

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y
PETRÓLEOS**

**ESTUDIO LITOESTRATIGRÁFICO Y DE ALTERACIONES
HIDROTERMALES EN LOS TESTIGOS DE PERFORACIÓN DE
LOS POZOS TTC-2, TTC-3 Y TTC-9, DEL INTERIOR DE LA
CALDERA CHACANA, PROVINCIAS DE NAPO Y PICHINCHA.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN OPCIÓN PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERAS GEÓLOGAS**

YESENIA CORINA ENRÍQUEZ PINCAY

yesenia18_05@hotmail.es

KARLA ALEJANDRA MORALES LEIVA

karlitaml12@hotmail.com

DIRECTOR: DR. PEDRO SANTIAGO REYES BENÍTEZ

pedro.reyes@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2017

DECLARACIÓN

Nosotras, Yesenia Corina Enríquez Pincay y Karla Alejandra Morales Leiva, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

YESENIA ENRÍQUEZ

KARLA MORALES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Yesenia Corina Enríquez Pincay y Karla Alejandra Morales Leiva, bajo mi supervisión.

Dr. Pedro Santiago Reyes Benítez

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), especialmente al Ing. Oscar Larrea, por brindarnos las facilidades para estudiar los testigos de perforación del Proyecto Ríos Orientales; y al personal de la Estación del Sistema Integrado de Agua Potable Papallacta, por brindarnos constante apoyo logístico durante el trabajo de campo.

A la Facultad de Geología y Petróleos de la Escuela Politécnica Nacional, por permitirnos utilizar los laboratorios para preparar las láminas delgadas y realizar los estudios petrográficos.

Al Ing. Bernardo Beate por su ayuda, guía, dirección y motivación durante la realización de este trabajo.

A los Doctores: Pedro Reyes y Daniel Andrade, por su valioso tiempo y buena predisposición para revisar este proyecto.

A nuestro querido profesor y gran amigo, el Ing. Tomás Espinoza, por sus acertados consejos y su apoyo incondicional; siempre fue un gran aliento para culminar con éxito nuestro paso por la universidad.

A la Ing. María José Hernández, por las facilidades brindadas para utilizar el laboratorio de microscopía.

A los Ingenieros: Osman Poma, Dayanara Hinojosa y Wilmer Merino, por su gentil ayuda para la realización de los análisis espectrales.

A nuestros padres, por ser el soporte fundamental de nuestras vidas y por habernos brindado su confianza y respaldo durante toda la carrera.

A nuestros queridos maestros, por mostrarnos el apasionante mundo de la geología, además de compartirnos sus valiosos conocimientos y experiencias.

A nuestros amigos de la Facultad, con quienes hemos compartido grandes momentos de alegría y quienes siempre nos brindan su ánimo y apoyo.

DEDICATORIA

A Dios, mi guía y fuente de fortaleza, quien bendice cada pasó en mi vida.

A mis amadísimos padres Miguel e Hiralda, quienes son el soporte de mi vida y mi gran ejemplo de superación.

A mis hermanitas Evelyn, Cintia, Mishu y Damaris, por brindarme siempre una enseñanza y demostrarme que en la vida no existen obstáculos que no se puedan superar.

A mis hermosos sobrinos Ma. Belén, Migue y Mathi, que son mi vida, una bendición de Dios y mi inspiración para salir adelante.

A mi amado novio, amigo y compañero Marco, por su amor y su apoyo incondicional en cada paso de mi vida.

A mi pequeño ángel, quien es mi inspiración para alcanzar muchas metas, con quien compartiré mi amor y mis logros por el resto de mis días.

A mi amada compañerita durante toda la carrera y quien me brindará su gran amor y compañía durante muchos años más, lffy.

Yesenía Corina Enríquez Píncay

DEDICATORIA

A Dios, por tantas bendiciones recibidas, y por haberme dado la fortaleza y sabiduría para culminar con éxito esta etapa.

A mi mamita Alexandra, porque este logro es tan mío como tuyo, todo lo que soy te debo a ti, a tus enseñanzas, tu apoyo y amor incondicional; tú has sido la mejor escuela de mi vida, eres la mujer más a la que más admiro en el mundo por tu fortaleza y valentía.

A mi abuelita Olguita, quien con su inmenso amor siempre me alentó a estudiar y a dar todo de mí para ser una mejor persona cada día.

A mi papi John, quien desde el cielo me ha cuidado y hoy estaría inmensamente feliz de compartir este triunfo conmigo.

A mi ñaño Sebas, por ser mi compañero de vida, de juegos y peleas.

A mis hijitos perrunos: Deisha y Pietro, por haber llenado mi vida de alegría con sus gracias y por su compañía durante las largas noches de estudio.

Karla Alejandra Morales Leiva

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
DEDICATORIA	VI
CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT.....	XV
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	16
1.1 ANTECEDENTES	16
1.2 JUSTIFICATIVOS	17
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4 ALCANCE	18
1.5 METODOLOGÍA	19
1.6 ÁREA DE ESTUDIO.....	20
1.6.1 MORFOLOGÍA Y CLIMA.....	21
1.6.2 VÍAS DE ACCESO Y POBLACIONES	22
1.6.3 UBICACIÓN DE LOS POZOS	22
1.7 SÍNTESIS DE TRABAJOS PREVIOS.....	24
1.8 ASPECTOS CONCEPTUALES.....	26
1.9 DESARROLLO DE ESTE TRABAJO	31
CAPÍTULO 2: MARCO GEODINÁMICO Y GEOLOGÍA DE LA CALDERA CHACANA	32

2.1	MARCO GEODINÁMICO	32
2.2	GEOLOGÍA REGIONAL.....	33
2.2.1	LITOESTRATIGRAFÍA DEL BASAMENTO.....	34
2.2.1.1	Cordillera Real (Basamento Metamórfico).....	34
2.2.1.2	Volcanismo Terciario	36
2.2.1.3	Volcanismo Cuaternario en la Cordillera Real.....	36
2.3	GEOLOGÍA DE LA CALDERA CHACANA	38
2.3.1	MORFOLOGÍA DE LA CALDERA	38
2.3.2	ESTRATIGRAFÍA.....	39
2.3.2.1	Unidades del Basamento	39
2.3.2.2	Flanco exterior de la caldera (Serie Tablones).....	39
2.3.2.3	Unidades asociadas al hundimiento del centro de la Caldera	40
2.3.2.4	Relleno Inicial de la Caldera.....	41
2.3.2.5	Intrusión de Sill y/o Lacolito y Resurgencia de la Caldera.....	42
2.3.2.6	Actividad volcánica entre 240-160 ka	43
2.3.2.7	Actividad volcánica entre 40-20 Ka	43
2.3.2.8	Depósitos recientes.....	45
2.3.3	MODELO DE EVOLUCIÓN DE LA CALDERA.....	47
CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN LITOESTRATIGRÁFICA DE LOS		
TESTIGOS DE PERFORACIÓN DE LOS POZOS TTC-2, TTC-3 Y TTC-9		
49		
3.1	INTRODUCCIÓN	49
3.2	ESTRATIGRAFÍA Y PETROGRAFÍA.....	49
3.2.1	UNIDADES DEL POZO TTC-2.....	50
3.2.1.1	Depósito de morrena (0-13.50m)	50
3.2.1.2	Flujo 1 –Dacita afanítica bandeada (13.50-103.81 m).....	53
3.2.1.3	Brecha polimíctica (103.81-104.70 m).....	55
3.2.1.4	Brecha polimíctica de metamórficos (104.70-118.45 m)	58
3.2.1.5	Depósito lacustre laminado y microfallado (118.45-118.80 m)....	61
3.2.1.6	Flujo 2 –Dacita afanítica bandeada (118.80-158.55 m).....	62
3.2.1.7	Depósito lacustre laminado y microfallado (158.55-159.60 m)....	64
3.2.1.8	Arenisca gruesa y brecha granular (159.60-160.00 m)	65
3.2.2	UNIDADES DEL POZO TTC-3.....	68

3.2.2.1	Depósito de morrena (0 - 26.10 m)	68
3.2.2.2	Flujo 3 - Dacita biotítica porfirítica (26.10-132.65 m).....	71
3.2.2.3	Flujo 4 - Dacita porfirítica negra (132.65-143.75 m).....	74
3.2.2.4	Flujo 5 - Andesita porfirítica negra (143.75-172.07 m)	77
3.2.2.5	Flujo 6 - Andesita porfirítica negra (172.07-205.46 m)	79
3.2.2.6	Brecha polimíctica (205.46-209.76 m).....	81
3.2.2.7	Flujo 7 - Andesita porfirítica negra (209.76-250 m)	84
3.2.3	UNIDADES DEL POZO TTC-9.....	87
3.2.3.1	Suelo (0 - 1.50 m).....	87
3.2.3.2	Depósito de morrena (1.50-15.60 m)	87
3.2.3.3	Brecha polimíctica estratificada (15.60-25.40 m)	89
3.2.3.4	(RA) Toba dacítica gruesa (25.40-33.05 m)	93
3.2.3.5	Brecha polimíctica masiva (33.05-47.70 m)	96
3.2.3.6	(RA) Dique 1 - Andesita ácida porfirítica (47.70-64.05 m).....	100
3.2.3.7	Brecha polimíctica masiva (64.05-71.62 m)	102
3.2.3.8	Flujo 8 - Andesita ácida porfirítica (71.62-97.53 m).....	105
3.2.3.9	Brecha polimíctica masiva hidrotermalizada (97.53-99.75 m)...	107
3.2.3.10	(RA) Dique 2 - Andesita ácida porfirítica (99.75-112.20 m).....	110
3.2.3.11	Brecha polimíctica masiva (112.20-120.39 m)	112
3.2.3.12	(RA) Toba andesítica ácida (120.39-129.60 m).....	115
3.2.3.13	Brecha freatomagmática (Diatrema) (129.60-576.75 m).....	117
3.2.3.13.1	Fragmentos juveniles:	118
3.2.3.13.2	Fragmentos de Pórfidos	119
3.2.3.13.3	Fragmentos de intrusivos	123
3.2.3.13.4	Fragmentos volcánicos.....	124
3.2.3.13.5	Fragmentos hidrotermales.....	135
3.2.3.13.6	Fragmentos Piroclásticos	136
3.2.3.14	Flujo 9 - Andesita ácida porfirítica (576.75-716.00 m).....	141
3.2.3.15	Brecha polimíctica estratificada (716.00-738.75 m)	143
3.2.3.16	Flujo 10 - Andesita porfirítica (738.75-773.62 m)	146
3.2.3.17	Flujo 11 - Andesita porfirítica (773.62- 805.85 m)	148
3.2.3.18	Flujo 12 - Andesita porfirítica (805.85-850.70 m)	150
3.2.3.19	Flujo 13 - Andesita porfirítica (850.70-880.00 m)	152

3.2.4	LITOESTRATIGRAFÍA DE LOS TRES POZOS	154
3.2.4.1	Pozo TTC-2	154
3.2.4.2	Pozo TTC-3	156
3.2.4.3	Pozo TTC-9	158
3.3	ANÁLISIS DE ELEMENTOS RADIOACTIVOS	166
3.3.1	INTRODUCCIÓN.....	166
3.3.2	INTERPRETACIÓN DE DATOS DE U, Th Y K EN LOS POZOS.....	167
CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LA ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN LOS POZOS TTC-2, TTC-3 Y TTC-9.....		172
4.1	INTRODUCCIÓN	172
4.2	MARCO CONCEPTUAL.....	173
4.1.1	SISTEMA HIDROTHERMAL Y SUS COMPONENTES	173
4.1.2	FLUIDOS HIDROTHERMALES	174
4.1.2.1	Tipos de fluidos hidrotermales.....	174
4.1.3	ALTERACIÓN HIDROTHERMAL.....	175
4.1.3.1	Alteración hidrolítica o metasomatismo del ion hidrógeno	176
4.1.3.2	Estilos y tipos de alteración hidrotermal	177
	Alteración potásica y propilítica.....	177
	Alteración fílica.....	178
	Alteración argílica, argílica intermedia y argílica avanzada.....	178
4.2	OCURRENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE LOS MINERALES DE ALTERACIÓN EN LOS POZOS.....	180
4.2.1	ARCILLA	180
4.2.2	CLORITA.....	185
4.2.3	ZEOLITAS	187
4.2.4	HEMATITA	190
4.2.5	SÍLICE	192
4.2.6	CALCITA	194
4.2.7	CUARZO	198
4.2.8	PIRITA.....	200
4.3	RESULTADOS.....	201
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		207

5.1	DISCUSIÓN	208
5.2	CONCLUSIONES	211
5.3	RECOMENDACIONES	214
	BIBLIOGRAFÍA	216

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1:	Mapa del área de estudio a escala 1:250 000.....	20
Figura 1.2:	a) Mapa de ubicación de los pozos. b) Perfil SE-NW	23
Figura 1.3:	Modelo generalizado de la evolución de una caldera riolítica	27
Figura 1.4:	Esquema de una erupción de un volcán maar-diatrema	29
Figura 2.1:	Esquema geológico del Ecuador.....	32
Figura 3.1:	Depósito morrénico TTC-2	52
Figura 3.2:	Muestras TTC-2-17 y TTC-2-57.....	54
Figura 3.3:	Muestras TTC-2-104.1 y TTC-2-104.7	57
Figura 3.4:	Muestras TTC-2-116 y TTC-2-117.....	60
Figura 3.5:	Contacto de la secuencia lacustre con la brecha de metamórficos... ..	61
Figura 3.6:	Muestra TTC-2-122 y TTC-2-153.....	63
Figura 3.7:	Muestra TTC-2-159.3.....	64
Figura 3.8:	Muestra TTC-2-159.7.....	67
Figura 3.9:	Contacto entre el till y el flujo de lava dacítico (Flujo 3).....	70
Figura 3.10:	Muestras TTC-3-39, TTC-3-86 y TTC-3-86.....	73
Figura 3.11:	Muestras TTC-3-140 y TTC-3-138	76
Figura 3.12:	Muestras TTC-3-170 y TTC-3-150	78
Figura 3.13:	Muestras TTC-3-177 y TTC-3-204	80
Figura 3.14:	Muestras TTC-3-205 y TTC-3-209	83
Figura 3.15:	Muestras TTC-3-223, TTC-3-247 y TTC-3-249 247	85
Figura 3.16:	Till del Pozo TTC-9 en contacto con brecha polimíctica.....	88

Figura 3.17: Muestra TTC-9-18, TTC-9-21 y TTC-9-25.....	92
Figura 3.18: Muestra TTC-9-28	95
Figura 3.19: Muestra TTC-9-42	98
Figura 3.20: Muestra TTC-9-63.	101
Figura 3.21: Ilustración de dique 1 cortando las brechas supra y subyacentes.	102
Figura 3.22: Muestra TTC-9-66	104
Figura 3.23: Muestra TTC-9-72 y TTC-9-76	106
Figura 3.24: Muestra TTC-9-97	109
Figura 3.25: Muestra TTC-9-109	111
Figura 3.26: Muestra TTC-9-117	114
Figura 3.27: Muestra TTC-9-117.....	116
Figura 3.28: Muestra TTC-9-594	142
Figura 3.29: Muestras TTC-9-720 y TTC-9-736.....	145
Figura 3.30: Muestras TTC-9-743 y TTC-9-770	147
Figura 3.31: Muestras TTC-9-777 y TTC-9-804	149
Figura 3.32: Muestras TTC-9-828 y TTC-9-838	151
Figura 3.33: Muestra TTC-9-868.....	153
Figura 3.34 Esquema litoestratigráfico del Pozo TTC-2	154
Figura 3.35: Esquema litoestratigráfico del Pozo TTC-3	156
Figura 3.36: Esquema litoestratigráfico del Pozo TTC-9	158
Figura 3.37: Modelo de la diatrema y maar.....	162
Figura 3.38: Esquema Litoestratigráfico de los Pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9.	165
Figura 4.1: Mineralogía de alteración común en sistemas hidrotermales.....	179
Figura 4.2: Esquema de minerales de alteración en los pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9	181
Figura 4.3: Alteración hidrotermal a arcilla	182
Figura 4.4: Espectro de esmectita de la muestra TTC-2-104.7	183
Figura 4.5: Espectro de illita-esmectita de la muestra TTC-9-118.....	184
Figura 4.6: Espectro de illita de la muestra TTC-9-346.7	184
Figura 4.7: Alteración hidrotermal a clorita	186
Figura 4.8: Espectro de clorita de la muestra TTC-2-103.....	187
Figura 4.9: Alteración hidrotermal a zeolitas.	189
Figura 4.10: Espectro de zeolita de la muestra TTC-2-49.....	190

Figura 4.11: Alteración hidrotermal a hematita	191
Figura 4.12: Espectro de hematita en la muestra TTC-3-86	192
Figura 4.13: Alteración hidrotermal a sílice.	194
Figura 4.14: Alteración hidrotermal a calcita.	197
Figura 4.15: Espectro de calcita de la muestra TTC-2-30	198
Figura 4.16: Alteración hidrotermal a cuarzo	199
Figura 4.17: Alteración hidrotermal a pirita.....	201
Figura 4.18: Esquema de mineralogía de alteración del Pozo TTC-2	202
Figura 4.19: Esquema de mineralogía de alteración del Pozo TTC-3	203
Figura 4.20: Esquema de mineralogía de alteración del Pozo TTC-9	205

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Resumen de fragmentos encontrados en la diatrema comunes con otros depósitos	163
Tabla 3.2: Concentraciones de radioelementos en diferentes clases de rocas. Tomada de Killeen, 1979	166
Tabla 3.3: Elementos radioactivos del pozo TTC-2.	168
Tabla 3.4: Elementos radioactivos del pozo TTC-3.	169
Tabla 3.5: Elementos radioactivos del pozo TTC-9.	170
Tabla 4.1: Distribución de las arcillas en los pozos	184

RESUMEN

La Caldera Chacana se encuentra a aproximadamente 67 km al Este de la ciudad de Quito, en las provincias de Napo y Pichincha. Dentro de la caldera se encuentran los pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9, ubicados en un trayecto lineal con rumbo SE-NO, entre el sector La Virgen y Papallacta; estos pozos se encuentran a una cota de 3253, 3750 y 4047 msnm, y tienen una profundidad 160, 250 y 880 m, respectivamente. En los testigos de perforación se realizó el estudio detallado de la litoestratigrafía y de alteraciones hidrotermales, para lo cual se llevó a cabo el logueo de 1290 m de roca, de los que se tomaron 192 muestras para estudios macroscópicos y análisis de Terraspec; además se realizaron 73 láminas delgadas para el estudio petrográfico y mineralógico, tanto del protolito como de la alteración hidrotermal.

En el pozo TTC-2 se han identificado dos unidades flujos de lava afanítica de composición dacítica, intercalados por dos secuencias de brechas clásticas que contienen tanto fragmentos de rocas metamórficas, las cuales corresponden al basamento de la Cordillera Real, como fragmentos de rocas volcánicas; además hay algunas intercalaciones de secuencias lacustres. El pozo TTC-3 está constituido por una serie de flujos de lava porfíricos que varían en composición de andesitas básicas (con bytownita y piroxeno) a dacitas (con biotita, anfíbol, plagioclasa y cuarzo), intercalados por una secuencia clástica de brechas polimícticas sin clastos metamórficos. El pozo TTC-9 presenta a la base una secuencia de flujos de lava porfíricos de composición andesítica, cortados por una brecha freatomagmática (diatrema), cuya aparente manifestación en superficie son una secuencia de brechas polimícticas y tobas que corresponderían al respectivo maar. Las unidades superiores de los tres pozos son depósitos inalterados de till formados durante el Pleniglacial y Tardiglacial

La acción de fluidos alcalinos clorurados sobre estas rocas generó alteración hidrotermal, caracterizada por la presencia de: arcillas (esmectita, illita- esmectita e illita; definidas con Terraspec), clorita, calcita, cuarzo, sílice, pirita, hematita y zeolitas; correspondiente a una zona de alteración hidrotermal predominantemente sub-propilítica.

ABSTRACT

The Chacana caldera complex is located approximately 65 km east of Quito, at the Napo and Pichincha provinces. In 2012, EPMAPS carried out 10 drillings as part of the Ríos Orientales project. The TTC-2, TTC-3 and TTC-9 wells are located inside the caldera, in a SE-NO trend between La Virgen area and Papallacta village; those wells are at an altitude of 3253, 3750 and 4047 meters above sea level, and they have a depth of 160, 250 and 880 meters, respectively. This study provides a detailed analysis of lithostratigraphy and hydrothermal alteration of the drill core of these 3 drills reaching a total of 1290 m of rock logged. Additionally, 192 samples were selected for macroscopic studies and Terraspec analysis, and 73 thin sections were prepared for petrographic and mineralogical study of protholith and hydrothermal alteration.

Aphanitic lava flows of dacitic composition were identified in the TTC-2 well, interlayered by sequences of clastic breccias, containing fragments of metamorphic rocks from the Cordillera Real basement and fragments of volcanic rocks, and by lacustrine sequences. The TTC-3 well consists of a series of porphyritic lava flows that vary in composition from basic andesites (with bytownite and pyroxene) to dacites (with biotite, amphibole, plagioclase and quartz), interlayered with a clastic sequence of polymictic breccias. The TTC-9 well shows at its base a sequence of porphyritic lava flows of andesitic composition, cut by phreatomagmatic breccias (diatreme), whose apparently surface manifestation is a sequence of polymictic breccias and tuffs, which probably corresponds to a maar ring structure. The uppermost unit in all three wells are late quaternary unaltered till deposits formed during the Pleniglacial and Lateglacial periods.

The action of chlorinated alkaline fluids over these rocks caused hydrothermal alteration, characterized by a mineral assemblage formed by: clays (smectite, illite-smectite and illite; defined by Terraspec), chlorite, calcite, quartz, silica, pyrite, hematite and zeolites; corresponding to a zone of mainly sub-propylitic alteration.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito EPMAPS, realizó 10 sondajes en el año 2012, como parte del Proyecto Ríos Orientales, obteniendo aproximadamente 3000 metros de núcleos de roca. Dichos sondajes se encuentran distribuidos a diferentes distancias, a lo largo de un trayecto lineal de aproximadamente 20 kilómetros, con rumbo SE-NO, entre los poblados de Papallacta y Paluguillo (Provincias Napo y Pichincha), los sondajes alcanzan una cota aproximada de 3120 msnm. El objetivo fue conocer las propiedades mecánicas de las rocas y analizar la factibilidad de construir por esta trayectoria el Tunel Trans Cordillerano, el cual conduciría agua desde la localidad de Papallacta a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Paluguillo, para luego ser distribuida en el Distrito Metropolitano de Quito.

Tres sondajes a diamantina ubicados al centro y sureste de la trayectoria, denominados: pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9, con 160, 250 y 880 metros de profundidad respectivamente, se encuentran ubicados dentro de la Caldera Chacana. Los pozos TTC-1 y TTC-10 también se encuentran dentro de la caldera, el pozo TTC-1 que se encuentra al Este de la trayectoria, en Papallacta y el pozo TTC-10 está ubicado en el portal de salida del Túnel Quito, cerca del borde occidental de la caldera. Los pozos restantes están situados en el flanco exterior occidental de la caldera.

La Caldera Chacana ocupa gran parte de la cresta de la Cordillera Real y se ubica a 67 kilómetros al Este de la ciudad de Quito, en las provincias de Napo y Pichincha. Se han realizado varios estudios geológicos en la caldera, entre los

que se incluye cartografía geológica, análisis geoquímicos, estudios geofísicos, geotérmicos y geotécnicos, mediante los cuales se ha desarrollado una interpretación geológica de los procesos dinámicos ocurridos en el complejo caldérico. Los resultados de estos estudios muestran que la Caldera Chacana es el complejo volcánico Cuaternario más grande de los Andes del Norte (Hall y Mothes, 2001; 2008) y se lo considera como un prospecto prometedor para albergar fuentes de calor de las que se podría extraer el recurso geotérmico, tanto de sistemas hidrotermales someros, como de sistemas profundos de roca caliente seca. (Beate et al., 2009; 2010; Villares, 2010; Pilicita, 2013).

1.2 JUSTIFICATIVOS

El presente estudio define la litoestratigrafía de los núcleos de roca de los pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9, del Proyecto Ríos Orientales de la EPMAPS, que en su totalidad representan 1290 m de roca de sondaje profundo. Estudios anteriores realizados en estos testigos de perforación se han enfocado en las propiedades mecánicas-geotécnicas de las rocas aledañas al eje del Túnel, mientras que en este proyecto se realiza un estudio litoestratigráfico detallado y completo para definir la petrografía de las unidades litoestratigráficas encontradas en los tres pozos. Además, y debido a que estas rocas se encuentran alteradas hidrotermalmente, la realización de este proyecto aporta con una caracterización de la mineralogía de alteración mediante estudios petrográficos microscópicos y espectrales, con los que se modela la alteración hidrotermal. Tanto la litoestratigrafía como la zonificación de la alteración hidrotermal han sido definidas por primera vez en estos testigos de perforación, en base a la petrografía microscópica sistemática.

Los datos obtenidos en este proyecto de titulación constituyen una fuente de información base para estudios geológicos posteriores relacionados al prospecto geotérmico Chacana y para complementar la información geológica del Proyecto Ríos Orientales.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Aportar al desarrollo del conocimiento geológico de la Caldera Chacana, en cuanto a la petrografía, estratigrafía y alteración hidrotermal, utilizando los testigos de roca obtenidos en los pozos TTC-2, TTC-3 Y TTC-9, que se encuentran ubicados en el interior de la Caldera Chacana.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar la petrografía de los testigos de perforación de los pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9, de la Caldera Chacana, para definir y caracterizar las unidades litoestratigráficas presentes.
2. Analizar, caracterizar y zonificar la alteración hidrotermal presente en la secuencia litoestratigráfica de los tres pozos, a través del estudio detallado de 1290 m de testigos de roca.
3. Interpretar los datos en un modelo conceptual preliminar.

1.4 ALCANCE

La información litológica para el desarrollo del presente trabajo se obtuvo a partir de la descripción petrográfica macroscópica y mesoscópica de 1290 m de testigos de roca, correspondientes a los pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9, extraídos del interior de la Caldera Chacana. De los testigos de roca se tomaron 192 muestras de mano representativas, que fueron estudiadas macroscópicamente y a partir de las cuales se elaboraron 73 láminas delgadas para el análisis petrográfico microscópico. Con los datos obtenidos se caracterizó cada una de las unidades litoestratigráficas y la alteración hidrotermal.

Además, en las 192 muestras de mano se efectuó el análisis complementario de espectros de minerales por Terraspec, obteniendo un total de 360 datos espectrales, con los que se identificaron algunos minerales de alteración

presentes en las muestras. También se utilizó la herramienta Spectral Gamma Ray, con la cual se midieron los parámetros U, Th y K en cada una de las muestras de mano.

1.5 METODOLOGÍA

El presente estudio se realizó siguiendo cuatro fases principales:

Fase I.- Recopilación de la información existente y elementos cartográficos con respecto al área de estudio: libros, publicaciones científicas, informes técnicos, tesis de grado, mapas geológicos y topográficos, fotografías aéreas, imágenes satelitales e información inédita, que constituyeron una base de información para el desarrollo del proyecto.

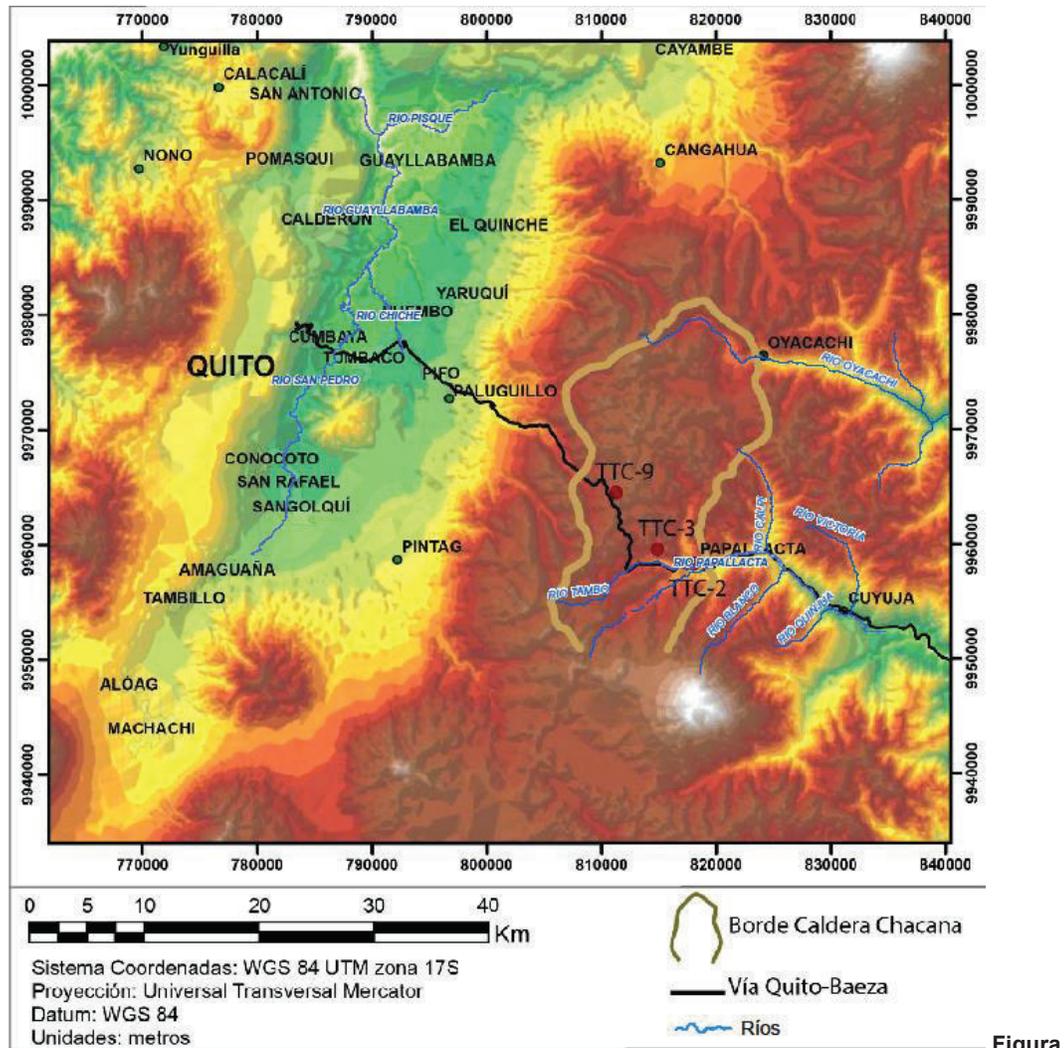
Fase II.- Trabajo de campo: en esta fase se realizó el logeo macroscópico y mesoscópico de 1290 m de testigos de perforación, ubicados en la bodega de testigos de rocas de EPMAPS en Papallacta. Se tomaron 192 muestras para estudios petrográficos y geoquímicos (espectrales), dejando un pedazo de madera en el sitio muestreado. Para el desarrollo de esta fase se utilizó lupa (de aumento x10, x20), lápiz de dureza, lápiz magnético, ácido clorhídrico al 10%, martillo, moladora, cámara digital y libreta de campo. Las muestras estudiadas serán devueltas a sus respectivas cajas en la bodega de Papallacta.

Fase III.- Trabajo de laboratorio: en esta fase se realizó el estudio petrográfico macroscópico de las 192 muestras de mano y se elaboraron 73 láminas delgadas, de las cuales se hicieron estudios microscópicos mineralógicos y petrográficos. Además como complemento a la petrografía, se realizaron 360 análisis e interpretaciones de espectros minerales por Terraspec y 192 análisis de U, Th y K utilizando el equipo de Gamma Ray espectral.

Fase IV.- Interpretación de los datos y redacción del informe: en esta fase se sintetizó e interpretó la información obtenida en las tres fases previas. Se presenta la litoestratigrafía y alteración hidrotermal de los pozos, un modelo conceptual preliminar, discusión, conclusiones, recomendaciones, bibliografía utilizada y anexos de soporte.

1.6 ÁREA DE ESTUDIO

La Caldera Chacana presenta un relieve topográfico comprendido entre las cotas de 3200 a 4500 msnm, dicho relieve ha sido modificado por erosión glacial, lo cual otorga a esta zona un carácter montañoso intrincado con cimas agudas de vertientes rectilíneas y depresiones profundas, cuyo fondo está generalmente ocupado por lagunas o humedales (Beate et al., 2009).



Figura

1.1: Mapa del área de estudio a escala 1:250 000

La red fluvial dentro de la caldera comprende los ríos Chalpi, Tambo, Tumiguina y Blanco, los cuales desembocan en el río Papallacta (Instituto Geográfico Militar, IGM, 1986). Los principales drenajes de la zona tienen una dirección aproximada

NE-SW, a lo largo de algunos de estos ríos se han formado lagunas como son la Laguna de Papallacta en la desembocadura del Río Tambo y a lo largo del Río Tumiguina se forman las lagunas Tumiguina, De Palos y Cojanco (Villares, 2010).

1.6.1 MORFOLOGÍA Y CLIMA

Las características morfológicas originales de la Caldera Chacana han sido modificadas por tectonismo e intensa erosión glaciaria. Su borde topográfico presenta una forma irregular alargada de 35 km en dirección N-S y de 10-15 Km en dirección E-O y constituye la parte central y somital del complejo volcánico Plio-Cuaternario Chacana, cuyas dimensiones son: 65 km (N-S) y 25 km (E-O). En la parte Norte de la caldera el borde topográfico es claramente reconocible y se encuentra a cotas de 4000 a 4300 msnm, el resto de la Caldera está formado por lomas, ríos, montes, valles, lagunas y pantanos (Beate et al., 2009).

Los glaciares han modificado drásticamente el paisaje, se observan restos de circos glaciares con cuchillas agudas en la cabecera de los valles, que inicialmente fueron domos volcánicos con cumbres redondeadas. Hay morrenas rellenas de valles excavados en antiguos flujos de lava y depósitos lacustres en las antiguas cubetas glaciares o circos (CELEC, 2012).

Normalmente las calderas son depresiones topográficas de relieves bajos o inexistentes (Lipman, 1984), sin embargo en el centro de la Caldera Chacana existen morfologías de erosión muy intensa y altitudes topográficas muy fuertes, generadas por el colapso y posterior levantamiento del piso de la caldera (Beate et al., 2009).

Las estribaciones orientales de la caldera presentan una morfología irregular con altas cuchillas y montañas con fuertes pendientes contrastando con la morfología bastante suave de las estribaciones occidentales conocida como serie Tablones (Hall y Mothes, 2008).

En los márgenes de la caldera se han formado varios volcanes que representan los puntos más altos de la zona como son: Chusalongo (4840 msnm) y Plaza de

Armas o Antisanilla (4620 msnm) al Sur y el estratovolcán Antisana (5756 msnm), en el margen SE (Beate et al., 2009).

El área de estudio forma parte del páramo andino, caracterizado por poseer clima semi a hiper húmedo, con abundante nubosidad y de alternancias térmicas diarias (Lasso, 2009). La temperatura en la zona de estudio oscila entre 8.4°C y 22°C, en las partes altas del páramo incluso llega a 0°C durante la noche cuando existen fuertes vientos; además la precipitación anual alcanza los 1525 mm y la humedad relativa es de 89% (Alpahuasi, 2011). La flora y fauna de la zona de estudio se encuentra detallada en los trabajos de Alpahuasi, 2011 y Lasso, 2009.

1.6.2 VÍAS DE ACCESO Y POBLACIONES

La vía Interoceánica cruza la caldera Chacana en su parte central, desde Pifo a Papallacta. Otra vía de acceso conecta Cangahua con Oyacachi y continúa hasta Papallacta; algunos ramales menores de ésta carretera dan acceso a las obras hidráulicas de la EMAAP-Q. Una tercera vía, conecta la población de Píntag con la parte sur de la caldera Chacana, en la zona de los volcanes Antisana y Chusalongo. Las únicas poblaciones dentro de la caldera son Oyacachi al norte, Papallacta y el caserío de El Tambo en la parte central-este (Beate et al., 2009), siendo las principales actividades económicas la ganadería, el turismo y en menor grado la agricultura.

1.6.3 UBICACIÓN DE LOS POZOS

Los pozos estudiados se encuentran alineados en una sección SE-NW, que atraviesa la Caldera Chacana, coincidente con la dirección del Túnel Trans Cordillerano en la superficie. Las coordenadas UTM WGS84 Zona 17S se presentan a continuación, junto con el mapa de ubicación de los pozos.

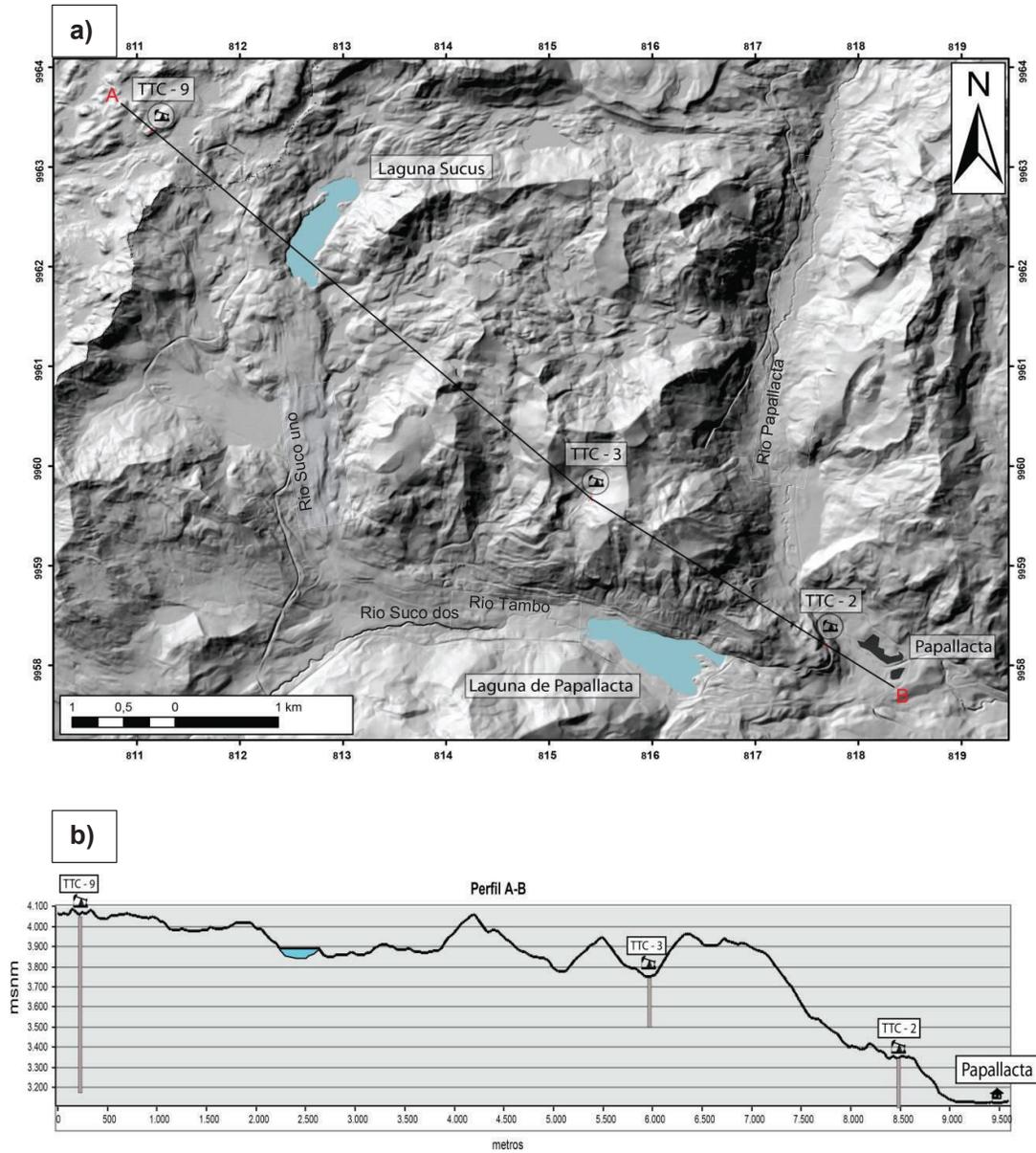


Figura 1.2: a) Mapa de ubicación de los pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9. b) Perfil SE-NW

TTC-2 (Prof. 160 m): 817698,23 E; 9958208,00 N; 3252,82 msnm

TTC-3 (Prof. 250 m): 815392,89 E; 9959682,25 N; 3749,80 msnm

TTC-9 (Prof. 880 m): 811152,82 E; 9963379,12 N; 4047.13 msnm

El pozo TTC-2 se encuentra en la carretera que va desde la Laguna de Papallacta hacia las Termas de Papallacta. El pozo TTC-3 se encuentra en el portal de salida del Túnel Baños (el eje de este túnel se encuentra a una cota 3750 msnm) y para acceder a este punto se toma un camino de tercer orden a partir de la Vía Interoceánica. Y el pozo TTC-9 se encuentra ubicado en el sector de La Virgen, en la antigua Vía Quito-Papallacta, a escasas decenas de metros de la Vía Interoceánica; este punto se ubica en la cresta de la Cordillera Real, en la zona divisoria continental de aguas.

1.7 SÍNTESIS DE TRABAJOS PREVIOS

La Caldera Chacana fue reportada por primera vez por Hall y Beate (1991) y consta en el mapa geológico del Ecuador 1:1.000.000 (Misión Británica-CODIGEM, 1993).

Según Hall y Mothes (2001), la Caldera Chacana es la más grande de los Andes del Norte, cuyo edificio volcánico fue construido con los productos de al menos tres ciclos magmáticos, caracterizados por andesitas, dacitas y riolitas. Su edad se estima entre 1 y 1.7 Ma (Pleistoceno). La caldera se formó por la gran emisión de magma riolítico, creando la estructura denominada “Los Tablones” de edad entre 0.75 y 0.98 Ma. Después de un largo periodo de reposo se tiene actividad en el cerro Potrerillos, en los flancos suroccidentales del edificio, en el centro Yarangala y numerosos flujos lávicos de dacita extruidos por fisuras distribuidas dentro de la caldera. Flujos de lava del siglo XVII y la presencia de fuentes termales sugieren que parte del centro de la Caldera Chacana aún está activo.

Hall y Mothes (2008), proponen que la caldera es de edad Pleistocénica, que mide ~50 km N-S por ~30 km E-W y está construida sobre un basamento metamórfico con un borde de caldera irregular en forma y altura. La historia geológica de la caldera estaría comprendida por cuatro grupos litológicos. El primero y el más antiguo corresponde a un cinturón de numerosos diques y brechas que forman el borde estructural de la caldera a lo largo de su margen oriental. El segundo grupo corresponde a una secuencia de más de 1250 m de espesor conformada por ignimbritas y tobas de composición dacítica y riolítica,

intercaladas con lavas de composición andesítica y dacítica. La secuencia tiene un rango de edad desde 2.7 a 0.8 Ma. Esta secuencia forma el flanco exterior de la caldera. El relleno de la caldera comprende el tercer grupo litológico y corresponde a cuatro tipos de roca: a) tobas y brechas con alteración de baja a media intensidad; b) lavas porfíricas andesíticas; c) una secuencia de origen fluvial formada por arenas y conglomerados; y d) un largo periodo de emisiones de lava de composición andesítica a dacítica. El cuarto grupo es corresponde a emisiones de flujos de lava de composición andesítica ácida a dacitas.

Beate et al. (2009), presenta un modelo geológico de la evolución de la Caldera Chacana en la que se incluye la descripción de varios domos y productos volcánicos altamente diferenciados. Durante el periodo de resurgencia de la caldera reporta la formación de una diatrema freatomagmática (Mogotes), la cual cambió parcialmente el piso de la caldera. Además se presentan tres zonas de interés geotérmico: Cachiyacu, Jamanco y Oyacachi.

Beate et al. (2010), presenta a Cachiyacu como un prospecto geotérmico prometedor dentro de la Caldera Chacana. Realizan un modelo geotérmico para el área de Cachiyacu, donde identifican que la fuente de calor proviene de la existencia de grandes cuerpos de magma emplazados en niveles someros de la corteza bajo Chacana en el área de Cachiyacu. Muestran que el reservorio geotérmico es de tipo hidrotermal convectivo, de agua dominante y que se encuentra dentro de una secuencia de rocas pre-caldera, formada por lavas y brechas. Estiman que la temperatura de los fluidos en Cachiyacu es de 200 a 300°C.

Villares (2010), presenta un estudio geovulcanológico en el que incluye la descripción estratigráfica de la zona sur de la Caldera Chacana junto con un mapa 1: 25000 donde se ubican las zonas de alteración hidrotermal y fuentes termales en Cachiyacu y Jamanco. Además, sugiere que la brecha freatomagmática Mogotes es evidencia de una intrusión durante la actividad post-colapso de la caldera.

CELEC (2012), presenta una compilación de información de varias unidades geológicas, petrografía, geomorfología, neotectónica, geoquímica y geofísica para

dos áreas de estudio: Jamanco (dentro de esta zona se encuentra el Pozo TTC-3) y Cachiyacu, incluyendo sus alrededores. Se menciona un volumen notable de tobas y brechas riolíticas en la depresión caldérica, presentes en los escombros excavados del Túnel Quito de EPMAPS, así como en las rocas observadas en el Túnel Baños de EPMAPS y los afloramientos vistos al lado oriental de la caldera. En el centro de la caldera (cerca de La Virgen y del Pozo TTC-9), las tobas y brechas están cubiertas por un manto extenso y potente de lavas tipo andesita negra, emitidas desde una larga fractura que pasa por el Cerro Potrerillos.

Pilicita (2013), presenta la caracterización de las fuentes termales, fallas geológicas, la descarga de calor y el aprovechamiento del recurso geotérmico en la Caldera Chacana, mediante la medición de parámetros físico químicos en aguas termales, mediciones superficiales, muestreo de agua y gases. Muestra que las aguas termales tienen origen meteórico (lluvia) y mediante análisis de la concentración de elementos mayores y traza, define que las aguas son principalmente sulfatadas cloruradas alcalinas de alta salinidad, bicarbonatadas alcalinas y alcalino terreas. Además por el análisis fotogeológico identifica el ambiente tectónico de la zona, lo cual permite la apertura de fallas y fracturas por donde circulan y ascienden los fluidos geotermales. Calcula que para todas las fuentes termales de Chacana existe una salida de calor de 19275.58 kJ/s a partir de 112.79 l/s, los que equivalen a 19.27 MW térmicos de capacidad.

1.8 ASPECTOS CONCEPTUALES

A continuación se presenta un resumen de los conceptos de: caldera, diatrema/brecha freatomagmática, maar y alteración hidrotermal.

Las **calderas** son grandes depresiones volcánicas que tienen una forma aproximada circular y se forman generalmente por grandes erupciones de ignimbritas (Lipman, 1984). Son comúnmente sitios de actividad geotermal y mineralización. Generalmente las calderas tienen periodos de colapso (debido a la rápida salida de magma durante una erupción) y resurgencia. El techo de la cámara magmática se hunde provocando un colapso, el cual no necesariamente es uniforme a lo largo de la caldera. La resurgencia ocurre cuando hay un nuevo

aporte de magma en el reservorio magmático, en un periodo posterior al colapso (Cole et al, 2005).

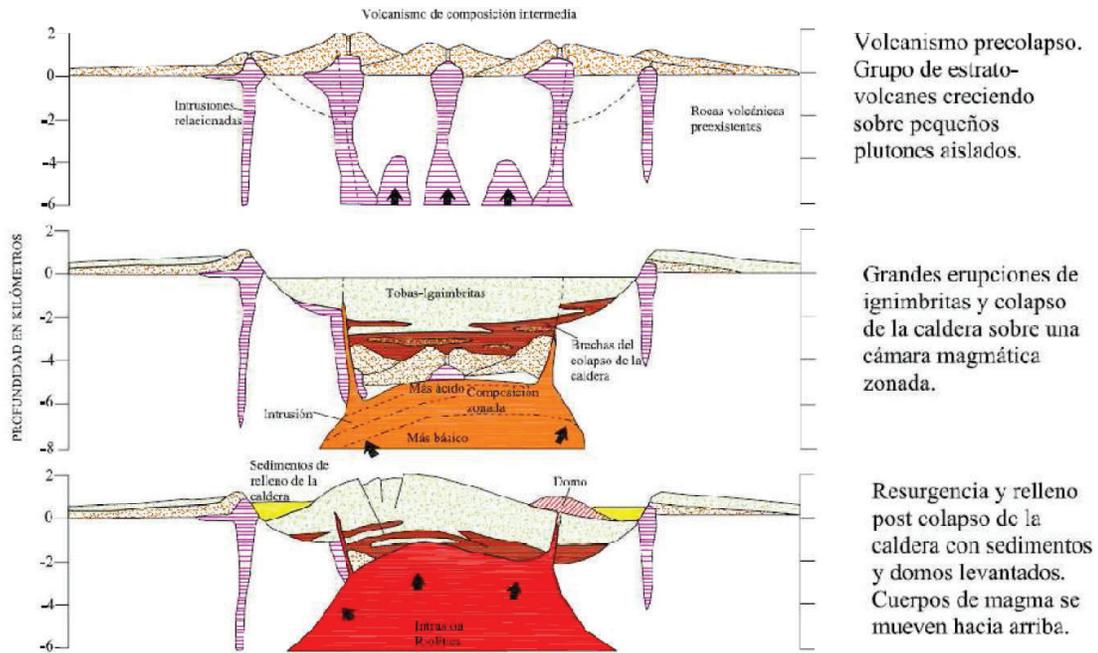


Figura 1.3: Modelo generalizado de la evolución de una caldera riolítica (Lipman, 1984)

Las **diatremas** son el producto de repetidas explosiones freatomagmáticas (causadas por la interacción subterránea del magma ascendente con un acuífero), brechificación y subsidencia del relleno de la diatrema; mientras que posteriormente son dominadas por la subsidencia parcial de la cámara magmática (Palladino et al., 2015). Estudios recientes de campo y experimentales (White y Ross, 2011; Graettinger et al., 2014; Valentine et al., 2015) indican que las explosiones subterráneas pueden o no llegar hasta la superficie, dependiendo de la profundidad y de la energía; explosiones freatomagmáticas someras (<200m) son más propensas a llegar a la superficie y expulsar material, mientras que las explosiones freatomagmáticas más profundas brechifican el magma y la roca caja, mezclándolos en dirección vertical convectiva.

En las diatremas se pueden reconocer varias facies de brechas, desde facies tobáceas muy finas hasta brechas líticas de grano grueso y fino. Una brecha más gruesa típicamente caracteriza las partes marginales de la diatrema. Los clastos

en estas brechas son heterolitológicos y comprenden todas las rocas de las paredes de la diatrema. La mayoría de clastos son pobremente vesiculados, pero también puede haber material de pómez dacítico a riolítico. El rango de los clastos puede ser de más de 10 metros de diámetro con formas subangulares a redondeados, pero la mayoría de clastos son pequeños. Puede haber clastos esferoidales, algunos de ellos mostrando características de exfoliación hipogénica (Sillitoe, 1985).

Son típicamente más grandes que la mayoría de chimeneas de brecha. La extensión vertical de las diatremas también es grande, algunas exceden los 1000 m de profundidad. Muchas diatremas tienen paredes inclinadas hacia dentro y varias de ellas tienen forma de embudo. Los contactos son generalmente abruptos y definidos por fallas anulares. Las rocas de caja en el borde de las fallas anulares están agrietadas y en algunos casos brechificadas. Grandes bloques de las rocas de caja de hasta varios cientos de metros de largo se desprenden de las paredes de la diatrema y son particularmente de amplia distribución en las partes marginales de las brechas (Sillitoe, 1985).

Algunas diatremas son cortadas por diques o cuerpos irregulares de rocas intrusivas, en las que la brechificación continuaba activa durante la intrusión, lo cual se evidencia por contactos irregulares, con relaciones de cortes mutuos entre las brechas y las rocas intrusivas, además de márgenes de enfriamiento en los pedazos de roca de dique incorporados en la brecha (chilled margins) (Sillitoe, 1985).

Las **brechas freatomagmáticas** son generalmente finogranulares, matriz soportada, de un 50 a 90% de matriz; muchas de estas brechas tienen componentes juveniles tobáceos y roca muy fragmentada en su interior. El material tobáceo comúnmente es de composición dacítica y contiene fragmentos y cristales de cuarzo, biotita y feldespato. Este material tobáceo es frecuentemente difícil de reconocer debido a que puede estar intensamente alterado. La abundancia de matriz generalmente no permite la presencia de espacios abiertos significativos en la mayoría de brechas, generalmente son de baja permeabilidad (Sillitoe, 1985).

