	24.500	-8.680	0.035	24.345	0.939	-0.007
40.000	27.820	-8.670	0.040	27.649	1.067	-0.008
45.000	31.000	-8.660	0.045	30.812	1.189	-0.008
50.000	34.030	-8.650	0.050	33.827	1.305	-0.008
60.000	39.590	-8.630	0.060	39.358	1.519	-0.009
70.000	44.560	-8.630	0.070	44.303	1.710	-0.009
80.000	48.130	-8.650	0.080	47.855	1.847	-0.008
90.000	48.310	-8.680	0.090	48.034	1.854	-0.007
100.000	48.150	-8.720	0.100	47.875	1.847	-0.006
120.000	53.230	-8.780	0.120	52.929	2.042	-0.004
140.000	49.420	-8.810	0.140	49.138	1.896	-0.004
160.000	49.380	-8.850	0.160	49.099	1.895	-0.002
180.000	48.800	-8.910	0.180	48.522	1.872	-0.001
200.000	53.920	-8.900	0.200	53.615	2.069	-0.001
250.000	56.320	-8.940	0.250	56.003	2.161	0.000
300.000	53.010	-9.060	0.300	52.710	2.034	0.004
350.000	42.810	-9.160	0.350	42.562	1.642	0.007
400.000	38.250	-9.230	0.400	38.025	1.467	0.009
450.000	36.110	-9.270	0.450	35.896	1.385	0.010
500.000	34.220	-9.290	0.500	34.016	1.313	0.011
600.000	31.800	-9.310	0.600	31.608	1.220	0.011
700.000	30.520	-9.330	0.700	30.335	1.171	0.012
800.000	29.070	-9.340	0.800	28.892	1.115	0.012
900.000	28.010	-9.330	0.900	27.838	1.074	0.012
1000.000	26.880	-9.330	1.000	26.713	1.031	0.012
				Crítico	1.031	

Datos asociados a la calibración de la máquina de corte directo y a las dimensiones de las probetas

Datos confección Probeta		
Área del molde	[cm ²]	25.915
Altura Probeta Natural	[cm]	1.764
Volumen Probeta Natural	[cm ³]	45.467
Datos constantes de Ensaye		
Calibración Anillo de Carga	[kg*división]	0.9949
Constante Anillo de Carga	[kg]	-0.0296
Calibración Def. Vertical	[cm]	-0.02966
Calibración Def. Horizontal	[cm]	0.001

Datos de Confección	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Peso suelo húmedo	[g]	65.37	64.97	68.89
Humedad de confección	[%]	53.1	57.79	57.79
Volumen	[cm ³]	45.467	45.467	45.467
Densidad Húmeda	[g/cm ³]	1.438	1.429	1.515
Densidad Seca	[g/cm ³]	0.939	0.906	0.960
Tensión Normal de ensaye	[kg/cm ³]	0.5	1.5	2.5
Carga aplicada	[kg]	12.958	38.873	64.788

Anexo G: Ensayo Triaxial

1. Ensayo con presión confinante de 1 kg/cm²

Probeta	N ° 1					
Altura Inicial de Confección	[cm]=	7.65				
Diámetro Inicial de Confección	[cm]=	3.64				
Variación Volumen drenado etapa consolidación	[cm ³]=	0.34				
Densidad Seca de Confección	[g/cm ³]=	0.95				
Humedad de Confección	[%]=	47.27				
Contrapresión	[kg/cm ²]=	5.00				
Presión de Cámara	[kg/cm ²]=	6.00				
Presión confinante	[kg/cm ²]=	1.00				
Velocidad Deformación Unitaria	[% / min]=	0.13				
Deformación Unitaria [%]	Variación P. de Poros [kg/cm ²]	p' [kg/cm ²]	p [kg/cm ²]	q [kg/cm ²]	sigma 3 [kg/cm ²]	sigma 1 [kg/cm ²]
0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.000	1.000
0.17	0.36	1.43	1.79	0.79	0.640	2.210
0.33	0.70	1.91	2.61	1.61	0.300	3.510
0.50	0.89	2.58	3.47	2.47	0.110	5.045
0.66	0.94	3.31	4.25	3.25	0.060	6.569
0.83	0.85	4.21	5.06	4.06	0.150	8.263
1.00	0.79	4.81	5.60	4.60	0.210	9.408
1.16	0.69	5.47	6.16	5.16	0.310	10.637
1.33	0.52	5.72	6.24	5.24	0.480	10.962
1.50	0.41	5.87	6.28	5.28	0.590	11.159
1.66	0.24	5.97	6.21	5.21	0.760	11.186
1.99	0.07	6.21	6.28	5.28	0.930	11.495
2.33	-0.13	6.49	6.36	5.36	1.130	11.841
2.66	-0.22	6.63	6.41	5.41	1.220	12.049
2.99	-0.35	6.83	6.48	5.48	1.350	12.315
3.32	-0.47	7.05	6.58	5.58	1.470	12.623
3.99	-0.61	7.24	6.63	5.63	1.610	12.873
4.65	-0.74	7.28	6.54	5.54	1.740	12.820
5.32	-0.84	7.10	6.26	5.26	1.840	12.367
5.98	-1.03	6.77	5.74	4.74	2.030	11.514
6.65	-1.03	6.72	5.69	4.69	2.030	11.410
8.31	-1.19	6.43	5.24	4.24	2.190	10.660
9.97	-1.22	6.07	4.85	3.85	2.220	9.924
11.64	-1.23	5.78	4.55	3.55	2.230	9.325
13.30	-1.25	5.58	4.33	3.33	2.250	8.914
14.96	-1.26	5.47	4.21	3.21	2.260	8.672
16.62	-1.26	5.38	4.12	3.12	2.260	8.509
19.95	-1.25	5.16	3.91	2.91	2.250	8.077

2. Ensayo con presión confinante de 3 kg/cm²

Probeta	N ° 2						
Altura Inicial de Confección	[cm]=	7.64					
Diámetro Inicial de Confección	[cm]=	3.63					
Variación Volumen drenado etapa consolidación	[cm ³]=	2.90					
Densidad Seca de Confección	[g/cm ³]=	0.96					
Humedad de Confección	[%]=	57.79					
Contrapresión	[kg/cm ²]=	5.00					
Presión de Cámara	[kg/cm ²]=	8.00					
Presión confinante	[kg/cm ²]=	3.00					
Velocidad Deformación Unitaria	[% / min]=	0.13					
Deformación Unitaria [%]	Variación P. de Poros [kg/cm ²]	p' [kg/cm ²]	p [kg/cm ²]	q [kg/cm ²]	sigma 3 [kg/cm ²]	sigma 1 [kg/cm ²]	
0.00	0.00	3.00	3.00	0.00	3.00	3.000	
0.17	0.70	3.52	4.22	1.22	2.3	4.741	
0.34	1.27	3.60	4.87	1.87	1.73	5.472	
0.50	1.74	3.69	5.43	2.43	1.26	6.113	
0.67	2.07	3.80	5.87	2.87	0.93	6.666	
0.84	2.28	3.92	6.20	3.20	0.72	7.123	
1.01	2.40	4.07	6.47	3.47	0.6	7.531	
1.18	2.44	4.25	6.69	3.69	0.56	7.938	
1.35	2.44	4.41	6.85	3.85	0.56	8.256	
1.51	2.42	4.54	6.96	3.96	0.58	8.500	
1.68	2.37	4.66	7.03	4.03	0.63	8.695	
2.02	2.31	4.88	7.19	4.19	0.69	9.072	
2.36	2.27	5.19	7.46	4.46	0.73	9.646	
2.69	2.19	5.53	7.72	4.72	0.81	10.254	
3.03	2.12	5.68	7.80	4.80	0.88	10.485	
3.37	2.05	5.81	7.86	4.86	0.95	10.666	
4.04	1.90	6.22	8.12	5.12	1.1	11.333	
4.71	1.77	6.49	8.26	5.26	1.23	11.758	
5.38	1.68	6.69	8.37	5.37	1.32	12.069	
6.06	1.53	6.75	8.28	5.28	1.47	12.028	
6.73	1.42	6.89	8.31	5.31	1.58	12.199	
8.41	1.18	6.66	7.84	4.84	1.82	11.493	
10.10	1.18	6.36	7.54	4.54	1.82	10.904	
11.78	1.18	6.10	7.28	4.28	1.82	10.387	
13.46	1.15	5.92	7.07	4.07	1.85	9.988	
15.14	1.08	5.70	6.78	3.78	1.92	9.473	
16.83	1.04	5.51	6.55	3.55	1.96	9.069	
20.19	0.95	5.19	6.14	3.14	2.05	8.323	

3. Ensayo con presión confinante de 6 kg/cm²

Probeta	N ° 3					
Altura Inicial de Confección	[cm]=	7.62				
Diámetro Inicial de Confección	[cm]=	3.78				
Variación Volumen drenado etapa consolidación	[cm ³]=	4.11				
Densidad Seca de Confección	[g/cm ³]=	1.00				
Humedad de Confección	[%]=	57.79				
Contrapresión	[kg/cm ²]=	4.00				
Presión de Cámara	[kg/cm ²]=	10.00				
Presión confinante	[kg/cm ²]=	6.00				
Velocidad Deformación Unitaria	[% / min]=	0.13				
Deformación Unitaria [%]	Variación P. de Poros [kg/cm ²]	p' [kg/cm ²]	p [kg/cm ²]	q [kg/cm ²]	sigma 3 [kg/cm ²]	sigma 1 [kg/cm ²]
0.00	0.00	6.00	6.00	0.00	6.00	6.000
0.17	0.28	6.77	7.05	1.05	5.72	7.827
0.34	1.21	7.47	8.68	2.68	4.79	10.148
0.51	2.24	8.09	10.33	4.33	3.76	12.415
0.68	3.26	8.75	12.01	6.01	2.74	14.755
0.85	3.70	9.01	12.71	6.71	2.30	15.715
1.02	4.25	9.50	13.75	7.75	1.75	17.250
1.19	4.39	9.73	14.12	8.12	1.61	17.840
1.36	4.37	9.96	14.33	8.33	1.63	18.291
1.52	4.15	10.33	14.48	8.48	1.85	18.811
1.69	3.99	10.39	14.38	8.38	2.01	18.762
2.03	3.72	10.50	14.22	8.22	2.28	18.716
2.37	3.44	10.57	14.01	8.01	2.56	18.572
2.71	3.33	10.56	13.89	7.89	2.67	18.443
3.05	3.19	10.45	13.64	7.64	2.81	18.091
3.39	3.12	10.43	13.55	7.55	2.88	17.971
4.07	2.98	10.41	13.39	7.39	3.02	17.797
4.74	2.88	10.28	13.16	7.16	3.12	17.442
5.42	2.79	10.06	12.85	6.85	3.21	16.914
6.10	2.72	9.73	12.45	6.45	3.28	16.188
6.78	2.67	9.35	12.02	6.02	3.33	15.363
8.47	2.72	8.68	11.40	5.40	3.28	14.076
10.17	2.80	8.35	11.15	5.15	3.20	13.497
11.86	2.94	7.94	10.88	4.88	3.06	12.818
13.55	2.97	7.70	10.67	4.67	3.03	12.375
15.25	2.99	7.48	10.47	4.47	3.01	11.958
16.94	3.04	7.24	10.28	4.28	2.96	11.526
20.33	3.18	6.87	10.05	4.05	2.82	10.930

Anexo H: Análisis de estabilidad de Ladera

Búsqueda libre de bloques

Resumen de factores de seguridad mínimos obtenidos por cada análisis

Corte directo

Nivel freático se ubica a 10 m de profundidad	Casos	Coeficiente sísmico	Superficie con menor FS		
			Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
	Estático	0,000	1,903	1,899	1,885
	Mínimo (FS <1,0)	0,159	0,997	0,989	0,982
	Máximo	0,500	0,460	0,457	0,454
Nivel freático satura $\frac{3}{4}$ del espesor de Qt	Casos	Coeficiente sísmico	Superficie con menor FS		
			Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
	Estático	0,000	2,061	2,065	2,048
	Mínimo (FS <1,0)	0,188	0,998	0,988	0,983
	Máximo	0,500	0,501	0,497	0,489
Nivel freático satura $\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	Casos	Coeficiente sísmico	Superficie con menor FS		
			Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
	Estático	0,000	2,385	2,388	2,371
	Mínimo (FS <1,0)	0,235	0,999	0,990	0,985
	Máximo	0,500	0,573	0,570	0,563

