



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DE SONDAJE
PROFUNDO EN LA FALLA SAN RAMÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

SEBASTIÁN EDUARDO MENARES LIRA

PROFESOR GUÍA:

SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

GABRIEL VARGAS EASTON

GREGORY PAUL DE PASCALE

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Sebastián Eduardo Menares Lira
FECHA: 20/03/2018
PROFESOR GUÍA: Sofía Rebolledo Lemus

CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DE SONDAJE PROFUNDO EN LA FALLA SAN RAMÓN

El presente trabajo se focaliza al oriente del Centro de Estudios Nucleares de La Reina (CEN), ubicado a los pies del Cerro Los Rulos y al norte de la quebrada de Ramón, donde se reconoce el contacto entre dos unidades morfoestructurales características de Chile Central. Al este, la Cordillera Principal y al oeste, la Depresión Intermedia

Este estudio tiene como objetivo identificar, describir y caracterizar las unidades geológicas presentes en el escarpe de la Falla San Ramón mediante dos sondajes profundos, un sondaje de diamantina (S-1) con recuperación de testigo que se ubicó sobre el escarpe alcanzando una profundidad de 199 metros y un segundo sondaje de aire reverso (S-2) ubicado en dependencias del CEN que alcanzó una profundidad de 100 metros.

Para la descripción y caracterización litológica detallada de los testigos del sondaje S-1, se realizaron cortes transparentes para su estudio microscópico. Además, difracción de rayos x y FTIR para conocer mejor la mineralogía presente en las estructuras. Con el fin de caracterizar geotécnicamente el sondaje S-1 se estimó RQD y frecuencia de fractura (ff/m)

La estratigrafía del sondaje ubicado sobre el escarpe de falla muestra roca asociada a la Formación Abanico sobre sedimentos cuaternarios de la cuenca de Santiago, lo que indica la presencia de una falla geológica inversa que se asocia a la Falla San Ramón. El segundo sondaje solo mostró sedimentos cuaternarios asociados al relleno de la cuenca.

Con los resultados se confeccionaron columnas estratigráficas representativas de los sondajes, las cuales se complementaron con información de estudios anteriores, logrando generar un perfil geológico de la zona.

Del estudio se ha podido concluir que la Falla San Ramón tiene una zona de daño estimado de 25 metros de espesor, caracterizada por la presencia de una red de estructuras subsidiarias, entre las que se encuentran, planos de fallas subverticales con estrías de falla. El núcleo de falla, representado por la presencia de 4 zonas con brechas de falla tipo mosaico, de espesores estimados entre 7,5 y 65 cm, alcanza un total de 1,35 metros de espesor. Las brechas de falla presentan una disminución del tamaño de grano con respecto al protolito (tobas de lapilli, lavas e ignimbritas), además; de presentar minerales metamórficos de bajo grado (zeolitas) rellenando espacios vacíos. Esto último genera una disminución de la permeabilidad permitiendo que la Falla San Ramón actúe como barrera-conducto para el agua subterránea.

Considerando la ubicación del escarpe de falla en la zona de estudio, un perfil de resistividad cercano y la ubicación de la falla en el sondaje S-1 la Falla San Ramón muestra un manteo entre 54°-60°E.

*A mi familia,
Juan, Cecilia y Nataly
Para Bastián*

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a quienes hicieron posible este trabajo de título, comenzando con los profesores Sofía, Gabriel y Gregory. A Sofía porque confió en mí a lo largo de la carrera de Geología, ya sea en sus ramos, proyectos e incluso escogiéndome como memorista de este trabajo de título. A Gabriel porque además de ser mi profesor en ramos importantes, compartimos muchas de opiniones, y a Gregory porque su conocimiento fue fundamental para el área estructural de este trabajo. Esta memoria fue posible también gracias a los perforadores y trabajadores del IDIEM, a los encargados de laboratorios del departamento de geología, y a los profesores Castruccio y Aguirre que me ayudaron con varias dudas.

Agradezco a los funcionarios de Beaucheff; las secretarías de bienestar que mes a mes me daban un suculento cheque, a los funcionarios del departamento de geología con los cuales compartí más de un terreno, a los guardias de seguridad Priscilla y Juan que me dejaban ir más tarde para poder estudiar un ratito más, a la Kathy y al Pelao que siempre confiaron que les devolvería lo que me prestaban, y a Blanca, que a lo largo de la carrera me ayudó muchas veces a solucionar problemas y sus respuestas siempre fueron las mejores.

También agradezco a mi familia; mis padres Juan y Cecilia, mi hermana Nataly y mis abuelos Lala y Rubén. Gracias a ellos tuve las herramientas y habilidades necesarias para entrar a esta universidad y estudiar la carrera que me gusta, Geología. Mi mamá desde siempre ha estado ahí para corregirme, incluso más veces de las que he necesitado. Mi papá, un hombre que con el ejemplo proyecta responsabilidad y perseverancia, es quien desde que tengo memoria me ha inculcado el gusto por el fútbol y el campo. Mi hermana, a pesar de la distancia física que nos aleja, siempre ha estado ahí para escucharme, aconsejarme y apoyarme. Y mis abuelos, sin importar en cuántos problemas me meta, en todo momento han estado a mi lado, regalomeándome.

Agradezco a mi hijo Bastián, quien hace un poco más de 2 años llego a mi vida, llenándola de alegrías y buenos momentos. Él ha sido mi prioridad en estos últimos años de universidad, su mundo ha sido ver al papá terminar los últimos ramos y trabajar para hacer realidad este trabajo de título, libro que usará para aprender a leer.

No puedo excluir de estos agradecimientos a mis amigos de siempre, Hinojosa, Jonnahan y Emanuel que, aunque no los veo tan seguido como quisiera, siempre están ahí.

Finalmente, agradezco a todas esas personas que hicieron mucho más llevadero mi paso por la U: Danton, Valo, Pelao Arias, Sergio “T” Gallardo, Ulisse, Guru, Sergiolo, Caneo, Lemuel, Jercko y Claudio, que son las peores juntas que pude encontrar, pero con quienes encajo perfecto. Las niñas apañadoras, que lamentablemente los años ya no les deja llegar hasta abajo, entre ellas, Claudita, Lara, Milo, Tort y Gise, mención especial a Chili que me prometió un pie de limón. Al mejor equipo de baby de Beaucheff Mapa-Geo y a todos los que pasaron alguna vez por el equipo más campeón de geo.

Tabla de contenido

1.	Antecedentes Generales.....	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Objetivos	2
1.2.1.	Objetivo general	2
1.2.2.	Objetivos específicos	2
1.3.	Ubicación y accesos.....	2
1.4.	Metodología	3
2.	Marco Tectónico y Marco Geológico.....	9
2.1.	Marco Tectónico	9
2.2.	Marco Geológico	11
3.	Geología y Geomorfología local	13
3.1.	Geología de sitio	14
4.	Sondajes.....	24
4.1.	Sondaje S-1	24
4.1.1.	Descripción Litológica	24
4.1.2.	Descripción geotécnica y de estructuras.....	51
4.1.3.	Ensayo Downhole.....	69
4.2.	Sondaje S-2	70
4.2.1.	Descripción Litológica	70
4.3.	Correlación con perfil de resistividad eléctrica (ERT)	73
5.	Discusiones.....	75
6.	Conclusiones.....	82
7.	Recomendaciones	84
8.	Bibliografía.....	85
9.	Anexos	90
9.1.	Sondaje S-1	90
9.2.	Resultados Rx y FTIR.....	97
9.3.	Sondaje S-2	98

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Tabla de descripción geotécnica.....	4
Tabla 1.2 Tabla de descripción de vetillas y fracturas.	4
Tabla 1.3 Grado de Meteorización ISRM (1981).....	5
Tabla 1.4 Criterios para la estimación de resistencia del material. Modificado de ISRM, 1981. ...	7
Tabla 1.5 Criterios para determinar el grado de alteración de las paredes (Villarroel et al., 2001).7	
Tabla 1.6 Caracterización del Índice de Resistencia Geológica (Hoek et al., 1998).....	8
Tabla 3.1 Descripción muestra T-P2-M1	16
Tabla 3.2 Descripción corte transparente muestra T-P3-M1	17
Tabla 3.3 Descripción corte transparente muestra T-P5-M1	19
Tabla 3.4 Descripción corte transparente muestra T-P6-M1	21
Tabla 4.1 Coordenadas Geográficas Sondaje S-1	24
Tabla 4.2 Descripción corte transparente muestra C37-02.....	26
Tabla 4.3 Descripción muestra C09-01. Dacita.....	30
Tabla 4.4 Descripción muestra C9-02. Andesita.....	32
Tabla 4.5 Descripción muestra C12-01. Toba de lapilli.....	34
Tabla 4.6 Descripción muestra C14-01. Toba de lapilli verdosa.	35
Tabla 4.7 Descripción muestra C22-01. Toba de lapilli con alteración de sílice.....	36
Tabla 4.8 Descripción muestra C23-01. Dacita.....	37
Tabla 4.9 Descripción Muestra C30-01 Horizontal. Andesita.	39
Tabla 4.10 Descripción Muestra C33-01. Ignimbrita.....	41
Tabla 4.11 Descripción muestra C33-02. Ignimbrita.	42
Tabla 4.12 Descripción muestra C34-01. Brecha de falla.....	44
Tabla 4.13 Descripción muestra C37-01. Brecha de falla.....	46
Tabla 4.14 A) Resumen muestras Secuencia volcánica entre subunidades A y G. B) Resumen muestras de brecha de falla extraídas de la subunidad H.	47
Tabla 4.15 Corte transparente muestra C8-01. Gravas.....	49
Tabla 4.16 Tabla resumen resultados difracción de rayos x y FTIR.....	67
Tabla 4.17 Resultados ensayo downhole.....	69
Tabla 4.18 Coordenadas geográficas Sondajes S-2.....	70
Tabla 9.1 A) Resultados difracción de rayos x. B) Resultados FTIR.	97

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.1. Ubicación sitio de estudio, imagen modificada de Vargas et al., 2014.....	2
Ilustración 1.2 Ubicación de sondajes en el área de estudio.	3
Ilustración 1.3 Diagrama de flujo.....	4
Ilustración 1.4 Grado de Meteorización en tramos sedimentarios de sondaje de diamantina.....	5
Ilustración 1.5 Perfiles de rugosidad y el valor atribuido al coeficiente de rugosidad JRC (Barton & Chouley, 1977).	6
Ilustración 2.1 Segmentación del margen de subducción, volcanismo y posición de la fosa.	9
Ilustración 2.2 Principales morfoestructuras de la segmentación andina en Chile entre los 32° y 35° S. La estrella roja indica zona de estudio (Modificada de Fock, 2005). Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yañez (2003).....	10
Ilustración 3.1 Perfil del cerro Los Rulos, modificado de Rauld (2002).....	14
Ilustración 3.2 Ubicación puntos levantados en terreno.....	14
Ilustración 3.3 Pared ubicada al oriente del camino.....	15
Ilustración 3.4 pared vertical que presenta zona con vetillas de calcita de rumbo N85°E y manteo 2°NW	15
Ilustración 3.5 Afloramiento en la pared sur de la quebrada de Ramón	18
Ilustración 3.6 Afloramiento de Rocas sedimentarias parada 6	20
Ilustración 3.7 Clastos ígneos intrusivos y extrusivos quebrada de Ramón.....	22
Ilustración 3.8 Mapa final zona de estudio.....	23
Ilustración 4.1 Muestra unidad Gravas Inferiores del sondaje S-1, extraída a una profundidad de 182,1 metros	25
Ilustración 4.2 Columna estratigráfica de la Unidad 2. Se ubican muestras para cortes transparentes.	28
Ilustración 4.3 Muestra C9-01. Dacita. Corte transparente en la Tabla 4.3.	29
Ilustración 4.4 Muestra C9-02. Andesita. Corte transparente en Tabla 4.4.	31
Ilustración 4.5 Muestra C12-01. Toba de lapilli. Corte transparente en la Tabla 4.5.	33
Ilustración 4.6 Muestra C30-01. Andesita. Corte transparente en la Tabla 4.9.....	38
Ilustración 4.7 Corte transparente vertical muestra C30-01. Nicoles paralelos y nicoles cruzados.	38
Ilustración 4.8 Muestra C33-01. Ignimbrita. Corte transparente en la Tabla 4.10.....	40
Ilustración 4.9 Muestra C37-01. Brecha de falla. Corte transparente en la Tabla 4.13.....	45

Ilustración 4.10 Muestra C8-01. Gravas. Corte transparente en la Tabla 4.15.	48
Ilustración 4.11 Columna estratigráfica sondaje S-1.....	50
Ilustración 4.12 Muestra de brecha de falla de la subunidad H.....	55
Ilustración 4.13 Plano de falla encontrado en la subunidad H, con líneas rojas se sigue la dirección de las estrías de falla (70°).....	55
Ilustración 4.14 Columna unidad 2. Con ubicación muestras FTIR y Rx.....	56
Ilustración 4.15 Resultados Rx y FTIR vetilla C12-02	57
Ilustración 4.16 Resultados Rx y FTIR vetilla C12-03	58
Ilustración 4.17 Resultados Rx y FTIR vetilla C12-04	59
Ilustración 4.18 Resultados Rx y FTIR vetilla C13-01	60
Ilustración 4.19 Resultados Rx y FTIR vetilla C19-01	61
Ilustración 4.20 Resultados Rx y FTIR vetilla C21-01	62
Ilustración 4.21 Resultados Rx y FTIR vetilla C28-01	63
Ilustración 4.22 Resultados Rx y FTIR vetilla 29-01	64
Ilustración 4.23 Resultados Rx y FTIR vetilla C32-01	65
Ilustración 4.24 Resultados Rx y FTIR vetilla C33-01	66
Ilustración 4.25 Columna estratigráfica sondaje S-1, y gráficos de datos geotécnicos.....	68
Ilustración 4.26 Gráfico velocidad de onda v/s profundidad (IDIEM, 2017)	69
Ilustración 4.27 Litología típica zona A	71
Ilustración 4.28 Litología típica zona B	71
Ilustración 4.29 Litología típica zona C	71
Ilustración 4.30 Litología típica zona D	71
Ilustración 4.31 Columna estratigráfica sondaje S-2.....	72
Ilustración 4.32 Perfil de Resistividad Eléctrica (ERT) de Diaz et al. 2014.	73
Ilustración 4.33 Perfil de resistividad con la información de los sondajes S-1 y S-2.	74
Ilustración 5.1 Fallas con comportamiento frágil. Modificado de Sibson et al. 1977	77
Ilustración 5.2 Clasificación de brecha de falla. Modificado de Woodcock & Mort, 2008.	77
Ilustración 5.3 Brecha de mosaico, extraída desde el trabajo de Woodcock & Mort, 2008	78
Ilustración 5.4 Componentes de la arquitectura de la zona de falla (Caine et al., 1996)	79
Ilustración 5.5 Componentes arquitectónicos sondaje S-1	80
Ilustración 9.9.1 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 1 a 6.....	90
Ilustración 9.9.2 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 7 a 12.....	91

Ilustración 9.9.3 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 13 a 18.....	92
Ilustración 9.9.4 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 19 a 24.....	93
Ilustración 9.9.5 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 25 a 30.....	94
Ilustración 9.9.6 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 31 a 36.....	95
Ilustración 9.9.7 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 37 a 41	96
Ilustración 9.9.8 Muestra sondaje S-2 primeros 12 m.....	98
Ilustración 9.9.9 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 23	98
Ilustración 9.9.10 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 35	98
Ilustración 9.9.11 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 46	99
Ilustración 9.9.12 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 58	99
Ilustración 9.9.13 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 69	99
Ilustración 9.9.14 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 80	100
Ilustración 9.9.15 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 92	100
Ilustración 9.9.16 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta 100 metros.....	100

1. Antecedentes Generales

1.1. Introducción

En Chile generalmente nos vemos sometidos a terremotos característicos de una zona de subducción activa, los cuales pueden tener una gran magnitud y afectar a extensas áreas, produciendo una destrucción regional importante. Si bien, estos terremotos son los más frecuentes, la ocurrencia de terremotos producidos por fallas corticales no es despreciable; por ejemplo, los terremotos de Curicó 2004 y Aysén 2007. Estos eventos corticales, aunque pueden llegar a tener una magnitud menor, generan un gran impacto en zonas pobladas.

Actualmente, los habitantes de Santiago de Chile muestran preocupación por la amenaza que la falla cortical llamada Falla San Ramón (FSR) puede significar para la ciudad. Esta falla tiene una dirección generalmente N-S y se encuentra ubicada entre dos rasgos morfológicos característicos de Santiago; al oriente de esta importante estructura se levanta un gran relieve perteneciente a la Cordillera Principal de Chile Central, mientras que al poniente comienza la Depresión Intermedia donde se ubica la ciudad.

Uno de los más importantes motivos que gatillan la necesidad de hacer un estudio estructural detallado de la FSR es que esta falla se ubica aledaña a infraestructura importante para la ciudad, así como, por ejemplo, el Centro de Estudios Nucleares (CEN), donde se encuentra el Reactor Nuclear Experimental Chileno. Esto toma aún más relevancia cuando estudios recientes han demostrado que la FSR muestra signos de actividad cuaternaria (Rauld, 2002, 2011; Armijo et al., 2008), pudiendo llegar a generar sismos de 7,2-7,5 con frecuencia de miles de años (Vargas et al., 2014).

Este trabajo de título se enmarca en el Proyecto Falla San Ramón del Centro Sismológico Nacional (CSN)-ONEMI y busca aportar datos para el modelo estructural de la FSR, así como esclarecer y confirmar estudios anteriores que clasifican la falla como inversa con vergencia al oeste (Rauld, 2002, 2011; Armijo et al., 2010).

Con este fin se realizó un sondaje de diamantina con recuperación de testigo (S-1), ubicado sobre el escarpe de la FSR que alcanzó una profundidad de 199 metros. Además, se perforó un pozo de 100 metros (S-2) en las instalaciones del CEN, el cual se realizó mediante perforación con aire reverso, donde se pudo caracterizar litológicamente el suelo del reactor.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Identificar, describir y caracterizar las unidades geológicas presentes en el escarpe de la Falla San Ramón, mediante testigo de sondaje profundo.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar y caracterizar, estructural y mineralógicamente las rocas atravesadas por el sondaje.
- Confeccionar una columna estratigráfica con la información obtenida.
- Confeccionar un perfil geológico básico con la información del sondaje y de un sondaje cercano de aire reverso de 100 metros de profundidad.

1.3. Ubicación y accesos

El área de estudio se encuentra en el sector nororiente de Santiago entre el piedemonte cordillerano de la Cordillera Principal y la Depresión Intermedia donde se encuentra la ciudad de Santiago. Los sitios donde se ejecutaron los sondajes se ubican al suroriente de la comuna de Las Condes (Ilustración 1.1).

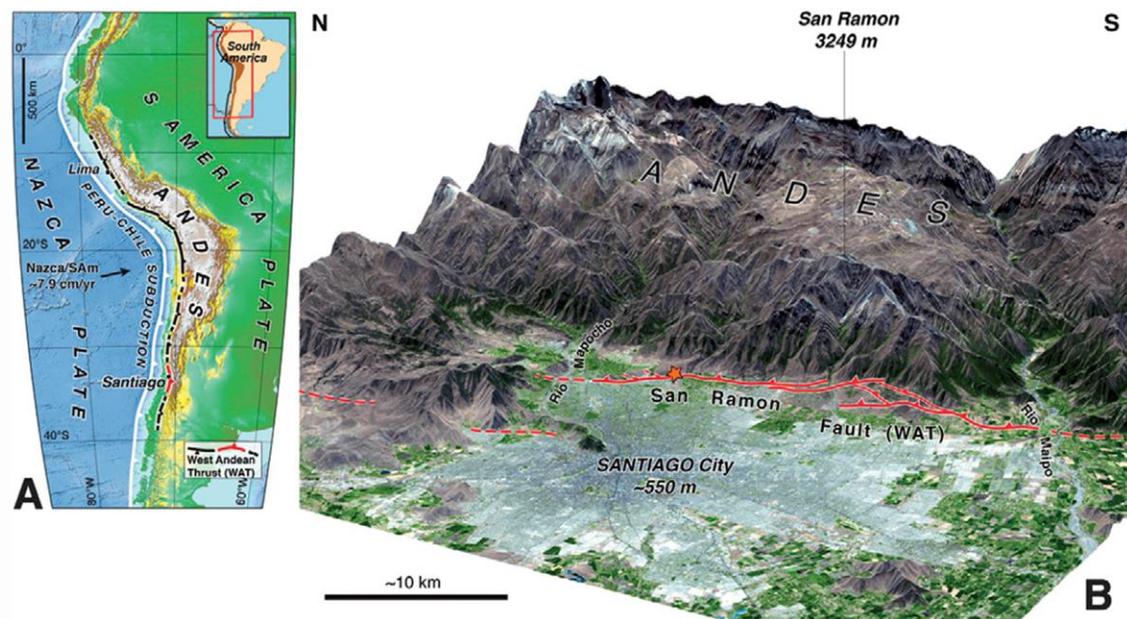


Ilustración 1.1. Ubicación sitio de estudio, imagen modificada de Vargas et al., 2014.

El sondaje de 199 metros de largo, con recuperación de testigos, se realizó en el complejo de apartamentos Laderas del Remanso (Ilustración 1.2), mientras el sondaje de aire reverso de 100 metros de largo se ejecutó en los terrenos del Centro de Estudios Nucleares de La Reina (CEN), al cual se accede por Av. Nueva Francisco Bilbao (Ilustración 1.2).

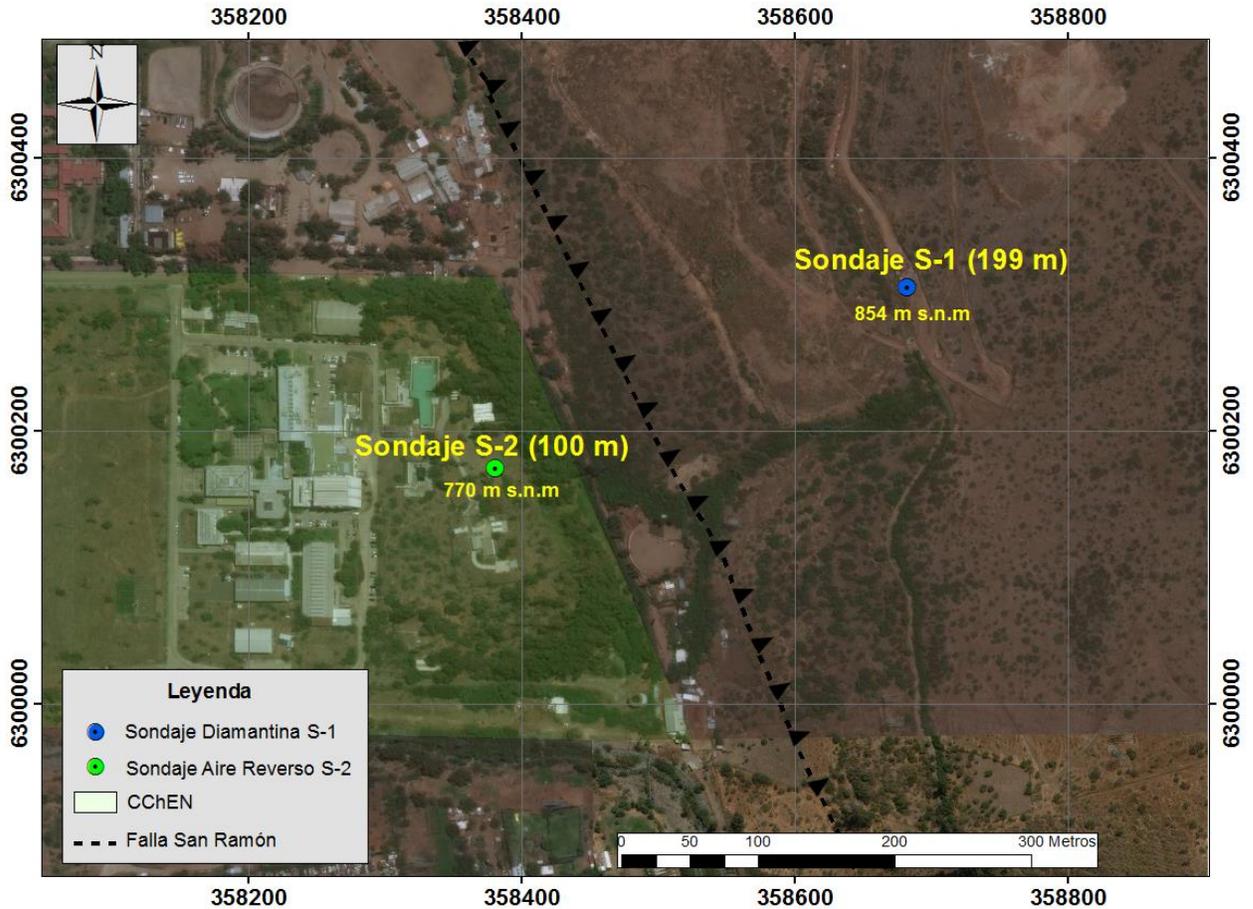


Ilustración 1.2 Ubicación de sondajes en el área de estudio.

El acceso y recorrido del área de estudio no es sencillo, internarse en los faldeos de los cerros es complicado debido a que la mayoría de los terrenos son de propiedad privada. En general se requiere una autorización, la cual, muchas veces, es difícil de conseguir.

1.4. Metodología

Entre los meses de diciembre de 2016 y marzo de 2017 IDIEM realizó dos sondajes en el marco del Proyecto Falla San Ramón del CSN-ONEMI. El sondaje S-1 corresponde a un sondaje de diamantina con recuperación de testigo continuo, en cambio, el sondaje S-2 corresponde a un sondaje de aire reverso.

Como parte de este estudio, durante este periodo, se realizó en terreno una descripción litológica básica de los testigos y *cuttings* de los sondajes para caracterizarlos. Posteriormente, cuando los sondajes se encontraban terminados, fueron mapeados, recabando los datos litológicos, geotécnicos y estructurales posibles, dependiendo del sondaje.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo (Ilustración 1.3) que resume el proceso entre la perforación de los sondajes y los resultados obtenidos.

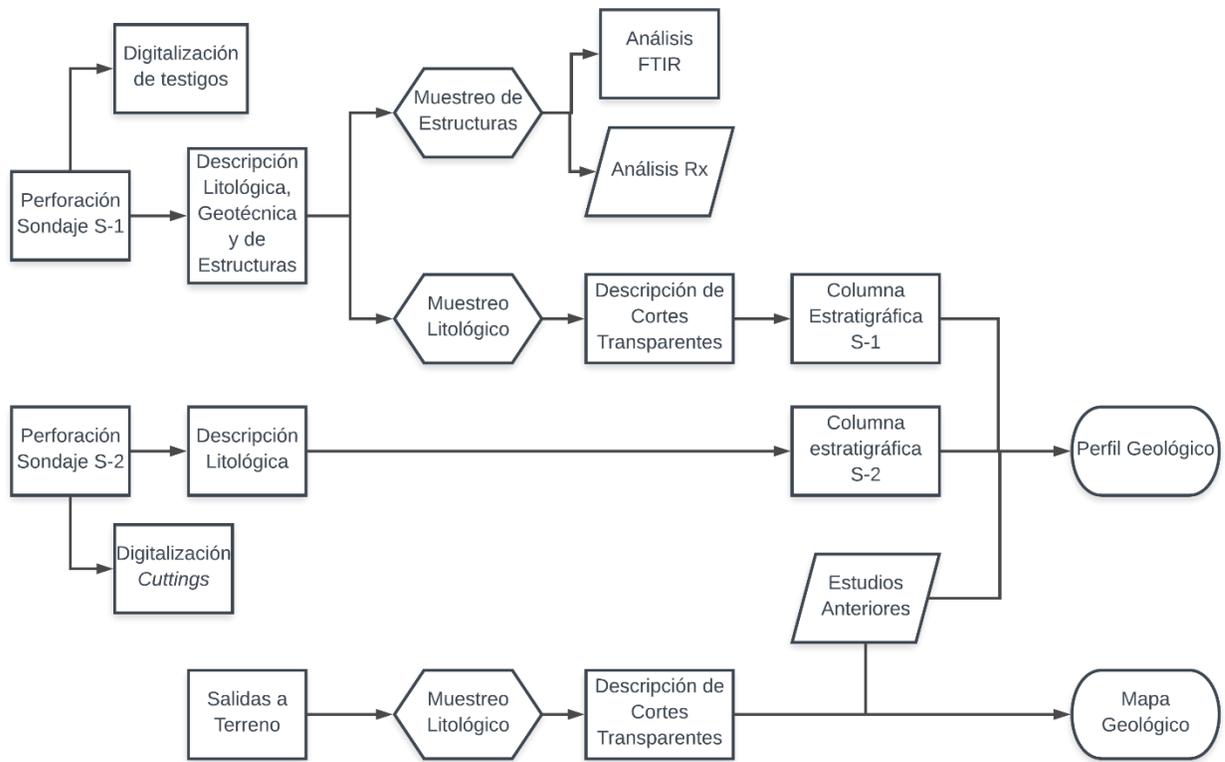


Ilustración 1.3 Diagrama de flujo

Para la descripción de los testigos del sondaje S-1 se utilizaron las tablas que se muestran a continuación (Tabla 1.1 y Tabla 1.2), con el fin de obtener datos de relevancia. Mientras que para el sondaje S-2 de aire reverso se obtuvieron muestras por cada metro de avance del sondaje para realizar una descripción litológica.

Tabla 1.1 Tabla de descripción geotécnica.

Caja	Tramo		Recuperación [%]	Litología	Grado de Meteorización	ff/m	RQD [%]	Resistencia del Material	Obs.
	Desde	Hasta							

Tabla 1.2 Tabla de descripción de vetillas y fracturas.

Caja	Tramo	Posición [m]	Tipo Vetilla-Fractura	Angulo			JRC	Tipo de Relleno	Resistencia del Relleno	Resistencia Pared	Alteración Pared	GSI		Obs.
				0-30	30-60	60-90						Estructura	Condición	

La Tabla 1.1 se usa para obtener los datos geotécnicos como el porcentaje de recuperación, litología, grado de meteorización, frecuencia de fractura (ff/m), RQD y resistencia del material

El grado de meteorización se estima de acuerdo con lo recomendado por ISRM (1981) (Tabla 1.3).

Tabla 1.3 Grado de Meteorización ISRM (1981).

Termino	Descripción	Grado
Roca Fresca	No presenta signos visibles de meteorización en la roca: tal vez una leve decoloración en las superficies de las discontinuidad mayores.	I
Levemente Meteorizada	La decoloración indica meteorización de la roca y en las superficies de las discontinuidades. La roca en su tonalidad puede estar decolorada por la meteorización y puede estar extremadamente algo más débil, que en su condición fresca.	II
Moderadamente Meteorizada	Menos de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos continuos.	III
Muy Meteorizada	Más de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se uede presentar como colpas o testigos discontinuos.	IV
Completamente Meteorizada	Toda la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La estructura original del macizo aún se mantiene en gran parte intacta.	V
Suelo Residual	Toda la roca está convertida como suelo. La estructura del macizo y la fábrica del material están destruidas. Existe un gran cambio de volumen, sin embargo el suelo no ha sido transportado significativamente.	VI

En la tabla anterior (Tabla 1.3) se establece una graduación para la meteorización de la roca. En este trabajo se realiza una adaptación de la Tabla 1.3, con el fin de establecer el grado de meteorización en sectores del sondaje donde se encuentra sedimento, para esto se establece una asociación visual entre el grado de meteorización y los testigos del sondaje que se muestra en la Ilustración 1.4, donde se establece un grado de meteorización mínimo a testigos que se encuentran enteros y un grado de meteorización máximo a testigos que se encuentren totalmente disgregados

Grado	Imagen comparativa
I	
II	
III	
IV	
V	
VI	

Ilustración 1.4 Grado de Meteorización en tramos sedimentarios de sondaje de diamantina.

La Tabla 1.2 se utilizó para obtener la ubicación e información relevante de las vetillas y fracturas encontradas en el sondaje S-1, los parámetros considerados fueron, tipo de estructura, ángulo con respecto a la horizontal, rugosidad (JRC), tipo de relleno, resistencia de relleno, resistencia de la pared, alteración de la pared y GSI.

Se ocupará la rugosidad de las estructuras que definieron Barton y Chouley (1977), mediante el coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (JRC) el cual depende del grado de rugosidad de la discontinuidad y varía desde cero para superficies lisas, creciendo conforme el perfil de rugosidad aumenta (Ilustración 1.5).

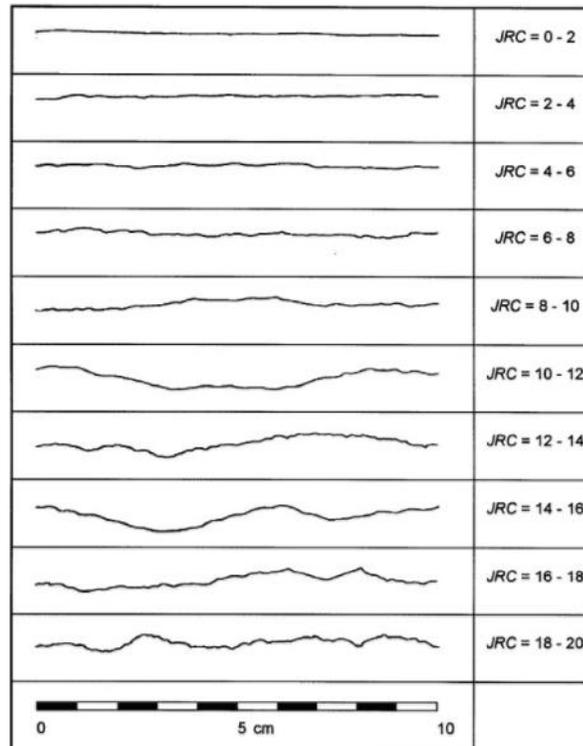


Ilustración 1.5 Perfiles de rugosidad y el valor atribuido al coeficiente de rugosidad JRC (Barton & Chouley, 1977).