Los **maars** son estructuras volcánicas caracterizados por sus cráteres en forma de tazón, que están rodeados por capas estratificadas que buzcan hacia afuera con un ángulo $<25^\circ$, y decrecen rápidamente en espesor conforme se alejan del anillo. Los depósitos de maar son distinguidos de los anillos de toba o conos de toba por la abundancia de componentes no juveniles (roca caja). Los depósitos son principalmente emplazados por surges basales y caída de piroclastos (Sigurdsson et al., 2015).

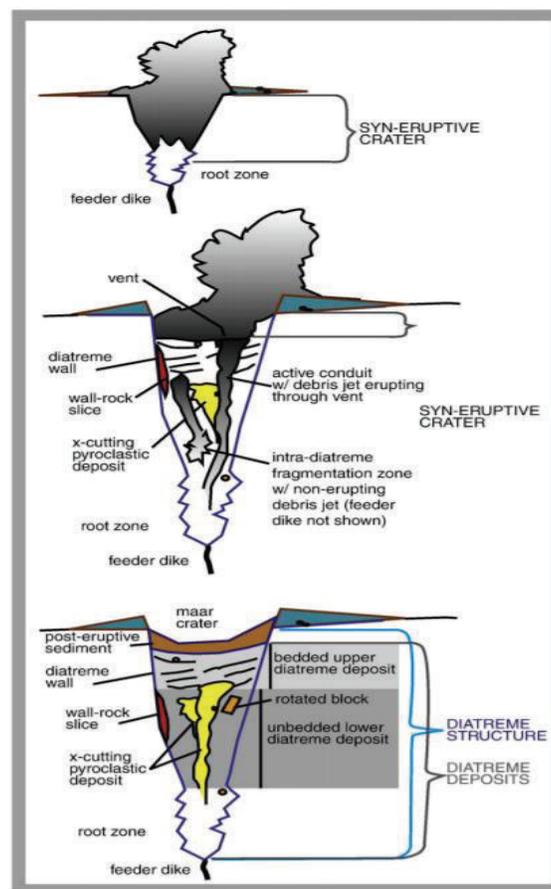


Figura 1.4: Perfiles esquemáticos de una erupción de un volcán maar-diatrema (a partir de un dique alimentador), y del volcán después de que el cráter fue parcialmente relleno por los sedimentos post-erupción (Tomado de: White y Ross, 2011).

La **alteración hidrotermal** es la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio en términos químicos y termales, debido a la presencia de

agua caliente, vapor o gas. La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma. Aunque la composición litológica inicial tiene una influencia en la mineralogía secundaria (hidrotermal), su efecto es menor que el debido a la permeabilidad, temperatura y composición del fluido. En efecto, la temperatura del fluido y el pH del mismo son los factores más relevantes en la asociación mineralógica resultante de los procesos de alteración hidrotermal (Corbett y Leach, 1998).

La **alteración propilítica** está relacionada a procesos termales en los que ocurre transferencia de calor a partir de una intrusión ígnea hacia las rocas aledañas durante el enfriamiento. Esta alteración es ampliamente distribuida en grandes volúmenes de roca (Lowell y Guilbert, 1970; Berger y Velde, 1992). Está caracterizada por la adición de H₂O y CO₂, y localmente S. Los minerales típicos son epidota, clorita, carbonatos, albita y pirita. En ciertos lugares hay presencia de: sericita, óxidos de Fe, montmorillonita y zeolitas pueden ser también comunes (Pirajno, 2009).

Las brechas de diatrema están alteradas en bajo grado pero con alta intensidad, independientemente si son pre o post mineral. La alteración parece no tener relación directa con la mineralización y en general se caracteriza por sericita, arcillas, clorita, carbonato, zeolitas, especularita y pirita. Sin embargo, parte de la pirita es invariablemente clástica. Esta alteración se atribuye al alto contenido de fluidos de las brechas al tiempo de su formación (Sillitoe, 1985).

La mineralización de metales preciosos tiende a concentrarse en los bordes de las diatremas, aunque también puede haber mineralización en su interior. El incremento de permeabilidad gracias a las fallas en anillo y agrietamiento o brechificación asociada a las rocas de caja es la razón primaria para la depositación de menas alrededor del margen de diatremas. (Sillitoe, 1985).

1.9 DESARROLLO DE ESTE TRABAJO

En los siguientes capítulos se presenta:

CAP. 2. Un resumen del marco geodinámico y la geología de la Caldera Chacana, mediante la información de trabajos anteriormente realizados.

CAP.3. Se realiza la caracterización litoestratigráfica de los testigos de perforación en cada uno de los pozos (TTC-2, TTC-3 y TTC-9), mediante la descripción de la petrografía y de la litofacies de cada unidad litoestratigráfica; además se presenta un resumen y las observaciones de cada unidad, complementando la información con fotografías macro y microscópicas de las rocas. Al final de este capítulo se resumen los resultados e interpretaciones de cada unidad litológica incluyéndolos en un esquema litoestratigráfico generalizado. Y como información adicional se presenta el resultado del análisis de elementos radioactivos (U, Th, K).

CAP.4. Se presenta el marco conceptual general referente a la alteración hidrotermal y se detalla la caracterización de la mineralogía de alteración hidrotermal en cada pozo, así mismo se da soporte a la información con los datos obtenidos por Terraspec y mediante fotografías macro y microscópicas. Al final de este capítulo se resume la información obtenida y se la incluye en un esquema generalizado de la mineralogía de alteración hidrotermal.

CAP.5. Se presenta la discusión, las conclusiones y recomendaciones de este proyecto de titulación.

CAPÍTULO 2

2. MARCO GEODINÁMICO Y GEOLOGÍA DE LA CALDERA CHACANA

2.1 MARCO GEODINÁMICO

La ruptura de la placa Farallón durante el Oligoceno (25 Ma) dio lugar a la formación de las placas de Cocos y Nazca (Lonsdale, 2005).

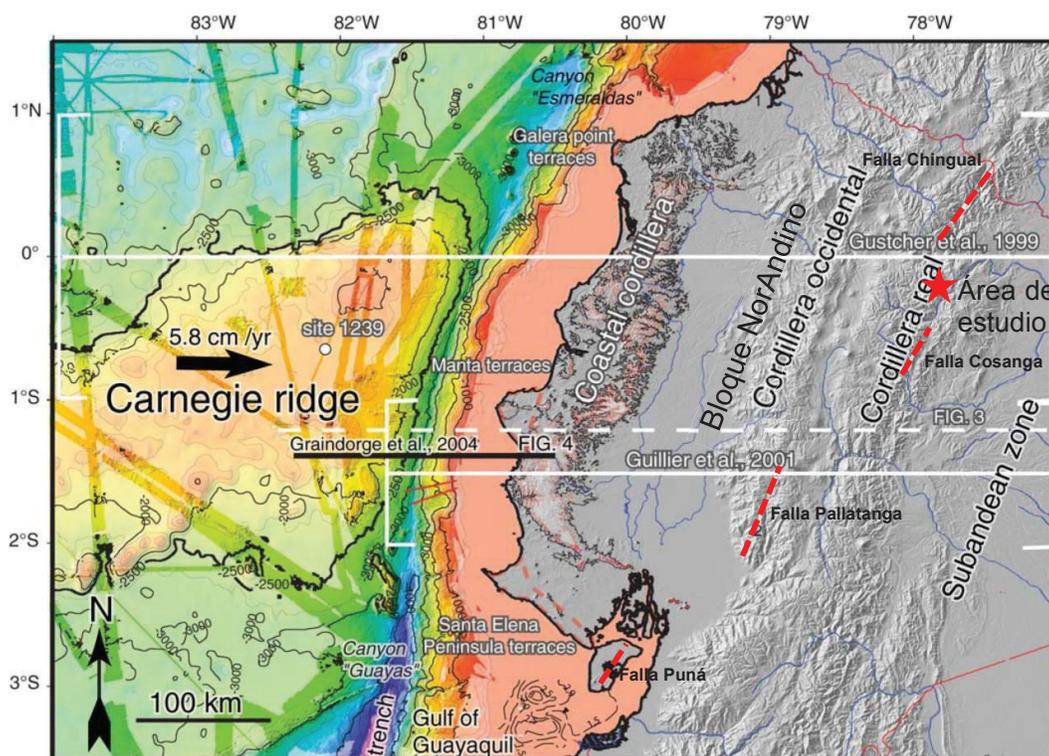


Figura 2.1: Esquema geológico del Ecuador, mapa de elevación del Ridge de Carnegie, en el área del margen de colisión. La estrella roja indica el área de estudio. Tomado de Michaud, (2009).

Entre 1°N y 2°S se ubica la Cordillera Asísmica de Carnegie, que constituye una cadena montañosa, que se asume se asienta sobre una corteza oceánica anterior a los 16 Ma (Fig. 2.1), y que comenzó a moverse hacia el margen continental

ecuatoriano hace 25 Ma, con una tasa de convergencia de ~5-6 cm/año con la placa Sudamericana (Trenkamp, et al., 2002).

La interacción de la placa Nazca con la Placa Sudamericana, ha dado origen a fenómenos sísmicos y volcánicos en el Ecuador (Pennington, 1981; Gutscher et al., 1999) y la formación del bloque Nor-Andino, como resultado de la acción de esfuerzos compresivos; en el Ecuador este bloque está limitado por un sistema de fallas principalmente dextrales, denominado Sistema Mayor Dextral, que conecta los segmentos de fallas activas desde el Golfo de Guayaquil hasta la Cordillera Real por el Sistema de fallas Puná – Pallatanga y Chingual – Cosanga PPCC. (Soulas et al., 1991, Segovia y Alvarado, 2009)

2.2 GEOLOGÍA REGIONAL

El proceso de subducción en el margen occidental de Sudamérica ha dado lugar a la orogenia andina, al volcanismo y a la sismicidad. En el Ecuador los Andes están formados por dos cadenas montañosas, al Este se encuentra la Cordillera Real y al Oeste la Cordillera Occidental, ambas presentan dirección aproximada N-S y se encuentran separadas por el Valle Interandino. Las dos cordilleras dividen el territorio continental en tres regiones: la costa, la sierra y el oriente (Lonsdale, 1978; Pennington, 1981; Vera, 2013).

Cada una de las regiones del Ecuador tiene distintas características geológicas y morfológicas, de Este a Oeste son: la Cuenca Oriente que se forma en parte como respuesta al levantamiento de la Cordillera Real y está constituida por sedimentos marinos cretácicos, sedimentos marinos someros y facies de agua dulce del Terciario (Jaillard et al., 1995; 1997; Baby et al., 2004). La Zona Subandina comprende el levantamiento Napo al Norte y el levantamiento Cutucú al Sur, donde se exponen las unidades que rellenan la cuenca oriente (Baldock, 1982). La Cordillera Real está formada por rocas metamórficas del Paleozoico – Mesozoico, separadas del Callejón Interandino por la falla Peltetec (Aspden y Litherland, 1992; Litherland et al., 1994). El Callejón Interandino se ubica entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Real, contiene una potente secuencia de depósitos volcánicos plio – pleistocénicos que cubren casi por completo el

basamento (Winkler et al. 2005). La Cordillera Occidental está compuesta de rocas volcánicas e intrusivas, máficas a intermedias, yuxtapuestas a depósitos turbidíticos del Cretácico Tardío al Oligoceno (Hughes y Pilatasig, 2002; Vallejo, et al., 2009). La región costa está compuesta por un basamento oceánico, cubierto por depósitos de antearco de edad Paleógeno – Neógeno (Feininger y Bristow, 1980; Jaillard et al., 1995).

2.2.1 LITOESTRATIGRAFÍA DEL BASAMENTO

2.2.1.1 Cordillera Real (Basamento Metamórfico)

La Cordillera Real representa la cadena montañosa del Este de los Andes Ecuatorianos, tiene una disposición NNE-SSW y una longitud de 650 km. Está constituida por un núcleo metamórfico, que se encuentran intruido por plutones tipo I y tipo S y cubierto por rocas ígneas cenozoicas. Los mayores granitoides calco-alcalinos fueron emplazados en 100-150 Ma (Aspden, et al., 1992). Se reconocen cinco divisiones litotectónicas, de Oeste a Este: Guamote, Alao, Loja, Salado y Amazónico, que se encuentran separadas por sistemas de falla con rumbo andino (Aspden y Litherland, 1992).

Terreno Guamote.- Está formado por cuarcitas con pizarras de la Subdivisión Punín, y filitas intercaladas con cuarcitas de la Subdivisión Cebadas, de edad Jurásico Superior? (150-160 Ma). Este terreno está limitado al Este por la falla Peltetec y al Oeste por la falla Ingapirca (Litherland et al., 1994).

Terreno Alao.- Está formado por una secuencia ofiolítica desmembrada con cherts y filitas de la Subdivisión Peltetec; metaturbiditas ricas en volcanoclastos de la subdivisión Maguazo; rocas verdes meta andesíticas y tobas de la Subdivisión Alao-Paute y esquistos grafitosos de la Subdivisión El Pan, de edad Jurásico Superior (156-169 Ma). Este terreno está limitado al Este por el Frente Baños y al Oeste por la falla Peltetec (Litherland et al., 1994).

Terreno Loja.- Está formado por granitos gnéisicos de tipo S con cristales gruesos de feldespato alcalino y cuarzo azul de la Subdivisión Tres Lagunas; orto

y para gneises de la subdivisión Sabanilla; esquistos pelíticos con muscovita y granate de la Subdivisión Agoyán; anfibolitas de la Subdivisión Monte Olivo y filitas oscuras y cuarcitas de la Subdivisión Chiguinda. Son plutones del Triásico Superior 200-220 Ma en sedimentos paleozóicos (Chiguinda) >252 Ma. Este terreno está limitado al Este por la Falla Llanganates y al Oeste por el Frente Baños (Litherland et al., 1994).

Terreno Salado.- Está formado por dioritas y granodioritas deformadas de la Subdivisión Azafrán; rocas verdes andesíticas y meta grawacas de la subdivisión Upano; meta sedimentos y mármoles de la Subdivisión Cerro Hermoso y esquistos pelíticos con gneises de la Subdivisión Cuyuja. Estas rocas tienen edad Jurásico 175 Ma con posibles elementos pre jurásicos. Este terreno está limitado al Este por la falla Cosanga-Mendez y al Oeste por la falla Llanganates (Litherland et al., 1994).

Terreno Amazónico.- Está formado por granitoides batolíticos calcoalcalinos de la Subdivisión Zamora; lavas calcoalcalinas y piroclastos de la subdivisión Misahuallí; rocas sedimentarias metavolcánicas de la Subdivisión Piuntza y filitas con mármoles de la Subdivisión Isimanchi. Las rocas ígneas pertenecen al plutonismo 190-150 Ma, y se encuentran emplazadas en sedimentos triásicos (Piuntza) y paleozóicos? (Isimanchi). Este terreno está limitado al Este por la falla Cosanga-Mendez y al Oeste por la falla Llanganates (Litherland et al., 1994).

La Cordillera Real está cubierta por depósitos volcánicos, sobre los que se construyeron grandes edificios volcánicos. Algunos volcanes sobrepasan los 4500 msnm como son los volcanes Cayambe, Antisana, Tungurahua, Altar, Sangay, entre otros (Beate et al., 2009).

Al Este de la Caldera Chacana aflora un basamento de rocas metamórficas, indicativo de que este basamento subyace la caldera. Estas rocas están dominadas por una gruesa secuencia de esquistos pelíticos intercalados con esquistos verdes y gneises cuarzo feldespáticos. El sector de Papallacta está dominado por meta-granitoides (gneises y esquistos cuarzo feldespáticos), localmente con cuarzo azul y esquistos verdes cuarzosos, a veces milonitizados, (CELEC, 2012), correspondientes al terreno Loja y a la subdivisión Tres Lagunas.

El grado de metamorfismo aumenta progresivamente hacia el oeste desde Baeza hasta Papallacta, donde las rocas de alto grado terminan abruptamente, cortadas por una falla regional (CELEC, 2012).

2.2.1.2 Volcanismo Terciario

Desde inicios del Mio-Plioceno hay actividad volcánica en la Cordillera Real, relacionada al régimen de subducción actual. Los productos volcánicos tienen composición andesítica-dacítica (Barberi et al., 1988). Los depósitos característicos de este periodo son la **Formación Pisayambo**, la cual consiste de una potente y extensa secuencia volcánica en la parte central del Ecuador, constituida por brechas, tobas y flujos masivos de lavas basálticas a andesíticas (Baldock, 1982). Dataciones realizadas en la parte basal de la Formación Pisayambo sugieren una edad 6-5 Ma (Barberi et al., 1988).

2.2.1.3 Volcanismo Cuaternario en la Cordillera Real

Los edificios volcánicos de la Cordillera Real se encuentran dispersos sin organización definida a lo largo de una franja de 350 km de largo y hasta 30 km de ancho. Estos volcanes alcanzan alturas de 5700-5900 msnm, con un relieve mayor a 3000m. Los productos de las erupciones más jóvenes son principalmente andesitas, aunque también se han encontrado dacitas y riolitas en los volcanes Cayambe, Cotopaxi y calderas Chacana y Chalupas (Hall y Mothes, 2008; Hall y Beate, 1991).

La Caldera Chacana tiene actividad desde el Pleistoceno al presente, con flujos piroclásticos y secuencias volcánicas que alcanzan el Callejón Interandino entre Pintag y El Quinche. Grandes erupciones pumíticas plinianas han ocurrido en 180 y 160 ka (Pifo A y Pifo B) estando intercaladas en la Cangahua superior, evidencia de actividad reciente son los flujos lávicos de Potrerillos (Papallacta) y Pinantura del siglo XVIII (Hall y Mothes, 2008).

La Formación Cangahua (~0.5-0.01 Ma) consiste de cenizas volcánicas finas mayormente desvitrificadas, cenizas volcánicas retrabajadas (especialmente por vientos), sedimentos fluviales y lacustres, y suelos incipientes. Está distribuida a lo largo del corredor interandino desde Pasto, Colombia hasta la provincia de Cañar en Ecuador. La Cangahua es una unidad estratigráfica de color café amarillento, con un espesor medio de 100 m, que cubre periclinalmente la topografía de la Sierra (Hall y Beate, 1991; Vera y López, 1986).

El alto porcentaje de vidrio, presencia de minerales volcánicos, así como un contenido promedio de 65% de sílice, sugiere que la Cangahua debe su procedencia a volcanes de carácter dacítico-riolítico y no tanto a los volcanes andesíticos que actualmente dominan la Sierra (Hall y Beate, 1991). Su origen se relaciona en gran parte a caídas de cenizas fina, con buen sorteo y estratificación periclinal; el efecto retrabajado de la ceniza por acción del viento es observado solo localmente (Vera y López, 1986), por lo que se considera que la fuente principal de la Cangahua son las calderas de los volcanes Chacana y Chalupas (Hall y Beate, 1991).

Los tres pozos estudiados en este proyecto de titulación y ubicados en el interior de la Caldera Chacana corresponden al registro del volcanismo cuaternario en la Cordillera Real, cuando en el Pleistoceno se produjo el nacimiento de varios centros volcánicos sobre los depósitos de la Formación Pisayambo (Terciario). Se conoce sobre la actividad reciente de Chacana, debido a la presencia de depósitos de flujos piroclásticos que se encuentran en el Callejón entre Pintag y el Quinche, las erupciones durante el Pleistoceno Tardío que cubren los Valles de los Chillós, Tumbaco y Guayllabamba, además los flujos de lava históricos de Papallacta y Pinantura del siglo XVIII.

2.3 GEOLOGÍA DE LA CALDERA CHACANA

2.3.1 MORFOLOGÍA DE LA CALDERA

Las dimensiones del complejo volcánico Chacana son 65 km (NS) x 25 km (EO). Los rasgos morfológicos característicos de la caldera son: los flancos exteriores, el borde topográfica de caldera y el área central (Beate et al., 2009).

Los flancos exteriores de la Caldera Chacana son heterogéneos, el flanco occidental presenta una morfología bastante suave, conocida como serie Tablones; contrastando con las estribaciones orientales que presenta morfología irregular con altas cuchillas y montañas con fuertes pendientes (Hall y Mothes, 2008).

El borde topográfico de la caldera presenta una forma irregular alargada de 35 km (NS) y 10 a 15 km (EO), se encuentra en la parte central y somital del complejo volcánico. Es claramente reconocible en la parte norte de la caldera, se encuentra parcialmente preservado y alcanza cotas de 4000 a 4300 msnm; también en el lado SE, donde se preservan los acantilados de la caldera (Beate et al., 2009).

Las características morfológicas iniciales de la caldera no se han preservado, debido a que en el periodo de resurgencia de la caldera el piso se levantó ~500 m por una intrusión somera de magma, esto junto con los fuertes procesos de erosión glacial generaron un relieve accidentado formado por colinas montañosas con cimas agudas de vertientes rectilíneas y depresiones profundas, cuyo fondo está generalmente ocupado por lagunas o humedales (CELEC, 2012).

La actividad erosiva de los glaciares del Cuaternario ha modificado radicalmente el paisaje, formando circos glaciares en la cabecera de los valles; tilitas rellenas de valles glaciares excavados en antiguas corrientes de lava y depósitos lacustres en las antiguas cubetas glaciares o circos. La morfología inicial de los domos volcánicos con sus cumbres redondeadas se ha modificado por la acción glacial, desarrollando cuchillas agudas que delimitan circos glaciares (CELEC, 2012).

2.3.2 ESTRATIGRAFÍA

Para la descripción estratigráfica de la Caldera Chacana se toma como referencia los trabajos realizados por Hall y Mothes (2008), Beate et al., (2009), Villares (2010) y CELEC (2012).

2.3.2.1 Unidades del Basamento

El basamento de la Caldera Chacana está formado por tres unidades de rocas que son:

1) Basamento metamórfico, el cual está constituido por rocas metamórficas de edad paleozoica a mesozoica, litológicamente comprenden gneis de cuarzo azul, esquistos de granate-muscovita y esquistos pelíticos y grafitosos. Afloran al lado oriental de la caldera, en la población de Papallacta, en pequeños afloramientos en el Río Papallacta, en la confluencia de los Ríos Tumiguina y Papallacta, y en el Río Blanco Chico (Villares, 2010).

2) Formación Pisayambo, constituye una potente y extensa secuencia volcánica en la parte central del Ecuador, formada por brechas, tobas y flujos masivos de lavas basálticas a andesíticas. Aflora en el borde suroeste del flanco exterior de la caldera, en la Quebrada Chacaucu, al Sur de la laguna Tipo Pugro y Secas en la vía de Pintag hacia el Antisana (Villares, 2010).

2.3.2.2 Flanco exterior de la caldera (Serie Tablones)

Se estima que el complejo Chacana inició su actividad hace aproximadamente 2,7 Ma (Hall y Mothes, 2008) con la construcción de la serie Tablones, que está constituida por al menos tres secuencias de andesitas, dacitas y riolitas, cuya formación terminó hace 0,8 Ma con el colapso y formación de la caldera y con la emisión de grandes volúmenes de magmas riolíticos que formaron las superficies actualmente conocidas como Tablones. Las secuencias volcánicas que forman el flanco exterior de la caldera se extienden de manera radial tanto hacia el Oeste

como al Norte; hacia el Este se la observa parcialmente como remanentes erosionados mientras que al Sur estas secuencias están cubiertas por volcánicos más recientes (Beate et al., 2009).

2.3.2.3 Unidades asociadas con el hundimiento del centro de la Caldera

Con el inicio de las grandes erupciones del complejo caldérico Chacana, se expulsaron enormes volúmenes de material volcánico al aire, a los flancos del edificio, e inclusive a la depresión que empezó a formarse, por el hundimiento que se generó por la evacuación del material magmático. El hundimiento se acomodó a lo largo de fallas y fracturas que encerró el cuerpo magmático, las mismas que fueron aprovechadas por la intrusión de diques que alimentaron a la erupción (Hall y Mothes, 2008).

Diques anulares

Varios diques anulares de andesitas y dacitas de grano muy fino que a veces llevan pocos fenocristales de plagioclasa (<1 mm), son de colores gris claro, gris medio, o gris verduzco y con una textura azucarada (microcristalina) (CELEC, 2012). Se encuentran en la zona de Papallacta y en el Valle Carihuaycu; estos representarían las estructuras y fallas que limitan el hundimiento de la caldera, es decir el borde estructural (Beate et al., 2009).

Brechas Papallacta

Esta brecha posee clastos hasta 25 cm de diámetro de rocas silíceas de color claro. Afloran en el ByPass de Papallacta; típicamente, estas brechas se localizan en contacto o cerca de la franja de diques, siempre por el lado occidental de dicha franja. En el ByPass esta unidad es de 10 m de espesor y está pegada a los diques. Sin embargo más al Oeste, se nota que la brecha está asociada también con fallas tectónicas de la misma secuencia (CELEC, 2012).

2.3.2.4 Relleno Inicial de la Caldera

El colapso de la caldera produjo una depresión que inicialmente fue rellenada por brechas y rodados de las paredes del borde topográfico y por ignimbritas syn-colapso. Posteriormente, la caldera fue rellenada por secuencias volcánicas de andesitas y dacitas negras, seguidas de un ambiente tranquilo con la depositación de sedimentos lacustres laminados, los cuales tienen una disposición grano creciente indicando que el ambiente cambiaba con el tiempo de menos energético a más energético (Beate, et al. 2009).

Ignimbritas y brechas syn-colapso caldérico

Las ignimbritas no afloran en superficie, pero se interpreta que se formaron contemporáneamente con la formación de la caldera. Las brechas son de color rojizo, gris y café, presentan mal sorteo y son matriz soportada. Compuestas por clastos de rocas volcánicas andesíticas afaníticas y porfíricas, dacitas, riolitas, tobas y clastos metamórficos (Villares, 2010).

Lavas andesíticas-dacítica negras

Presentan textura porfírica poikilítica (se caracteriza por la existencia de pequeñas y frecuentes inclusiones minerales en un cristal relativamente grande) con matriz intergranular ligeramente fluidal, formadas por fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, anfíbol, opacos y cuarzo, con una matriz formada por microlitos de plagioclasa, clinopiroxeno, anfíbol, cuarzo y vidrio. Esta unidad corresponde a un grupo de flujos de lava, cuyo centro de emisión puede ser el Cerro Potrerillos (Villares, 2010).

Sedimentos lacustres

Rocas estratificadas con intercalaciones de capas de arena y arcilla, presentan textura clásica arenosa limo-arcillosa, que contiene fragmentos de cristales de plagioclasa, líticos de andesitas y dacitas porfíricas. Al techo del paquete hay conglomerados formados por andesitas y dacitas negras, andesitas de coloración rojiza, dacitas claras y en menor cantidad obsidiana (Villares, 2010). Esta unidad

es interpretada como sedimentos lacustres depositados en el fondo de la caldera y posteriormente levantados hasta su posición actual (Beate et al., 2009).

2.3.2.5 Intrusión de Sill y/o Lacolito Dacítico y Resurgencia de la Caldera

Aparentemente, una intrusión intracaldera somera de magma evolucionado con forma de sill y/o lacolito dio lugar a la resurgencia de la caldera, con el levantamiento de los depósitos sedimentarios de relleno en una altura aproximada de ~500m. También sirvió de fuente para el emplazamiento de domos riolíticos tempranos (Domos de la Loma Baños y Cojanco). Este nuevo magma dio lugar también a la formación de la brecha freatomagmática Mogotes (Diatrema) en la parte central de la caldera y previa a los domos mencionados (Beate, et al. 2009).

Brecha freatomagmática Mogotes

La brecha Mogotes es de color gris claro con tonalidad verdosa, matriz soportada, mal sorteada. Contiene clastos angulares y subangulares, centimétricos a decimétricos, de volcánicos afaníticos, volcánicos porfiríticos y tobas. La matriz está conformada por materiales de tamaño de limo, arena y grava de la misma composición ífica (Villares, 2010).

Aparece mejor expuesta en los alrededores de la laguna Mogotes y hacia el Sur de ésta. Es posible que este evento haya cambiado la geometría del relleno del fondo caldérico a un embudo abierto hacia arriba, y que el proceso represente una erupción ignimbrítica pasmada, lo cual se explica por la gran capacidad de disipación de energía térmica de este tipo de brechas (Beate, et al., 2009).

Domos y flujos riolíticos tempranos

Corresponde a un grupo de domos y flujos dacíticos-riolíticos ubicados a lo largo del valle El Tambo, tanto al Norte como al Sur de este. Tres domos riolíticos son ubicados en la Loma Baños, mientras que un domo colada está ubicado en el Cerro Cojanco. En las partes bajas del valle El Tambo, en el cauce del río, existe un flujo de lava riolítico (Villares, 2010).

2.3.2.6 Actividad volcánica entre 240-160 ka

Existe un hiato deposicional de 800 ka hasta los 240 ka, donde inicia un período de intensa actividad con la construcción de varios edificios volcánicos (Plaza de Armas y Chusalongo) ubicados sobre las rocas del flanco exterior de la caldera (Beate et al., 2009).

Se producen también pequeños flujos en el borde topográfico: Quincharrumi y Chimbaurco; en el interior de la caldera en cambio ocurre el emplazamiento de domos, domo-coladas y flujos de lava de composición dacítica y riolítica ubicados a lo largo del borde estructural de la caldera p.e. Potrerillos (Beate et al., 2009).

Además se producen erupciones explosivas plinianas (Pifo A y Pifo B) e ignimbritas (Burrochupa) y la extrusión del flujo de obsidiana de Yarangala (180 ka) en el borde NW. Esta etapa de actividad incluye tanto el gran flujo de lava del río Quijos al SE de la zona, como el evento ignimbrítico Chalupas al S, contemporáneo con la formación de la caldera de colapso del mismo nombre (Hall y Mothes, 2008). La edad de estos dos eventos es de 211 ka (Hammersley, 2005).

2.3.2.7 Actividad volcánica entre 40-20 Ka

En el periodo comprendido entre 160 y 40 ka no se reporta actividad en la caldera, pero a partir de 40 ka ocurren varios flujos andesíticos y dacíticos tanto en el flanco y borde W, así como también en el interior de la caldera (Hall y Mothes, 2008).

Los flujos que se encuentran en el flanco exterior occidental de la caldera corresponden a un grupo de flujos cuyo centro de emisión está ubicado en los sectores de Tolontag y Padre Corral, ambos flujos son clasificados como andesíticos. Dos flujos de lava se ubican en el borde topográfico de la caldera y corresponden a los flujos dacítico de Guambi y Palugo; otro flujo dacítico de lava se ubica en el borde estructural de la caldera y corresponde al flujo de Yuyos. (Beate et al., 2009).

En el interior de la caldera existieron tres centros de emisión, uno dio origen al flujo Sucus, otro se encuentra en el sector de Salvefaccha y el tercero dio origen a dos flujos presentes en la población de Papallacta (Villares, 2010).

2.3.2.8 Depósitos recientes

Volcánicos Antisana

Son andesitas, andesitas basálticas y andesitas ácidas. Constituyen un grupo de flujos de lava que descienden del Antisana en dirección NW. Estos flujos chocan con flujos del Chusalongo y son desviados hacia el interior de la caldera (Villares, 2010).

Depósitos glaciares

Corresponden a depósitos de morrenas terminales, laterales y centrales; los clastos de las morrenas son principalmente volcánicos, incluyen clastos de andesitas y dacitas afaníticas y porfiríticas con tonalidades desde grises oscuras hasta claras. Existen también clastos de riolitas, vitrófiros y clastos alterados. Conforman gran parte de la cubierta de los volcánicos dentro de la caldera, aparecen tanto sobre la secuencia volcánica que forma el flanco exterior de la caldera como en el interior de la misma (Villares, 2010).

Lahares, materiales de caída (tefras) y morrenas retrabajadas

Los lahares contienen materiales de diferentes litologías, entre estos existen principalmente andesitas afaníticas, andesitas y dacitas porfiríticas. La matriz de los depósitos está compuesta por ceniza y son matriz-soportados. También se incluye depósitos de ceniza y materiales de caída provenientes del Antisana y de otras fuentes no definidas. Los depósitos de ceniza son de color claro y están constituidos por plagioclasa, anfíbol, magnetita y biotita. Existen también materiales finos resultado de la erosión de los edificios del Chusalongo y Tabla Rumi y morrenas retrabajadas. (Villares, 2010).

Flujos de lava históricos

La Caldera Chacana ha emitido dos flujos de lava en los últimos 300 años. Uno de ellos es el Flujo Pinantura que se encuentra en el flanco exterior de la caldera

y el otro es el Flujo Papallacta, que se encuentra en el interior de la caldera y forma la laguna de Papallacta (Villares, 2010).

Depósitos coluviales y aluviales

Son depósitos matriz soportada, constituidos por clastos angulares de composición de acuerdo al lugar de proveniencia. Los clastos son de tamaño menor a 50 cm, la matriz está constituida por suelos y también por los mismos componentes líticos en fracciones finas. Estos depósitos se encuentran al pie de las laderas de los valles así como al pie de los escarpes. Son depósitos provocados por la caída de materiales de las partes superiores (Villares, 2010).

Depósitos hidrotermales (Travertino)

Las aguas que contienen bicarbonato cálcico se presentan en manantiales termales formando amplias terrazas de travertino como es el caso de las fuentes termales de Chacana. La precipitación de carbonato produce un autosellamiento, por lo que la salida de las fuentes termales va migrando de posición. Los depósitos de travertino son rasgos característicos para la localización de fuentes termales en Chacana y relacionarlos con el marco tectónico de la caldera, ya que las fallas son los principales canales de circulación de las aguas termales que al alcanzar la superficie y perder el CO_2 disuelto, precipitan el carbonato de calcio formando los niveles de travertino (Pilicita, 2013).

2.3.3 MODELO DE EVOLUCIÓN DE LA CALDERA

En el siguiente texto se describe la evolución de la Caldera Chacana, teniendo como fuente de información los estudios de Hall y Mothes (2008), Beate et al., (2009), Villares (2010) y CELEC (2012).

La Caldera Chacana está construida sobre un basamento metamórfico en su zona central y este, mientras que el basamento de los flancos occidentales serían rocas oceánicas no expuestas del terreno Pallatanga? (Villares, 2010).

Chacana comenzó su actividad hace 2,7 Ma con la construcción de la serie Tablones (flanco exterior de la caldera), la misma que está formada por secuencias de andesitas, dacitas y riolitas, cuya formación terminó hace 0,8 Ma con el colapso y formación de la caldera (Hall y Mothes, 2008).

La caldera inicialmente fue rellenada por materiales generados simultáneamente con el colapso de la caldera y por ignimbritas syn-colapso (se formaron contemporáneamente con la formación de la caldera). Posteriormente, la caldera fue rellenada por secuencias volcánicas de andesitas y dacitas negras, seguidas de un ambiente tranquilo en el que la caldera funcionó como una laguna en la que se depositaron sedimentos lacustres desde areniscas finas hasta conglomerados. Posteriormente se produce el levantamiento de los depósitos de sedimentos lacustres, con lo que se asume que una intrusión intracaldera somera de magma evolucionado produjo la resurgencia de la caldera; ésta intrusión permitió también el emplazamiento de domos riolíticos tempranos (Domos de la Loma Baños y Cojanco). Además, dio lugar a la formación de la brecha freatomagmática Mogotes (Diatrema) en la parte central de la caldera (Beate et al., 2009).

Después de un periodo de calma (sin actividad volcánica) hasta los 240 ka, inicia un período de intensa actividad volcánica dando como resultado la construcción de los edificios volcánicos Tabla Rumi, Plaza de Armas y Chusalongo ubicados sobre las rocas del flanco exterior de la caldera. Se producen también pequeños flujos en el borde topográfico como los de Quincharrumi y Chimbaurco; mientras que en el interior de la caldera ocurre el emplazamiento de domos, domo-coladas y flujos de lava de composición dacítica y riolítica (Beate et al., 2009). Además, se

producen erupciones explosivas plinianas conocidas como Pifo A y Pifo B, e ignimbritas (Burrochupa) y la extrusión del flujo de obsidiana de Yarangala en el borde NW (Beate et al., 2009). Esta etapa de actividad también incluye al gran flujo de lava del río Quijos al SE de la zona con 211 ka (Hall y Mothes, 2008) y al evento ignimbrítico Chalupas al S, contemporáneo con la formación de la caldera de colapso del mismo nombre (Hammersley, 2005).

Durante los siguientes 160 a 40 ka no se reporta actividad en la caldera, pero a partir de 40 ka ocurren varios flujos andesíticos y dacíticos tanto en el flanco y borde occidental, así como también en el interior de la caldera (Beate et al., 2009). Los últimos eventos volcánicos de la Caldera Chacana corresponden a la emisión de dos flujos de lava históricos de composición andesita ácida, bastante parecidos entre sí y que son los flujos Pinantura y Papallacta depositados en 1728 y 1773, respectivamente (Hall y Mothes, 1991).

Los tres pozos estudiados en este proyecto de titulación se encuentran ubicados dentro de la Caldera Chacana. El pozo TTC-2 se encuentra ubicado cerca al borde oriental de la caldera, aproximadamente a 400 m en dirección Este de la plaza central en Papallacta (Fig. 1.2), donde aflora in situ el gneis granítico Tres Lagunas, que forma parte del basamento metamórfico de la Cordillera Real y sobre el cual se construye la caldera en su parte central y este.

El pozo TTC-3 se encuentra ubicado a ~2.5 km al NW del pozo TTC-2 (Fig. 1.2), constituye una serie de flujos de lava de composición andesítica a dacítica. Dentro del marco geológico de Chacana, estos flujos podrían corresponder a los flujos de lava que rellenaron la caldera antes de su periodo de resurgencia debido a una intrusión de magma evolucionado, o podrían corresponder a flujos de lava más jóvenes a 40 ka, cuando también se reporta actividad volcánica dentro de la caldera. Los flujos de lava de este pozo se podrían ubicar en el contexto del tiempo mediante datos de edad a través de dataciones radiométricas.

El pozo TTC-9 se encuentra a ~5 km al NW del pozo TTC-3 (Fig. 1.2), en la parte central de la caldera que se levantó debido a una intrusión intracaldera somera de magma evolucionado y que posiblemente también dio lugar a la formación de la brecha freatomagmática (diatrema) encontrada en este pozo.

CAPÍTULO 3

3. CARACTERIZACIÓN LITOESTRATIGRÁFICA DE LOS TESTIGOS DE PERFORACIÓN DE LOS POZOS TTC-2, TTC-3 Y TTC-9

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se realiza la descripción petrográfica de las rocas presentes en los tres pozos, a partir de la descripción macroscópica y mesoscópica (logueo) de un total de 1290 metros de testigos de roca y de 192 muestras de mano (ver Anexo 1) y la descripción microscópica de 73 muestras de roca en lámina delgada (ver Anexo 2). Con el estudio petrográfico se identificaron las unidades litoestratigráficas y se propuso una interpretación geológica para cada una de ellas. Estas rocas presentan alteración hidrotermal, pero en este capítulo se enfatiza solamente la petrografía del protolito (roca antes de ser alterada) y la mineralogía de alteración será tratada en el Capítulo 4.

3.2 ESTRATIGRAFÍA Y PETROGRAFÍA

En el desarrollo de este subcapítulo se utilizarán las siguientes abreviaciones para describir el estado de las rocas:

RF: Roca fresca sin alteración hidrotermal o con mínima alteración hidrotermal

RA: Roca alterada con alteración hidrotermal significativa y conspicua

RM: Roca meteorizada

3.2.1 UNIDADES DEL POZO TTC-2

Este pozo es vertical, tiene 160 m de profundidad y es el más cercano al borde caldérico oriental.

3.2.1.1 Depósito de morrena (0-13.50m)

Este depósito heterolitológico está comprendido entre las cotas 3252.82 y 3239.32 msnm cuyo espesor es 13.50 m. Es un depósito morrénico o till, clasto soportado, pobremente sorteado, sin estratificación, no consolidado, de color café a marrón. Compuesto por 30% de matriz de limo arenoso; y presenta 70% de fragmentos subangulosos a subredondeados, con tamaños que varían desde 2 cm hasta 1 m.

- **Petrografía**

Está formado por fragmentos de roca que corresponden a:

- a. **38% (RF) Brecha polimíctica A:** Brecha heterolitológica (es decir con fragmentos de varias litologías), color rojizo, matriz soportada, pobremente sorteada, no estratificada. Compuesta de:
 - o 40% de matriz arcillosa
 - o 30% de líticos angulosos a subredondeados de dacita porfirítica, color gris claro, la cual presenta 90% de matriz criptocristalina; y 10% de fenocristales de: plagioclasa (8%) y anfíbol (2%).
 - o 30% de líticos subangulosos a subredondeados de andesita afanítica, color gris oscuro. Compuesta de vidrio, plagioclasa y máficos.
- b. **10% (RF) Dacita porfirítica anfibólica:** color gris violáceo, compuesta de:
 - o 20% de fenocristales: plagioclasa (17%), anfíbol (2%) y cuarzo (1%)
 - o 80% de matriz microcristalina.
 Presenta xenolitos subredondeados de andesita porfirítica.
- c. **7% (RF) Andesita afanítica:** color gris claro, presenta matriz criptocristalina formada por vidrio y cristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol y magnetita.
- d. **5% (RF) Brecha polimíctica B:** Color verde rosáceo, matriz soportada, pobremente sorteada, no estratificada. Compuesta de:

- o 55% de matriz arcillosa-arenosa
 - o 25% de líticos angulosos a subredondeados de dacita porfirítica, color gris claro que está compuesta de fenocristales de plagioclasa, anfíbol, piroxeno, y cuarzo; con matriz microcristalina con vidrio.
 - o 10% de líticos subangulosos a subredondeados de andesita afanítica, color gris oscuro. Compuesta de vidrio, plagioclasa y piroxeno.
 - o 10% de fragmentos de cristales de plagioclasa, piroxeno, anfíbol y cuarzo.
- e. **4% (RA) Andesita porfirítica con alteración propilítica:** color gris verdoso, compuesta de:
- o 10% de fenocristales: plagioclasa (4%), anfíbol (3%) y piroxeno (3%).
 - o 90% de matriz microcristalina con vidrio alterado parcialmente a arcillas y minerales máficos alterados a clorita.
- Presenta pirita muy fina diseminada en toda la roca.
- f. **3% (RA) Dacita porfirítica con alteración propilítica:** color gris verdoso, compuesta de:
- o 30% de fenocristales: plagioclasa (23%), anfíbol (5%), piroxeno (1%) y cuarzo (1%).
 - o 70% de matriz microcristalina con vidrio alterado parcialmente a arcillas y minerales máficos alterados a clorita.
- g. **3% (RF) Dacita afanítica:** Fragmento del Flujo 1, es color gris oscuro, presenta matriz criptocristalina formada por vidrio y cristales de plagioclasa, cuarzo, piroxeno, anfíbol y magnetita. La roca presenta pátinas de pirolusita en las fracturas.

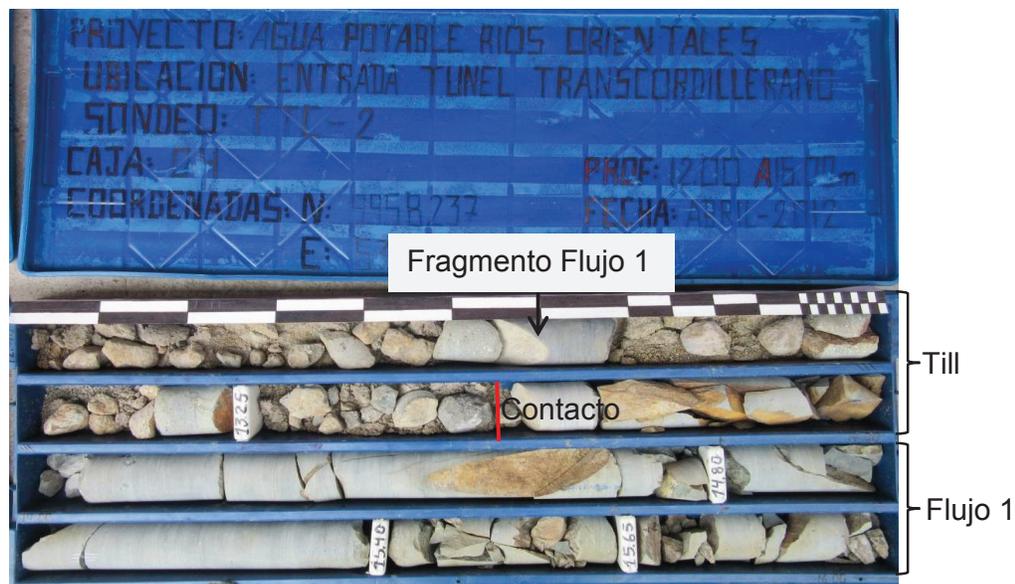


Figura 3.1: Depósito morrénico (de 12 a 13.50 m) en contacto con flujo de lava afanítico (Flujo 1) (desde 13.50 m). Se observa pátinas de oxidación por meteorización en las fracturas de la roca.

- **Observaciones**

Este depósito morrénico presenta fragmentos de rocas de distintas litologías, entre rocas frescas y rocas con alteración propilítica que se encontraban en afloramientos, expuestos a la erosión glacial y fueron incluidas en la morrena durante el avance del glaciar. Fragmentos del Flujo 1 (roca subyacente) se encuentran también dentro del till.

Se encuentra a una cota de ~3250 msnm, lo cual sugiere que su formación ocurrió durante el Pleniglacial (35 - >40 ka) cuyo límite altitudinal se encuentra en un rango de 2900 a 3900 msnm (Clapperton y Vera, 1986; Clapperton y McEwan, 1985).

Se encuentra en contacto discordante erosivo, sobreyaciendo a un flujo finamente bandeado de dacita afanítica (Flujo 1).

3.2.1.2 Flujo 1 – (RA) Flujo de lava finamente bandeado de dacita afanítica (13.50-103.81 m)

Esta unidad tiene una potencia de 90.31 m y está comprendido entre las cotas 3239.32 – 3149.01 msnm.

● Petrografía

Para la caracterización petrográfica de este flujo, se tomaron en cuenta las muestras de roca en lámina delgada: TTC-2-17, TTC-2-57 y TTC-2-103.

La roca presenta textura hipocristalina, afanítica intersertal fluidal.

(Hipocristalina: Textura de acuerdo al grado de cristalinidad en la que coexisten cristales y vidrio. Afanítica: Los constituyentes de la roca son tan pequeños que no son visibles a simple vista. Intersertal: Los intersticios de la roca están ocupados por vidrio).

La roca está compuesta de:

- o 50% de vidrio parcialmente alterado a arcilla, color café claro, es isotrópico y engloba a los microlitos.
- o 41% de microlitos de plagioclasa (andesina), con forma alargada y disposición subparalela entre sí. Son de tamaño ≤ 0.2 mm, no poseen maclas y el ángulo de extinción es de 25° .
- o 3% de cuarzo, con forma anhedral y de tamaño ≤ 0.2 mm.
- o 2% de anfíbol totalmente alterado a clorita, con forma euhedral, de tamaño de 0.8 a 0.1 mm.
- o 2% de magnetita, de color negro, de tamaño ≤ 0.02 mm, los cristales se encuentra diseminados en la roca y en partes se encuentran agrupados en forma de agregados.
- o 1% de biotita, con forma alargada y fibrosa, de tamaño de 1 a 0.1 mm, presentan coronas de óxidos.
- o $<1\%$ de piroxeno, con forma prismática subhedral, de tamaño de 0.5 mm, ocasionalmente se encuentran agrupados en forma de agregados subredondeados.

- **Litofacies**

Este flujo presenta bandeamiento muy fino, microscópicamente se observan lineamientos cristalinos con una textura fluidal. No fue evidente la presencia de autobrechas a la base, ni al techo del flujo.

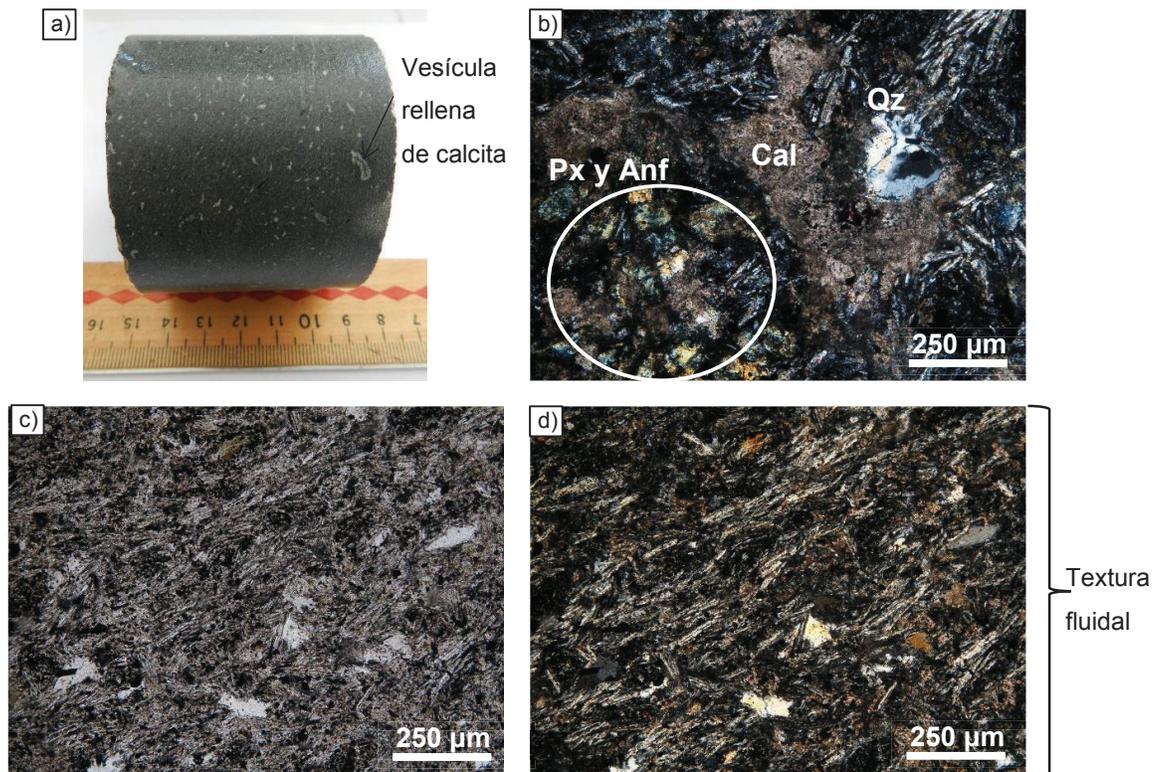


Figura 3.2: a) Muestra TTC-2-17: Dacita afanítica con pequeñas vesículas rellenas por calcita. b) FNX (**Figura con nícoles cruzados**) de la muestra TTC-2-57: Anfíbol y piroxeno agrupados en forma de agregados, totalmente alterados a clorita; junto con microlitos de plagioclasa, cuarzo y vidrio intersticial; calcita relleno las vesículas y reemplazando ocasionalmente al vidrio. c) FSNX (**Figura sin nícoles cruzados**) de la muestra TTC-2-17: se observa la textura hipocristalina afanítica intersertal fluidal. d) FNX de la muestra TTC-2-17: se observa los microlitos de plagioclasa, cuarzo, biotita y óxidos con orientación subparalela entre sí, y vidrio intersticial ligeramente alterado a arcilla.

- **Observaciones**

El contacto de base entre el Flujo 1 y la secuencia clástica de brechas polymícticas es abrupto y se observa claramente debido al cambio de litología en los testigos de roca.

De 94 a 95 m de profundidad se encontró una zona de fallamiento normal de bajo ángulo.

3.2.1.3 Secuencia clásica de brecha polimíctica con fragmentos volcánicos y metamórficos (103.81-104.70 m)

Esta unidad tiene una potencia de aproximadamente 1 m, y está comprendida entre las cotas 3149.01-3148.12 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de esta unidad, se tomaron en cuenta las muestras TTC-2-103, TTC-2-104.1 y TTC-2-104.7.

La brecha presenta textura pefítica con matriz pelítica- psamítica. Está formada por aproximadamente 50% de líticos subredondeados a subangulosos de las siguientes litologías:

a) 12% (RA) Andesita afanítica silicificada: Fragmentos de 4 a 2 mm, con forma angulosa a subredondeada y presentan textura afanítica.

Está compuesta de:

- o 60% de vidrio totalmente alterado a arcilla
- o 34% de criptocristales de plagioclasa y máficos
- o 3% de anfíbol de tamaño de 0.3 a 0.1 mm, alterado a clorita y presenta pátinas de hematita.
- o 2% de plagioclasa de tamaño de 0.3 a 0.2 mm.
- o 1% de óxidos de tamaño ≤ 0.2 mm.