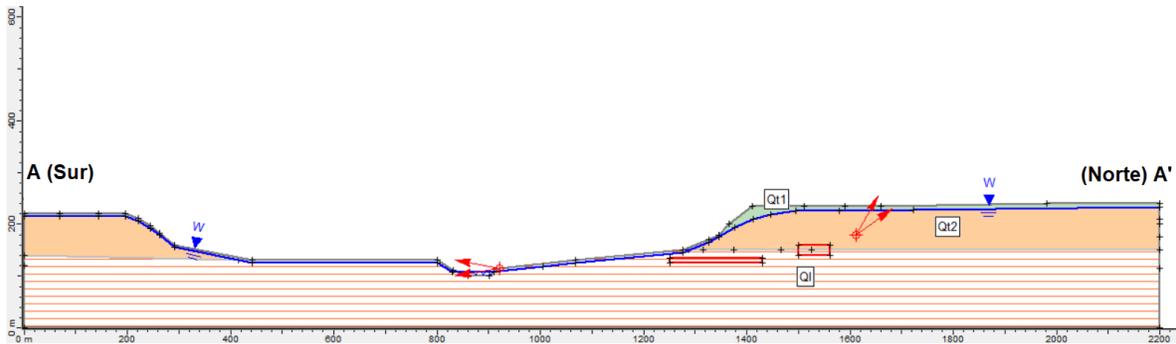
Triaxial

Nivel freático se ubica a 10 m de profundidad	Casos	Coeficiente sísmico	Superficie con menor FS		
			Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
	Estático	0,000	2,581	2,553	2,521
	Mínimo (FS <1,0)	0,285	0,997	0,943	0,921
	Máximo	0,500	0,660	0,601	0,591
Nivel freático satura $\frac{3}{4}$ del espesor de Qt	Casos	Coeficiente sísmico	Superficie con menor FS		
			Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
	Estático	0,000	2,808	2,783	2,753
	Mínimo (FS <1,0)	0,320	0,999	0,943	0,921
	Máximo	0,500	0,713	0,653	0,641
Nivel freático satura $\frac{1}{2}$ del espesor de Qt	Casos	Coeficiente sísmico	Superficie con menor FS		
			Simplificado de Bishop	Spencer	Morgenstern-Price
	Estático	0,000	3,249	3,228	3,192
	Mínimo (FS <1,0)	0,390	0,998	0,945	0,923
	Máximo	0,500	0,821	0,765	0,748

Casos de análisis realizados y superficies de falla posibles

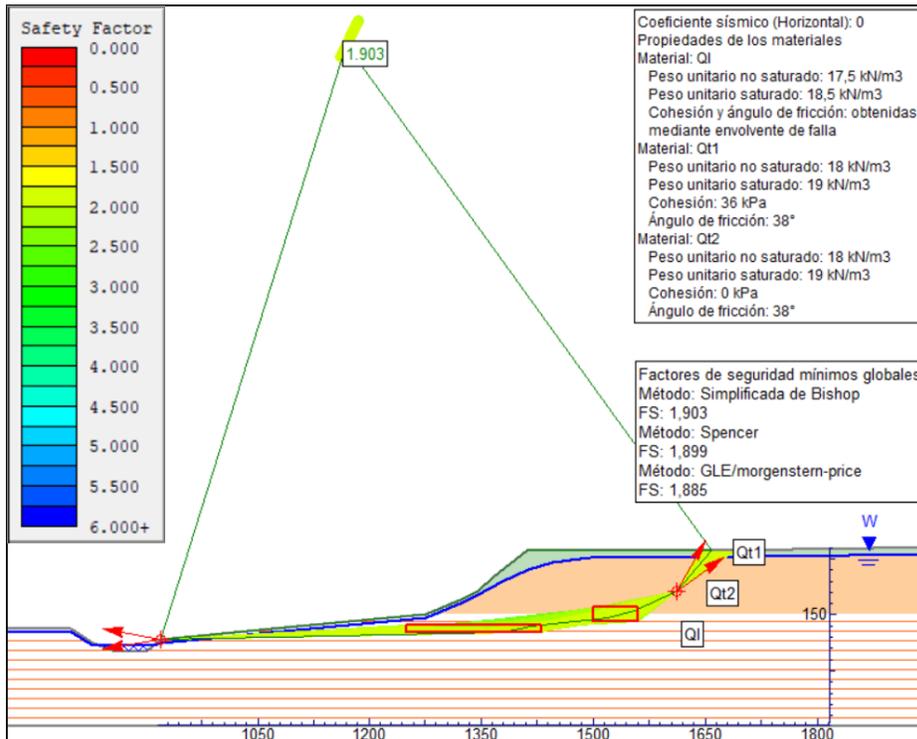
Nivel freático se ubica a 10 m de profundidad

Perfil representativo

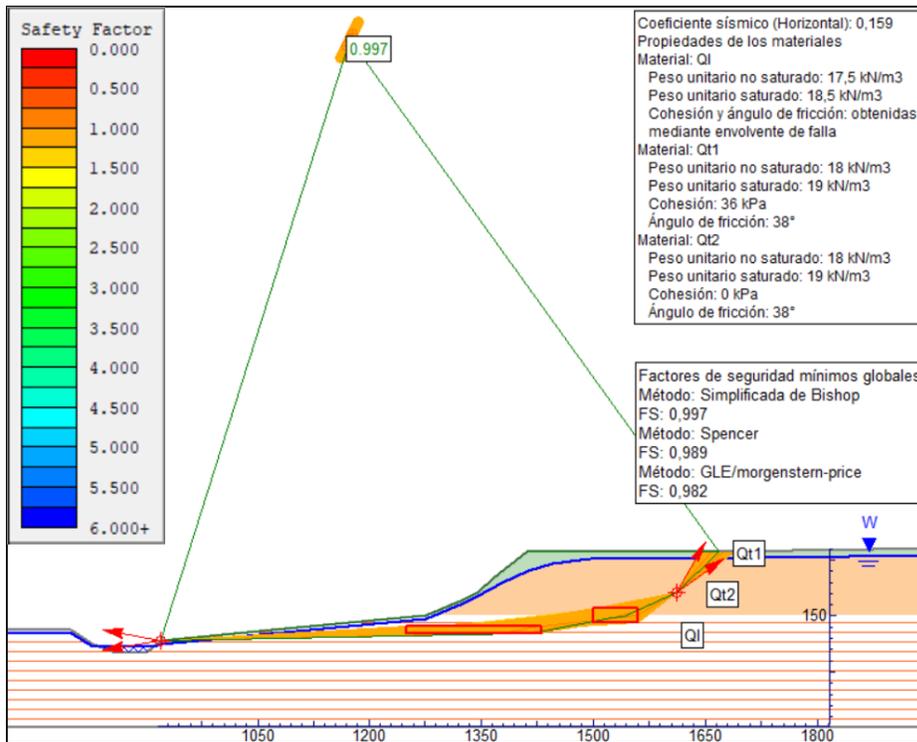


Usando datos obtenidos mediante ensayo de corte directo en Q1

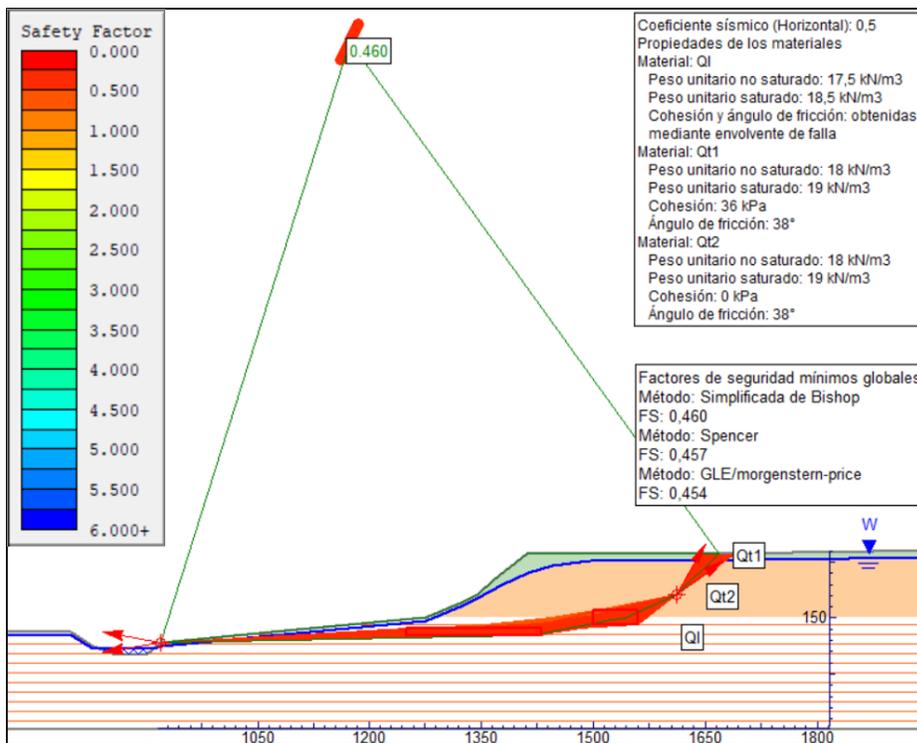
Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,159 y vertical de 0

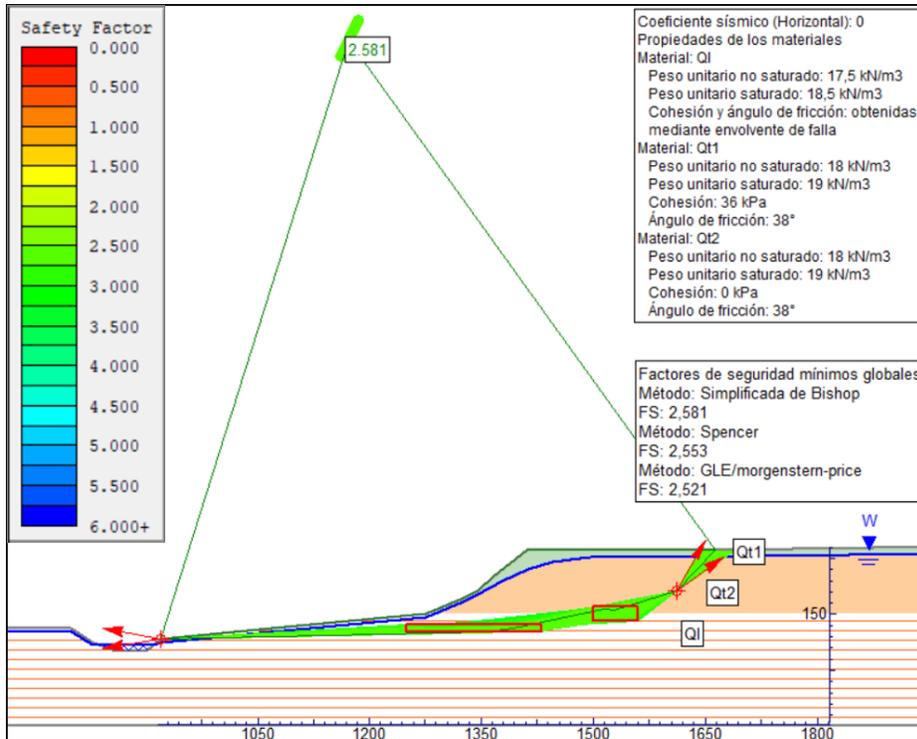


Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0

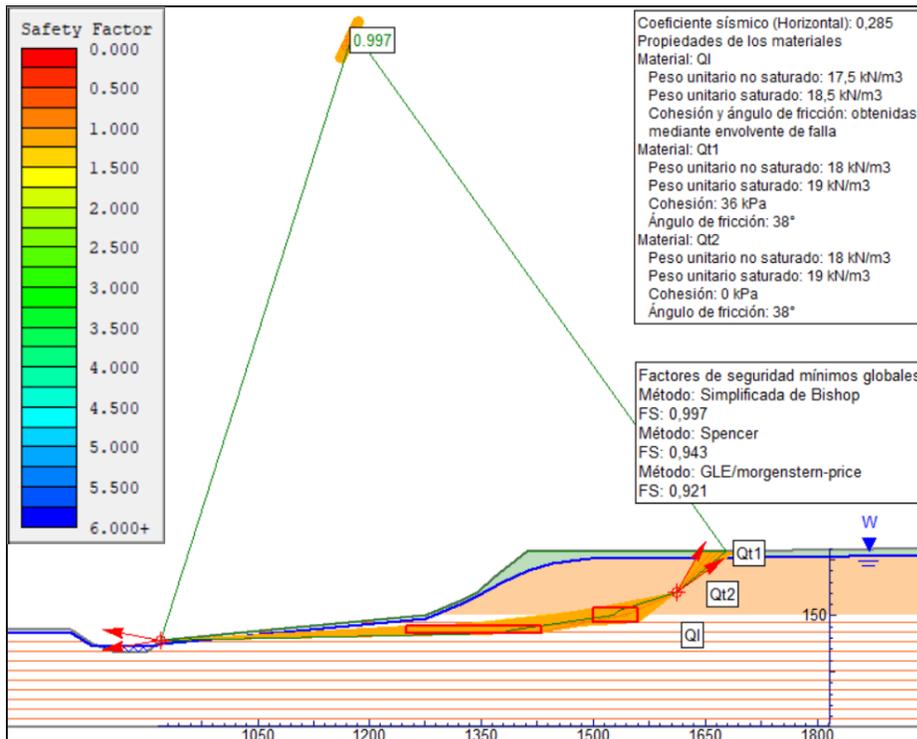


Usando datos obtenidos mediante ensayo triaxial consolidado-no drenado en QI

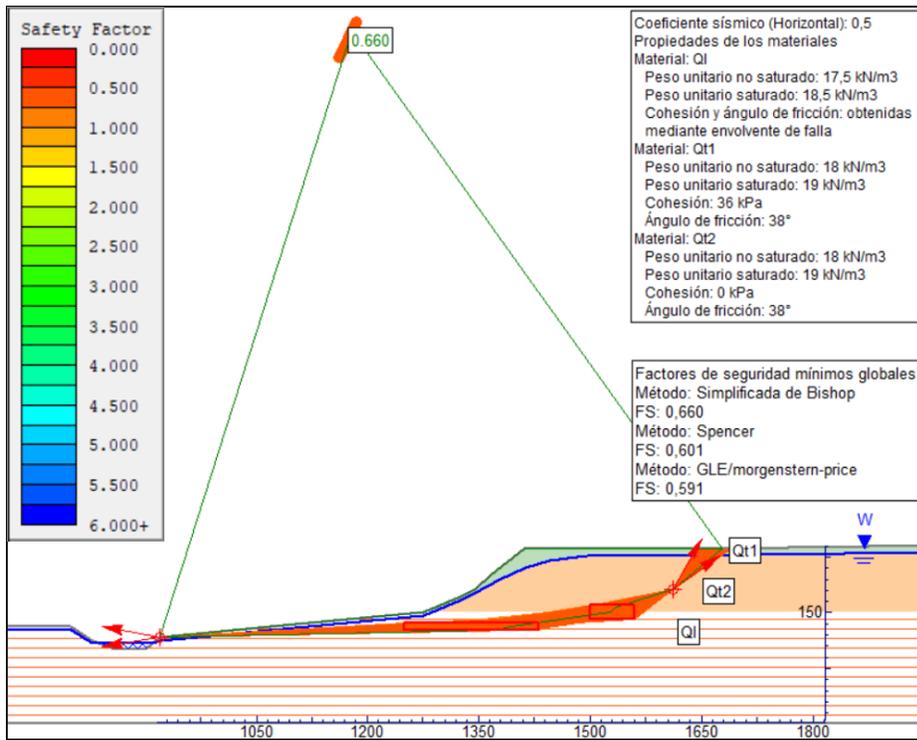
Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,285 y vertical de 0