Para los parámetros resistencia del material, resistencia de relleno y resistencia pared se utilizó la Tabla 1.4 la que corresponde al criterio empírico para la estimación de la resistencia del material. Donde los valores S1 a S6 se deben aplicar a suelos y los valores R0 a R6 se deben aplicar a roca.

Tabla 1.4 Criterios para la estimación de resistencia del material. Modificado de ISRM, 1981.

Clase	Descripción	Identificación en testigos
S1	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.
S2	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.
S3	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para penetrar el dedo.
S4	Arcilla rígida	Fácilmente marcada por el pulgar, solamente puede ser penetrada con gran esfuerzo.
S5	Arcilla muy rígida	Fácilmente marcada por la uña.
S6	Arcilla dura	Se marca con dificultad por la uña.
R0	Roca extremadamente débil	Se puede marcar con la uña.
R1	Roca muy débil	Se disgrega fácilmente con presión. Se talla fácilmente con una cortaplumas.
R2	Roca débil	Puede rayarse con dificultad con una cortaplumas. Se pueden hacer marcas profundas con la punta del rayador.
R3	Roca moderadamente fuerte	No se puede rayar con una cortaplumas la muestra en mano, se pueden hacer marcas con la punta del rayador.
R4	Roca fuerte	Difícilmente se puede rayar con rayador. Se necesita un golpe con el martillo de geólogo para romper el testigo.
R5	Roca muy fuerte	El testigo requiere de muchos golpes del martillo geológico para ser fracturado.
R6	Roca extremadamente fuerte	El testigo solo puede ser astillada con el martillo geológico.

La alteración de las paredes se refiere al grado de alteración con respecto a la matriz de la roca, la Tabla 1.5 muestra los criterios utilizados para determinar este parámetro.

Tabla 1.5 Criterios para determinar el grado de alteración de las paredes (Villarroel et al., 2001).

Código	Grado de Alteración	Descripción
1	Alta	La pared se encuentra totalmente alterada, y su grado de alteración es alto con respecto a la matriz de la roca.
2	Media	La pared se encuentra medianamente alterada y su grado de alteración es medio con respecto a la matriz.
3	Baja	La pared se encuentra ligeramente alterada en relación con la matriz.
4	Igual Matriz	El grado de alteración entre la pared y la matriz es similar.
5	Menor Matriz	La pared se encuentra menos alterada que la matriz de la roca.

Para caracterizar el macizo rocoso atravesado por el sondaje S-1 se estimaron dos parámetros geotécnicos para la caracterización del índice de resistencia geológica (GSI), los cuales corresponden a la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades (Tabla 1.6).

Tabla 1.6 Caracterización del Índice de Resistencia Geológica (Hoek et al., 1998).

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO	CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES
INTACTO O MASIVO: Macizo rocoso in situ o especímenes de roca intacta, con escasa discontinuidades ampliamente espaciadas.	
FRACTURADO EN BLOQUES: macizo rocoso conformado por trozos o bloques de roca bien trabados de forma cúbica y definidos por tres sets de estructuras, ortogonales entre sí.	MUY BUENO: Superficies muy rugosas y paredes frescas sin meteorización.
FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES: Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados de varias caras angulosos y definidos por cuatro o más sets de estructuras.	BUENO: Superficies rugosas, paredes levemente meteorizadas, con pátinas de óxido de hierro.
FRACTURADO Y PERTURBADO: Macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formados por la intersección de numerosos sets de estructuras	REGULAR: Superficies lisas, paredes moderada mente meteorizadas y alteradas.
DESINTEGRADO: Macizo rocoso muy fracturado y quebrado conformado por un conjunto pobremente trabado de bloques y trozos de roca angulosos y también redondeados.	MALA: Superficies lisas y cizalladas, paredes muy meteorizadas con recubrimientos compactos o rellenos de fragmentos angulares.
FOLIADO-LAMINADO-CIZALLADO: Rocas débiles plegadas y cizalladas tectónicamente. Carencia de formación de bloques debido a la esquistosidad que prevalece sobre otras estructuras	MUY MALA: Superficies cizalladas, muy meteorizadas con recubrimientos o rellenos arcillosos blandos.

La información obtenida de la descripción litológica del sondaje S-1 se corroboró con la descripción de cortes transparentes realizados a las diferentes litologías presentes en el sondaje, con esta información se realizó una columna estratigráfica y se graficaron los datos geotécnicos más importantes obtenidos en la Tabla 1.1. Además, se realizó análisis de Rx y FTIR para reconocer la mineralogía de las vetillas presentes en el sondaje S-1.

Con estudios geofísicos existentes en la zona y la información obtenida de los sondajes S-1 y S-2 se realizó un perfil geológico.

Durante las salidas a terreno se mapeó la geología de la zona de estudio, se muestrearon afloramientos cercanos a los cuales se le realizaron cortes transparentes, con el fin de reconocer con exactitud las litologías presentes en los afloramientos y poder correlacionarlos con las litologías reconocidas en los sondajes. Con un modelo de elevación digital (DEM) se confeccionó un mapa del área de estudio que contiene la información recabada en terreno junto con la de trabajos anteriores.

Una parte importante de este estudio fue digitalizar los testigos del sondaje S-1 para un posterior análisis visual más sencillo, además se digitalizaron las muestras extraídas del sondaje S-2. Estas digitalizaciones se realizaron mediante fotografías de buena resolución, ocupando softwares como Photoshop e Illustrator para su análisis y ordenamiento digital.

2. Marco Tectónico y Marco Geológico

2.1. Marco Tectónico

Al norte de la península de Taitao, Chile, se encuentra una zona de convergencia activa de placas tectónicas de tipo oceánica-continental; la Placa de Nazca subduce bajo la Placa Sudamericana (Ilustración 2.1). La subducción se reconoce activa desde el Jurásico Inferior (Mpodozis & Ramos, 1989), pero la tasa de subducción ha variado a través del tiempo. Durante el Eoceno-Mioceno, alrededor de 25 Ma, tuvo un aumento en la tasa de convergencia de 5 a 15 cm/año producto de la ruptura de la placa Farallón (Pardo-Casas & Molnar, 1987; Somoza, 1998), en los últimos 10 Ma se ha desacelerado en un 50% aproximadamente (Meade & Conrad, 2008), llegando a 6,8 cm/año en la actualidad (Vigny et al., 2009).



Ilustración 2.1 Segmentación del margen de subducción, volcanismo y posición de la fosa.
(Modificado de Rauld, 2002)

El área de estudio se ubica en una zona de transición ubicada entre los 32° S y 34° S (Jara, 2013). Al norte de esta zona la placa de Nazca subduce con una pendiente media de 25° E que se tiende a horizontalizar a unos 250 km al este de la fosa, mientras que, al sur de la zona de transición, el ángulo de subducción se mantiene constante entre 25°- 30° E (Jara, 2013). Según estudios recientes, la transición entre estos dos segmentos diferentes de subducción es gradual y mediante flexión de las placas, y no por desgarro (Pesicek et al., 2012). Esto evidencia que la subducción no ocurre de manera homogénea en esta latitud de Chile.

Como resultado de este ambiente tectónico en Chile Central, es posible distinguir tres rasgos morfoestructurales andinos (Ilustración 2.2), dispuestas en franjas orientadas preferentemente norte-sur, que de oeste a este son: Cordillera de la Costa, la Depresión Central y la Cordillera Principal (Troncoso, 2014).

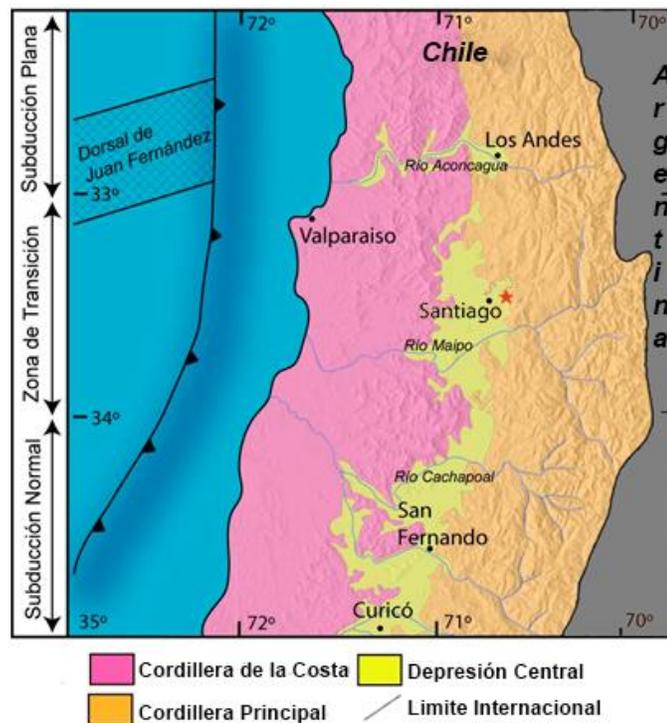


Ilustración 2.2 Principales morfoestructuras de la segmentación andina en Chile entre los 32° y 35° S. La estrella roja indica zona de estudio (Modificada de Fock, 2005). Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yañez (2003)

La Cordillera de la Costa está formada principalmente por granitoides del Paleozoico Superior en su flanco occidental, mientras que en su parte más oriental se compone por secuencias volcánicas y sedimentarias (Thomas et al., 1958; Sernageomin, 2003; Fock, 2005). Este cordón montañoso que no supera los 2500 m s.n.m. tiene una morfología redondeada y evidencia un relieve maduro (Rauld, 2011).

La Depresión Intermedia corresponde a las cuencas ubicadas entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera Principal (Troncoso, 2014). En la Región Metropolitana está rellena por depósitos aluviales y fluvio-glaciares (Karzulovic, 1957; Thiele, 1980) de edad pliocena a holocena (<5Ma), los cuales en algunos lugares superan los 500 metros de espesor. Al norte de los 33° S la Depresión Intermedia desaparece dando paso a cordones montañosos transversales asociados a la subducción presente en esta zona.

La Cordillera Principal tiene un relieve muy irregular y juvenil (Troncoso, 2014). Su parte occidental está compuesta por rocas volcánicas y volcanoclásticas, de edad cenozoica y su parte oriental de rocas sedimentarias marinas y continentales con intercalaciones de rocas volcánicas de edad mesozoica, estas últimas se encuentran fuertemente deformadas (Rauld, 2011).

La estructura de la Cordillera Principal se puede describir en tres dominios (Rauld, 2011):

- Dominio Occidental, corresponde a un rasgo morfoestructural consistente en fallas y pliegues de longitud de onda aproximada de 5 km (Thiele, 1980; Charrier et al., 2002; 2005a; Fock, 2005; Rauld, 2011), que presentan intrusivos del Mioceno Inferior. Las estructuras que dominan esta unidad tienen una vergencia oeste (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011).
- Dominio Central en el que predominan las unidades volcano-sedimentarias del Cenozoico caracterizado por pliegues de vergencia oeste representados por una serie de sinclinales (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011).
- Dominio Oriental o también conocido como Faja Plegada y Corrida Del Aconcagua (Ramos et al., 1996; Rauld, 2011). Sobre este dominio, al sur de los 32°S se encuentra el arco volcánico actual (Rauld, 2011).

La zona de estudio se encuentra en el dominio occidental.

2.2. Marco Geológico

Desde alrededor de 200 millones de años, Chile Central (33°-35°S) ha estado dominado por un magmatismo asociado al régimen de subducción presente. Este régimen ha generado secuencias volcánicas y batolitos de orientación cercanamente norte-sur, que se hacen progresivamente más jóvenes hacia el este.

La Cordillera de la Costa es una potente secuencia volcano-sedimentaria que representa el arco magmático Mesozoico. Esta secuencia fue depositada en una cuenca sobre un basamento plutónico y metamórfico de edad paleozoica. La presencia de intercalaciones marinas durante el Cretácico Inferior, y las bajas razones de Sr en basaltos demuestran un régimen de extensión cortical durante este periodo. Según esto, Levi y Aguirre (1981) la interpretan como cuenca marginal de trasarco, o como cuenca de extensión de intraarco por Charrier y Muñoz (1994), (Rauld, 2002). El Cretácico Superior está representado en el centro y al oeste de la Depresión Intermedia por una secuencia mayoritariamente piroclástica ácida, correspondiente a la Formación Lo Valle (Thomas, 1958).

En el trasarco Mesozoico, donde hoy se encuentra la Cordillera Principal, se desarrolló una cuenca extensiva de antepaís sobre basamento Paleozoico (Cuenca de Neuquén, según Mpodozis y Ramos, 1989) que recibió detritos derivados de la erosión del arco magmático en ese entonces ubicado en la actual Cordillera de la Costa. Esta cuenca muestra en sus depósitos evidencias de dos ciclos de transgresión - regresión marina y que se colmató a fines del Cretácico Inferior con la acumulación de la Formación Colimapu (Klohn, 1960), la cual está conformada por aproximadamente 2000 metros de areniscas, lutitas y conglomerados rojos continentales e intercalaciones volcánicas (Rauld, 2002).

Entre la cuenca de Neuquén y la Depresión Intermedia se ubicaba una cuenca volcanotectónica donde fue depositada una potente secuencia de rocas volcánicas y volcano-detriticas continentales (Wyss et al., 1996), a la latitud de la zona de estudio; esta secuencia se conoce bajo el nombre de Formación Abanico (Aguirre, 1960). En la actualidad la Formación Abanico aflora en dos franjas de orientación aproximadamente norte-sur, separadas por afloramientos de la Formación Farellones.

La Formación Abanico (Aguirre, 1960) se encuentra compuesta por depósitos volcanoclásticos, entre los que se encuentran tobas, brechas volcánicas e intercalaciones de lavas básicas a intermedias, además de intercalaciones sedimentarias continentales (fluviales, aluviales y lacustres). Dentro de la Formación Abanico se encuentran rocas con diferencias geoquímicas que varían de toleítico a calcoalcalino, relacionadas a distintas velocidades de convergencia de las placas del régimen de subducción (Sellés, 1999). El espesor de esta formación se estima en 3000 m, aunque aparece aumentado por intrusiones de filones-manto y lacolitos andesíticos (Thiele, 1980).

Edades K-Ar señalan para esta unidad una edad Oligoceno Superior – Mioceno Inferior (Charrier & Munizaga, 1979), además por estudios de fauna fósil se asigna edad Eoceno Superior – Mioceno (Charrier et al., 2007). La franja occidental de la Formación Abanico se encuentra en contacto paraconcordante con la Formación Lo Valle, con un *hiatus* de 37 Ma (Gana & Wall, 1997), se puede apreciar este contacto a 4 kilómetros al este de Chacabuco. En el sector de Angostura de Paine la Formación Abanico se dispone en discordancia de erosión sobre las rocas de la Formación Las Chilcas, con un *hiatus* de casi 90 Ma (Sélles & Gana, 2001). En el margen oriental la Formación Abanico está en contacto con las formaciones mesozoicas, mediante grandes fallas regionales (Baeza, 1999; Godoy et al., 1999; Charrier et al., 2002).

La formación que sobreyace a la Formación Abanico es la Formación Farellones (Klohn, 1960), de edad miocena. Es una formación continental compuesta por sedimentitas clásticas terrígenas, lavas andesíticas riolíticas y basálticas, y rocas piroclásticas que alternan con sedimentos derivados de la descomposición de estas rocas efusivas. El espesor estimado es de 3000 metros (Thiele, 1980). Charrier et al. (2002a), interpretó que el contacto entre ambas está controlado por la inversión de la cuenca abanico y se manifiesta localmente como discordancia o discordancia progresiva en aquellos lugares donde el tectonismo facilitó el movimiento de algunas fallas inversas que afectaron a los depósitos, o como un paso gradual en los lugares donde no se produjo actividad tectónica.

3. Geología y Geomorfología local

En el siguiente capítulo se describe las unidades geológicas presentes en la zona de estudio, la cual se ubica en la ladera occidental del cerro Los Rulos y al norte de la quebrada de Ramón. La morfología del cerro Los Rulos es irregular y erodada, comparada con los cerros Calán y Apoquindo, los cuales se ubican directamente al noroeste y son considerados parte de una misma estructura (Rauld, 2002).

Las unidades geológicas presentes en la zona (Ilustración 3.8) son cuatro, una correspondiente a roca fundamental y otras tres unidades de depósitos no consolidados asignadas al Cuaternario. Estas fueron definidas por Thiele (1980) y reconocidas en terreno.

- **Unidad de Roca Fundamental (Formación Abanico)**
La unidad Roca Fundamental se asocia a la Formación Abanico; aflora al oriente del cerro Los Rulos, más precisamente en la cara poniente del cerro Alto de las Vizcachas. Se pueden apreciar afloramientos de esta unidad en la quebrada de Ramón.
- **Unidad sedimentaria Cuaternaria Antigua**
Esta unidad corresponde sedimentos que presentan intercalaciones de capas compuestas por material fino y por material clástico anguloso en matriz fina, los que se encuentran cubriendo la Formación Abanico y tienen un espesor de decenas de metros (Rauld, 2002). En el área de estudio se encuentra en el cerro Los Rulos.
- **Unidad Sedimentaria Cuaternaria Joven**
Corresponde principalmente a depósitos de material fino, limo arcilloso, con niveles intercalados de arenas, gravillas y gravas arenosas, las que en algunos casos se presentan como lentes y bolsones (Rauld, 2002). En la ladera norte de la quebrada de Ramón los depósitos de esta unidad forman una terraza aluvial que posee un largo superior a 500 m y un ancho inferior a 100 m, su superficie se encuentra inclinada al oeste (Rauld, 2002).
- **Unidad Sedimentaria Cuaternaria Reciente**
Esta unidad corresponde a depósitos de abanicos aluviales. En la zona de estudio se encuentra el abanico aluvial procedente de la quebrada de Ramón el cual está compuesto por gravas arenosas, gravas limosas y por sedimentos finos con intercalaciones arenosas, los que se alteran con depósitos de flujos de detritos (Rauld, 2002).

A continuación, se muestra un perfil del cerro Los Rulos (Ilustración 3.1) el cual fue modificado desde el trabajo de Rauld (2002).

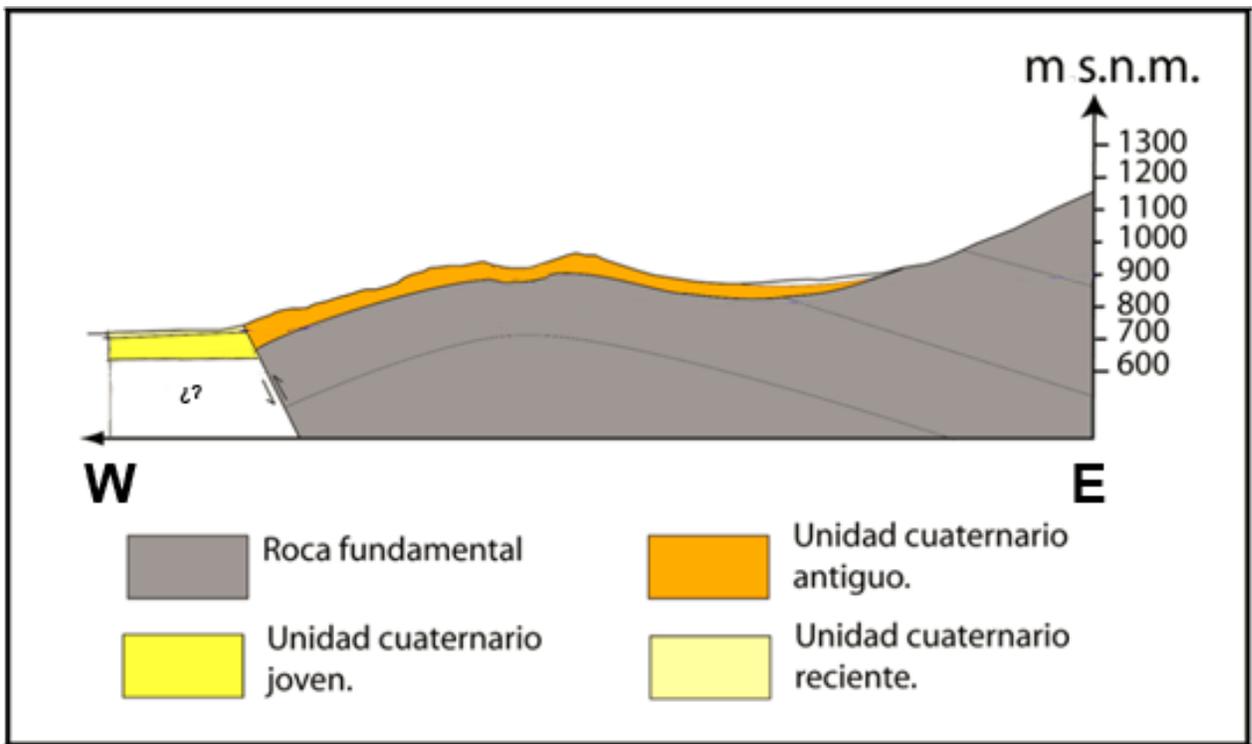


Ilustración 3.1 Perfil del cerro Los Rulos, modificado de Rauld (2002).

3.1. Geología de sitio

En el trabajo de terreno, además de estudiar la morfología del cerro Los Rulos, se levantaron afloramientos al este de este cerro y en la quebrada de Ramón (Ilustración 3.2). Se tomaron muestras de los afloramientos encontrados y se realizaron cortes transparentes para verificar su litología.

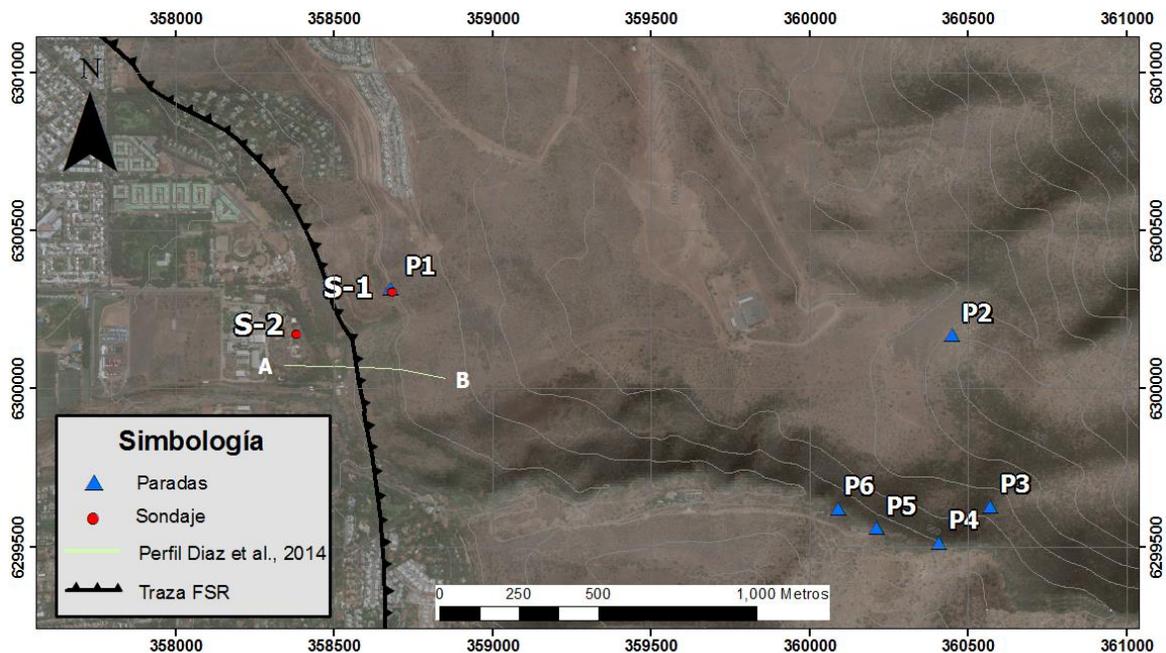


Ilustración 3.2 Ubicación puntos levantados en terreno.

- Punto 1
Coordenadas: 358679 E - 6300315 S Altura: 789 m s.n.m.

Esta parada se encuentra en el camino donde se perforó el sondaje S-1. En el sitio se encuentra una pared de tres metros de altura (Ilustración 3.3), constituida por gravas matriz soportada, sin estructuras sedimentarias. Los clastos son subredondeados a subangulosos, de tamaño entre [5-50] cm, de mala selección, y presentan litología de origen ígneo extrusivo. Este depósito se asocia a las gravas de la unidad Cuaternaria Antigua.



Ilustración 3.3 Pared ubicada al oriente del camino

En la misma pared, 30 metros al sur, en la pared se aprecia una zona de vetillas de calcita, con un rumbo de N85°E y manto 2° NW (Ilustración 3.4).



Ilustración 3.4 pared vertical que presenta zona con vetillas de calcita de rumbo N85°E y manto 2°NW

- Punto 2

Coordenadas: 360453 E - 6300167 S

Altura: 1102 m s.n.m.

Afloramiento de color amarillento, ubicado en la cara occidental del cerro Alto de las Vizcachas, con dimensiones de 50 metros de alto y por lo menos 100 de ancho. Roca piroclástica verdosa con presencia de fragmentos líticos, plagioclasas y feldespatos, se clasifica con el nombre de Toba de lapilli. Se realizó corte transparente a la muestra recolectada en este afloramiento (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Descripción muestra T-P2-M1

<p>Nicoles paralelos</p>  <p>Nicoles cruzados</p> 	<p>Roca piroclástica verdosa</p> <p>Fragmentos mayores 40%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Subangulosos • Fragmentos de roca 40% <ul style="list-style-type: none"> Traquita Andesita • Fragmentos de cristales 60% <ul style="list-style-type: none"> Feldespatos Plagioclasas (Albita) <p>Masa fundamental 60 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tamaño <ul style="list-style-type: none"> Ceniza • Color <ul style="list-style-type: none"> // verde oscuro sucio X Oscura sucia • Composición <ul style="list-style-type: none"> Vidrio volcánico <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Epidota • Esmectita • Prehnita <p>Textura</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fragmentada <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Toba de lapilli
--	---

- Punto 3
 Coordenadas: 360574 E - 6299626 S Altura: 1017 m s.n.m.

Afloramiento de dimensiones de 5 metros de ancho por 4 de largo, de color grisáceo, origen ígneo extrusivo, textura porfírica con fenocristales de plagioclasa en matriz oscura, se asocia a una Lava Cuarzo-Andesita.

Tabla 3.2 Descripción corte transparente muestra T-P3-M1

<p>Nicoles paralelos</p> 	<p>Roca volcánica extrusiva</p> <p>Cristales 20 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo 50% • Plagioclasa 45% • Feldespato 5 % <p>Masa fundamental 80 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Color // Marrón sucia X Oscura • Mineralogía Vidrio
<p>Nicoles cruzados</p> 	<p>Cristalinidad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hipocristalina <p>Tamaño de cristales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Equigranular <p>Textura</p> <ul style="list-style-type: none"> • Porfírica <p>Forma de cristales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hipidiomorfica <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Esmeclita <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo-Andesita

- Punto 4
Coordenadas: 360412 E - 6299511 S Altura: 945 m s.n.m.

Afloramiento ubicado en la pared sur de la quebrada de Ramón, tiene hasta 30 metros de altura y 80 metros de ancho, se observan estratos de colores amarillo y rojizo con manto aparente de N33° E (Ilustración 3.5).

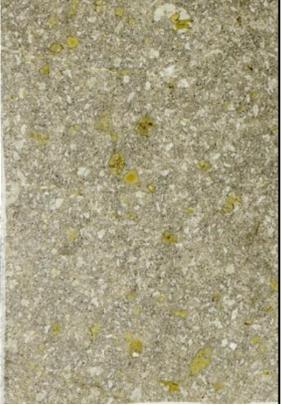


Ilustración 3.5 Afloramiento en la pared sur de la quebrada de Ramón

- Punto 5
 Coordenadas: 360214 E - 6299558 S Altura: 921 m.s.n.m.

Afloramiento ubicado en la quebrada de Ramón, tiene 4 metros de altura y 5 de ancho, roca grisácea con fenocristales de plagioclasa en una matriz afanítica, se le asocia el nombre de Lava Andesita-Basáltica.

Tabla 3.3 Descripción corte transparente muestra T-P5-M1

<p>Nicoles paralelos</p> 	<p>Roca volcánica extrusiva</p> <p>Cristales 45%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plagioclasa 70% • Clinopiroxeno 20% • Olivino 10% <p>Masa fundamental 55%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Color // Negro X Oscura • Mineralogía Vidrio <p>Cristalinidad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hipocristalina <p>Tamaño de cristales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inequigranular <p>Textura</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intergranular • Cumuloporfirica <p>Forma de cristales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hipidiomorfica <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Esmectita • Clorita <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Andesita Basáltica
<p>Nicoles cruzados</p> 	

- Punto 6
Coordenadas: 360092 E - 6299620 S Altura: 907m.s.n.m.

Afloramiento de rocas sedimentarias, tiene una altura de 30 metros y ancho de 40 metros, color marrón y negro, presencia de lutitas y areniscas finas, se observa una marcada estratificación con rumbo N5°W y manteo 45°E (Ilustración 3.6).

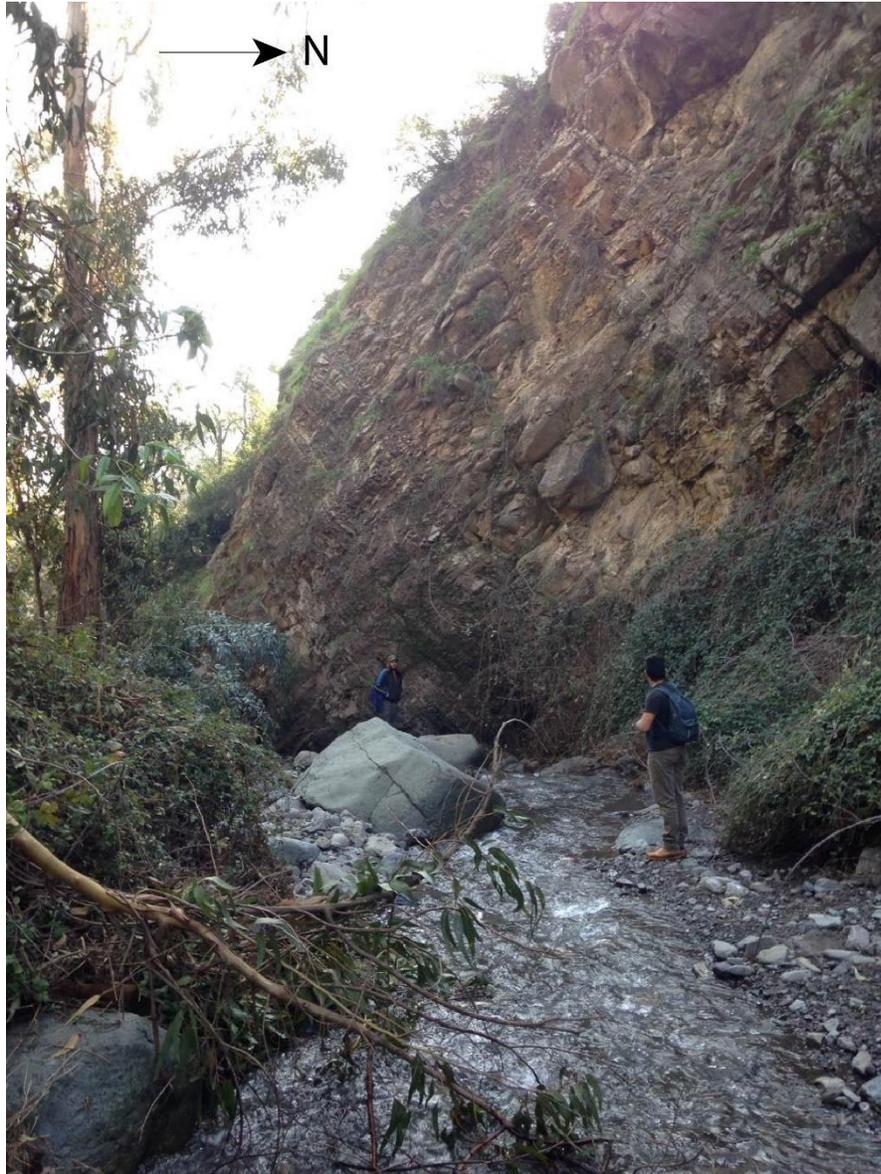


Ilustración 3.6 Afloramiento de Rocas sedimentarias parada 6

Tabla 3.4 Descripción corte transparente muestra T-P6-M1

<p>Nicoles paralelos</p> 	<p>Roca Sedimentaria Clástica Estratificada</p> <p>Clastos 5%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo <p>Matriz 90%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arcillas <p>Cemento 5%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Óxidos de hierro <p>Tamaño de grano</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arcilla
<p>Nicoles cruzados</p> 	<p>Grado de selección</p> <ul style="list-style-type: none"> • Muy buena selección <p>Forma</p> <ul style="list-style-type: none"> • Equidimensional <p>Esfericidad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baja Esfericidad <p>Redondeamiento de clastos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Subredondeado <p>Relación matriz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Matriz Soportado <p>Estructuras sedimentarias</p> <ul style="list-style-type: none"> • No presenta <p>Color</p> <ul style="list-style-type: none"> • // Marrón • X Negro <p>Grado de madurez</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alta madurez textural <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lutita

A lo largo del recorrido por los depósitos fluviales recientes de la quebrada de Ramón se identificó el origen de detritos presentes, en su mayoría correspondían a clastos de origen ígneo extrusivo (75%), también se encontró un importante número de clasto de origen ígneo plutónico (20%) y en menor cantidad clastos de origen sedimentario (5%) (Ilustración 3.7).