Estos fragmentos se encuentran alterados:

- o 60% arcilla como producto de alteración del vidrio de la matriz.
- o 15% silicificación en los cristales de plagioclasa y la matriz.
- o 1% clorita como producto de alteración de anfíbol.
- o 1% hematita en forma de pátinas en los cristales de anfíbol y en la matriz.

b) 12% Cuarzo de origen metamórfico: Fragmentos de 4 a 2 mm, con forma subangular a angulosa, algunos cristales tienen textura poikilítica (se

caracteriza por la existencia de pequeñas y frecuentes inclusiones minerales en un cristal relativamente grande) con cristales de sericita en el interior.

- c) 12% (RF) Esquisto cuarzo sericítico:** Fragmentos de 5 a 2 mm, con forma subredondeada, y textura lepidoblástica (textura orientada debida al crecimiento paralelo, por blastesis, de minerales hojosos), compuesta de:
- o 60% de sericita
 - o 39% de cuarzo
 - o 1% de óxidos
- d) 9% (RF) Gneis cuarzo-muscovítico:** Fragmentos de 15 mm, con forma alargada subangular, presentan textura gnéisica poikiloblástica, compuesta de:
- o 50% de cuarzo, de tamaño de 4 a 0.1 mm, algunos cristales presentan textura poikiloblástica con inclusiones de sericita.
 - o 47% de muscovita de tamaño de 0.2 mm, los cristales se encuentran agrupados formando bandas.
 - o 2% de albita, de tamaño ≤ 0.1 mm.
 - o 1% de clorita, de tamaño ≤ 0.1 mm.
 - o 1% de hematita en forma de pátinas, junto a los cristales de muscovita dándole un aspecto de bandeamiento a la roca.
- e) 3% (RF) Filita con pátinas de hematita:** Fragmentos de 10 mm, con forma subredondeada y textura filítica. Compuesta de:
- o 55% de sericita
 - o 54% de cuarzo de tamaño ≤ 0.1 mm
 - o 1% de hematita en forma de pátinas
- f) 2% (RF) Pizarra:** Fragmentos de 4 a 2 mm, presentan textura pizarrosa. Compuesta de:
- o 70% de arcilla
 - o 22% de sericita

- o 5% de plagioclasa
- o 2% de cuarzo de tamaño ≤ 0.1 mm
- o $<1\%$ de óxidos

La matriz de la brecha representa aproximadamente el 50% de la roca y está formada por arcilla (30%), fragmentos de cristales y rocas de tamaño ≤ 2 mm de: cuarzo (12%), sericita (3%), hematita en forma de pátinas (1%), andesita afanítica (4%).

- **Litofacies**

La brecha no presenta gradación, es masiva, matriz soportada y pobremente sorteada.

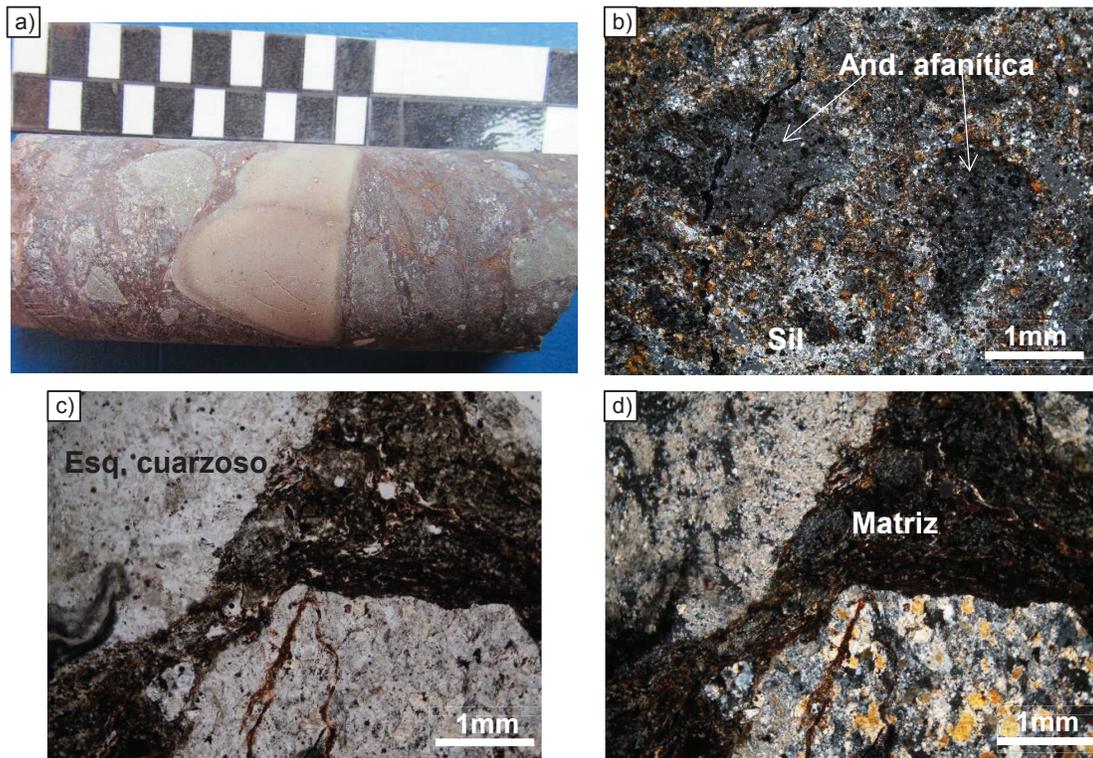


Figura 3.3: a) Muestra TTC-2-104.1: Brecha polimíctica con fragmentos volcánicos y metamórficos, algunos fragmentos volcánicos presentan bordes coloración oscura, posiblemente sean bordes de oxidación supérgena. b) FNX de la muestra TTC-2-104.7: Brecha con fragmentos subangulosos de andesita afanítica, en matriz de arcilla y sílice con pátinas de hematita. c) FSNX de la muestra TTC-2-104.1: Brecha polimíctica con fragmentos angulares a subangulosos de esquistos cuarzosos. d) FNX de la muestra TTC-2-104.1: Brecha polimíctica con matriz de arcilla, sericita y pátinas de hematita.

- **Observaciones**

Esta brecha clástica de 1 m de espesor, está constituida por fragmentos volcánicos y metamórficos, presenta una matriz rojiza lo cual sugiere que la permeabilidad de la roca permitió el paso de fluidos ricos en hierro (Fe) en un ambiente oxidante, formando pátinas de hematita. Además la forma sub-angular de sus líticos volcánicos y metamórficos, sugiere que estos no tuvieron mucho transporte, es decir su fuente es cercana al sitio donde se depositaron. Los líticos volcánicos son principalmente andesitas y el cuarzo presente en estas brechas corresponde al cuarzo azul encontrado en los gneises de la unidad Tres Lagunas de edad Triásico, perteneciente al basamento metamórfico de la Cordillera Real.

Los fragmentos de rocas volcánicas se encuentran alterados hidrotermalmente, mientras que los metamórficos no son afectados por la alteración.

A la base se observa un contacto transicional con otra secuencia clástica de brechas que están formadas únicamente por rocas metamórficas.

3.2.1.4 Brecha polimíctica compuesta solamente de fragmentos metamórficos (104.70-118.45 m)

Esta unidad tiene una potencia de 13.75 m y está comprendida entre las cotas 3148.12-3134.37 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de esta unidad, se tomaron en cuenta las muestras TTC-2-111, TTC-2-116 y TTC-2-117.

La brecha presenta textura psefítica con matriz psamítica- pelítica. Está formada por aproximadamente 65% de líticos subredondeados a subangulosos de las siguientes litologías:

- a. **25% Cuarzo:** Fragmentos de 7 a 2 mm, con forma subangular a angulosa, algunos cristales tienen textura poikiloblástica con cristales de sericita en el interior.
- b. **15% (RF) Filita sericítica:** Fragmentos de 7 a 2 mm, con forma angulosa a subredondeada y textura filítica. Compuesta de:
- o 94% de sericita
 - o 4% de cuarzo
 - o 2% de óxidos
- c. **13% (RF) Gneis cuarzo-muscovítico:** Fragmentos de 22 mm, con forma subangular, presentan textura gnéisica poikiloblástica. Compuesta de:
- o 60% de cuarzo, de tamaño de 7 a 0.3 mm, algunos cristales presentan textura poikiloblástica con inclusiones de sericita.
 - o 31% de muscovita de tamaño de 0.2 mm, los cristales se encuentran agrupados formando bandas.
 - o 8% de albita, de tamaño de 3 a 1 mm, alteradas parcialmente a arcilla.
 - o 2% de óxidos, se encuentra junto a los cristales de muscovita.
 - o 1% de biotita, de tamaño ≤ 1 mm.
- d. **7% (RF) Esquisto cuarzo-sericítico-biotítico:** Fragmentos de 6 a 2 mm, con forma angulosa alargada, y textura lepidoblástica. Compuesta de:
- o 55% de sericita
 - o 34% de biotita
 - o 10% de cuarzo
 - o 1% de óxidos
- e. **4% (RF) Filita clorítica:** Fragmentos de 4 a 2 mm, con forma subangular a subredondeada y textura filítica. Compuesta de:
- o 60% de clorita
 - o 33% de arcilla
 - o 7% de plagioclasa

- f. **1% Plagioclasa:** Fragmentos de 4 a 2 mm, con forma angulosa, posiblemente albita.

La matriz de la brecha representa aproximadamente el 35% de la roca y está formada por arcilla (10%) y fragmentos de rocas y cristales de tamaño ≤ 2 mm de: filita clorítica (5%), filita sericítica (5%), esquistos cuarzo-sericítico-biotítico (4%), cuarzo (5%), sericita (4%), plagioclasa (albita) (2%).

- **Litofacies**

La brecha no presenta gradación, es masiva, matriz soportada y pobremente sorteada, con fragmentos angulosos a subredondeados.

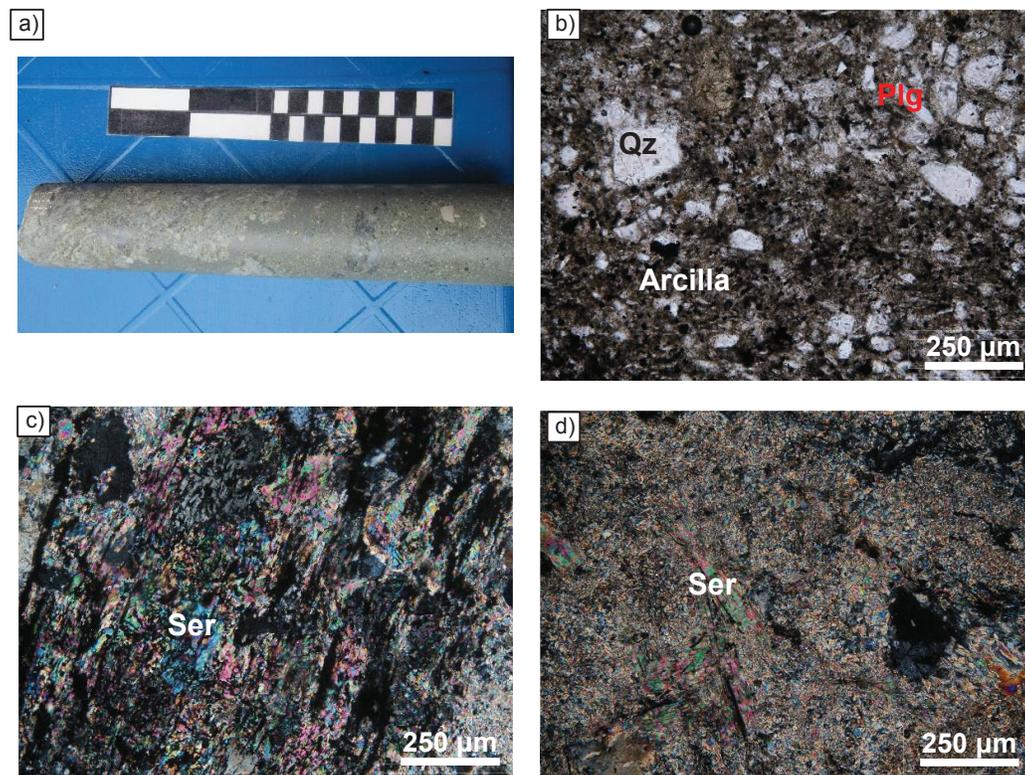


Figura 3.4: a) Fotografía a profundidad de 117.30-117.55: Brecha polimictica con fragmentos metamórficos subangulosos. b) FSNX de la muestra TTC-2-116: Matriz arenosa de cuarzo, arcilla, sericita y plagioclasa. c) FNX de la muestra TTC-2-117: Brecha con fragmentos subangulosos de esquistos cuarzo-sericítico rico en óxidos, en matriz de cuarzo, arcilla y sericita (mineral de alta birrefringencia). d) FNX de la muestra TTC-2-116: Fragmento de filita sericítica.

- **Resumen**

Esta brecha clástica de 13.75 m de potencia, se compone únicamente de fragmentos líticos metamórficos sub-angulares a sub-redondeados, lo que indica que la fuente (el basamento metamórfico) es cercana a este pozo; se conoce que el gneis granítico Tres Lagunas aflora en la plaza de la Iglesia de Papallacta a aproximadamente 400 m del pozo TTC-2. Por lo tanto el cuarzo de tonalidad azul encontrado en esta brecha es proveniente de la unidad metamórfica Tres Lagunas.

La brecha con fragmentos metamórficos se encuentra en contacto disconforme con un depósito lacustre.

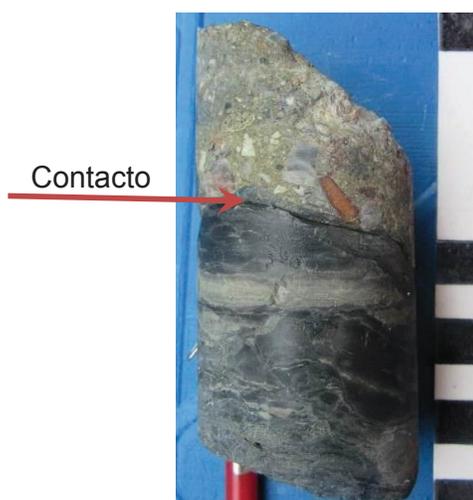


Figura 3.5: Fotografía de 118.40 a 118.50 m de profundidad, donde se observa claramente el contacto concordante entre la secuencia lacustre (abajo) y la brecha de fragmentos metamórficos (arriba). La secuencia lacustre presenta laminación y leve microfallamiento.

3.2.1.5 Depósito lacustre laminado y microfallado (118.45-118.80 m)

Este depósito tiene una potencia de 35 cm y está comprendido entre las cotas 3134.37– 3134.02 msnm.

- **Petrografía**

La roca presenta una textura pelítica, representa un depósito formado en su totalidad por ceniza volcánica fina. Se observan laminaciones paralelas sucesivas

de color negro y gris claro; presenta buen sorteo y sus componentes son de tamaño muy fino.

- **Litofacies**

Las laminaciones posiblemente fueron formadas en un ambiente lacustre.

- **Observaciones**

La base de esta secuencia se encuentra en contacto con un flujo de dacita afanítica (Flujo 2).

3.2.1.6 Flujo 2 – (RA) Flujo de lava finamente bandeado de dacita afanítica (118.80-158.55 m)

Esta unidad tiene una potencia de 39.75 m, y está comprendida entre las cotas 3134.02 – 3094.27 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de este flujo, se tomaron en cuenta las muestras TTC-2-122 y TTC-2-153.

La roca presenta textura hipocrystalina, afanítica intersertal fluidal; compuesta de:

- o 50% de vidrio color café claro, es isotrópico y engloba a los microlitos.
- o 40% de microlitos de plagioclasa, con forma alargada y disposición subparalela entre sí. Son de tamaño ≤ 0.2 mm, no poseen macla polisintética.
- o 6% de cuarzo, con forma anhedral y de tamaño de 0.5 a 0.1 mm.
- o 2% de anfíbol, con forma euhedral, de tamaño de ≤ 0.1 mm.
- o 2% de magnetita, de color negro, de tamaño ≤ 0.02 mm, los cristales se encuentran diseminados en la roca.

- **Litofacies**

Este flujo de aproximadamente 40 m de potencia, presenta bandeamiento muy fino, microscópicamente la disposición de los microlitos es fluidal. No presenta autobrecha a la base ni al techo.

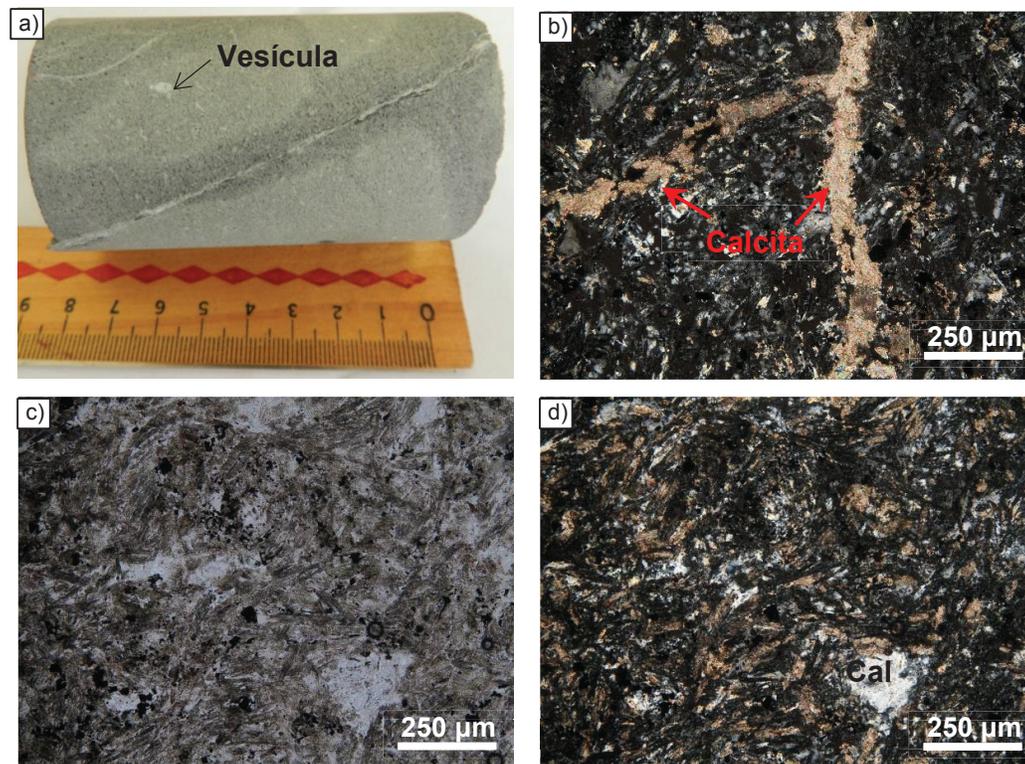


Figura 3.6: a) Muestra TTC-2-122: Dacita afanítica con pequeñas vesículas rellenas por calcita. b) FNX de la muestra TTC-2-122: La roca presenta textura hipocristalina, afanítica intersertal fluidal, y está cortada por vetillas de calcita. c) FSNX de la muestra TTC-2-153: En la muestra se observan los microlitos de plagioclasa parcialmente alterados a arcilla. d) FNX de la muestra TTC-2-153: En la muestra se observa que en las vesículas rellenas de calcita.

- **Observaciones**

Hay una zona altamente fracturada en el tramo de 138 a 139 m.

A la base se encuentra en contacto disconforme con un depósito lacustre.

3.2.1.7 Depósito lacustre laminado y microfallado (158.55-159.60 m)

Esta unidad tiene una potencia de 1.05 m, y está comprendido entre las cotas 3094.27 – 3093.22 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de este depósito, se tomó en cuenta la muestra TTC-2-159.3.

La roca presenta textura pelítica, representa un depósito formado por ceniza volcánica fina, en forma de una secuencia de laminaciones sucesivas, de color negro y café a la base, mientras que al techo son de color gris claro.

- **Litofacies**

La secuencia pelítica presenta laminación de ceniza fina, posiblemente en un ambiente lacustre.

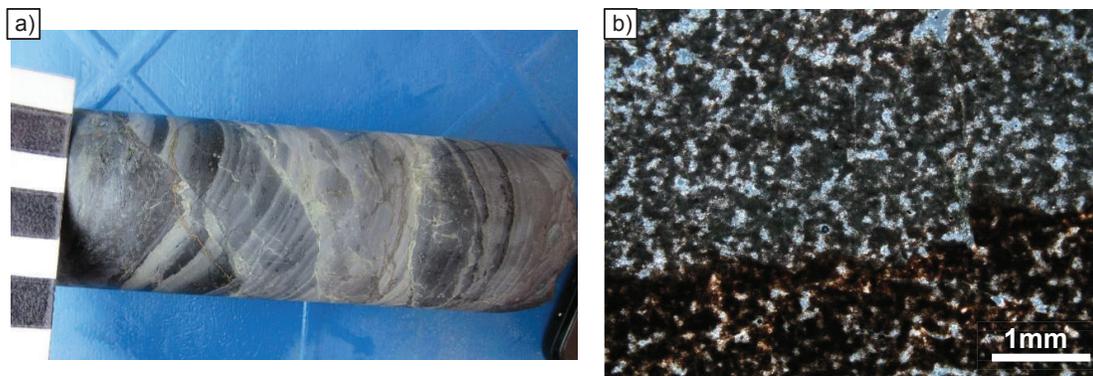


Figura 3.7: a) Muestra TTC-2-159.3: Secuencia pelítica laminada microfallada b) FSNX de la muestra TTC-2-159.3: La roca presenta textura pelítica, está compuesta por ceniza fina, se observa el contacto entre las laminaciones.

- **Observaciones**

Es posible que esta secuencia de aproximadamente 1 m de potencia, se encuentre microfallada debido al flujo dacítico encontrado en el techo de esta secuencia.

A la base, se encuentra en contacto disconforme con un paquete clástico de arenisca gruesa y brecha granular.

3.2.1.8 Secuencia clástica de arenisca gruesa y brecha granular con fragmentos silicificados y gradación inversa (159.60-160.00 m)

Esta unidad tiene una potencia de 40 cm, y está comprendido entre las cotas 3093.22-3092.82 msnm.

● Petrografía

Para la caracterización petrográfica de esta unidad, se tomó en cuenta la muestra TTC-2-159.7.

La roca tiene gradación granocreciente, a la base es una arenisca gruesa que gradada hacia el techo a brecha granular.

Está formada por diferentes litologías: cuarzo, fragmentos de toba silicificada, filitas y esquistos cloríticos. El cemento que une a los granos es de tipo arcilloso.

La brecha presenta textura psefítica con matriz psamítica-pelítica. Está formada por aproximadamente 30% de líticos subredondeados a subangulosos de las siguientes litologías:

- a. **10% (RA) Lutita silicificada:** Fragmentos de 12 a 3 mm, con forma subangular, compuesta por arcilla de coloración café claro.
Alteración: 10% de silicificación diseminada en la roca.

- b. **10% (RA) Lutita laminada silicificada:** Fragmentos de 4 a 3.5 mm, con forma subangular y textura pelítica. Compuesta de arcilla (100%) de color café claro laminada con café oscuro.

- c. **10% (RA) Toba silicificada:** Fragmentos de 4 mm, con forma subredondeada, es de grano fino y está compuesta de: ceniza compacta (90%), fragmentos de cuarzo (6%), de tamaño ≤ 0.2 mm, fragmentos de plagioclasa (4%) de tamaño ≤ 0.2 mm, reemplazados totalmente por calcita.
Alteración:
10% silicificación en toda la roca.
4% calcita, como producto de reemplazamiento en cristales de plagioclasa.
4% pirita, de tamaño ≤ 0.1 mm, diseminada en toda la roca.

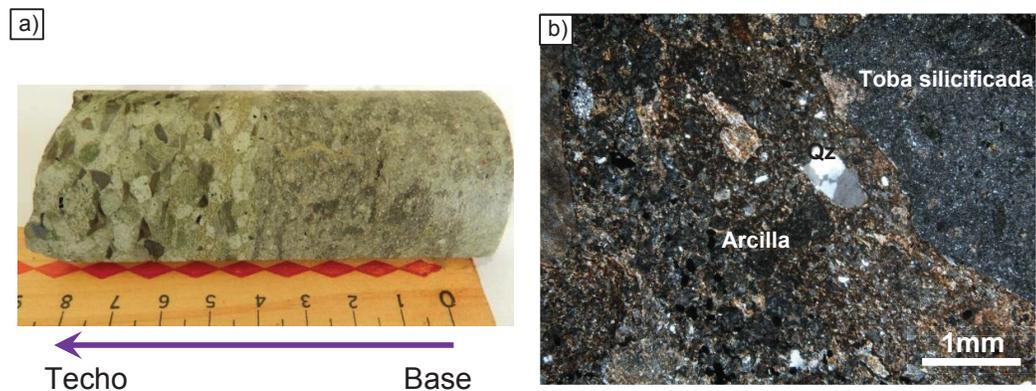
3% hematita como producto de alteración de magnetita en la matriz, se presenta en forma de pátinas.

La matriz de la brecha representa aproximadamente el 70% de la roca y está formada por arcilla y fragmentos de rocas y cristales de tamaño ≤ 2 mm:

- a. 49% Arcilla
- b. 10% Toba silicificada
- c. 10% Cuarzo
- d. 1% Filita
- e. 1% Esquisto cuarzo-sericítico-biotítico

- **Litofacies**

La arenisca gruesa tiene textura psamítica, es moderadamente sorteada, bien consolidada y está formada por granos de tamaño de 3-0.1 mm. La brecha es una secuencia clástica matriz soportada, moderadamente sorteada y está formada por arena gruesa y gravilla. Posiblemente corresponden a un depósito de origen fluvio-lacustre.



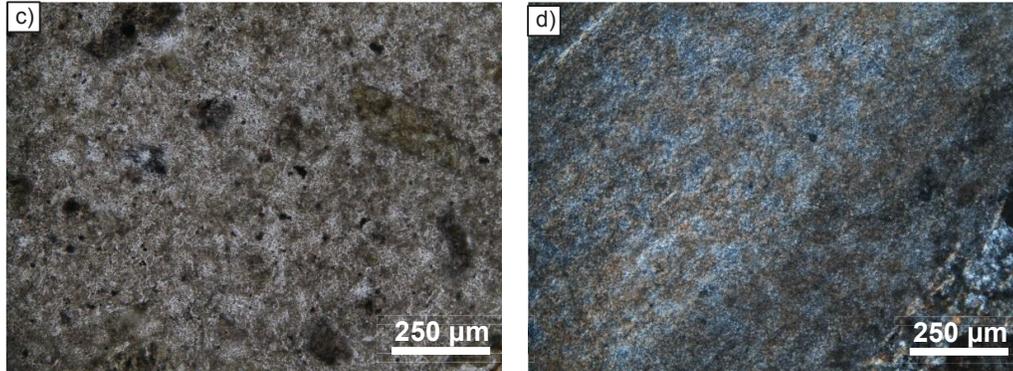


Figura 3.8: a) Muestra TTC-2-159.7: Arenisca (a la base) con gradación inversa y brecha granular (al techo). b) FNX de la muestra TTC-2-159.7: Matriz de la brecha, formada principalmente por arcilla, fragmentos de cuarzo y de toba silicificada. c) FSNX de la muestra TTC-2-159.7: Fragmento de toba silicificada. d) FNX de la muestra TTC-2-159.7: Fragmento de lutita laminada silicificada.

- **Observaciones**

Este depósito de aproximadamente 1 m de potencia, presenta fragmentos de rocas silicificadas de forma subangular, que probablemente provienen de una fuente cercana. Estas rocas fueron silicificadas por procesos anteriores a la formación de la brecha. Debido a la gradación granocreciente de la roca se puede interpretar que son depósitos de origen fluvio-lacustre, con incrementos de energía.

El resumen de la litoestratigrafía del POZO TTC-2 se encuentra en el subcapítulo 3.2.4.1 (Pág. 154) y el esquema litoestratigráfico de los tres pozos se muestra en la Figura 3.38 (Pág.165)

3.2.2 UNIDADES DEL POZO TTC-3

3.2.2.1 Depósito de morrena (0 - 26.10 m)

El depósito está comprendido entre las cotas 3722-3748.10 msnm, tiene un espesor aparente de 26 m.

- **Petrografía**

Es un depósito polimíctico, clasto soportado, pobremente sorteado, sin estratificación, de color café a gris claro. Está compuesto por 50% de matriz de arena media a gruesa con arcillas y presenta 50% de fragmentos subangulosos a subredondeados, con tamaños que varían desde 2 cm hasta 1 m. Estos fragmentos de roca corresponden a:

- a. **15% (RF) Brecha polimíctica A:** Es una brecha clasto soportada, pobremente sorteada, estratificada y con ligero magnetismo. Está compuesta de:
 - o 40% de matriz limosa de color gris violáceo
 - o 40% de líticos de toba de grano grueso, de color verdoso, con fragmentos de: plagioclasa (5%), biotita (2%), anfíbol (1%) y líticos de dacita porfirítica (2%).
 - o 20% de dacita porfirítica color gris claro, la cual presenta 80% de matriz criptocristalina; y 20% de fenocristales de: plagioclasa (8%), biotita (8%) y anfíbol (4%).
- b. **10% (RF) Brecha polimíctica B:** Matriz soportada, pobremente sorteada, no estratificada, porosa. Compuesta de:
 - o 80% de matriz de arena fina
 - o 20% de fragmentos líticos y de cristales: plagioclasa (5%), biotita (5%), dacita afanítica (6%) y andesita porfirítica (4%).

- c. **7% (RF) Dacita porfirítica A:** color gris verdoso
- o 30% de fenocristales: plagioclasa (20%), biotita (8%), anfíbol (2%).
 - o 70% de matriz microcristalina.
- d. **5% (RF) Brecha polimíctica C:** Matriz soportada, pobremente sorteada, no estratificada. Compuesta de:
- o 75% de matriz arcillosa
 - o 15% de líticos de andesita ácida porfirítica color gris oscuro, la cual presenta 70% de matriz criptocristalina; y 30% de fenocristales de: plagioclasa (20%), piroxeno (6%) y anfíbol (4%).
 - o 10% de dacita porfirítica color gris claro, compuesta por 85% de matriz criptocristalina; y 15% de fenocristales de: plagioclasa (7%), biotita (4%), anfíbol (3%) y cuarzo (1%).
- e. **5% (RF) Dacita porfirítica del Flujo 3:** Compuesta de:
- o 73% de matriz criptocristalina
 - o 27% de fenocristales de: plagioclasa (17%), biotita (4%), cuarzo (2%), piroxeno (1%), anfíbol (1%) y magnetita (1%).
- f. **4% (RF) Dacita porfirítica B:** color gris oscuro, ligeramente porosa y con leve magnetismo. Compuesta de:
- o 70% de matriz criptocristalina
 - o 30% de fenocristales: plagioclasa (20%), anfíbol (6%), biotita (3%) y cuarzo (1%).
- g. **2% (RF) Dacita porfirítica C:** color rojizo, oxidada, con leve magnetismo. Compuesta de:
- o 90% de matriz criptocristalina.
 - o 10% de fenocristales: plagioclasa (8%) y anfíbol (2%)

- h. **2% (RF) Toba dacítica:** color gris, compuesta de:
- o 85% de ceniza compacta.
 - o 15% de fragmentos de cristales de: plagioclasa (12%), anfíbol (3%).



Figura 3.9: Testigos de perforación de 24.00-28.00 m, a 26.10 m se encuentra el contacto entre el till y el flujo de lava dacítico (Flujo 3).

● Observaciones

Este depósito morrénico presenta fragmentos de rocas de distintas litologías (brechas polimícticas, flujos de lava, tobas), expuestas en afloramientos e incluidas en la morrena durante el avance del glaciar.

La altura de este depósito (3750 msnm) sugiere que su formación ocurrió durante el Pleniglacial (35 - >40 ka), cuyo límite altitudinal se encuentra en un rango de 2900 a 3900 msnm (Clapperton y Vera, 1986; Clapperton y McEwan, 1985).

Se encuentra en contacto disconforme, sobreyaciendo a un flujo bandeado de dacita (Flujo 3).

3.2.2.2 Flujo 3 - Flujo de lava bandeado de dacita biotítica porfirítica (26.10-132.65 m)

Esta unidad tiene una potencia de 104.65 m, y está comprendida entre las cotas 3721.90-3617.25 msnm.

● Petrografía

Para la caracterización petrográfica se tomaron en cuenta las muestras TTC-3-39, TTC-3-86 Y TTC-3-96.

La roca presenta textura hipocristalina, porfirítica y poikilítica orientada con matriz intersertal; compuesta de 27% de fenocristales:

- o 17% de plagioclasa (An 45, andesina), se identificaron tres tamaños de cristales que representan tres generaciones de cristalización: 1ra (7-3 mm), 2da (1.5-1 mm) y 3ra (0.7-0.2 mm).
Los cristales presentan macla polisintética, carlsbad, en menor proporción de periclina y sin maclas. Algunos de los cristales de la 1ra generación presentan zonación concéntrica normal. Ocasionalmente presentan inclusiones de piroxeno, anfíbol, biotita y óxidos. Algunos cristales se encuentran fracturados irregularmente.
- o 4% de biotita con tamaños desde 0.8 a 0.2 mm, algunos tienen inclusiones de óxidos y xenocristales de cuarzo, también presentan golfos de corrosión (cristales embayados).
- o 2% de cuarzo con tamaños desde 1.5 a 0.2 mm, algunos presentan inclusiones de óxidos y biotita y golfos de corrosión.
- o 1% de piroxeno de tamaño desde 0.6 a 0.2 mm.
- o 1% de anfíbol con tamaño desde 0.7 a 0.2 mm, presentan inclusiones de óxidos y golfos de corrosión.
- o 1% de magnetita en forma de agregados diseminada en toda la roca.

La matriz de la roca representa el 73% y está formada por:

- o 40% de vidrio color café, isotrópico, y ocupa los intersticios entre los microlitos

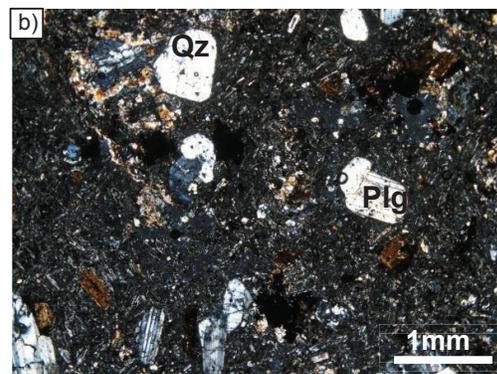
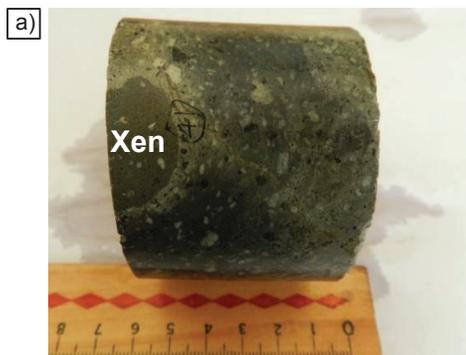
- o 26% de microlitos de plagioclasa con disposición fluidal
- o 2% de cuarzo dispuestos aleatoriamente
- o 2% de piroxeno
- o 1% de anfíbol
- o <1% de óxidos

La roca presenta xenolitos de:

- o Andesita porfírica, de tamaño de 30 a 5 mm, subredondeados, color gris oscuro. Compuesta de 84% de matriz criptocristalina y 16% de fenocristales de: plagioclasa (10%), piroxeno (5%) y anfíbol (<1%).
- o Diorita con textura fanerítica, de grano medio, los xenolitos son de tamaño ≤ 6 mm, subredondeados, compuestos por: cristales de plagioclasa intermedia (57%) envueltos entre cristales de clinopiroxeno (diópsido, 15%) y ortopiroxeno (hipersteno, 20%), hornblenda (5%) y óxidos (3%).

• Litofacies

Este flujo no tiene autobrecha de techo ni de base, presenta bandeamiento subhorizontal, formando bandas de color gris claro y gris oscuro.



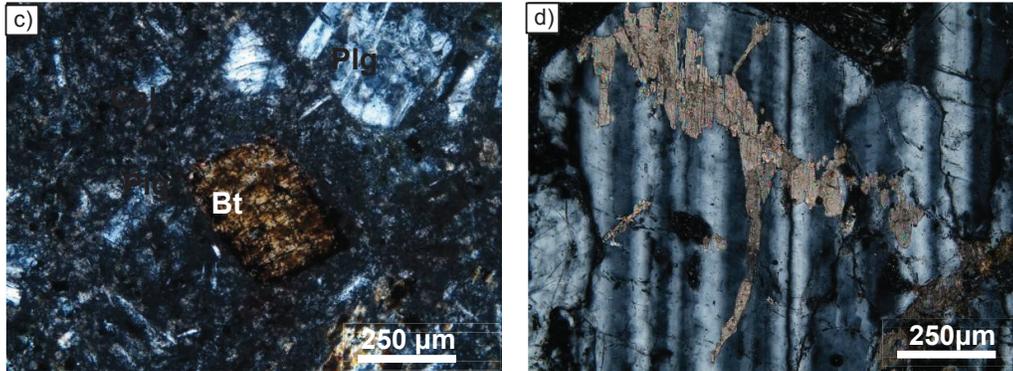


Figura 3.10: a) Muestra TTC-3-39: Dacita porfírica bandeada con xenolitos. b) FNX de la muestra TTC-3-96: Se observa principalmente los cristales de plagioclasa y cuarzo, en una matriz hipocristalina formada por vidrio y microlitos de plagioclasa orientados sub-paralelamente entre sí. c) FNX de la muestra TTC-3-39: la roca es rica en cristales de biotita, los cuales no presentan alteración. d) FNX de la muestra TTC-3-86: fenocristal de plagioclasa con reemplazamiento parcial de calcita.

• Resumen

Este flujo se encuentra en contacto concordante con un flujo de dacita (Flujo 4).

Se encontraron xenolitos de andesita porfírica y diorita, lo que indica que este flujo durante su trayecto hacia la superficie incorporó fragmentos de cuerpos intrusivos y extrusivos anteriormente emplazados a profundidad. Estos fragmentos también se encontraron en el Flujo 4 y en la diatrema del pozo TTC-9.

La presencia de cristales con golfos de corrosión (cristales embayados) se debe a la re-fusión o disolución de un mineral dentro de un fundido o solución en el que se formó (Winter, 2014), lo cual sugiere un desequilibrio con el fundido circundante (Struhsacker, 1978).

Hay un tramos altamente fracturado de 47.40 a 50.00 m y una zona con fracturas de alto ángulo en el tramo de 124.00 a 125.50 m

3.2.2.3 Flujo 4 - Flujo de lava de dacita porfirítica negra (132.65-143.75 m)

Esta unidad tiene una potencia de 11.1 m y está comprendida entre las cotas 3617.25-3606.15 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica se tomaron en cuenta las muestras TTC-3-138 y TTC-3-140. La roca presenta textura hipocristalina, pilotáxica porfirítica y poikilítica con matriz intersertal fluidal.

Pilotáxica: textura orientada-fluidal de rocas volcánicas básicas o intermedias, caracterizada por la disposición subparalela de los microlitos de feldespato, en cuyos intersticios están ocupados por material criptocristalino o vidrio. (MacKenzie, W.S y Adams, A.E. 1994).

Compuesta de 23% de fenocristales:

- o 18% de plagioclasa (An 60, andesina), se identificaron dos tamaños de cristales que representan dos generaciones de cristalización: 1ra (7.5-2.5 mm) y 2da (2-0.4 mm). Los cristales presentan macla polisintética y carlsbad, algunos cristales de la 1ra generación presentan zonación concéntrica normal, ciertos cristales presentan inclusiones de piroxeno, anfíbol y óxidos. En pocos casos se observan golfos de corrosión (cristales embayados) y coronas de reacción.
- o 1% de anfíbol con tamaños desde 0.4 a 0.1 mm, presentan inclusiones de óxidos.
- o 2% de clinopiroxeno (augita), con tamaños desde 0.6 a 0.2 mm, ocasionalmente presentan golfos de corrosión, es incoloro, con ángulo de exfoliación de 87 a 93°, presenta relieve alto, birrefringencia moderada, ángulo de extinción 36-45° y figura biaxial (+).
- o <1% de ortopiroxeno (hipersteno) con tamaños desde 0.8 a 0.2 mm, presenta relieve alto, birrefringencia débil, extinción paralela y figura biaxial (-).

- o <1% de biotita con tamaños desde 0.4 a 0.2 mm, algunos cristales presentan bordes de óxidos.
- o <1% de cuarzo con tamaños desde 0.4 a 0.2 mm, algunos cristales presentan golfos de corrosión.

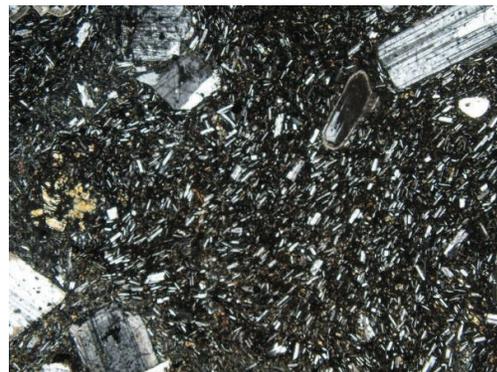
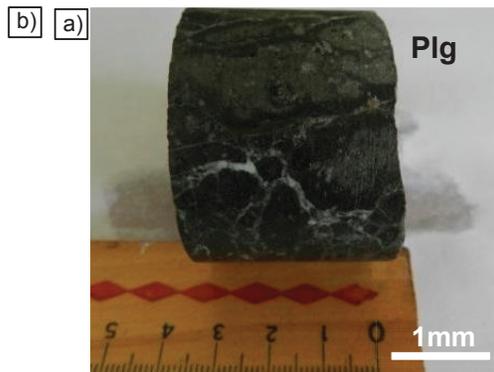
La matriz representa el 77% de la roca, constituida por:

- o 37% de vidrio color café ocupando los intersticios entre los microlitos.
- o 29% de plagioclasa, con tamaños ≤ 0.2 mm y disposición fluidal
- o 7% de piroxeno
- o 3% de anfíbol
- o 1% de óxidos

La roca presenta xenolitos de: Diorita con textura fanerítica, ofítica de grano fino, los xenolitos son de tamaño ≤ 6 mm, subredondeados, compuestos por: cristales de plagioclasa intermedia (57%) envueltos entre cristales de clinopiroxeno (diópsido, 15%) y ortopiroxeno (hipersteno, 20%), hornblenda (5%) y óxidos (3%).

- **Litofacies**

Este flujo es masivo en los primeros 6.22 m y a la base se presenta como una autobrecha de 4.88 m de espesor.



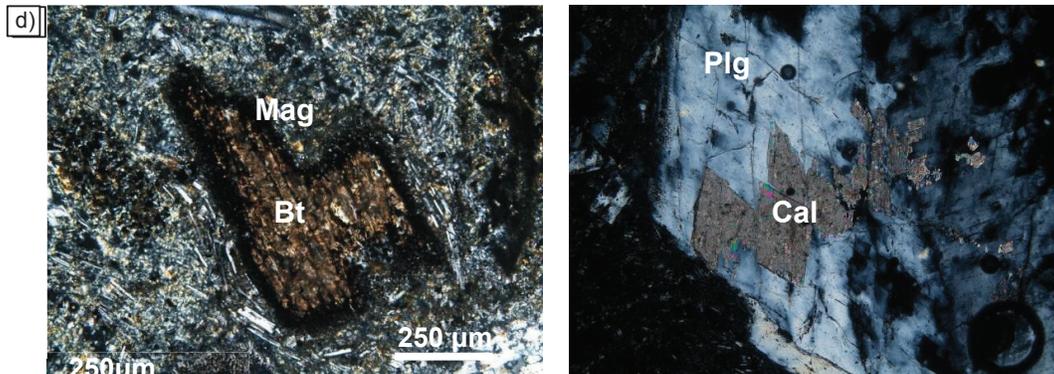


Figura 3.11: a) Muestra TTC-3-140: Muestra de la autobrecha de base del flujo de dacita porfirítica. b) FNX de la muestra TTC-3-138: Se observa principalmente los fenocristales de plagioclasa y cuarzo en una matriz hipocristalina formada por vidrio y microlitos de plagioclasa orientados sub-paralelamente entre sí. c) FNX de la muestra TTC-3-138: cristal de biotita con bordes de magnetita. d) FNX de la muestra TTC-3-140: fenocristal de plagioclasa con reemplazamiento parcial de calcita.

- **Resumen**

El Flujo 4 es poco potente y petrográficamente similar al Flujo 3, en principio se los puede interpretar como dos flujos de lava provenientes de la misma fuente. Incorpora los xenolitos encontrados en el Flujo 3, los mismos que también se encuentran como fragmentos en el interior de la diatrema del pozo TTC-9.

Además de la presencia de cristales embayados, se encontró cristales con coronas de reacción, lo cual sugiere que el mineral no estuvo en equilibrio con los otros minerales de la roca (J. Winter, 2014).

Se encuentra en contacto concordante con el flujo de andesita subyacente (Flujo 5).

Contacto concordante: Se define únicamente por el cambio litológico, no presenta una superficie erosional, ni la presencia de suelo.

3.2.2.4 Flujo 5 - Flujo de lava de andesita porfirítica negra (143.75-172.07 m)

Esta unidad tiene 28.32 m de potencia y está comprendida entre las cotas 3606.15-3577.83 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica se tomaron en cuenta las muestras TTC-3-150 y TTC-3-170.

La roca presenta textura hipocristalina, porfirítica y poikilítica con matriz intersertal fluidal. Compuesta de 25% de fenocristales:

- o 14% de plagioclasa (An 56, labradorita) se identificaron dos tamaños de cristales que representan dos generaciones de cristalización: 1ra (5-2 mm) y 2da (0.9-0.2 mm). Los cristales presentan macla tipo polisintética y carlsbad, algunos cristales de la 1ra generación presentan zonación concéntrica y ocasionalmente presentan inclusiones de piroxeno, anfíbol y óxidos. Algunos cristales se encuentran fracturados.
- o 5% de clinopiroxeno (augita), con tamaños que varían desde 1.3 a 0.15mm, presentan macla polisintética e inclusiones de óxidos
- o 3% de ortopiroxeno (hipersteno), el tamaño varía desde 2 a 0.1mm presentan inclusiones de óxidos. Existe intercrecimiento de ortopiroxeno y clinopiroxeno.
- o 2% de anfíbol, el tamaño varía de 1.3 a 0.3 mm, presentan inclusiones de óxidos.
- o 1% de magnetita en forma de agregados, color negro y diseminada en toda la roca.

La matriz constituye el 75% de la roca y está formada por:

- o 45% de vidrio color café, ocupando los intersticios entre los microlitos
- o 27% de plagioclasa, subhedrales con disposición fluidal
- o 2% de piroxeno
- o 1% de anfíbol.

- **Litofacies**

Este flujo es masivo y no presenta autobrechamiento.

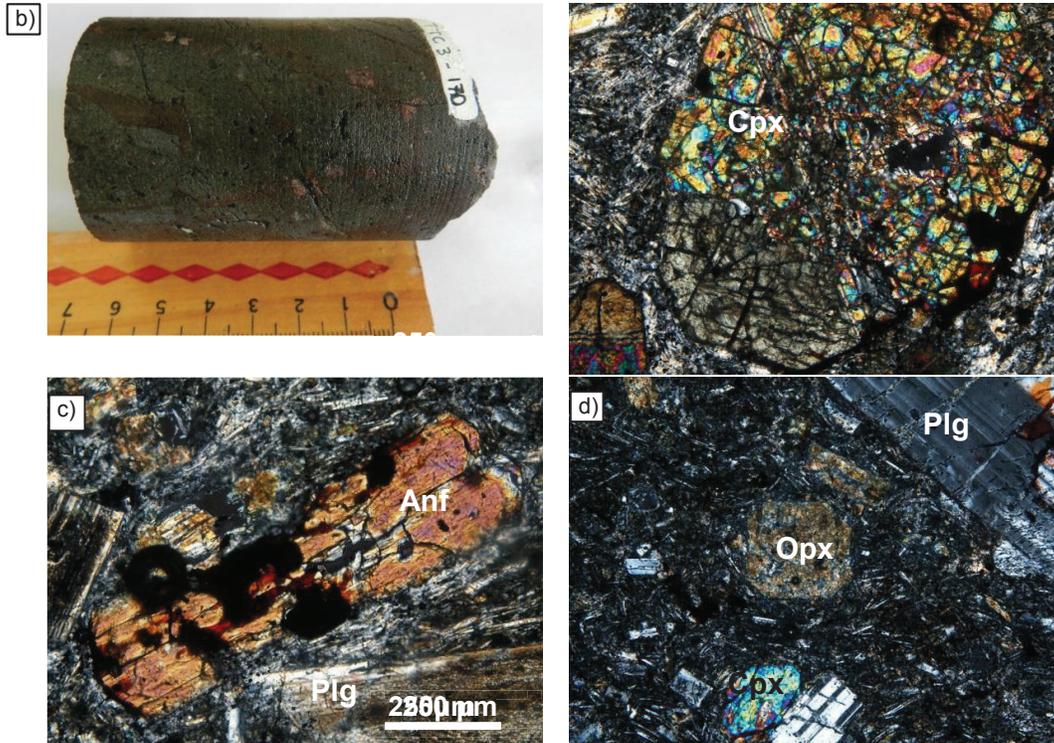


Figura 3.12: a) Muestra TTC-3-170: Muestra del flujo de andesita porfírica negra. b) FNX de la muestra TTC-3-150: Fenocristal de clinopiroxenos maclado, con óxidos en los bordes, envuelto por una matriz hipocristalina formada de vidrio y microlitos de plagioclasa orientados sub-paralelamente entre sí. c) FNX de la muestra TTC-3-150: Fenocristal de anfíbol con inclusiones de magnetita alterada parcialmente a hematita; también se observan fenocristales de plagioclasa los cuales están alterados parcialmente a arcillas. d) FNX de la muestra TTC-3-170: fenocristales de ortopiroxeno alterados parcialmente a clorita y fenocristales de clinopiroxeno y plagioclasa sin alteración. Con esto se evidencia que los minerales ferromagnesianos son más susceptibles a la alteración propilítica a diferencia de las plagioclasas.

- **Resumen**

Los fenocristales de este flujo se encuentran microfracturados, esto puede ser el resultado de los esfuerzos producidos por el lento enfriamiento durante su avance en superficie.

El contacto basal de este flujo es concordante con el flujo 6.

3.2.2.5 Flujo 6 - Flujo de lava de andesita porfirítica negra (172.07-205.46 m)

Esta unidad tiene un espesor de 33.39 m, y está comprendido entre las cotas 3577.83-3544.44 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica, se tomaron en cuenta las muestras TTC-3-177 y TTC-3-204.

La roca presenta textura hipocristalina, porfirítica y poikilítica con matriz intersertal fluidal. Compuesta de 12% de fenocristales:

- o 9% de plagioclasa (An 80, bytownita), se identificaron dos tamaños de cristales que representan dos generaciones de cristalización: 1ra (4-1 mm) y 2da (1-0.3 mm), presentan macla tipo polisintética, carlsbad y sin maclas. Presentan inclusiones de piroxeno y óxidos y frecuentemente se encuentran fracturados.
- o 2% de piroxeno (clinopiroxeno), el tamaño de los cristales varía desde 2 a 0.1mm.
- o 1% de óxidos (magnetita) en forma de agregados subhedrales e irregulares, diseminados en toda la roca.

La matriz constituye el 88% de la roca y está formada por:

- o 45% de vidrio, el cual presenta una tonalidad café, es isotrópico y ocupa los intersticios entre los microlitos.
- o 40% de microlitos de plagioclasa con disposición fluidal y forma subhedral.
- o 2% de piroxeno, los cuales presentan forma anhedral y subhedral.
- o 1% de óxidos muy finos diseminados en toda la matriz.

- **Litofacies**

Este flujo está formado por una autobrecha de 9.43 m al techo, por un flujo masivo de 11.30 m en la parte intermedia y una autobrecha de 12.66 m de espesor a la base.