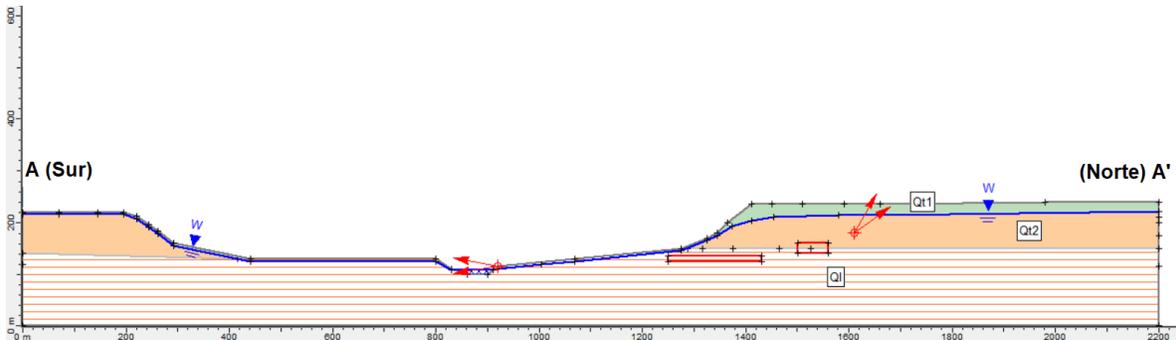


Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0



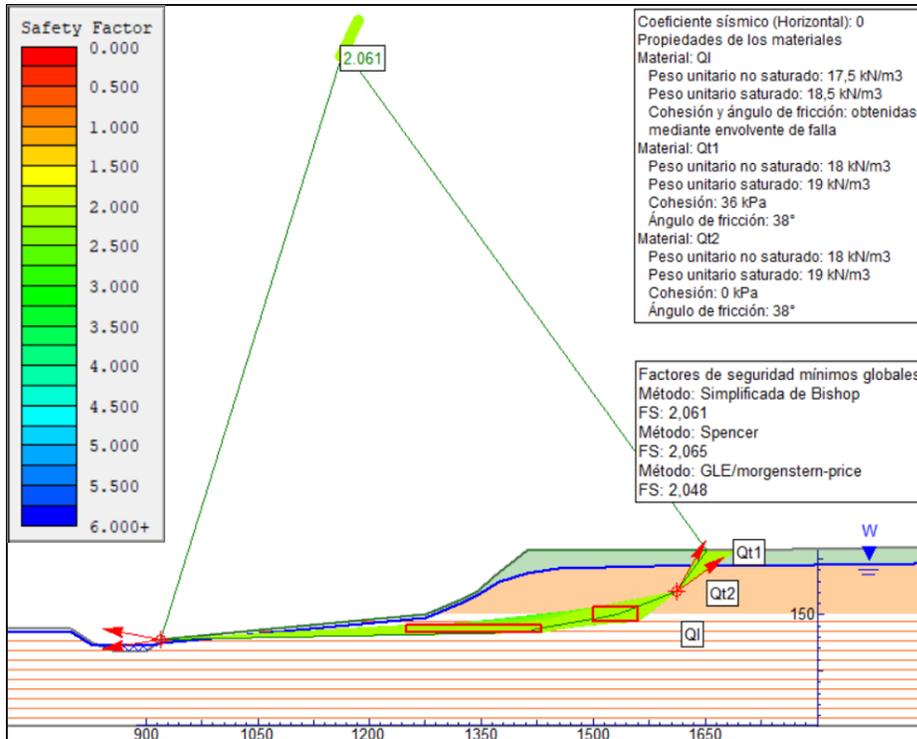
Nivel freático satura $\frac{3}{4}$ del espesor de Qt

Perfil representativo

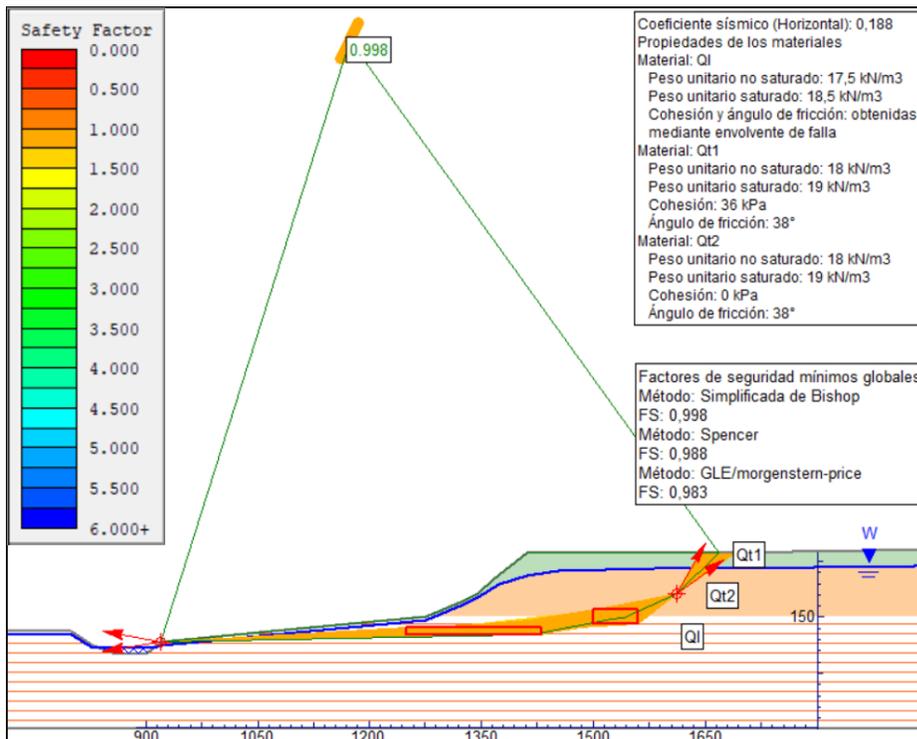


Usando datos obtenidos mediante ensayo de corte directo en QI

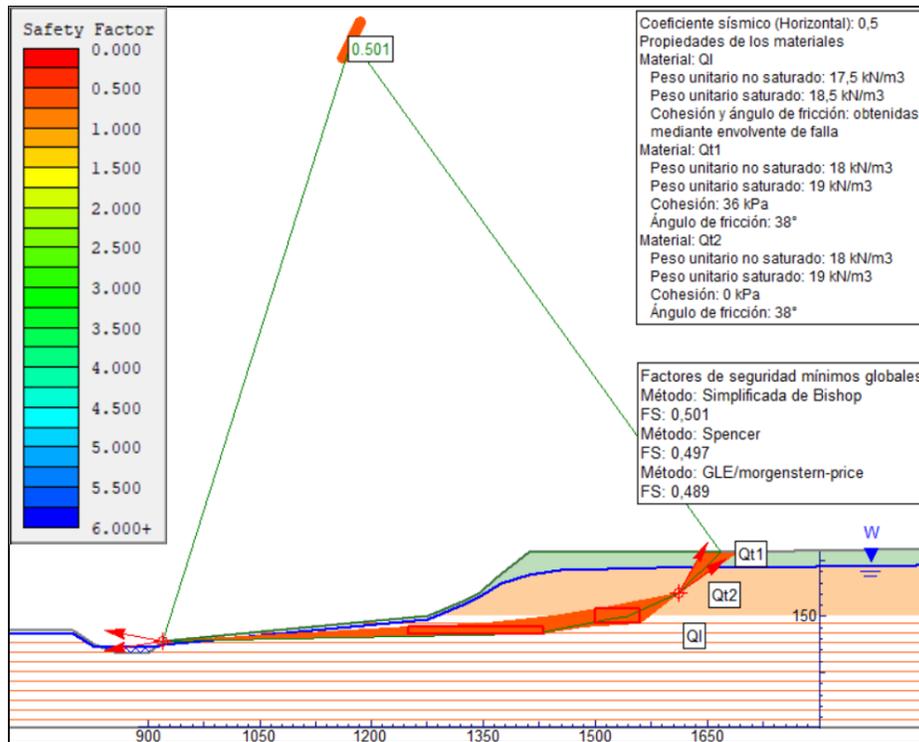
Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,188 y vertical de 0