Ilustración 3.7 Clastos ígneos intrusivos y extrusivos quebrada de Ramón

A continuación, se muestra un mapa con los resultados del mapeo superficial de la zona de estudio (Ilustración 3.8).

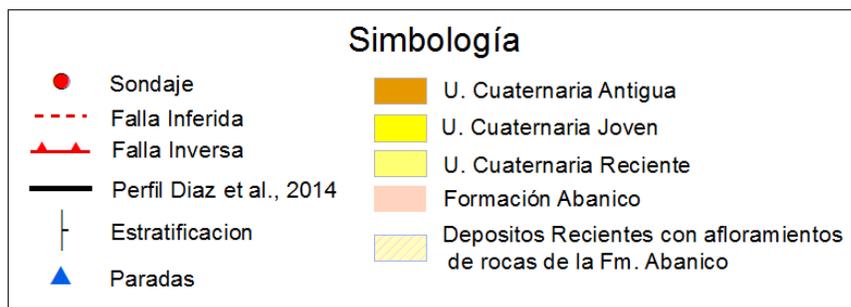
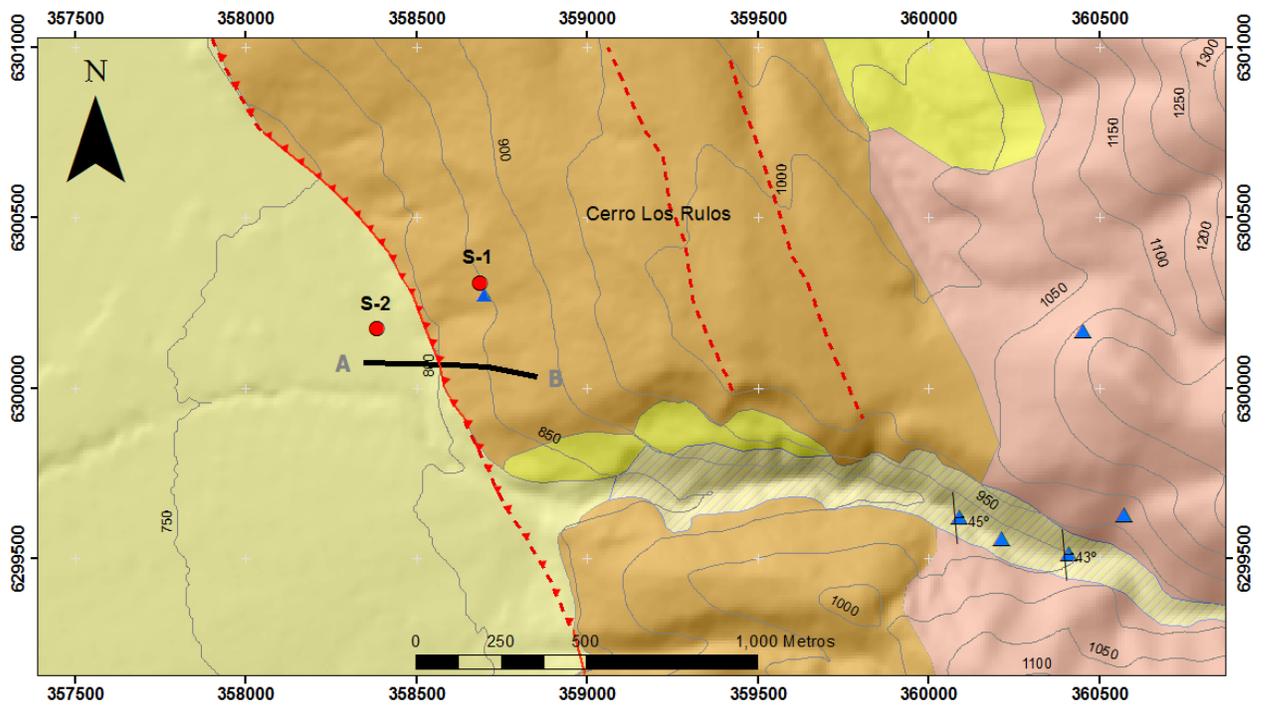


Ilustración 3.8 Mapa final zona de estudio.

4. Sondajes

En este capítulo se muestran los resultados de la descripción de los sondajes. El sondaje de diamantina S-1 se describió litológica y geotécnicamente, mientras tanto el sondaje S-2 solo se describió litológicamente debido al tipo de sondaje (Aire Reverso). En anexos 9.1 y 9.3 se encuentra la digitalización mediante fotografías que se les realizó a los sondajes S-1 y S-2.

4.1. Sondaje S-1

El sondaje de diamantina S-1 fue realizado por IDIEM sobre el escarpe de falla, al comienzo del piedemonte cordillerano a una altura de 854 m s.n.m., en una propiedad privada habitacional llamada Laderas del Remanso de las Condes. Tiene un diámetro de 63,5 mm (HQ) y alcanza una profundidad de 199 metros, las coordenadas geográficas del sondaje se encuentran en la siguiente tabla (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Coordenadas Geográficas Sondaje S-1

Coordenadas Geográficas Sondaje S1 (WGS 84)	
358683 E	6300306 S

4.1.1. Descripción Litológica

En el sondaje S-1 se definieron 3 unidades litológicas que se encuentran descritas desde la más profunda a la más somera.

Unidad 3 (Gravas Inferiores)

Unidad de sedimento terrígeno continental que comienza a una profundidad de 181,3 metros y se encuentra hasta el final del sondaje (199 m), por lo que tiene un espesor en el sondaje de 17,7 metros. Es matriz soportado, pobremente seleccionado y sin cemento entre los clastos y la matriz.

Los clastos son en su mayoría fragmentos líticos subredondeados, polimícticos; el tamaño de grano predominante es grava (entre 4 y 256 mm), con un promedio estimado de 12 cm. Los clastos son en su gran mayoría de origen ígneo extrusivo como andesitas y traquitas, además en esta unidad se encuentran dos clastos ígneos plutónicos de mayor tamaño, el primero con un largo de 42 cm correspondiente a una granodiorita y el segundo tiene un largo cercano a 70 cm y corresponde a una granodiorita cloritizada. El porcentaje de clastos en la Unidad 3 es del 45%.

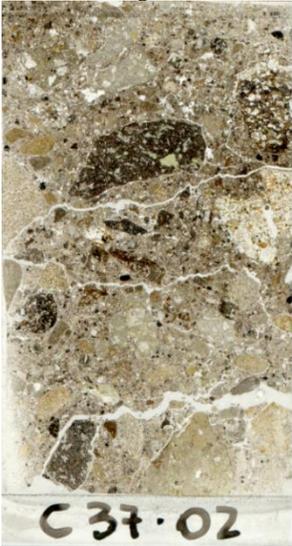
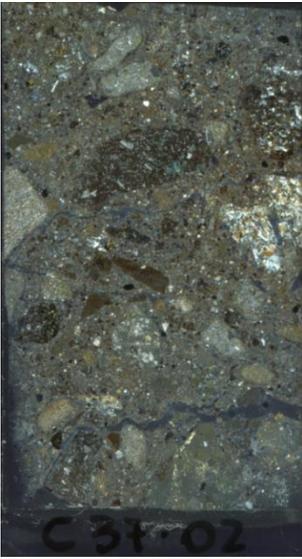
La matriz, 55%, es de tamaño arena fina a limosa (menor de ¼ mm), de color café. La unidad es homogénea, sin estructuras sedimentarias.

Para verificar la litología de esta unidad se extrajo la muestra C37-02 (Ilustración 4.1), a la cual se le realizó un corte transparente que se muestra en la Tabla 4.2. En esta muestra se observan clastos de origen volcánico de distintas composiciones, entre ellas, andesitas, andesita basáltica y traquitas, y clastos de origen plutónico como monzonita y monzodioritas. Los clastos son subredondeados y tienen una pobre selección. La matriz es de granulometría fina con presencia de esmectita, no se observa cemento. El porcentaje de clastos es 40% y el de la matriz es del 60%.



Ilustración 4.1 Muestra unidad Gravas Inferiores del sondaje S-1, extraída a una profundidad de 182,1 metros

Tabla 4.2 Descripción corte transparente muestra C37-02

<p>Nicoles paralelos</p>  <p>C 37 · 02</p>	<p>Gravas</p> <p>Clastos 40 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Subredondeados • Fragmentos líticos Traquita Andesita Dacita • Tamaño Hasta 1 cm <p>Matriz 60 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tamaño Arcilla • Color // Incolora sucia arcillosa X Oscura • Composición Arcillas de meteorización <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Epidota • Esmectita <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gravas
<p>Nicoles cruzados</p>  <p>C 37 · 02</p>	

La descripción microscópica concuerda con la descripción macroscópica de la unidad Gravas Inferiores. Con la muestra C37-02 se corrobora que la unidad de Gravas Inferiores se encuentra a una profundidad de 182,1 metros y que esta unidad es de carácter sedimentario no consolidado.

Unidad 2 (Secuencia Volcánica)

Esta unidad está constituida por rocas de origen volcánico principalmente lavas y rocas piroclásticas. Tiene un espesor total de 141,3 metros y se encuentra sobre las gravas de la unidad anterior (Gravas Inferiores). Las litologías presentes en la Unidad 2 corresponden a intercalaciones de lavas, tobas multicolores e ignimbritas.

La secuencia de rocas en esta unidad es la siguiente de arriba hacia abajo:

- A. Intercalación de roca ígneas extrusivas de composición andesítica a dacítica. *Roca con alto grado de meteorización difícil de ver su protolito. Muestras C9-01 y C9-02.*
12,6 metros
- B. Toba de lapilli multicolor. *Roca de origen volcánico de color predominantemente verde, con intercalaciones de tobas marrón y rojiza, muestra pequeñas zonas de alteración pervasiva de sílice. Muestras C12-01, C14-01 y C22-01.*
60 metros
- C. Dacita. *Roca volcánica extrusiva, afanítica, de color marrón y de composición dacítica. Muestra C23-01.*
8,4 metros
- D. Igual a subunidad B.
18,9 metros
- E. Intercalaciones de ignimbritas y tobas multicolores. *Porcentaje de ignimbritas 30%, y porcentaje de tobas 70%.*
6,4 metros
- F. Andesita criptocristalina. *Roca volcánica extrusiva, afanítica, de color gris y composición andesítica. Muestras C30-01.*
3,3 metros
- G. Igual a subunidad E. *Subunidad con mayor porcentaje de ignimbrita. Porcentaje ignimbrita 60% y porcentaje de tobas 40% Muestra C33-01.*
10,7 metros
- H. Zona con intercalaciones de brechas de falla. *Subunidad con zonas de brecha de falla intercaladas con tobas multicolores, ignimbritas y lavas de composición andesíticas. Las brechas de falla presentan clastos fracturados y rotados que pertenecen a la roca preexistente, entre las que se encuentran, tobas multicolores, ignimbritas y lavas. Muestras C33-02, C34-01 y C37-01.*
21 metros

La Ilustración 4.2 presenta una columna estratigráfica de la Unidad 2 que contiene las ubicaciones de las 12 muestras extraídas para la realización de cortes transparentes con el fin de verificar y correlacionar de mejor manera las litologías descritas de forma macroscópica.

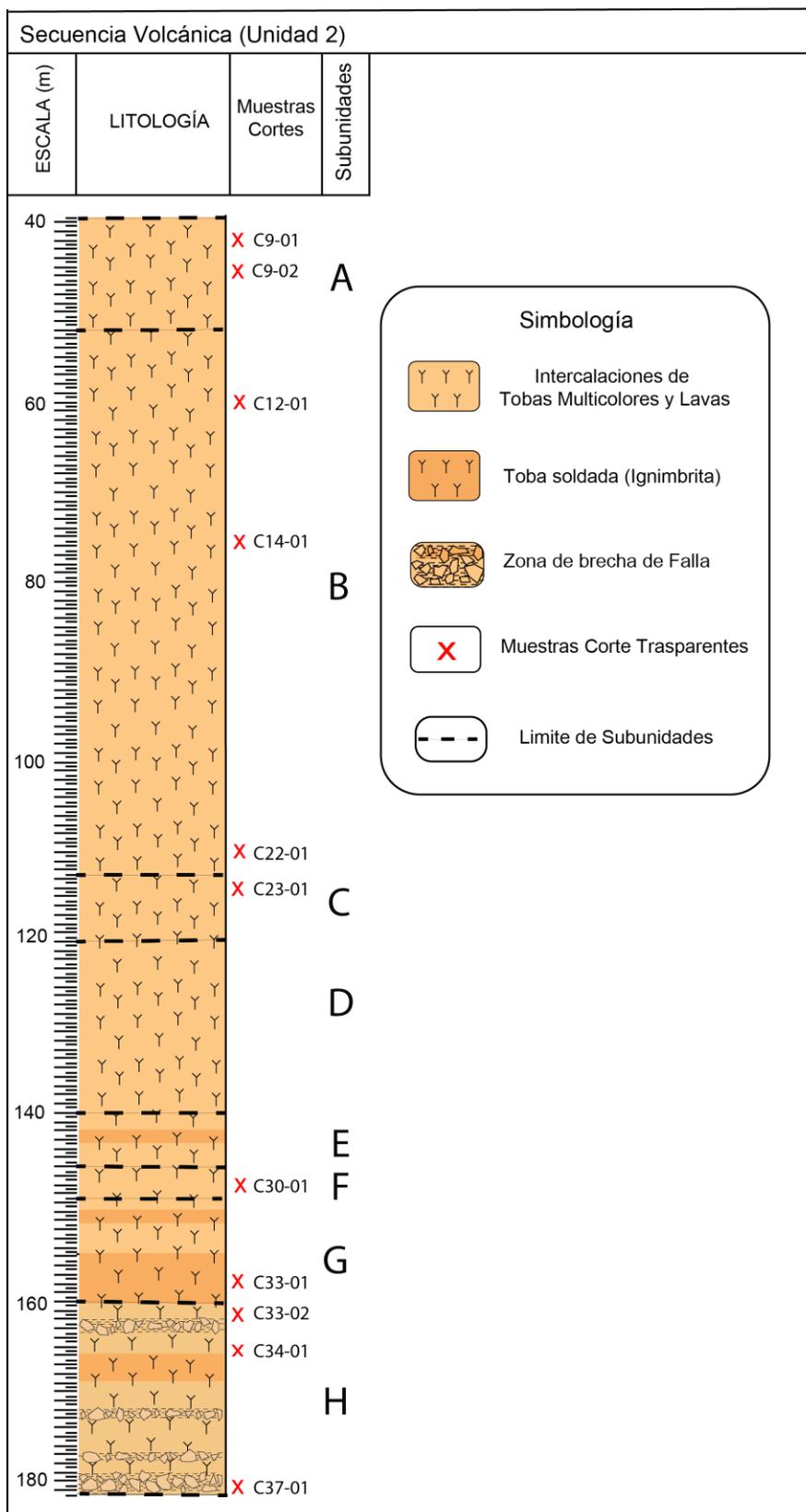


Ilustración 4.2 Columna estratigráfica de la Unidad 2. Se ubican muestras para cortes transparentes.

Subunidad A

- Muestra C9-01

Roca volcánica extrusiva de composición dacítica encontrada a 42,3 metros de profundidad (Ilustración 4.3 y Tabla 4.3). Presenta una alta meteorización por lo que el corte tiene un alto contenido de arcillas. Como protolito se reconoce una Dacita con vetillas de cuarzo y arcillas de alteración entre la que se reconoce esmectita.



Ilustración 4.3 Muestra C9-01. Dacita. Corte transparente en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Descripción muestra C09-01, Dacita.

<p>Nicoles paralelos</p>  <p>C9-01</p>	<p>Roca volcánica extrusiva meteorizada</p> <p>Cristales 35 %</p> <ul style="list-style-type: none">• Cuarzo• Plagioclasa <p>Masa fundamental 65%</p> <ul style="list-style-type: none">• Color // Oscura Arcillosa X Oscura• Mineralogía Vidrio <p>Cristalinidad</p> <ul style="list-style-type: none">• Hipocristalina <p>Tamaño de cristales</p> <ul style="list-style-type: none">• Equigranular <p>Textura</p> <ul style="list-style-type: none">• Afanítica <p>Forma de cristales</p> <ul style="list-style-type: none">• Hipidiomorfica <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none">• Esmectita• Arcillas de meteorización <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none">• Dacita <p>Vetillas</p> <ul style="list-style-type: none">• Cuarzo
<p>Nicoles cruzados</p>  <p>C9-01</p>	

- Muestra C9-02

Roca extrusiva de composición andesítica ubicada a una profundidad de 45,5 metros (Ilustración 4.4 y Tabla 4.4). Presenta un alto grado de meteorización, se reconoce como una Andesita con vetillas de cuarzo-albita y alteración de esmectita.



Ilustración 4.4 Muestra C9-02. Andesita. Corte transparente en Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Descripción muestra C9-02. Andesita.

<p>Nicoles paralelos</p>  <p>C9-02</p>	<p>Roca volcánica extrusiva meteorizada</p> <p>Cristales 45 %</p> <ul style="list-style-type: none">• Plagioclasa• Cuarzo <p>Masa fundamental 55 %</p> <ul style="list-style-type: none">• Color // Incolora marrón arcillosa• X Oscura• Mineralogía Vidrio <p>Cristalinidad</p> <ul style="list-style-type: none">• Hipocristalina <p>Tamaño de cristales</p> <ul style="list-style-type: none">• Equigranular
<p>Nicoles cruzados</p>  <p>C9-02</p>	<p>Textura</p> <ul style="list-style-type: none">• Afanítica microcristalina <p>Forma de cristales</p> <ul style="list-style-type: none">• Hipidiomorfica <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none">• Esmectita <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none">• Andesita <p>Vetillas</p> <ul style="list-style-type: none">• Cuarzo• Albita

Subunidad B

- Muestra C12-01

Roca piroclástica encontrada a 60 metros de profundidad (Ilustración 4.5), con típica textura fragmentada de cristales y fragmentos de roca subanguloso. Se clasifica como Toba de lapilli (Tabla 4.5). Posee una alta meteorización, presenta esmectita y epidota como minerales de alteración, además, arcillas de meteorización.

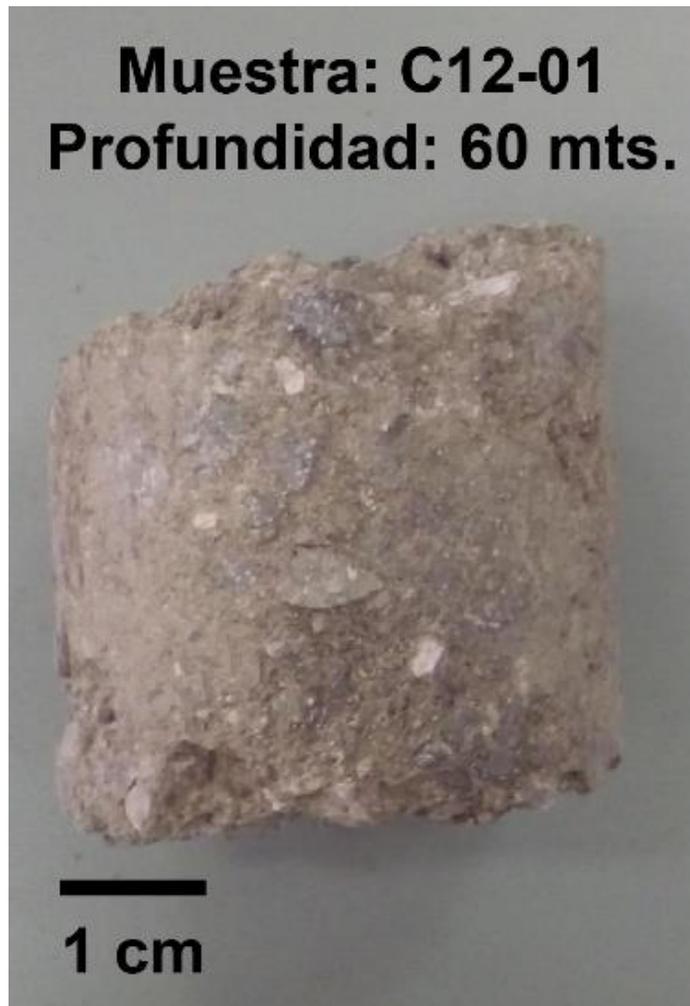
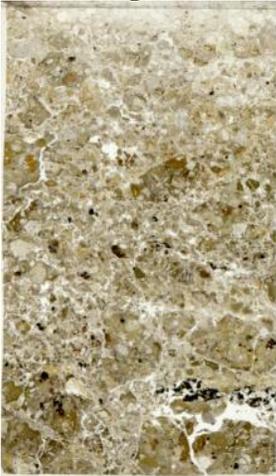


Ilustración 4.5 Muestra C12-01. Toba de lapilli. Corte transparente en la Tabla 4.5.

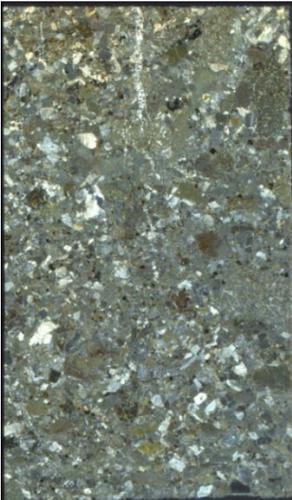
Tabla 4.5 Descripción muestra C12-01. Toba de lapilli.

<p>Nicoles paralelos</p>  <p>C12-01</p>	<p>Roca piroclástica meteorizada</p> <p>Fragmentos mayores 40 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Subangulosos • Fragmentos de roca <ul style="list-style-type: none"> Andesita Dacita Traquita • Fragmentos de cristales <ul style="list-style-type: none"> Plagioclasa Feldespatos Cuarzo <p>Masa fundamental 60 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tamaño <ul style="list-style-type: none"> Ceniza • Color <ul style="list-style-type: none"> // Incolora sucia X Oscuro • Composición <ul style="list-style-type: none"> Vidrio volcánico <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Epidota • Esmectita • Arcillas de meteorización <p>Texturas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fragmentada <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Toba de Lapilli meteorizada
<p>Nicoles cruzados</p>  <p>C12-01</p>	

- Muestra C14-01

Roca típica de subunidades B y D, Toba de lapilli con matriz verdosa ubicada a una profundidad de 74,3 metros (Tabla 4.6). Presenta textura fragmentada, fragmentos de roca principalmente traquitas y andesitas, mientras tanto los fragmentos de cristales son en su mayoría de albita. El corte presenta una vetilla de cuarzo sinuosa, bien delimitada y discontinua. La roca presenta minerales de alteración de epidota y arcillas entre la que se reconoce la esmectita.

Tabla 4.6 Descripción muestra C14-01. Toba de lapilli verdosa.

<p>Nicoles paralelos</p>  <p>C1401</p>	<p>Roca piroclástica verdosa</p> <p>Fragmentos mayores 35%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Subangulosos • Fragmentos de roca <ul style="list-style-type: none"> Traquita Andesita Dacita • Fragmentos de cristales <ul style="list-style-type: none"> Albita Feldespatos Plagioclasa <p>Masa fundamental 65 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tamaño <ul style="list-style-type: none"> Ceniza • Color <ul style="list-style-type: none"> // Incolora a verdosa X Oscura a verde • Composición <ul style="list-style-type: none"> Vidrio volcánico <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Epidota • Esmectita <p>Texturas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fragmentada <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Toba de lapilli <p>Vetilla</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo
<p>Nicoles cruzados</p>  <p>C1401</p>	

- Muestra C22-01

Toba de lapilli típica de las subunidades B y D (Tabla 4.7). La muestra tomada a 111,7 metros de profundidad en una zona con alteración rica en sílice donde predomina el cuarzo, presenta arcillas de esmectita en baja cantidad. Contiene fragmentos de roca entre ellos traquitas y andesitas, y cristales de plagioclasas y feldespatos.

Tabla 4.7 Descripción muestra C22-01. Toba de lapilli con alteración de sílice.

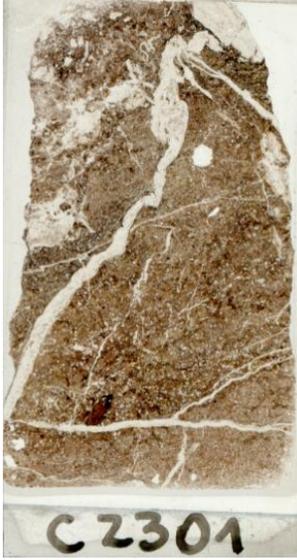
<p>Nicoles paralelos</p>  <p>C2201</p>	<p>Roca piroclástica verdosa con alteración pervasiva de sílice</p> <p>Fragmentos mayores 45 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Subredondeados • Fragmentos de roca <ul style="list-style-type: none"> Traquita Andesita • Fragmentos de cristales <ul style="list-style-type: none"> Plagioclasa (Albita) Feldespatos <p>Masa fundamental 55 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tamaño <ul style="list-style-type: none"> Ceniza • Color <ul style="list-style-type: none"> // Incolora sucia X Oscura • Mineralogía <ul style="list-style-type: none"> Vidrio volcánico <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Esmectita • Cuarzo <p>Textura</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fragmentada <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Toba de lapilli <p>Vetilla</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo
<p>Nicoles cruzados</p>  <p>C2201</p>	

Subunidad C

- Muestra C23-01

Muestra de roca ubicada a 114 metros de profundidad. Corresponde a una roca volcánica extrusiva de composición dacítica (Tabla 4.8), constituida por minerales equigranulares inmersos en una matriz vítrea y vetillas de albita y cuarzo con espesor máximo de 3 mm. La matriz presenta alteración arcillosa color marrón con minerales de alteración como epidotas y arcillas de esmectita.

Tabla 4.8 Descripción muestra C23-01. Dacita.

<p>Nicoles paralelos</p> 	<p>Roca volcánica extrusiva</p> <p>Cristales 25 %</p> <ul style="list-style-type: none">• Cuarzo• Plagioclasa• Feldespato <p>Masa fundamental 75 %</p> <ul style="list-style-type: none">• Color // Marrón Arcillosa X Oscura• Mineralogía Vidrio <p>Cristalinidad</p> <ul style="list-style-type: none">• Hipocristalina <p>Tamaño de cristales</p> <ul style="list-style-type: none">• Equigranular <p>Textura</p> <ul style="list-style-type: none">• Afanítica <p>Forma de cristales</p> <ul style="list-style-type: none">• Hipidiomorfica <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none">• Epidota• Esmectitas• Arcillas <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none">• Dacita <p>Vetillas</p> <ul style="list-style-type: none">• Albita• Cuarzo
<p>Nicoles cruzados</p> 	

Subunidad F

- Muestra C30-01

Roca volcánica extrusiva de composición andesítica, color gris (Ilustración 4.6) con cristales muy pequeños inmersos en matriz vítrea. Presenta vetillas medianamente sinuosas con minerales de cuarzo y albita. Las vetillas presentan discontinuidades abruptas.

La muestra se extrajo de una profundidad de 147,8 metros y se le realizaron 2 cortes transparentes, uno horizontal (Tabla 4.9) y otro de orientación vertical (Ilustración 4.7).



Ilustración 4.6 Muestra C30-01. Andesita. Corte transparente en la Tabla 4.9.



Ilustración 4.7 Corte transparente vertical muestra C30-01. Nicols paralelos y nicols cruzados.

Tabla 4.9 Descripción Muestra C30-01 Horizontal. Andesita.

<p>Nicoles paralelos</p> 	<p>Roca volcánica extrusiva</p> <p>Cristales 15 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo • Plagioclasa <p>Masa fundamental 85 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Color // Incolora sucia X Oscura • Mineralogía Vidrio <p>Cristalinidad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hipocristalina <p>Tamaño de cristales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Equigranular <p>Textura</p> <ul style="list-style-type: none"> • Afanítica <p>Forma de cristales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hipidiomorfica <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arcillas <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Andesita criptocristalina <p>Vetillas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Albita • Cuarzo
<p>Nicoles cruzados</p> 	

Subunidad G

- Muestra C33-01

Muestra de ignimbrita extraída de una profundidad de 158,7 metros (Ilustración 4.8 y Tabla 4.10). Tiene estructura bandeada, por deposición de flujo piroclástico y pequeña cantidad de fragmentos mayores de hasta 5 mm, entre los cuales se distinguen cuarzo, plagioclasa y clastos subredondeados de andesita. Matriz de vidrio volcánico soldado con presencia de fiames.



Ilustración 4.8 Muestra C33-01. Ignimbrita. Corte transparente en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Descripción Muestra C33-01. Ignimbrita.

<p>Nicoles paralelos</p>  <p>C 3301</p>	<p>Roca piroclástica</p> <p>Fragmentos mayores 10 %</p> <ul style="list-style-type: none">• Subredondeados• Fragmentos de roca Andesita• Fragmentos de cristales Cuarzo Plagioclasas <p>Masa fundamental 90 %</p> <ul style="list-style-type: none">• Tamaño Ceniza• Color // Marrón Oscura X Oscura• Mineralogía Vidrio volcánico <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none">• Calcita• Esmectita <p>Texturas</p> <ul style="list-style-type: none">• Piroclástica <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none">• Toba soldada (ignimbrita)
<p>Nicoles cruzados</p>  <p>C 3301</p>	

Subunidad H

- Muestra C33-02

Muestra tomada a una profundidad de 161,9 metros (Tabla 4.11). Contiene un 35 % de clastos pertenecientes a un protolito andesítico. Presencia de salbanda de falla que contiene arcillas de composición similar al protolito. Además, en el corte se observan minerales de alteración identificables como esmectitas y zeolitas. Muestra típica de la subunidad H. Vetilla de 1 cm. de espesor rellena por muscovita y sericita.

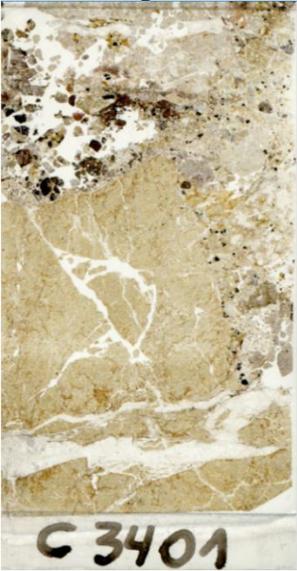
Tabla 4.11 Descripción muestra C33-02. Ignimbrita.

<p>Nicoles paralelos</p> 	<p>Brecha de Falla</p> <p>Clastos 35%</p> <ul style="list-style-type: none">• Subangulosos• Cristales 45 %• Plagioclasa• Anfibol• Cuarzo• Masa fundamental 55 %• Color<ul style="list-style-type: none">// Incolora amarillentaX Marrón• Mineralogía<ul style="list-style-type: none">Vidrio• Protolito• Andesita <p>Matriz 65 %</p> <ul style="list-style-type: none">• Arcillas (Gouge) <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none">• Zeolita relleno de espacios vacíos• Esmectita <p>Vetilla</p> <ul style="list-style-type: none">• Muscovita• Sericita
<p>Nicoles cruzados</p> 	

- Muestra C34-01

Muestra extraída desde una profundidad de 165 metros, zona de brecha de falla donde se encuentran en contacto dos litologías preexistentes (Tabla 4.12), la primera una andesita de igual composición que la muestra C33-02 y la segunda una toba de lapilli parecida muestra C14-01. Estas rocas preexistentes generaron una brecha de falla típica de la subunidad H.

Tabla 4.12 Descripción muestra C34-01. Brecha de falla.

<p>Nicoles paralelos</p> 	<p>Brecha de Falla (Dos Protolitos)</p> <p>Clastos Subangulosos 85%</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Andesita 45 % <ul style="list-style-type: none"> • Cristales <ul style="list-style-type: none"> ➤ 45 % ➤ Plagioclasa ➤ Anfíbol ➤ Cuarzo • Masa fundamental <ul style="list-style-type: none"> ➤ 55 % ➤ Color <ul style="list-style-type: none"> // Incolora amarillenta X Marrón ➤ Mineralogía <ul style="list-style-type: none"> Vidrio ❖ Toba de lapilli 40 % <ul style="list-style-type: none"> • Fragmentos mayores 35% <ul style="list-style-type: none"> ➤ Subredondeados ➤ Fragmentos de roca <ul style="list-style-type: none"> ✓ Andesita ✓ Dacita ➤ Fragmentos de cristales <ul style="list-style-type: none"> ✓ Plagioclasa (Albita) ✓ Cuarzo • Masa fundamental 65 % <ul style="list-style-type: none"> ➤ Tamaño <ul style="list-style-type: none"> Ceniza ➤ Color <ul style="list-style-type: none"> // Incolora a verdosa X Oscura a verde ➤ Composición <ul style="list-style-type: none"> Vidrio volcánico • Textura <ul style="list-style-type: none"> Fragmentada <p>Matriz 15 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arcillas (salbanda de falla) <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zeolita relleno de espacios vacíos • Esmeclita <p>Vetilla</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo • Albita
<p>Nicoles cruzados</p> 	

- Muestra C37-01

Muestra extraída desde una profundidad de 181 metros. Roca muy alterada que contiene vetillas de albita-cuarzo (Ilustración 4.9 y Tabla 4.13) y zeolitas tanto en la roca como en vetillas. El protolito de la roca es una andesita, que presenta una alta meteorización por lo que es difícil de reconocer.