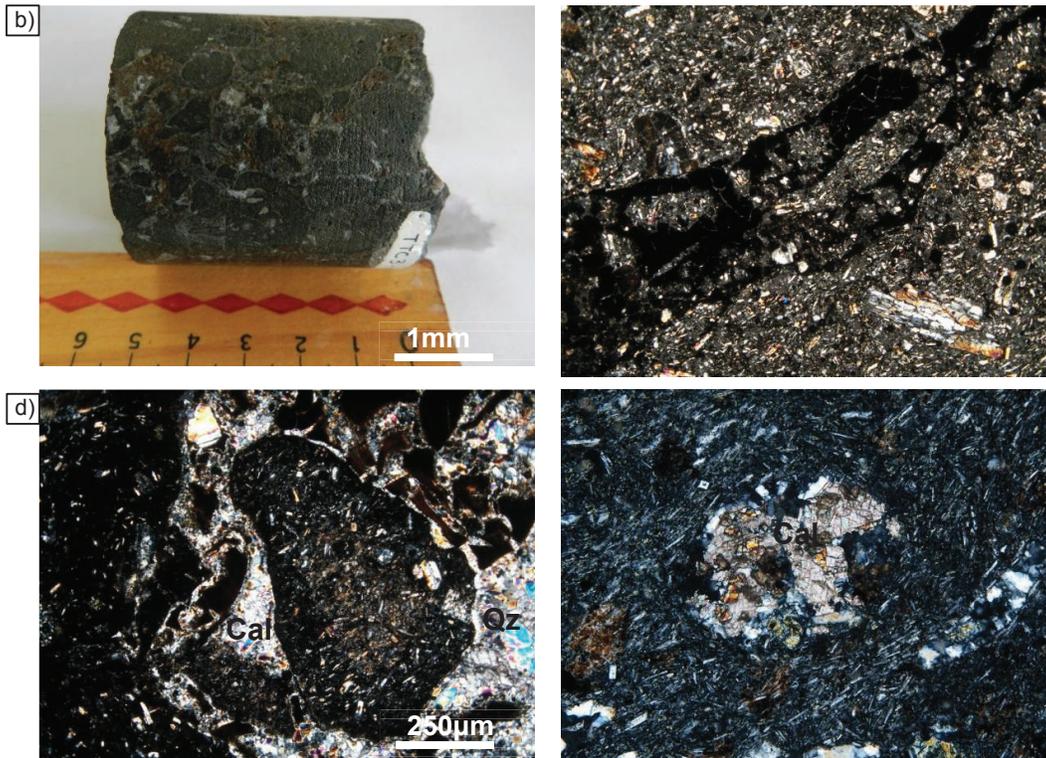


Figura 3.13: a) Muestra TTC-3-177: Muestra de la autobrecha de techo del flujo de andesita porfirítica. b) FNX de la muestra TTC-3-177: Se observa la matriz hipocristalina formada por vidrio y microlitos de plagioclasa orientados sub-parallelamente entre sí. Atravesados por vetillas irregulares de sílice y óxidos. c) FNX de la muestra TTC-3-177: la roca es fracturada debido a la brechificación de la roca y los espacios vacíos son posteriormente rellenos por calcita y cuarzo. d) FNX de la muestra TTC-3-204: se observa la matriz de la roca formada principalmente por vidrio y microlitos de plagioclasa, que envuelven los fenocristales de plagioclasa que también están reemplazados totalmente por calcita.

- **Resumen**

La autobrecha del flujo se encuentra silicificada, ya que constituye una roca más permeable, permitiendo la fácil circulación de fluidos ricos en sílice.

La composición de este flujo de lava enriquecida en plagioclasa cálcica y piroxeno, es evidencia una realimentación de magma básico, que posiblemente se asocia al inicio de un ciclo de diferenciación magmática.

A la base del flujo se encuentra un contacto disconforme con una secuencia clástica de brechas. Además, en los primeros centímetros del techo de la brecha se observa un contacto “quemado”, debido al contraste térmico.

3.2.2.6 Brecha polimíctica (205.46-209.76 m)

Esta unidad tiene un espesor de 4.3 m y está comprendida entre las cotas 3544.44-3540.14 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica se tomaron en cuenta las muestras TTC-3-205 Y TTC-3-209.

Estas brechas presentan textura psefítica con matriz psamítica pelítica. Compuestas de 30% de fragmentos subangulosos a subredondeados de:

a) **20% (RA) Toba con fragmentos de vidrio:** Fragmentos de 16 a 2.5mm.

Es una toba gruesa y está compuesta de:

- o 50% de fragmentos de vidrio, alterados levemente a arcilla
- o 30% de pasta de ceniza
- o 18% de plagioclasa, parcialmente alterada a arcilla y reemplazadas por calcita
- o 2% de anfíbol alterados totalmente a clorita.

La roca tiene poros rellenos de arcilla, clorita y calcita.

b) **4% (RA) Andesita afanítica:** Fragmentos de 6 a 2 mm, compuestos de:

- o 39% de plagioclasa levemente reemplazadas por calcita;
- o 1% de piroxeno, alterados totalmente a clorita;

- o 60% de vidrio

Presentan 1% de hematita en forma de pátinas en la matriz.

- c) **3% (RA) Andesita afanítica:** Son fragmentos de tamaño de 7 a 2 mm, compuestos de:

- o 50% de plagioclasa reemplazadas parcialmente por calcita
- o 5% de piroxeno alterados totalmente a clorita y reemplazados por calcita.
- o 44% de vidrio
- o 1% óxidos

- d) **3% (RA) Toba gruesa:** Son fragmentos de 3mm, están compuestos de:

- o 40% de fragmentos de vidrio
- o 5% de piroxeno totalmente alterados a clorita
- o 27% de pasta de ceniza fina alterada a arcilla
- o 28% de plagioclasa reemplazadas totalmente por calcita

La roca presenta concentración de hematita en forma de pátinas (1%) principalmente en los fragmentos de vidrio.

La matriz de las brechas constituye el 70% de la roca y está formada por ceniza alterada a arcilla (26%), vitroclastos (10%), fragmentos de cristales y rocas de tamaño $\leq 2\text{mm}$ de: plagioclasa (25%), piroxeno (3%), óxidos (1%), andesita afanítica (4%) y andesita afanítica con pátinas de hematita (1%).

• Litofacies

La roca es masiva, matriz soportada y pobremente sorteada.

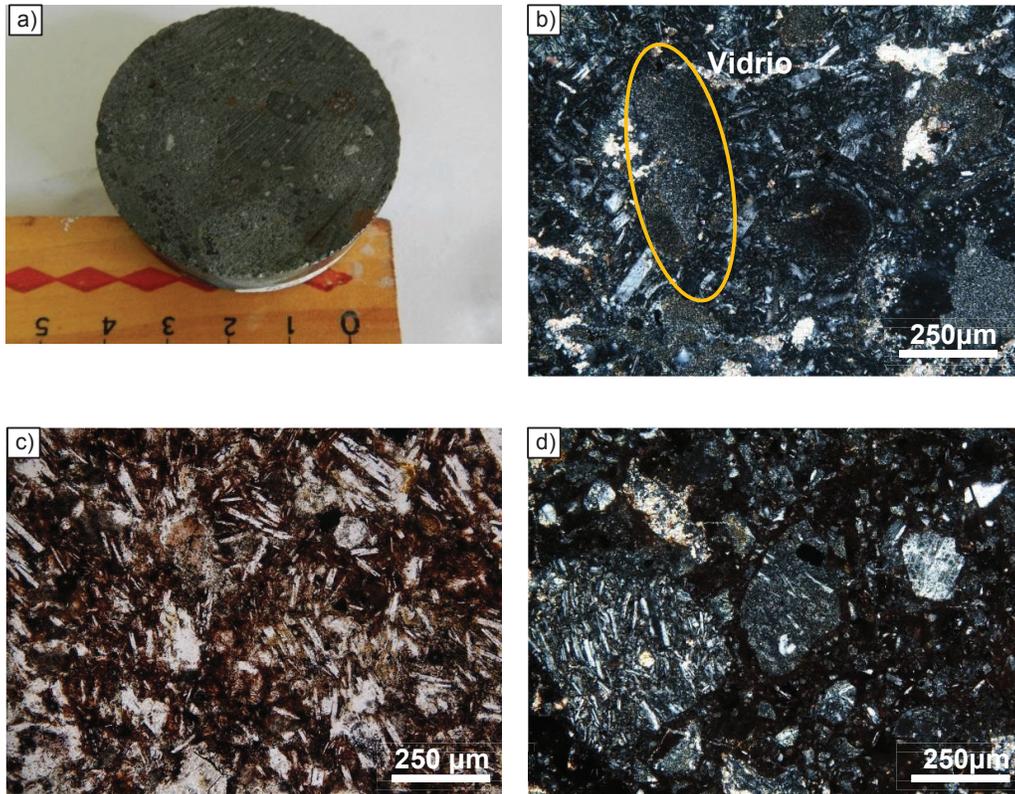


Figura 3.14: **a)** Muestra TTC-3-205: Muestra de brecha polimíctica matriz soportada y pobremente sorteada. **b)** FNX de la muestra TTC-3-205: Fragmento de toba, formado por pasta de ceniza con fragmentos de vidrio alterados levemente a arcilla y fragmentos de plagioclasa. **c)** FSNX de la muestra TTC-3-209: Fragmento de andesita afanítica con pátinas de hematita, compuesta principalmente de vidrio y microlitos de plagioclasa. La roca ha sido pintada por hematita. **d)** FNX de la muestra TTC-3-209: se observa la matriz de la roca formada principalmente por arcilla, que envuelven los fragmentos de plagioclasa, andesita afanítica y tobas.

- **Resumen**

Esta secuencia de brechas constituye un depósito detrítico local, posiblemente de origen coluvial, formado por fragmentos subangulosos a subredondeados de distintas litologías (tobas y andesitas afaníticas).

El contacto basal de la secuencia de brechas con el Flujo 7 es erosional.

La alta permeabilidad de esta brecha ha permitido la circulación de fluidos hidrotermales relacionados a la alteración sub-propilítica.

3.2.2.7 Flujo 7 - Flujo de lava de andesita porfirítica negra (209.76-250 m)

Esta unidad tiene un espesor de 40.24 m (hasta donde llega la perforación) y está comprendido entre las cotas 3540.14- 3499.90 msnm.

● Petrografía

Para la caracterización petrográfica se tomaron en cuenta las muestras TTC-3-223, TTC-3-247 y TTC-3-249.

La roca presenta textura hipocristalina, porfirítica, poikilítica, seriada y masiva con matriz intersertal. Compuesta de 25% de fenocristales:

- o 17% de plagioclasa (An 76 – An 68, bytownita y labradorita), se identificaron 3 tamaños de cristales que representan tres generaciones de cristalización: 1ra (6-3.5mm), 2da (2.5-1mm) y 3ra (0.7 -0.1mm), algunos cristales presentan maclas tipo polisintética y carlsbad, algunos cristales presentan inclusiones de óxidos y piroxeno.
- o 3% de clinopiroxeno (augita), hay dos generaciones de cristales: 1ra (2-1 mm) y 2da (0.6-0.2mm).
- o 2% de ortopiroxeno (hipersteno), hay dos generaciones de cristales: 1ra (4.5-3 mm), 2da (1.5-0.2 mm).
- o 2% de óxidos (magnetita), disseminados en toda la roca.
- o 1% de anfíbol (hornblenda), hay dos generaciones de cristales: 1ra (3.5-2.5 mm), 2da (0.7-0.2 mm).

La matriz representa el 75% de la roca y está formada por:

- o 38% de plagioclasa con disposición fluidal
- o 30% de vidrio, color café, ocupando los intersticios entre los microlitos
- o 5% de piroxeno
- o 1% de anfíbol
- o 1% de óxidos

La roca presenta xenolitos de: Diorita con textura fanerítica, ofítica de grano fino, los xenolitos son de tamaño ≤ 6 mm, subredondeados, compuestos por: cristales de plagioclasa intermedia (57%) envueltos entre cristales de clinopiroxeno (diópsido, 15%) y ortopiroxeno (hipersteno, 20%), hornblenda (5%) y óxidos (3%).

- **Litofacies**

Este flujo está formado por una parte masiva en los primeros 27.79 m y a la base por una autobrecha de 12.45 m de espesor.

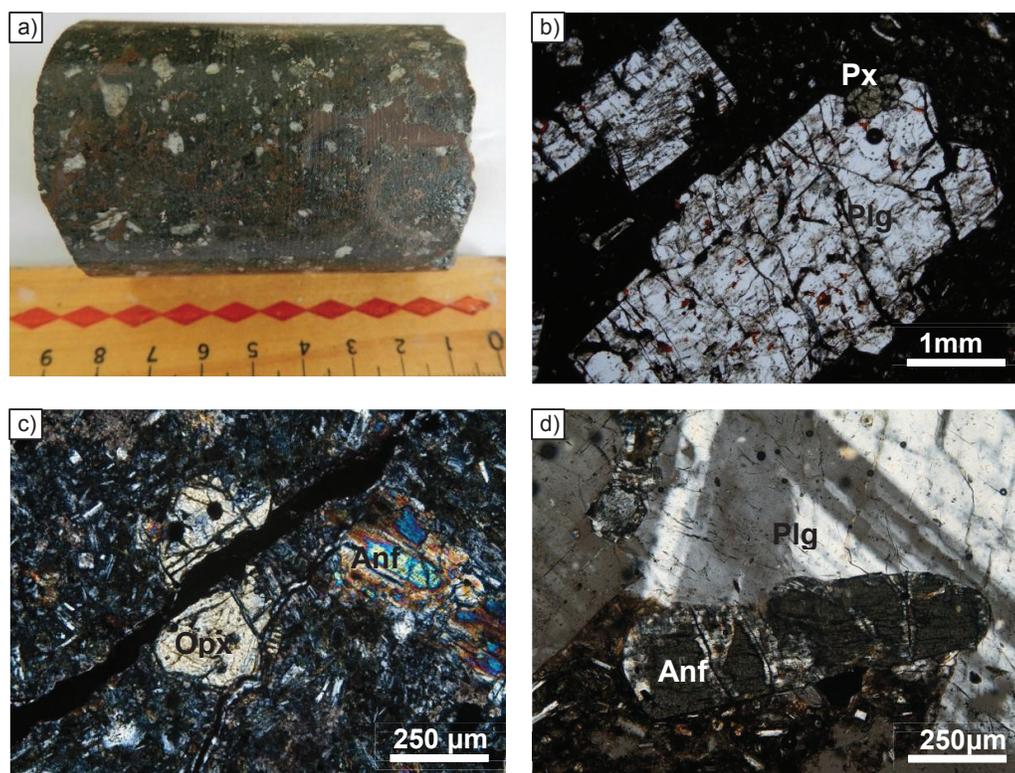


Figura 3.15: a) Muestra TTC-3-247: Muestra de la autobrecha de base del flujo de andesita porfirítica. b) FNX de la muestra TTC-3-223: Fenocristales de plagioclasa fracturados y con inclusiones de piroxeno y óxidos. c) FNX de la muestra TTC-3-247: Fenocristal de hornblenda junto a cristal de ortopiroxeno cortado por vetilla de sílice y hematita. La matriz de la roca es hipocristalina compuesta de vidrio y microlitos de plagioclasa. d) FNX de la muestra TTC-3-249: Fenocristales de plagioclasa que ha crecido alrededor de un xenocristal de anfíbol.

- **Resumen**

Este flujo constituye el fin de esta perforación, sin embargo no se llegó hasta el contacto basal del mismo.

La existencia de ortopiroxeno y hornblenda, así como la presencia de plagioclasa cálcica creciendo alrededor de un xenocristal de anfíbol, son indicativos de la mezcla de magmas, debido a la realimentación de un magma básico.

Hay una zona de falla entre 222 y 226.30 m, evidenciado por planos de falla de alto ángulo (50 a 70°) con estrías y pátinas de calcita.

El resumen de la litoestratigrafía del POZO TTC-3 se encuentra en el subcapítulo 3.2.4.2 (Pág. 156) y el esquema litoestratigráfico de los tres pozos se muestra en la Figura 3.38 (Pág.165)

3.2.3 UNIDADES DEL POZO TTC-9

3.2.3.1 Suelo (0 - 1.50 m)

Formado por limo color café oscuro, es plástico y presenta restos de materia orgánica (p.e., raíces). Se encuentra entre las cotas 4047.13 a 4045.63 msnm.

3.2.3.2 Depósito de morrena (1.50-15.60 m)

El depósito de tipo "till" tiene 14.10 m de espesor y está comprendido entre las cotas 4045.63 y 4031.13 msnm.

- **Petrografía**

Depósito polimíctico, clasto soportado, pobremente sorteado, sin estratificación, de color beige a café claro. Compuesto por 45% de matriz de arena limosa; y presenta 55% de fragmentos subangulosos a subredondeados, con tamaños que varían desde 1cm hasta 40 cm; estos fragmentos de roca corresponden a:

- a. **25% (RA) Dacita afanítica A con alteración a arcilla:** color gris, presenta textura microcristalina formada por plagioclasa, anfíbol, cuarzo y vidrio totalmente alterado a arcillas,
- b. **15% (RF) Dacita afanítica B:** color rosáceo, presenta textura criptocristalina, formada por vidrio y se evidencian muy pocos cristales de plagioclasa, anfíbol, biotita y cuarzo. La roca tiene litofacies laminada y los cristales se encuentran orientados paralelamente entre sí.
- c. **10% (RF) Dacita afanítica C:** color gris, presenta textura microcristalina, está formada por vidrio plagioclasa, anfíbol, piroxeno y cuarzo.
- d. **5% (RA) Andesita porfirítica (descrita en la LD TTC-9-15):** color gris oscuro, compuesta de:
 - o 15% de fenocristales: plagioclasa (6%), anfíbol moderadamente alterado a clorita (3%), piroxeno moderadamente alterado a clorita (5%) y óxidos (1%).

- o 85% de matriz microcristalina con vidrio levemente alterado a arcilla, plagioclasa, piroxeno y anfíbol.



Figura 3.16: Depósito de till en contacto erosional a los 15.60 m de profundidad con una brecha polimíctica.

- **Resumen**

Debido a que esta morrena se encuentra a una cota de 4045.63 a 4031.13 msnm y está cubierta por 1.5 m de suelo, se asume que su formación ocurrió durante el Tardiglacial (12-10 ka), cuyo límite altitudinal corresponde a 3800 a 4400 msnm. (Clapperton y Vera, 1986).

La morrena contiene fragmentos de rocas frescas y alteradas, que estuvieron expuestas a la erosión glacial y fueron incluidas en la morrena a medida que el glaciar avanzaba.

Los fragmentos son principalmente dacitas afaníticas y en menor cantidad son andesitas porfíricas. Ninguno de estos fragmentos de rocas fue encontrado en los depósitos de morrena de los pozos TTC-2 y TTC-3, ni en la secuencia de brechas subyacentes.

Se encuentra en contacto erosional con la brecha polimíctica subyacente.

3.2.3.3 Brecha polimíctica estratificada (15.60-25.40 m)

Esta unidad tiene una potencia de 9.80 m, y está comprendida entre las cotas 4031.53-4021.73 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de esta unidad, se tomó en cuenta las muestras TTC-9-18, TTC-9-21 y TTC-9-25.

La brecha presenta textura psefítica con matriz psamítica-pelítica. Están formadas por aproximadamente 40% de líticos subangulosos a subredondeados de las siguientes litologías:

a) 15% (RA) Toba con textura eutaxítica (Toba 1): Fragmentos de 5 a 2 mm, presentan textura eutaxítica (fragmentos de pómez y partículas vítreas aplastadas en una matriz de ceniza fina). Compuesta de:

- o 50% de pasta de ceniza, alterado parcialmente a arcilla
- o 48% de fragmentos de pómez, alterados a arcilla
- o 2% de plagioclasa, reemplazadas parcialmente por calcita

b) 7% (RA) Toba andesítica con vitroclastos (Toba 2): Fragmentos de 10 a 2 mm, compuestos de:

- o 56% de pasta de ceniza, alterada totalmente a arcillas
- o 40% de vitroclastos alterados a arcilla y rellenos de calcita
- o 3% de plagioclasa, reemplazadas parcialmente por calcita
- o 1% de piroxeno, alterado totalmente a clorita

c) 5% (RA) Toba fina dacítica (Toba 3): Fragmentos de 7 a 2 mm, compuestos de:

- o 66% de pasta de ceniza, alterada totalmente a arcillas
- o 30% de plagioclasa

- o 3% de piroxeno alterado totalmente a clorita
- o 1% de cuarzo

La roca presenta <1% de vetillas muy finas de calcita

d) 3% (RA) Andesita afanítica con alteración a arcilla (And A1):

Fragmentos de 5 a 2 mm, con textura intersertal fluidal, compuestos de:

- o 7% de plagioclasa
- o 1% de anfíbol alterado totalmente a clorita
- o 92% de vidrio alterado totalmente a arcilla

e) 2% (RA) Toba gruesa andesítica (Toba 4): Fragmentos de 7 a 2 mm, compuestos de:

- o 55% de pasta de ceniza
- o 42% de plagioclasa
- o 2% de piroxeno alterados totalmente a clorita y arcillas
- o 1% de óxidos

La roca tiene 1% de pirita muy fina diseminada.

f) (RA) 2% Andesita básica porfirítica (And P1): Fragmentos de tamaño de 4 a 2 mm, presentan textura porfirítica pilotáxica con matriz intersertal fluidal. Compuesta de 8% de fenocristales de:

- o 6% de plagioclasa (bytownita)
- o 2% de piroxeno, alterados totalmente a clorita

La matriz constituye el 92% de la roca y está formada por:

- o 67% de vidrio
- o 25% de microlitos de plagioclasa

g) 2% (RA) Andesita afanítica (And A2): Fragmentos de 2.5 a 2 mm, tienen textura hipocristalina con matriz intersertal fluidal. Compuesta de:

- o 75% de vidrio
- o 15% de plagioclasa con ligera tonalidad rojiza
- o 5% de piroxeno alterado totalmente a clorita
- o 3% de anfíbol alterado totalmente a clorita
- o 2% de óxidos

h) 2% (RA) Toba eutaxítica con pátinas de hematita (Toba 5): Fragmentos de 8 a 6 mm, compuestos de:

- o 50% de pasta de ceniza
- o 40% de fragmentos de vidrio, alterados a arcilla
- o 10% de plagioclasa

La roca presenta 1% de hematita en forma de pátinas.

i) 2% (RA) Toba andesítica con clorita, hematita y sílice (Toba 6): Fragmentos de 25mm, presentan textura cinerítica. Compuesta de:

- o 90% de pasta de ceniza, alterada totalmente a arcillas
- o 5% de piroxeno
- o 4% de plagioclasa
- o 1% de óxidos

La matriz de las brechas representa aproximadamente el 60% de la roca y está formada por ceniza alterada a arcilla (16%) y fragmentos de rocas y cristales (44%) de tamaño ≤ 2 mm de: plagioclasa, piroxeno, cuarzo, anfíbol, tobas, andesitas porfíricas, andesitas afaníticas y óxidos.

- **Litofacies**

La brecha de esta unidad presenta estratificación muy gruesa (>100 cm), con gradación inversa desde arenisca gruesa (con granos de tamaño de ~2 mm) a brecha pebble (con fragmentos de 6-64 mm), matriz soportada, pobremente sorteada.

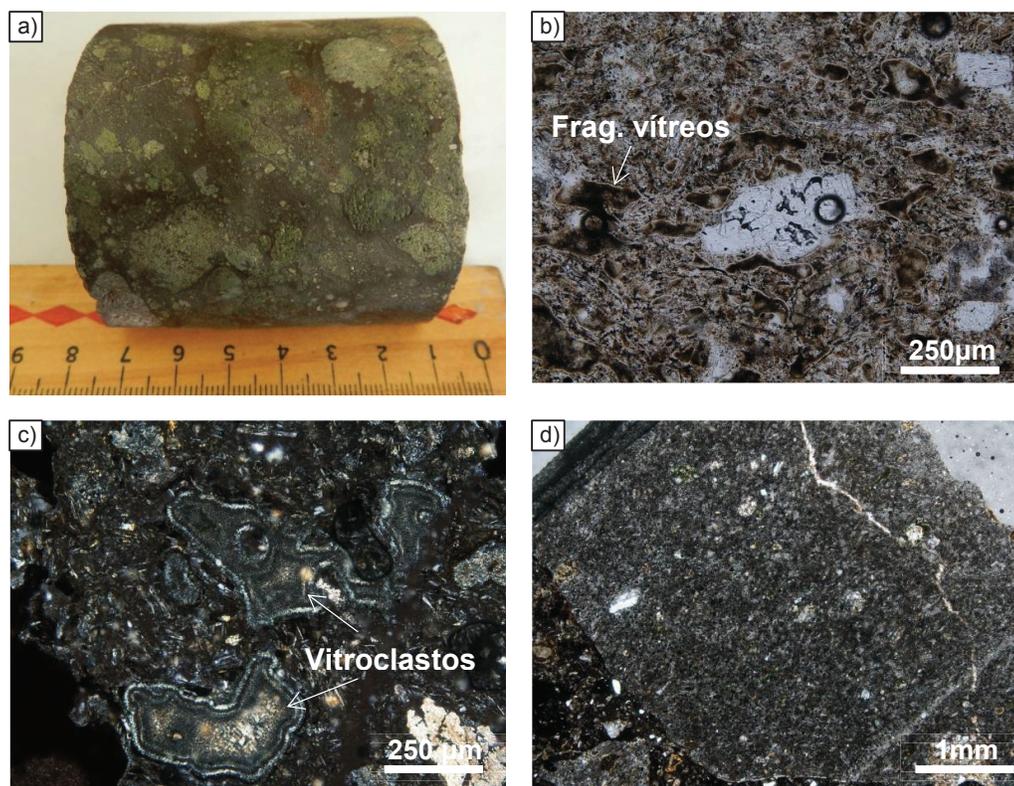


Figura 3.17: **a)** Muestra TTC-9-21: Brecha polimíctica, matriz soportada formada de ceniza alterada totalmente a arcilla. **b)** FNX de la muestra TTC-9-21: Fragmento de Toba 1- toba andesítica con textura eutaxítica (fragmentos vítreos aplastados alterados a arcilla). **c)** FNX de la muestra TTC-9-25: Toba andesítica con vitroclastos (Toba 2) con bordes de cuarzo, alterados a arcilla y reemplazados por calcita. **d)** FNX de la muestra TTC-9-18: Fragmento de toba fina dacítica (Toba 3) con vetillas muy finas de calcita.

- **Resumen**

La brecha contiene fragmentos de distintas litologías (Tobas, andesitas afaníticas y porfíricas); los fragmentos And A1, And A2, And P1, Toba 3 y Toba 6 se encuentran presentes en los depósitos de brechas subyacentes. And A2 y And P1

también están presentes en la diatrema (descrita en este mismo pozo, a profundidad entre 129.60 y 576.75 m).

Debido a la abundante cantidad de matriz (60%) formada por ceniza alterada a arcilla y fragmentos de roca pulverizada (≤ 2 mm) de la misma litología de los clastos que componen la brecha; se interpreta que esta brecha y con toda la secuencia de brechas y tobas entre 15.60 y 129.60 m, constituyen la expresión superficial de la diatrema (maar) y se producen por una erupción explosiva (freatomagmática) donde hay alta fragmentación del magma y de las rocas circundantes.

El contacto basal de esta secuencia es disconforme.

3.2.3.4 (RA) Toba dacítica gruesa (25.40-33.05 m)

Esta unidad tiene una potencia de 7.65 m, y está comprendida entre las cotas 4021.73-4014.08 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de este depósito, se tomó en cuenta la muestra TTC-9-28.

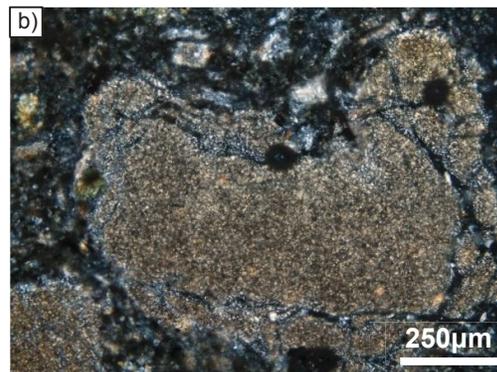
La roca está compuesta de ceniza, cristales y lapilli acrecionario.

- o 34% de plagioclasa (andesina), de tamaño de 4 a 0.1 mm, los cristales se encuentran fracturados (fracturas en forma de cola de golondrina), además presentan formas cuspidas y están levemente reemplazadas por calcita.
- o 30% de pasta de ceniza, se encuentra totalmente alterada a arcillas.
- o 23% de lapilli acrecionario (agregados redondeados de ceniza, de tamaño de lapilli, comúnmente exhiben una estructura concéntrica (J.G.Moore y Peck, 1962). Se cree que se forman por la acreción de ceniza fina alrededor de un núcleo, gotas de agua o partículas sólidas (R.A.F. Cas y

J.V.Wright, 1988). Se forman frecuentemente en una columna rica en vapor de una erupción freática y freatomagmática (Self y Sparks, 1978)), tienen forma subredondeada. Se encuentran totalmente alterados a arcilla y algunos presentan bordes de cuarzo secundario finogranular.

- o 5% de anfíbol, de tamaño de 3 a 0.5 mm, tienen forma subhedral y se encuentran totalmente alterados a clorita.
- o 4% de piroxeno, de tamaño ≤ 0.2 mm, tienen forma subhedral a anhedral y se encuentran totalmente alterados a clorita.
- o 3% de cuarzo, de tamaño de 0.7 a ≤ 0.1 mm, tienen forma subhedral a anhedral.
- o 1% de óxidos, de tamaño ≤ 0.2 mm, se encuentran diseminados en toda la roca.

- **Litofacies:** Masiva



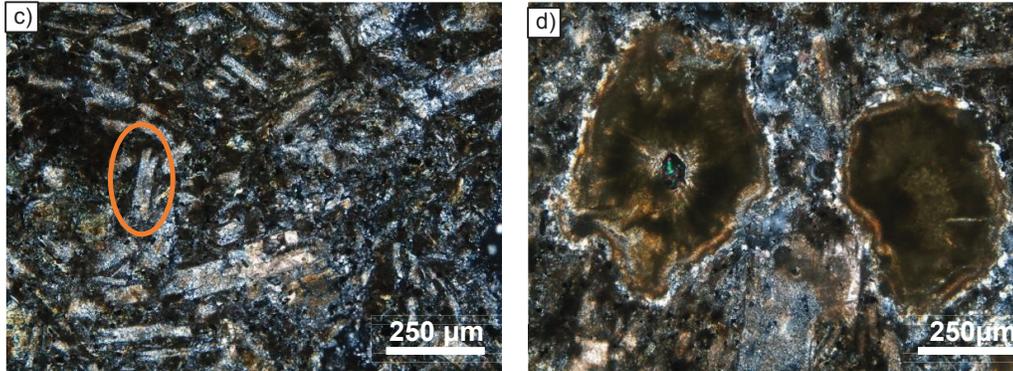


Figura 3.18: **a)** Muestra TTC-9-28: Toba gruesa formada por pasta de ceniza alterada a arcilla y fragmentos de cristales de plagioclasa con formas cuspidas. **b)** FNX TTC-9-28: Lapilli acrecionario parcialmente alterado a arcilla. **c)** FNX TTC-9-28: fragmentos y cristales de plagioclasa envueltos en una pasta de ceniza. Se observa una fractura en el cristal de plagioclasa en forma de cola de golondrina. **d)** FNX TTC-9-28: Lapilli acrecionario totalmente alterado a arcilla y con bordes de cuarzo finogranular.

- **Resumen**

Este paquete volcanoclástico es interpretado como un depósito derivado de una erupción explosiva. Evidencia de esto es la presencia de plagioclasas con formas cuspidas y con fracturas en forma de cola de golondrina, envueltos en una matriz de ceniza, lo que evidencia un alto grado de fragmentación, típico de erupciones explosivas que son capaces de generar abundante cantidad de piroclastos, desde ceniza fina hasta bloques de muy pocos metros (McPhie, 1993). Además la presencia de lapilli acrecionario el cual es común en una amplia variedad de depósitos piroclásticos primarios, especialmente formados en erupciones freatomagmáticas (McPhie, 1993).

El depósito es moderadamente sorteado y está afectado por alteración propilítica. En este depósito el contacto basal es disconforme.

3.2.3.5 Brecha polimíctica masiva (33.05-47.70 m)

Esta unidad tiene una potencia de 14.65 m, y está comprendida entre las cotas 4014.08-3999.43 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de esta secuencia de brechas, se tomó en cuenta la muestra TTC-9-42.

La roca presenta textura psefítica con matriz psamítica-pelítica. Se encontró 50% de fragmentos subangulosos a subredondeados de las siguientes litologías:

- a) **18% (RA) Toba eutaxítica con pasta de óxido rojizo (Toba 7):** De tamaño de 20 a 8 mm, tienen textura eutaxítica (fragmentos vítreos aplastados) y está compuesta de:
 - o 43% de pasta de ceniza con coloración rojiza
 - o 35% de fragmentos de pómez moderadamente aplastados, alterados totalmente a esmectita.
 - o 15% de fragmentos de vidrio, alterado totalmente a esmectita.
 - o 7% de fragmentos de plagioclasa

- b) **11% (RA) Andesita afanítica con alteración a arcilla (And A1):** De tamaño de 6 a 2 mm, presentan textura hipocristalina intersertal fluidal y está compuesta de:
 - o 92% de vidrio intersertal, totalmente alterado a esmectita.
 - o 7% de plagioclasa
 - o 1% de anfíbol, totalmente alterados a clorita

- c) **7% (RA) Andesita porfirítica básica (And P1):** De tamaño de 8 a 2 mm, presenta textura porfirítica pilotáxica con matriz intersertal fluidal y está compuesta de 8% de fenocristales de:

- o 6% de plagioclasa (bytownita)
- o 2% de piroxeno, alterados totalmente a clorita

La matriz de la roca representa el 92% y está formada por:

- o 67% de vidrio intersertal
- o 25% de microlitos de plagioclasa

d) 6% (RA) Toba andesítica con alteración a clorita y sílice (Toba 6): De tamaño de 25 mm y está compuesta de:

- o 90% de pasta de ceniza, totalmente alterada a esmectita
- o 4% de fragmentos de plagioclasa, reemplazados parcialmente por calcita.
- o 5% de piroxeno alterados completamente a clorita
- o 1% de óxidos, diseminados en toda la roca

e) 3% (RA) Toba fina dacítica (Toba 3): De tamaño de 3 a 2 mm y está compuesta de:

- o 66% de pasta de ceniza alterada totalmente a esmectita
- o 30% de plagioclasa
- o 3% de piroxeno, alterado totalmente a clorita
- o 1% de cuarzo

f) 5% Andesita afanítica (And A2): De tamaño de 2.5 a 2 mm, tienen textura hipocristalina con matriz intersertal fluidal. Compuesta de:

- o 75% de vidrio
- o 15% de plagioclasa con ligera tonalidad rojiza
- o 5% de piroxeno alterado totalmente a clorita
- o 3% de anfíbol alterado totalmente a clorita

- o 2% de óxidos

La matriz de la brecha representa el 50% de la roca y está formada por ceniza alterada a arcilla (25%), fragmentos de cristales y rocas de tamaño ≤ 2 mm, de: plagioclasa con formas cuspidadas (17%), piroxeno (2%), óxidos (2%), And A1 (1%), And P1 (1%), Toba 3 (1%) y And A2 (1%).

- **Litofacies**

La brecha es masiva, matriz soportada y pobremente sorteada.

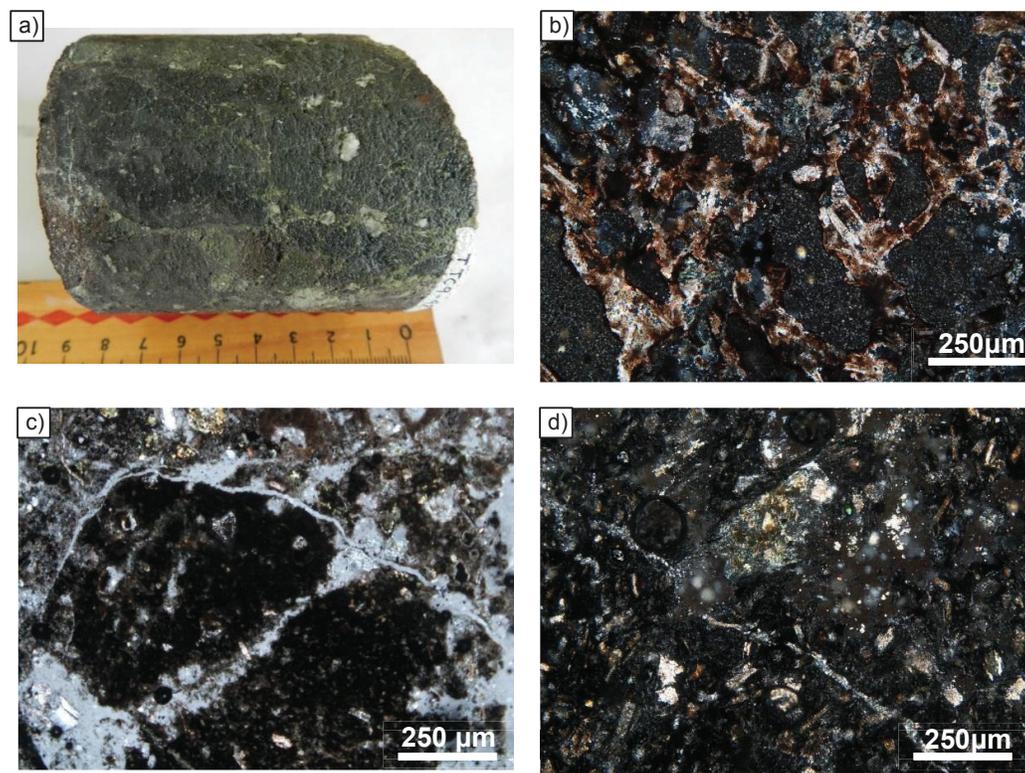


Figura 3.19: a) Muestra TTC-9-42: Brecha polimíctica matriz soportada con fragmentos subangulosos a subredondeados. b) FNX TTC-9-42: fragmentos de toba con textura eutaxítica y pasta de óxido rojizo (Toba 7). c) FSNX de la muestra TTC-9-42: fragmento de andesita afanítica con alteración a arcilla (And A1). d) FSNX de la muestra TTC-9-42: Fragmento de andesita porfirítica básica (And P1).

- **Resumen**

Esta brecha está formada por fragmentos de rocas (And A1, And A2, And P1, Toba 3 y Toba 6) que también están presentes en la brecha de 15.60 a 25.40 m. Además, los fragmentos And P1 y And A2 se encuentran dentro de la diatrema. Los clastos son subangulosos a subredondeados y tienen diferentes intensidades de alteración hidrotermal.

Se interpreta como un depósito derivado de una erupción explosiva (freatomágmatica), evidencia de esto es la presencia de plagioclasas con formas cuspidas, envueltos en una matriz de abundante ceniza (50%), resultado de un alto grado de fragmentación.

La brecha presenta alta permeabilidad lo que permitió el paso de fluidos hidrotermales que provocan que la roca esté alterada propilíticamente.

El contacto inferior de esta brecha es fallado de alto ángulo, y está cortado por un dique, que por el contraste térmico genera una zona quemada de ~1 m en la brecha (contacto “cocinado”).

Toda esta brecha presenta fallas de alto ángulo (55 – 60°) de cinemática normal con componente transcurrente.

3.2.3.6 (RA) Dique 1 - Andesita ácida porfirítica (47.70-64.05 m)

Esta unidad tiene una potencia de 16.35 m, y está comprendido entre las cotas 3999.03-3983.08 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de este flujo, se tomó en cuenta la muestra TTC-9-63.

La roca presenta textura hipocristalina, porfirítica y poikilítica con matriz intersertal; compuesta de 17% de fenocristales:

- 10% de plagioclasa, se identificaron tres tamaños de cristales que representan tres generaciones de cristalización: 1ra (6-3 mm), 2da (0.9-0.3 mm) y 3ra (0.3-0.1 mm). Los cristales presentan macla polisintética y la mayoría se encuentran muy fracturados debido al tectonismo.
- 4% de piroxenos, con tamaños desde 3-0.15 mm, forma subhedral, tienen inclusiones de óxidos.
- 2% de anfíbol, con tamaños desde 2.5-0.5 mm, forma subhedral alargados, presentan inclusiones de óxidos.
- <1% de biotita, el tamaño varía desde 0.25 a 0.1 mm, presentan forma subhedral, tienen inclusiones de óxidos.
- <<1% de óxidos, en forma de agregados, color negro, diseminados en la roca.

La matriz de la roca representa el 83% y está formada por:

- 40% de vidrio coloro café e isotrópico, ocupa los intersticios de la roca
- 39% de plagioclasa, orientadas subparalelamente entre sí
- 2% de piroxeno
- 2% de anfíbol

- **Litofacies Masiva**

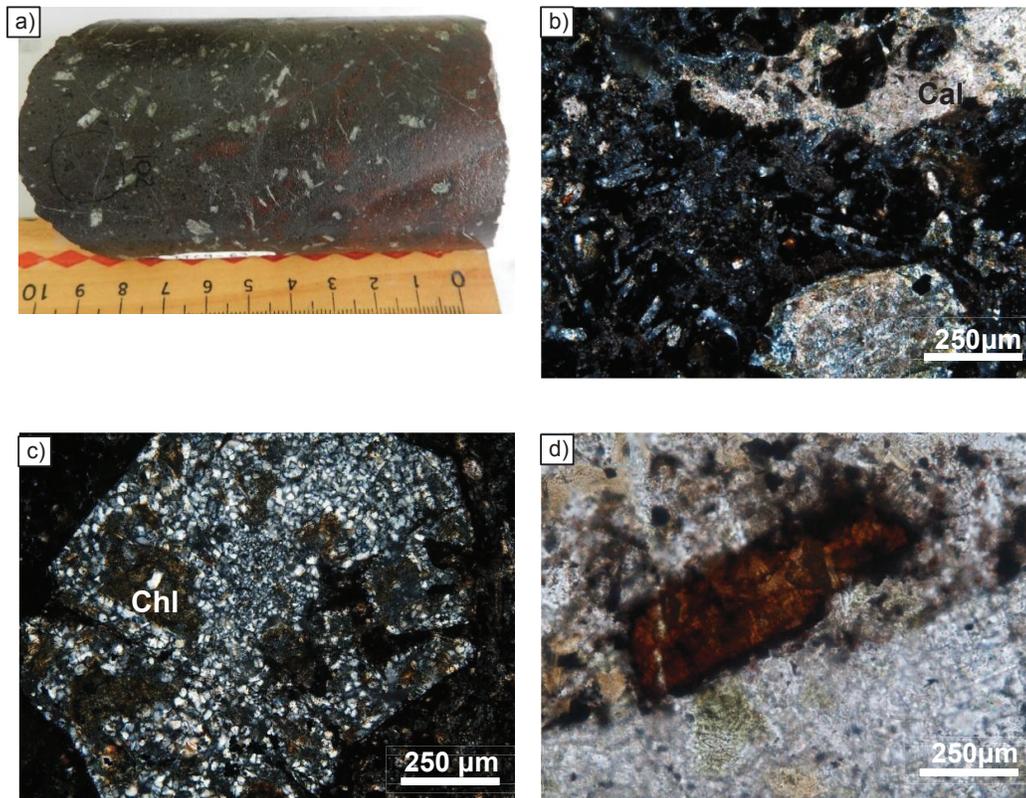


Figura 3.20: a) Muestra TTC-9-63: Muestra de flujo de andesita porfírica ácida. b) FNX en la que se observan fenocristales de plagioclasa reemplazados totalmente por calcita y una matriz hipocristalina de vidrio y microlitos de plagioclasa. c) FNX de cristal de piroxeno alterado a clorita y reemplazado por cuarzo. d) FSNX de cristal de biotita con bordes de óxidos.

• Resumen

Esta andesita ácida corresponde a una intrusión tipo dique (cuerpo tabular intrusivo, producido cuando el magma es inyectado forzosamente dentro de una fractura o zona de debilidad (Lutgens, 2012)). La evidencia es la presencia de cristales alineados subparalelamente entre sí, márgenes de enfriamiento en el dique y zonas quemadas en la roca caja.

El contacto del dique con la brecha suprayacente (hanging wall) es de alto ángulo, claramente definido por una zona de falla y genera una zona quemada de ~1 m en la brecha. Mientras que el contacto del dique con la brecha subyacente (footwall) está definido por un borde de enfriamiento de ~20 cm de espesor en la andesita ácida, evidenciado por el cambio en la coloración de la roca, de gris

oscuro a gris claro; además también generó una zona quemada de ~2.5 m en la brecha.

La zona de falla de 33 a 66 m probablemente favoreció la intrusión del Dique 1.

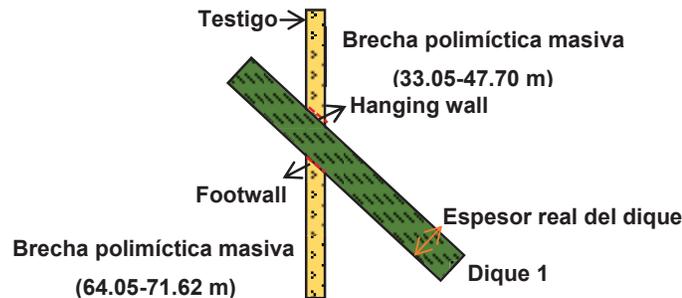


Figura 3.21: Ilustración de dique 1 cortando las brechas supra y subyacentes.

3.2.3.7 Brecha polimíctica masiva (64.05-71.62 m)

Esta unidad tiene 7.57 m de potencia y está comprendida entre las cotas 3983.08-3975.51 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de esta secuencia de brechas, se tomó en cuenta las muestras TTC-9-66 y TTC-9-70.

Las rocas presentan textura psefítica con matriz psamítica-pelítica. Se encontró aproximadamente 40% de fragmentos angulosos a subredondeados de las siguientes litologías:

- (RA) 35% Toba con fragmentos de pómez (Toba 8):** Fragmentos de tamaño de 50 a 2 mm, compuestos de:
 - o 85% de pasta de ceniza, alterada totalmente a arcillas
 - o 5% de plagioclasa, con fracturas tipo cola de golondrina, reemplazadas parcialmente por calcita.
 - o 5% de fragmentos de pómez alterados totalmente a arcilla

- o 3% de piroxeno, alterados totalmente a clorita
- o 2% de anfíbol, alterados totalmente a clorita

b) 5% (RA) Toba eutaxítica con pasta de óxido rojizo (Toba 7): De tamaño de 8 a 3 mm, con textura eutaxítica (fragmentos vítreos aplastados). Y está compuesta de:

- o 35% de fragmentos de pómez aplastados
- o 43% de pasta de ceniza, alterada totalmente a arcilla
- o 15% de fragmentos de vidrio alterados a arcilla
- o 7% de fragmentos de plagioclasa

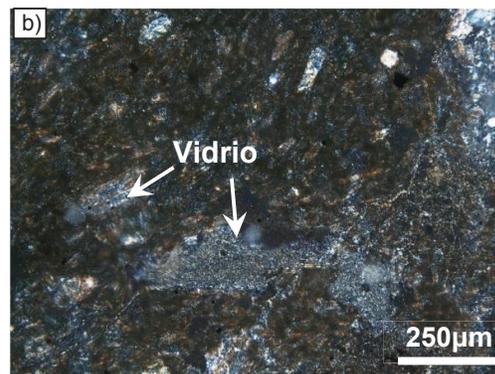
La matriz de la brecha constituye el 60% de la roca y está formada por ceniza alterada totalmente a arcilla (36%) y fragmentos de cristales y rocas de tamaño ≤ 2 mm de: plagioclasa con formas cuspidadas (8%), toba con fragmentos de pómez (5%), toba eutaxítica con pasta de óxido rojizo (5%), piroxeno (5%) y óxidos (1%).

- **Litofacies** La roca es masiva, matriz soportada y pobremente sorteada.

a)



b)



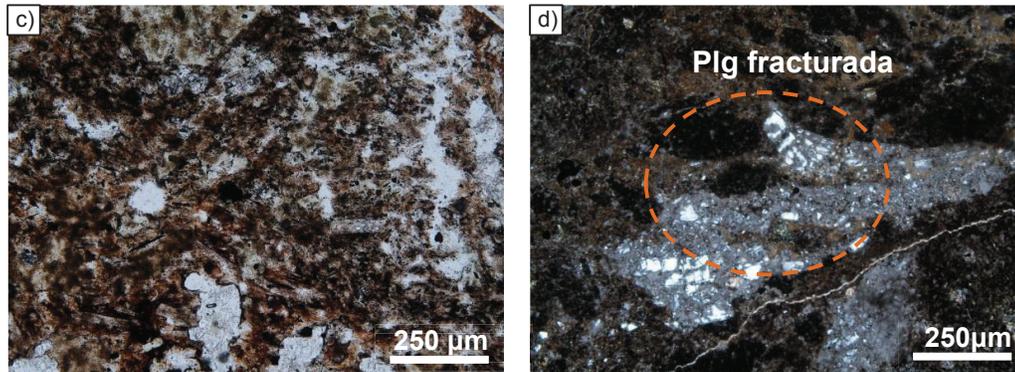


Figura 3.22: a) Muestra TTC-9-66: Muestra de brecha polimíctica matriz soportada con fragmentos angulosos a subredondeados. b) FNX de la muestra TTC-9-66, de toba con fragmentos de vidrio en la muestra. c) FSNX de la muestra TTC-9-70, de fragmento de toba con pasta de óxido rojizo. d) FNX de la muestra TTC-9-66, de fragmento de plagioclasa fracturado en forma de cola de golondrina.

- **Resumen**

La brecha es masiva, está formada por fragmentos angulares a subredondeados de fragmentos de toba con diferentes intensidades de alteración hidrotermal.

Los fragmentos de la Toba 7 también se encuentran en la brecha de 33.05 a 47.70 m.

La presencia de plagioclasas con formas cuspidas y con fracturas en cola de golondrina, envueltos en una matriz abundante de ceniza (60%), son el resultado de un alto grado de fragmentación producto de una erupción explosiva freatomagmática.

Esta brecha se encuentra cortada al tope por el Dique 1, que generó una zona quemada de ~2.5 m en la brecha.

Hay una zona de falla de 64.05 a 66.30 m, con cinemática normal de alto ángulo (50-60°).

El contacto basal de esta brecha con el flujo de andesita ácida porfirítica es fallado de bajo ángulo con componente transcurrente.

3.2.3.8 Flujo 8 - Flujo de lava de andesita ácida porfirítica (71.62-97.53 m)

Esta unidad tiene 25.91 m de potencia y está comprendida entre las cotas 3975.51-3949.60 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de este flujo, se tomó en cuenta la muestra TTC-9-72 y TTC-9-76.

La roca presenta textura hipocristalina, porfirítica, orientada y poikilítica con matriz intersertal. Compuesta de 16% de fenocristales:

- o 10% de plagioclasa (An 66, labradorita), se identificaron dos tamaños de cristales que representan dos generaciones de cristalización: 1ra (6-1 mm) y 2da (0.6-0.1 mm). Algunos de los cristales presentan macla polisintética, carlsbad y sin maclas, presentan inclusiones de óxidos y la mayoría de los cristales se encuentran fracturados.
- o 3% de piroxeno, con tamaños desde 0.9-0.05 mm, forma subhedral, tienen inclusiones de óxidos.
- o 2% de anfíbol, el tamaño varía desde 2-0.2 mm, forma subhedral, presentan inclusiones de óxidos.
- o <1% biotita
- o <1% de óxidos, en forma de agregados, color negro, diseminados en la roca.

La matriz de la roca representa el 84% y está formada por:

- o 50% de vidrio color café, ocupando los intersticios de la roca.
- o 32% de plagioclasa con ligera disposición fluidal.
- o 1% de piroxeno
- o 1% de anfíbol.

- **Litofacies**

La autobrecha superior de este flujo tiene un espesor de 2.28 m (muestra TTC-9-72), su parte masiva es de 15.00 m (muestra TTC-9-76) y la autobrecha de la base es de 8.63 m.