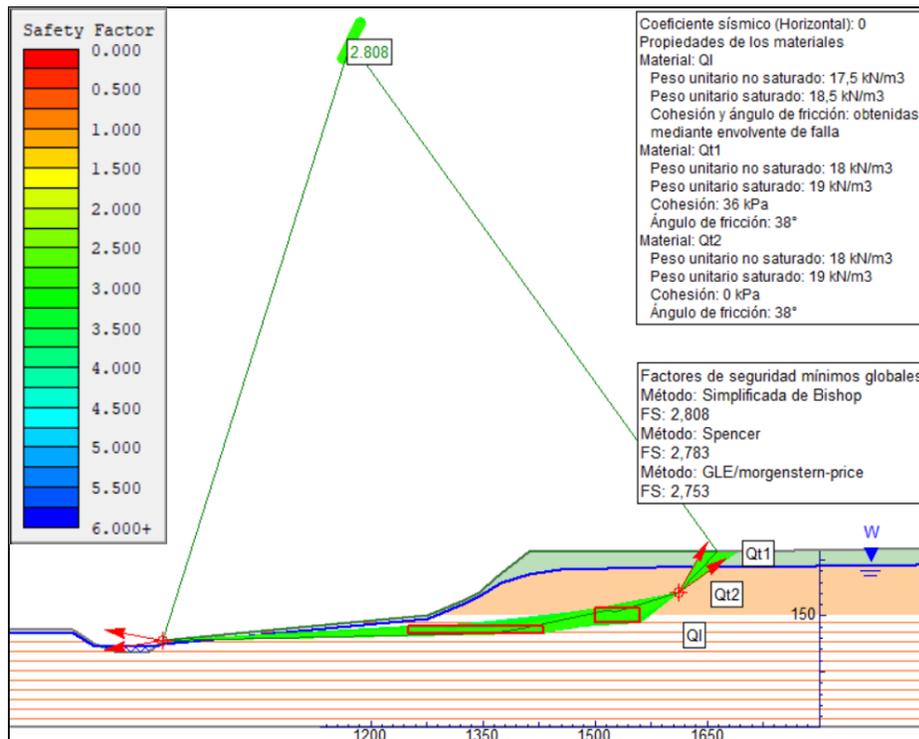


Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0

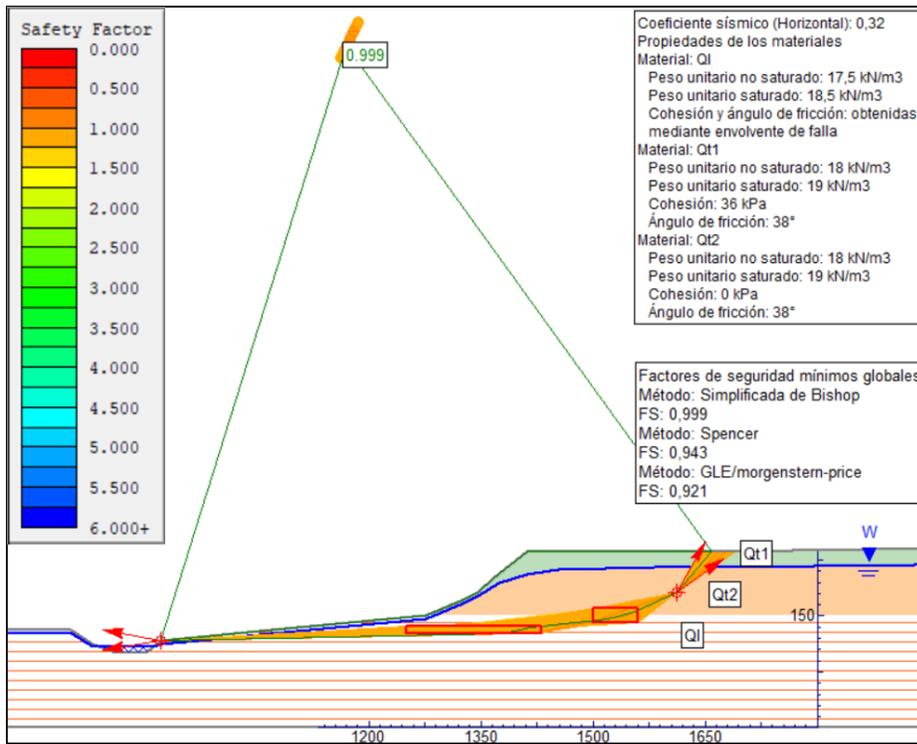


Usando datos obtenidos mediante ensayo triaxial consolidado-no drenado en Ql

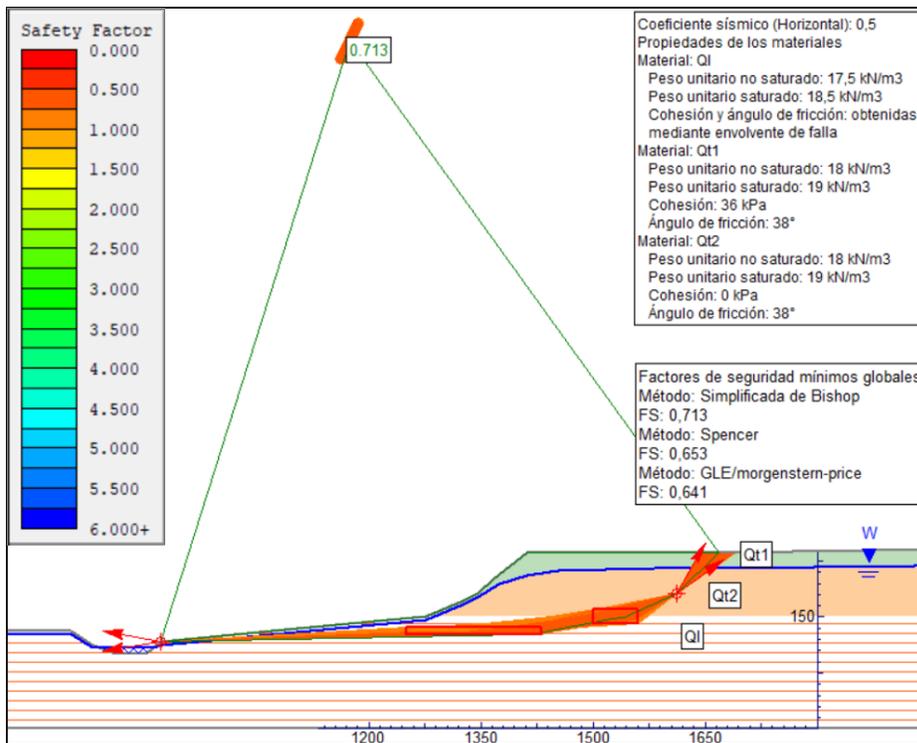
Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,32 y vertical de 0

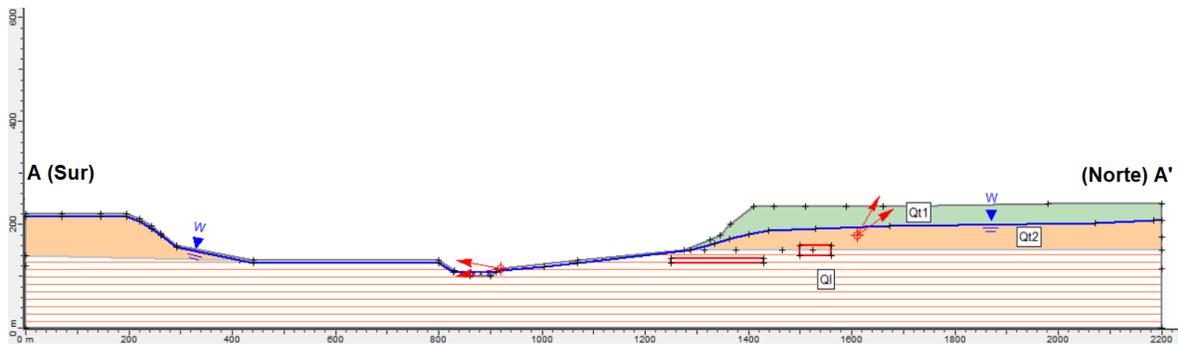


Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0



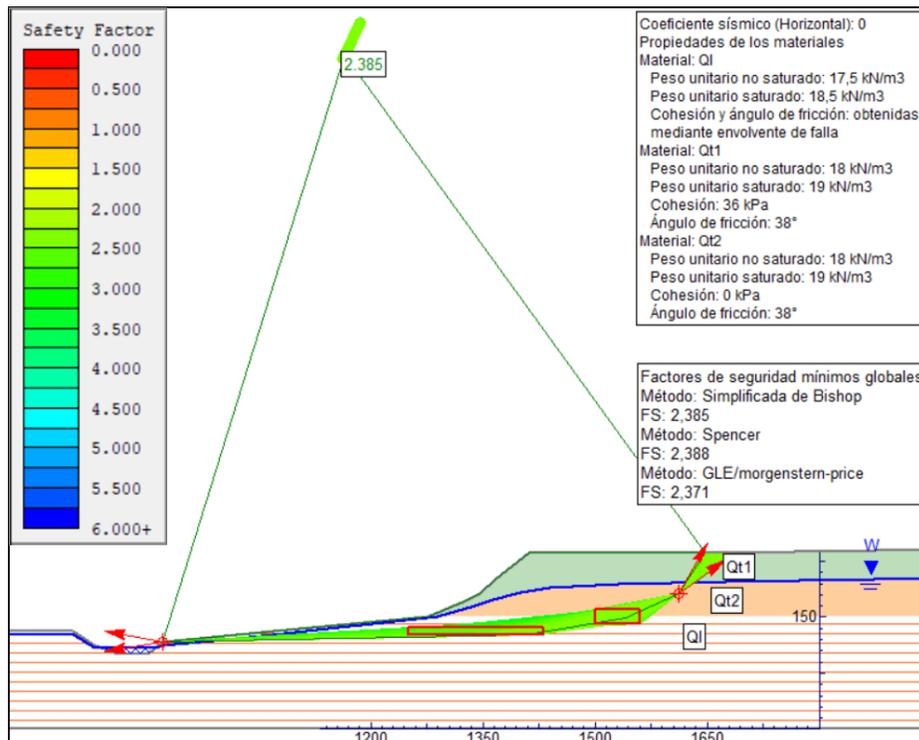
Nivel freático satura $\frac{1}{2}$ del espesor de Qt

Perfil representativo

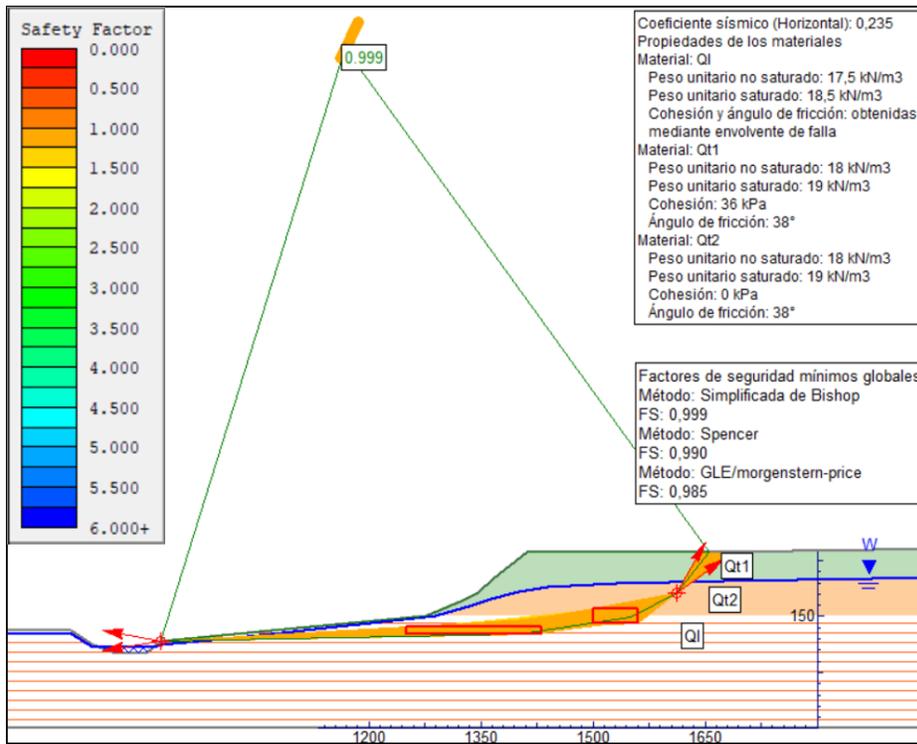


Usando datos obtenidos mediante ensayo de corte directo en Ql

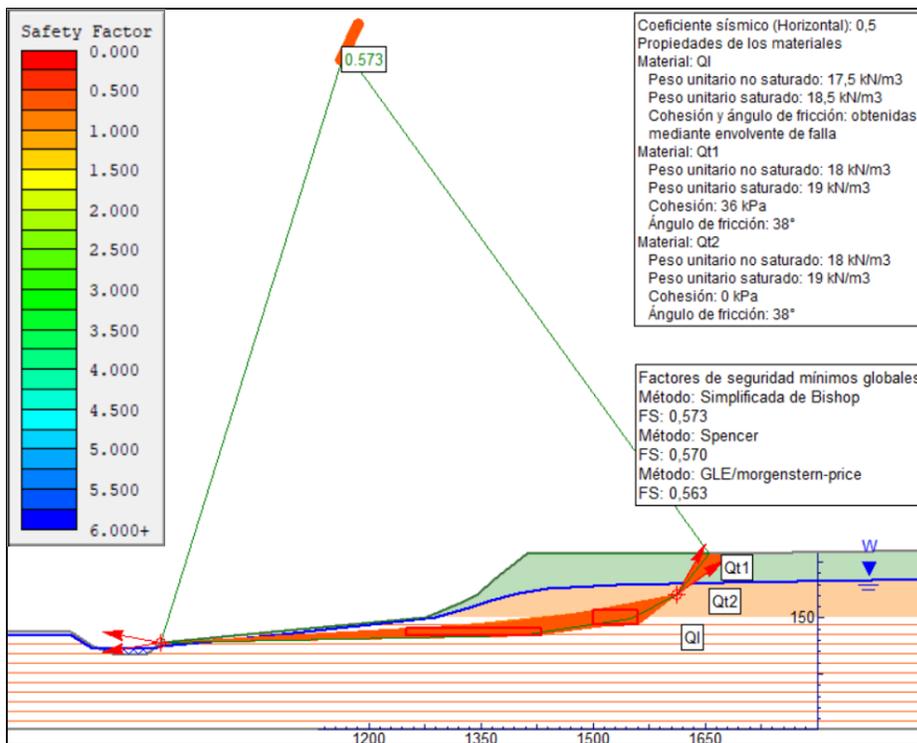
Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,235 y vertical de 0