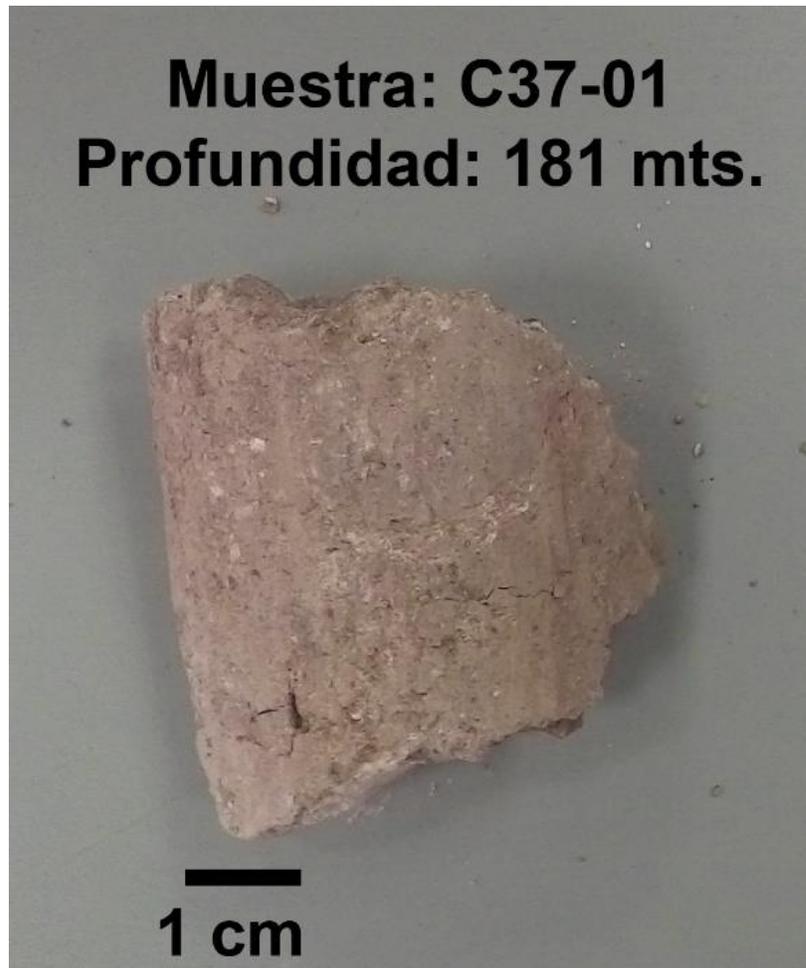
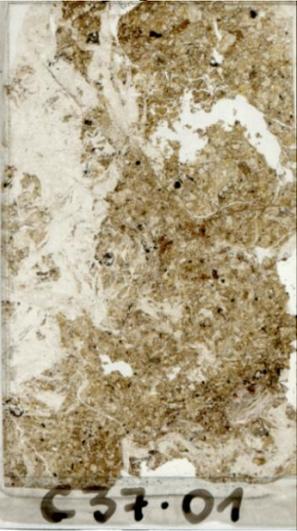
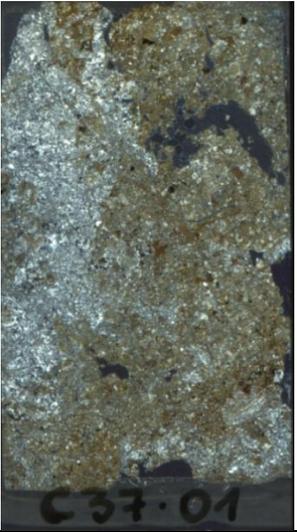


Ilustración 4.9 Muestra C37-01. Brecha de falla. Corte transparente en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Descripción muestra C37-01. Brecha de falla.

<p>Nicoles paralelos</p>  <p>C37-01</p>	<p>Brecha de Falla</p> <p>Clastos 30%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Subangulosos • Cristales 40 % • Plagioclasa • Anfíbol • Cuarzo • Masa fundamental 60 % • Color <ul style="list-style-type: none"> // Incolora amarillenta X Marrón • Mineralogía <ul style="list-style-type: none"> Vidrio • Protolito • Andesita
<p>Nicoles cruzados</p>  <p>C37-01</p>	<p>Matriz 70 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arcillas (Gouge) <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zeolita relleno de espacios vacíos • Esmeclita <p>Vetilla</p> <ul style="list-style-type: none"> • Albita • Cuarzo • Zeolita

A continuación, se muestran tablas resumen de las muestras obtenidas en la Unidad 2 (Secuencia Volcánica) (Tablas 4.14a y Tabla 4.14b).

Tabla 4.14 A) Resumen muestras Secuencia volcánica entre subunidades A y G. B) Resumen muestras de brecha de falla extraídas de la subunidad H.

Muestra (Prof.)	Sub unidad	Nombre	Cristales	Fragmentos mayores de roca		Masa fundamental			Cristalinidad / Tamaño de cristales	Textura	Forma de Cristales	Minerales de Alteración	Vetillas		
				Fragmentos de roca	Fragmentos de Cristales	%	Color	X						Mineralogía	%
C09-01 (42,33 mts.)	A	Dacita	Cuarzo Plagioclasa			35	Oscuro arcilloso	Oscuro	Vidrio	65	Hipocristalina / Equigranular	Esmectita Arcillas de meteorización	Cuarzo		
C09-02 (45,55 mts.)	A	Andesita	Cuarzo Plagioclasa			45	Incolora a marrón	Oscuro	Vidrio	55	Hipocristalina / Equigranular	Esmectita	Cuarzo Albita		
C12-01 (60 mts.)	B	Toba de lapilli		Andesita Dacita Traquita	Cuarzo Feidespatos Plagioclasa	40	Incolora Sucia	Oscuro	Vidrio volcánico	60		Esmectita Arcillas de meteorización	Epidota		
C14-01 (74,3 mts.)	B	Toba de lapilli		Andesita Dacita Traquita	Cuarzo Feidespatos Albita	35	Incolora a Verdosa	Oscuro a Verde	Vidrio volcánico	65		Esmectita Epidota	Cuarzo		
C22-01 (111,7 mts.)	B	Toba de Lapilli		Andesita Traquita	Feidespatos Albita	45	Incolora sucia	Oscuro	Vidrio volcánico	55		Esmectita Cuarzo	Cuarzo		
C23-01 (130,5 mts.)	C	Dacita	Cuarzo Plagioclasa Feidespato			25	Marrón sucio	Oscuro	Vidrio	75	Hipocristalina / Equigranular	Esmectita Epidota Arcillas	Cuarzo Albita		
C30-01 (147,8 mts.)	F	Andesita Criptocristalina	Cuarzo Plagioclasa			15	Incolora sucia	Oscuro	Vidrio	85	Hipocristalina / Equigranular	Arcillas	Cuarzo Albita		
C33-01 (158,75 mts.)	G	Toba soldada (lignimbrita)		Andesita	Cuarzo Plagioclasa	10	Marrón oscura	Oscuro	Vidrio volcánico	90		Calcita Esmectita			

Muestra	Sub unidad	Protolito	Cristales		Fragmentos mayores		Clastos			Masa fundamental		Matriz		Minerales Accesorios	Vetillas			
			Minerales	%	Frag. De Cristales	Frag. de Roca	%	Color	X	Mineralogía	%	Textura	Mineralogía			%		
																	Minerales	%
C33-02 (161,9 mts.)	H	Andesita	Plagioclasa Anfibol Cuarzo	45					Incolora amarillenta	Marrón	Vidrio	55	35	Afanítica	Salbanda	65	Zeolita Esmectita	Muscovita Sericita
C34-01 (165 mts.)	H	Andesita	Plagioclasa Anfibol Cuarzo	45					Incolora amarillenta	Marrón	Vidrio	55	45	Afanítica	Salbanda	15	Zeolita Esmectita	Cuarzo Albita
		Toba de lapilli			Albita Cuarzo	35			Incolora verdosa	Oscuro verde	Vidrio Volcánico	65	40	Fragmentada				
C37-01 (181 mts.)	H	Andesita	Plagioclasa Anfibol Cuarzo	40					Incolora amarillenta	Marrón	Vidrio	60	30	Afanítica	Salbanda	70	Zeolita Esmectita	Albita Cuarzo

Unidad 1 (Gravas Superiores)

Unidad de sedimento terrígeno continental. Es la unidad superficial, con un espesor de 40 metros; es un sedimento matriz soportado, pobremente seleccionado y sin cemento entre los clastos y la matriz.

Los clastos son generalmente fragmentos líticos subredondeados, polimícticos, con un tamaño de grano grueso (entre 4 y 256 mm), con un promedio estimado de 6 cm. El porcentaje de fragmentos líticos en la Unidad es del 35%.

La matriz tiene un tamaño de arena fina a limosa (menor de $\frac{1}{4}$ mm), color café. El porcentaje de matriz en esta unidad es del 65%. No se encontró evidencias de gradaciones en esa unidad o estructuras sedimentarias.

Se encontró agua subterránea a 25 metros de profundidad que correspondería a agua que percola desde el piedemonte cordillerano.

Para corroborar la litología de esta unidad se extrajo la muestra C8-01 (Ilustración 4.10), que se ubicaba a 39,7 metros de profundidad, y a la cual se le realizó un corte trasparente que se muestra en la Tabla 4.15.

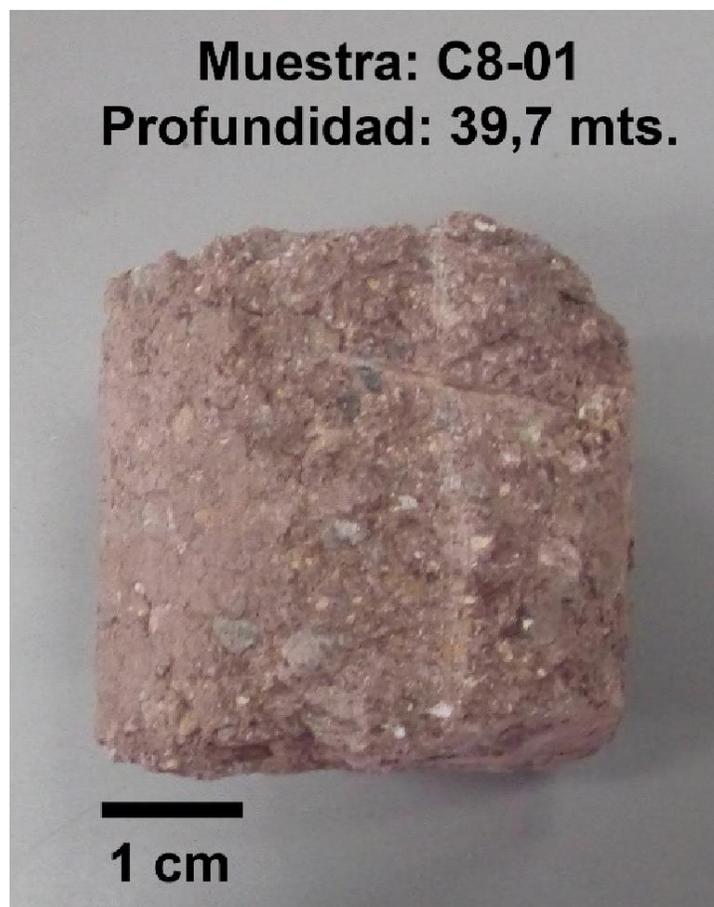
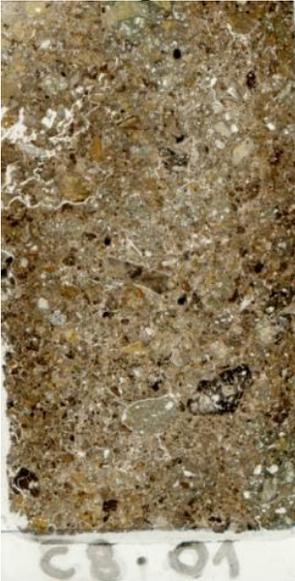


Ilustración 4.10 Muestra C8-01. Gravas. Corte trasparente en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Corte transparente muestra C8-01. Gravas

<p>Nicoles paralelos</p>  <p>C8-01</p>	<p>Gravas</p> <p>Clastos 40%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Subredondeados • Fragmentos líticos Traquita Andesita Dacita • Tamaño Hasta 5 mm <p>Matriz 60%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tamaño Arcilla • Color // Marrón arcilloso X Marrón arcilloso oscuro • Composición Arcillas <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Epidota • Esmectita <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grava fango-arenosa
<p>Nicoles cruzados</p> 	

En el corte transparente (Tabla 4.15), se observan clastos subredondeados con una mala selección. Los clastos son de origen ígneo extrusivos de distintas composiciones, en su mayoría traquitas y andesitas. Es matriz soportado, donde la matriz presenta un color marrón y una granulometría fina de arcilla predominando la esmectita, no se observa cemento. El porcentaje de clastos es 40% y el de matriz es 60%. La descripción microscópica concuerda con observaciones macroscópicas de la unidad que por su granulometría se clasifica por el nombre de Gravas Superiores.

Columna estratigráfica Sondaje S-1

La continuación se muestra la columna estratigráfica del sondaje S-1 (Ilustración 4.11).

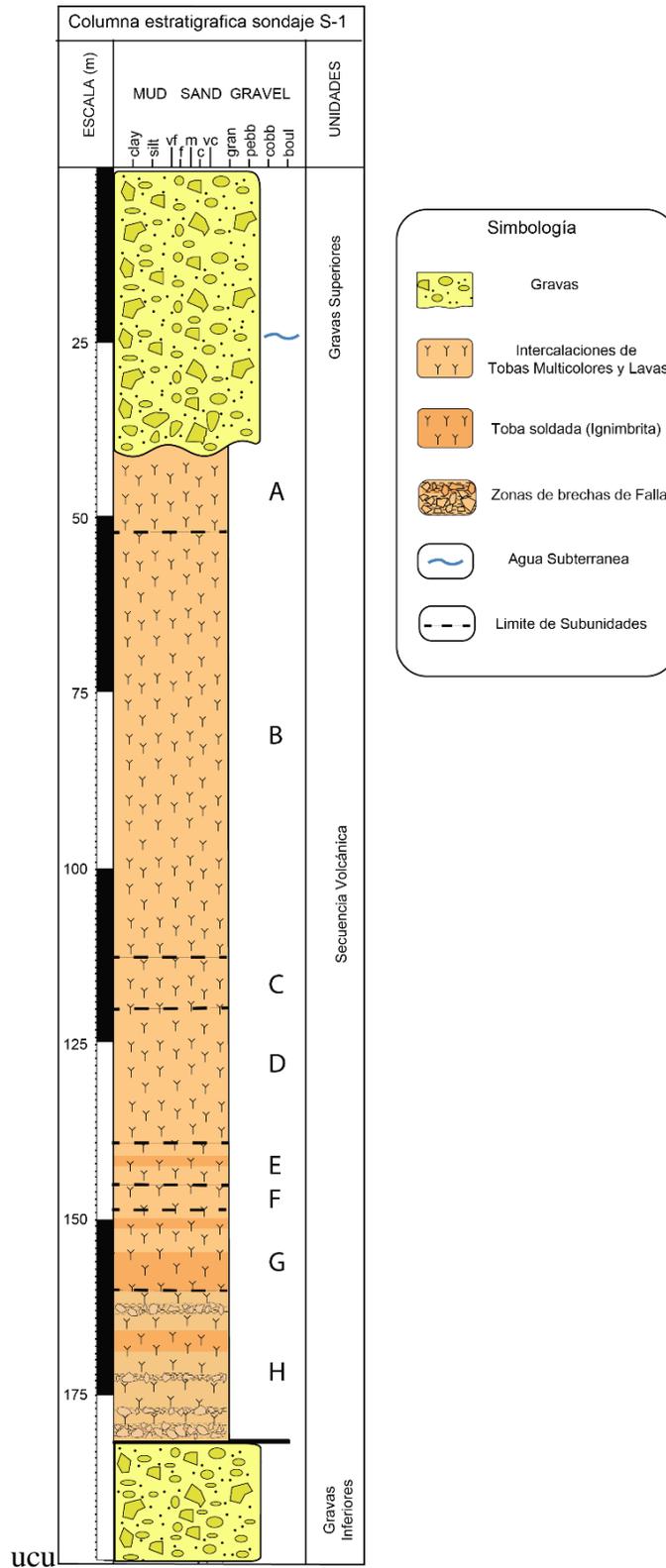


Ilustración 4.11 Columna estratigráfica sondaje S-1.

4.1.2. Descripción geotécnica y de estructuras

Unidad 3 (Gravas Inferiores)

Para esta unidad se evaluó el grado de meteorización y la resistencia del material.

El grado de meteorización de la Unidad 3 en promedio fue III (Tabla 1.4), donde en los sectores con mayor porcentaje de clastos llegó a grado II.

La resistencia del material de los clastos es graduada en R3 (Roca medianamente fuerte) para los clastos volcánicos y R4 para los clastos ígneos. En tanto la resistencia del material de la matriz es graduada en S5 (arcilla muy rígida), la cual es fácilmente marcada con la uña

Unidad 2 (Secuencia Volcánica)

Los parámetros geotécnicos que se estudiaron de esta unidad son *Rock Quality Designation* (RQD), grado de meteorización, resistencia del material y frecuencia de fracturas (ff/m).

El RQD de esta unidad es cercano al 20%, representando una calidad del macizo rocoso muy mala, sin embargo, en el gráfico de la Ilustración 4.25, se puede apreciar zonas de mayor calidad del macizo rocoso donde la tendencia principal es mientras más profundo se encuentra la roca en el sondaje, el RQD aumenta levemente de muy mala a mala, esto tiende hasta el metro 160,3 donde vuelve a tener un RQD muy malo y comienza la zona de brechas de falla (subunidad H) hasta el final de esta unidad.

El grado de meteorización de esta unidad se tiende a mantener entre [III-IV] durante toda la unidad, excepto los primeros 25 metros donde muestra un grado de meteorización entre [IV-V], y desde los 140 metros a los 160 metros donde el grado de meteorización es entre [II-III].

La resistencia del material en la mayor parte de la unidad es R3, definida como roca medianamente fuerte. Esto cambia cuando se encuentra la litología de ignimbritas encontradas en las subunidades E y G de la secuencia estratigráfica, en estas zonas la resistencia de la roca que es identificada como roca extremadamente débil (R0).

La frecuencia de fracturas dentro de la Unidad 2 promedia 12 fracturas por metro, excepto en la subunidad H donde el promedio de fracturas por metro sube a 24 ff/m, debido a la presencia de zonas con brecha de falla.

Dentro de esta unidad se encuentran diferentes estructuras, ya sea vetillas o fracturas. A continuación, se describirán las subunidades definidas en la Secuencia Volcánica (Unidad 2) y sus principales estructuras, desde la subunidad más superficial a la más profunda:

Subunidad:

A. Roca muy fracturada. El macizo se encuentra fracturado y perturbado, sus discontinuidades son regulares, con superficies lisas, paredes moderadamente meteorizadas y alteradas. Las estructuras típicas que se encuentran son:

- a. Vetillas finas de calcita con dureza 2 en la escala de mohs, presentan ángulo predominantemente entre [30°-60°] respecto a la horizontal, resistencia de

relleno S4 (Arcilla Rígida), espesor promedio de 1 mm, rugosidad (JRC) entre [10-12] y el grado de alteración entre la pared de la discontinuidad y la matriz de la roca es similar. Corresponden al 20% de las vetillas.

- b. Vetillas de cuarzo-albita con espesor promedio de 5 mm, tienen una dureza promedio de 3 según la escala de mohs, muestran diferentes ángulos de orientación algunas subhorizontales [0°-30°] y otras subverticales [60°-90°] resistencia de relleno S5 (Arcilla muy rígida), rugosidad (JRC) entre [8-10] y el grado de alteración de la pared es similar al de la matriz. Corresponden al 80% de las vetillas del tramo.

B. El macizo se encuentra fuertemente fracturado en bloques con pequeñas zonas perturbadas. Las discontinuidades tienen en promedio una condición regular con superficies lisas, paredes moderadamente meteorizadas y alteradas. Las estructuras típicas son:

- a. Vetillas de calcita de espesor promedio de 2 mm, poseen una dureza de 2 en la escala de mohs, con ángulo de orientación subhorizontal [0°-30°] resistencia de relleno S6 (Arcilla dura), rugosidad característica entre [6-8] y el grado de alteración de la pared es similar a la matriz de la roca. Estas vetillas representan un 5% del total.
- b. Gran cantidad de vetillas de cuarzo-albita, dureza de 3 según la escala de mohs, de espesor promedio de 3 mm y un máximo de 10 mm, con ángulos de orientación predominante entre [60°-90°] y [30°-60°], resistencia de relleno S5 (arcilla muy rígida), rugosidad promedio entre [4-8] y el grado de alteración de la pared de las discontinuidades es similar al de la roca. Estas vetillas corresponden al 93% total.
- c. Vetilla de Feld. K-Qz, vetillas de dureza 6 según la escala de mohs, con espesor promedio de 10 mm, ángulo de orientación entre [0°-30°], resistencia de relleno R2 (Roca débil), rugosidad promedio entre [8-10] y el grado de alteración de la pared es ligeramente mayor en relación con la matriz. Estas vetillas corresponden al 2% del total.

C. Macizo se encuentra fuertemente fracturado y desintegrado, las discontinuidades son de superficie lisas con paredes moderadamente meteorizadas y alteradas. La estructura típica es la siguiente:

- a. Vetillas de cuarzo-albita, con espesor promedio de 5 mm y un máximo de 12 mm, dureza de 3 según la escala de mohs sus rugosidades van entre [4-8], con ángulos de orientación principalmente entre [0°-30°], resistencia de relleno S5 (Arcilla muy rígida) y el grado de alteración de las paredes están levemente meteorizadas con respecto a la matriz.

D. El macizo se encuentra fracturado y perturbado. Las discontinuidades tienen condiciones regulares con superficies lisas, paredes moderadamente meteorizadas y alteradas. Las estructuras que se encuentran en esta subunidad son:

- a. Vetillas cuarzo-albita tienen con dureza de 3 en la escala de mohs, un espesor promedio 3 mm, en su mayoría tienen una rugosidad entre [4-6], con orientación en todas direcciones, predominantemente entre [0°-30°] y [60°-90°], resistencia de relleno S5 (arcilla muy rígida) y la alteración de paredes es baja con respecto a la matriz. Corresponden al 85% de las vetillas en esta subunidad.
 - b. Vetillas de cuarzo, presentan una dureza de 7 en la escala de mohs, espesor promedio de 3 mm, con una rugosidad característica entre [6-8], orientación mayoritariamente entre [0°-30°], resistencia de relleno R2 (Roca débil) y el grado de alteración de las paredes es ligeramente mayor con respecto a la matriz. Corresponden al 15 % de las vetillas.
 - c. Fractura subvertical con espejo de falla. Las estrías de falla muestran un desplazamiento en diagonal con un ángulo de 70° con respecto a la horizontal, tiene un largo aproximado 7 metros y comienza en el 130,5 de profundidad del sondaje.
- E. Macizo de roca fuertemente fracturado en bloques con algunas zonas perturbadas. Las discontinuidades muestran superficies lisas con paredes moderadamente meteorizadas y alteradas. Las estructuras típicas que se encuentran en esta subunidad son:
- a. Vetillas cuarzo-albita presentan una dureza de 3 con respecto a la escala de mohs, espesor promedio 4 mm, una rugosidad entre [6-8], con ángulos predominantes entre [30°-60°], resistencia de relleno S5 (arcilla muy rígida) y grado de alteración de las paredes levemente meteorizadas. Corresponden al 70% de las vetillas.
 - b. Vetillas de cuarzo con dureza 7 en la escala de mohs, espesor promedio 12 mm, con orientación entre [0°-30°], rugosidad característica entre [6-8], resistencia de relleno R2 (Roca débil) y el grado de alteración de las paredes es regular con superficies lisas y moderadamente meteorizadas. Corresponden al 30% de las vetillas.
- F. Macizo fuertemente fracturado en bloques con discontinuidades de superficie rugosa con paredes levemente meteorizadas. Las estructuras que se encuentran en el tramo son:
- a. Vetillas de cuarzo-albita con dureza 4 en escala de mohs, espesor promedio de 4 mm, con una rugosidad entre [8-10], con ángulos entre [60°-90°], resistencia de relleno S5 (arcilla muy rígida) y el grado de alteración de las paredes ligeramente mayor en relación con la matriz. Corresponden al 60 % de las vetillas.
 - b. Vetillas de cuarzo de dureza 7 en la escala de mohs, espesor promedio de 7 mm, rugosidad entre [10-12], ángulo de orientación entre [0°-30°], resistencia de relleno R2 (Roca débil) y con un grado de alteración de la pared igual al de la matriz. Corresponden al 40 % de vetillas.

- G. Macizo fuertemente fracturado en bloques con discontinuidades regulares con superficies lisas, paredes moderadamente meteorizadas y alteradas. Las estructuras que se encuentran en este tramo son:
- a. Vetillas de cuarzo-albita, presentan una dureza 3 en la escala de mohs, espesor promedio 2 mm, rugosidad entre [4-6], ángulo de orientación [30°-60°], resistencia de relleno S5 (arcilla muy rígida) y las paredes se encuentran levemente alteradas con respecto a la matriz. Corresponden al 40 % de las vetillas.
 - b. Vetillas de cuarzo, dureza de 7 en la escala de mohs, espesor promedio entre 7 mm, rugosidad entre [8-12], ángulo de orientación entre [0°-30°], resistencia de relleno R2 (Roca débil) y las paredes se encuentran medianamente alteradas con respecto a la matriz. Corresponden al 50% de las vetillas.
 - c. Vetillas de calcita de dureza 2 en la escala de mohs, espesor promedio de 3 mm, rugosidad entre [4-6, orientación vetilla entre [0°-30°], resistencia de relleno S4 (Arcilla rígida) y la alteración de las paredes es la misma que la matriz.
- H. Macizo fuertemente fracturado y quebrado, se aprecian estructuras de desintegración del macizo rocoso, conformando un conjunto pobremente trabado de bloques y trozos de roca angulosos.

En esta subunidad se reconocen zonas de brechas de falla con espesores entre 15 y 130 cm, la zona de brecha de falla principal se ubica al final de la subunidad H en contacto por falla con la unidad Gravas Inferiores (Unidad 3), entre los 180 y 181,3 metros de profundidad.

En las zonas de brechas de fallas se muestra un porcentaje de salbanda de falla (*gouge*) del 25 %, porcentaje de clastos de tamaño mayor a 2 mm del 65% y porcentaje de clastos menores a 2 mm del 10 %.

Las vetillas que se encuentran en las zonas de brechas de falla muestran discontinuidades abruptas debido a la trituración del protolito (Ilustración 4.12).

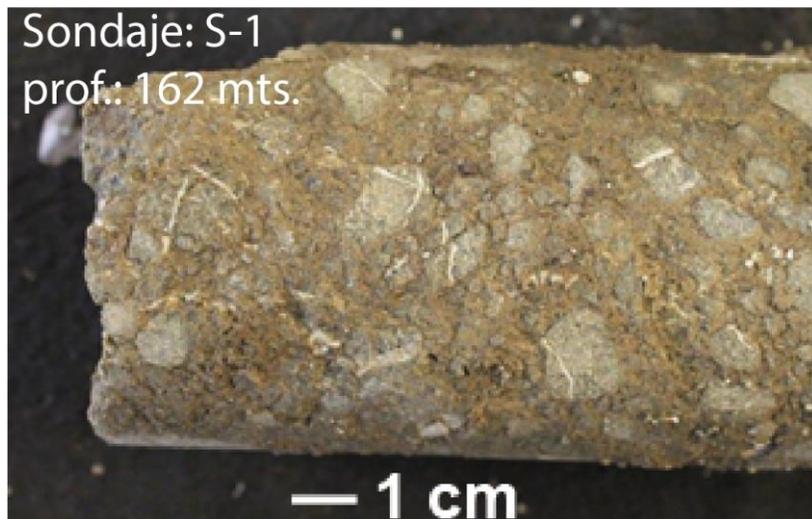


Ilustración 4.12 Muestra de brecha de falla de la subunidad H.

- a. Estructura encontrada a los 162,5 metros de profundidad, donde se encuentra un espejo de falla subvertical que presenta estrías de falla diagonales con un ángulo de 70° con respecto a la horizontal. En la Ilustración 4.13 se puede ver el plano de falla y con líneas rojas se sigue el lineamiento de las estrías de falla presentes. Esta estructura similar a la estructura encontrada en la subunidad D sugiere que esta orientación es recurrente en la zona de daño de la Falla San Ramón.



Ilustración 4.13 Plano de falla encontrado en la subunidad H, con líneas rojas se sigue la dirección de las estrías de falla (70°).

Unidad 1(Gravas Superiores)

Los parámetros geotécnicos con los que se evaluó esta unidad son, el grado de meteorización y la resistencia del material.

En los 5 metros más superficiales de esta unidad, el grado de meteorización fue VI, lo que corresponde por la presencia de suelo recientemente depositado y con alto grado de meteorización. En el resto de la unidad el grado de meteorización promedio es III, con los últimos 10 metros de la unidad alcanzado el grado II.

Los clastos presentaron una resistencia R3 (roca medianamente fuerte) y la resistencia del material de la matriz fue S5 (arcilla muy rígida) la cual es fácilmente marcada con la uña.

Análisis FTIR y Rx

Para verificar de mejor manera la composición de vetillas y rocas de la Unidad 2 se tomaron muestras para análisis de Rx y FTIR, y así poder correlacionar lo visto en cortes transparentes y muestras de mano. A continuación, se muestra la ubicación de las muestras realizadas para los análisis FTIR y Rx (Ilustración 4.14).

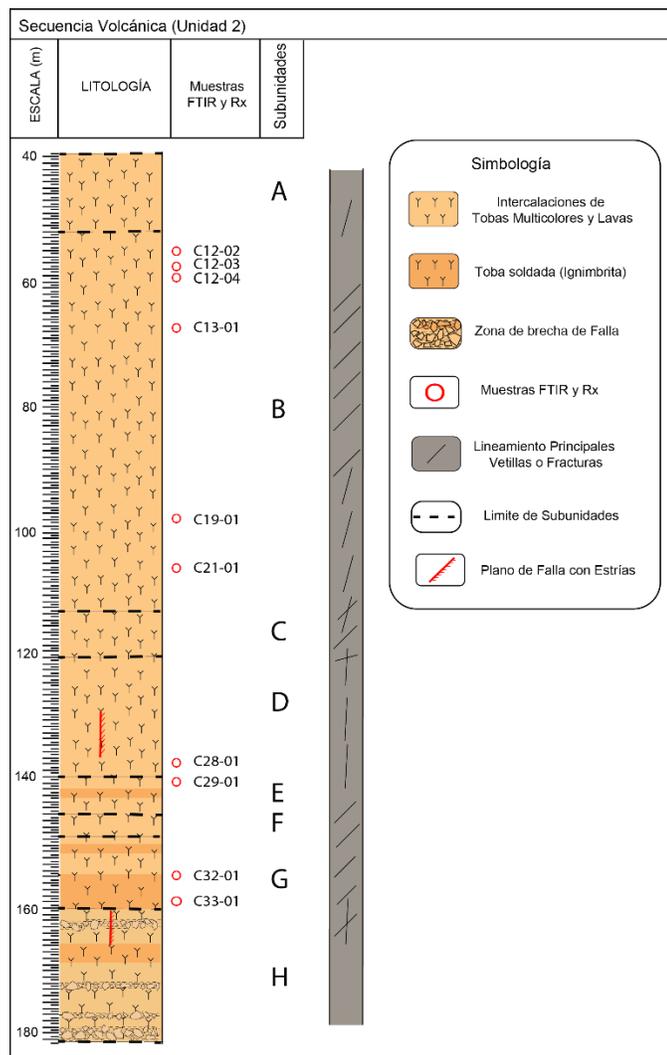


Ilustración 4.14 Columna unidad 2. Con ubicación muestras FTIR y Rx.