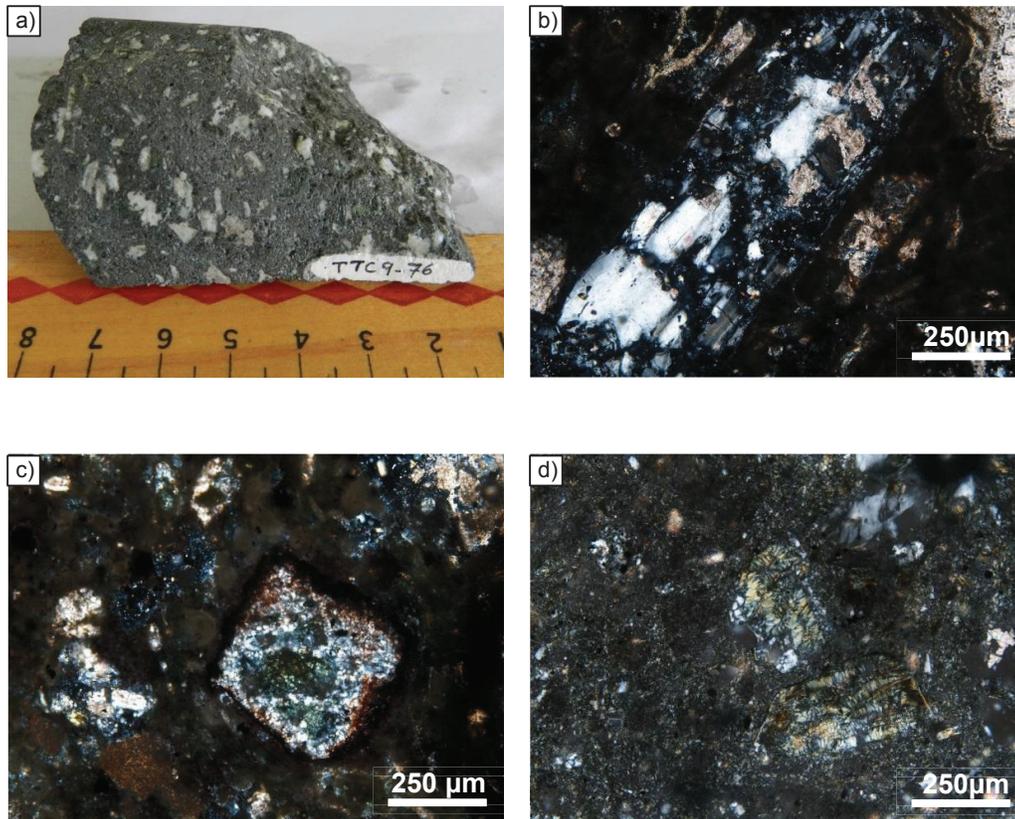


Figura 3.23: a) Muestra TTC-9-76: Muestra de flujo de andesita ácida porfírica. b) FNX de la muestra TTC-9-76 de cristal de plagioclasa fracturado y reemplazado parcialmente por calcita. c) FNX de la muestra TTC-9-76, de cristal de piroxeno alterado a clorita, reemplazado por cuarzo y con corona de óxidos. d) FNX de la muestra TTC-9-72, de cristales de piroxeno alterados totalmente a clorita.

- **Resumen**

La mayoría de fenocristales de este flujo se encuentran fracturados, como resultado del enfriamiento rápido durante su avance y también por la existencia de fallas de bajo ángulo con componente transcurrente, las que también favorecieron

el paso de fluidos hidrotermales calientes, provocando que la roca tenga una moderada intensidad de alteración propilítica.

En la base la roca se encuentra en contacto con una brecha polimíctica fracturada la cual presenta una zona quemada que se produce debido al contraste térmico, generando también un borde de enfriamiento en este flujo.

En el tramo de 80 a 99.53 m se encontraron fallas normales con componente transcurrente de alto ángulo (50 a 60°).

3.2.3.9 Brecha polimíctica masiva hidrotermalizada (97.53-99.75 m)

Esta unidad tiene 2.22 m de espesor y está comprendida entre las cotas 3949.6-3947.38 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de esta unidad, se tomó en cuenta la muestra TTC-9-97.

La brecha de esta unidad presenta textura pefítica con matriz pelítica. Se encontraron dos tipos de fragmentos desde subangulosos a subredondeados, que constituyen el 32% de la roca y son de las siguientes litologías:

- a) **30% (RA)Toba con fragmentos de pómez (Toba 8):** De tamaño de 20 a 2mm, está formada por:
 - o 85% de pasta de ceniza alterada totalmente a arcilla
 - o 5% de plagioclasa, se encuentran fracturadas (fracturas tipo cola de golondrina), están reemplazadas parcialmente por calcita y alteradas a arcilla.
 - o 5% de fragmentos de pómez alterados totalmente a arcilla
 - o 3% de piroxeno alterados totalmente a clorita

- o 2% de anfíbol, alterados totalmente a clorita

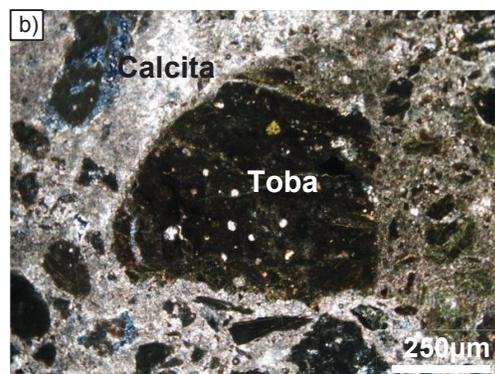
b) 2% (RA) Toba eutaxítica con pasta rojiza (Toba 7): De tamaño de 10 a 3 mm, compuesta de:

- o 63% de pasta de ceniza color rojizo
- o 15% de fragmentos de pómez aplastadas y alteradas totalmente a arcilla
- o 15% de fragmentos de vidrio, alterados parcialmente a arcilla
- o 7% de plagioclasa, reemplazados totalmente por calcita

La matriz de la brecha constituye el 68% de la roca y está formada por: ceniza (61%) la cual es reemplazada por calcita, fragmentos de toba (5%), plagioclasa (1%) y piroxeno alterado totalmente a clorita (1%).

- **Litofacies**

La roca es masiva, matriz soportada y pobremente sorteada, con brechificación hidrotermal posterior.



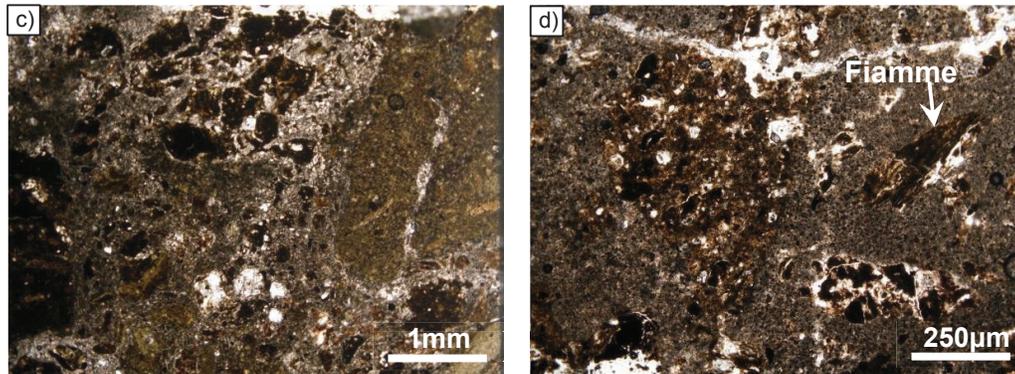


Figura 3.24: a) Muestra TTC-9-97: Brecha polimíctica hidrotermalizada con vetillas de calcita. b) FNX de fragmentos de toba con a fragmentos de pómez. c) FSNX de fragmentos de toba con fragmentos de pómez. d) FSNX de fragmento de toba eutaxítica con pasta rojiza.

- **Resumen**

Esta unidad presenta los mismos líticos (Toba 7 y Toba 8) de la brecha de 64.05 a 71.62 m.

Esta brecha también es de origen freatomágmatico, evidenciada por la presencia de plagioclasas con fracturas en cola de golondrina, envueltos en una matriz rica en ceniza (68%) producto de un alto grado de fragmentación.

La alta permeabilidad de la brecha favorece el paso de fluidos hidrotermales que fracturan la roca, formando una brecha hidrotermal.

La brecha se encuentra afectada por fallas normales de alto ángulo (50-60°) con componente transcurrente y el contacto basal también se encuentra fallado.

3.2.3.10 (RA) Dique 2 - Andesita ácida porfirítica (99.75-112.20 m)

Esta unidad tiene 12.45 m de potencia y está comprendida entre las cotas 3947.38-3934.93 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica se tomó en cuenta la muestra TTC-9-109.

La roca presenta una textura hipocristalina, porfirítica, traquítica y pilotáxica con matriz criptocristalina intersertal. Los fenocristales representan el 44% de la roca, y están conformados por:

- o 40% plagioclasa (An 49, Andesina), se identificaron tres tamaños de cristales que representan tres generaciones de cristalización: 1ra (6-3.5 mm), 2da (2.5-1.5 mm) y 3ra (0.6-0.2 mm).
- o 3% piroxeno, hay dos generaciones de cristales, 1ra (2.5-1 mm) y 2da (0.5-0.2 mm), se encuentran alterados a clorita.
- o 1% anfíbol de tamaño de 0.9-0.4 mm, alterados a clorita
- o <<1% óxidos (magnetita) de tamaño de 0.5-0.1 mm.

La matriz representa el 56% de la roca y está conformada por:

- o 33% de vidrio
- o 20% de plagioclasa
- o 2% de piroxeno alterados a clorita
- o 1% de óxidos

- **Litofacies**

Dique subvertical de alto ángulo, con cizallamiento de bajo ángulo. Los cristales se encuentran orientados paralelamente en dirección del dique.

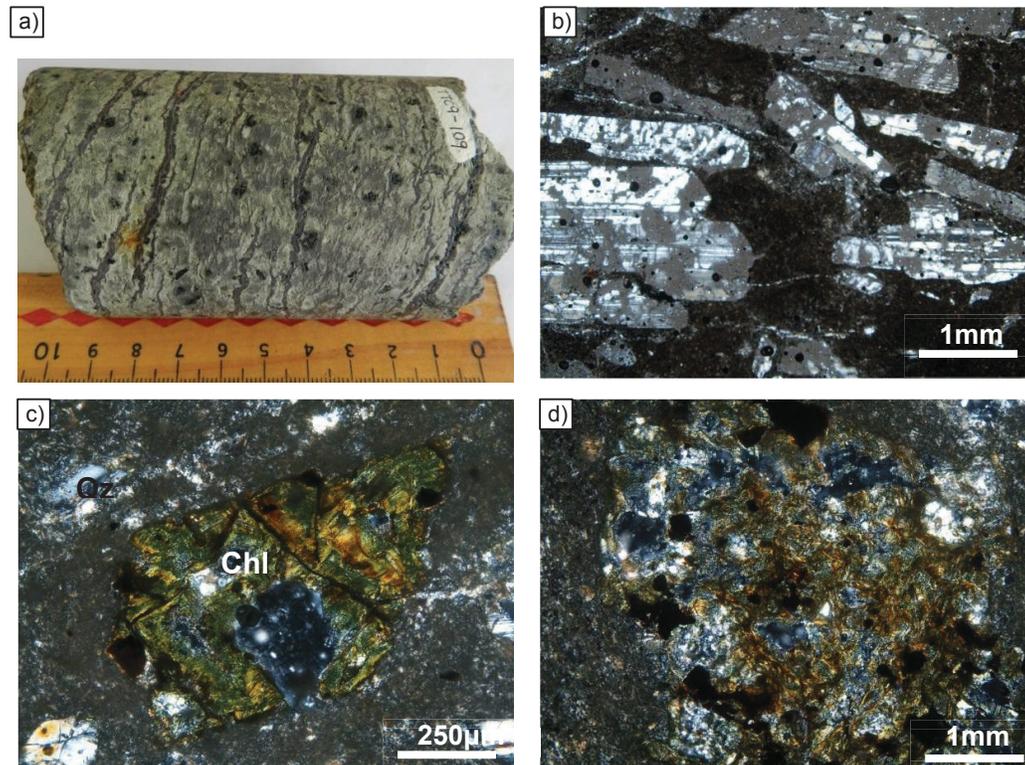


Figura 3.25: a) Muestra TTC-9-109: flujo de andesita ácida porfirítica con vetillas subhorizontales de calcita y óxidos. b) FNX de cristales de plagioclasa orientados paralelamente entre sí, siguiendo la dirección del dique. (Las marcas grises en los cristales son espacios vacíos en la plg que posiblemente eran reemplazamientos de arcilla y fueron evacuados en la realización de la lámina delgada). c) FNX de cristal piroxeno con alteración a clorita. d) FNX de cristal de piroxeno con inclusiones de óxidos, con alteración a clorita y reemplazado por cuarzo.

• Resumen

La andesita ácida corresponde a una intrusión tipo dique, la evidencia es la presencia de cristales alineados paralelamente entre sí, siguiendo la dirección del dique, además el contacto entre la intrusión y la roca caja subyacente se encuentra “cocinado”.

El contacto del dique con la brecha polimictica hidrotermalizada suprayacente (hanging wall) es fallado de alto ángulo y no se evidencia una zona “cocinada”. Mientras que el contacto del dique con la brecha subyacente (footwall) está definido por una zona “cocinada” de ~2 m de espesor en la brecha.

La zona de falla de 80 a 129 m posiblemente favoreció la intrusión del Dique 2.

El fracturamiento de los cristales y la formación de vetillas subhorizontales, es producto del cizallamiento de bajo ángulo.

3.2.3.11 Brecha polimíctica masiva (112.20-120.39 m)

Esta unidad tiene 8.19 m de potencia y está comprendida entre las cotas 3934.93-3926.74 msnm.

- **Petrografía**

Para la descripción petrográfica de esta secuencia, se tomó en cuenta la muestra TTC-9-117. La roca tiene textura psefítica con matriz pelítica. Y está constituida por 30% de fragmentos de rocas y de cristales, desde angulosos a subredondeados de:

- a) **12% (RA) Andesita afanítica (And A3):** De tamaño de 4 a 2 mm, tiene textura hipocristalina con matriz intersertal fluidal, y está compuesta de:
 - o 52% de plagioclasa, con leve reemplazamiento de calcita
 - o 50% de vidrio, alterado parcialmente a arcilla
 - o 2% de piroxeno, alterados totalmente a clorita
 - o <1% de óxidos
- b) **8% (RA) Toba con alteración a esmectita (Toba 9):** De tamaño de 1.8 mm, está compuesta de:
 - o 90% de pasta de ceniza, alterada totalmente a arcilla
 - o 8% de fragmentos de plagioclasa, reemplazadas por calcita
 - o 1% de anfíbol con alteración a clorita
 - o 1% óxidos
- c) **5% (RA) Toba andesítica con pántinas de hematita (Toba 10):** De tamaño de 6 a 2 mm, presenta textura eutaxítica y está compuesta de:
 - o 82% de vidrio alterado a arcilla
 - o 15% de fragmentos de plagioclasa
 - o 2% de fragmentos de pómez alterados totalmente a arcilla

- o <1% de fragmentos de piroxeno alterados a clorita
 - o <1% de hematita en forma de pátinas
- d) 2% (RA) Toba andesítica con fragmentos de pómez (Toba 11):** De tamaño de 7 a 2 mm, presenta textura eutaxítica y está compuesta de:
- o 87% de vidrio alterado a arcilla
 - o 10% de fragmentos de plagioclasa
 - o 2% de fragmentos de pómez alterados a arcilla
 - o 1% de óxidos
- e) 2% fragmentos de anfíbol:** De tamaño de 3 a 2 mm, alterados totalmente a clorita.
- f) 1% Óxidos**

La matriz de la brecha constituye el 70% de la roca y está formada por: ceniza (59%) alterada totalmente a arcilla, piroxeno (7%) alterado totalmente a clorita, plagioclasa (3%) y anfíbol (<1%) alterado totalmente a clorita.

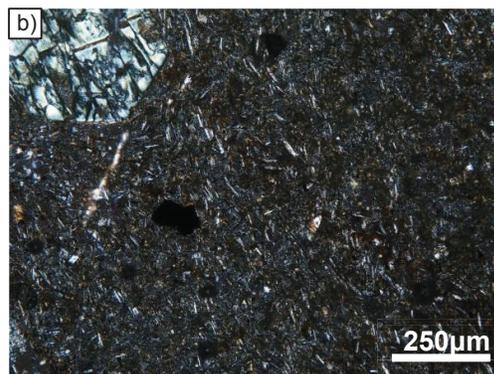
- **Litofacies**

La brecha es masiva, matriz soportada y moderadamente sorteada

a)



b)



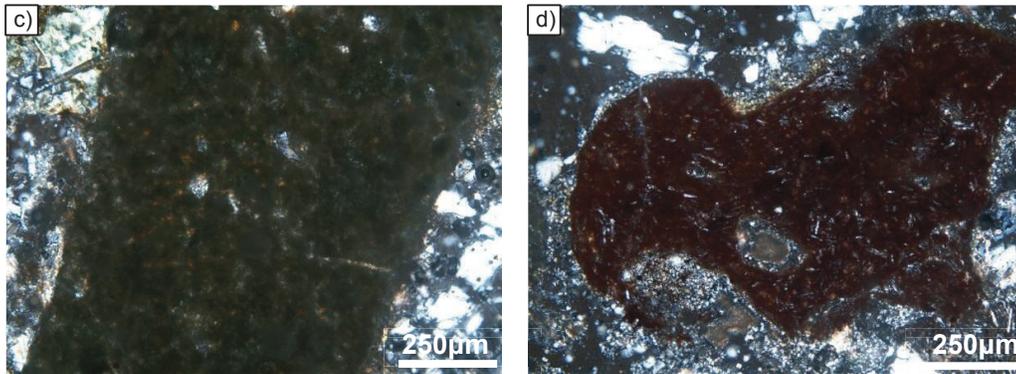


Figura 3.26: a) Muestra TTC-9-117: Brecha polimíctica matriz soportada. b) FNX de fragmento de andesita afanítica. c) FNX de fragmento de toba con alteración a esmectita (Toba 9) d) FNX de fragmento con forma cuspada de toba andesítica con pátinas de hematita.

- **Resumen**

La brecha es masiva, con abundante matriz formada por ceniza alterada a arcilla, presenta líticos con formas cuspadas, lo cual es evidencia de una actividad explosiva. Contiene fragmentos de roca (Toba 9) que también se encontraron en la diatrema.

El contacto basal de esta brecha es fallado de bajo ángulo con componente transcurrente.

En todo el tramo de esta brecha se han encontrado fallas normales de alto ángulo (50-60°).

3.2.3.12 (RA) Toba andesítica ácida (120.39-129.60 m)

Esta unidad tiene 9.21 m de potencia y está comprendida entre las cotas 3926.74-3917.53 msnm.

• Petrografía

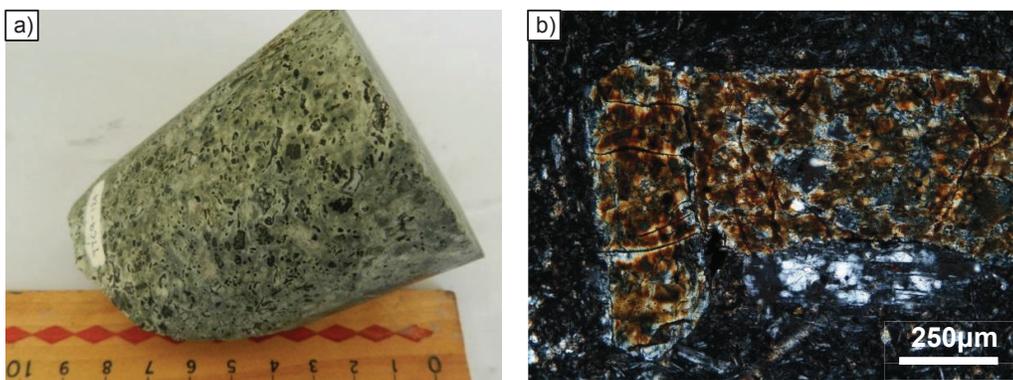
Para la descripción petrográfica de esta unidad, se tomó en cuenta la muestra TTC-9-124. La roca está formada por fragmentos y cristales de:

- 44% Plagioclasa: De tamaño de 7 a 0.1 mm, se encuentran muy fracturados y han sido reemplazados por calcita y alterados a arcilla.
- 30% Pasta de ceniza
- 15% Anfíbol: De tamaño de 2.1 a 0.1 mm, alterados totalmente a clorita
- 10% Piroxeno: De tamaño de 1.5 a 0.1 mm, alterados totalmente a clorita
- 1% Óxidos

La roca presenta cavidades irregulares, de tamaño de 5 a 0.5 mm que han sido rellenadas por calcita y clorita.

• Litofacies

Depósito masivo, moderadamente sorteado.



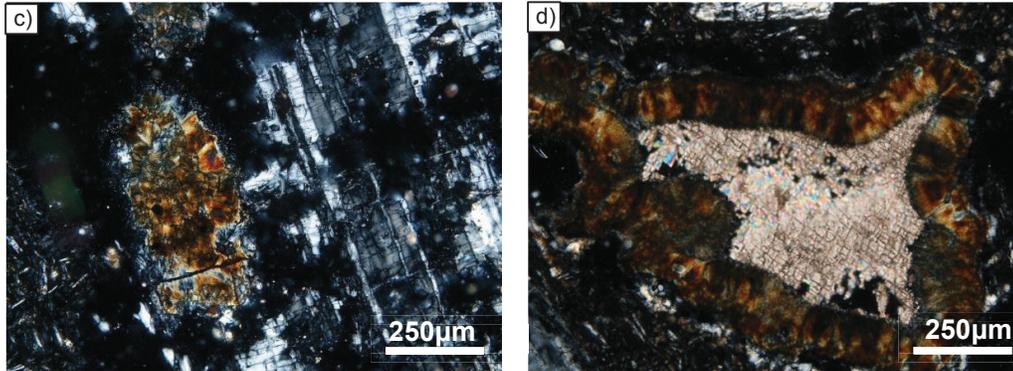


Figura 3.27: a) Muestra TTC-9-124: Toba andesítica ácida b) FNX de cristal de anfíbol completamente alterado a clorita. c) FNX de cristal de plagioclasa muy fracturado junto a cristal de anfíbol alterado a clorita. d) FNX de cavidad rellena de calcita con bordes de arcilla.

- **Resumen**

Este depósito volcanoclástico producto de actividad volcánica de carácter explosivo freatomagmática; evidencia de esto son los cristales envueltos en una matriz de ceniza, la que se genera debido a la alta fragmentación y la presencia de vapor que al condensarse produce lodo.

En todo el tramo de esta toba se han encontrado fallas normales de alto ángulo (50-60°).

En este depósito el contacto basal es concordante “abrupto”.

3.2.3.13 Brecha freatomagmática (Diatrema) (129.60-576.75 m)

Esta unidad tiene 447.15 m de potencia y está comprendida entre las cotas 3917.53-3470.38 msnm.

- **Petrografía**

Para la caracterización petrográfica de esta secuencia de brechas se tomaron en cuenta 88 muestras de mano (Ver Anexo No. 1) y 18 muestras en láminas delgadas: TTC-9-131, TTC-9-211, TTC-9-309, TTC-9-315, TTC-9-331, TTC-9-346, TTC-9-347, TTC-9-352, TTC-9-374, TTC-9-403, TTC-9-423, TTC-9-438, TTC-9-466, TTC-9-513, TTC-9-521, TTC-9-530, TTC-9-533 y TTC-9-566.

Los fragmentos encontrados en la diatrema se describen a continuación e incluyen:

- Juveniles
- Pórfidos (cuerpos intrusivos subvolcánicos)
- Intrusivos faneríticos (diorita)
- Volcánicos
- Hidrotremales (cuarzo)
- Piroclastos (Tobas)

DESCRIPCIÓN DE LOS FRAGMENTOS ENCONTRADOS EN LA DIATREMA:

3.2.3.13.1 Fragmentos juveniles:

Fragmentos angulosos, de tamaño de 15 a 5mm, de color gris oscuro. Para la descripción petrográfica se tomó en cuenta la lámina TTC-9-211. Presenta textura hipocristalina, formada por:

- 70% vidrio
- 25% microlitos de plagioclasa de tamaño <0.5mm
- 2% anfíbol, de tamaño ≤1mm, alterado totalmente a clorita.
- 1% cuarzo, de tamaño ≤ 0.1mm
- 1% piroxeno, de tamaño ≤1mm, alterado totalmente a clorita
- <1% óxidos

Alteración:

3% clorita, como producto de alteración de máficos.

Presenta un borde de enfriamiento de coloración gris blanquecino.



Prof. 380.90m

Nombre Roca: Dacita afanítica



TTC-9-211:Aumento 10X CN



TTC-9-211:Aumento 10X CN

Fragmentos angulosos, irregulares y alargados, de tamaño de 4 cm a 2 mm. Presentan coloración verdosa clara. Estos fragmentos se encontraron en las láminas delgadas TTC-9-131, TTC-9-211 y TTC-9-309.

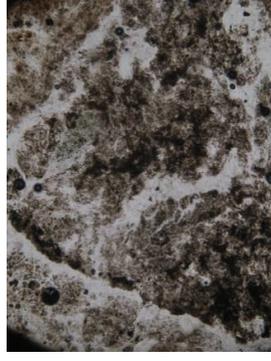
Presentan textura hialina, compuesto de: 98% vidrio, color café, alterado totalmente a esmectita. 2% plagioclasa, de tamaño de 0.1mm.

Alteración:

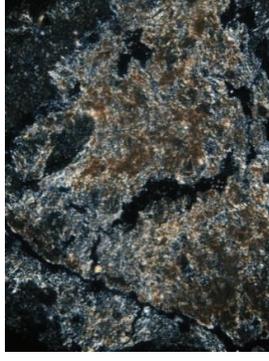
100% de esmectita como producto de alteración del vidrio.



Prof. 198.20m.



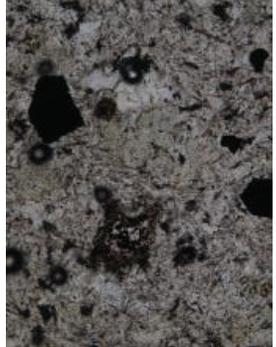
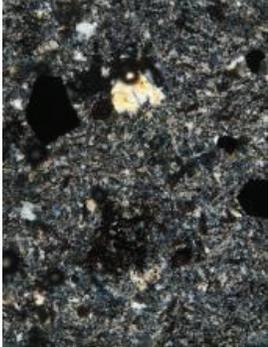
TTC-9-211: Aumento 10X SN



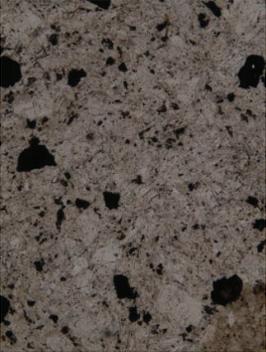
TTC-9-211: Aumento 10X CN

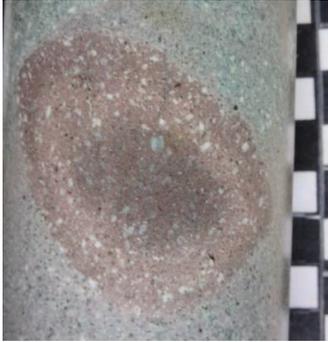
Nombre Roca: Vidrio volcánico, alterado totalmente a esmectita

3.2.3.13.2 Fragmentos de Pórfidos

<p>Fragmentos angulosos a subredondeados, de tamaño de 4 cm a 3 mm, para la descripción petrográfica se tomó en cuenta la muestra TTC-9-533.</p> <p>Presentan textura porfídica con matriz criptocristalina. Compuesta de 14% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 7% plagioclasa, de tamaño de 1.5 a 0.1mm reemplazada totalmente por calcita 2% biotita, de tamaño de 0.8 a 0.2mm, alteradas totalmente a clorita y con coronas de óxidos (hematita). 2% cuarzo, de tamaño de 0.4 a 0.1mm. <1% anfibol, alterados a clorita con corona de óxidos (hematita). 2% óxidos, en forma de agregados alterados totalmente a hematita. <p>La matriz constituye el 86% de la roca y está formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 71% plagioclasa, reemplazadas parcialmente por calcita. 10% cuarzo (10%) 2% anfibol, alterados totalmente a clorita. 3% óxidos, alterados totalmente a hematita. <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 13% calcita como producto de reemplazamiento en plagioclasas. 1% hematita como producto de alteración de magnetita. 5% clorita como producto de alteración de biotita y anfibol. 5% pirita diseminada en toda la roca, de tamaño de 0.3-0.1mm. 	 <p style="text-align: center;">Prof. 533.65m.</p>  <p style="text-align: center;">TTC-9-533: Aumento 10X SN</p>  <p style="text-align: center;">TTC-9-533: Aumento 10X CN</p>
<p>Nombre Roca: Pórfido dacítico</p>	

<p>Fragmentos subangulosos, de tamaño de 3.5cm a 2mm.</p> <p>Presentan textura porfídica, compuesta de 15% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 10% plagioclasa, de tamaño de 2 a 1.5mm, reemplazadas parcialmente por calcita y alteradas a arcilla. 2% piroxeno, de tamaño de 1mm, alterados totalmente a clorita; 1% anfibol, de tamaño de 1mm, alterados totalmente a clorita. <p>La matriz constituye el 85% de la roca y está formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 70% plagioclasa, alteradas levemente a arcillas. 2% cuarzo, de tamaño <0.1mm 1% óxidos <1% piroxeno alterados a clorita <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 10% arcilla como producto de alteración de plagioclasa 7% calcita, como producto de reemplazamiento en cristales de plagioclasa. 	 <p style="text-align: center;">Prof. 539m</p>
<p>Nombre Roca: Pórfido dacítico</p>	

	<p>Fragmentos subangulosos a subredondeados, con bordes cuspidados, de tamaño de 15cm a 2mm. Se encontraron estos fragmentos en las láminas delgadas TTC-9-211 y TTC-9-309.</p> <p>Tienen textura porfídica masiva, compuesta de 10% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 7% plagioclasa, de tamaño de 1.5-0.6mm 1% cuarzo, de tamaño de 0.4mm 1% biotita, de tamaño 0.3-0.1mm <1% anfíbol, de tamaño de 0.6-0.4mm <p>La matriz de la roca constituye el 90%, es microcristalina, y está compuesta por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 70% microlitos de plagioclasa ≤ 0.2mm 18% microlitos de cuarzo ≤ 0.1mm 2% óxidos <p>Alteración: 10% Arcilla como producto de alteración de la plagioclasa 1% Pirita de tamaño ≤ 0.1mm, diseminada en la roca.</p>
<p>Prof. 550m.</p>  <p>TTC-9-309: Aumento 2.5X SN</p>	 <p>TTC-9-309: Aumento 2.5X CN</p>
<p>Nombre Roca: Pórfido dacítico blanquecino</p>	

	<p>Fragmentos subredondeados, de tamaño de 5cm, presenta textura porfídica, compuesto de 25% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 22% plagioclasa, de tamaño ≤ 3mm 2% anfíbol, de tamaño ≤ 2mm con pátinas de hematita 1% piroxeno, de tamaño ≤ 1mm con pátinas de hematita y alterados a clorita. <p>La matriz de la roca constituye el 75% y es criptocristalina de color rosáceo.</p> <p>Alteración: 10% arcilla como producto de alteración de plagioclasas 1% hematita en forma de pátinas en cristales de piroxenos y anfíboles. 1% clorita como producto de alteración de piroxenos y anfíboles. 2% pirita, de tamaño < 1mm, diseminada en toda la roca.</p> <p>La alteración es en forma concéntrica, con mayor abundancia de arcilla y clorita en el centro del lítico.</p>
<p>Prof. 533.32m</p>	<p>Nombre Roca: Pórfido dacítico rosáceo</p>

 <p style="text-align: right;">Prof. 538</p>	<p>Fragmentos subangulosos, de tamaño de 4-2.5cm.</p> <p>Tienen textura porfídica, presenta 25% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 17% plagioclasas, de tamaño $\leq 2\text{mm}$ 5% anfíbol, de tamaño $\leq 2\text{mm}$, parcialmente alterado a clorita y con pátinas de hematita 3% piroxeno, de tamaño $\leq 1\text{mm}$ parcialmente alterado a clorita y con pátinas de hematita. <p>La matriz constituye el 75% de la roca y es criptocristalina color gris violáceo.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 4% clorita como producto de alteración de piroxeno y anfíbol. 3% hematita en forma de pátinas en cristales de piroxeno y anfíbol 2% pirita, de tamaño $\leq 1\text{mm}$, diseminada en toda la roca. <p>Nombre Roca: Pórfido dacítico violáceo</p>
---	--

 <p style="text-align: right;">Prof. 540.67m</p>	<p>Fragmentos subangulosos con bordes angulosos, de tamaño desde 1 a 12cm. Presentan textura porfídica y están compuestos de 30% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 20% plagioclasa, de tamaño de 5 a 1mm, alteradas parcialmente a arcillas y levemente reemplazadas por calcita. 3% piroxeno, de tamaño de 1 a 2mm, alterados parcialmente a clorita y con pátinas de hematita. 5% anfíbol, de tamaño de 1 a 4mm, con pátinas de hematita y alterados parcialmente a clorita. 2% cuarzo, de tamaño de 1mm. <p>La matriz constituye el 70% de la roca, es microcristalina de color rosáceo.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 17% de arcilla como producto de alteración de cristales de plagioclasa. 3% pirita, de tamaño de 1mm, diseminada en toda la roca. 2% de clorita como producto de alteración de piroxenos y anfíboles. 2% calcita como producto de reemplazamiento en plagioclasas. 1% hematita en forma de pátinas en cristales de piroxeno y anfíbol. <p>Nombre Roca: Pórfido dacítico</p>
---	---

<p>Se encuentran a una profundidad de 503m, tienen forma subangular y son de tamaño de 5-1cm.</p> <p>Presenta textura porfídica y está compuesta de 20% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 15% Plagioclasa de tamaño $\geq 3\text{mm}$ 3% Piroxeno de tamaño $\geq 2\text{mm}$ 2% Anfíbol de tamaño $\geq 2\text{mm}$ 1% Cuarzo de tamaño de 1mm. <p>La matriz constituye el 80% de la roca y es microcristalina de coloración violácea.</p> <p>Alteración:</p> <p>2% Hematita en forma de pátinas en la matriz de la roca y cristales de piroxeno y anfíbol.</p>	 <p style="text-align: right;">Prof. 503m</p>
<p>Nombre Roca: Pórfido dacítico con pátinas de hematita</p>	

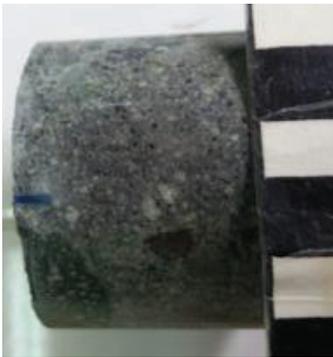
<p>Fragmento subangular a subredondeado, de tamaño de 3cm, presenta textura porfídica, compuesto de 15% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 7% plagioclasa, de tamaño $\leq 2\text{mm}$, alteradas parcialmente a arcillas. 6% anfíbol, de tamaño $\leq 5\text{mm}$, alterados totalmente a clorita. 2% piroxeno, de tamaño $\leq 1\text{mm}$, alterados totalmente a clorita. <p>La matriz constituye el 85% de la roca y está totalmente alterada a arcillas.</p> <p>Alteración:</p> <p>90% de arcilla como producto de alteración de fenocristales y microlitos de plagioclasa.</p> <p>8% clorita, como producto de alteración de piroxeno y anfíbol.</p> <p>2% pirita, de tamaño $\leq 1.5\text{mm}$, diseminada en toda la roca.</p>	 <p style="text-align: right;">Prof. 573.95m</p>
<p>Nombre Roca: Pórfido dacítico totalmente alterado a arcilla</p>	

3.2.3.13.3 Fragmentos de intrusivos

<p>Fragmentos subredondeados de tamaño de 4cm, presentan textura porfídica, compuestas de 22% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 14% plagioclasa, de tamaño desde 4 a 1mm, reemplazadas parcialmente por calcita. 5% anfíbol, de tamaño de 3 a 1mm, alterados totalmente a clorita. 1% cuarzo (1%), de tamaño de 2mm. 2% piroxeno (2%), de tamaño de 1mm, alterados totalmente a clorita. <p>La matriz representa el 78% de la roca y es microcristalina.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 20% silicificación en toda la roca 10% calcita como producto de reemplazamiento en cristales de plagioclasa y en la matriz. 7% clorita como producto de alteración de piroxeno y anfíbol. 5% arcilla en la matriz como producto de alteración de plagioclasas. 	 <p style="text-align: right;">Prof. 539.90m</p>
<p>Nombre Roca: Pórfido dacítico silicificado</p>	

<p>Se encuentra a profundidades desde 495 hasta 541m, fragmentos subredondeados, de tamaño de 20 a 30 cm. Tienen textura fanerítica de grano medio, compuesta por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 57% de cristales de plagioclasa intermedia. 15% clinopiroxeno (diópsido) 20% ortopiroxeno (hipersteno) 5% homblenda 3% óxidos <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 20% Silicificación en la roca. 10% Calcita reemplazando a algunos cristales de plagioclasa. 9% Clorita como producto de alteración de piroxeno y anfíbol. 2% Pirita diseminada en toda la roca $\geq 1\text{mm}$. <p>Estos fragmentos se encontraron también en forma de xenolitos en los Flujos 3 y 4 del Pozo TTC-3.</p>	 <p style="text-align: right;">Prof. 495m</p>
<p>Nombre Roca: Diorita de grano medio silicificada</p>	

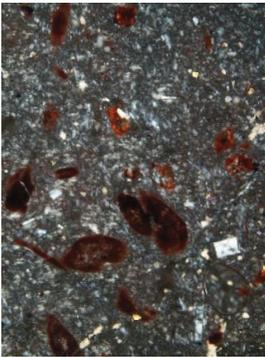
3.2.3.13.4 Fragmentos volcánicos

 <p style="text-align: center;">Prof. 519m</p>	<p>Se encuentra a una profundidad de 519m, tienen forma angular, de tamaño de 3cm. Tienen textura porfirítica y está compuesta de 12% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 8% plagioclasa, de tamaño $\leq 3\text{mm}$ 3% piroxeno, de tamaño $\leq 1\text{mm}$ 2% anfíbol, de tamaño $\leq 1\text{mm}$ 1% cuarzo, de tamaño $\leq 1\text{mm}$ 1% óxidos <p>La matriz constituye el 88% de la roca y es criptocristalina con vidrio.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 15% silificación en toda la roca 8% calcita reemplazando a los fenocristales de plagioclasa. 1% clorita como producto de alteración de máficos. <p>Nombre roca: Dacita porfirítica</p>
---	--

 <p style="text-align: center;">Prof. 513m.</p>	<p>Fragmentos subredondeados a subangulosos de tamaño de 20 a 3mm. Para la descripción petrográfica se tomó en cuenta la muestra TTC-9-513. Presentan textura porfirítica con matriz criptocristalina. Compuesta de 20% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 16% plagioclasa, de tamaño de 1.3 a 0.1mm, reemplazadas parcialmente por calcita 2% cuarzo, de tamaño de 0.2 a 0.1mm 1% anfíbol, de tamaño de 0.5 a 0.1mm, con coronas de óxidos, se encuentran alterados a clorita y reemplazados por calcita. 1% óxidos, de tamaño de 0.1 a 0.2mm, con alteración parcial a hematita. <p>La matriz constituye el 80% de la roca y está conformada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 68% vidrio, alterado parcialmente a arcilla 4% cuarzo 6% plagioclasa, reemplazada parcialmente por calcita 2% óxidos <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 55% silificación 20% calcita como producto de reemplazamiento en plagioclasas 4% pirita diseminada en toda la roca, de tamaño $\leq 0.3\text{mm}$. 2% clorita como producto de alteración de anfíboles. 1% hematita como producto de alteración de magnetita y diseminada en la matriz. <p>Nombre roca: Dacita porfirítica silificada</p>
--	--

TTC-9-513: Aumento 10X SN

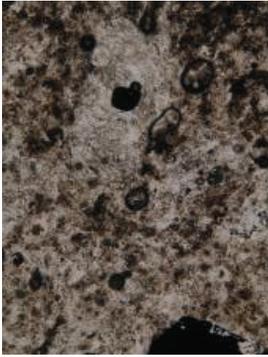
TTC-9-513: Aumento 10X CN

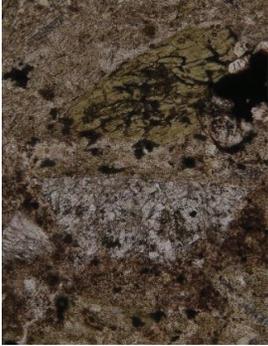
<p>Fragmentos subangulosos a subredondeados, de tamaño de 4cm a 4mm, algunos fragmentos presentan ingreso de matriz, como el que se observa en la fotografía macroscópica. Estos fragmentos se encontraron también en la lámina delgada TTC-9-131.</p> <p>Presentan textura porfirítica, con matriz cryptocristalina, compuesta por 18% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 10% plagioclasa, de tamaño de 0.2mm, figura biaxial (-), ángulo de extinción 18°; posiblemente andesina. 3% biotita, de tamaño de 0.3mm. 3% anfíbol, de tamaño de 0.4 a 0.2mm. 1% piroxeno, de tamaño de 0.15mm. 1% óxidos (1%), de tamaño <0.1mm, alterados a hematita. <p>La matriz constituye el 72% de la roca y está formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 50% vidrio alterado parcialmente a arcillas 20% microlitos de plagioclasa 2% anfíbol y biotita <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 25% arcilla, como producto de reemplazamiento del vidrio 5% calcita reemplazando parcialmente a plagioclasa 1% hematita en forma de pátinas, como producto de alteración de la magnetita y alrededor de los minerales máficos 	 <p style="text-align: center;">Prof. 539.85m</p>  <p style="text-align: center;">TTC-9-131: Aumento 2.5X SN</p>  <p style="text-align: center;">TTC-9-131: Aumento 2.5X SN</p>	<p>Nombre Roca: Dacita porfirítica con pátinas de hematita</p>
---	---	---

<p>Fragmentos subangulosos a subredondeados, de tamaño de 2 a 4cm, presenta textura porfirítica, compuesto de 25% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 20% plagioclasa, de tamaño de 3 a 1mm, levemente reemplazadas por calcita. 3% anfíbol, de tamaño de 2 a 1mm, alterados totalmente a clorita. 2% piroxeno, de tamaño ≤1.5mm, alterados totalmente a clorita. <p>La matriz constituye el 75% de la roca, compuesta de vidrio alterado parcialmente a arcillas, microlitos de plagioclasa y máficos alterados a clorita.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 30% de arcilla como producto de alteración de vidrio 8% clorita, como producto de alteración de piroxenos y anfíboles. 8% calcita como producto de alteración de plagioclasas. <p>Observaciones:</p> <p>Presentan bordes cuspados y halos de clorita.</p>	 <p style="text-align: center;">Prof. 524.68m</p>  <p style="text-align: center;">Prof. 525.15m</p>	<p>Nombre Roca: Dacita porfirítica con bordes de clorita</p>
---	---	---

 <p>Prof. 515.65m</p>	<p>Fragmentos subredondeados, de tamaño de 3.5cm, con textura porfirítica, litofacies laminada, compuesta de 17% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 14% plagioclasa, de tamaño de 4 a 1mm, reemplazadas parcialmente por calcita. 1% piroxeno, de tamaño ≤ 1mm, alterados totalmente a clorita. 1% anfíbol, de tamaño ≤ 1mm, alterados totalmente a clorita. 1% óxidos <p>La matriz constituye el 83% de la roca, es microcristalina con vidrio, levemente alterada a arcillas y clorita.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 7% clorita, como producto de alteración de piroxenos y anfíboles. 5% arcilla, como producto de alteración del vidrio 5% calcita, como producto de reemplazamiento en plagioclasas <p>Nombre Roca: Dacita porfirítica bandeada</p>
--	---

 <p>Prof.: 503.87m</p>	<p>Fragmentos subangulosos, de tamaño de 3cm a 2mm. Para la descripción petrográfica se tomó en cuenta la muestra TTC-9-131. Presenta textura hipocristalina porfirítica, compuesta por 22% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 19% plagioclasa, de tamaño de 2.5-0.2mm. 1% piroxeno, de tamaño de 0.7mm, completamente alterado a clorita. 1% biotita, de tamaño de 1.2 a 0.5mm, alterada parcialmente a clorita y con inclusiones de óxidos. <1% óxidos, de tamaño de 0.5mm. <p>La matriz constituye el 78% de la roca y está formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 48% vidrio, alterado totalmente a arcilla. 30% de microlitos de plagioclasa, de tamaño <0.05mm, totalmente alterados a arcilla. <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 78% arcilla color verdoso como producto de alteración total del vidrio y de los microlitos de plagioclasa. 2% vetillas de óxidos <0.5mm. 1% clorita como producto de alteración de piroxeno y biotita <<1% piritita de tamaño <0.05mm diseminada en toda la roca.
 <p>TTC-9-131: Aumento 10X</p>	 <p>TTC-9-131: Aumento 10X CN</p>
<p>Nombre Roca: Andesita biotítica porfirítica</p>	

<p>Fragmentos subredondeados de 6-4cm. Para la descripción petrográfica se tomó en cuenta la muestra TTC-9-521.</p> <p>Presentan textura porfídica con matriz criptocristalina, compuesta de 13% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 10% plagioclasa, de tamaño de 2 a 0.4mm, reemplazadas totalmente por calcita. 3% biotita, de tamaño de 0.8 a 0.1mm, alteradas parcialmente a clorita. 1% piroxeno, de tamaño de 0.8 a 0.2mm, levemente alterados a clorita. <p>La matriz representa el 86% de la roca y está formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 60% vidrio alterado totalmente a arcillas 26% microlitos de plagioclasa <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 60% arcilla como producto de alteración del vidrio. 8% silificación 4% piritita 4% calcita, producto de reemplazamiento en plagioclasas 2% clorita, producto de reemplazamiento en piroxeno y biotita. 	 <p>Prof. 521m.</p>  <p>TTC-9-521: Aumento 10X SN</p>  <p>TTC-9-521: Aumento 10X CN</p>
<p>Nombre Roca: Andesita ácida porfídica</p>	

<p>Fragmentos subredondeados a subangulosos de tamaño de 5 a 15cm. Este fragmento corresponde al Flujo 9 (Flujo de lava de andesita ácida porfídica) que se encuentra a 576.75 - 716.00m de profundidad.</p> <p>La roca presenta una textura hipocristalina, porfídica y poikilítica con matriz intersertal. Compuesta de 24% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 16% plagioclasa (posiblemente andesina), se identificaron tres tamaños de cristales: 1ra (6-3mm), 2da (2-1mm) y 3ra (0.5-0.1mm). La mayoría presentan reemplazamiento de calcita. 3% de piroxeno, hay dos generaciones de cristales: 1ra (2-1.5mm) y 2da (0.5-0.1mm), los cristales presentan inclusiones de óxidos, se encuentran alterados totalmente a clorita. 3% de anfíbol, hay dos generaciones: 1ra (1.5-1 mm) y 2da (0.5-0.2 mm). Alterados totalmente a clorita. <1% Biotita de tamaño de 1.3-0.2 mm 1% de óxidos (magnetita). <p>La matriz constituye el 76% de la roca y está formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 35% vidrio parcialmente alterado a arcilla 31% plagioclasa 5% piroxeno 4% anfíbol 1% óxidos. <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 20% arcilla como producto de alteración del vidrio de la matriz 20% calcita reemplazando a los cristales de plagioclasa y en forma de vetillas de espesor <0.1mm 15% clorita como producto de alteración de piroxeno y anfíbol 4% sílice relleno vesículas 1% Piritita de tamaño <0.1mm 	 <p>Prof. 540m</p>  <p>TTC-9-594: Aumento 10X SN</p>  <p>TTC-9-594: Aumento 10X CN</p>
<p>Nombre Roca: Andesita ácida porfídica del flujo de 576.75 - 716.00m (Flujo 9)</p>	

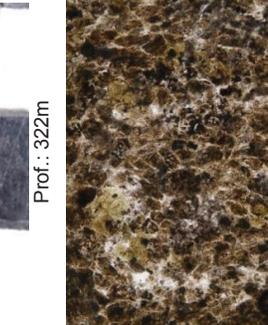
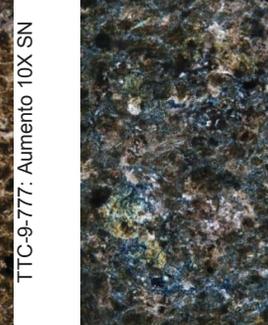
<p>Fragmentos angulosos a subangulosos, de tamaño de 3cm a 3mm. Para su descripción petrográfica se tomó en cuenta la muestra TTC-9-521.</p> <p>Presentan textura hipocristalina porfirítica, compuesta de 14% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 10% plagioclasa, de tamaño de 3 a 0.4mm, reemplazadas parcialmente por calcita. 3% biotita, de tamaño de 0.8 a 0.1mm, alteradas parcialmente a clorita. 1% piroxeno, de tamaño de 0.8 a 0.2mm, levemente alterados a clorita. <p>La matriz constituye el 86% de la roca y está formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 60% vidrio, totalmente alterado a arcillas 26% microlitos de plagioclasa <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 60% arcilla como producto de alteración del vidrio. 8% silicificación 4% pirita 4% calcita, producto de reemplazamiento en plagioclasas 2% clorita, producto de alteración de piroxeno y biotita. 	 <p style="text-align: center;">Prof. 485m.</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-521: Aumento 10X SN</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-521: Aumento 10X CN</p>
<p>Nombre Roca: Andesita ácida porfirítica</p>			

<p>Fragmentos subangulosos, de tamaño de 10cm, tienen textura porfirítica, compuesto de 22% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 18% plagioclasa, de tamaño ≤ 3mm, levemente reemplazadas por calcita. 2% piroxeno, de tamaño de 3 a 1mm, alterados parcialmente a clorita. 2% anfíbol, de tamaño ≤ 1mm, alterados parcialmente a clorita. <p>La matriz representa el 88% de la muestra y está compuesta de vidrio alterado parcialmente a arcillas, y microlitos de plagioclasa y máficos levemente alterados a clorita.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 5% arcilla, como producto de alteración del vidrio 5% de calcita como producto de reemplazamiento en plagioclasas. 3% de clorita como producto de alteración de piroxenos y anfíboles. 	 <p style="text-align: center;">Prof. 471m</p>
<p>Nombre Roca: Andesita porfirítica</p>	

 <p style="text-align: right;">Prof. 410.85m</p>	<p>Fragmentos subangulosos a subredondeados, de tamaño de 3.5 a 0.5cm, con textura porfirítica. Compuestos de 8% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 6% plagioclasa (bytownita), de tamaño de $\leq 1.5\text{mm}$. 2% piroxeno, de tamaño $\ll 1\text{mm}$, alterado totalmente a clorita. <p>La matriz es color rojizo, constituye el 92% de la roca y está formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 67% vidrio 25% microlitos de plagioclasa. <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> <1% de hematita en forma de pátinas <p>Este fragmento también se encontró en la brechas suprayacentes a la diatrema, de profundidades de 15.60 a 25.40m y 33.05 a 47.70m.</p>
<p>Nombre Roca: Andesita porfirítica básica (And P1)</p>	

 <p style="text-align: right;">Prof. 519m.</p>	<p>Fragmentos subangulosos a subredondeados de 5-0.5cm. Tienen textura porfirítica compuesta de 22% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 16% plagioclasa, de tamaño $\leq 4\text{mm}$, presentan inclusiones de máficos alterados a clorita y están reemplazadas parcialmente por calcita. 4% piroxeno, de tamaño $\leq 1\text{mm}$, alterado totalmente a clorita. 1% anfíbol, de tamaño $\leq 1\text{mm}$, alterados a clorita. 1% óxidos <p>La matriz constituye el 78% de la roca, es criptocristalina con vidrio alterado a arcilla.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 15% arcilla como producto de alteración del vidrio de la matriz. 10% calcita, producto de reemplazamiento en plagioclasas. 8% clorita como producto de alteración de piroxeno y anfíbol.
<p>Nombre Roca: Andesita porfirítica</p>	

 <p style="text-align: center;">Prof. 533.65m</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-530: Aumento 10X SN</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-530: Aumento 10X CN</p>
<p>Fragmentos subredondeados a angulosos, de tamaño de 13cm a 2mm. Para la descripción petrográfica se tomó en cuenta la muestra TTC-9-530.</p> <p>La roca presenta textura hipocristalina porfirítica con matriz intersertal fluidal. Compuesta de 28% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 20% plagioclasa (andesina), hay dos generaciones de plagioclasas: 1ra (2 a 1.5mm), 2da (0.6 a 0.3mm), están parcialmente reemplazadas por calcita. 4% anfíbol, de tamaño de 1.1- 0.3mm, alterados totalmente a clorita. 3% piroxeno, de tamaño de 0.4-0.1mm, alterados totalmente a clorita. <1% biotita, de tamaño de 0.4-0.2mm, alterada totalmente a clorita. <1% cuarzo, de tamaño de 0.4-0.2mm. <<1% óxidos 	<p>La matriz constituye el 72% de la roca y está formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 35% microlitos de plagioclasa con disposición fluidal. 30% vidrio alterado a arcilla. 4% piroxeno, alterados a clorita. 3% anfíbol, alterados a clorita. 	<p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 30% arcilla como producto de alteración del vidrio 14% clorita como producto de alteración de piroxenos y anfíboles 10% silice, en toda la roca 10% calcita, producto de reemplazamiento en plagioclasas. <1% de pirita diseminada en toda la roca. <p>Nombre de la roca: Andesita porfirítica ácida</p>