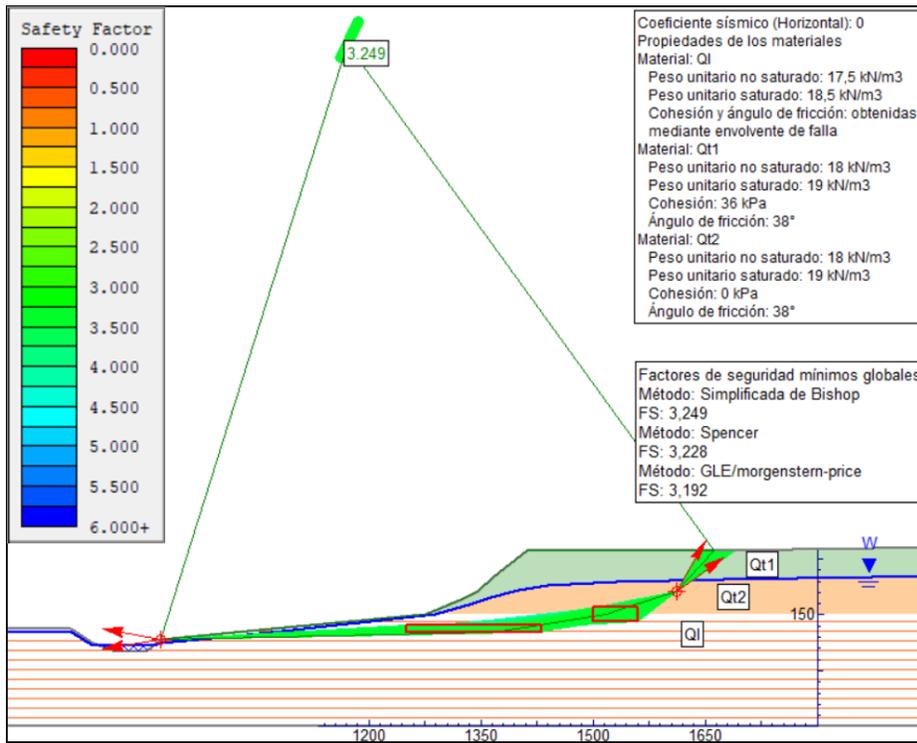


Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0

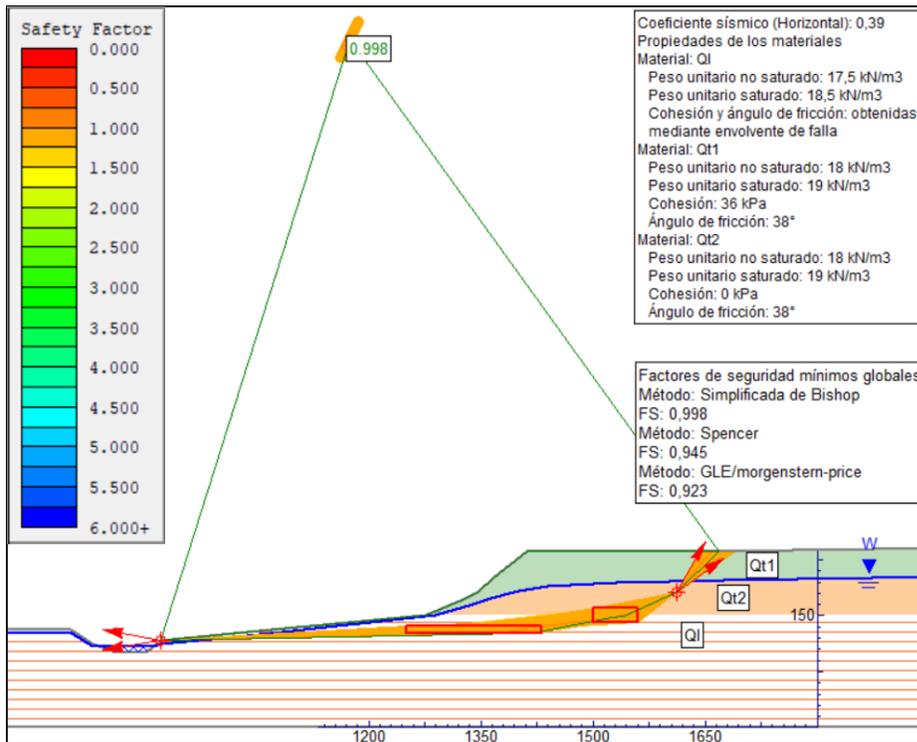


Usando datos obtenidos mediante ensayo triaxial consolidado-no drenado en Ql

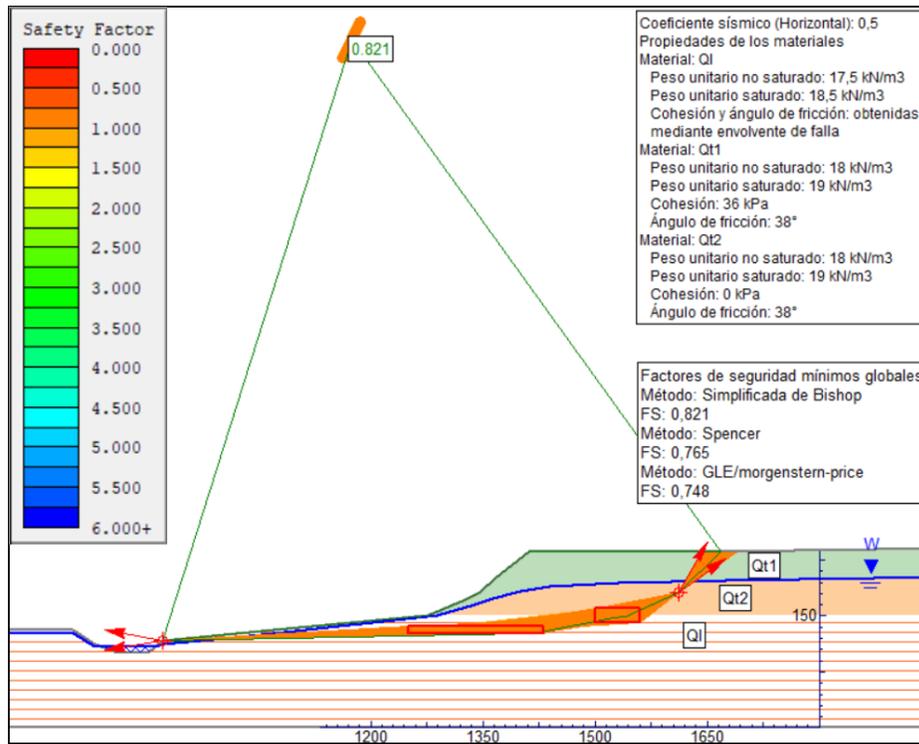
Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,39 y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0

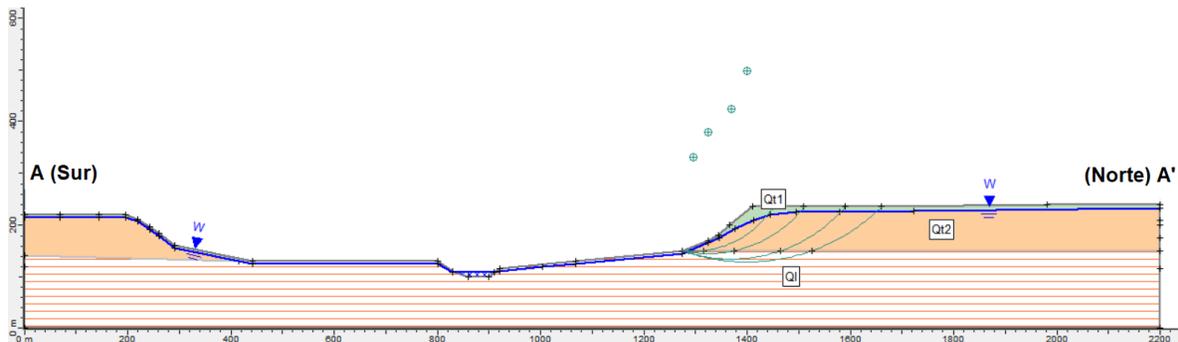


Deslizamientos circulares fijados

Casos de análisis realizados y superficies de falla posibles

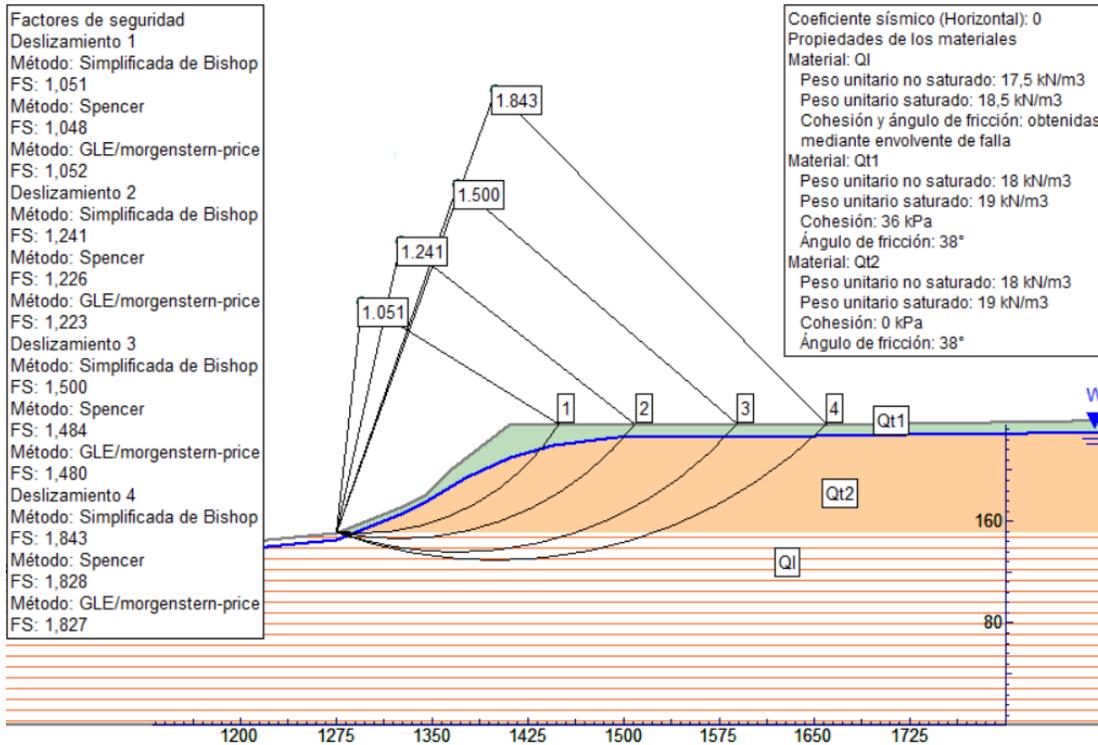
Nivel freático se ubica a 10 m de profundidad

Perfil representativo

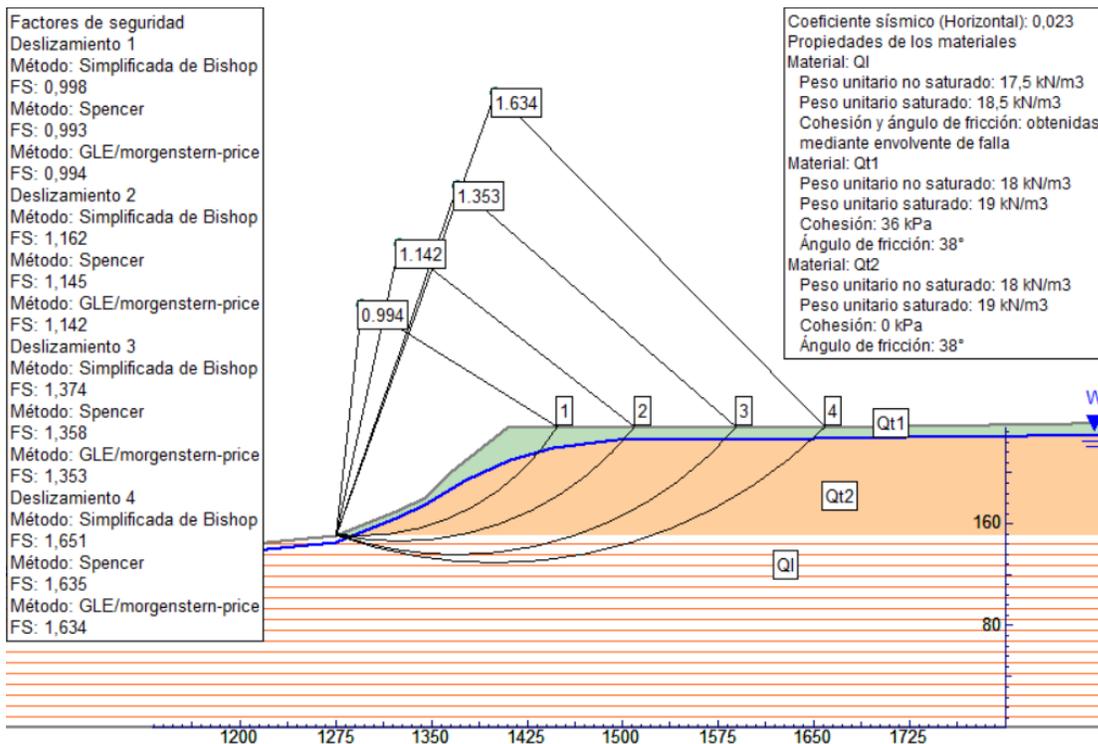


Usando datos obtenidos mediante ensayo de corte directo en QI

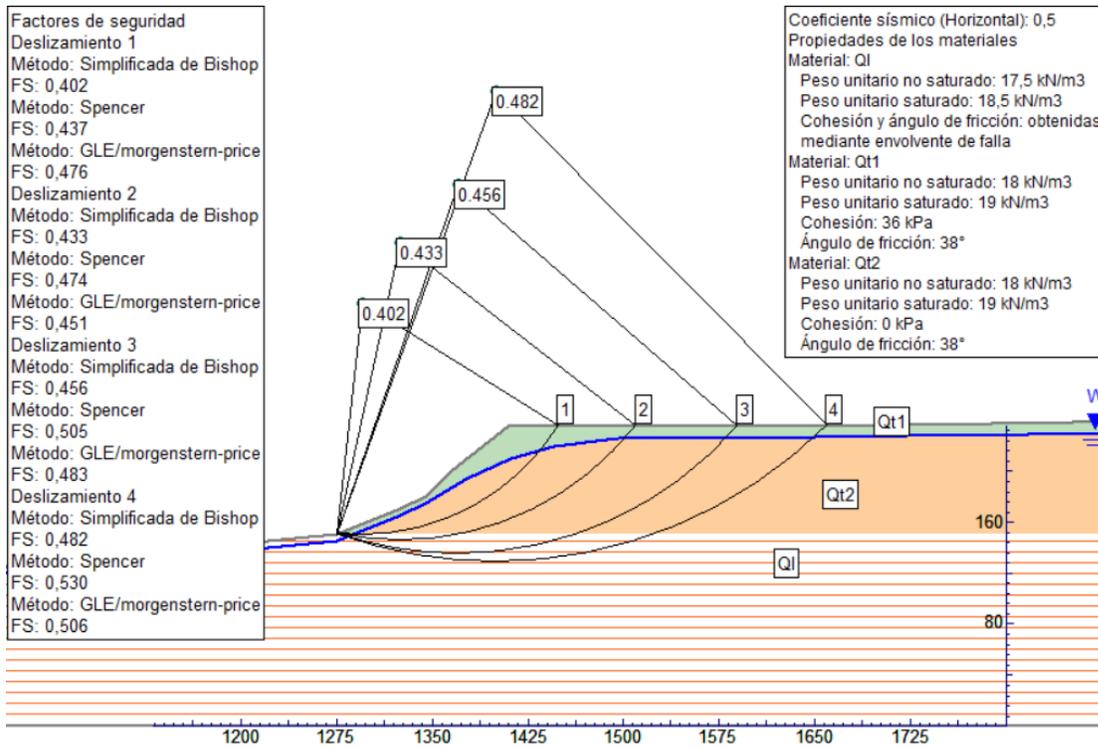
Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,023 y vertical de 0