- Vetilla C12-02

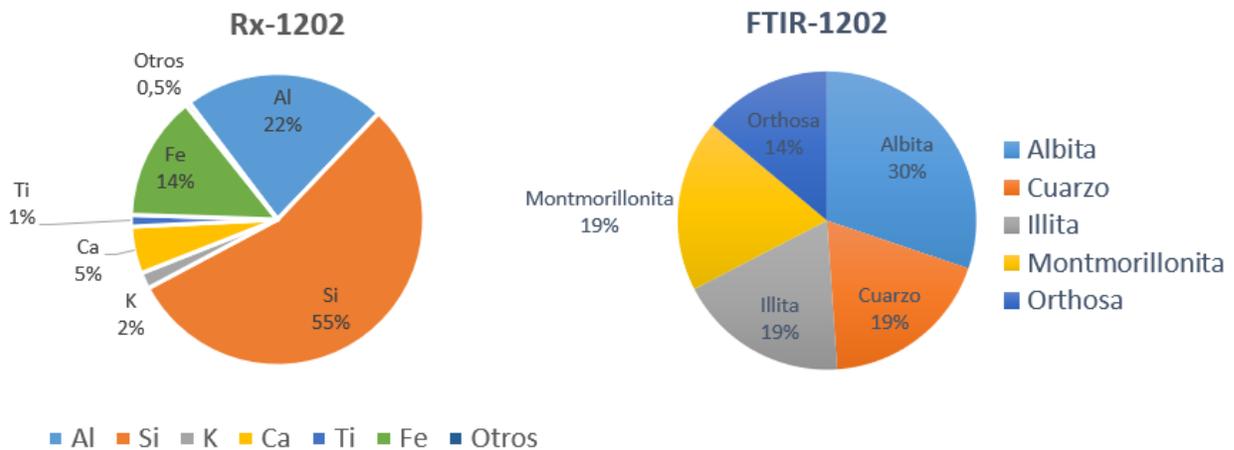


Ilustración 4.15 Resultados Rx y FTIR vetilla C12-02

La vetilla C12-02 se encuentra a una profundidad de 57,5 metros. Tiene una orientación subvertical, espesor de 3 mm, resistencia de relleno S5 (arcilla muy rígida). Su grado de alteración de las paredes es similar a la de la matriz de la roca, el relleno es blando de color blanco y textura arcillosa.

Los resultados de difracción de rayos x (Rx) (Ilustración 4.15), muestran que los especímenes cristalinos más importantes encontrados en la muestra son el Si (55,1%), Al (22,38%), Fe (13,76%), Ca (5,2%) y en menor porcentaje el K, Ti, Mn, Sr y V los cuales se pueden asociar a impurezas.

En los resultados de espectrometría infrarroja (FTIR) (Ilustración 4.15), los minerales de tamaño arcillas presentes en la muestra son; albita (30,2%), cuarzo (18,7%), montmorillonita (18,7%), illita (18,5%), y orthosa (13,9%).

Dado estos resultados la vetilla C12-02 es de cuarzo-albita-. Se estima que la presencia de montmorillonita se debe a alteración por hidrólisis de la albita. La illita se asocia a meteorización hídrica.

- Vetilla C12-03

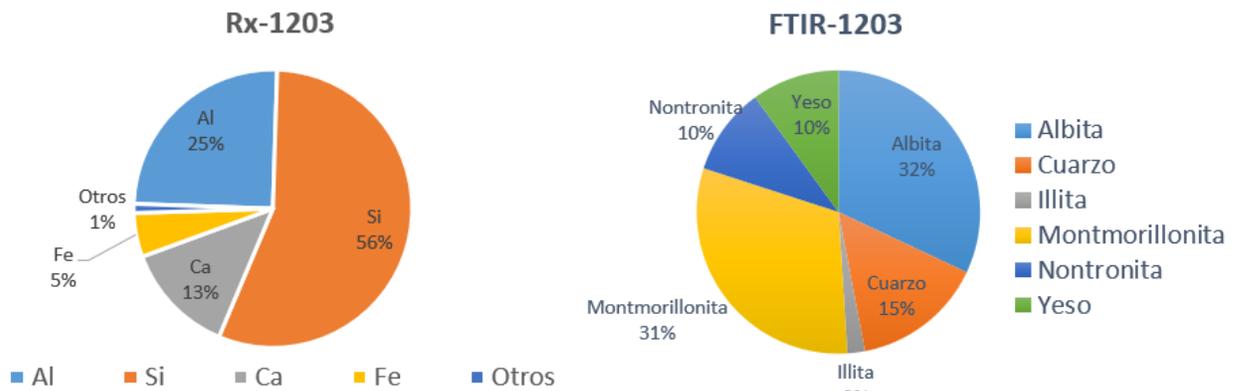


Ilustración 4.16 Resultados Rx y FTIR vetilla C12-03

La vetilla C12-03 se encuentra a una profundidad de 58,7 metros, tiene un ángulo de 15° con respecto a la horizontal, espesor de 4 mm, resistencia de relleno S5 (arcilla muy rígida); el grado de alteración de las paredes es similar a la de la matriz de la roca, el relleno es blando de color blanco y textura arcillosa.

Los resultados de difracción de rayos x (Rx) (Ilustración 4.16), muestran que los especímenes cristalinos más importantes encontrados en la muestra son el Si (55,8%), Al (24,9%), Ca (13,05%), Fe (5,1%) y en menor porcentaje el K, Ti, Ba, Mn, Sr y Cu los cuales se pueden asociar a impurezas.

En los resultados de espectrometría infrarroja (FTIR) (Ilustración 4.16), los minerales de tamaño arcillas presentes en la muestra es la albita (32%), montmorillonita (31%), cuarzo (15%), nontronita (10%), yeso (10%) e illita (2%).

Dado estos resultados la vetilla C12-03 es de cuarzo-albita, con mayor cantidad de albita y esta a su vez mayormente alterada a montmorillonita. La montmorillonita es producto de la hidrólisis de la albita, dada una meteorización hídrica, que también explica la presencia de Fe concordante con la illita. La nontronita se asocia a alteración de ceniza volcánica y pertenece al grupo de la esmectita por lo que se asocia a la meteorización de la roca que contiene la vetilla. El yeso identificado en el FTIR, al no aparecer especímenes cristalinos de azufre en la difracción de rayos x se considera un error del método.

- Vetilla C12-04

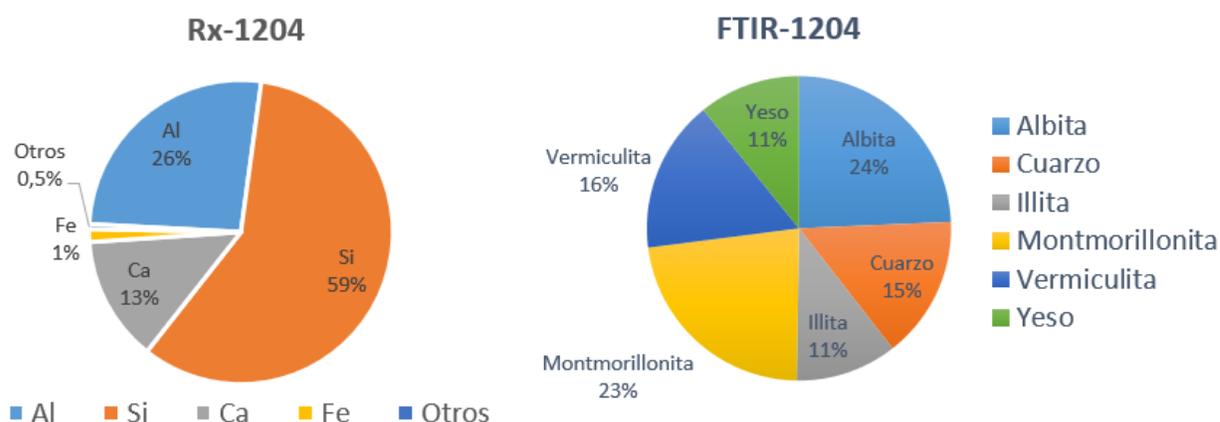


Ilustración 4.17 Resultados Rx y FTIR vetilla C12-04

La vetilla C12-04 se encuentra a 59,5 metros de profundidad, tiene un ángulo de 45°, espesor de 3 mm, resistencia de relleno S5 (arcilla muy rígida); el grado de alteración en las paredes es similar al de la matriz de la roca y el relleno es arcilloso de color blanco.

Los resultados de difracción de rayos x (Rx) (Ilustración 4.17), muestran que los especímenes cristalinos más importantes encontrados en la muestra son el Si (58,47%), Al (26,32%), Ca (13,33%) y en menor porcentaje el Fe, K, Ti, Mn y Sr, los cuales se pueden asociar a impurezas.

En los resultados de espectrometría infrarroja (FTIR), los minerales de tamaño arcillas presentes en la muestra es la albita (24,3%), montmorillonita (22,7%), vermiculita (16,2%), cuarzo (15,1%), yeso (10,8%) e illita (10,8%).

Dado estos resultados la vetilla está compuesta por albita-cuarzo, la albita mayoritariamente se encuentra alterada por hidrólisis a montmorillonita y la presencia de illita se correlaciona a arcillas de meteorización en esta zona. El yeso y la vermiculita que aparecen en el FTIR, se asocian a un error del análisis ya que en la difracción de rayos x no existen especímenes cristalinos de azufre (S) y magnesio respectivamente, además de no tener correlación a la vetilla estudiada.

- Vetilla C13-01

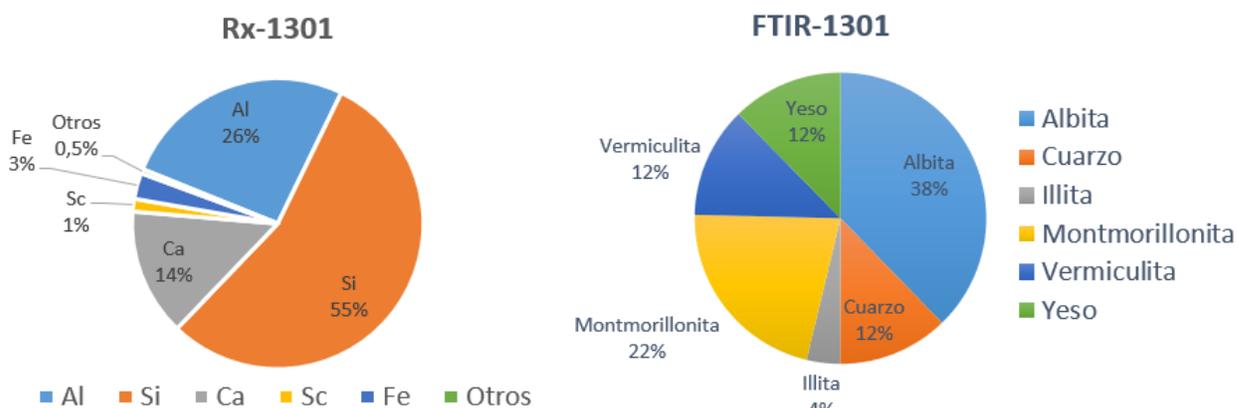


Ilustración 4.18 Resultados Rx y FTIR vetilla C13-01

La vetilla C13-01 se encuentra a una profundidad de 68,6 metros, tiene un ángulo de 55°, espesor de 5 mm, resistencia de relleno S5 (arcilla muy rígida); el grado de alteración de la pared es similar al de la matriz de la roca, el relleno es blanco y arcilloso.

Los resultados de difracción de rayos x (Rx) (Ilustración 4.18) muestran que los especímenes cristalinos más importantes encontrados en la muestra son el Si (54,96%), Al (26,08%), Ca (14,17%) y en menor porcentaje el Fe, K, Ti, Mn y Sr, los cuales se pueden asociar a impurezas.

En los resultados de espectrometría infrarroja (FTIR), los minerales de tamaño arcillas presentes en la muestra es la albita (37,7%), montmorillonita (21,6%), cuarzo (12,3%), yeso (12,3%), vermiculita (12,3%) e illita (3,7%).

Dado estos resultados la vetilla es de albita-cuarzo, la albita mayoritariamente se encuentra alterada por hidrólisis a montmorillonita. La illita presente en los resultados de FTIR se asocia a los especímenes cristalinos de Fe en difracción de rayos x y se debe su presencia a meteorización hídrica. El yeso y la vermiculita que aparecen en el FTIR, se asocia a un error del análisis ya que en la difracción de rayos x no existen especímenes cristalinos de azufre (S) y magnesio respectivamente, además de no tener correlación a la vetilla estudiada.

- Vetilla C19-01

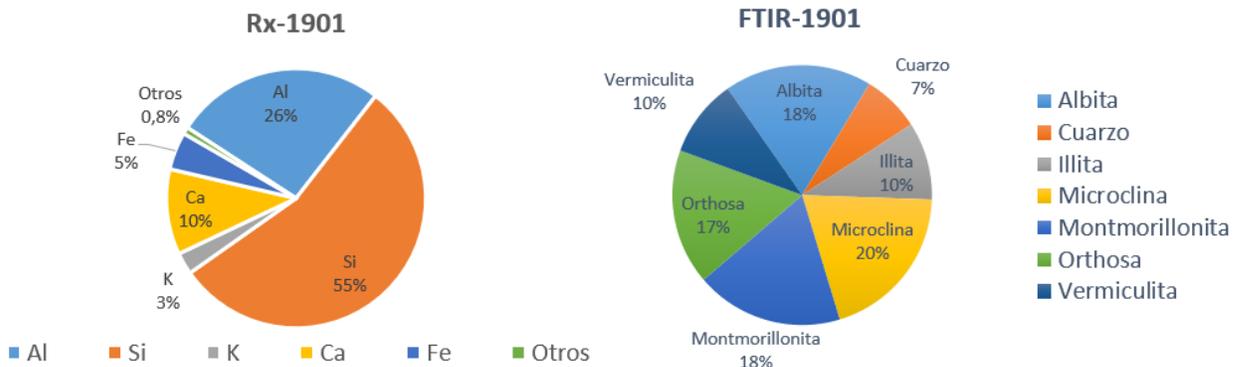


Ilustración 4.19 Resultados Rx y FTIR vetilla C19-01

La vetilla C19-01 se ubica a 98,85 metros de profundidad, tiene un ángulo de 10°, espesor de 30 mm, resistencia de relleno R2 (Roca débil); el grado de alteración de la pared es levemente mayor al de la matriz de la roca, el relleno es rosado blanquecino y de alta dureza.

Los resultados de difracción de rayos X (Rx) (Ilustración 4.19), muestran que los especímenes cristalinos más importantes encontrados en la muestra son el Si (54,64%), Al (26,32%), Ca (10,64%), Fe (4,69%), K (2,72%) y en menor porcentaje el Ti, Mn, Tm, Zr, V, Sr y Y, los cuales se pueden asociar a impurezas.

En los resultados de espectrometría infrarroja (FTIR), el mineral más importante presente en la muestra es la microclina (19,8%), montmorillonita (18,4%), albita (18,4%), ortosa (16,9%), vermiculita (9,7%), illita (9,7%) y cuarzo (7,2%).

Los resultados establecen que esta vetilla está compuesta principalmente por feldespatos (microclina y orthosa). También por la alta presencia de montmorillonita en los resultados del FTIR se deduce que la vetilla también está compuesta por albita y parte de esta albita se altera por montmorillonita. La illita corresponde a arcillas de meteorización que se puede correlacionar con el 5% de especímenes cristalinos de Fe. La vermiculita que aparece en el FTIR, se asocia a un error del análisis ya que en la difracción de rayos x no existen especímenes cristalinos de magnesio.

- Vetilla C21-01

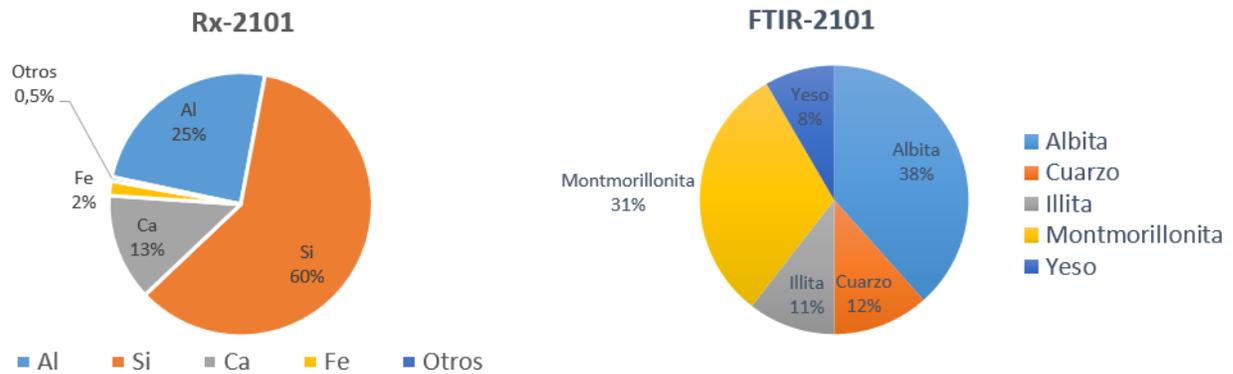


Ilustración 4.20 Resultados Rx y FTIR vetilla C21-01

La vetilla C21-01 se ubica a 106,3 metros de profundidad, tiene un ángulo cercano a los 90° espesor de 3 mm, resistencia de relleno S5 (arcilla muy rígida); el grado de alteración de la pared es similar al de la matriz de la roca, el relleno es color blanco de textura arcillosa.

Los resultados de Rx (Ilustración 4.20) muestran en mayor porcentaje a los especímenes cristalinos de Si (59,97%), Al (24,63%) y Ca (13,13%) y en menor porcentaje Fe, K, Mn, Ti, Sr y Zr, los cuales se pueden asociar a impurezas y no contemplar para el análisis.

En los resultados de FTIR, el mineral más importante presente en la muestra es la albita (38,4%), montmorillonita (31,1%), cuarzo (11,6%), illita (10,5%) y yeso (8,4%).

Los resultados establecen que esta vetilla está compuesta por cuarzo-albita, con parte de la albita alterada por hidrólisis a montmorillonita. El yeso que aparece en el FTIR, se asocia a un error del análisis ya que en la difracción de rayos x no existen especímenes cristalinos de azufre (S). La illita se asocia al 2% de especímenes cristalinos de Fe y correspondería a arcillas de meteorización.

- Vetilla C28-01

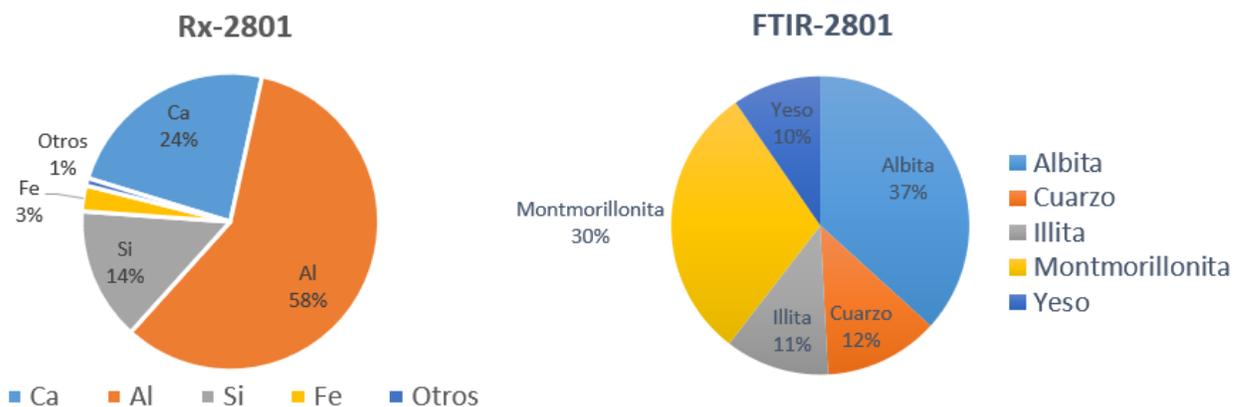


Ilustración 4.21 Resultados Rx y FTIR vetilla C28-01

La vetilla C28-01 se ubica a 138,4 metros de profundidad, tiene un ángulo de 2°, espesor de 10 mm, resistencia de relleno R1 (roca muy débil); el grado de alteración de la pared se encuentra ligeramente alterada en comparación con la matriz de la roca, el relleno es color blanco y de dureza media.

Los resultados de Rx (Ilustración 4.21) muestran al porcentaje de especímenes cristalinos de Si (58,25%), Al (23,72%) y Ca (14,44%) y en menor porcentaje Fe, K, Mn, Ti y Sr, los cuales se pueden asociar a impurezas y no contemplar para el análisis.

Los minerales presentes en los resultados de la espectrometría infrarroja (FTIR) son la albita (36,7%), montmorillonita (29,9%), cuarzo (12,4%), illita (11,3%) y yeso (9,6%).

Analizando los resultados a la vetilla se le asocia una mineralización cuarzo-albita, la albita en un alto porcentaje alterada por hidrolisis a montmorillonita. El yeso presente en los resultados de FTIR se asocia a error en el análisis debido a que no existen especímenes cristalinos de azufre en la difracción de rayos x. Los especímenes cristalinos de Fe se asocian a la illita que correspondería a arcilla por meteorización presentes en la vetilla.

- Vetilla C29-01

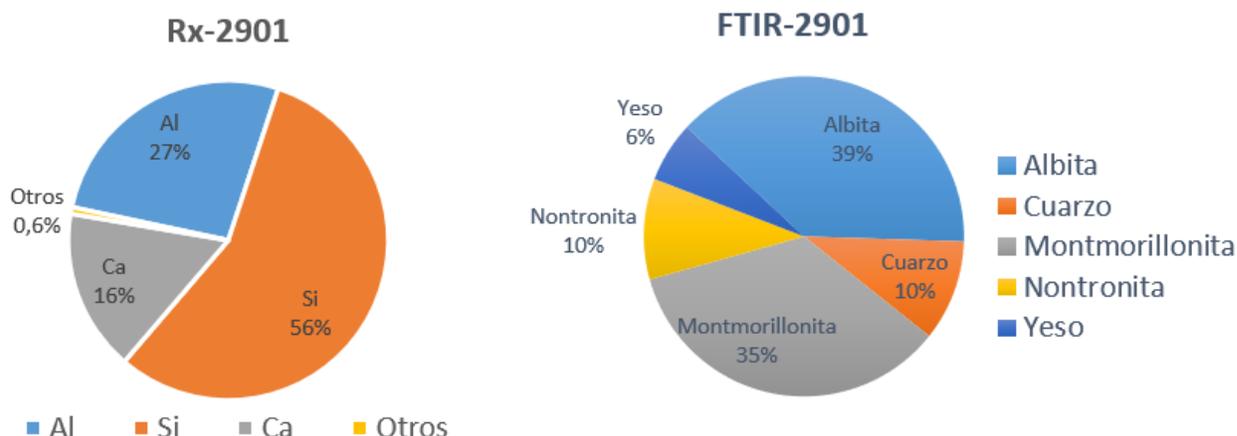


Ilustración 4.22 Resultados Rx y FTIR vetilla 29-01

La vetilla C29-01 se encuentra a una profundidad de 142,8 metros, tiene un ángulo de 20°, espesor de 3 mm, resistencia de relleno S5 (arcilla muy rígida); el grado de alteración de las paredes es levemente mayor al de la matriz de la roca, el relleno es color blanco con dureza media.

Los resultados de Rx (Ilustración 4.22), muestran al porcentaje de especímenes cristalinos de Si (56,21%), Al (26,74%) y Ca (16,4%) y en menor porcentaje Fe, K, Mn y Sr, los cuales se pueden asociar a impurezas y no contemplar para el análisis.

Los minerales resultantes de la espectrometría infrarroja son la albita (38,6%), montmorillonita (35%), cuarzo (10,2%), nontronita (10,2%) y yeso (6,1%).

Comparando ambos análisis se concluye que el mineral de nontronita que muestra un alto porcentaje en los resultados de FTIR no se condice con la cantidad de Fe mostrada en el análisis de Rx, por lo que quedaría descartada como arcilla predominante en esta estructura.

La vetilla C29-01 tiene una composición de cuarzo-albita, esta última mayormente alterada a montmorillonita. El yeso correspondería a un error del análisis FTIR porque en la difracción de rayos x no se encuentran especímenes cristalinos de azufre.

- Muestra de roca C32-01

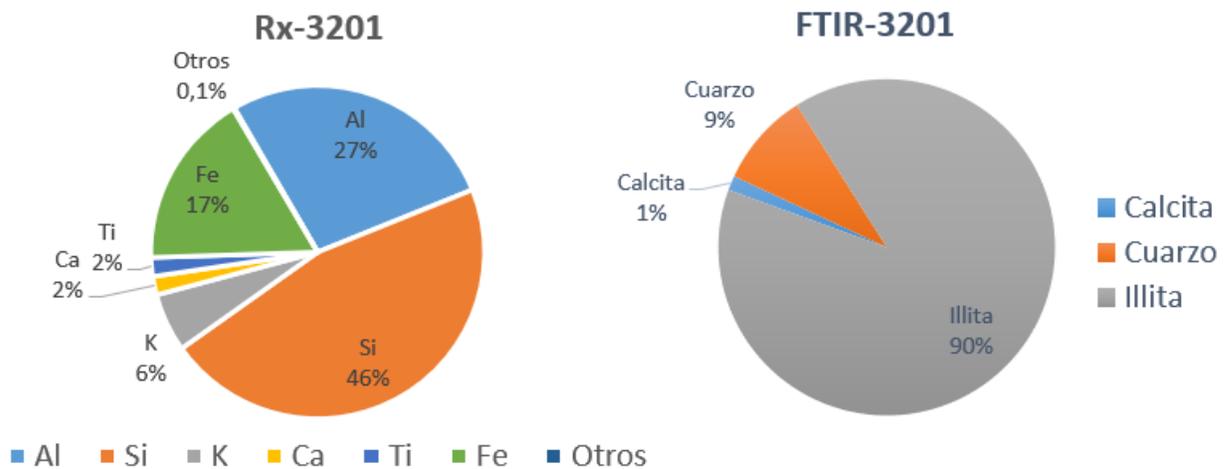


Ilustración 4.23 Resultados Rx y FTIR vetilla C32-01

Muestra de roca de la ignimbrita de la subunidad G, a una profundidad de 155,7 metros, la roca es extremadamente débil por lo que se puede marcar por la uña, la roca tiene un color marrón rojizo oscuro.

Los resultados de Rx (Ilustración 4.23), muestran el porcentaje de especímenes cristalinos de Si (46,28%), Al (27,23%), Fe (17,04%) Y K (5,68%) y en menor porcentaje Ti, Ca, V, Mn y Zn, los cuales se pueden asociar a impurezas.

Los minerales resultantes de la espectrometría infrarroja muestran un mineral claramente superior en porcentaje y es la illita con un 89,5%, además un menor porcentaje de cuarzo (9,1%) y calcita (1,4%).

Por los resultados se puede deducir que esta roca tiene un alto grado de meteorización por el alto porcentaje de illita presente, esto se debe a la elevada porosidad de la roca (ignimbrita) y también su alta permeabilidad, que genera mayor paso hídrico por esta zona y con ello mayor meteorización hídrica generando la formación de illita.

El cuarzo y la calcita se encuentran presentes en menor porcentaje en la roca y se observaron en el corte transparente de la roca (Tabla 4.10)

- Muestra de roca C33-01

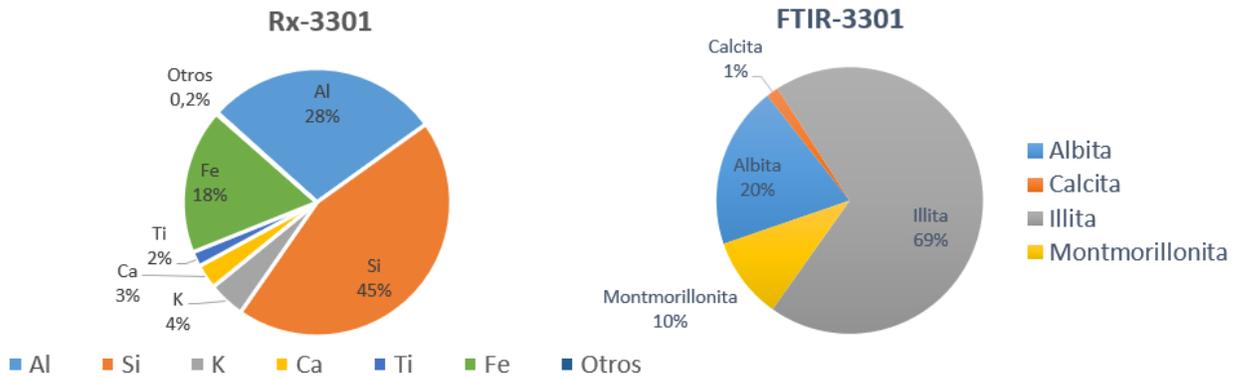


Ilustración 4.24 Resultados Rx y FTIR vetilla C33-01

Muestra de roca de las ignimbritas de la subunidad G, a una profundidad de 158,7 metros. Esta muestra fue analizada en la misma roca que la muestra C32-01, pero mostraba un color más oscuro.

Los resultados de Rx (Ilustración 4.24), muestran los porcentajes de especímenes cristalinos de Si (44,57%), Al (28,44%), Fe (17,56%), K (4,45%) y Ca (2,97%) y en menor porcentaje Ti, V, Mn, Sr, Cu, Zn y Y, los cuales se pueden asociar a impurezas. La mayor cantidad de impurezas y de elementos más pesados, por ejemplo, Cobre (Cu), Estroncio (Sr) e Itrio (Y), explicaría el oscurecimiento del color de la roca. Además, debido a la alta permeabilidad de la roca los elementos tienen a depositarse por gravedad en la parte inferior de la roca.

Los minerales resultantes de la espectrometría infrarroja illita como el mineral más abundante con un 69% la sigue la albita con 19,7%, la montmorillonita con un 9,9 % y finalmente la calcita con un 1,5%.

Los resultados son similares a la muestra C32-01, donde vuelve a predominar mineralógicamente la illita y como los otros minerales mostrados por el FTIR se encuentran in-situ en la roca (Tabla 4.10).

En anexos 9.2 se encuentra una tabla con los resultados completos de la difracción de rayos x y FTIR de las muestras extraídas, a continuación, en la Tabla 4.16 se resumen los resultados de difracción de rayos x y FTIR.

Tabla 4.16 Tabla resumen resultados difracción de rayos x y FTIR.

MUESTRA	Prof. [m]	Composición	Roca Caja	Subunidad	Vetilla o Roca
C12-02	57,5	Albita-Cuarzo	Toba de lapilli	B	Vetilla
C12-03	58,7	Albita Cuarzo	Toba de lapilli	B	Vetilla
C12-04	59,5	Albita-Cuarzo	Toba de lapilli	B	Vetilla
C13-01	68,6	Albita Cuarzo	Toba de lapilli	B	Vetilla
C19-01	98,85	Feld K- Cuarzo	Toba de lapilli	B	Vetilla
C21-01	106,3	Albita Cuarzo	Toba de lapilli	B	Vetilla
C28-01	138,4	Albita-Cuarzo	Toba de lapilli	D	Vetilla
C29-01	142,8	Albita Cuarzo	Toba de lapilli	E	Vetilla
C32-01	155,7	-	Ignimbrita	G	Roca
C33-01	158,7	-	Ignimbrita	G	Roca

Columna Sondaje S-1

Con los datos litológicos, estructurales y geotécnicos se realizó la siguiente columna estratigráfica que muestra paralelamente los lineamientos estructurales más importantes, así como gráficos de los datos geotécnicos como RQD, Grado de Meteorización, Resistencia del Material y Frecuencias de Fracturas (ff/m), además, dentro de la columna estratigráfica se ubican los planos de falla localizados en el sondaje, recordando que estos planos de fallas son subverticales al sondaje y presentan estrías de falla diagonales (Ilustración 4.25).

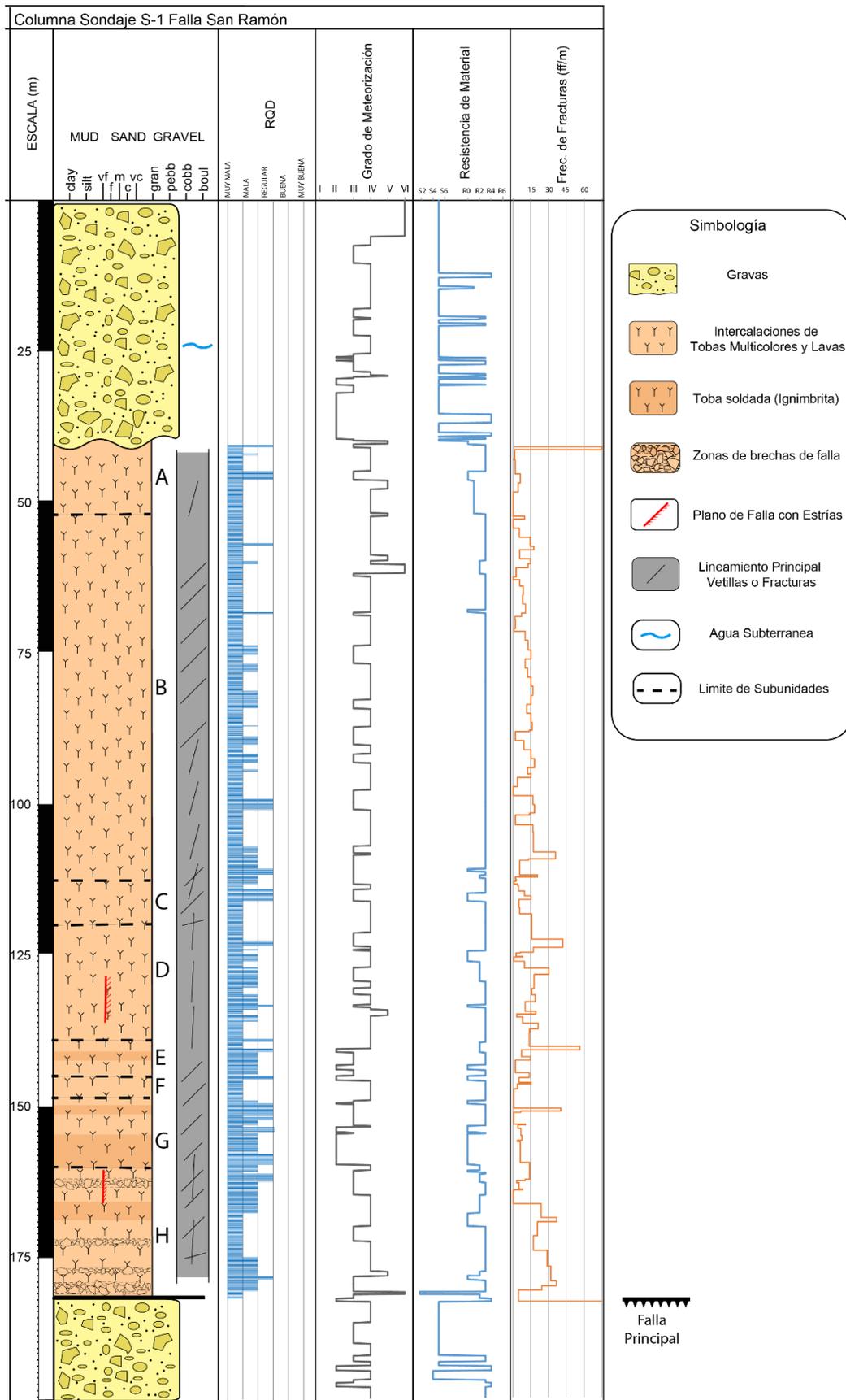


Ilustración 4.25 Columna estratigráfica sondaje S-1, y gráficos de datos geotécnicos

4.1.3. Ensayo Downhole

En los primeros 50 metros del sondaje S-1 se le realizó un ensayo downhole, el cual estuvo a cargo de IDIEM y los resultados obtenidos se muestran en las Tabla 4.17 e Ilustración 4.26.