 <p style="text-align: center;">Prof.: 322m</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-777: Aumento 10X SN</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-777: Aumento 10X CN</p>
<p>Fragmentos subangulosos a subredondeados, de tamaño de 1 a 3cm. Este fragmento corresponde al Flujo 11 (Flujo de lava de andesita porfirítica) que se encuentra a 773.62 – 805.85m de profundidad.</p> <p>Presenta textura hipocristalina, porfirítica, poikilitica con matriz intersertal. Compuesta de 19% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 9% plagioclasa (bytownita), con tres generaciones de cristales: 1ra (4-2.2 mm), 2da (1.7-1 mm) y 3ra (0.5-0.2 mm), algunos cristales presentan inclusiones de piroxeno y óxidos. Se encuentran reemplazados por calcita. 5% piroxeno, hay dos generaciones: 1ra (3-1.5 mm) y 2da (0.5-0.1 mm), algunos cristales presentan inclusiones de óxidos. Se encuentran alterados a clorita. 4% anfíbol, hay dos generaciones de cristales: 1ra (2-1 mm) y 2da (0.7-0.4 mm). Se encuentran alterados a clorita. 1% de óxidos de tamaño de 0.5-0.3mm. 	<p>La matriz de la roca constituye el 81% de la roca, y está formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 34% de vidrio 30% de plagioclasa con disposición fluidal 8% de piroxeno 7% de anfíbol 1% de óxidos 	<p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 40% arcilla, como producto de alteración del vidrio y microlitos de plagioclasa. 12% calcita, como producto de reemplazamiento en fenocristales y microlitos de plagioclasa. 10% clorita, como producto de alteración de piroxenos y anfíboles. 1% hematita, en forma de pátinas
<p>Nombre Roca: Andesita porfirítica del flujo de lava de 773.62-805.85 (Flujo 11)</p>		

 <p style="text-align: right;">Prof. 382m</p>	<p>Estos fragmentos líticos se encuentran a profundidades de 382m.</p> <p>Fragmentos angulosos, con bordes cuspidados, de tamaño de 11cm, presentan textura porfírica, compuestos de 15% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 9% plagioclasa, de tamaño de 3 a 1mm, algunas están invadidas por pátinas de hematita. 2% anfibol, de tamaño de 2 a 1mm, alterados totalmente a clorita. 4% piroxeno, de tamaño de 3 a 1mm, alterados totalmente a clorita. <p>La matriz constituye el 85% de la roca, es microcristalina con vidrio, color gris obscuro.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 25% silificación en toda la roca 6% clorita, como producto de alteración de piroxenos y anfíboles. 1% hematita, en forma de pátinas en los cristales de plagioclasa
<p>Nombre Roca: Andesita porfírica silificada</p>	

 <p style="text-align: right;">Prof. 423m</p>	<p>Estos fragmentos líticos se encuentran a profundidades de 415-423m.</p> <p>Son angulosos a subangulosos, de tamaño de 5cm a 8mm, presentan textura porfírica, compuesto de 20% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 10% plagioclasa, de tamaño de 3 a 1mm, levemente reemplazadas por calcita. 6% anfibol, de tamaño de 3 a 1mm, alterados totalmente a clorita. 4% piroxeno, de tamaño de 2 a 1mm, alterados totalmente a clorita. <p>La matriz constituye el 80% de la roca, es microcristalina con vidrio, color gris obscuro.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 12% clorita, como producto de alteración de piroxenos y anfíboles. 5% arcilla, como producto de alteración del vidrio. 1% hematita, en forma de pátina en la matriz 2% calcita, como producto de reemplazamiento en plagioclasas.
<p>Nombre Roca: Andesita porfírica</p>	

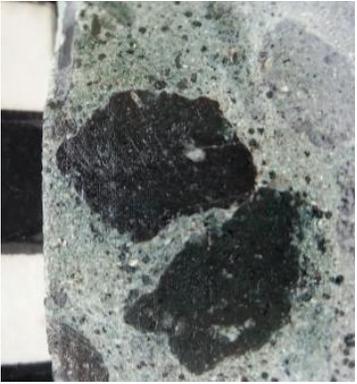
<p>Estos fragmentos líticos se encuentran a profundidades de 509.95m.</p> <p>Fragmentos subredondeados, de tamaño de 4.5cm, con textura porfírica, compuesta de 20% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 14% plagioclasa, de tamaño de 5 a 1mm, levemente reemplazadas por calcita. 4% anfíbol (4%), de tamaño ≤ 3mm, alterados parcialmente a clorita. 1% piroxeno, de tamaño ≤ 2mm, alterados parcialmente a clorita. 1% óxidos <p>La matriz constituye el 80% de la roca, es criptocristalina con vidrio.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 4% calcita, como producto de reemplazamiento en plagioclasas 3% clorita, como producto de alteración de piroxenos y anfíboles. 3% pirita, diseminada en toda la roca. <p>El fragmento de roca presenta un borde de enfriamiento de coloración más clara.</p>	 <p style="text-align: right;">Prof. 509.95m</p>
<p>Nombre Roca: Andesita porfírica</p>	

<p>Fragmentos angulosos, de tamaño de 1.5cm, con textura porfírica, compuestos de 10% de cristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 8% plagioclasa, de tamaño ≤ 2mm, alteradas parcialmente a arcilla. 2% piroxeno, de tamaño ≤ 1mm, alterados parcialmente a clorita. <1% óxidos <p>La matriz constituye el 90% de la roca, es criptocristalina con vidrio.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 20% silificación en toda la roca 4% arcilla, como producto de alteración de plagioclasa 4% pirita, muy fina, con mayor concentración en cristales de plagioclasa 1% clorita, como producto de alteración de piroxenos. 	 <p style="text-align: right;">Prof. 248m</p>
<p>Nombre Roca: Andesita porfírica</p>	

 <p style="text-align: right;">Prof. 248m</p>	<p>Fragmentos de angulosos, de 1.5cm, con textura porfirítica, compuestos de 25% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 15% plagioclasa, de tamaño de 6 a 1mm. 6% anfíbol, de tamaño de 4 a 1mm, totalmente alterados a clorita. 4% piroxeno, de tamaño ≤ 1mm, alterados totalmente a clorita. <p>La matriz representa el 75% de la roca, es criptocristalina con vidrio.</p> <p>Alteración:</p> <p>20% silicificación en toda la roca</p> <p>10% clorita, como producto de alteración de piroxenos y anfíboles.</p> <p>Nombre Roca: Andesita porfirítica silicificada</p>
--	--

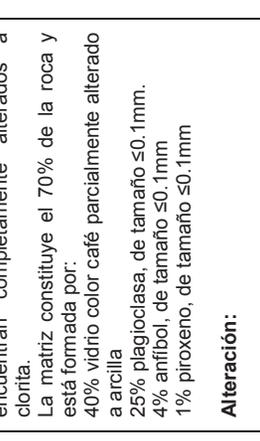
 <p style="text-align: right;">Prof. 403.80m.</p>	<p>Fragmentos angulosos con forma angulosa, de tamaño de 3cm, con textura microporfirítica. Compuestos de 13% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 10% plagioclasa, de tamaño de ≤ 1.5mm 2% piroxeno, de tamaño ≤ 1mm <1% anfíbol, de tamaño ≤ 1mm. <p>La matriz es color rojizo-violáceo, constituye el 87% de la roca y está formada por vidrio, microilitos de plagioclasa y máficos.</p> <p>Alteración:</p> <p>Ninguna</p> <p>Nombre Roca: Andesita microporfirítica</p>
--	---

 <p style="text-align: right;">Prof. 415.36m</p>	<p>Fragmentos angulosos a subangulosos de tamaño de 3cm, con textura afanítica, compuesto de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 83% vidrio, alterado parcialmente a arcilla. 15% plagioclasa, de tamaño ≤ 1mm, con leve reemplazamiento de calcita. 2% piroxeno, de tamaño ≤ 1.5mm. <p>Alteración:</p> <p>20% arcilla, como producto de alteración del vidrio.</p> <p>5% silicificación en toda la roca</p> <p>3% calcita en plagioclasas</p> <p><1% hematita en forma de pátinas en la matriz.</p> <p>Nombre Roca: Andesita afanítica</p>
--	---

 <p style="text-align: right;">Prof. 347m</p>	<p>Fragmentos subangulosos a subredondeados de tamaño de 1.5cm a 5mm, presentan textura afanítica y están compuestos de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 83% vidrio 15% plagioclasa, de tamaño ≤ 2mm. 2% piroxeno, alterados totalmente a clorita <p>Alteración:</p> <p>2% clorita, como producto de alteración de piroxenos.</p> <p>Nombre Roca: Andesita afanítica</p>
---	--

 <p style="text-align: right;">Prof. 554m</p>	<p>Fragmentos subangular con bordes cuspidados, de tamaño de 7cm. Tienen textura microporfirítica, compuesta de 15% de cristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 7% piroxeno, de tamaño $\leq 1\text{mm}$ 4% anfíbol, de tamaño $\leq 3\text{mm}$ 4% plagioclasa, de tamaño $\leq 5\text{mm}$ <p>La matriz constituye el 85% de la roca y es criptocristalina con vidrio.</p> <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 11% clorita como producto de alteración de piroxeno y anfíbol. 10% arcilla en la matriz como producto de alteración del vidrio. 4% calcita reemplazando a plagioclasa 4% pirita $\leq 1\text{mm}$ diseminada en toda la roca. <p>Los fragmentos tienen bordes rosáceos de $\leq 1\text{mm}$.</p> <p>Nombre Roca: Andesita microporfirítica</p>
--	---

 <p style="text-align: right;">Prof. 248m</p>	<p>Fragmentos angulosos, de tamaño de 12 a 5mm, con textura afanítica, compuestos de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 83% vidrio, levemente alterado a arcilla 15% plagioclasa, de tamaño $< 1\text{mm}$ 2% piroxeno, de tamaño $< 1\text{mm}$, alterados totalmente a clorita. <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 5% arcilla, como producto de alteración del vidrio 2% clorita, como producto de alteración de piroxenos $< 1\%$ pirita, muy fina, diseminada en toda la roca. <p>Nombre Roca: Andesita afanítica</p>
---	---

 <p style="text-align: right;">Prof. 211.90m</p>	<p>Fragmentos angulosos a subangulosos, de color amarillento, de tamaño de 10 a 3mm. Para la descripción petrográfica se tomó en cuenta la lámina TTC-9-131.</p> <p>Presentan textura hipocristalina porfirítica con matriz intersertal fluidal, compuesta por 30% de fenocristales de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 20% plagioclasa, de tamaño de 0.3 a 0.2mm, posiblemente andesina. 7% anfíbol, de tamaño de 0.15 a 0.2mm, se encuentran completamente alterados a clorita. 3% piroxeno, de tamaño de 0.15mm, se encuentran completamente alterados a clorita. <p>La matriz constituye el 70% de la roca y está formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 40% vidrio color café parcialmente alterado a arcilla 25% plagioclasa, de tamaño $\leq 0.1\text{mm}$. 4% anfíbol, de tamaño $\leq 0.1\text{mm}$ 1% piroxeno, de tamaño $\leq 0.1\text{mm}$ <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 20% arcilla como producto de alteración del vidrio de la matriz. 15% clorita como producto de alteración de anfíbol y piroxeno. 1% pirita, diseminada en toda la roca
 <p style="text-align: right;">TTC-9-131: Aumento 10X SN</p>	 <p style="text-align: right;">TTC-9-131: Aumento 10X CN</p>
<p>Nombre Roca: Andesita ácida microporfirítica</p>	

 <p style="text-align: right;">Prof. 403.90</p>	<p>Fragmentos subangulosos a subredondeados, de tamaño de 3cm, con textura afanítica. Compuestos de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 60% vidrio 37% plagioclasa, de tamaño de $\leq 1\text{mm}$ 2% piroxeno, de tamaño $\leq 1\text{mm}$ $<< 1\%$ anfíbol, de tamaño $\leq 1\text{mm}$ <p>Presenta $< 1\%$ de xenolitos de tamaño de 8mm, de diorita de grano muy fino, con magnetita.</p> <p>Alteración:</p> <p>10% de silificación en toda la roca.</p> <p>Nombre Roca: Andesita afanítica</p>
--	---

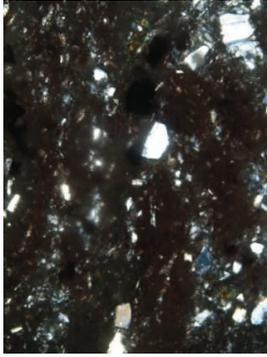
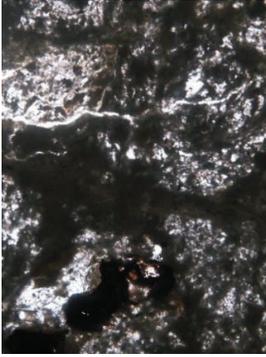
 <p style="text-align: right;">Prof. 563.85m</p>	<p>Fragmentos subangulosos, de tamaño de 10cm a 5mm, presenta textura afanítica y está compuesta de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 76% vidrio, alterado parcialmente a arcilla 18% plagioclasa, de tamaño $\leq 1\text{mm}$, reemplazadas parcialmente por calcita. 5% piroxeno, de tamaño $\leq 1\text{mm}$, alterados totalmente por clorita. $< 1\%$ anfíbol, de tamaño $\leq 1\text{mm}$, alterados totalmente a clorita. <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 15% arcilla como producto de alteración del vidrio 10% calcita reemplazando a cristales de plagioclasa. 6% clorita como producto de alteración de piroxeno y anfíbol. 2% pirita de tamaño $< < 1\text{mm}$, diseminada en toda la roca. <p>Nombre Roca: Andesita afanítica</p>
---	---

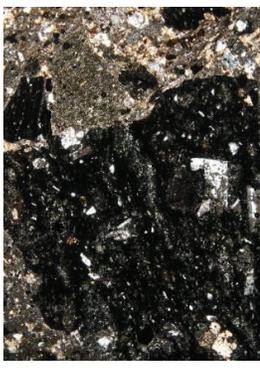
3.2.3.13.5 Fragmentos hidrotermales

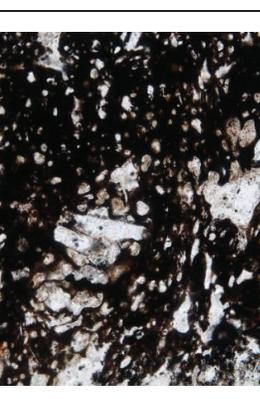
 <p style="text-align: right;">Prof. 248m</p>	<p>Fragmentos angulosos con bordes cuspidados, de tamaño de 3 cm a 2 mm, presentan textura afanítica. Compuesta de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 75% vidrio 15% plagioclasa con ligera tonalidad rojiza 5% piroxenos alterado a clorita 3% anfíbol alterado a clorita 2% óxidos <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 8% clorita, como producto de alteración de piroxenos y anfíboles. $< 1\%$ hematita en forma de pátinas en cristales de plagioclasa. <p>Estos fragmentos también se encontraron en las brechas suprayacentes de: 15.60 a 25.40m y de 33.05 a 47.70m.</p> <p>Nombre Roca: Andesita afanítica (And A2)</p>
---	--

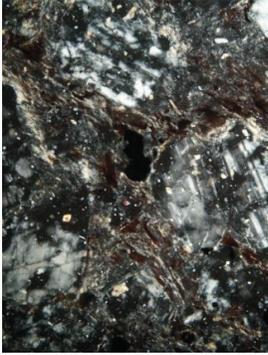
 <p style="text-align: right;">Prof. 196m</p>	<p>Fragmentos subredondeados a subangulosos de tamaño $\leq 1\text{cm}$, color blanquecino. No son abundantes en la diatrema.</p> <p>Nombre: Cuarzo hidrotermal</p>
--	---

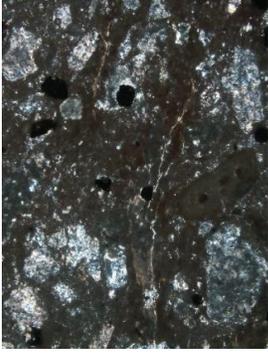
3.2.3.13.6 Fragmentos Piroclásticos

<p>Fragmentos subredondeados a subangulosos, de tamaño de 25 a 5mm. Para la descripción microscópica de estos fragmentos se tomó en cuenta la muestra TTC-9-211.</p> <p>Compuestos de fragmentos y cristales de: 75% pasta de ceniza, alterada parcialmente a arcilla. 20% plagioclasa, de tamaño de 0.5-0.1mm. 3% cuarzo, de tamaño de 0.2-0.1mm. 1% piroxeno, de tamaño de 0.2-0.1mm, alterados totalmente a clorita. 1% óxidos, de tamaño de 0.2-0.05mm.</p> <p>Alteración:</p> <p>30% arcilla como producto de alteración parcial del vidrio 1% clorita como producto de alteración de piroxeno. <1% hematita en forma de pátinas</p>	 <p>Prof. 410.85m</p>  <p>TTC-9-211: Aumento 10X SN</p>  <p>TTC-9-211: Aumento 10X CN</p>
<p>Fragmentos subredondeados a subangulosos de tamaño de 5cm a 2mm. Está compuesta de:</p> <p>90% ceniza, alterada totalmente a esmectita. 8% de fragmentos de plagioclasa, de tamaño ≤ 0.2mm, totalmente reemplazadas por calcita. 1% anfíbol, de tamaño ≤ 0.1mm, alterados a clorita. 1% óxidos</p> <p>Alteración:</p> <p>90% arcilla como producto de alteración de la ceniza. 8% calcita, como producto de reemplazamiento en plagioclasas. 1% clorita como producto de alteración de anfíbol.</p> <p>Estos fragmentos se encontraron en las brechas suprayacentes de: 112.20 a 120.39m de profundidad.</p>	 <p>Prof. 574.40m</p>  <p>TTC-9-131: Aumento 10X SN</p>  <p>TTC-9-131: Aumento 10X CN</p>
<p>Nombre Roca: Toba totalmente alterada a esmectita (Toba 9)</p>	
<p>Nombre Roca: Toba rojiza</p>	

 <p style="text-align: center;">Prof. 315m</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-315: Aumento 10X SN</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-315: Aumento 10X CN</p>
<p>Fragmentos angulosos a subangulosos, de color gris oscuro, de tamaño de 10-0.5mm. Para la descripción microscópica se consideró la muestra TTC-9-315.</p> <p>Están compuestos de fragmentos de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 74% vidrio, de coloración negra, isotrópico. 15% plagioclasa, de forma angular de tamaño de 0.7-0.1mm, algunos cristales presentan inclusiones de máficos (posiblemente anfíbol) completamente alterado a clorita, otros cristales de plagioclasa se encuentran completamente alterados a arcilla y presentan ingreso de soluciones de Fe a través de las fracturas, algunos también han sido reemplazados por calcita. 2% piroxeno, de tamaño $\leq 0.5\text{mm}$, completamente alterados a clorita. 8% fragmentos de toba rojiza (de tamaño de 2mm, compuesta de ceniza (40%), anfíbol (7%) completamente alterado a clorita, fragmentos de plagioclasa (3%). Presenta pátinas de hematita). 1% cuarzo, de tamaño $\leq 0.5\text{mm}$, son de forma angular. <p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 5% arcilla, como producto de alteración parcial en plagioclasas. 3% calcita, como producto de reemplazamiento en fragmentos de plagioclasa. 2% clorita, como producto de alteración de piroxeno. <p>Observaciones:</p> <p>Algunos fragmentos presentan ingreso de matriz.</p> <p style="text-align: right;">Nombre Roca: Toba dacítica negra</p>		

 <p style="text-align: center;">Prof. 315</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-315:Aumento 10X SN</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-315:Aumento 10X CN</p>
<p>Fragmentos subangulosos a subredondeados, de tamaño de 5-2.5mm. Para la descripción petrográfica se tomó en cuenta la lámina TTC-9-315.</p> <p>Presenta textura porosa, formada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> 75% vidrio, de coloración negro 5% plagioclasa, de tamaño $\leq 0.4\text{mm}$ 20% poros redondeados, de tamaño $\leq 0.3\text{mm}$, algunos poros han sido rellenos de calcita. <p style="text-align: right;">Nombre Roca: Pómez dacítica</p>		

 <p style="text-align: center;">Prof. 352m.</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-352:Aumento 10X CN</p>  <p style="text-align: center;">TTC-9-352:Aumento 10X CN</p>
<p>Fragmentos angulosos a subangulosos, de tamaño de 5cm a 2mm. Para la descripción de este fragmento se consideró la LD TTC-9-352.</p> <p>Están compuestos de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 50% fragmentos de cristales de plagioclasa, de tamaño de 2 a 0.05mm, con forma angulosa, están fracturadas y tienen disposición desordenada, presentan muy leve reemplazamiento por calcita. 42% ceniza alterada parcialmente a arcilla. 5% piroxeno, de tamaño de 1 a 0.1mm, totalmente alterados a clorita. 2% óxidos 1% cuarzo, de tamaño de 0.2 a 0.1mm. 	<p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 35% arcilla, como producto de alteración de la ceniza. 5% clorita, como producto de alteración de piroxenos. 3% calcita, como producto de reemplazamiento en plagioclasas. 1% hematita, en forma de pátinas
<p>Nombre Roca: Toba dacítica gruesa</p>	

 <p style="text-align: center;">Prof. 333m.</p>	 <p style="text-align: center;">TTC-9-340:Aumento 10X CN</p>  <p style="text-align: center;">TTC-9-340:Aumento 10X CN</p>
<p>Para su descripción se consideró la muestra de LD TTC-9-340.</p> <p>Está compuesta de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 65% de pasta de ceniza, levemente alterada a arcilla. 25% de fragmentos de cristales de plagioclasa, de tamaño de 4-0.2mm, alterados a arcilla. 5% fragmentos de vidrio de forma alargada (fiammes), de tamaño de 12-1mm, alterados totalmente a arcilla. 3% fragmentos de cuarzo, de tamaño de 0.3 - 0.1mm. 2% piroxeno, de tamaño de 0.5-0.2 mm, alterados totalmente a clorita. 	<p>Alteración:</p> <ul style="list-style-type: none"> 60% arcilla, producto de alteración de plagioclasas, ceniza y en fiammes. 5% pirita, de tamaño de 1.2-0.1mm, diseminada en toda la roca. 2% clorita, producto de alteración de piroxeno. 1% hematita, diseminada en la roca
<p>Nombre Roca: Toba dacítica gruesa con fiammes</p>	

- **Litofacies**

Brecha masiva muy heterogénea, matriz soportada, pobremente sorteada, con fragmentos muy angulosos a subredondeados.

- **Resumen**

Esta brecha presenta una gran cantidad de matriz (65%), formada por roca pulverizada y fragmentos de cristales de plagioclasa, piroxeno, anfíbol, biotita y cuarzo (de tamaño ≤ 2 mm), producto de una gran actividad explosiva.

Los fragmentos de roca que conforman la brecha tienen formas desde angulosas hasta subredondeados. Algunos fragmentos presentan bordes cuspidos, definidos por McPhie (1993) como pedazos de roca con bordes angulosos que pueden ser modificados si los fragmentos permanecen calientes y plásticos después de la depositación y son generados por la fragmentación explosiva de magma y rocas.

Los fragmentos que se encuentran en la brecha varían en tamaño desde más de 2 mm hasta ~ 70 cm, y muy pocos sobrepasan los 2 metros de espesor.

- Los fragmentos juveniles (representan muestras de la erupción del magma, pueden ser parcialmente cristalizados o no cristalizados (Cas y Wright, 1988)) son el vidrio que está totalmente alterado a esmectita y los fragmentos de dacita afanítica, de las cuales algunas presentan bordes de enfriamiento (denominados chilled margins, estos bordes se forman por el rápido enfriamiento del fragmento de roca caliente al momento de incorporarse en la brecha (Sillitoe, 1985)).
- Los fragmentos intrusivos corresponden a una diorita finogranular, que presenta la misma petrografía que los xenolitos encontrados en los Flujos 3 y 4 del pozo TTC-3.
- Fragmentos encontrados en las brechas suprayacentes: And A2 (en la brecha de 33.05 a 47.70 m), And P1 (en las brechas de 15.60 a 25.40 m y de 33.05 a 47.70 m) y Toba 9 (en la brecha de 112.20 a 120.39 m).

Además se encontraron fragmentos de los flujos de lava subyacentes: Flujo 9 (de 576.75 a 716.00 m) y Flujo 11 (773.62 a 805.85 m).

Debido a la presencia de abundante matriz, fragmentos juveniles con bordes de enfriamiento, fragmentos con bordes cuspidos, fragmentos de las unidades supra y subyacentes, se determinó que esta brecha corresponde a una diatrema (que se define como un ventó generado principalmente por una erupción freatomagmática, cuya manifestación en la paleosuperficie es un maar (Sillitoe, 2010). Son generalmente finogranulares, matriz soportadas (50 – 90%), muchas de estas contienen componentes juveniles que generalmente son de composición dacítica; se forman por una explosión subterránea que se produce cuando el magma entra en contacto con un acuífero de manera que se generan múltiples explosiones que involucran la vaporización del agua subterránea, fragmentación de la roca e incorporación de partículas magmáticas (Sillitoe, 1985)).

Los fragmentos de intrusivos y de pórfidos provienen de una zona más profunda, que fue atravesada por la diatrema e incorporó este tipo de fragmentos. La redondez de estos fragmentos se debe al transporte vertical convectivo que se produce mientras la diatrema está activa.

La diatrema presenta un bajo grado de alteración propilítica, caracterizado por la presencia de arcilla, clorita, calcita, sílice y pirita. Esta alteración se atribuye al alto contenido de fluidos hidrotermales durante su formación y posteriormente debido a la microporosidad de la brecha.

Hay una zona de falla normal de bajo ángulo (15 a 20°) en el tramo de 309 a 332 m y en el tramo de 542 a 545 m hay una zona altamente fractura y muy alterada a arcilla.

3.2.3.14 Flujo 9 - Flujo de lava de andesita ácida porfirítica (576.75-716.00 m)

Esta unidad tiene 139.25 m de potencia y está comprendida entre las cotas 3470.38-3331.13 msnm.

- **Petrografía**

Para la descripción petrográfica de este flujo, se tomaron en cuenta las muestras TTC-9-594, TTC-9-605 y TTC-9-649. La roca presenta una textura hipocristalina, porfirítica y poikilítica con matriz intersertal. Al techo del flujo (en los primeros ~40 m) la roca presenta alrededor de 10% de vesículas (de tamaño <1 mm) con formas subredondeadas, alargadas e irregulares.

Compuesta de 24% de fenocristales:

- o 16% Plagioclasa (posiblemente andesina), se identificaron tres tamaños de cristales que representan tres generaciones de cristalización: 1ra (6-3 mm), 2da (2-1 mm) y 3ra (0.5-0.1 mm). Algunos cristales presentan inclusiones de anfíbol, piroxeno y óxidos. La mayoría de fenocristales se encuentran reemplazadas por calcita.
- o 3% de piroxeno, hay dos generaciones de cristales: 1ra (2-1.5 mm) y 2da (0.5-0.1 mm), algunos cristales presentan inclusiones de óxidos. Todos se encuentran alterados a clorita.
- o 3% de anfíbol, hay dos generaciones: 1ra (1.5-1 mm) y 2da (0.5-0.2 mm). Todos se encuentran alterados a clorita.
- o 1% de óxidos (magnetita).
- o <1% Biotita de tamaño de 1.3-0.2 mm

La matriz constituye el 76% de la roca y está formada por:

- o 31% microlitos de plagioclasa alineados subparalelamente entre sí (textura traquítica). Presentan reemplazamiento parcial de calcita.
- o 35% de vidrio parcialmente alterado a arcilla
- o 5% piroxeno, alterados a clorita
- o 4% anfíbol, alterados a clorita

- o 1% de óxidos.

- **Litofacies**

Flujo ligeramente bandeado, formado por una autobrecha en el techo de 34.05 m de espesor, la parte masiva tiene 102.35 m y a la base se encuentra una autobrecha de 2.85 m.

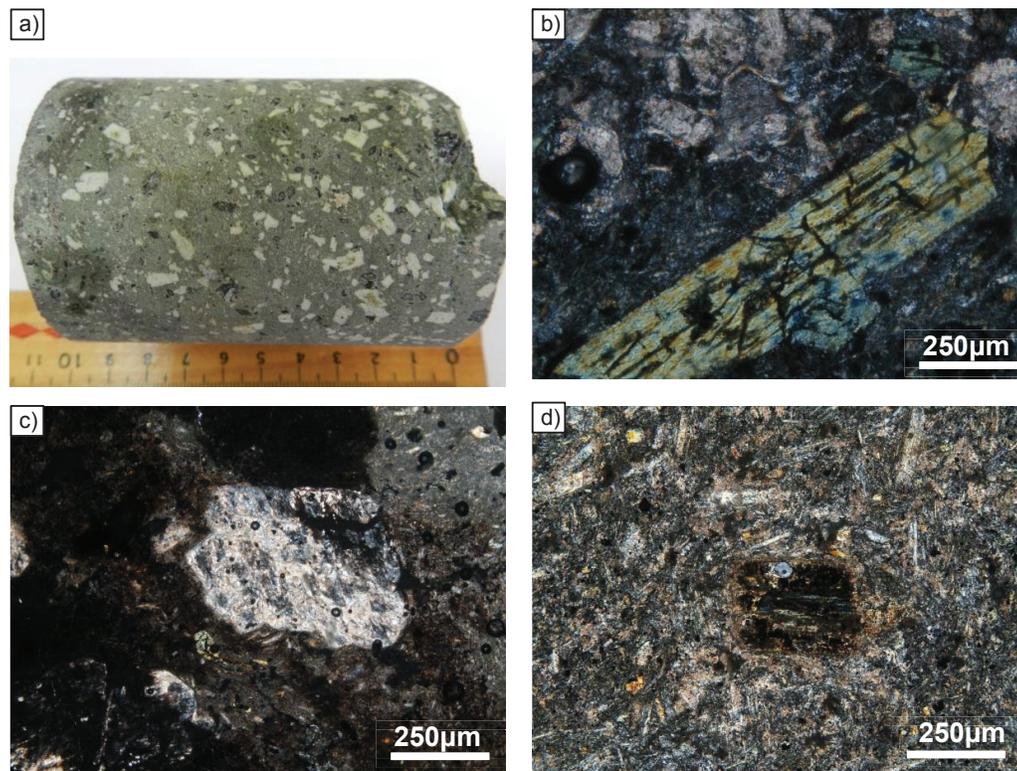


Figura 3.28: a) Muestra TTC-9-594: Andesita ácida porfirítica. b) FNX de cristal de anfíbol completamente alterado a clorita. c) FNX de cristal de plagioclasa reemplazado por calcita. d) FNX de cristal de biotita envuelto en una matriz hipocristalina formada por vidrio y microlitos de plagioclasa.

- **Resumen**

Las vesículas encontradas en las muestras de roca correspondientes a la sección superior del flujo de lava, son evidencia del contenido de gases mientras se mueve en superficie; inicialmente una porción de los gases escapan, pero luego de un tiempo transcurrido, se forma una costra en la parte superior del flujo (capa

fina de lava parcial o totalmente solidificada), la cual impide la salida de los gases que no escaparon previamente.

El contacto al techo este flujo de andesita con la diatrema es un contacto fallado de alto ángulo. A la base se encuentra en contacto discordante con una secuencia de brechas polimícticas.

Se encontraron varios fragmentos de este flujo dentro de la diatrema, pero especialmente son abundantes en cercanías al contacto.

De 608 a 628 m hay una zona de falla de alto ángulo (~55°).

3.2.3.15 Secuencia clásica estratificada de brechas polimícticas (716.00-738.75 m)

Esta unidad tiene 22.75 m de espesor y está comprendida entre las cotas 3331.13-3308.38 msnm.

• Petrografía

Para la descripción petrográfica de esta unidad se tomaron en cuenta las muestras TTC-9-720 y TTC-9-736.

Las brechas de esta unidad tienen textura psefítica con matriz pelítica-psamítica. Se encontraron fragmentos de roca desde angulosos a subredondeados que constituyen aproximadamente el 35% de la roca, y son de las siguientes litologías:

- a) 9% (RA) Toba dacítica con alteración a arcilla:** De tamaño de 12 a 2 mm, está compuesta de:
 - o 97% de pasta fina de ceniza, alterada totalmente a illita
 - o 2% de plagioclasa, reemplazadas por calcita
 - o 1% de cuarzo

- b) 7% (RA) Toba con alteración a arcilla:** De tamaño de 22 a 2 mm, está compuesta de:
- o 81% de pasta de ceniza fina alterada totalmente a illita
 - o 12% de plagioclasa, reemplazadas por calcita
 - o 3% de cuarzo
 - o 2% de piroxeno, alterados a clorita
 - o <1% de biotita, alterados a clorita
 - o <1% de anfíbol, alterados a clorita
 - o <1% de líticos de andesita afanítica
 - o <<1% de trazas de sericita
- c) 6% (RA) Andesita afanítica con alteración argílica:** De tamaño de 12 a 2 mm, presenta textura hipocristalina y está compuesta de:
- o 65% de vidrio alterado totalmente a illita
 - o 30% de plagioclasa, alteradas totalmente a illita
 - o 5% de piroxenos, alterados totalmente a clorita
- d) 6% (RA) Andesita porfirítica con reemplazamiento de calcita:** De tamaño de 4 a 2 mm, con textura hipocristalina y está compuesta de:
- o 58% de vidrio parcialmente alterado a arcilla
 - o 40% de plagioclasa, reemplazadas por calcita
 - o 2% de piroxenos, alterados a clorita y reemplazados por calcita
- e) 4% (RA) Andesita afanítica:** De tamaño de 10 a 2 mm, con textura hipocristalina, compuesta de:
- o 59% de vidrio parcialmente alterado a arcilla
 - o 40% de plagioclasa, reemplazadas levemente por calcita
 - o 1% de anfíbol, alterados totalmente a clorita.
- f) 3% (RA) Dacita porfirítica silicificada:** De tamaño de 2.2 mm, con textura hipocristalina porfirítica, compuesta de:
- o 86% de vidrio reemplazado parcialmente por sílice
 - o 7% de plagioclasa, reemplazadas por calcita

- o 5% de cuarzo
- o 1% de óxidos
- o <1% de biotita, alteradas a clorita
- o La roca se encuentra silicificada (~ 20%).

La matriz de la secuencia de brechas constituye el 65% de la roca y está formada por fragmentos de cristales y rocas de tamaño ≤ 2 mm de: arcilla (20%), plagioclasa (14%), piroxeno (5%), anfíbol (2%), cuarzo (1%), óxidos (1%), andesita afanítica (12%), andesita afanítica totalmente alterada a arcilla (3%), toba dacítica con alteración a arcilla (4%) y dacita porfirítica silicificada (1%).

• Litofacies

La secuencia de brechas es estratificada, presenta gradación inversa, es matriz soportada y pobremente sorteada.

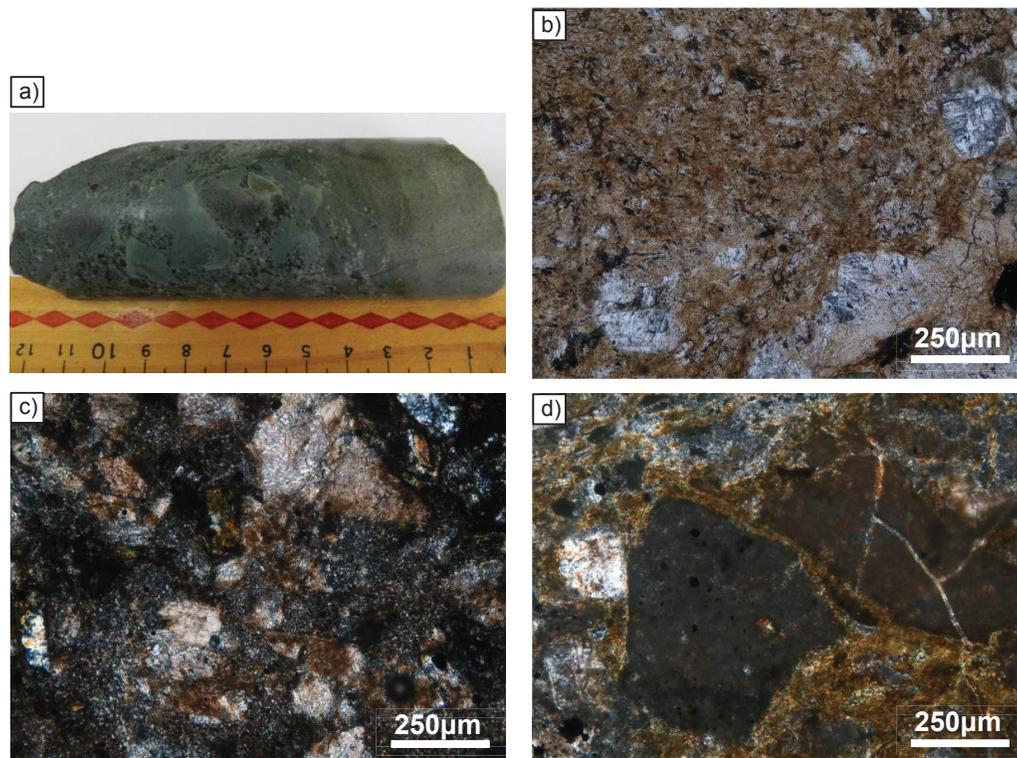


Figura 3.29: a) Muestra TTC-9-736: Fragmento de brecha polimíctica pobremente sorteada. b) FSNX de la muestra TTC-9-736, de toba dacítica con alteración a arcillas. c) FNX de la muestra TTC-9-720, de fragmento de toba con alteración a arcilla. d) FNX de la muestra TTC-9-720, de un fragmento de andesita afanítica totalmente alterada a arcillas.

- **Resumen**

Presenta fragmentos de rocas con alteración propilítica y rocas silicificadas.

La formación de esta secuencia se interpreta como un depósito aluvial que erosionó y transportó diferentes tipos de rocas, siendo las más abundantes las rocas con alteración propilítica.

A la base se encuentra en contacto fallado (de alto ángulo ~50°) con un flujo de lava andesítico.

3.2.3.16 Flujo 10 - Flujo de lava de andesita porfirítica (738.75-773.62 m)

Esta unidad tiene un espesor de 34.87 m y está comprendido entre las cotas 3308.38-3273.51 msnm.

- **Petrografía**

Para la descripción petrográfica de este flujo, se tomó en cuenta la muestra TTC-9-743 y TTC-9-770. La roca presenta una textura hipocristalina, porfirítica, poikilítica y traquítica con matriz intersertal. Compuesta de 21% de fenocristales:

- o 12% de plagioclasa (An 68, labradorita), se identificaron dos tamaños de cristales que representan tres generaciones de cristalización: 1ra (7-3 mm) y 2da (2-1 mm), presentan inclusiones de piroxeno y óxidos. La mayoría de cristales presentan reemplazamiento parcial de calcita.
- o 4% de piroxeno de tamaño de 1 a 0.3 mm, con inclusiones de plagioclasa y óxidos. Los cristales se encuentran alterados a clorita.
- o 3% de anfíbol de tamaño de 1 a 0.2 mm, con inclusiones de óxidos y alterados a clorita.
- o 1% de óxidos (magnetita) de tamaño de 0.5 a 0.1 mm.

La matriz representa el 79% de la roca, y está formada por:

- o 35% de vidrio ocupando los intersticios entre los microlitos

- o 33% de microlitos de tamaño ≤ 0.1 mm de plagioclasa con disposición fluidal
- o 5% de piroxeno, alterados a clorita
- o 4% de anfíbol, alterados a clorita
- o 2% de óxidos

- **Litofacies**

Este flujo es ligeramente bandeado, está formado por una autobrecha de 10.85 m de espesor en el techo, una parte masiva de 24.02 m y no presenta autobrecha en la base.

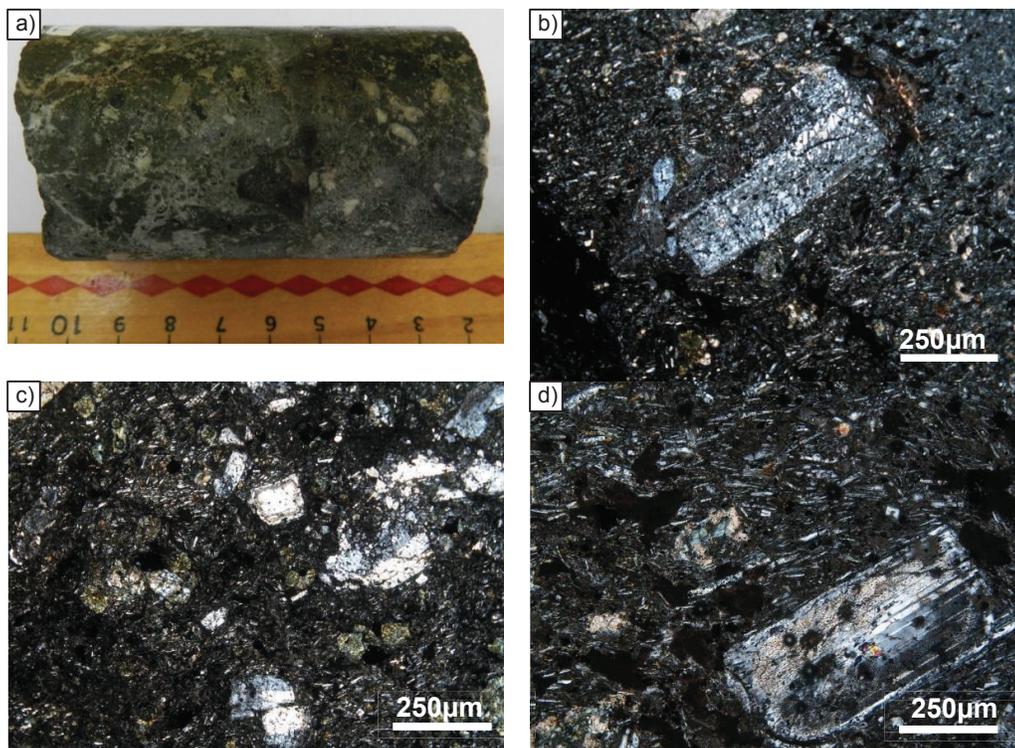


Figura 3.30: a) Muestra TTC-9-743: Núcleo de andesita porfirítica del Flujo 10. b) FNX de la muestra TTC-9-743: Fenocristal de plagioclasa y matriz hipocristalina formada por vidrio y microlitos de plagioclasa. c) FNX de la muestra TTC-9-743: Fenocristales de plagioclasa junto con piroxeno y anfíbol totalmente alterados a clorita. d) FNX de la muestra TTC-9-770: Fenocristal de plagioclasa y de óxidos diseminados en la matriz.

- **Resumen**

A la base se encuentra en contacto concordante con el Flujo 11: lava andesítica.

3.2.3.17 Flujo 11 - Flujo de lava de andesita porfirítica (773.62- 805.85 m)

Esta unidad tiene un espesor de 32.23 m y está comprendida entre las cotas 3273.51-3241.28 msnm.

● Petrografía

Para la descripción petrográfica de este flujo se tomaron en cuenta las muestras TTC-9-777, TTC-9-794 y TTC-9-804. La roca presenta textura hipocristalina, porfirítica y poikilítica con matriz criptocristalina intersertal. Compuesta de 19% de fenocristales:

- o 9% de plagioclasa (An 78, bytownita), se identificaron tres tamaños de cristales que representan tres generaciones de cristalización: 1ra (4-2.2 mm), 2da (1.7-1 mm) y 3ra (0.5-0.2 mm), algunos cristales presentan inclusiones de piroxeno y óxidos. Se encuentran reemplazados por calcita.
- o 5% de piroxeno, hay dos generaciones: 1ra (3-1.5 mm) y 2da (0.5-0.1 mm), algunos cristales presentan inclusiones de óxidos. Se encuentran alterados a clorita.
- o 4% de anfíbol, hay dos generaciones de cristales: 1ra (2-1 mm) y 2da (0.7-0.4 mm). Se encuentran alterados a clorita.
- o 1% de óxidos de tamaño de 0.5-0.3 mm.

La matriz de la roca constituye el 81% de la roca, y está formada por:

- o 34% de vidrio
- o 30% de plagioclasa con disposición fluidal
- o 8% de piroxeno
- o 7% de anfíbol
- o 1% de óxidos

● Litofacies

Este flujo es ligeramente bandeado, está formado por una autobrecha de 7.88 m al techo, una parte masiva de 21.65 m de espesor y la autobrecha de base tiene 2.7 m de espesor.

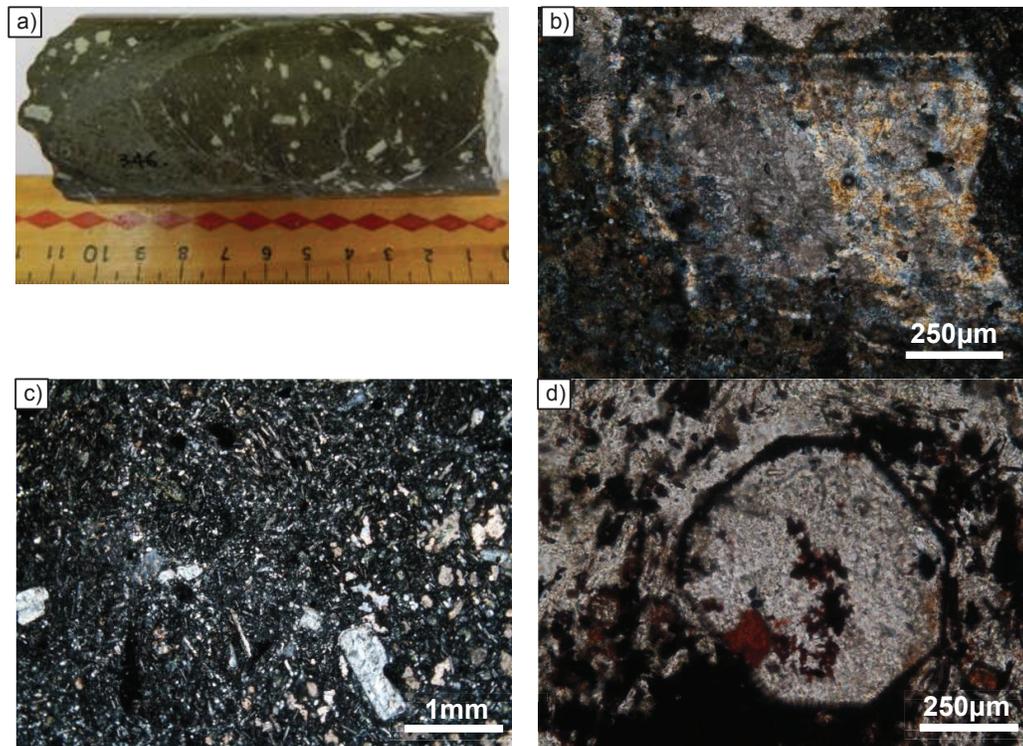


Figura 3.31: **a)** Muestra TTC-9-777: Núcleo de andesita porfírica del Flujo 11. **b)** FNX de la muestra TTC-9-777, de fenocristal de plagioclasa reemplazado parcialmente por calcita **c)** FNX de la muestra TTC-9-804, de la matriz de la roca con textura hipocrystalina formada principalmente por vidrio y microlitos de plagioclasa. **d)** FSNX de fenocristal de piroxeno reemplazado por calcita y con bordes e inclusiones de hematita.

• Resumen

Se encontraron fragmentos de este flujo de lava incluidos en la diatrema, específicamente a 322 m de profundidad, aproximadamente a 400 m más arriba.

A profundidad de 785 a 800 m se encontró una zona de fallamiento transcurrente de alto ángulo ($\sim 60^\circ$)

A la base se encuentra en contacto concordante con un flujo de lava andesítica.

3.2.3.18 Flujo 12 - Flujo de lava de andesita porfirítica (805.85-850.70 m)

Este flujo tiene una potencia de 44.85 m y está comprendido entre las cotas 3241.28-3196.43 msnm.

● Petrografía

Para la caracterización petrográfica de este flujo, se tomaron en cuenta las muestras TTC-9-828 Y TTC-9-838. Las rocas presentan textura hipocristalina, porfirítica y poikilítica con matriz traquítica intersertal. Compuesta de 20% de fenocristales:

- o 10% de plagioclasa (An 75, bytownita), se identificaron dos tamaños de cristales que representan dos generaciones de plagioclasa: 1ra (6-2 mm) y 2da (1.6-0.2 mm). Los cristales presentan macla polisintética y carlsbad. Algunos cristales presentan inclusiones de óxidos, se encuentran fracturados y presentan reemplazamiento parcial de calcita.
- o 5% de piroxeno, de forma subhedral, presentan tamaños desde 1 a 0.15 mm, tienen inclusiones de plagioclasa y óxidos. Se encuentran totalmente alterados a clorita.
- o 3% de anfíbol, de forma subhedral, el tamaño varía desde 1 a 0.3 mm, presentan inclusiones de óxidos. Se encuentran totalmente alterados a clorita.
- o 2% de óxidos en forma de agregados, color negro, disseminados en la roca.

La matriz de la roca representa el 80% y está formada por:

- o 44% de plagioclasa alineados paralelamente entre sí.
- o 30% de vidrio ocupando los intersticios de la roca
- o 3% de óxidos
- o 2% de piroxeno
- o 1% de anfíbol

- **Litofacies**

Flujo bandeado, presenta una autobrecha al techo de 7.61 m de espesor y la parte masiva es de 37.24 m.

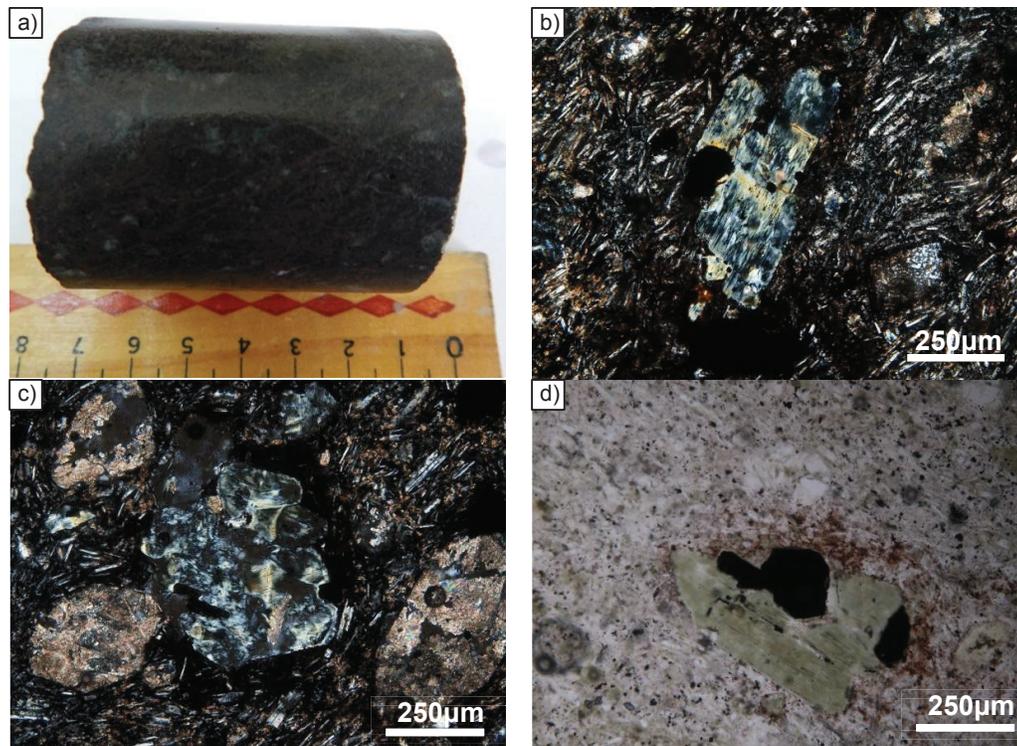


Figura 3.32: a) Muestra TTC-9-828: Testigo de andesita porfírica. b) FNX de la muestra TTC-9-828, de fenocristal de anfíbol, alterado totalmente a clorita, la matriz de la roca es hipocristalina con microlitos de plagioclasa orientados paralelamente entre sí (textura traquítica). c) FNX de la muestra TTC-9-828, de fenocristales de piroxeno alterado a clorita y reemplazado por calcita. d) FSNX de la muestra TTC-9-838, de fenocristal de anfíbol alterado a clorita y con inclusiones de óxidos.

- **Resumen**

A la base se encuentra en contacto concordante con el Flujo 13 de andesita porfírica.

3.2.3.19 Flujo 13 - Flujo de lava de andesita porfirítica (850.70-880.00 m)

Esta unidad tiene una potencia de 29.30 m y está comprendido entre las cotas 3196.43-3167.13 msnm.