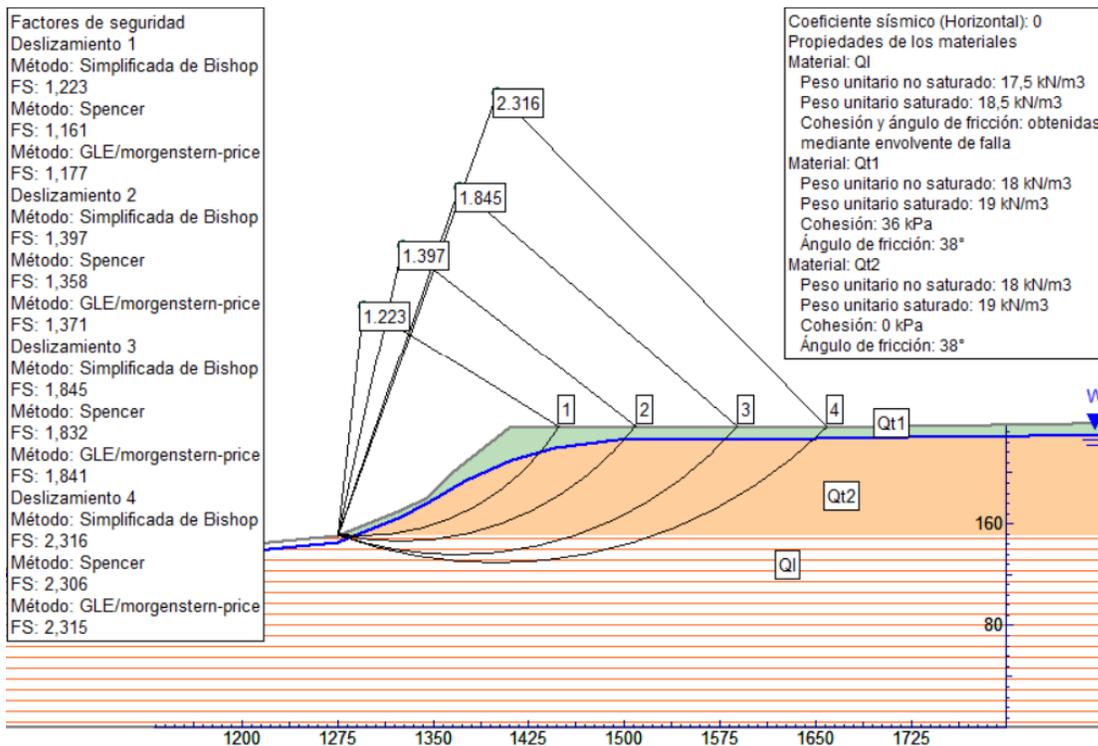


Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0

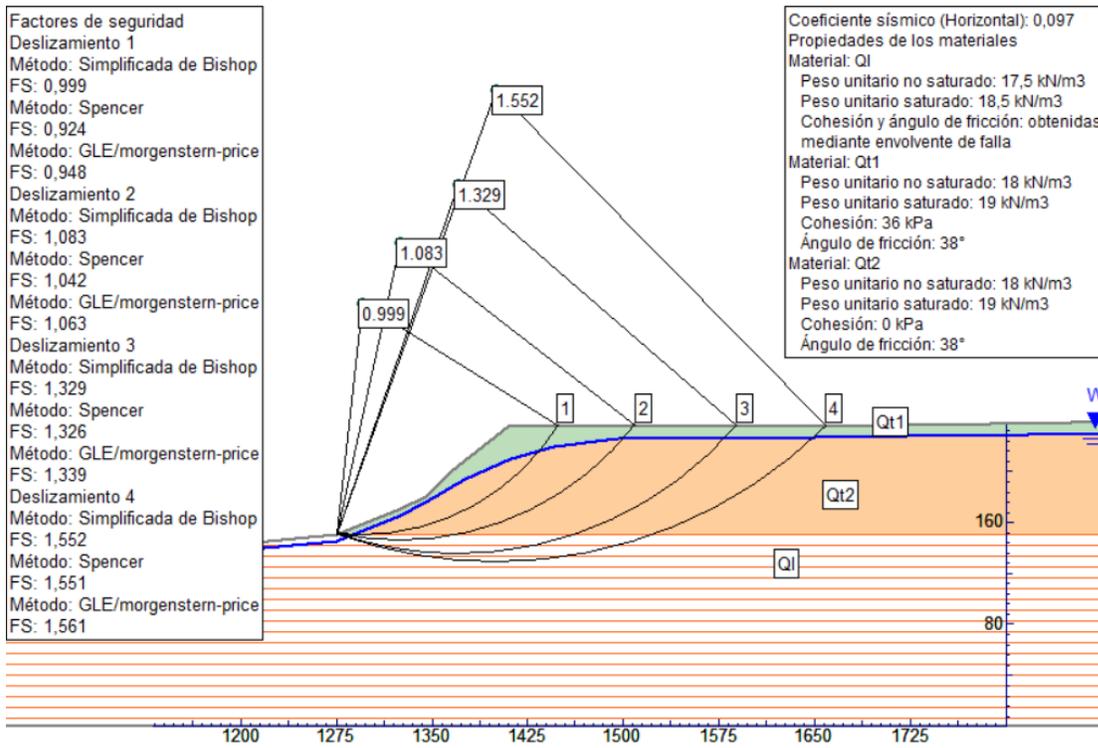


Usando datos obtenidos mediante ensayo triaxial consolidado-no drenado en Qi

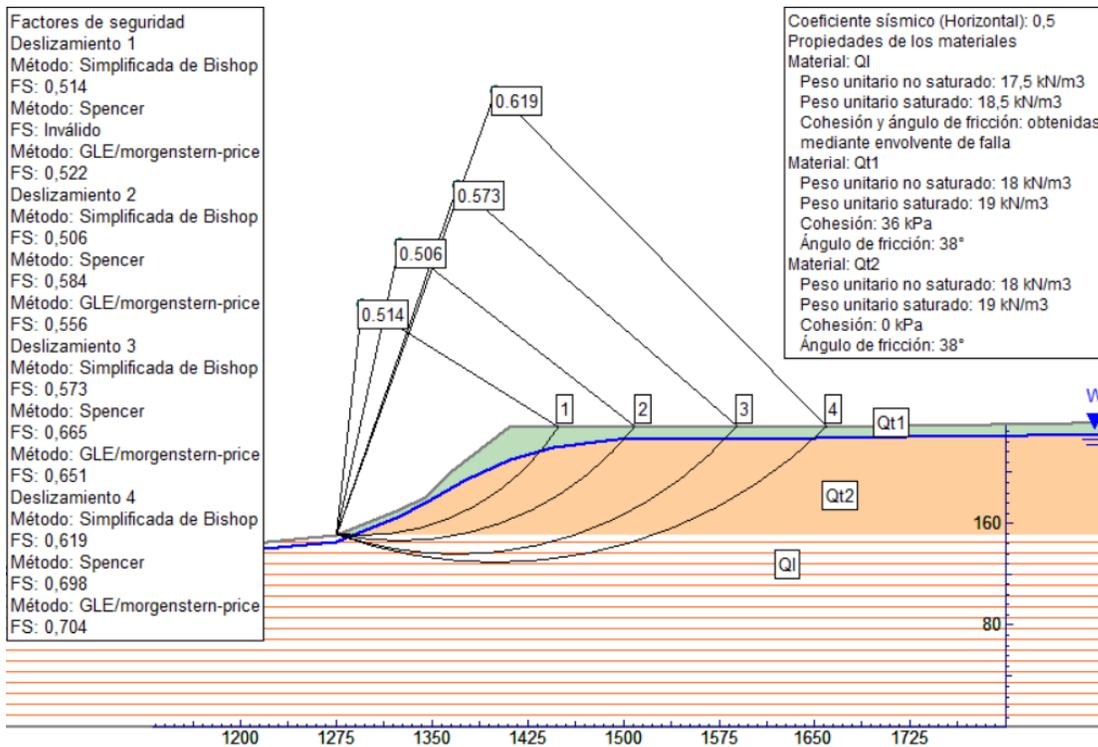
Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,097 y vertical de 0

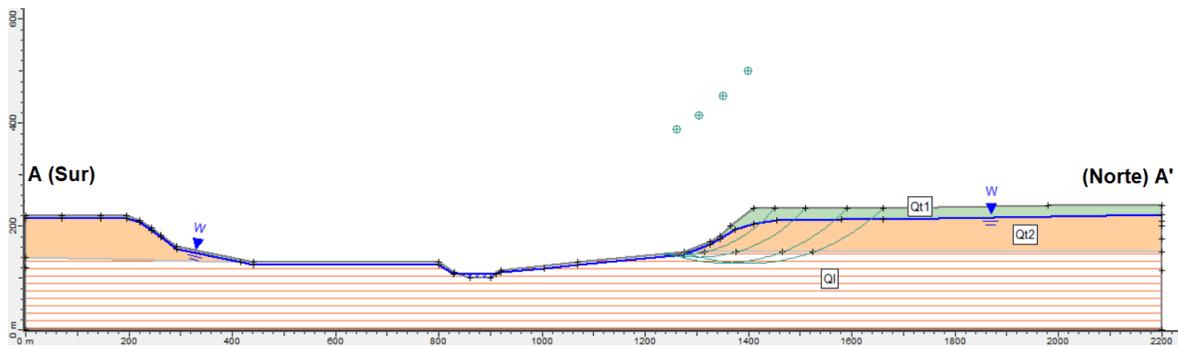


Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0



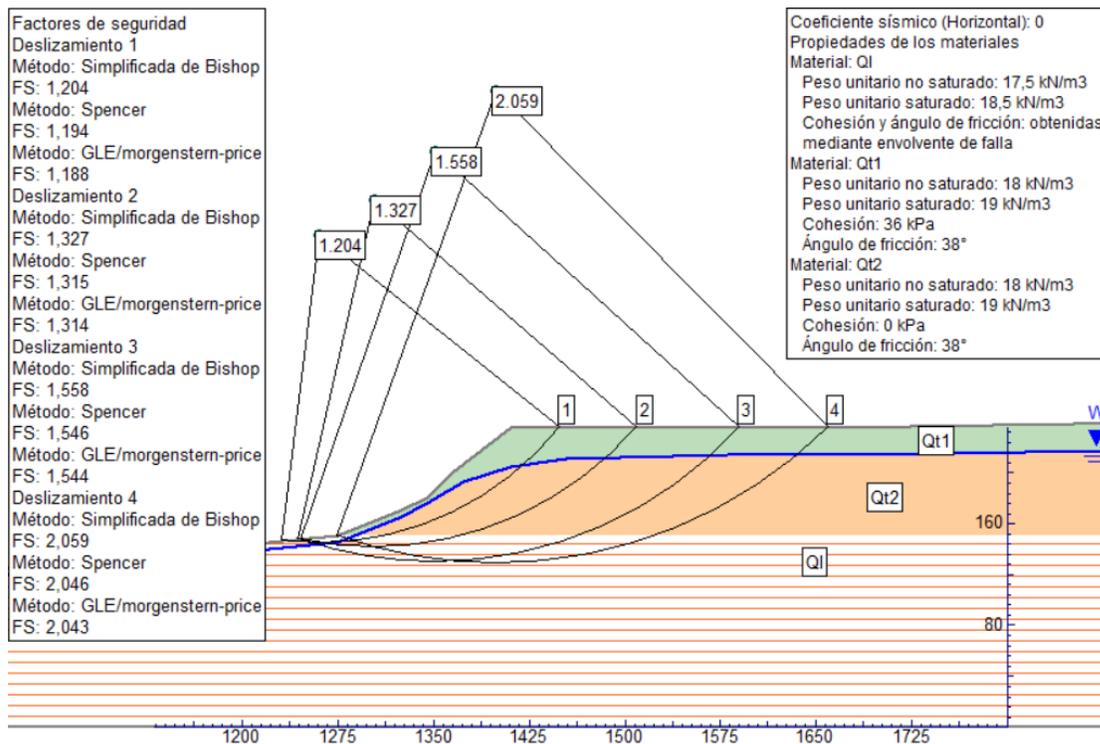
Nivel freático satura $\frac{3}{4}$ del espesor de Qt