Tabla 4.17 Resultados ensayo downhole

Cota		Velocidad de onda	
Inferior [m]	Superior [m]	Compresión [m/seg]	Corte [m/seg]
0	9	940	560
9	22	1180	720
22	48	1600	780

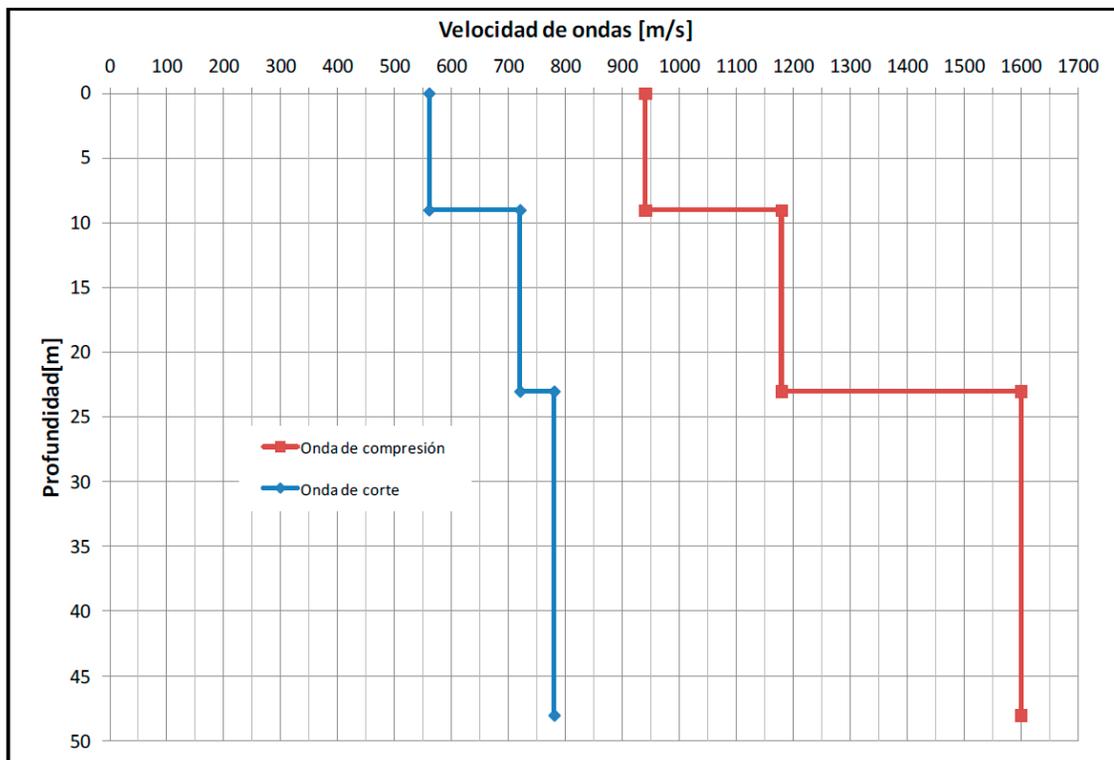


Ilustración 4.26 Gráfico velocidad de onda v/s profundidad (IDIEM, 2017)

Según los resultados del ensayo, a los 22 metros de profundidad la velocidad de compresión aumenta significativamente comparada con el aumento de la velocidad de onda de corte, esto podría corresponder a la presencia de agua subterránea desde esa cota (IDIEM, 2017), ya que litológica y estructuralmente no se encuentra un cambio importante a esa profundidad que pudiera explicar esa diferencia entre las ondas de compresión y corte.

4.2. Sondaje S-2

El sondaje de aire reverso S-2 fue realizado por IDIEM en terreno perteneciente a la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN) ubicado en la comuna de La Reina. El sondaje tuvo un diámetro de 12 pulgadas (30,48 cm), alcanzó una profundidad de 100 metros y se realizó para la instalación de una estación sismológica. Este sondaje se ubicó a 330 metros al oeste del S-1 y a 770 m.s.n.m., las coordenadas geográficas donde se encuentra el sondaje en la siguiente tabla (Tabla 4.18).

Tabla 4.18 Coordenadas geográficas Sondajes S-2

Coordenadas Geográficas Sondaje S-2 (WGS 84)	
358381 E	6300173 S

4.2.1. Descripción Litológica

Unidad S-2

Se obtuvieron muestras representativas de cada metro de perforación. Estas muestras de *cuttings* se describieron litológicamente y se obtuvo la siguiente estratigrafía.

La secuencia es la siguiente, de arriba hacia abajo:

- A. Clastos subredondeados y polimícticos donde se diferencian clastos de andesita, tobas y traquitas (Ilustración 4.27). En los primeros metros se encuentra mayor porcentaje de sedimentarios finos terrígenos que se asocia al suelo de los primeros metros. Zona de dureza normal de perforación.
29 metros
- B. Zona bimíctica. En los dos primeros metros predominan *cuttings* de andesitas angulosas (Ilustración 4.28), mientras en el último metro predomina litología de roca volcánica de composición traquítica. Zona de alta dureza de perforación.
3 metros
- C. Semejante a A (Ilustración 4.29).
25 metros
- D. Muestra con clastos subredondeados, polimícticos donde se diferencian clastos de rocas volcánicas e intrusivas, entre las rocas volcánicas presentes se encuentran andesita, toba y traquita, mientras en rocas ígneas se encuentran clastos de rocas graníticas. Zona con mayor presencia de arcillas y matriz terrígena (Ilustración 4.30). Zona de baja dureza.
43 metros

Por el contexto del sondaje S-2, la Unidad S-2 se interpreta como gravas terrígenas continentales, depositadas en la cuenca de Santiago. Las distintas zonas del sondaje se asocian a diferentes porcentajes de clastos versus matriz, donde en la secuencia la parte B se toma como *boulders* de gran tamaño debido a que en esos metros se pierde lo polimíctico del sondaje, pero luego el sondaje sigue mostrando clastos con caras subredondeadas y polimíctico. En el sondaje se encontró agua subterránea a los 60 metros de profundidad.

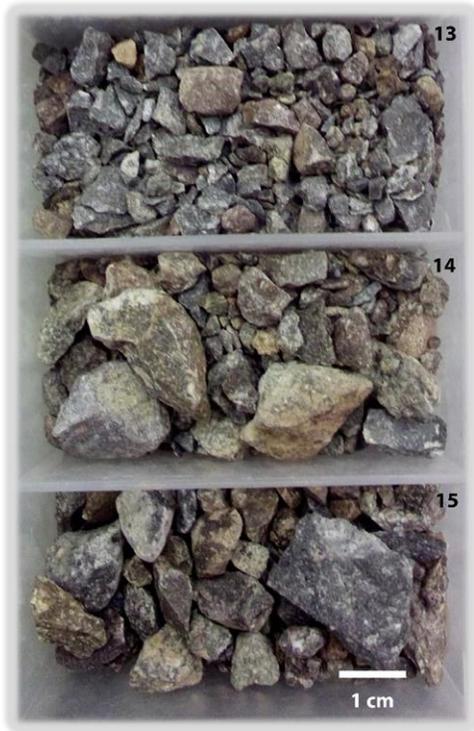


Ilustración 4.27 Litología típica zona A

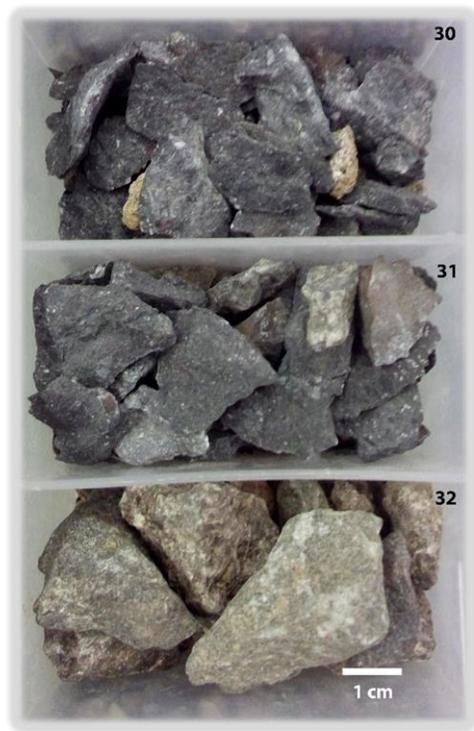


Ilustración 4.28 Litología típica zona B



Ilustración 4.29 Litología típica zona C



Ilustración 4.30 Litología típica zona D

Columna sondaje S-2

Con los datos recopilados del sondaje S-2 se realizó la siguiente columna estratigráfica, donde se muestra una sola unidad de grava con diferentes durezas a lo largo del sondaje (Ilustración 4.31). La zona B se presenta como una zona mucho más dura y la muestra presenta una litología predominante, esto se explica por la presencia de un clasto de tamaño *boulder* que fue atravesado por el sondaje. En la zona D la dureza de la grava disminuye considerablemente esto debido a la mayor presencia de agua y arcillas, que hace esta parte de la unidad más blanda para la perforación.

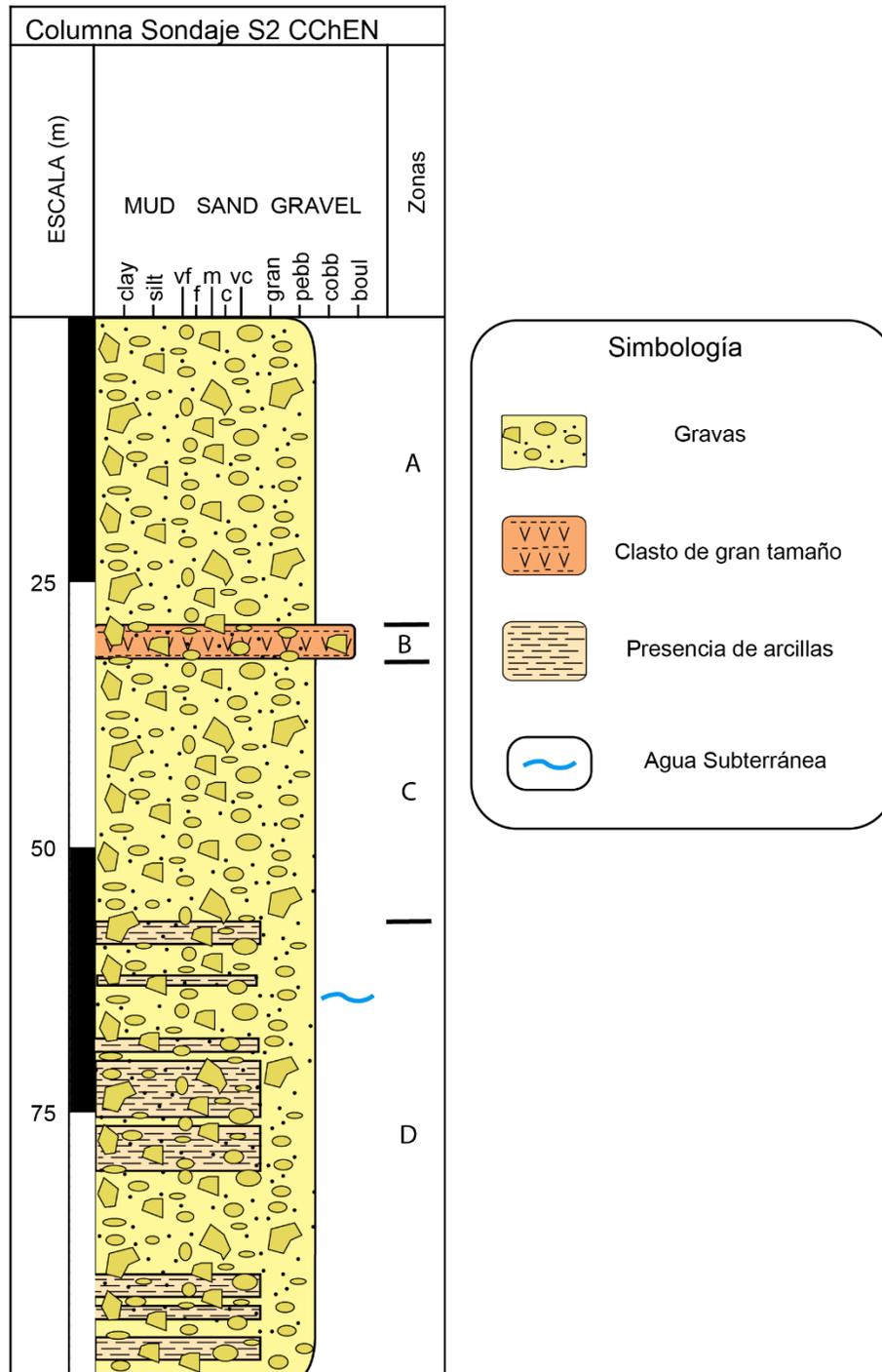


Ilustración 4.31 Columna estratigráfica sondaje S-2.

4.3. Correlación con perfil de resistividad eléctrica (ERT)

Desde el trabajo de Díaz et al. (2014) se extrajo un perfil generado por la inversión de datos obtenidos por la técnica de imagen ERT (*Electric Resistivity Tomography*) (Ilustración 4.32). Se ocupa este perfil dado que se ubica a aproximadamente 250 metros al sur de los sondajes S-1 y S-2, además, se ubica perpendicular al límite entre la cuenca de Santiago y piedemonte cordillerano atravesando la Falla San Ramón, por lo que ambos sondajes se pueden asociar a este perfil.

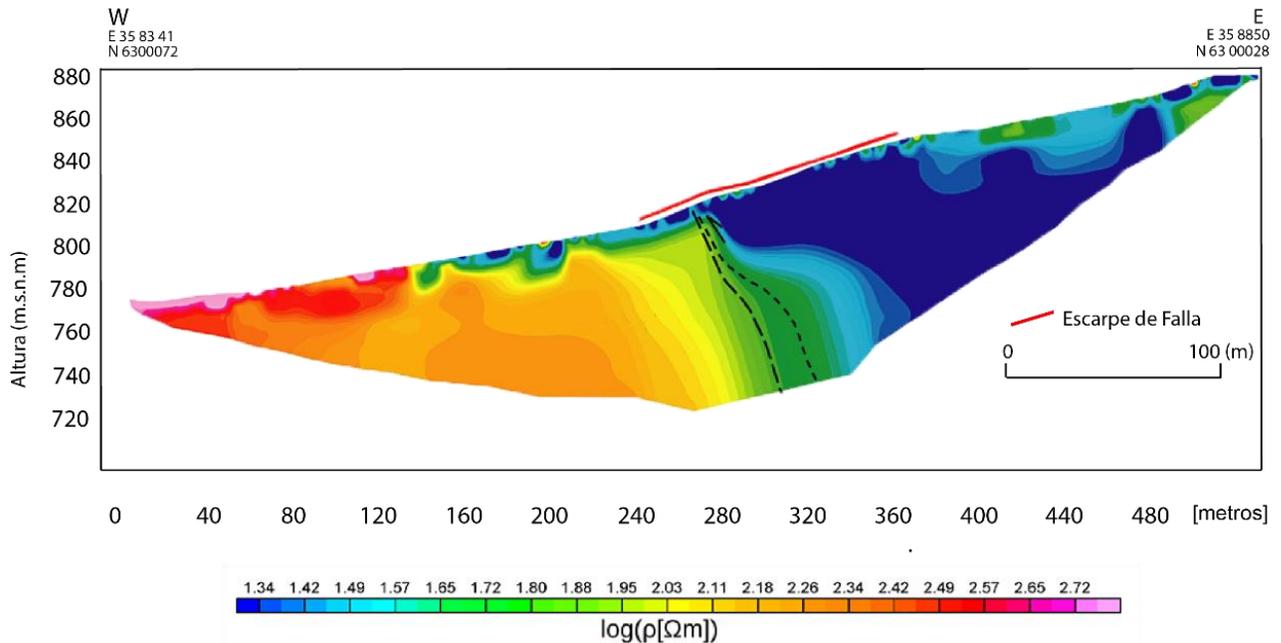


Ilustración 4.32 Perfil de Resistividad Eléctrica (ERT) de Díaz et al. 2014.

Según Díaz et al. 2014 el perfil muestra claramente 2 áreas diferentes, delimitadas verticalmente, la parte occidental entre [0-280] metros, presenta valores de resistividad mucho más altos [100-600] μm en comparación con la parte oriental del perfil [280-530] metros, donde los valores de resistividad observados son muy bajos y van entre [5-50] μm .

El perfil muestra colores amarillos para el área occidental del perfil que es la con mayor resistividad, una zona verde de transición y un área de azul ubicada al oriente del perfil que representa la zona con menor resistividad, además con la línea roja se muestra el escarpe de la Falla San Ramón.

El abrupto cambio lateral de resistividad ubicado a 280 metros aparece claramente en el perfil, donde además se puede apreciar que este cambio de resistividad se profundiza con un manto aproximado entre [54°E-60°E], que Díaz et al. 2014 interpreta como un control estructural de las propiedades eléctricas asociadas a la Falla San Ramón.

Al perfil de resistividad de Díaz et al. 2014, se le incorporo las columnas estratigráficas de los sondajes S-1 y S-2, para generar un perfil geológico básico de la zona de estudio. Las columnas fueron incluidas a escala y ubicadas según la posición de los sondajes con respecto al perfil de resistividad (Ilustración 4.33).

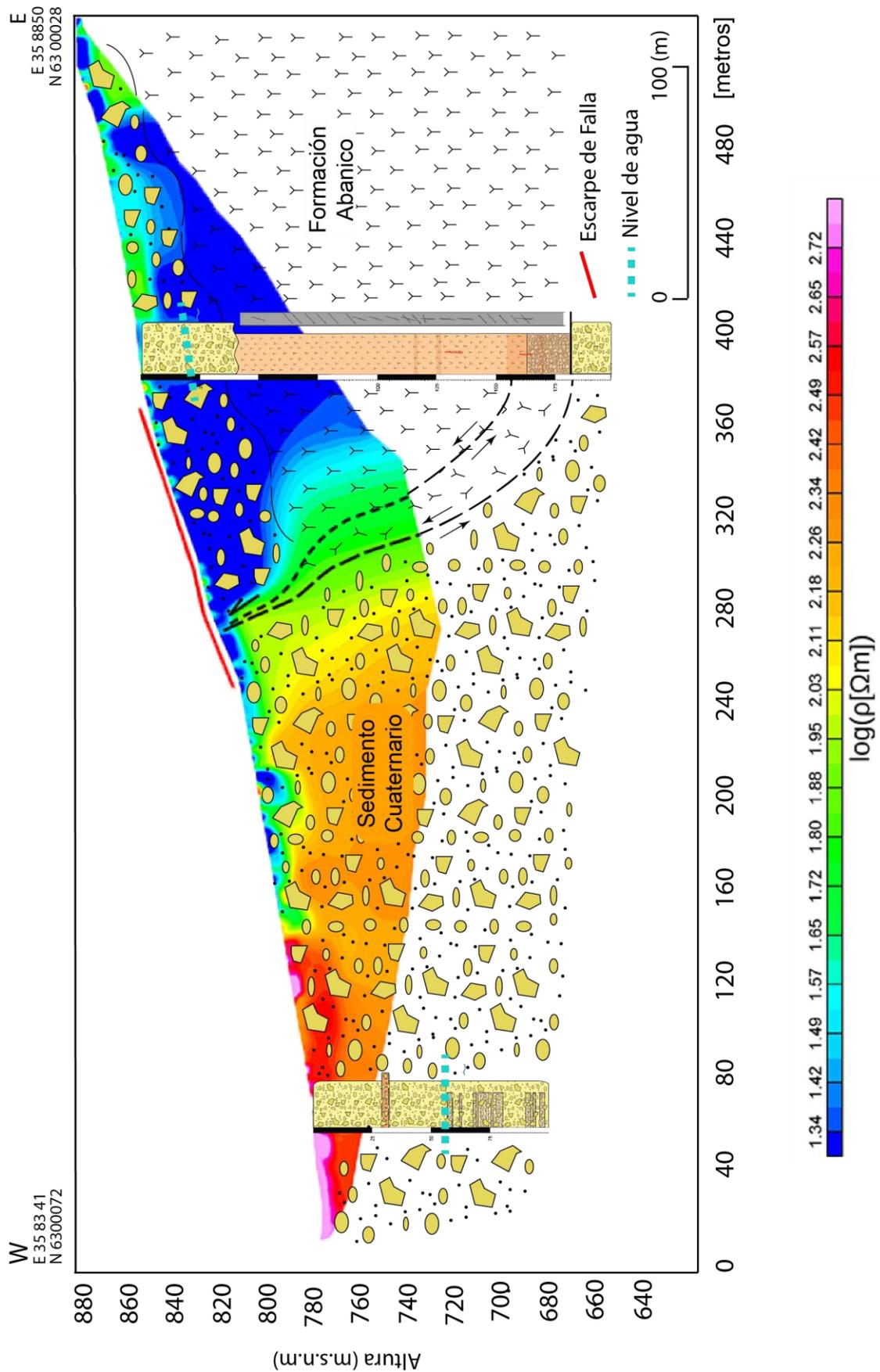


Ilustración 4.33 Perfil de resistividad con la información de los sondajes S-1 y S-2.

5. Discusiones

El sondaje S-1 atraviesa 3 unidades que desde la superficie son;

- **Gravas Superiores (Unidad 1):** Unidad de sedimentos con granulometría de grava. Entre sus clastos se encuentran rocas ígneas extrusivas de diferentes composiciones. Se infiere que esta unidad es la misma descrita por Rauld (2002) como unidad Cuaternaria Antigua.

En terreno no se encontraron clastos de origen ígneo plutónico sobre el cerro Los Rulos, lo que puede estar correlacionado con un bajo o nulo porcentaje de este tipo de clastos en la unidad Cuaternaria Antigua y el nulo aporte de este tipo de rocas al cerro los Rulos desde el piedemonte cordillerano (cara poniente cerro Alto de las Vizcachas), donde por literatura y en terreno no se encontraron cuerpos intrusivos que aporten detritos de este tipo

- **Secuencia Volcánica (Unidad 2):** Secuencia de roca que es conformada por intercalaciones de lavas, tobas multicolores e ignimbritas. Debido a la localización de sondaje y litología de esta unidad se asocia a la Formación Abanico la cual se le asocia una edad Oligoceno superior – Mioceno inferior (Charrier & Munizaga, 1979).

En el trabajo de Nystrom et al. (2003), se identifican los 400 a 500 metros superiores del miembro inferior de la Formación Abanico, como una zona dominada por flujos piroclásticos soldados y tobas de precipitación, lo cual permitiría correlacionar la unidad de Secuencia Volcánica con la unidad descrita por Nystrom en camino a Farellones. Sin embargo, este trabajo no tiene el alcance para corroborar esta hipótesis.

- **Gravas Inferiores (Unidad 3):** Unidad de sedimentos con granulometría grava, con la particularidad que además de encontrar clastos de origen ígneo extrusivo también se encuentran de origen intrusivo. Se interpreta una asociación con la unidad Cuaternaria Joven del trabajo de Rauld (2002).

Los clastos de origen intrusivo atravesados por el sondaje S-1 en esta unidad, se pueden correlacionar con los clastos graníticos encontrados en los depósitos fluviales de la quebrada de Ramón, lo que deja entrever que este tipo de clastos son transportados desde la parte alta de la quebrada de Ramón donde si hay evidencia de afloramientos de roca intrusiva de similar composición a los clastos encontrados en la unidad de Gravas Inferiores.

Dado que los sedimentos de la unidad de Gravas Inferiores tienen una edad menor a la unidad que la sobreyace (Secuencia Volcánica), se deduce que el sondaje S-1 atravesó una falla inversa que se interpreta como la FSR, la cual produjo el cabalgamiento de la Formación Abanico sobre las Gravas Inferiores.

En los resultados se describieron 4 tipos de vetillas que predominan en el sondaje S-1, estos tipos de vetillas son;

- **Vetillas de albíta-cuarzo:** Son las principales vetillas del sondaje en términos de porcentaje. Son vetillas de dureza 3 en la escala de mohs, arcillosas, de color blanco, presentan un amplio rango de orientaciones y se presentan en la unidad Secuencia Volcánica (unidad 2).

- Vetillas de calcita: Pequeño número de vetillas de color blanco, de dureza 2 en la escala de mohs, efervescentes, con una orientación subhorizontal que se encuentran distribuida mayormente en la unidad de Gravas Superiores y en los primeros 30 metros de la Secuencia Volcánica (subunidad A y primeros 15 metros de la subunidad B). Además, existe mineralización de calcita en las ignimbritas encontradas en la subunidad G de la Secuencia Volcánica, la cual presenta vetillas difusas de este tipo.
- Vetillas de cuarzo: Bajo número de este tipo de vetillas, presentan un color blanco, tienen una dureza 7 en la escala de mohs, espesor promedio de 2 cm, tienen una orientación preferentemente subhorizontal y se localizan en la unidad de Secuencia Volcánica preferentemente en tobas multicolores.
- Vetillas de feld. k-cuarzo: Bajo porcentaje de vetillas que presentan un color rosado blancuzco, tienen una dureza de 6 en la escala de mohs, espesor promedio de 8 mm, tienen una orientación preferentemente subhorizontal y se localizan en la unidad de Secuencia Volcánica preferentemente en tobas multicolores.

Las vetillas de albita-cuarzo se formaron por fluidos mineralizadores ricos en sodio y aluminio que aprovecharon debilidades estructurales para avanzar dentro de la roca. Estas vetillas presentaron en los resultados de FTIR montmorillonita, la cual se infiere, que se formó por hidrólisis de la albita. En tanto las vetillas de cuarzo se encuentran en zonas de alteración ricas en sílice que se presentan de manera pervasiva en la roca.

En el sondaje S-1 las vetillas de calcita se ubican en zonas más permeables, donde los fluidos percolan y meteorizan generando estas vetillas, esto ocurre en las Gravas Superiores y en los primeros metros de roca de la Secuencia Volcánica. Además, donde se encuentran este tipo de vetillas a mayor profundidad, lo hacen en una roca con mayor permeabilidad (ignimbrita).

En el nivel más somero de la corteza las zonas de fallas tienen un comportamiento frágil (Ilustración 5.1), por lo que generan rocas de falla de fábrica aleatoria, entre ellas, salbanda de falla (*gouge*), brecha de falla, serie cataclasita, pseudotaquilitas (Sibson, 1977). En la subunidad H de la Secuencia Volcánica (entre [160,3-181,3] metros del sondaje S-1), se encuentran zonas de brechas de fallas que consisten en roca fragmentada, separada por un material fino con alto grado de plasticidad (*gouge* o harina de falla). Además, en este tipo de roca, gracias a los cortes transparentes, se reconoció minerales metamórficos de bajo grado (zeolitas) en intersticios de las brechas de falla. Estos minerales se generan en esta zona por los esfuerzos diferenciales presentes, que generan un metamorfismo dinámico donde el factor predominante es la presión y donde se genera la rotura mecánica de la roca (brecha de falla).

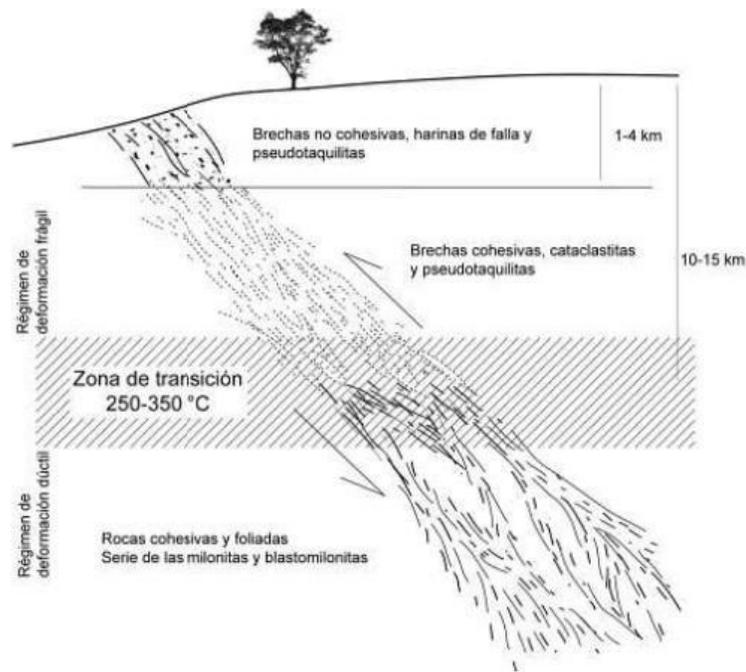


Ilustración 5.1 Fallas con comportamiento frágil. Modificado de Sibson et al. 1977

Para definir esta roca de falla se utilizó la clasificación de Woodck y Mort (2008), la cual se realizó revisando, entre otros, el trabajo de Sibson (1977) que es la clasificación más influyente de las rocas de falla (Woodcock & Mort, 2008).

Esta clasificación se muestra en un diagrama ternario (Ilustración 5.2) donde las variables corresponden a: clastos grandes (> 2mm), clastos pequeños (0.1 a 2 mm) y cemento o matriz (< 0.1mm). La línea que representa el 30% de clastos grandes separa la serie de brechas de falla con respecto a la serie de cataclasita o milonita.

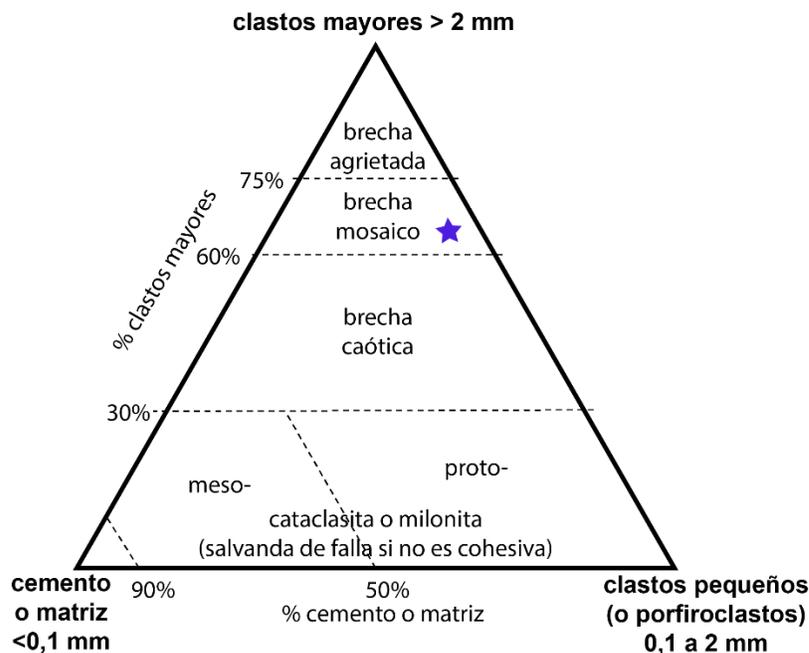


Ilustración 5.2 Clasificación de brecha de falla. Modificado de Woodcock & Mort, 2008.

La clasificación de brecha de falla contiene tres subdivisiones principales: brecha agrietada, brecha mosaico y brecha caótica, dependiendo de que tan bien encajado se encuentren los clastos (Woodcock & Mort, 2008). Para la roca de falla encontrada en el sondaje S-1, a una profundidad de 162 m (Ilustración 4.12), el porcentaje de clastos de tamaño mayor a 2 mm es 65%, por lo que se define como una brecha mosaico (Ilustración 5.2).

Los clastos en una brecha de mosaico muestran una notoria separación y rotación, pero aun muestran cierta adaptación a los clastos adyacentes (Woodcock & Mort, 2008). Esta descripción concuerda con lo visto en la brecha de falla encontrada en el sondaje S-1, la cual podemos apreciar en la Ilustración 4.12, donde se puede apreciar la rotación y separación de clastos. Comparándola con una imagen de brecha mosaico extraída desde el trabajo de Woodcock y Mort (Ilustración 5.3) se puede apreciar la similitud entre ambas.