● Petrografía

Para la caracterización petrográfica de este flujo, se tomó en cuenta la muestra TTC-9-868. La roca presenta textura hipocristalina, porfirítica y poikilítica con matriz intersertal fluidal. Compuesta de 30% de fenocristales:

- o 20% de plagioclasa, se identificaron dos tamaños de cristales que representan dos generaciones de cristalización: 1ra (4-2 mm) y 2da (0.5-0.15 mm), presentan inclusiones de piroxeno, anfíbol y óxidos, además se encuentran muy fracturados y reemplazados por calcita.
- o 5% de piroxeno en forma subhedral a euhedral, presentan tamaños desde 0.4 a 0.1 mm, se asocian con la magnetita. Se encuentran alterados a clorita.
- o 3% de anfíbol en forma subhedral, con tamaños desde 1 a 0.4 mm, presentan inclusiones de óxidos. Se encuentran alterados a clorita
- o 2% de óxidos de color negro con formas irregulares, diseminados en toda la roca pero con mayor concentración en cristales de piroxeno y anfíbol.

La matriz de la roca representa el 70% y está formada por:

- o 32% de vidrio intersticial
- o 27% de plagioclasa con disposición fluidal.
- o 5% de piroxeno
- o 3% de anfíbol
- o 3% de óxidos

● Litofacies

Flujo bandeado, presenta una autobrecha al techo de 11.30 m de espesor y la parte masiva del flujo es de 18.00 m hasta el final del pozo, sin llegar a la base del flujo.

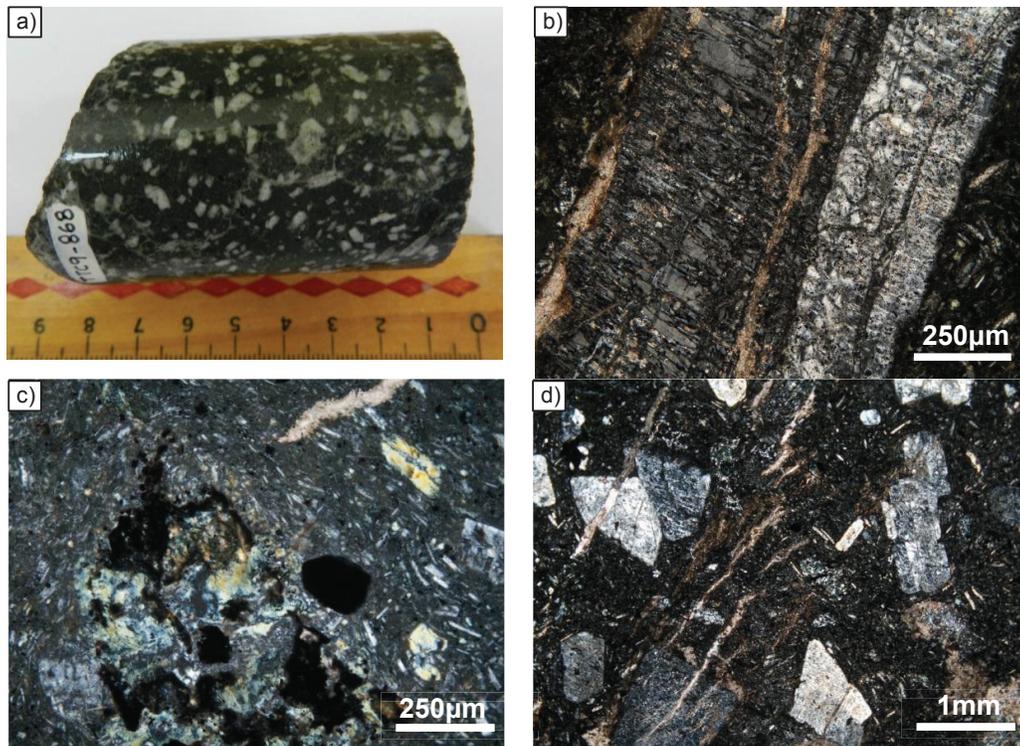


Figura 3.33: a) Muestra TTC-9-868: Testigo de andesita porfírica. b) FNX de fenocristal de plagioclasa fracturado y con leve reemplazamiento de calcita. c) FNX de piroxeno alterado a clorita y asociado con óxidos, en una matriz hipocristalina de vidrio y microlitos de plagioclasa. d) FNX en la que se observa que los fenocristales de plagioclasa están fracturados y la matriz de la roca es vítrea con pocos microlitos de plagioclasa.

- **Resumen**

Este flujo constituye el fin de esta perforación, pero no se observó el contacto basal.

En los tramos de 855-865 m y de 873-880 m se encontró una zona de falla normal de alto ángulo (50 a 60°).

El resumen de la litoestratigrafía del POZO TTC-9 se encuentra en el subcapítulo 3.2.4.3 (Pág. 158) y el esquema litoestratigráfico de los tres pozos se muestra en la Figura 3.38 (Pág.165).

3.2.4 LITOESTRATIGRAFÍA DE LOS TRES POZOS

3.2.4.1 Pozo TTC-2

La litoestratigrafía de este pozo comprende:



Figura 3.34 Esquema litoestratigráfico del Pozo TTC-2

1. Depósito de morrena de aproximadamente 13 m de potencia, se encuentra a una cota de ~3250 msnm, correspondiente al periodo Pleniglacial (35 - >40 ka), formado por fragmentos de brechas polimícticas y de flujos de lava.
2. Flujo 1-Flujo de lava finamente bandeado de dacita afanítica de ~90 m de espesor, que no presenta autobrecha de techo ni de base. Petrográficamente está compuesto de vidrio, plagioclasa (andesina), óxidos, cuarzo, anfíbol, biotita y piroxeno.
3. Secuencia clástica de brechas polimícticas, de ~1 m de espesor, la cual presenta fragmentos volcánicos (andesitas) y metamórficos (gneises). El cuarzo encontrado en estas brechas, es el cuarzo azul de los gneises de la unidad Tres Lagunas, de edad Triásico, correspondiente al basamento metamórfico de la Cordillera Real. De acuerdo a la forma subangular de sus componentes, se asume que la fuente de origen de estos fragmentos es cercana al sitio en el que se depositaron y que la presencia de rocas metamórficas y fragmentos de cuarzo azul son evidencia de que el Pozo TTC-2 se encuentra ubicado cerca al borde de la caldera en donde aflora el basamento metamórfico de la Cordillera Real.
4. Secuencia clástica de brechas polimícticas formada solamente por fragmentos metamórficos (gneises, esquitos, filitas y cuarzo con tonalidad

azul), sub-angulares a sub-redondeados. Los gneises y el cuarzo azul corresponden a la unidad Tres Lagunas, por lo tanto se asume que este pozo se encuentra muy cercano al borde de la Caldera Chacana, donde aflora el basamento metamórfico de la Cordillera Real.

5. Depósito lacustre laminado y microfallado, de ~ 35 cm de espesor, formado por ceniza volcánica muy fina.
6. Flujo 2- Flujo de lava finamente bandeado de dacita afanítica, de ~ 40 m de espesor, no presenta autobrecha de techo ni de base. Petrográficamente está compuesto por vidrio, plagioclasa, cuarzo, anfíbol y óxidos.
7. Depósito lacustre laminado y microfallado, de ~ 1m de espesor, formado por ceniza volcánica muy fina.
8. Secuencia clástica de arenisca gruesa y brecha granular con fragmentos silicificados, presenta gradación inversa, de ~ 1m de espesor. Posiblemente corresponde a un depósito de abanico aluvial o de origen fluvio-lacustre.

3.2.4.2 Pozo TTC-3

La litoestratigrafía de este pozo comprende:

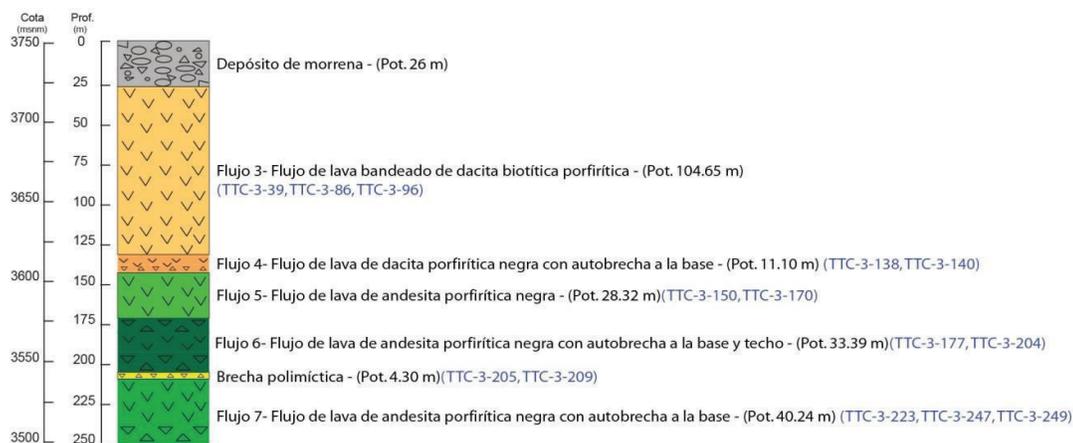


Figura 3.35: Esquema litoestratigráfico del Pozo TTC-3

1. Depósito de morrena, de ~ 26 m de potencia, se encuentra a una cota de ~3748 msnm, correspondiente al periodo Pleniglacial (35 - >40 ka). Formado por fragmentos de brechas polimícticas, flujos de lava y tobas.
2. Flujo 3- Flujo de lava bandeado de dacita biotítica porfirítica, de ~105 m de espesor, compuesto de fenocristales de plagioclasa (andesina), biotita y cuarzo, piroxeno, anfíbol y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, cuarzo, piroxeno, anfíbol y óxidos. Presenta xenolitos de andesita porfirítica y diorita, lo que indica que durante su trayecto a la superficie incorporo fragmentos de cuerpos intrusivos y extrusivos anteriormente emplazados a profundidad. Estos fragmentos también se encontraron en el Flujo 4 y en la diatrema del pozo TTC-9. Una característica sobresaliente de este flujo es la presencia de fenocristales con golfos de corrosión, lo cual sugiere que estuvieron en desequilibrio con el fundido circundante. No presenta autobrechas de techo ni de base.
3. Flujo 4- Flujo de lava de dacita porfirítica negra, es poco potente ~11 m con una autobrecha de ~5 m a la base. Esta lava presenta características petrográficas similares al Flujo 3, lo que se interpreta como dos flujos de lava provenientes de la misma fuente. Petrográficamente está compuesto de fenocristales de plagioclasa (andesina), clinopiroxeno (augita), anfíbol,

ortopiroxeno (hipersteno), biotita y cuarzo en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, piroxeno, anfíbol y óxidos.

4. Flujo 5- Flujo de lava de andesita porfirítica negra, tiene ~28 m de potencia, los fenocristales presentan fracturamiento producto del avance del flujo en superficie. No presenta autobrecha a la base, ni al techo. Petrográficamente está compuesto de fenocristales de plagioclasa (labradorita), clinopiroxeno (augita), ortopiroxeno (hipersteno), anfíbol y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, piroxeno y anfíbol.
5. Flujo 6- Flujo de lava de andesita porfirítica negra, tiene ~33 m de espesor, con una autobrecha de techo de ~ 9 m y una autobrecha de base de ~ 13 m de potencia. Petrográficamente está compuesto de fenocristales de plagioclasa (bytownita), clinopiroxeno (augita), y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, piroxeno y óxidos.
6. Brecha polimíctica, tiene un espesor de ~4, constituye un depósito detrítico local, compuesto por fragmentos subangulosos a subredondeados de andesitas afaníticas.
7. Flujo 7- Flujo de lava de andesita porfirítica negra, tiene ~40 m de espesor con una autobrecha de base de ~14 m. Petrográficamente está compuesto de fenocristales de plagioclasa (bytownita y labradorita), ortopiroxeno (hipersteno), clinopiroxeno (augita), anfíbol (hornblenda) y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, piroxeno, anfíbol y óxidos. La existencia de ortopiroxeno y hornblenda, así como la presencia de plagioclasa cálcica creciendo alrededor de un xenocristal de anfíbol, son indicativos de la mezcla de magmas, debido a la realimentación de un magma básico.

3.2.4.3 Pozo TTC-9

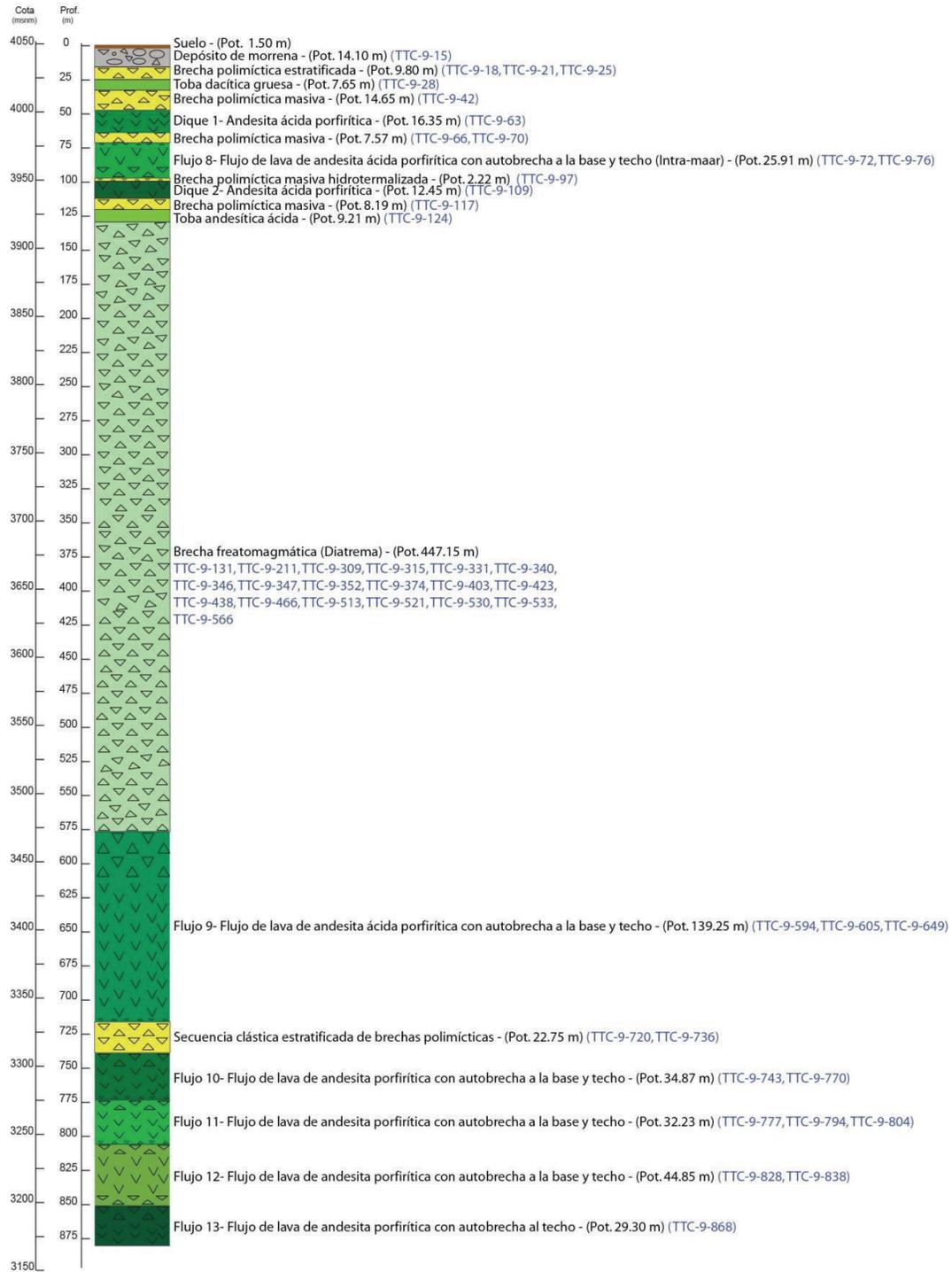


Figura 3.36: Esquema litoestratigráfico del Pozo TTC-9

La litoestratigrafía de este pozo comprende:

1. Suelo, tiene una potencia de ~1.50 m, contiene restos de materia orgánica (p.e., raíces).
2. Depósito de morrena, de ~14 m de potencia, se encuentra a una cota de ~4045.63 msnm y está cubierta por 1.5 m de suelo, se asume que su formación ocurrió durante el Tardiglacial (12-10 ka). Está formado por fragmentos de rocas frescas y alteradas de flujos de lava con textura afanítica y porfírica, que estuvieron expuestos a la erosión glacial y fueron incluidas en la morrena a medida que el glaciar avanzaba.
3. Brecha polimíctica estratificada, tiene ~10 m de potencia y está formada por fragmentos de tobas y de flujos de lava con textura afanítica y porfírica. Presentan abundante cantidad de matriz (60%) formada por ceniza alterada a arcilla y fragmentos de roca pulverizada (≤ 2 mm) de la misma litología de los clastos que componen la brecha; se interpreta que su formación se debe a erupciones explosivas (freatomagmáticas) en las que se produce una alta fragmentación del magma y de las rocas circundantes.
4. Toba dacítica gruesa, tiene ~8 m de potencia y está compuesta por ceniza, cristales y lapilli acrecionario. Este paquete volcanoclástico es interpretado como un depósito derivado de una erupción explosiva, evidencia de esto es la presencia de plagioclasas con formas cuspidadas y con fracturas en forma de cola de golondrina, envueltos en una matriz de ceniza, lo que evidencia un alto grado de fragmentación, típico de erupciones explosivas. Además la presencia de lapilli acrecionario el cual es común en una amplia variedad de depósitos piroclásticos primarios, especialmente formados en erupciones freatomagmáticas (McPhie, 1993).
5. Brecha polimíctica masiva, tiene una potencia de ~15 m, y está formada por fragmentos subangulosos a subredondeados de flujos de lava afaníticos, porfíricos y tobas, algunos de estos fragmentos se encuentran presentes en las brechas suprayacentes y en la diatrema. Se interpreta como un depósito derivado de una erupción explosiva (freatomágmatica), evidencia de esto es la presencia de plagioclasas con formas cuspidadas,

envueltos en una matriz de abundante ceniza (50%), resultado de un alto grado de fragmentación.

6. Dique 1- Andesita ácida porfirítica, tiene una potencia de 16.35 m, presenta cristales alineados subparalelamente entre sí, márgenes de enfriamiento en el dique y zonas quemadas en la roca caja. Compuesto de fenocristales de plagioclasa, piroxeno, anfíbol, biotita y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, piroxeno, anfíbol y óxidos.
7. Brecha polimíctica masiva, tiene una potencia de ~8 m, y está formado por fragmentos de toba, además fragmentos de cristales de plagioclasa con formas cuspidas y con fracturas en cola de golondrina, envueltos en una matriz abundante de ceniza (60%), lo cual es resultado de un alto grado de fragmentación producto de una erupción explosiva.
8. Flujo 8 - Flujo de lava de andesita ácida porfirítica, tiene una potencia de ~26 m, tiene una autobrecha de techo de ~2 m y una autobrecha de base de ~9m. Petrográficamente está compuesto de fenocristales de plagioclasa (labradorita), piroxeno, anfíbol, biotita y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, piroxeno y anfíbol. La mayoría de fenocristales de este flujo se encuentran fracturados, como resultado del enfriamiento rápido durante su avance.
9. Brecha polimíctica masiva hidrotermalizada, tiene ~2 m de espesor y está formada por fragmentos de tobas. Es de origen freatomágmatco, evidenciado por la presencia de plagioclasas con fracturas en cola de golondrina, envueltos en una matriz rica en ceniza (68%) producto de un alto grado de fragmentación.
10. Dique 2- Andesita ácida porfirítica, tiene una potencia de ~12 m. Presenta cristales alineados paralelamente entre sí, siguiendo la dirección del dique, además el contacto entre la intrusión y la roca caja subyacente se encuentra “cocinado”. Compuesto de fenocristales de plagioclasa (andesina), piroxeno, anfíbol y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, piroxeno y óxidos.
11. Brecha polimíctica masiva, tiene una potencia de ~8 m, tiene abundante matriz formada por ceniza alterada a arcilla y presenta líticos con formas cuspidas, lo cual es evidencia de una actividad explosiva. Contiene

fragmentos de andesitas afaníticas y tobas, de los cuales algunos también se encontraron en la diatrema.

12. Toba andesítica ácida, tiene una potencia de ~9 m, está formada por fragmentos de cristales envueltos en una pasta de ceniza, la que se genera debido a la alta fragmentación del magma. Esta toba presenta vesículas que se forman por la presencia de vapor durante la explosión, el cual es evacuado cuando la ceniza es depositada en superficie, generando cavidades vacías en la roca.

Esta serie de brechas y tobas identificadas desde 15.60 hasta 129.60 m, con una potencia total de 114 m, se interpretan como los depósitos del maar, el cual es la manifestación superficial de la diatrema. Los maars se definen como cráteres de forma redondeada que cortan de 10 a más de 500 m de profundidad en una superficie pre-eruptiva. Son formados sub-aéreamente como resultado de erupciones freatomagmáticas. Los depósitos están compuestos por piroclastos juveniles, derivados del magma ascendente, clastos accesorios de rocas volcánicas de erupciones anteriores y clastos derivados de rocas subvolcánicas del basamento (Sigurdsson et al., 2015). Las brechas son polimícticas, mayoritariamente masivas, contienen abundante matriz de ceniza y fragmentos de rocas volcánicas y piroclásticas, de los cuales algunos también están dentro de la diatrema. Las tobas están compuestas de una pasta de ceniza que engloba cristales con fracturas en forma de cola de golondrina y bordes cuspidos, además algunas tobas contienen lapilli acrecionario. Los depósitos del maar se encuentran atravesados por los Diques 1 y 2 e interrumpidos por el flujo de lava andesítico ácido porfírico (Flujo 8- Intra-maar).

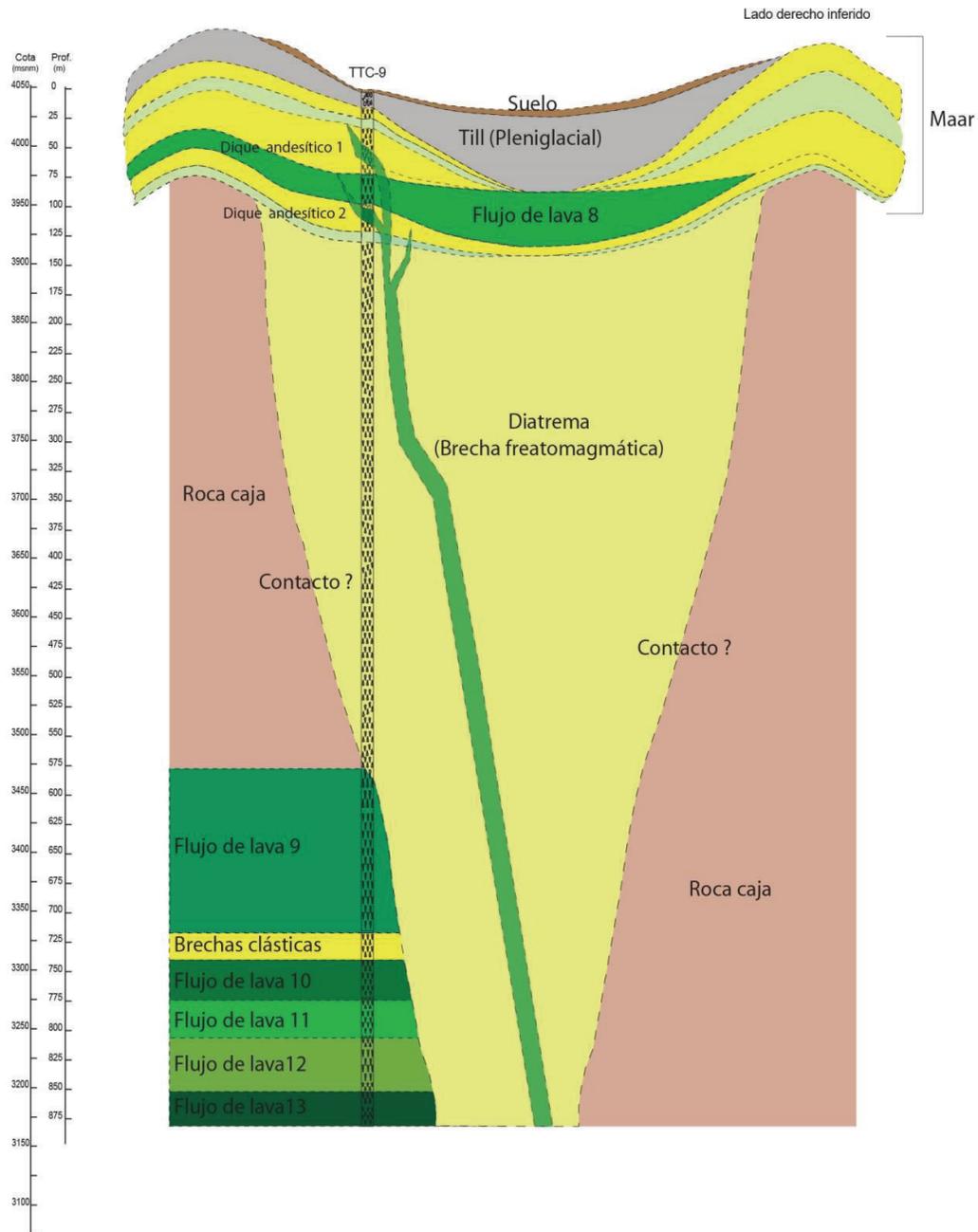


Figura 3.37: Modelo propuesto de la diatrema y maar.

13. Brecha freatomagmática (Diatrema): A una profundidad de 129.60 a 576.75 m, con una potencia de ~447 m, se encontró una brecha con abundante matriz de ceniza (~65%) y con fragmentos de roca angulosos a subredondeados de fragmentos: juveniles (vidrio alterado a esmectita y dacita afanítica), volcánicos, intrusivos, pórfidos, piroclásticos e

hidrotermales. Algunos fragmentos presentan bordes cuspidos generados por la fragmentación explosiva de magma y rocas, algunos de los fragmentos juveniles presentan bordes de enfriamiento. Además esta brecha incorpora algunos fragmentos encontrados en las brechas suprayacentes (maar), así como también fragmentos de los flujos de lava subyacentes. Con estas características se determinó que esta brecha corresponde a una diatrema formada por una erupción freatomagmática.

Los fragmentos de la diatrema constituyen el 35% de la brecha y han sido agrupados en seis familias y ordenados de acuerdo a su abundancia (en base al 100%):

Tipo de fragmento	(%)	Fragmentos repetidos
Rocas volcánicas	67	Flujo 9, Flujo 11, And P1 (encontrada también en las brechas del maar de 15.60-25.40 m y 33.05-47.70 m de profundidad), And A2 (encontrada también en las brechas del maar de 15.60-25.40 m y 33.05-47.70 m de profundidad).
Rocas piroclásticas (Tobas)	15	Toba 9 (encontrada también en las brechas del maar de 112.20 a 120.39 m de profundidad).
Pórfidos	12	Encontrados solo en la diatrema
Juveniles	5	Encontrados solo en la diatrema
Intrusivos	<1	Dioritas encontradas en los Flujos 3 y 4 del pozo TTC-3 en forma de xenolitos.
Hidrotermales	<<1	Encontrados solo en la diatrema

Tabla 3.1: Resumen de fragmentos encontrados en la diatrema comunes con otros depósitos

14. Flujo 9 - Flujo de lava de andesita ácida porfirítica, tiene una potencia de ~139 m, tiene una autobrecha de techo de ~34 m y una autobrecha de base de ~3m. Petrográficamente está compuesto por fenocristales de plagioclasa (andesina), piroxeno, anfíbol, biotita y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, piroxeno, anfíbol y óxidos. Se encuentra ligeramente vesiculado hacia el techo del flujo. Se encontraron fragmentos de este flujo dentro de la diatrema.
15. Secuencia clástica estratificada de brechas polimicticas, tiene una potencia de ~23 m, tiene abundante matriz formada por ceniza alterada a arcilla y fragmentos de cristales y de andesitas, dacitas y tobas.

16. Flujo 10 - Flujo de lava de andesita porfirítica, tiene una potencia de ~35 m, tiene una autobrecha de techo de ~11 m y no presenta una autobrecha de base. Petrográficamente está compuesto por fenocristales de plagioclasa (labradorita), piroxeno, anfíbol y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, piroxeno, anfíbol y óxidos.
17. Flujo 11- Flujo de lava de andesita porfirítica, tiene una potencia de ~32 m, tiene una autobrecha de techo de ~8 m y una autobrecha de base de ~3m Petrográficamente está compuesto por fenocristales de plagioclasa (bytownita), piroxeno, anfíbol y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, piroxeno, anfíbol y óxidos. Se encontraron fragmentos de este flujo dentro de la diatrema.
18. Flujo 12- Flujo de lava de andesita porfirítica, tiene una potencia de ~45 m, tiene una autobrecha de techo de ~8 m y no presenta una autobrecha de base. Petrográficamente está compuesto por fenocristales de plagioclasa (bytownita), piroxeno, anfíbol y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, óxidos, piroxeno y anfíbol.
19. Flujo 13- Flujo de lava de andesita porfirítica, tiene una potencia de ~29 m (hasta donde llega la perforación de este pozo) tiene una autobrecha de techo de ~11 m y no se pudo determinar si presenta una autobrecha de base, debido a que la perforación no llega hasta la base del flujo. Petrográficamente está compuesto por fenocristales de plagioclasa (bytownita), piroxeno, anfíbol y óxidos en una matriz vítrea con microlitos de plagioclasa, piroxeno, anfíbol y óxidos.



ESQUEMA LITOSTRATIGRÁFICO DE LOS POZOS TTC-2, TTC-3 Y TTC-9 DEL INTERIOR DE LA CALDERA CHACANA

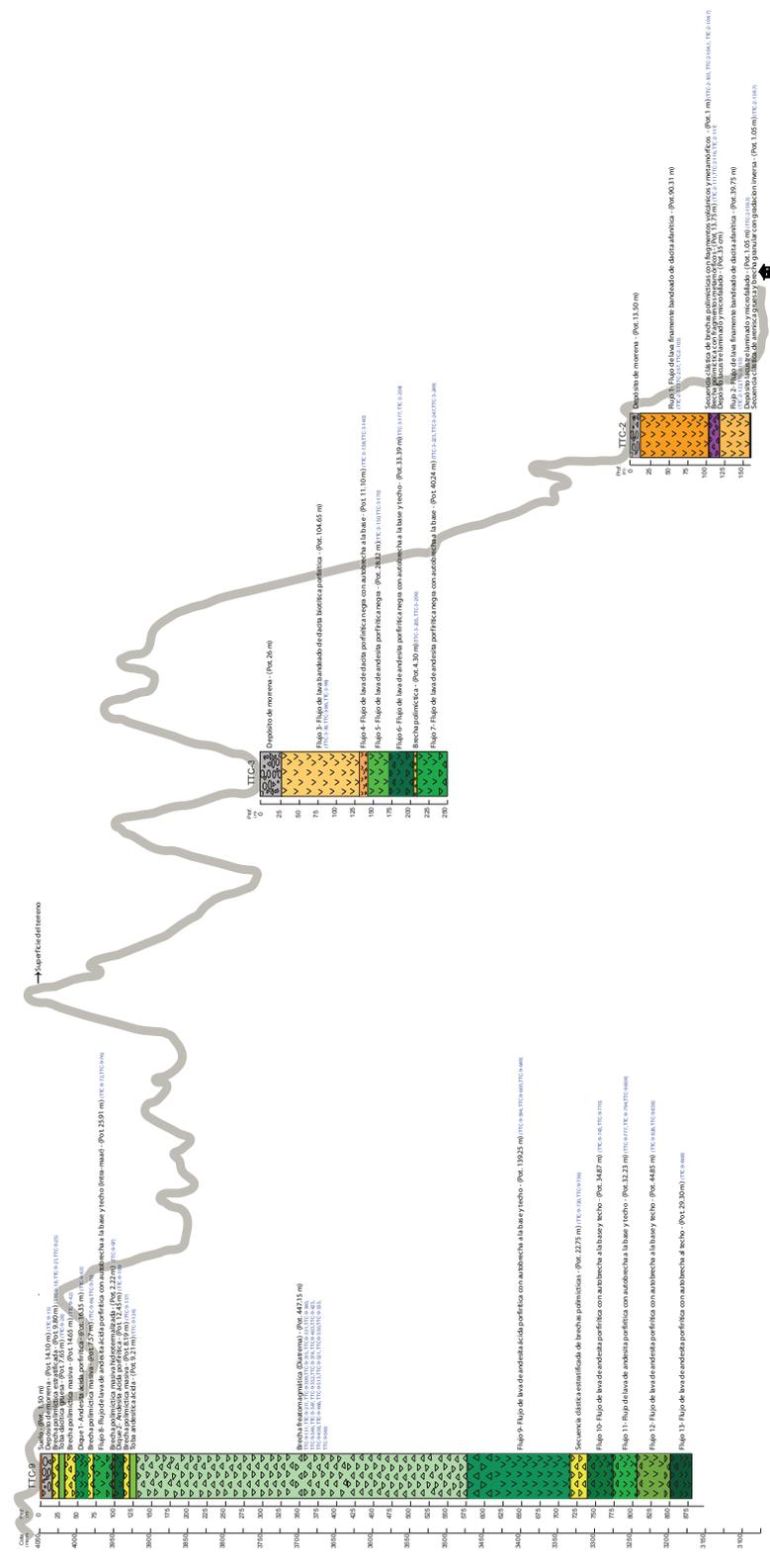


Figura 3.38: Esquema litostratigráfico de los pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9

3.3 ANÁLISIS DE ELEMENTOS RADIOACTIVOS

3.3.1 INTRODUCCIÓN

Todas las rocas y suelos son naturalmente radioactivos. Los rayos gamma son relacionados al decaimiento espontáneo de los elementos radiactivos. Los tres elementos con radioactividad natural más comunes son el U, Th y K, los que se encuentran en concentraciones variables en los minerales que forman las rocas (Ford, et al., 2008).

El potasio se encuentra principalmente en los feldespatos, los cuales son abundantes y ampliamente distribuidos en la corteza terrestre, también se encuentra en otros minerales como biotita y muscovita. Uranio y torio están generalmente presentes en concentraciones bajas (medidas en partes por millón) en un amplio rango de minerales. El torio es relativamente inmóvil y su concentración permanece constante (Ford, et al., 2008).

Uranio y torio se encuentran presentes en minerales como arcillas, feldespatos, minerales pesados, fosfatos y materia orgánica (Schnyder, et al 2006). En cuanto a las relaciones radiométricas, los altos ratios de K/Th indican una fuente volcánica (Gould, et al., 2014), y los altos ratios de Th/K indican alteración hidrotermal (Ford, et al., 2008).

Rock Type	Potassium (%)		Uranium (ppm)		Thorium (ppm)	
	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range
Felsic Extrusives	3.1	1.0 – 6.2	4.1	0.8 – 16.4	11.9	1.1 – 41.0
Felsic Intrusives	3.4	0.1 – 7.6	4.5	0.1 – 30.0	25.7	0.1 – 253.1
Intermediate Extrusives	1.1	1.1 – 2.5	1.1	0.2 – 2.6	2.4	0.4 – 6.4
Intermediate Intrusives	2.1	0.1 – 6.2	3.2	0.1 – 23.4	12.2	0.4 – 106.0
Mafic Extrusives	0.7	0.06 – 2.4	0.8	0.03 – 3.3	2.2	0.05 – 8.8
Mafic Intrusives	0.8	0.01 – 2.6	0.8	0.01 – 5.7	2.3	0.03 – 15.0
Ultramafic	0.3	0 – 0.8	0.3	0 – 1.6	1.4	0 – 7.5
Alkali Feldspathoidal	6.5	2.0 – 9.0	29.7	1.9 – 62.0	133.9	9.5 – 265.0
Intermediate Extrusives						
Alkali Feldspathoidal	4.2	1.0 – 9.9	55.8	0.3 – 720.0	132.6	0.4 – 880.0
Intermediate Intrusives						
Alkali Feldspathoidal	1.9	0.2 – 6.9	2.4	0.5 – 12.0	8.2	2.1 – 60.0
Mafic Extrusives						
Alkali Feldspathoidal	1.8	0.3 – 4.8	2.3	0.4 – 5.4	8.4	2.8 – 19.6
Mafic Intrusives						
Chemical Sedimentary Rocks	0.6	0.02 – 8.4	3.6	0.03 – 26.7	14.9	0.03 – 132.0
Carbonates	0.3	0.01 – 3.5	2	0.03 – 18.0	1.3	0.03 – 10.8
Detrital Sedimentary Rocks	1.5	0.01 – 9.7	4.8	0.01 – 80.0	12.4	0.2 – 362.0
Metamorphosed Igneous Rocks	2.5	0.1 – 6.1	4	0.1 – 148.5	14.8	0.1 – 104.2
Metamorphosed Sedimentary Rocks	2.1	0.01 – 5.3	3	0.1 – 53.4	12	0.1 – 91.4

Tabla 3.2: Concentraciones de radioelementos en diferentes clases de rocas. Tomada de Killeen, 1979

El Espectrómetro de Rayos Gamma (GRS) provee una medida directa de la concentración de elementos radioactivos, con el que se puede diferenciar litologías y alteración relacionada a depósitos superficiales. El GRS está diseñado para detectar los rayos gamma asociados a los elementos radioactivos y ordenar con precisión los rayos gamma detectados por su respectiva energía (Ford, et al., 2008).

Debido a que la concentración de cada elemento radioactivo varía entre cada tipo de roca, el GRS ayuda a diferenciar las litologías. Las rocas alteradas por un proceso de mineralización poseen una firma que ayuda en la exploración, esta firma se refiere a cambios en la concentración de los elementos radioactivos con respecto a la roca caja original, por ejemplo en la alteración potásica hay enriquecimiento de K (Ford, et al., 2008).

3.3.2 INTERPRETACIÓN DE DATOS DE U, Th Y K EN LOS POZOS

Para la medición de la concentración de U, Th y K en las rocas se utilizó el espectrómetro de rayos gamma BGO-SUPER-SPEC RS-230, con el cual se tomaron medidas en las 192 muestras de los tres pozos. Los datos obtenidos con el espectrómetro se adjuntan en el Anexo No 4.

A continuación se muestran los rangos de las concentraciones de elementos radioactivos (U, Th y K) en función de la litología. Dichas concentraciones se presentan en porcentaje para el potasio y en partes por millón (ppm) para el torio y uranio.

La cantidad de potasio presente en las rocas se asume que es la misma que el protolito debido a que la alteración que han sufrido estas rocas es sub-propilítica y este tipo de alteración no aporta con K al sistema.

Pozo TTC-2

Litología	Rango K (%)	Rango U (ppm)	Rango Th (ppm)
Flujo 1: Dacita Afanítica	1.1-1.6	1.0-3.6	3.5-7.0
Brecha Polimíctica 1	1.2-1.4	2.0-4.4	3.2-5.9
Brecha de metamórficos	1.1-1.8	1.3-2.8	4.7-8.4
Flujo 2: Dacita afanítica	1.2-1.5	1.2-2.1	5.9-7.5
Depósito Lacustre 2	1.5	1.6-1.8	5.9-6.6
Arenisca	1.3	2.7	6.0

Tabla 3.3: Elementos radioactivos del pozo TTC-2.

El pozo TTC-2 se ha podido determinar que en los dos flujos de lava dacíticos (Flujo 1 y 2) la cantidad de potasio es similar y está en un rango de 1.1 a 1.6%. En cuanto al uranio, el Flujo 1 presenta de 1-3.6 ppm y el Flujo 2 presenta rangos de 1.2-2.1 ppm, lo que indica que el Flujo 1 está ligeramente más enriquecido en U, por lo que posiblemente el Flujo 1 es ligeramente más félsico. El torio es un elemento inmóvil, el cual se encuentra en el Flujo 1 en concentraciones de 3.5 a 7 ppm, en el Flujo 2 en rangos de 5.9 a 7.5 ppm, lo que indica que el Flujo 2 está más enriquecido en Th.

La brecha de fragmentos metamórficos posee mayor concentración de potasio que la brecha polimíctica. La cantidad de uranio en la brecha polimíctica es mayor que en la brecha de metamórficos y que en el resto de litologías, esto puede ser debido a la presencia de algún fragmento muy rico en U. La brecha de metamórficos es la litología que presenta mayor rango de Th, esto posiblemente se debe a la presencia de fragmentos de Tres Lagunas, que son sedimentos finos fundidos (material cortical) ricos en U y Th.

El depósito lacustre y de arenisca presentan valores similares en la concentración de K y Th, pero la arenisca se encuentra más enriquecida en U que el depósito lacustre.

Pozo TTC-3

Litología	Rango K (%)	Rango U (ppm)	Rango Th (ppm)
Flujo 3: Dacita biotítica porfirítica	1.1-1.6	1.0-3.6	3.5-7.0
Flujo 4: Dacita Porfirítica negra	1.2-1.4	2.0-4.4	3.2-5.9
Flujo 5: Andesita Porfirítica	1.1-1.8	1.3-2.8	4.7-8.4
Flujo 6: Andesita Porfirítica	1.2-1.5	1.2-2.1	5.9-7.5
Brecha polimíctica 2	1.5	1.6-1.8	5.9-6.6
Flujo 7: Andesita Porfirítica negra	1.3	2.7	6.0

Tabla 3.4: Elementos radioactivos del pozo TTC-3.

Los flujos de la base de este pozo (Flujo 5, 6 y 7) tienen una composición andesítica, mientras que los flujos superiores (Flujo 3 y 4) son de composición dacítica. En las concentraciones de elementos radioactivos no se observa una tendencia que refleje claramente este proceso de diferenciación. Pero en los flujos dacíticos la cantidad de potasio en el Flujo 3 es mayor que en el Flujo 4, lo que podría indicar que el Flujo 3 es ligeramente más ácido; sin embargo el Flujo 4 está más enriquecido en U. En cuanto al potasio en los flujos andesíticos, si es evidente la diferenciación, incrementa la cantidad de K desde el Flujo 7 hasta el Flujo 5.

La brecha polimíctica está formada por fragmentos volcánicos que tienen rangos de elementos radioactivos similares a los de las rocas volcánicas adyacentes.

Pozo TTC-9

Litología	Rango K (%)	Rango U (ppm)	Rango Th (ppm)
Brecha polimíctica	1.2-1.5	0.9-4.3	6.2-8.0
Toba andesítica	1.2-1.4	2.5-3.0	2.2-6.3
Brecha polimíctica	1.1-1.2	2.3-3.5	4.7-6.8
Dique 1: Andesita Porfírica	1.1-1.5	2.2-2.3	5.0-6.4
Brecha polimíctica	1.3-1.5	1.3-1.4	1.5-3.0
Flujo 8: Andesita Porfírica	1.1-1.5	1.7-4.7	3.3-6.5
Brecha polimíctica	1.3	2.1	6.3
Dique 2: Andesita Porfírica	1.1-1.3	1.7-4.7	3.3-6.5
Brecha polimíctica	1.3-1.4	1.5-2.8	5.1-8.7
Toba andesítica ácida	1.4	3.6	3.9
DIATREMA (Brecha Freatomagmática)	1.0-1.8	1.2-5.2	3.1-9.2
Flujo 9: Andesita Porfírica	1.3-1.5	1.0-3.1	2.5-9.5
Brecha Polimíctica	1.3-1.5	2.3-3.4	2.4-7.0
Flujo 10: Andesita porfírica	1.1-1.4	1.0-4.0	4.1-7.5
Flujo 11: Andesita Porfírica	1.3-1.6	1.8-2.9	4.4-6.6
Flujo 12: Andesita Porfírica	1.0-1.4	1.2-4.5	4.5-6.4
Flujo 13: Andesita Porfírica	1.3	3.1-4.0	4.9-5.5

Tabla 3.5: Elementos radioactivos del pozo TTC-9.

Los valores de U, Th y K en las muestras no presentan una tendencia clara que diferencie las unidades, debido a que los cambios litológicos y composicionales no son drásticos. Todos los flujos de lava de este pozo tienen una composición intermedia andesítica, con concentraciones de K que varían en un rango de 1 a 1.8%; de U en un rango de 1 a 4.7 ppm y de Th en un rango de 2 a 9.5 ppm.

Las brechas polimícticas clásticas están formadas por fragmentos de rocas volcánicas y piroclásticas de composición intermedia, los cuales presentan rangos de concentración de elementos radioactivos de K de 1.1 a 1.5%, de U de 1 a 4.5 pmm y de Th de 1.5 a 8.7 ppm, estas concentraciones son muy similares a las de los flujos andesíticos.

Las tobas andesíticas presentan concentración de Potasio de 1.2 a 1.4%, de Uranio de 2.5 a 3.6 y de Torio de 2.2-6.3 ppm, estos valores de elementos radioactivos son inferiores a los de las lavas y brechas polimícticas clásticas.

La brecha freatomagmática (diatrema) presenta concentraciones de potasio de 1 a 1.8%, de uranio de 1.2 a 5.2 ppm y de torio de 3.1 a 9.5 ppm; estos valores presentan un poco más de variación en el rango de los elementos radioactivos, esto se debe a que esta brecha presenta varios tipos de fragmentos: juveniles afaníticos, porfiríticos, piroclásticos, porfídicos e intrusivos.

En general, los datos obtenidos no muestran un contraste o tendencia bien definida para determinar la litoestratigrafía de los pozos. Posiblemente este resultado es poco acertado porque se realizó en muestras que no necesariamente son continuas, sino más bien en muestras representativas de los pozos separadas una cierta distancia una de la otra, por otro lado las brechas polimícticas contienen fragmentos de rocas de varias litologías, lo cual no permite tener una buena correlación entre los datos.

CAPÍTULO 4

4. CARACTERIZACIÓN DE LA ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN LOS POZOS TTC-2, TTC-3 Y TTC- 9

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la caracterización de la alteración hidrotermal en las rocas de los pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9, la cual se define por la paragénesis mineral: esmectita, illita-esmectita, illita, clorita, calcita, zeolitas, hematita, pirita, cuarzo y sílice. De acuerdo a la descripción de la mineralogía de alteración común en sistemas hidrotermales realizada por Corbett y Leach (1997), el grupo de minerales presentes en las rocas de este estudio corresponden a alteración sub-propilítica, no llega a ser alteración propilítica porque no se ha encontrado epidota y/o adularia.

Los minerales característicos de la alteración propilítica se forman a través de la recristalización de los minerales principales de la roca inicial y de la incorporación de H_2O , CO_2 y H_2S en presencia de agua clorurada. Illita, esmectita y calcita se forman a través de la alteración hidrolítica en presencia de agua-vapor caliente rica en CO_2 (Simmons y Browne, 2000). El dióxido de carbono y el cloruro se originan desde la profundidad en un sistema hidrotermal y su inclusión dentro del fluido principal es externamente controlado por celdas convectivas que se forman cuando el agua meteórica entra en contacto con una fuente de calor (Giggenbach, 1986). La concentración de cationes mayores en el fluido es controlada por la interacción fluido-roca (Giggenbach, 1984). Con el fin de facilitar la comprensión de los conceptos de sistema, fluido y alteración hidrotermal, en el subcapítulo 4.2 se encuentra un marco conceptual.

Para definir la mineralogía de alteración en las rocas de los tres pozos, se realizó la descripción macroscópica y mesoscópica (logueo) de 1290m de testigos de

perforación, el estudio petrográfico de 73 láminas delgadas y el análisis de 360 espectros de terraspec en 192 muestras de roca. Con estos datos, en el subcapítulo 4.3 se presenta una caracterización de cada uno de los minerales de alteración encontrados y un esquema de la distribución espacial de estos minerales en los pozos (Figura 4.43).

4.2 MARCO CONCEPTUAL

4.1.1 SISTEMA HIDROTHERMAL Y SUS COMPONENTES

Un sistema hidrotermal puede ser definido como la distribución de fluidos calientes circulando bajo la superficie de la Tierra, en distintas direcciones (tanto lateral como verticalmente), a diferentes temperaturas y presiones. La presencia, movimiento y afectación de estos fluidos sobre la roca, sean o no descargados a la superficie, constituyen la actividad hidrotermal. Una definición más rigurosa incluye la situación geológica dentro de la cual la circulación de fluidos es generada y mantenida durante un periodo de tiempo suficiente para formar una concentración anómala de minerales metálicos (Pirajno, 2009).

Un sistema hidrotermal consiste de dos componentes esenciales: una fuente de calor que provee la energía necesaria (magmática, gradiente geotérmico, decaimiento radiogénico, metamorfismo) y una fase fluida que incluye soluciones derivadas de fluidos magmáticos/juveniles, fluidos metamórficos, fluidos meteóricos, agua congénita o agua de mar. Un sistema hidrotermal necesita un sistema de conducción como fallas, fracturas o litologías permeables que transporten las soluciones a un sitio de depositación (Pirajno, 2009).

Un depósito mineral hidrotermal es formado por la circulación de fluidos calientes (50 a >500°C) que filtran, transportan y subsecuentemente precipitan su carga mineral en respuesta a los cambios en las condiciones físico-químicas (Pirajno, 2009).

Las rocas dentro de las cuales el depósito es formado pueden presentar varios grados de alteración hidrotermal y de intensidad de alteración. La alteración se produce cuando el conjunto de minerales de la roca inicial están en desequilibrio

físico-químico con los fluidos hidrotermales y por lo tanto tienden a re-equilibrarse formando nuevos conjuntos de minerales que son estables en las nuevas condiciones (Pirajno, 2009).

Es muy importante hacer una distinción entre conjunto de minerales (*mineral assemblages*) y asociación de minerales (*mineral association*). Conjunto de minerales hace referencia a un grupo de minerales que se forman más o menos al mismo tiempo y son estables conjuntamente; esencialmente definen las condiciones físico-químicas de un sistema. Y asociación mineral es un grupo de minerales que están juntos, pero no están necesariamente en equilibrio y no se forman al mismo tiempo (Pirajno, 2009).

4.1.2 FLUIDOS HIDROTERMALES

Un fluido hidrotermal es definido como una solución acuosa caliente (50 a >500°C) que contiene Na, K, Ca, Cl como componentes mayores, así como también otros elementos menores como Mg, B, S, Sr, CO_2 , H_2S , NH_4 , Cu, Pb, Zn, Sn, Mo, Ag y Au. El agua de una solución hidrotermal puede ser de origen meteórico, agua de mar, congénita, metamórfica, juvenil o magmática. La mayoría de soluciones hidrotermales tienen una mezcla de orígenes en las que una o más de las fuentes puede predominar (Pirajno, 2009).

Dentro de un sistema hidrotermal, el movimiento de los fluidos es en gran parte controlado por fuerzas boyantes (de empuje) que conducen la pluma hidrotermal y por la estructura de permeabilidad que distribuye los fluidos (Simmons y Browne, 2000), los fluidos calientes ascienden y los fríos bajan.

4.1.2.1 Tipos de fluidos hidrotermales

Un fluido clorurado o agua clorurada, se caracteriza por tener un pH casi neutro, con una alta concentración de CO_2 (2.7 %), un ratio CO_2/H_2S de 132, H_2S de 0.015% y con temperaturas de ~300°C (Hedenquist, 1990). El término agua clorurada se refiere al componente dominante en el líquido, que ha perdido la mayor parte de su dióxido de carbono disuelto a través de la ebullición (boiling en

inglés) (Simmons y Browne, 2000). La ebullición resulta del fraccionamiento de gases disueltos dentro de una fase de vapor que migra a la superficie independientemente de la fase líquida (Giggenbach, 1980). Si el vapor se condensa dentro de un cuerpo de agua subterránea en la zona vadosa, el H_2S puede ser oxidado a H_2SO_4 produciendo un fluido-vapor ácido sulfatado caliente con un pH de 2 a 3, ligeramente clorurado (casi cero o cero) y con temperaturas de 100 a 130°C. Si el vapor condensa dentro de un cuerpo de agua subterránea sin un reservorio de oxígeno (bajo la zona vadosa), puede resultar un fluido rico en CO_2 , con un pH aproximadamente neutro, levemente clorurado, con un ratio CO_2/H_2S de 300 a 1000 y temperatura de 120 a 180°C (Hedenquist, 1990).

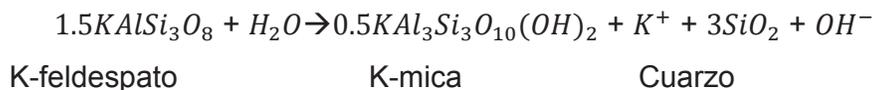
4.1.3 ALTERACIÓN HIDROTERMAL

La alteración hidrotermal es un proceso complejo que involucra cambios mineralógicos, químicos y texturales; resulta de la interacción de fluidos acuosos calientes con las rocas a través de las cuales circulan. La alteración puede desarrollarse bajo condiciones sub-sólidas magmáticas debido a la acción e infiltración de fluidos supercríticos dentro de masas rocosas. A temperaturas y presiones bajas, la exsolución de gases y fases acuosas de los fluidos hidrotermales que actúan en las rocas circundantes, producen cambios como resultado del desequilibrio debido al H^+ , OH^- y otros constituyentes volátiles. Los factores principales que controlan los procesos de alteración son: (1) la naturaleza de la roca inicial; (2) la composición de los fluidos; y (3) la concentración, actividad y potencial químico de los componentes del fluido (H^+ , CO_2 , O_2 , K^+ , H_2S y SO_2). La circulación hidrotermal y la alteración generalmente involucran grandes cantidades de fluidos que pasan a través de las rocas que son consideradas como permeables debido a la presencia de fracturas o poros conectados (Pirajno, 2009).