Perfil representativo

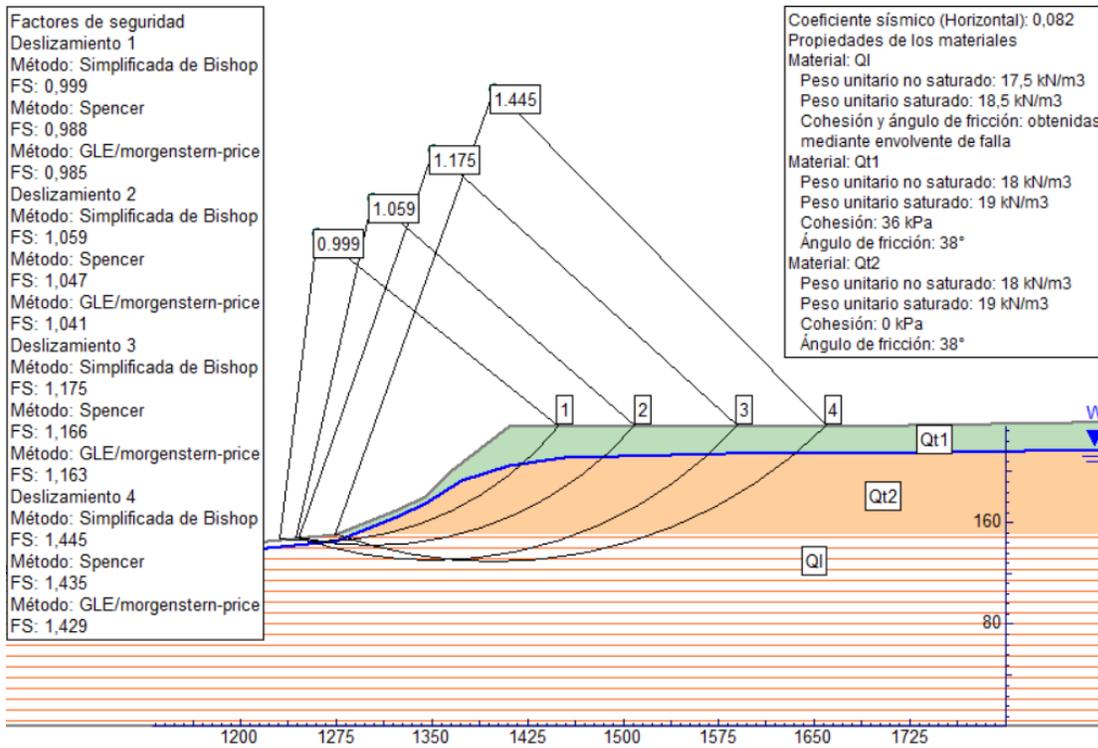


Usando datos obtenidos mediante ensayo de corte directo en Ql

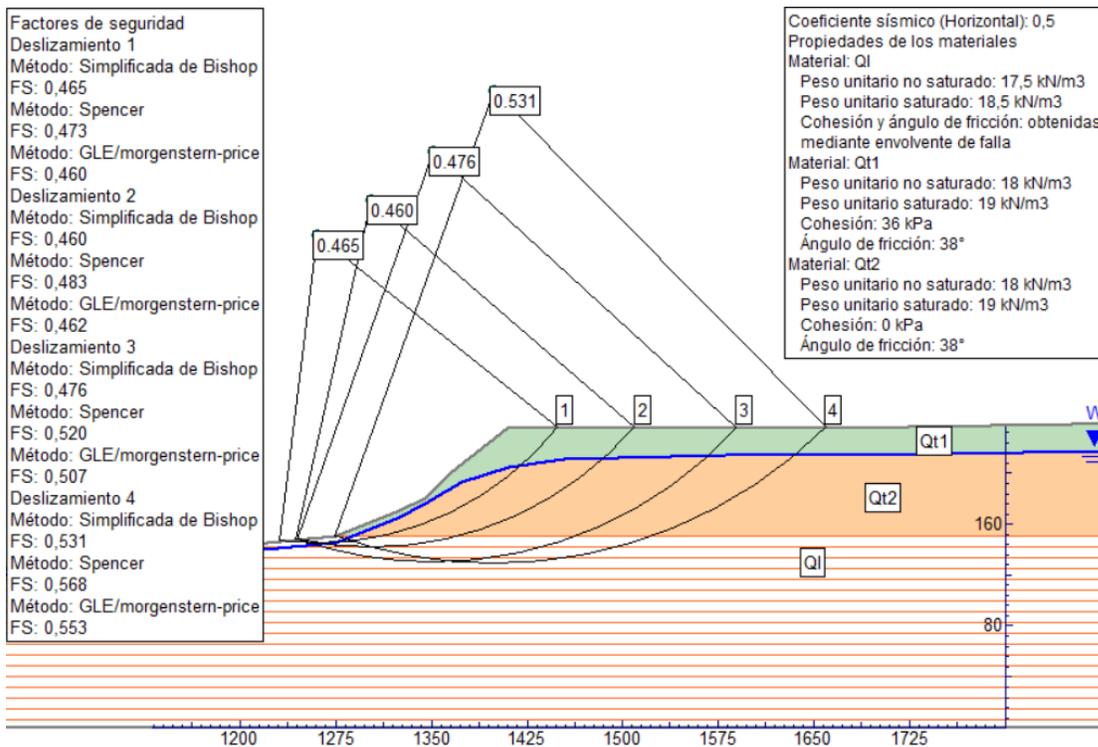
Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,082 y vertical de 0

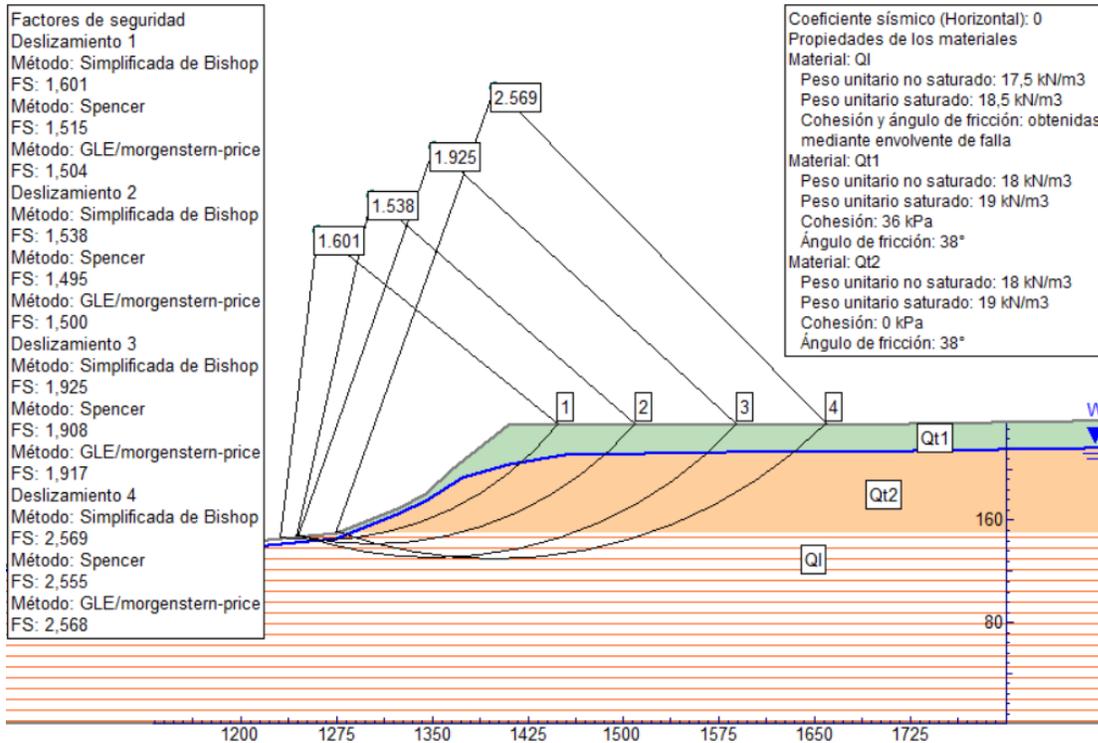


Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0

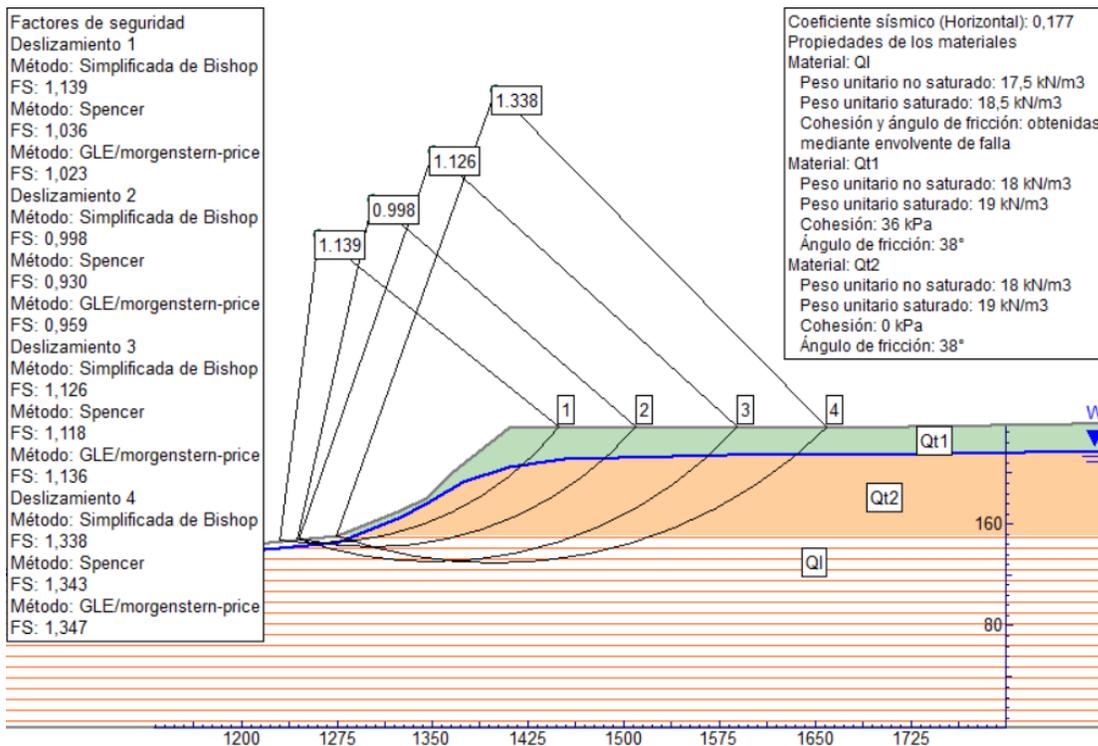


Usando datos obtenidos mediante ensayo triaxial consolidado-no drenado en QI

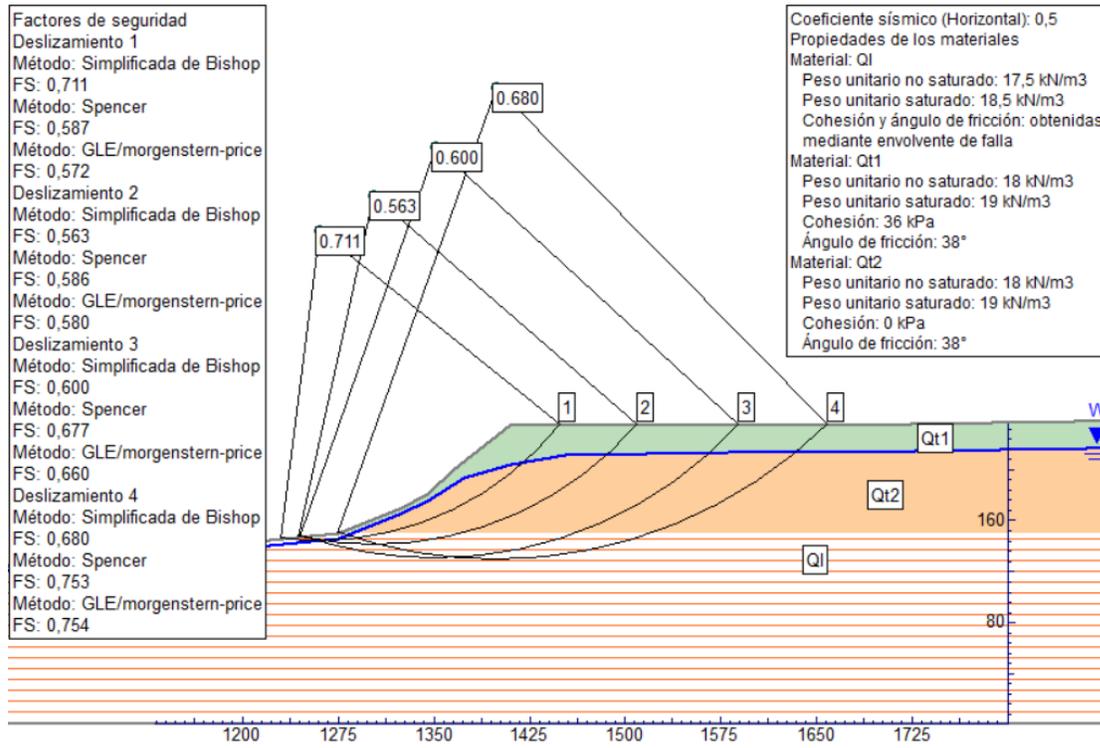
Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,177 y vertical de 0