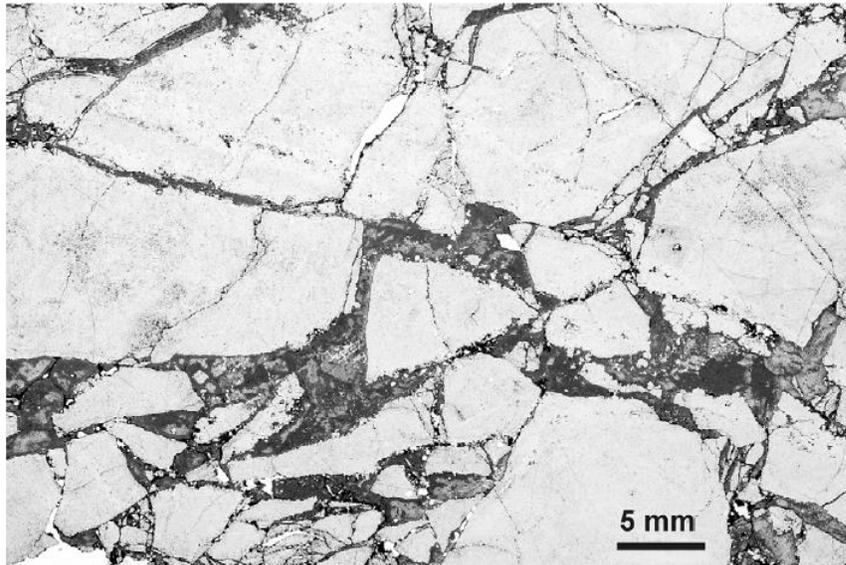


Ilustración 5.3 Brecha de mosaico, extraída desde el trabajo de Woodcock & Mort, 2008

En la corteza superior las zonas de fallas presentan discontinuidades litológicamente heterogéneas y estructuralmente anisotrópicas (Caine et. al. 1996). Estas pueden actuar como conducto, barreras o sistemas combinados de barreras-conducto que mejoran o impiden el flujo de fluidos (Caine et al. 1996; Randolph & Johnson, 1989; Smith et al., 1990; Scholz, 1990; Caine et al., 1993; Forster et al., 1994; Antonellini & Aydin, 1994; Newman & Mitra, 1994; Goddard & Evans, 1995). Los componentes principales en las zonas de fallas ubicadas en la corteza superior son el núcleo de falla, la zona de daño y el protolito (Caine et. al. 1996) (Ilustración 5.4).

COMPONENTES DE LA ARQUITECTURA DE LA ZONA DE FALLA

- NÚCLEO DE FALLA**
 Salbanda
 Cataclasita
 Milonita

- ZONA DE DAÑO**
 Fallas menores
 Fracturas
 Vetillas
 Pliegues

- PROTOLITO**
 Estructuras Regionales

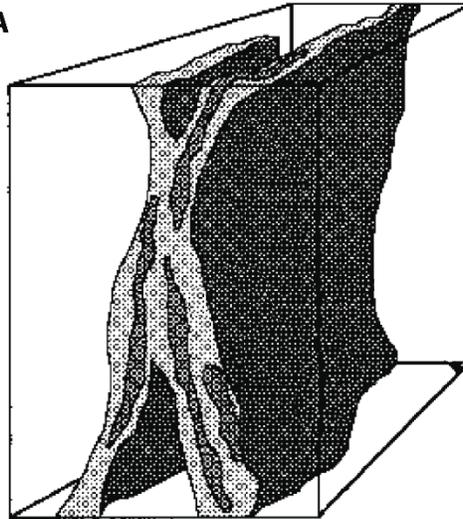


Ilustración 5.4 Componentes de la arquitectura de la zona de falla (Caine et al., 1996)

La zona de daño es la red de estructuras subsidiarias que se unen al núcleo de la falla y pueden mejorar la permeabilidad de la zona de falla en relación con el núcleo y el protolito no deformado (Caine et al., 1996; Chester Y Logan, 1986; Smith et al., 1990; Andersson et al., 1991; Scholz y Anders, 1994; Goddard y Evans, 1995). Estas estructuras subsidiarias incluyen pequeñas fallas, venas, fracturas, roturas y pliegues que causan heterogeneidad y anisotropía en la estructura de permeabilidad y propiedad elásticas de la zona de falla (Caine et al., 1996; Bruhn et al., 1994).

De acuerdo con lo observado en el sondaje S-1, la zona de daño comienza a 130,5 metros de profundidad, donde se comienzan a encontrar planos de fallas secundarias con estrías de falla. La zona de daño se extiende hasta el fin de la Secuencia Volcánica (181,3 metros), donde comienza la unidad de sedimentos Gravas Inferiores (Unidad 3).

Dentro de esta zona de daño se encuentran intercalaciones de ignimbritas. Esta roca se considera de alta permeabilidad de acuerdo con el alto porcentaje de illita y mineralización de calcita obtenido en los ensayos FTIR y difracción de rayos x.

El núcleo de falla es donde se produce la mayor parte del desplazamiento, generalmente tienen una menor porosidad y permeabilidad que el protolito adyacente (Caine et al., 1996) debido a la reducción del tamaño de grano y/o la precipitación mineral producida en el núcleo.

El sondaje S-1 atraviesa un núcleo de la falla discontinuo representado por 4 zonas de brechas de falla tipo mosaico, las cuales se encuentran distribuidas en la subunidad H (Secuencia Volcánica) e intercaladas con zonas de daño. Estas zonas de brechas de falla mosaico tienen espesores de entre [15 - 130 cm] y en total suman 2,7 metros. La zona de brecha principal tiene un espesor de 130 cm y se encuentra al final de la Secuencia Volcánica en contacto con las Gravas Inferiores (Ilustración 5.5).

Las brechas mosaico tienen una menor porosidad que el protolito, debido a la disminución del tamaño de grano (salbanda de falla) y la precipitación de minerales (zeolitas) en los espacios vacíos generados en la brecha, produciendo una disminución de la permeabilidad y actuando como una barrera para los fluidos.

Comparando con el perfil de resistividad de Diaz 2014, se concuerda que la zona de núcleo de la falla podría actuar como una barrera para los fluidos, los cuales se deslizan a lo largo de planos de fallas más superficiales (Caine et al., 1996; Diaz et al., 2014), esto explica el cambio de fluidos impulsado estructuralmente entre el *hanging wall* y el *footwall* de la Falla San Ramón (Diaz et al. 2014). Por lo que la FSR se comportaría como un sistema combinado de barrera-conducto donde la zona de daño actúa como conducto y el núcleo de falla como una barrera.

En resumen, en el sondaje S-1 se logró atravesar la falla en la cual se definió una zona de daño con un espesor de 50 metros y un núcleo de falla discontinuo que en total suma 2,7 metros (Ilustración 5.5). Estos valores corresponden a los espesores medidos en el sondaje S-1, por ende, los espesores de la zona de daño y núcleo de falla de la falla San Ramón, son menores y dependen del manto de esta falla.

El sondaje S-2 atravesó 100 metros de gravas cuaternarias pertenecientes al relleno de la cuenca de Santiago. Estas gravas mostraron diferentes durezas en el proceso de perforación, lo que se interpreta como distintas granulometrías de clastos a lo largo del sondaje. La descripción litológica de los *cutting* confirmó la existencia de una sola unidad de sedimentos, por lo que a priori se descarta a esta profundidad y ubicación roca perteneciente a la Formación Abanico alzada por la Falla San Ramón sobre la cuenca de Santiago.

El perfil de Diaz et al. (2014) concuerda bastante con los resultados de los sondajes S-1 y S-2, los cuales confirman un cabalgamiento con vergencia oeste y manto aproximado entre [54-60]° E. La estructura atravesada por el sondaje S-1 muestra evidencia de que la Falla San Ramón es una falla de grandes proporciones, que sería la responsable de gran parte del alzamiento de la Cordillera Principal sobre la Depresión Central.

En el mundo han ocurrido eventos catastróficos relacionados con fallas corticales de similares características, como por ejemplo el terremoto de Chi-Chi 1999 en Taiwán, el cual tuvo una magnitud de Mw 7.6, deformó la superficie del terreno e interactuó con las estructuras de ingeniería presentes en la zona (Huang et al. 2015).

Este tipo de eventos no se pueden evitar, pero si minimizar los riesgos asociados y la forma más efectiva es hacer este tipo de estudios, con los cuales se delimitan y adelantan posibles escenarios, ayudando a los gobiernos a delinear zonas de riesgo de rotura en superficie de las fallas, formular regulaciones para zonas de fallas sísmicas y alentar a los propietarios a evitar zonas de fallas para el desarrollo de tierras (Huang et al. 2015).

Para el caso de la Falla San Ramón es imprescindible hacer un cambio al plan regulador para que no se siga construyendo cerca de la FSR y generar un plan de acción frente a un posible sismo generado por este sistema de falla, que abarque toda la ciudad de Santiago y alrededores. Es necesario que una posible reconstrucción no dependa al nivel socioeconómico o influencias y sea eficiente para toda la población involucrada.

6. Conclusiones

En el sondaje S-1, realizado en el escarpe de falla de la Falla San Ramón (FSR), se identificaron tres unidades principales. La unidad más somera, de 40 m de espesor, corresponde a gravas con clastos volcánicos y es asignada a la unidad Cuaternaria Antigua. La unidad intermedia, denominada Secuencia Volcánica tiene un espesor de 141,3 metros y contiene tobas multicolores, lavas e ignimbritas. Esta secuencia se asocia al miembro inferior de la Formación Abanico. La tercera unidad, con un espesor de 17,7 metros en el sondaje, consiste en sedimentos cuaternarios, principalmente gravas con clastos de origen ígneo extrusivo e intrusivos, que se asignan a la unidad Cuaternaria Joven.

Por otra parte, en el sondaje S-1 se logró distinguir una zona de daño permeable de aproximadamente 50 metros de espesor, ubicada desde los 130 metros de profundidad hasta el contacto de la Secuencia Volcánica con las Gravas Inferiores (181,3 m). En esta zona de daño se ubican pequeñas fallas secundarias que aumentan la permeabilidad del protolito.

Junto a lo anterior, entre los 160,3 y 181,3 m, el sondaje S-1 atravesó un núcleo de falla discontinuo representado por 4 zonas de brechas de falla tipo mosaico, las cuales se encuentran distribuidas en la Secuencia Volcánica e intercaladas con zonas de daño. Estas zonas de brechas de falla mosaico tienen espesores de entre [15 - 130 cm] y en total suman 2,7 metros. La zona de brecha principal tiene un espesor de 130 cm y se encuentra al final de la Secuencia Volcánica en contacto con las Gravas Inferiores.

Lo anterior permite deducir que el sondaje S-1 atravesó la Falla San Ramón (FSR), una falla inversa que produjo el cabalgamiento de la Formación Abanico sobre las Gravas Inferiores.

Según los resultados de arcillas que se realizó a vetillas del sondaje S-1 se logró identificar 4 tipos de vetillas, vetillas de albita-cuarzo que son la de mayor proporción dentro del sondaje, vetillas de cuarzo de mayor dureza y espesor, vetillas de feldespato potásico-cuarzo con un característico color rosado blancuzco, y vetillas de calcita que se ubican en las Gravas Superiores, primeros metros de la Secuencia Volcánica y en los planos de debilidad del sondaje S-1.

Con las muestras extraídas del sondaje S-2 se concluyó que solo atravesó sedimentos pertenecientes a depósitos cuaternarios de la cuenca de Santiago. La información de los resultados obtenidos se acopló de forma muy certera al perfil de resistividad de Diaz et al. (2014), confirmándose una vergencia oeste y un manteo estimado de entre [54° 60°E].

Considerando un manteo estimado de 60° la zona de daño tendría un espesor real de 25 metros y el núcleo de falla total un espesor real de 1,35 metros; siendo el espesor real del núcleo de falla principal de 65 cm.

La unidad Secuencia Volcánica está caracterizada geotécnicamente por un RQD muy bajo con un pequeño repunte local, un grado de meteorización más bien homogéneo, entre III y IV, con un aumento al comienzo y final de la unidad llegando a un grado de meteorización V. La resistencia del material consistió básicamente en roca medianamente fuerte, exceptuando las zonas de ignimbritas y brechas de falla donde la resistencia del material fue menor, marcándola fácilmente con la uña. Presentó una frecuencia de fractura en promedio de 12 ff/m con una mayor frecuencia en las zonas de brechas de falla llegando a 24 ff/m. En tanto, las Gravas Superiores e Inferiores del

sondaje S-1 (Unidad 1 y Unidad 3) presentaron un grado de meteorización entre [III-IV], y resistencia del material de la matriz asociada a arcilla muy rígida S5.

Los resultados mostrados en este trabajo demuestran que la Falla San Ramón es una estructura geológica de grandes proporciones presente en el sector oriente de Santiago, que cuenta con una longitud en superficie que llega a más de 30 km y en la zona de estudio tiene un espesor de zona de daño estimado de 25 metros.

Esta estructura geológica debe generar preocupación para el desarrollo espacial de la ciudad de Santiago, por esto se deben continuar con un estudio continuo que sea capaz de generar herramientas para poder actuar frente a un movimiento sísmico generado por la FSR, con el fin de disminuir problemas de infraestructura relevantes para la ciudad y por sobre todo posibles pérdidas humanas.

7. Recomendaciones

Con el fin de profundizar en el conocimiento de la Falla San Ramón se sugiere:

- Realizar un perfil de resistividad eléctrica que atravesase ambos sondajes (S-1 y S-2), para obtener un mapeo de la Falla San Ramón más preciso y así establecer los espesores reales tanto de la zona de daño como el núcleo de falla.
- Realizar trabajo de terreno para correlacionar con el trabajo de Nystrom et al. (2003), y corroborar que las litologías de la Formación Abanico presentes en el sondaje S-1 corresponden a la parte superior del miembro inferior de esta formación.
- Estudiar en terreno los clastos de la unidad Cuaternaria Antigua (cerro Los Rulos), con el objetivo de reconocer los tipos de clastos presentes en esta unidad y poder corroborar la nula o baja presencia de clastos ígneos intrusivos en la unidad de Gravas Superiores en comparación con las Gravas Inferiores que si presenta este tipo de clastos.
- Realizar análisis SEM a las muestras de la zona de falla para reconocer la mineralogía de la salbanda de falla y minerales metamórficos presentes en las brechas de falla.

8. Bibliografía

- Aguirre, L., 1960., Geología de los Andes de Chile central., Boletín N°9, Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, 70 p.
- Andersson, J. E., Ekman, L., Nordqvist, R., and Winberg, A., 1991, Hydraulic testing and modeling of a low-angle fracture zone at Finnsjon, Sweden: *Journal of Hydrology*, v. 126, p. 45–77.
- Antonellini, M., and Aydin, A., 1994, Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: Petrophysical properties: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 78, p. 355–377.
- Armijo R., Rauld R., Thiele R., Vargas G., Campos J., Lacassin R., & Kausel E., 2007. The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile.
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., and Kausel, E., 2010, The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile, *Tectonics*, 29, TC2007.
- Baeza, O., 1999. Análisis de litofacies, evolución depositacional y análisis estructural de la formación Abanico en el área comprendida entre los ríos Yeso y Volcán, Región Metropolitana. Tesis (Geólogo). Santiago. Universidad de Chile, Departamento de Geología. 119 p.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 10(1), 1-54.
- Brown, E. T. (1981). Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods.
- Bruhn, R. L., Parry, W. T., Yonkee, W. A., and Thompson, T., 1994, Fracturing and hydrothermal alteration in normal fault zones: *PAGEOPH*, v. 142, p. 609–644.
- Caine J.S., Evans J.P., Forster C.B., 1996. Fault zone architecture & permeability structure.
- Caine, J. S., Forster, C. B., and Evans, J. P., 1993, A classification scheme for permeability structures in fault zones: *Eos (Transactions, American Geophysical Union)*, v. 74, p. 677.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J. J., Gana, P., Kay, S. M., Muñoz, N., Wyss, A. R., Zurita, E., 2002. Evidence for cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36° S.L.). *Journal of South American Earth Sciences* 15, 117–139.
- Charrier, R., Bustamante, M., Comte, D., Elgueta, S., Flynn, J. J., Iturra, N., Muñoz, N., Pardo, M., Thiele, R., Wyss, A. R., 2005. The Abanico extensional basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion and relation to shallow seismic activity and andean uplift. *Neues Jahrbuch Fur Geologie Und Palaontologie-Abhandlungen* 236, 43–77.

Charrier, R., Pinto, L. y Rodríguez, M.P., 2007. Tectono-stratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile, in: *Geology of Chile*, Chapter 3 (Moreno, T. & Gibbons, W., editors), The Geological Society, London, Special Publication, 21-116.

Charrier, R. y Munizaga, F., 1979. Edades K-Ar de volcánicas cenozoicas del sector cordillerano del Río Cachapoal, Chile (34°15' de latitud sur). *Revista geológica de Chile* N°17, pp. 41 – 51.

Charrier, R., Muñoz, N., 1994. Jurassic cretaceous palaeogeographic evolution of the Chilean Andes at 23° -24°S and 34° -35°S latitude: A comparative analysis. In: Reutter, K. Scheuber, E., Wigger, P. (Eds.), *Tectonics of the Southern Central Andes*. Springer Verlag, Berlin, pp. 233–242.

Chester, F. M., and Logan, J. M., 1986, Composite planar fabric of gouge from the Punchbowl fault, California: *Journal of Structural Geology*, v. 9, p. 621–634.

Díaz D., Maksymowicz A., Vargas G., Vera E., Contreras-Reyes E., & Rebolledo S., 2014. Exploring the shallow structure of the San Ramón thrust fault in Santiago, Chile (~33.5° S), using active seismic and electric methods.

Fock, A., 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile.

Forster, C. B., Goddard, J. V., and Evans, J. P., 1994. Permeability structure of a thrust fault, in the mechanical involvement of fluids in faulting: U.S. Geological Survey Open File Report 94-228, p. 216–223.

Gana, P. y Wall, R., 1997. Evidencias geocronológicas ⁴⁰Ar/³⁹Ar y K–Ar de un Hiatus Cretácico Superior – Eoceno en Chile Central (33°- 33°33'S). *Revista geológica de Chile* 24(2) pp. 145 – 163.

Giambiagi, L. B., Tunik, M. A. y Ghiglione, M., 2001. Cenozoic tectonic evolution of the Alto Tunuyan foreland basin above the transition zone between the flat and normal subduction segment (33 degrees 30 '-34 degrees S), western Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 14 (7): pp. 707-724.

Giambiagi, L.B., and Ramos, V.A., 2002. Structural evolution of the Andes in a transitional zone between flat and normal subduction (33°30'–33°45'S), Argentina and Chile: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, p. 101–116.

Giambiagi, L. B., Ramos, V. A., Godoy, E., Alvarez, P. P. y Orts, S., 2003. Cenozoic deformation and tectonic style of the Andes, between 33 degrees and 34 degrees south latitude. *Tectonics*, 22 (4).

Goddard, J. V., and Evans, J. P., 1995. Chemical changes and fluid-rock interaction in faults of crystalline thrust sheets, northwestern Wyoming, U.S.A.: *Journal of Structural Geology*, v. 17, p. 533–547.

Godoy, E., Yañez, G., and Vera, E., 1999. Inversion of an Oligocene volcano-tectonic basin and uplifting of its superimposed Miocene magmatic arc in the Chilean Central Andes: First seismic and gravity evidences: *Tectonophysics*, v. 306, p. 217–236.

Hoek, E., Marinos, P., & Benissi, M. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57(2), 151-160.

Huang, W.-J., W.-S. Chen, Y.-H. Lee, C.-C. Yang, M.-L. Lin, C.-S. Chiang, J.-C. Lee, and S.-T. Lu, 2016. Insights from heterogeneous structures of the 1999 Mw 7.6 Chi-Chi earthquake thrust termination in and near Chushan excavation site, Central Taiwan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 339–364.

IDIEM, 2017. Informe de exploración “Proyecto Sondaje Falla San Ramón

Jara, P., 2013. Tectónica mezo-cenozoica en la cordillera principal de Chile central entre 32° y 33°S. Análisis a partir de nuevos antecedentes de campo y modelamiento analógico. Tesis de grado para optar al grado de doctor en ciencias mención geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología.

Karzulovic, J., 1957. Sedimentos cuaternarios y aguas subterráneas en la cuenca de Santiago. *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*. Universidad de Chile. Volumen 14 – 15. pp. 5 -120.

Klohn, C., 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central. Instituto de investigaciones Geológicas, Boletín N° 8, Santiago. 95 p.

Levi, B. Y Aguirre, L., 1981. Ensilic spreading-subsidence in the Mesozoic and Palaeogene Andes of Central Chile. *Journal of the Geological Society of London* 138. pp. 75 – 81.

Meade, B. J. y Conrad, C. P., 2008. Andean growth and the deceleration of South American subduction: Time evolution of a coupled orogen-subduction system. *Earth and Planetary Science Letters*, 275 (1-2): pp. 93-101

Mpodozis, C., Ramos, V. A., 1989. The Andes of Chile and Argentina. In: Eriksen, G., Caas, M., Reintmund, J. (Eds.). *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and energy resources*. Earth Sciences Series. Circum-Pacific council for Energy and Hydrothermal Resources, Houston, Texas, pp. 59–60.

Newman, J., and Mitra, G., 1994. Fluid-influenced deformation and recrystallization of dolomite at low temperatures along a natural fault zone, Mountain City window, Tennessee: *Geological Society of America Bulletin*, v. 106, p. 1267–1280.

Nyström, J.O., Vergara, M., Morata, D. y Levi, B., 2003. Tertiary volcanism during extension in the Andean foothills of central Chile (33°15’-33°45’S). *Geological Society of America, Bulletin* 115(12), 1523-1537.

- Pardo-Casas, F., Molnar, P., 1987. Relative motion of the Nazca (Farallón) and South American plates since late cretaceous time. *Tectonics* 6(3), 233– 284.
- Pesicek, J. D., Engdahl, E. R., Thurber, C. H., DeShon, H. R., & Lange, D., 2012. Mantle subducting slab structure in the region of the 2010 M 8.8 Maule earthquake (30–40° S), Chile. *Geophysical Journal International*, 191(1), 317-324.
- Ramos, V.A., Aguirre-Urreta, M.B., Álvarez, P.P., Cegarra, M., Cristallini, E.O., Kay, S.M., Lo Forte, G.L., Pereyra, F. y Pérez, D., 1996. Geología de la región del Aconcagua, Provincias de San Juan y Mendoza. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Buenos Aires, Argentina. Subsecretaría de la Nación, Anales 24, 510 pp.
- Randolph, L., and Johnson, B., 1989. Influence of faults of moderate displacement on groundwater flow in the Hickory sandstone aquifer in central Texas: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 21, p. 242.
- Rauld, R., 2002. Análisis morfoestructural del frente cordillerano Santiago Oriente entre el Río Mapocho y la Quebrada de Macul. Memoria. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Rauld, R., 2011. Deformación Cortical y Peligro Sísmico Asociado a la Falla San Ramón en el Frente Cordillerano de Santiago, Chile Central (33° S). Tesis de grado para optar al grado de doctor en ciencias mención geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología
- Scholz, C., 1990. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge, Cambridge university press. 438p.
- Scholz, C. H., and Anders, M. H., 1994. The permeability of faults, in the mechanical involvement of fluids in faulting: U.S. Geological Survey Open-File Report 94-228, p. 247–253.
- Sellés, D., 1999. La Formación Abanico en el cuadrángulo Santiago (33°15' – 33°30' ; 70°30' – 70°45' O). Chile Central. Estratigrafía y Geoquímica. Tesis para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile.
- Sélles, D. y Gana, P., 2001. Geología del área Talagante - San Francisco de Mostazal, Regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Esc. 1:100.000. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica N°74. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. 30 p.
- SERNAGEOMIN., 2003. Mapa geológico de Chile. Base Geológica 1:1.000.000. Documento digital. 23 p.
- Sibson, R. H., 1977. Fault rocks and fault mechanisms: Geological Society of London Journal, v. 133, p. 191–231.
- Smith, L., Forster, C. B., and Evans, J. P., 1990. Interaction of fault zones, fluid flow, and heat transfer at the basin scale, in Hydrogeology of permeability environments: International Association of Hydrogeologists, v. 2, p. 41–67.

- Somoza, R., 1998. Updated azca (Farallon)—South America relative motions during the last 40My: implications for mountain building in the central Andean region. *J. South Am. Earth Sci.* 11, 211–215.
- Tassara, A. y Yañez, G., 2003. Relationship between elastic thickness and the tectonic segmentation of the Andean margin. *Revista Geológica de Chile*, 30 (2): pp. 159-186.
- Thiele, R., 1980. Geología de la hoja Santiago, Región Metropolitana. Carta Geológica de Chile N° 39, Instituto de investigaciones geológicas. 1 Mapa. 51 p.
- Thomas, H., 1958. Geología de la cordillera de la Costa entre el valle de La Ligua y la cuesta de Barriga. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín 2: 1-80, Santiago.
- Troncoso, M., 2014. Evidencia geomorfológica de neotectónica en el borde oriental de la depresión Los Andes - San Felipe, provincia de Los Andes, región de Valparaíso. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias, mención geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Vargas G., Klinger Y., Rockwell T.K., Forman S.L., Rebolledo S., Baize S., Lacassin R., & Armijo R., 2014. Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes.
- Vigny, C., Rudloff, A., Ruegg, J.-C., Madariaga, R., Campos, J. y Alvarez, M., 2009. Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap, Chile. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 175 (1- 2): pp. 86-95.
- Villarroel, R., Merino, L., Leiva, G., & Sanchez, G., 2001. Metodología de caracterización geotécnica a partir de testigos de sondajes de diamantina en rocas alteradas, y su aplicación en minería a rajo abierto y subterránea.
- Woodcock, N. H., & Mort, K., 2008. Classification of fault breccias and related fault rocks. *Geological Magazine*, 145(3), 435-440.
- Wyss, A., Charrier, R., Flynn, J., 1996. Fossil mammals as a tool in the Andean stratigraphy: dwindling evidence of Late Cretaceous volcanism in the South Central Main Range. *Paleobios* 17 (2-4), pp. 13 – 27.

9. Anexos

9.1. Sondaje S-1

Se muestra la digitalización total del sondaje S-1 el cual se dividió en cajas de testigos extraídos desde el sondaje de diamantina.