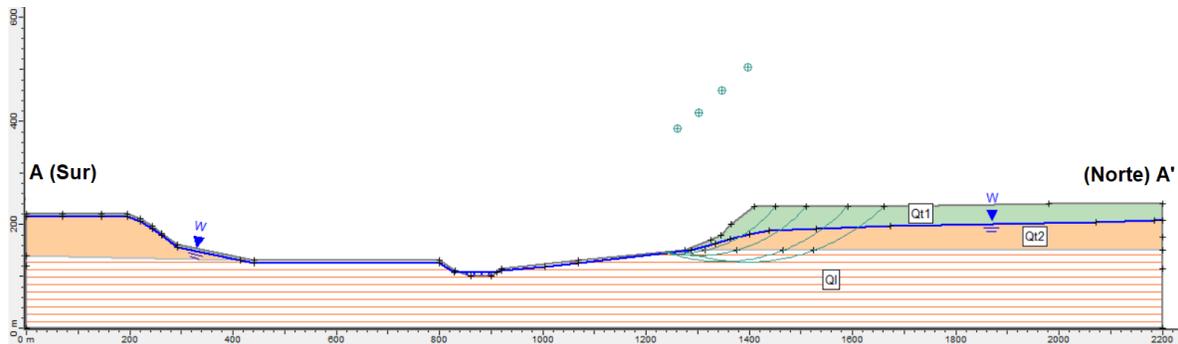


Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0



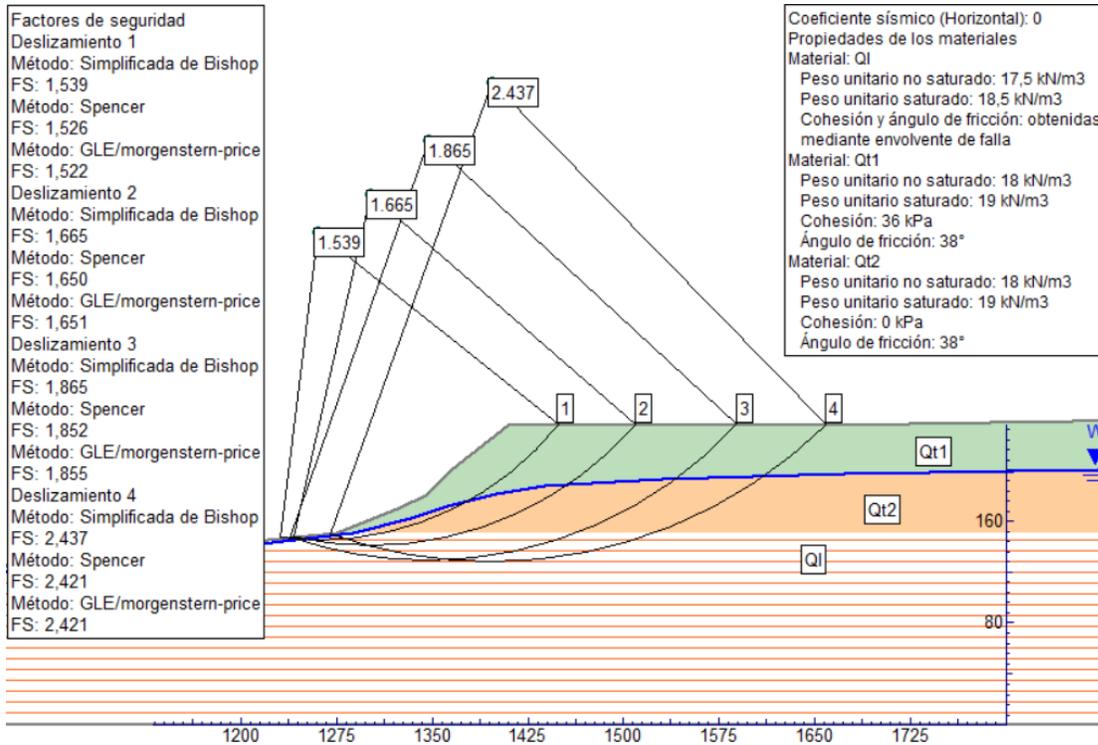
Nivel freático satura ½ del espesor de Qt

Perfil representativo

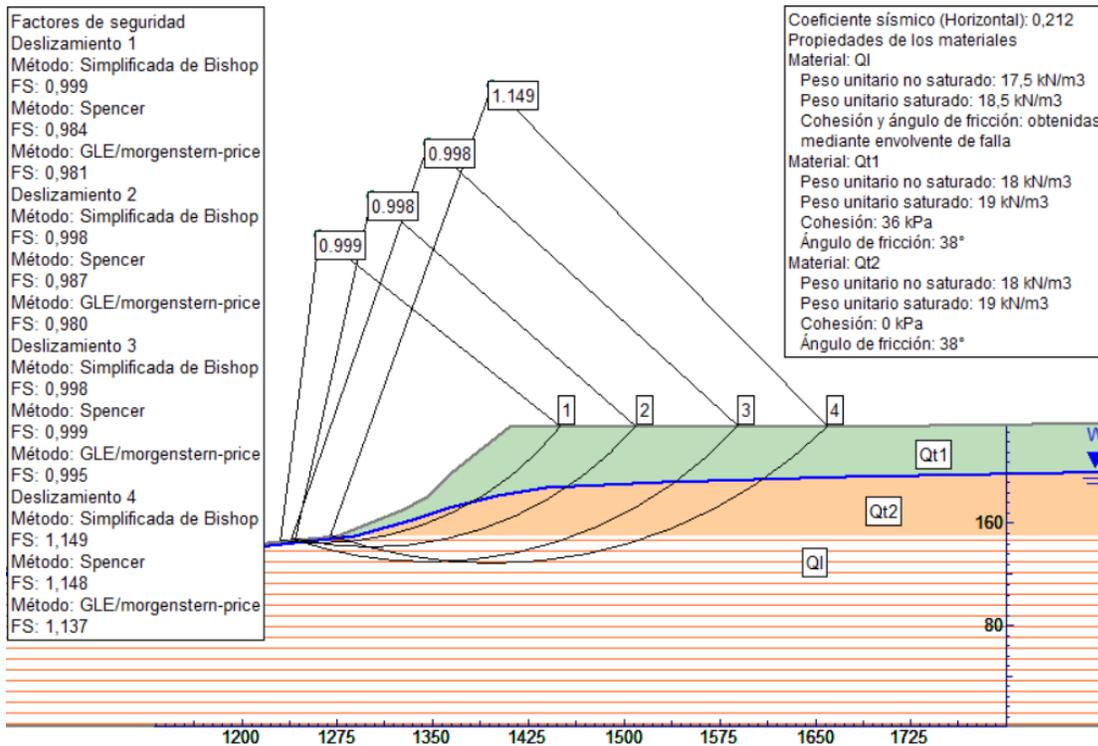


Usando datos obtenidos mediante ensayo de corte directo en QI

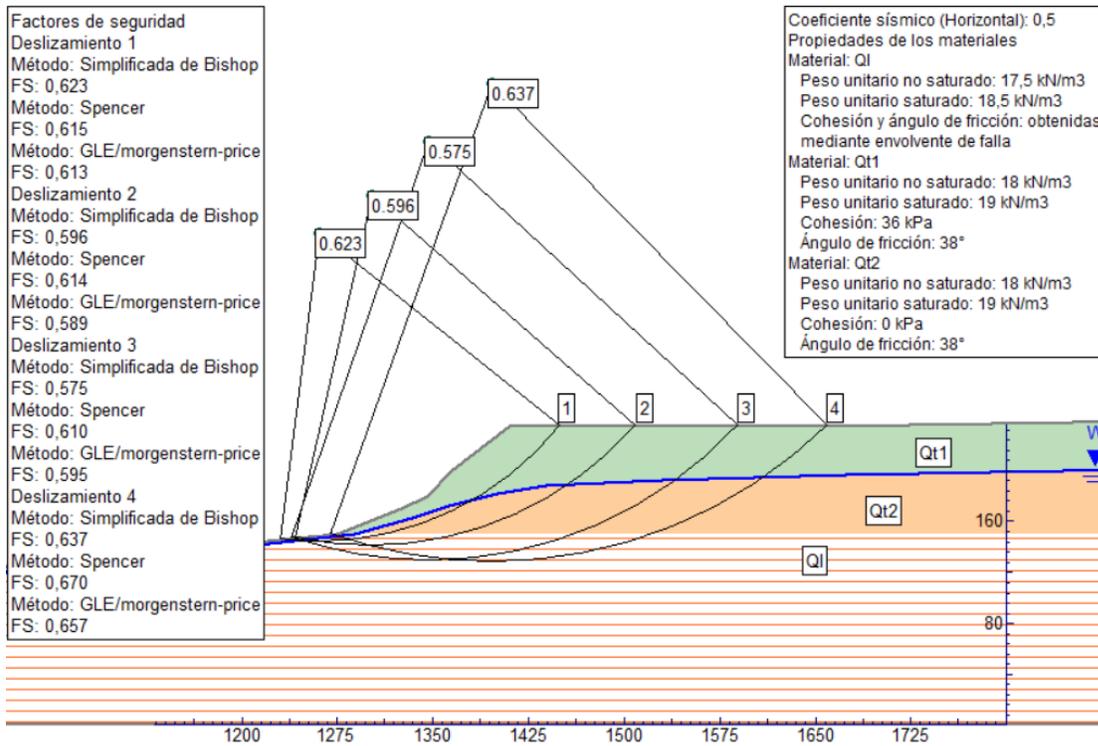
Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,212 y vertical de 0

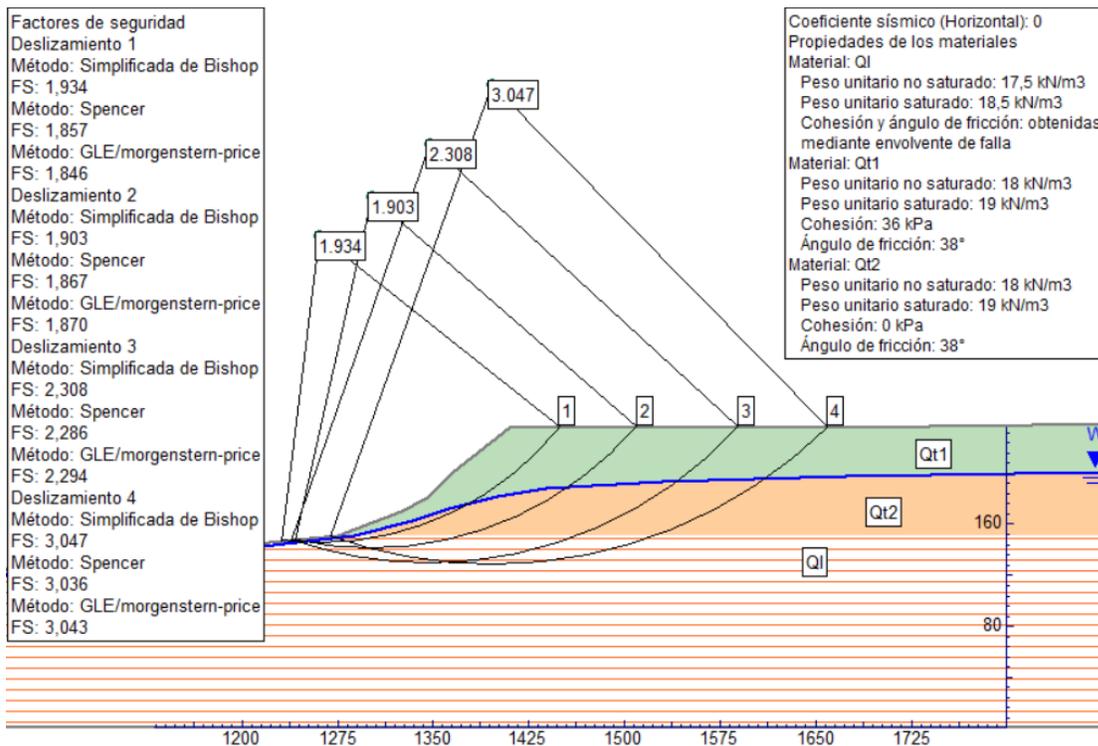


Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0

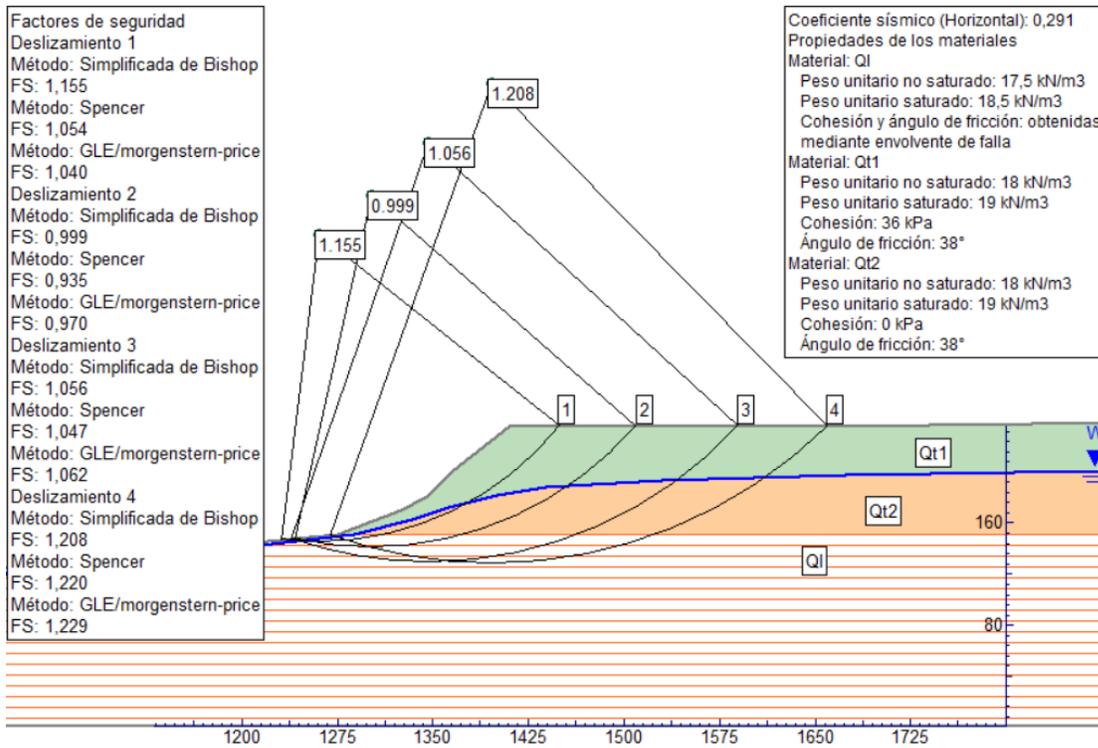


Usando datos obtenidos mediante ensayo triaxial consolidado-no drenado en Qi

Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,291 y vertical de 0



Análisis realizado aplicando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5 y vertical de 0