Ilustración 9.9.1 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 1 a 6

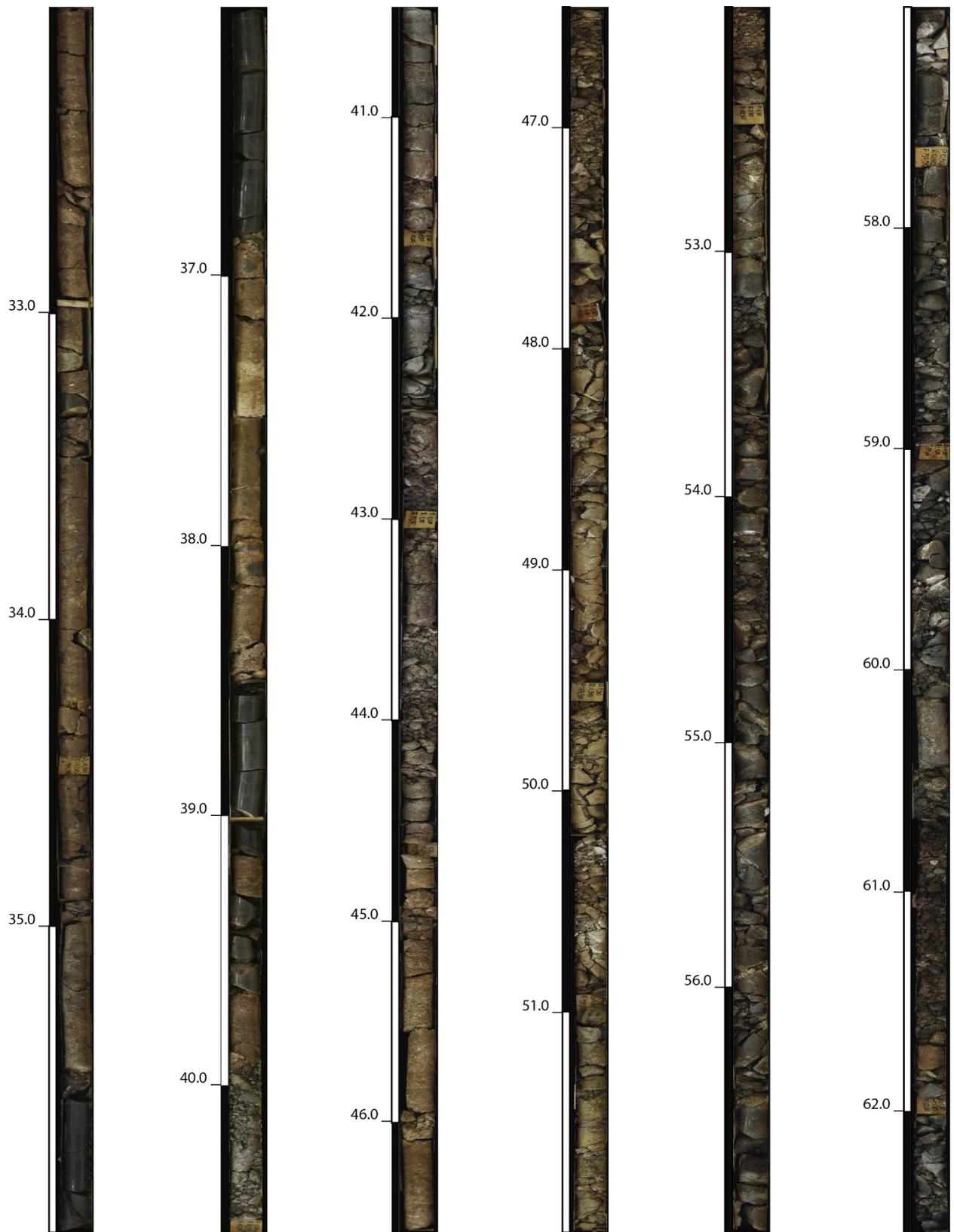


Ilustración 9.9.2 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 7 a 12

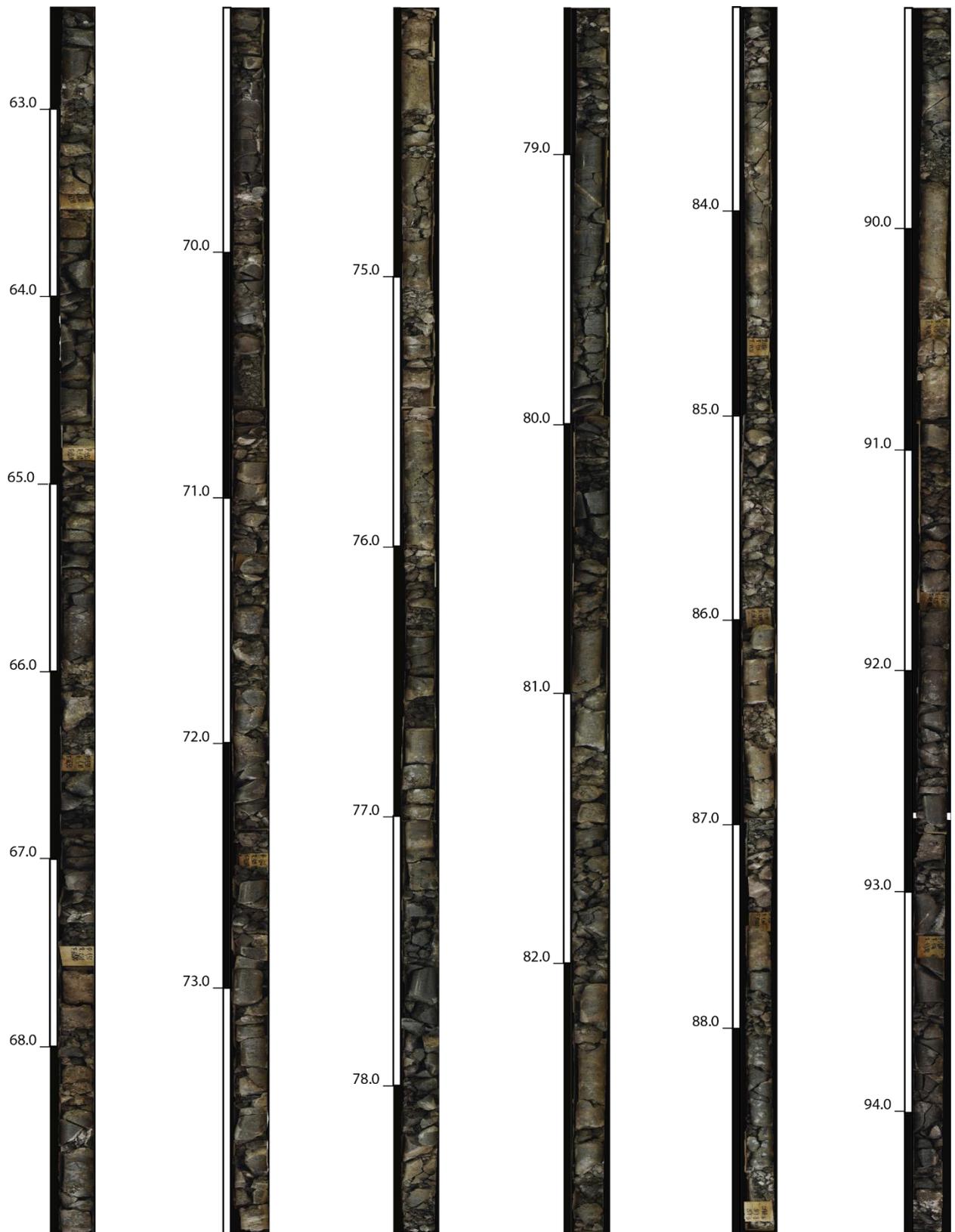


Ilustración 9.9.3 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 13 a 18

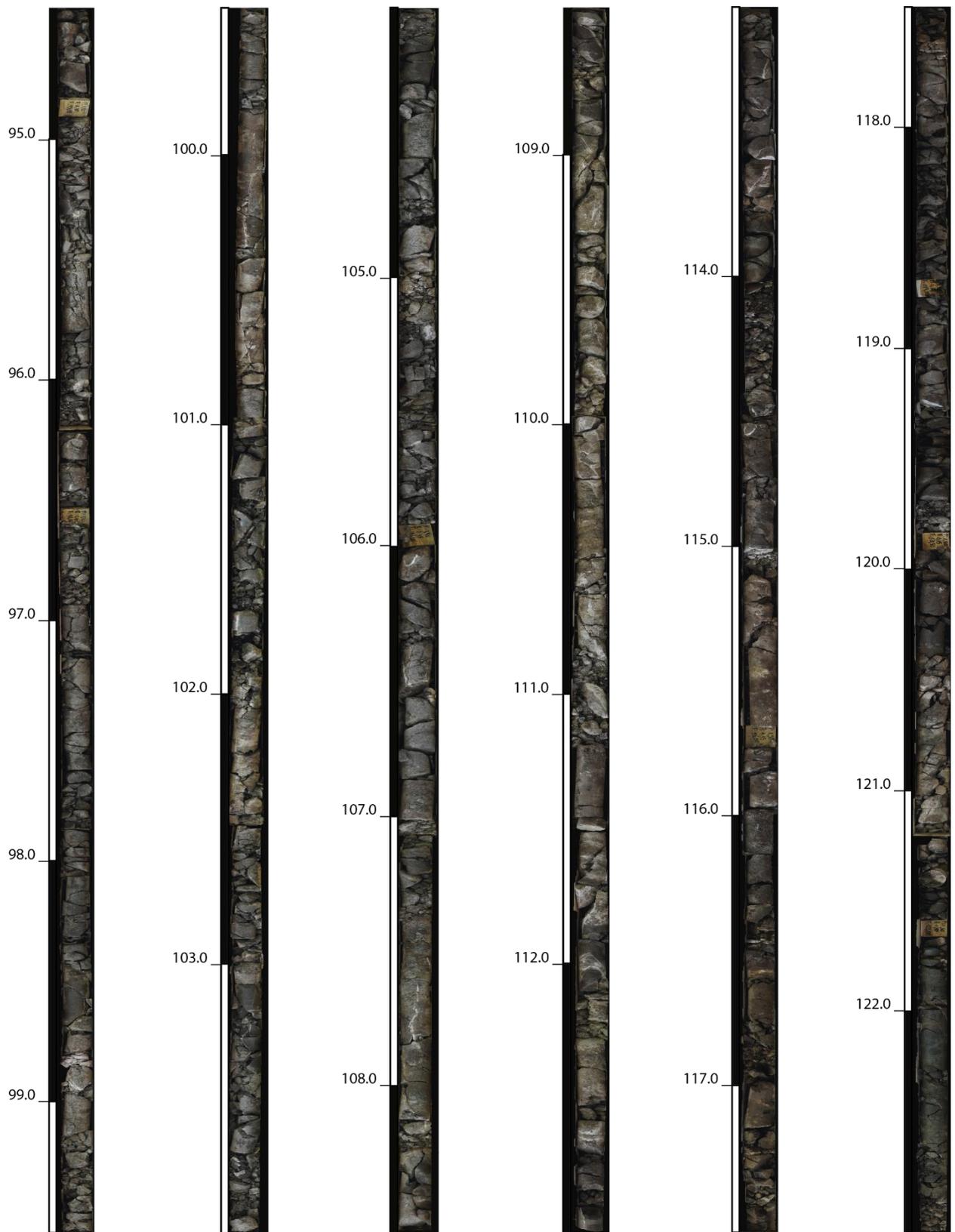


Ilustración 9.9.4 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 19 a 24

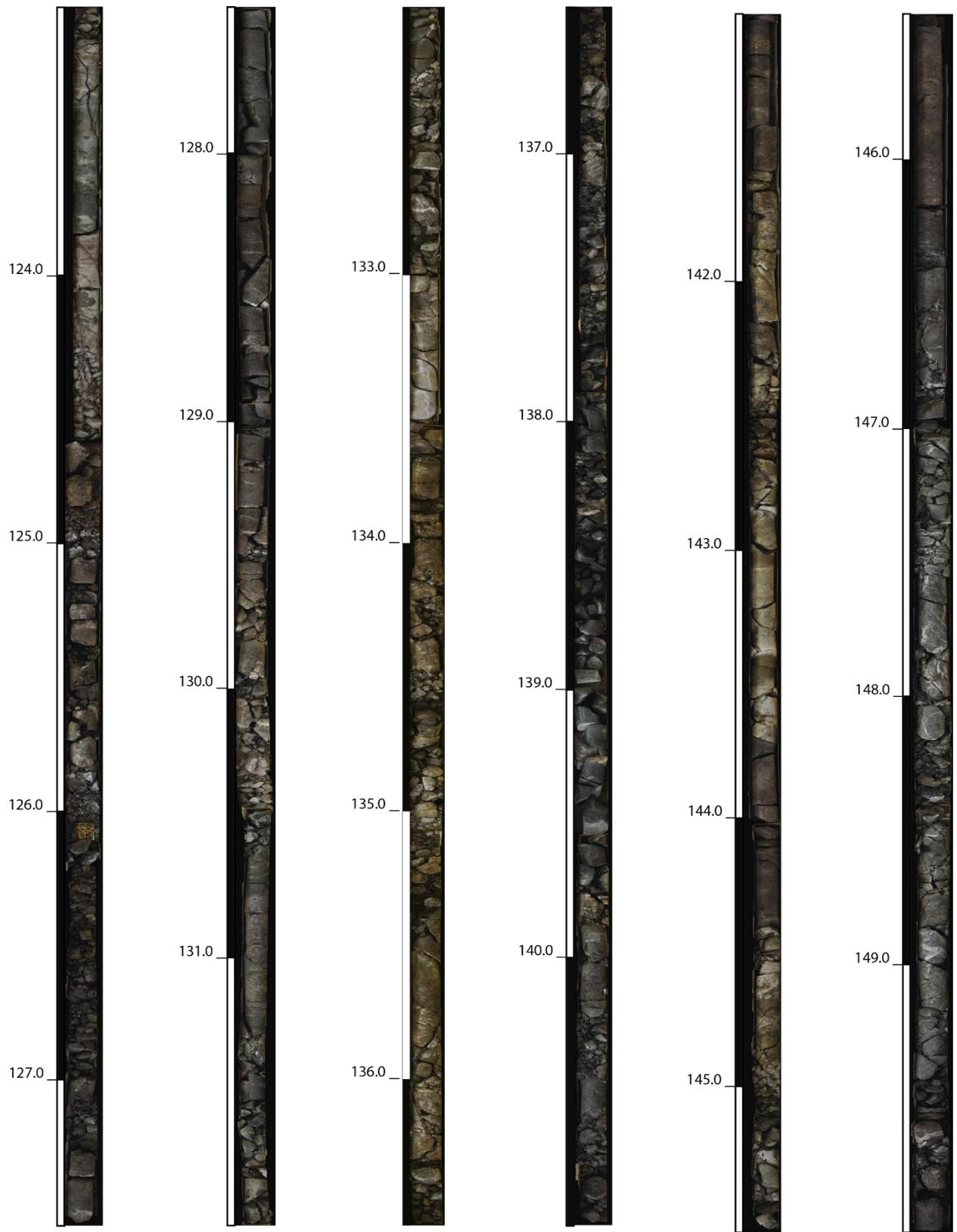


Ilustración 9.9.5 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 25 a 30

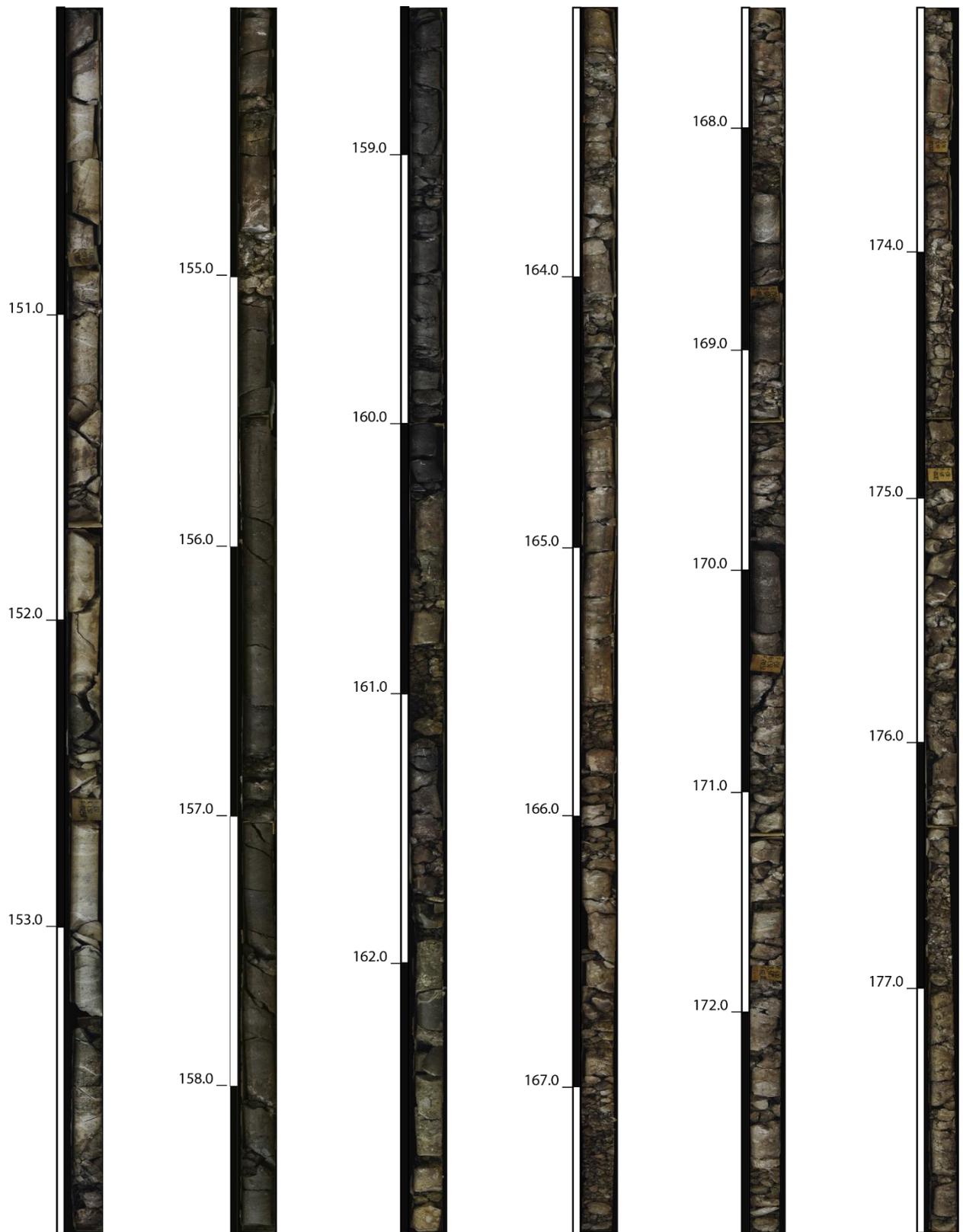


Ilustración 9.9.6 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 31 a 36

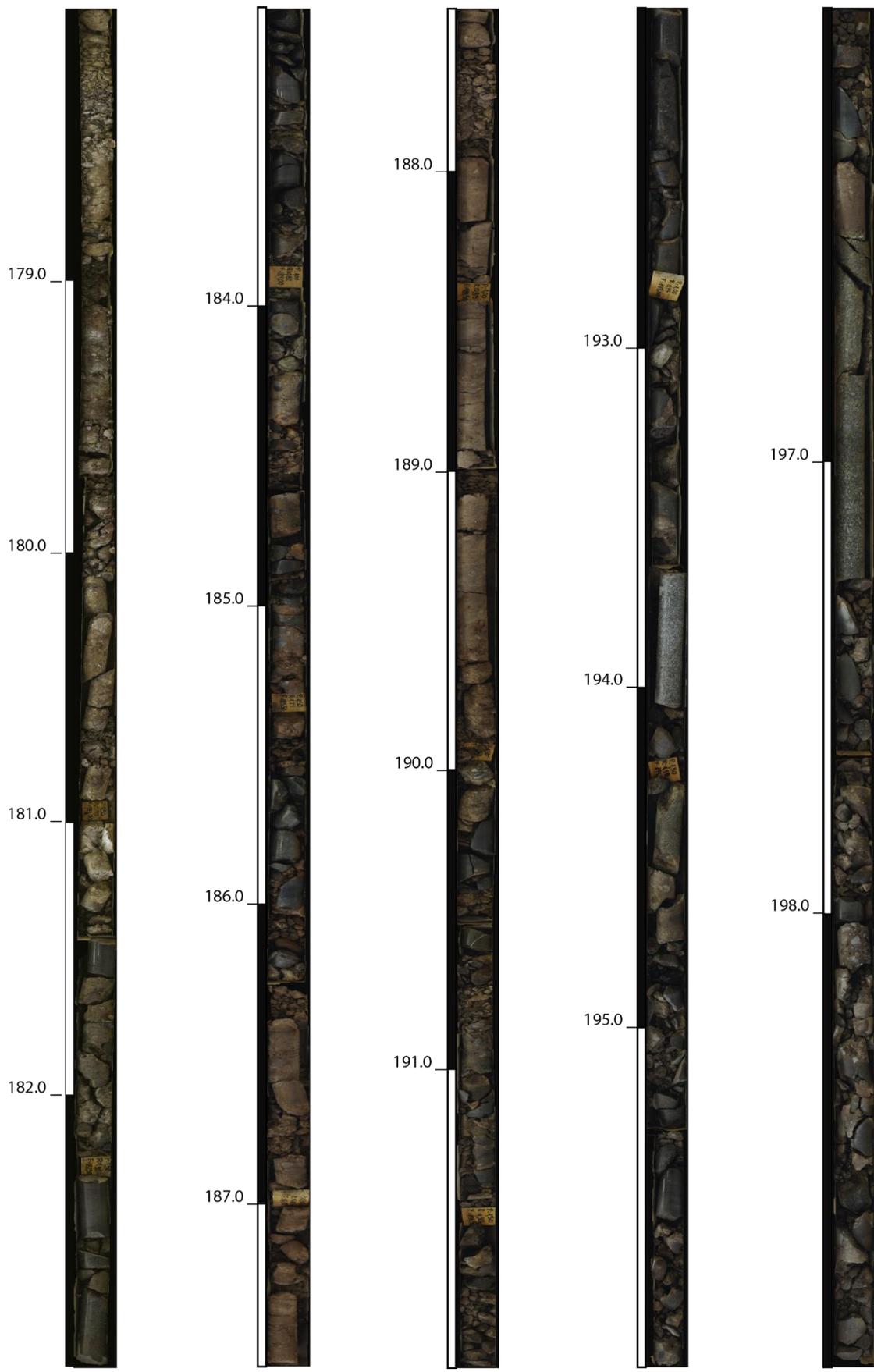


Ilustración 9.9.7 Cajas de testigos sondaje S-1. De izquierda a derecha cajas 37 a 41

9.2. Resultados Rx y FTIR

Tabla 9.1 A) Resultados difracción de rayos x. B) Resultados FTIR.

A)

MUESTRA	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti	V	Mn	Fe	Cu	Zn	Sr	Y	Zr	Ba	Tm
C12-02	22,383	55,107	1,804	5,204		1,288	0,055	0,313	13,768			0,079				
C12-03	24,944	55,844	0,456	13,05		0,334		0,106	5,111	0,019		0,024			0,111	
C12-04	26,32	58,47	0,37	13,33		0,07		0,06	1,37			0,01				
C13-01	26,086	54,968	0,315	14,173	1,404			0,139	2,896			0,019				
C19-01	26,32	54,64	2,72	10,64		0,5	0,019	0,24	4,69			0,015	0,009	0,059		0,16
C21-01	24,63	59,97	0,27	13,13		0,09		0,1	1,79			0,02		0,006		
C28-01	23,72	58,25	0,4	14,44		0,26		0,12	2,8			0,02				
C29-01	26,74	56,21	0,23	16,4				0,04	0,35			0,04				
C32-01	27,23	46,28	5,68	1,792		1,828	0,063	0,051	17,04		0,023					
C33-01	28,44	44,57	4,45	2,97		1,83	0,07	0,05	17,56	0,02	0,02	0,02	0,01			

B)

MUESTRA	Albita	Calcita	Cuarzo	Illita	Microclina	Montmorillonita	Nontronita	Orthosa	Vermiculita	Yeso
C12-02	30,2		18,7	18,5		18,7		13,9		
C12-03	32		15	2		31	10			10
C12-04	24,3		15,1	10,8		22,7			16,2	10,8
C13-01	37,7		12,3	3,7		21,6			12,3	12,3
C19-01	18,4		7,2	9,7	19,8	18,4		16,9	9,7	
C21-01	38,4		11,6	10,5		31,1				8,4
C28-01	36,7		12,4	11,3		29,9				9,6
C29-01	38,6		10,2			35	10,2			6,1
C32-01		1,4	9,1	89,5						
C33-01	19,7	1,5		69		9,9				

9.3. Sondaje S-2

Digitalización de las muestras en *cuting* extraídas desde el sondaje de aire reverso S-2.

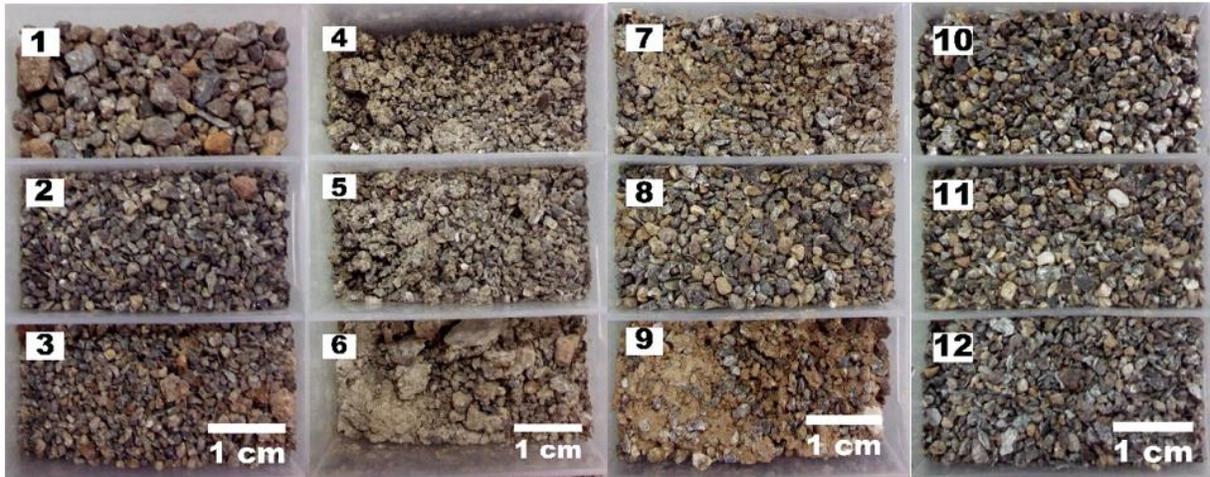


Ilustración 9.9.8 Muestra sondaje S-2 primeros 12 m

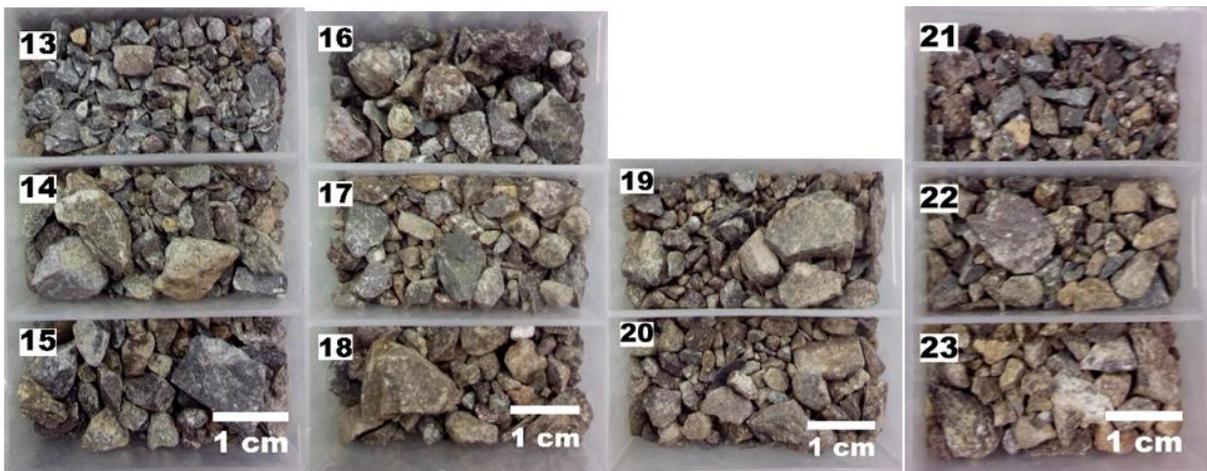


Ilustración 9.9.9 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 23

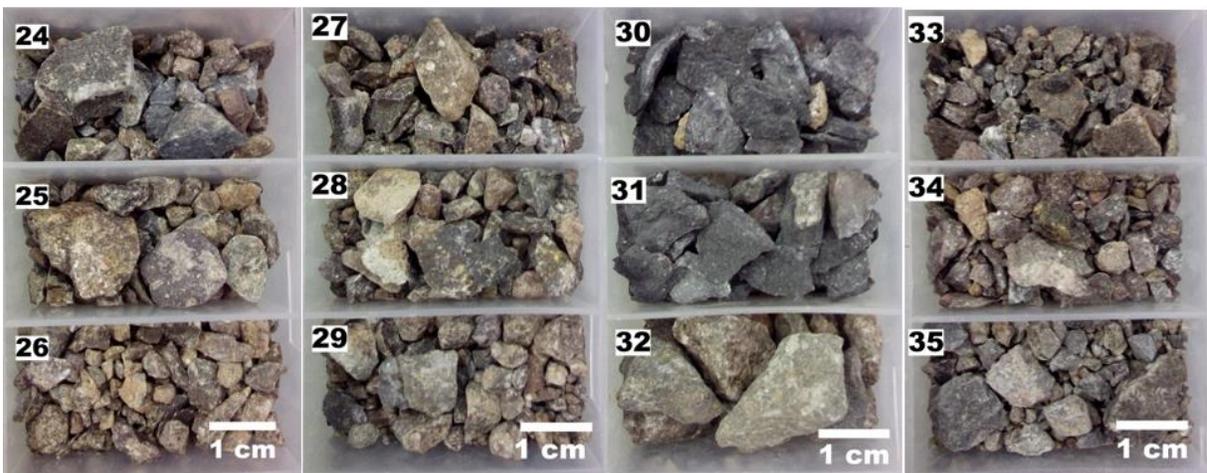


Ilustración 9.9.10 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 35

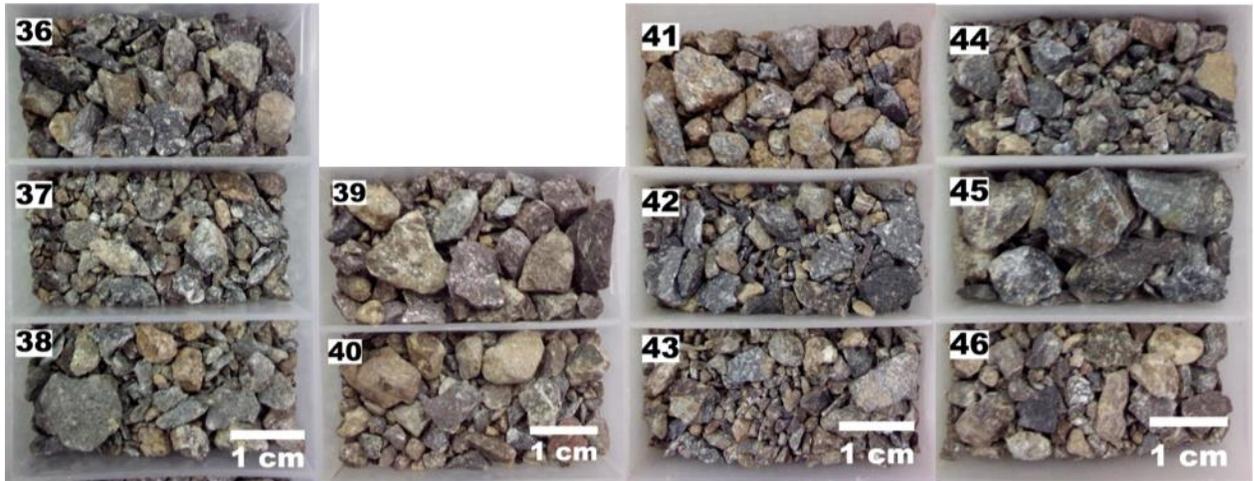


Ilustración 9.9.11 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 46

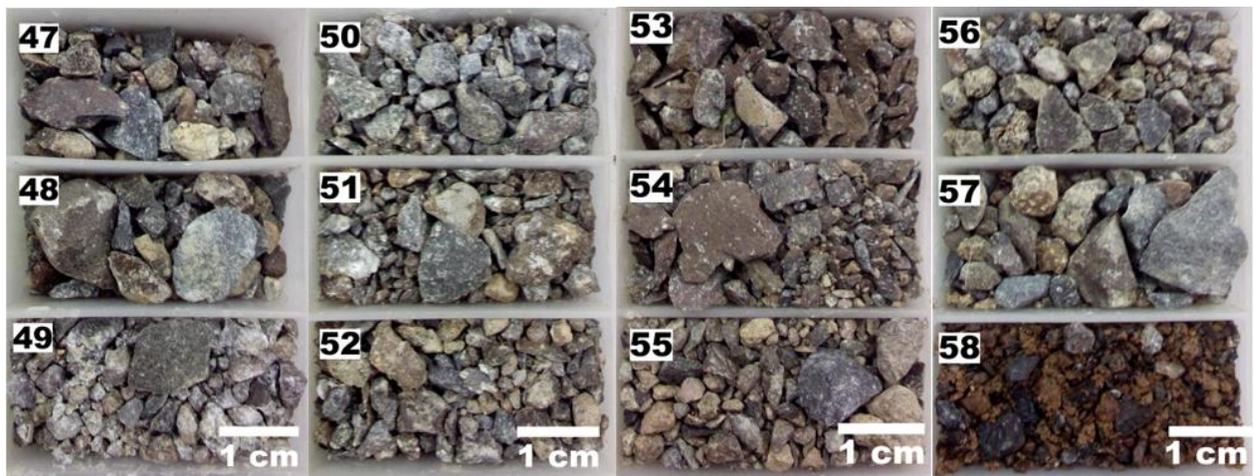


Ilustración 9.9.12 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 58

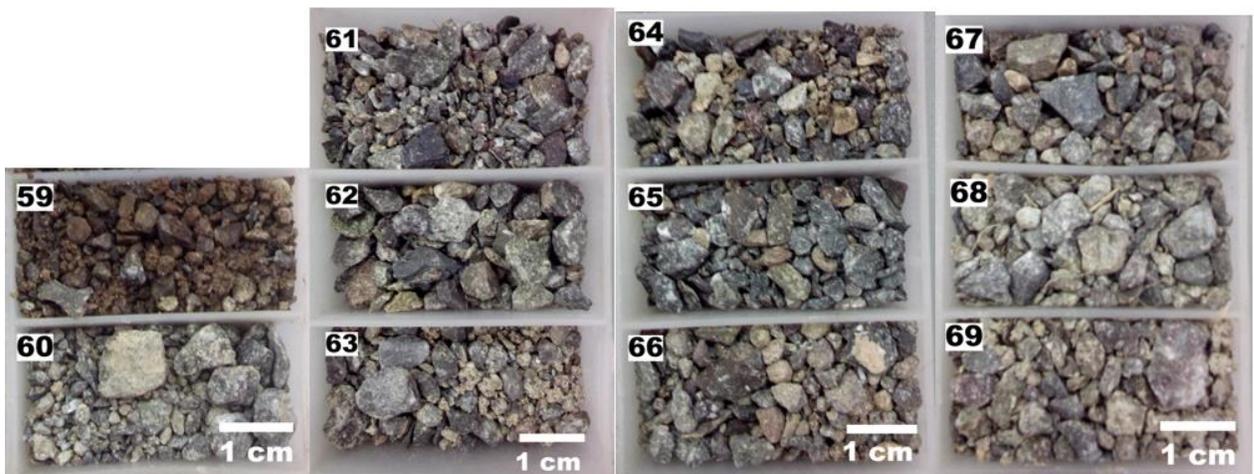


Ilustración 9.9.13 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 69

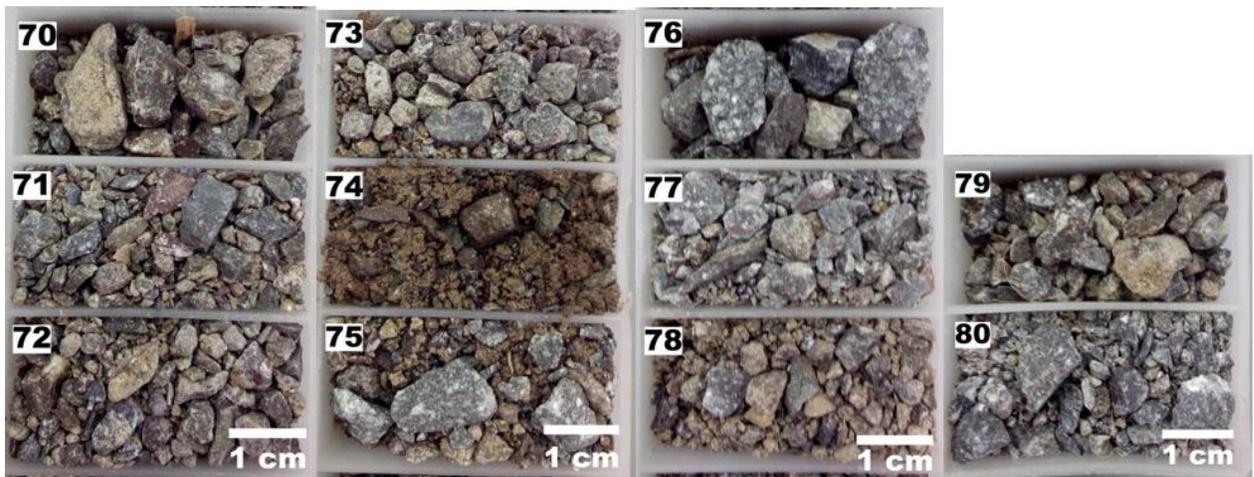


Ilustración 9.9.14 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 80

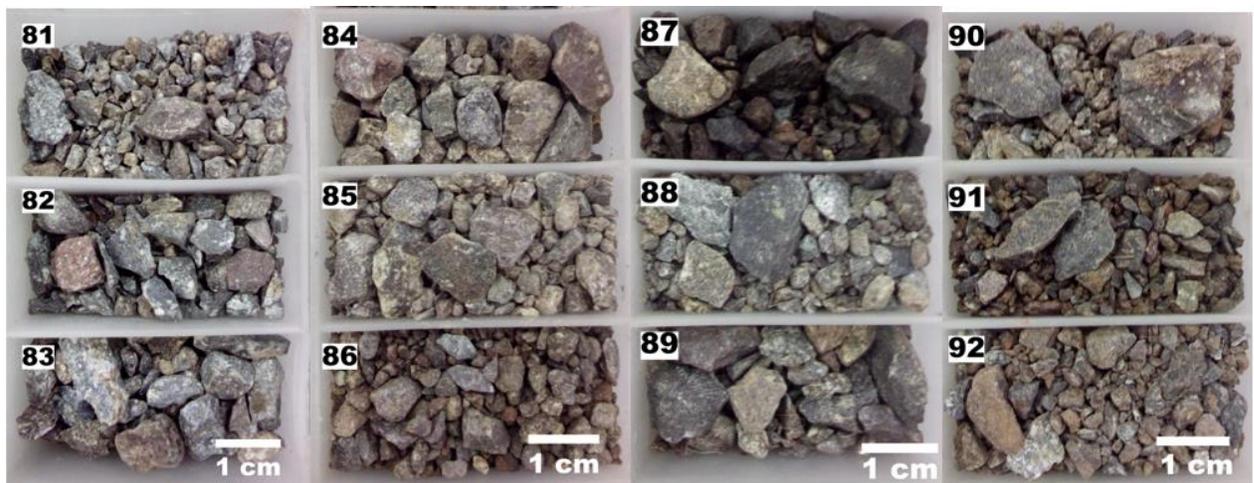


Ilustración 9.9.15 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta metro 92



Ilustración 9.9.16 Continuación de muestras sondaje S-2 hasta 100 metros