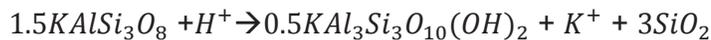
4.1.3.1 Alteración hidrolítica o metasomatismo del ion hidrógeno

Es un fenómeno que involucra la descomposición iónica de H_2O en H^+ y OH^- . En la alteración hidrotermal H^+ o el OH^- son consumidos durante la reacción con los minerales silicatados, de manera que la relación H^+/OH^- cambia. La fuente de iones de H^+ puede ser de reacciones sub-sólidas durante el metasomatismo alcalino, el agua o ácidos en la solución hidrotermal. La conversión de silicatos anhidros es una reacción que consume H^+ e introduce iones metálicos en la solución, esto a su vez afecta el pH de la solución y su poder para disolver o mantener cationes en la solución (Pirajno, 2009).

Un ejemplo típico de descomposición hidrolítica de feldespato es:



La suma de las dos reacciones nos da:



Se ve que el K^+ es introducido en la solución y el H^+ es consumido.

Se considera que la hidratación es la transferencia de moléculas de agua desde un fluido al mineral y frecuentemente acompaña a la hidrólisis.

Las reacciones donde un catión es reemplazado por otro en un mineral, son llamadas intercambios de base (Pirajno, 2009).

En resumen, la hidrólisis, la hidratación y los intercambios de base controlan la estabilidad de los minerales silicatados, el pH de la solución y la transferencia de cationes dentro de la solución. Son los responsables de la agrupación de minerales en la alteración hidrotermal propilítica, argílica, sericítica o filica y potásica. Áreas de intensa actividad hidrolítica son usualmente sometidas a alteración propilítica en donde el fenómeno de hidratación (Adición de agua y CO_2) es dominante (Pirajno, 2009).

4.1.3.2 Estilos y tipos de alteración hidrotermal

Los términos que describen y clasifican la alteración hidrotermal pueden ser expresados como una función de: (1) reconocimiento de la agrupación de minerales y (2) los cambios químicos.

Los principales estilos de alteración son: pervasiva, selectivamente pervasiva y no pervasiva. La alteración pervasiva es caracterizada por el reemplazamiento de la mayoría o de todos los minerales que forman la roca original y resulta de la parcial o total obliteración de la textura original. La alteración selectivamente pervasiva se refiere al reemplazamiento de específicos minerales originales por ejemplo la clorita reemplazando a la biotita; en este caso la textura original es preservada. La alteración no pervasiva significa que solo ciertas porciones de la roca han sido afectadas por los fluidos hidrotermales (Pirajno 2009).

Alteración potásica y propilítica

La alteración potásica es esencialmente común e importante en los sistemas tipo pórfido y epitermales, ocurre en zonas de alta temperatura y en condiciones neutras a alcalinas (Pirajno, 2009; Corbett y Leach, 1997). Los minerales característicos de esta alteración son K-feldespatos y biotita en pórfidos; y adularia en sistemas epitermales. Frecuentemente también sulfuros como calcopirita, pirita y molibdenita. La alteración sílica potásica se forma como un reemplazamiento de plagioclasa y minerales máficos a temperaturas entre 600 – 400°C. Los grupos de minerales comunes son K-feldespatos-biotita-cuarzo, K-feldespatos-clorita, K-feldespatos-biotita-magnetita, acompañados de otros minerales como albita, sericita, anhidrita, apatito y ocasionalmente rutilo (Pirajno, 2009).

La alteración propilítica está caracterizada por la adición de H_2O y CO_2 . Los minerales típicos en esta alteración son epidota, clorita, carbonatos, albita, K-feldespatos y pirita. También puede aparecer sericita, óxidos de hierro, montmorillonita y zeolitas. La alteración propilítica tiende a ser más pervasiva hacia la parte interna de un depósito hidrotermal (Pirajno, 2009). Se forma en condiciones neutras a alcalinas en rangos de temperatura de 200 a 250°C

(Corbett y Leach, 1997). Cuando la alteración es dominada por zeolitas en lugar de epidota, el término sub-propilítica puede ser aplicado (Corbett y Leach, 1997).

En los sistemas hidrotermales actuales, de manera generalizada, la alteración propilítica es producto de la circulación de fluidos clorurados-sódicos calientes, con temperaturas entre 200 y 350°C (González-Partida, et al., 2000).

Alteración fílica

La alteración fílica o sericítica es tipificada por el grupo de minerales de cuarzo-sericita-pirita. Las fases minerales asociadas con la alteración son K-feldespato, caolinita, calcita, biotita, rutilo, anhidrita y apatito. Esta alteración se debe esencialmente a la desestabilización de feldespatos en la presencia de H^+ , OH^- , K y S, para formar cuarzo, mica blanca, pirita y a veces calcopirita (Pirajno, 2009). Se forma en rangos de pH de 4 a 5 y a temperaturas entre 200 y 250°C (Corbett y Leach, 1997).

Alteración argílica, argílica intermedia y argílica avanzada

La alteración argílica es caracterizada por la formación de minerales arcillosos debido al intenso metasomatismo del hidrógeno y la lixiviación de ácidos a temperaturas entre 100 y 300°C. Este tipo de alteración es común en sistemas tipo pórfidos. Los minerales arcillosos resultan del reemplazamiento de plagioclasas y silicatos máficos como la hornblenda y biotita (Pirajno, 2009).

La alteración argílica intermedia está definida por la presencia de montmorillonita, illita, clorita, arcillas del grupo del caolín (caolinita, dickita, halloysita, hallofano) y en menor cantidad sericita (Pirajno, 2009). Esta alteración se forma a temperaturas relativamente bajas (200-250°C) y con pH moderado (aproximadamente 4-5) (Corbett y Leach, 1997).

La alteración argílica avanzada se produce debido al intenso ataque de ácidos y la lixiviación de cationes alkali que provocan la destrucción de feldespatos y máficos. Dickita, caolinita, pirofilita, barita, alunita y diáspora son las fases minerales típicas en este tipo de alteración. También pueden estar presentes

sulfuros, topacio, turmalina y arcillas amorfas (Pirajno, 2009). La alteración argílica avanzada comprende fases minerales que son formadas en condiciones de bajos pH (≤ 4) (Corbett y Leach, 1997).

Como veremos en las siguientes páginas, la alteración hidrotermal en los pozos estudiados es de tipo sub-propilítica.

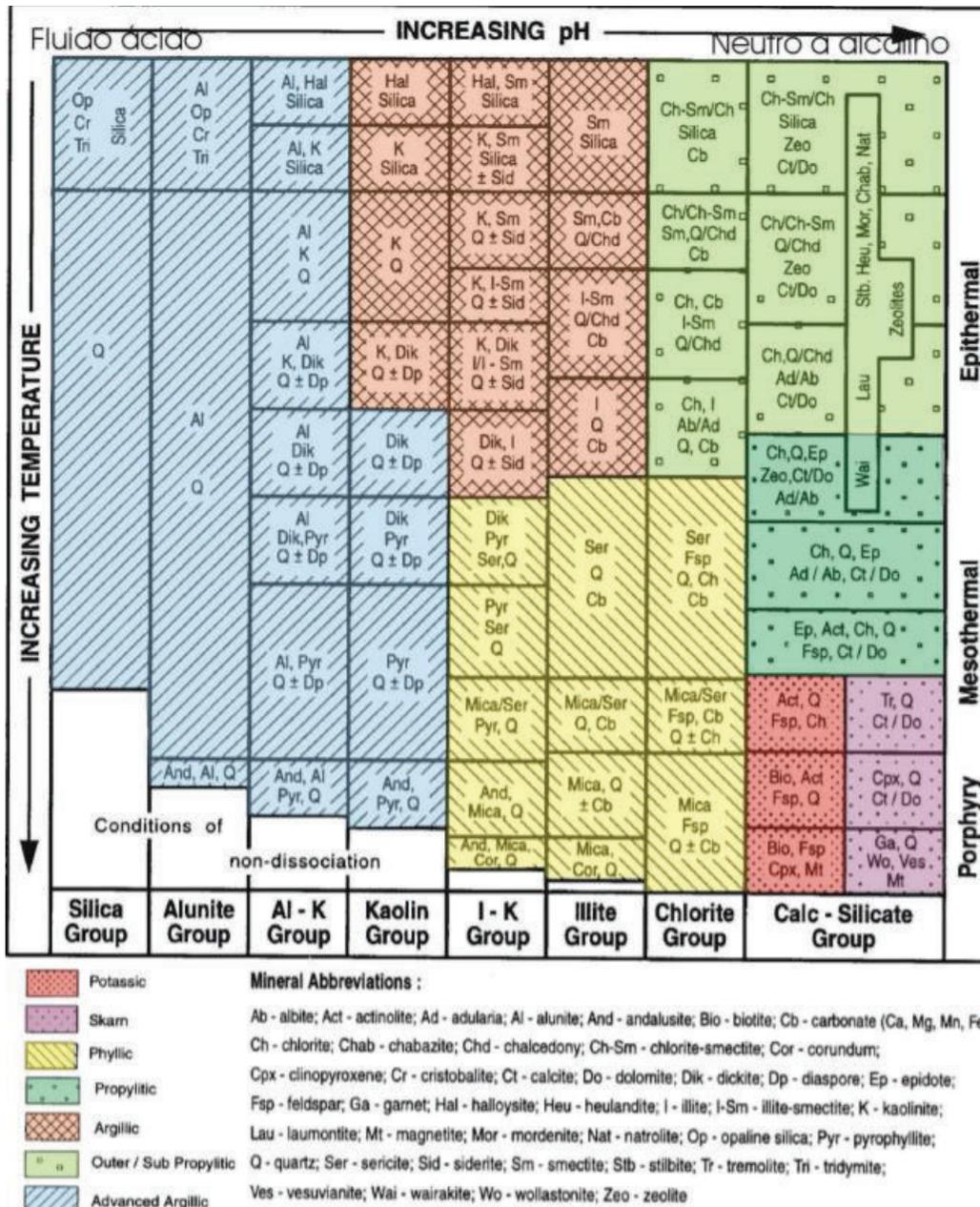


Figura 4.1: La mineralogía de alteración común en sistemas hidrotermales es resumida en el esquema descrito por Corbett y Leach, 1997.

4.2 OCURRENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE LOS MINERALES DE ALTERACIÓN EN LOS POZOS

Los minerales de alteración encontrados en los tres pozos son: arcilla (esmectita, illita-esmectita e illita), clorita, calcita, hematita, pirita, sílice, cuarzo y zeolitas; estos minerales corresponden a una zona de alteración sub-propilítica.

Para la caracterización de estos minerales se realizaron estudios petrográficos macroscópicos, microscópicos y espectrales, cuyos resultados se detallan a continuación, en la descripción de cada mineral.

En la Figura 4.2 se muestra el esquema de los pozos con la distribución espacial de los minerales de alteración.

4.2.1 ARCILLA

Tanto macroscópicamente y microscópicamente, se identificó que la arcilla en los flujos de lava se forma principalmente como producto de la alteración del vidrio y en menor cantidad como producto de alteración parcial de plagioclasas. En las brechas la arcilla se concentra en la matriz y en menor cantidad en los fragmentos líticos, debido a que la matriz es la zona permeable de la roca, en la que los fluidos hidrotermales circulan con mayor facilidad.

La arcilla también se encuentra presente en las vetillas hidrotermales que están asociadas con: (1) calcita - clorita – arcilla, (2) sílice – arcilla, y (3) arcilla – hematita. En este caso la arcilla es producto de una depositación directa a partir de las soluciones hidrotermales (Browne and Ellis, 1970).

Macroscópicamente la arcilla encontrada es de color verde turquesa y es muy suave. Microscópicamente presenta aspecto pulverulento, es generalmente de color café y con nicols cruzados es isotrópica; pero la arcilla en los poros es cristalina, es de color verde claro, tiene forma acicular (es un filosilicato) y con nicols cruzados los colores de interferencia son de café a verde.

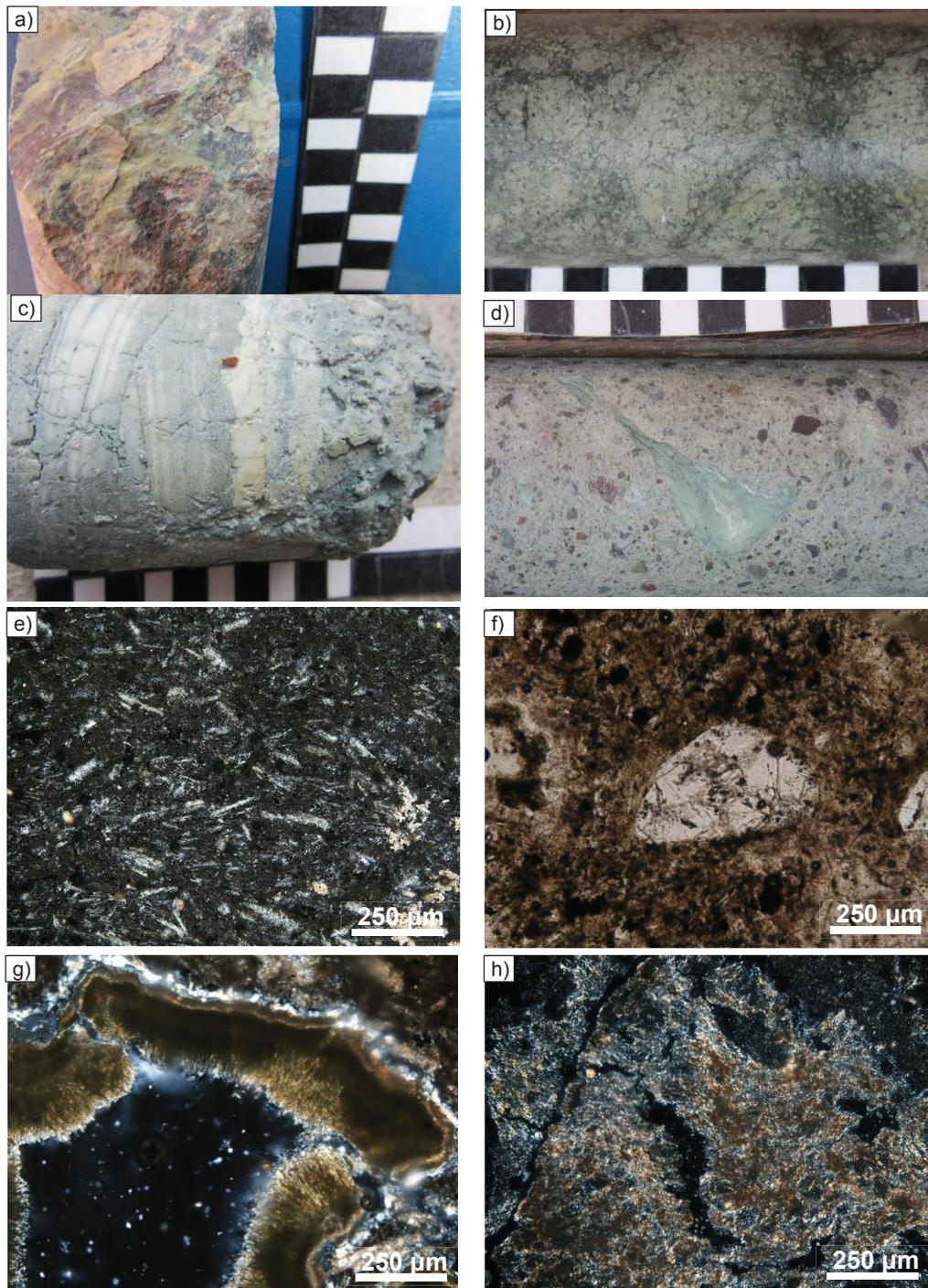


Figura 4.3: **a)** Fotografía a 104.70m de profundidad en el pozo TTC-2, muestra un espejo de falla. **b)** Fotografía de 72.15-72.28m de profundidad en el pozo TTC-9, muestra una autobrecha de andesita con alto grado de alteración a arcilla y clorita. **c)** Fotografía de 118.65-118.75m de profundidad en el pozo TTC-9, muestra la matriz de una secuencia de brechas totalmente alterada a arcilla. **d)** Fotografía de 198.20 – 198.30m de profundidad en el pozo TTC-9, muestra un fragmento angular de vidrio volcánico totalmente alterado a arcilla, además la matriz de la brecha está conformada mayoritariamente por arcilla. **e)** FCNX de la muestra TTC-2-103: se observa que el vidrio de la matriz y los cristales de plagioclasa de la dacita se encuentra parcialmente alterados a arcilla. **f)** FSNX de la muestra TTC-3-86, la matriz de la roca está levemente alterada a arcilla. **g)** FCNX de la muestra TTC-9-28: se observan vesículas rellenas por arcilla, la arcilla se encuentra cristalina. **h)** FCNX de la muestra TTC-9-131: fragmento de vidrio completamente alterado a arcilla, macroscópicamente d.

Con la interpretación de 360 espectros de Terraspec (ver Anexo 3), se logró identificar tres tipos de arcillas en las rocas de los tres pozos: esmectita, intercrecimiento de illita-esmectita e illita. La presencia de dichas arcillas es común en una zona de alteración sub-propilítica y propilítica (Corbett y Leach, 1997).

Los espectros de la arcilla del grupo de la illita y esmectita se caracterizan por tener picos pronunciados en ~1400 nm (este pico hace referencia a la presencia de OH), ~1900 nm (este pico hace referencia a la presencia de H₂O) y el pico en ~2200 nm (este pico hace referencia a la presencia de Aluminio) (Spectral International, Inc., 2005) (Fig. 4.4). Los espectros de estas arcillas se diferencian ya que la esmectita a partir de ~2200 nm no presenta ningún pico, por el contrario el espectro de la illita posee varios picos después de 2200 nm; y el intercrecimiento de illita-esmectita presenta inflexiones después del pico de 2200 nm. A continuación se encuentran los espectros típicos de estas arcillas:

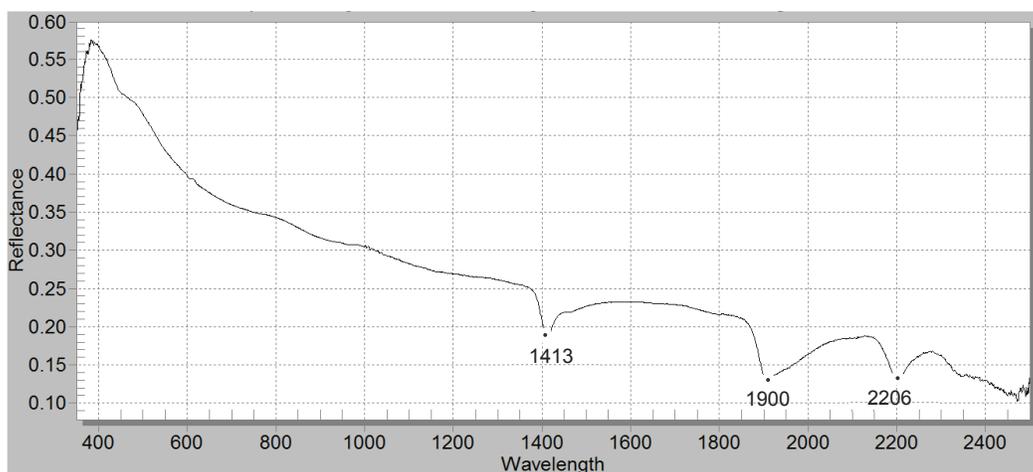


Figura 4.4: Espectro de esmectita de la muestra TTC-2-104.7

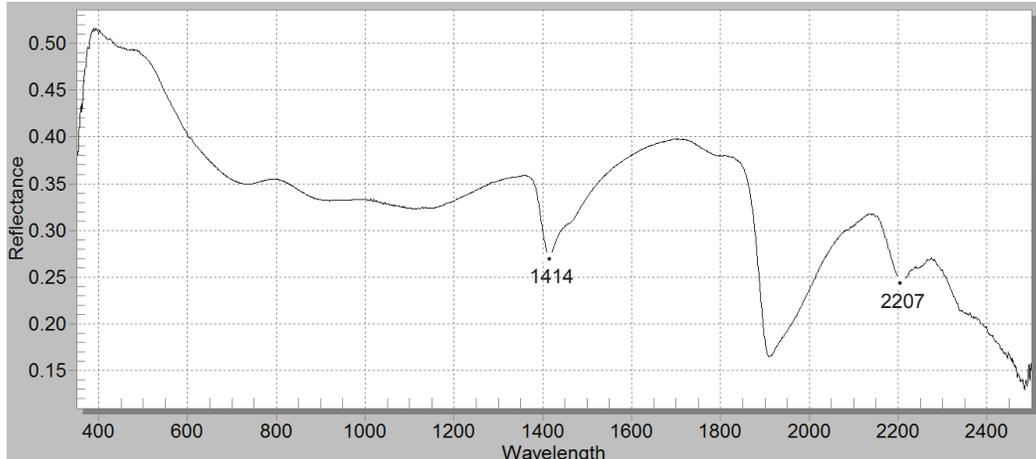


Figura 4.5: Espectro de illita-esmectita de la muestra TTC-9-118

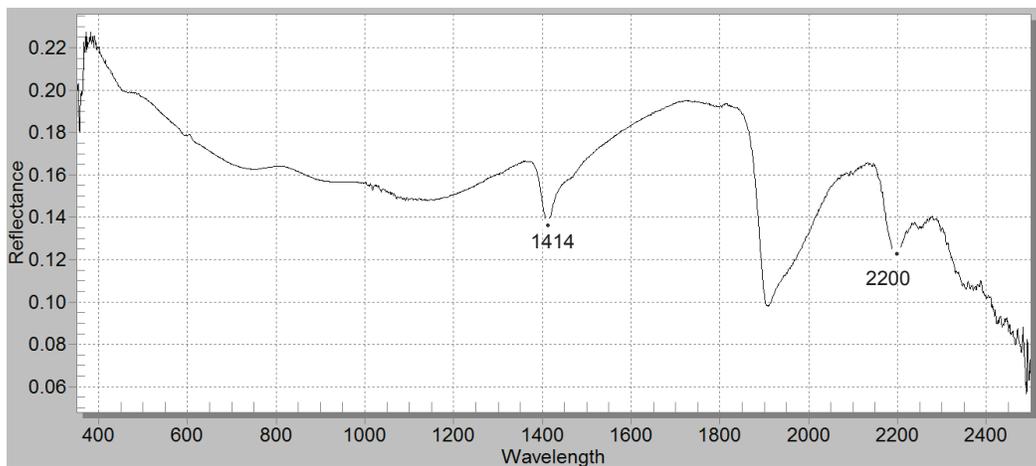


Figura 4.6: Espectro de illita de la muestra TTC-9-346.7

En la Tabla 4.1 se muestra la distribución de las arcillas en los pozos, la distribución espacial se encuentra en la Figura 4.2.

	POZO TTC-9	POZO TTC-3	POZO TTC-2
ESMECTITA	15.60 m – 110 m	26.10 m - 250 m	13.50 m – 105 m
ILLITA-ESMECTITA	110 m - 310 m	-	105 m -160 m
ILLITA	310 m -880 m	-	-

Tabla 4.1: Distribución de las arcillas en los pozos

La zonación determinada por la presencia de estos tres tipos de arcillas, nos indica un aumento en la temperatura dentro del sistema hidrotermal: la esmectita

domina a temperaturas menores a 150°C (Simmons y Browne, 2000), el intercrecimiento illita – esmectita a temperaturas sobre los 200°C (Browne, 1978) y la illita a temperaturas mayores a 200°C (Simmons y Browne, 2000).

4.2.2 CLORITA

En zonas de alto grado de alteración hidrotermal donde la temperatura excede los 200°C, en condiciones de soluciones neutras a alcalinas es común encontrar clorita trioctahedral (Inoue, 1992). La composición química de la clorita es influenciada por los modos de ocurrencia, la composición original de la roca, de la temperatura y la composición de las soluciones (Shikazono y Kawahata, 1987), en zonas de alteración propilítica es principalmente controlada por la composición de la roca original, ya que la alteración propilítica ocurre bajo condiciones casi isoquímicas (Inoue, 1992).

La clorita rica en magnesio (Mg-Clorita) se forma bajo condiciones levemente oxidantes y con bajos pH. En ese caso, a veces se encuentra asociada con la sudoita (Al-Clorita). La clorita rica en hierro (Fe-Clorita) se forma en condiciones reductoras (Inoue, 1992) y posiblemente precipite durante la ebullición (boiling) en respuesta a la liberación de Al y Fe a partir de la disociación de $Al(OH)_4^-$ y $Fe(OH)_4^-$ de una solución (Reed y Spycher, 1985).

En los tres pozos existe abundante cantidad de clorita, principalmente como producto de alteración de los minerales ferromagnesianos (piroxeno, anfíbol y biotita) que se encuentran presentes en los flujos de lava y en los fragmentos líticos de las brechas. En menos cantidad también se encontró clorita en vetillas hidrotermales asociada con la arcilla, calcita y sílice; en los planos de falla se encontró clorita junto a la calcita, además en poros y cavidades de las rocas lo cual indica que la clorita también fue depositada directamente a partir de las soluciones hidrotermales. La clorita y el intercrecimiento illita-clorita pueden formarse a temperaturas de más de 145°C (Browne, 1978).

La distribución de clorita indica que su estabilidad es en gran parte independiente de la profundidad, permeabilidad y temperatura; y su abundancia está relacionada

con el contenido inicial de hierro de las rocas no alteradas (Browne and Ellis, 1970).

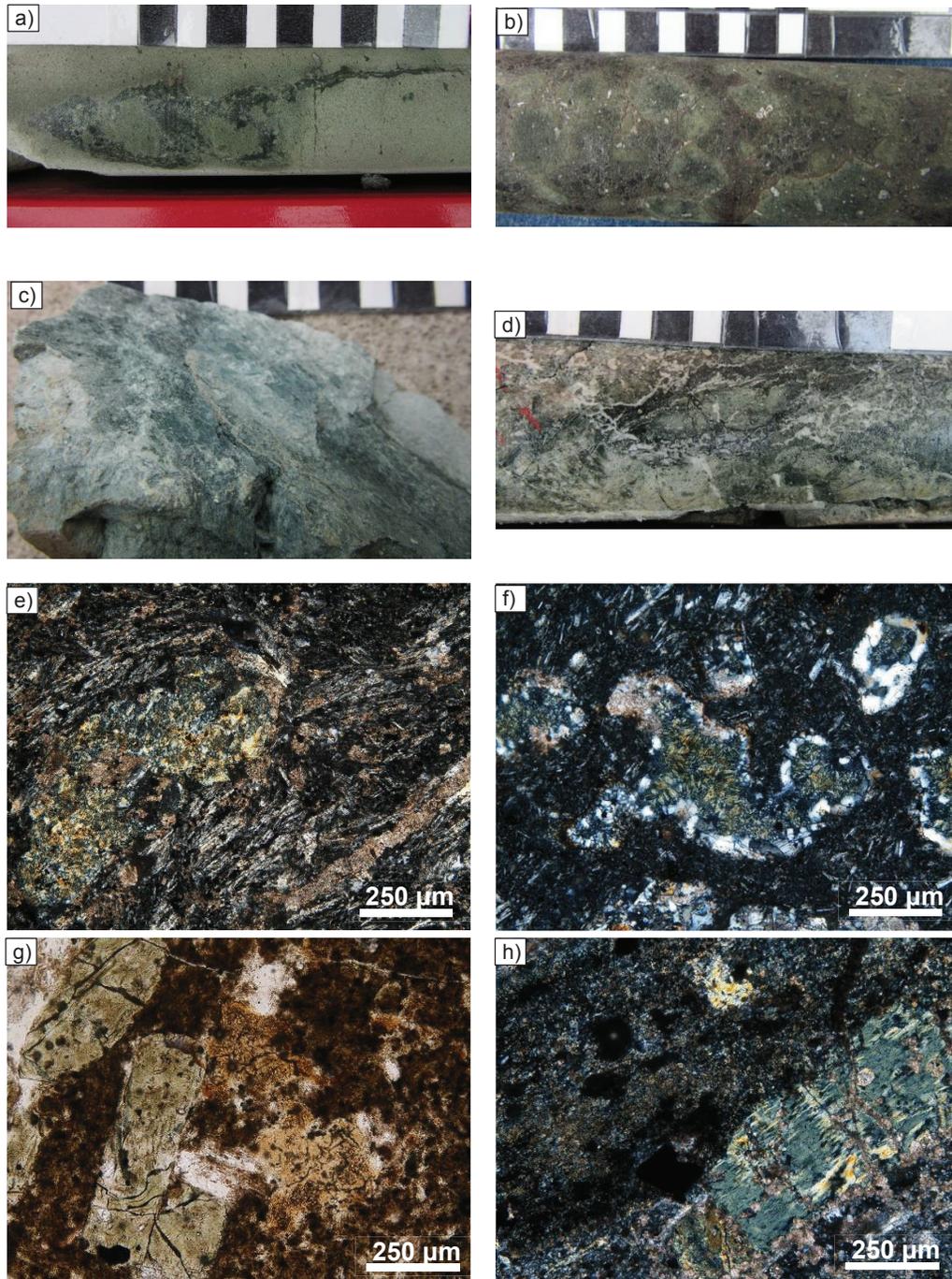


Figura 4.7: a) Fotografía a 156.00-156.14m de profundidad en el pozo TTC-2, muestra vetillas irregulares de clorita. b) Fotografía a 172.50m de profundidad en el pozo TTC-3, en la que se nota una tonalidad verdosa en la roca debido a la presencia de clorita diseminada en toda la roca. c) Fotografía de 119m de profundidad en el pozo TTC-9, muestra alto grado de alteración a clorita en la roca. d) Fotografía a 172.50m de profundidad en el pozo TTC-3, en la que se nota una tonalidad verdosa en la roca debido a la presencia de clorita diseminada en toda la roca. e) FCNX de la

muestra TTC-2-17: se observa un cristal de anfíbol totalmente alterado a clorita y ligeramente reemplazado por calcita. **f)** FCNX de la muestra TTC-3-204, en la que se muestran poros irregulares de ~1mm de espesor rellenos de clorita y con bordes de cuarzo y calcita. **g)** FSNX de la muestra TTC-9-70: se observan cristales de anfíbol totalmente alterados a clorita. **h)** FSNX de la muestra TTC-9-649: se observa un cristal de anfíbol totalmente alterado a clorita, así como también cristales de pirita diseminados.

El espectro de la clorita se caracteriza por tener picos marcados en ~1400 nm, ~2250 nm y ~2340 – 2350 nm.

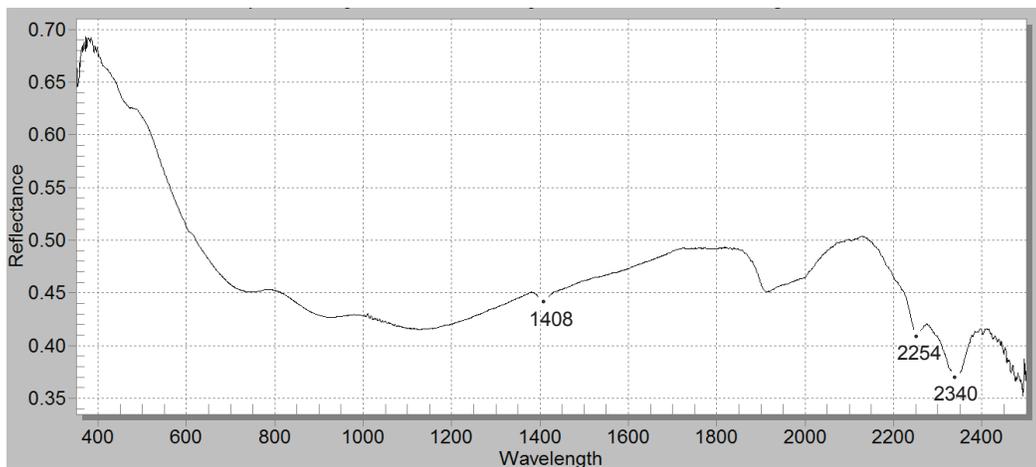


Figura 4.8: Espectro de clorita de la muestra TTC-2-103

4.2.3 ZEOLITAS

La formación de zeolitas cálcicas (wairakita, mesolita, thomsonita, heulandita, estilbita, chabazita, y laumontita) por alteración hidrotermal es principalmente influenciada por las propiedades químicas de estos minerales. La diferencia en el contenido de calcio, la relación Si/Al y el contenido de H₂O sugiere que su formación se relaciona con la composición del material inicial, la composición de la solución y la temperatura. Las zeolitas se forman comúnmente por la alteración del vidrio volcánico, nefelina y plagioclasa. La formación de zeolitas cálcicas a partir de minerales con Ca libre como la nefelina y en las rocas pobres en Ca, como el vidrio riolítico, indican que esta reacción necesita un sistema abierto donde el calcio puede ser añadido y los alkalis pueden ser removidos (Wirsching, 1981)

Las zeolitas formadas en campos geotérmicos son producto de alteración de materiales volcánicos y rocas feldespáticas, por la acción de fluidos hidrotermales de origen meteórico o marino que disuelven silicatos y vidrio volcánico, formando depósitos de zeolitas en zonas más someras y frías. Los minerales, formados por sustitución isomórfica, rellenan poros intergranulares o vetas. En sentido general la mineralogía es variable, pero se destacan zeolitas cálcicas, como laumontita, escolecita, estilbita, chabacita y thomsonita (Keith, et al., 1983).

La distribución de las zeolitas dependiendo de la temperatura es variable, la heulandita se forma a 100°C, laumontita de 150-200°C y wairakita a >250°C (Pirajno, 2009). Sin embargo estos rangos de temperatura no son iguales en todos los sistemas hidrotermales, por ejemplo en los campos geotérmicos de Nueva Zelanda se ha encontrado la asociación mordenita-laumontita-wairakita, donde la mordenita se forma a 50°C y la wairakita se forma sobre los 215°C y ocasionalmente también en temperaturas inferiores a 140°C. En Islandia las zeolitas son comunes a menos de 230°C. Wairakita aparece a temperaturas entre 232 y 276°C en Ohaki-Broadlands en Nueva Zelanda, 142 a 250°C en Wairakita y 222 a 260°C en el campo geotermal Tauhara en Nueva Zelanda (Browne, 1978). Generalmente aparece bordeando fracturas debido a la depositación de soluciones y solo raramente reemplazando a las plagioclasas (Browne and Ellis, 1970).

En el Pozo TTC-2 se encontraron zeolitas en las fracturas y relleno de poros. Las zeolitas mesoscópicamente son muy cristalinas, algunas tienen forma tabular y otras presentan forma cúbica. Microscópicamente se presentan en forma de agregados fibrosos que son más o menos radiales, con relieve no marcado y birrefringencia baja (Figura 4.9 a-d).

En el Pozo TTC-3 no se encontraron zeolitas y en el pozo TTC-9 son muy escasas, macroscópicamente no son evidentes, pero microscópicamente se encontraron zeolitas con hábito acicular tabular radial, relieve moderado y colores de interferencia de 1er orden, posiblemente se formaron como producto de alteración del vidrio volcánico.

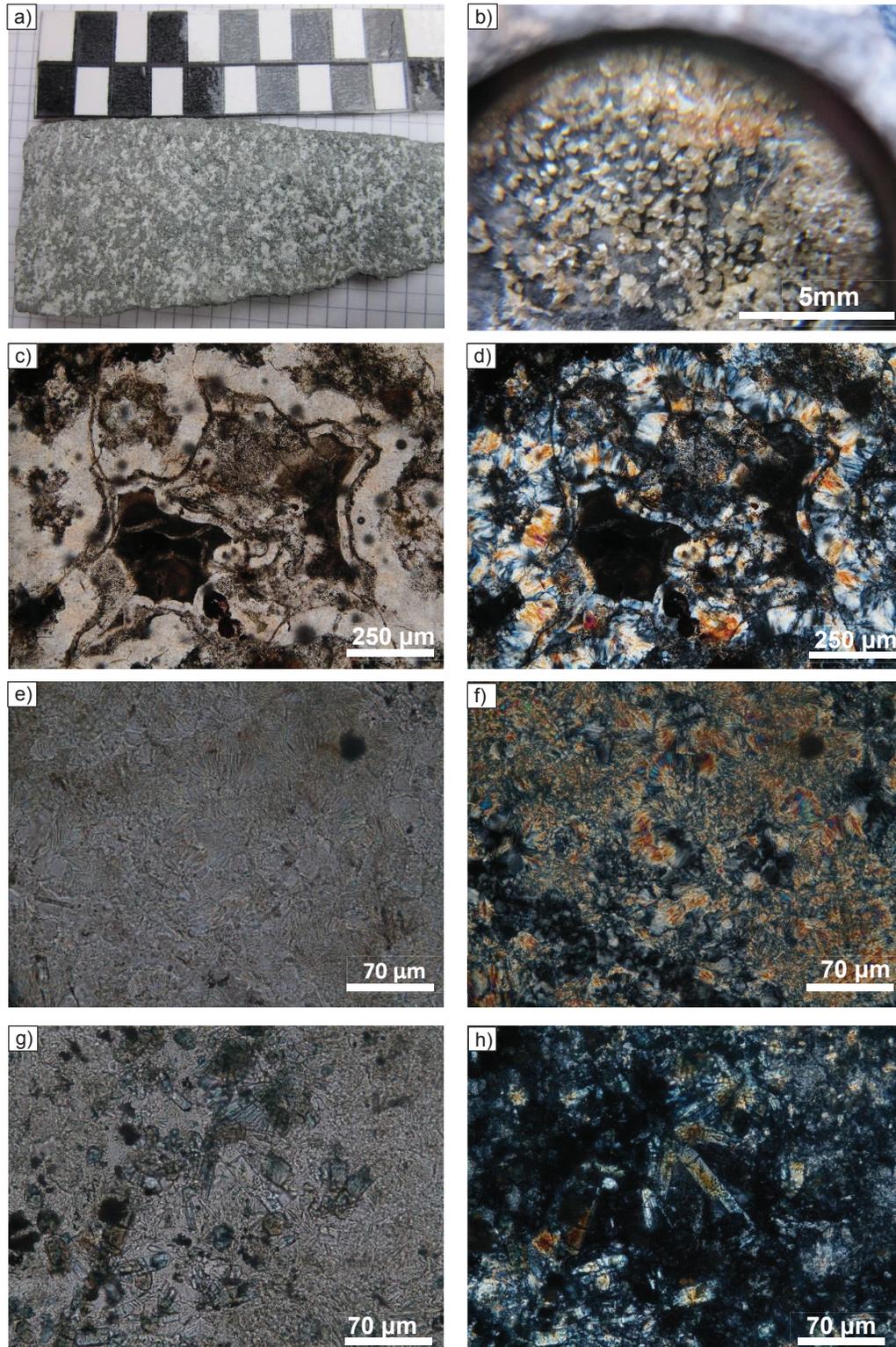


Figura 4.9: a) Fotografía de 48.50m de profundidad en el pozo TTC-2, muestra pequeños cristales de zeolita en una vetilla. b) Fotografía a 158.50m de profundidad en el pozo TTC-2, muestra pequeños cristales de zeolita en una fractura. c y d) FSNX (c) FCNX (d) de la muestra TTC-2-104.7: Zeolita con sílice relleno vesículas. e y f) FSNX (e) FCNX (f) de la muestra TTC-2-122: Zeolitas dispuestas acicularmente. g y h) FSNX (g) FCNX (h) de la muestra TTC-9-31: Cristales de zeolita prismáticos alargados dispuestos en forma radial.

El espectro de las zeolitas se caracteriza por los picos en ~1400 nm (pico del OH) y en ~1900nm (pico del H₂O) (Spectral International, Inc., 2005)

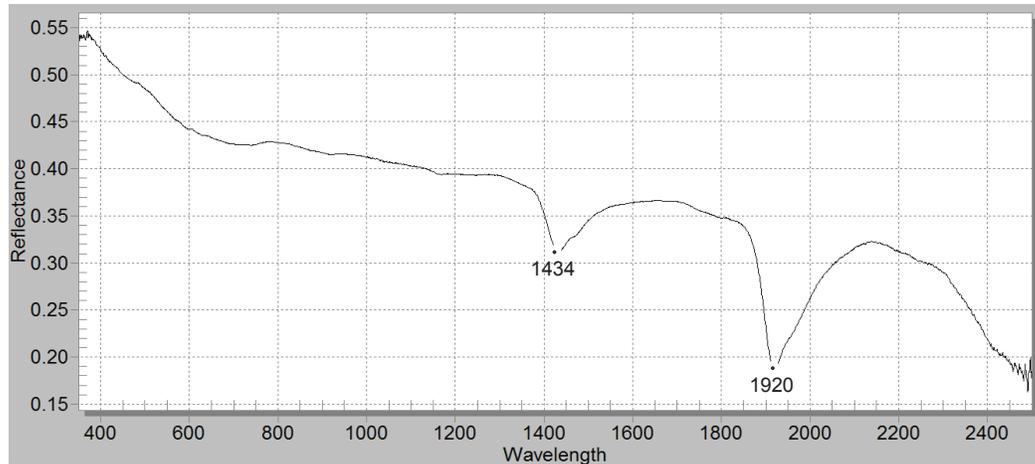


Figura 4.10: Espectro de zeolita de la muestra TTC-2-49

4.2.4 HEMATITA

Macroscópicamente se identifica la hematita debido a la coloración rojiza que le da a la roca, en la matriz y en vetillas. Microscópicamente se observó que la hematita se forma a partir de la magnetita (martitización). Se identificó soluciones rojizas (posiblemente geles de hematita), que atraviesan mediante vetillas los cristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol. Las vetillas tienen espesores variables desde 1 a 0.1 mm, son subhorizontales, irregulares y de alto ángulo. Las rocas conservan parte del magnetismo, ya que el proceso de martitización sigue ocurriendo. En algunos casos la hematita está asociada con la calcita, arcilla y cuarzo.

En el Pozo TTC-2 se encontró hematita en trazas, relleno de los poros de las rocas junto con la calcita y en la matriz de las brechas; se encontró a profundidades mayores a 100 m.

En el Pozo TTC-3 se encontró hematita (geles) a partir de los 140 m de profundidad, se observó vetillas rojizas y cristales de plagioclasas rubí (color rojizo).

En el Pozo TTC-9 la hematita se forma como producto de alteración de la magnetita, en este pozo se encontró hematita en los primeros 120 m y desde 805 m de profundidad hasta el fin del pozo.

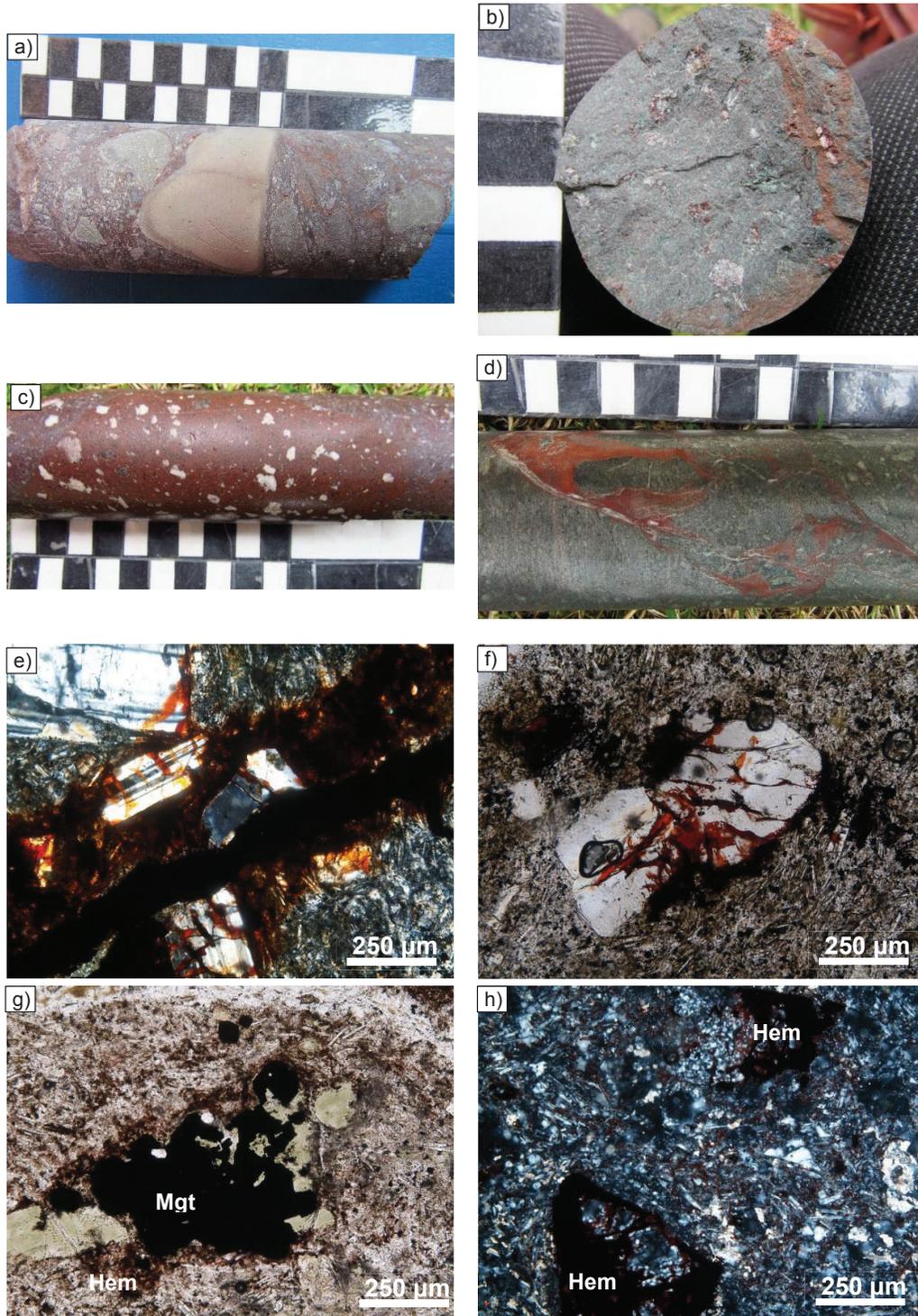


Figura 4.11: a) Muestra TTC-2-104.1: Brecha polimíctica con hematita en la matriz. b) Fotografía a

220.45 m en el pozo TTC-3, se muestra una vetilla de hematita y algunos cristales de plagioclasa teñidos de coloración rojiza debido a las inclusiones de hematita. **c)** Fotografía a 823.50m de profundidad del pozo TTC-9, fragmento de roca con abundante coloración de hematita en la matriz. **d)** Fotografía a 838.60m de profundidad del pozo TTC-9, se observa una vetilla formada por hematita y calcita en los bordes. **e)** FCNX de la muestra TTC-3-150, en la que se observa una vetilla de hematita que atraviesa a la matriz de la roca y a algunos fenocristales de plagioclasa. **f)** FSNX de la muestra TTC-3-150, se muestra un fenocristal de plagioclasa con venas de hematita, derivada posiblemente de la magnetita. **g)** FSNX de la muestra TTC-3-838, en ella se observa la magnetita alterada levemente a hematita, tiñendo de color rojizo la matriz de la roca. **h)** FCNX de la muestra TTC-9-828, se observan cúmulos de hematita distribuidos aleatoriamente en la roca.

La presencia de hematita en el espectro obtenido en el análisis de terraspec se identifica por el pico en 905nm. Valores inferiores a 910 nm son indicativos de la presencia de hematita.

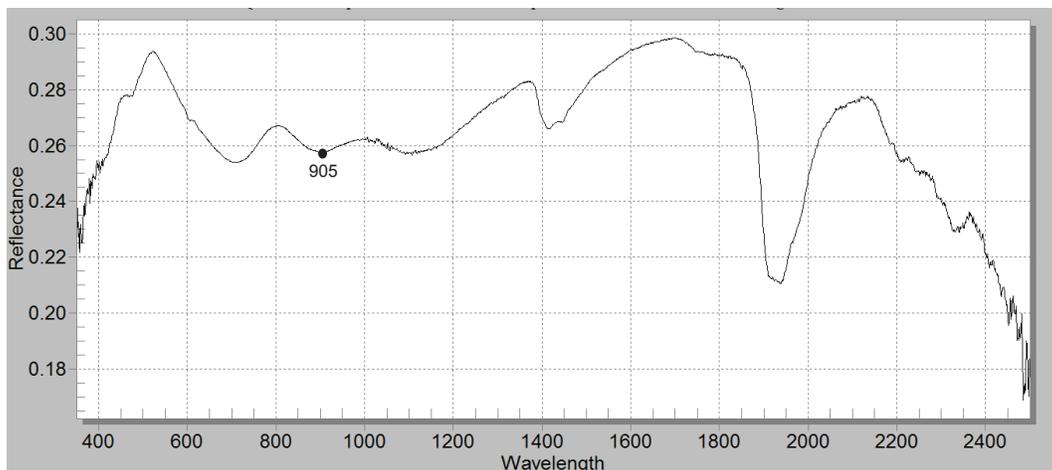


Figura 4.12: Espectro de hematita en la muestra TTC-3-86

4.2.5 SÍLICE

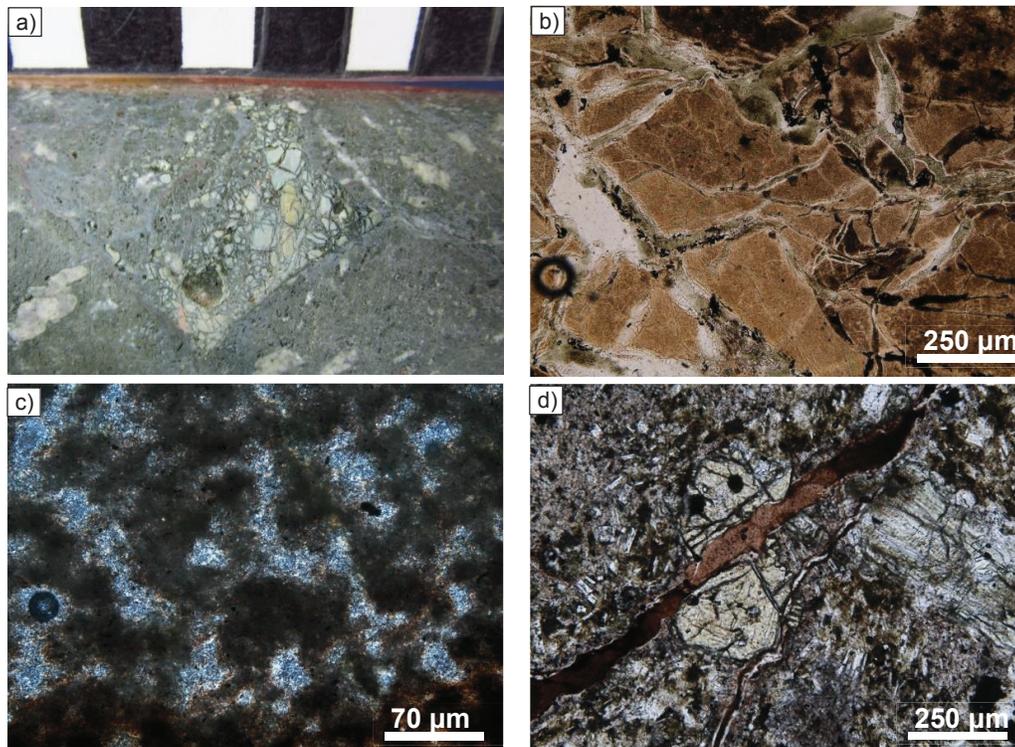
La solubilidad en agua del sílice (sílice amorfo, ópalo, cristobalita, calcedonia y cuarzo) incrementa con la temperatura en un rango de 10 a 100 ppm en temperaturas de 50 a 100°C y más de 1000 ppm sobre los 300°C, después de esta temperatura la solubilidad del sílice decrece. La supersaturación de sílice promueve la precipitación de sílice amorfo a temperaturas de aproximadamente 140°C, y soluciones ricas en cloruros generalmente depositan en superficie grandes cantidades de sílice amorfo (Pirajno, 2009)

Macroscópicamente la presencia de sílice en las rocas se identifica por la dureza y microscópicamente es cuarzo criptocristalino relleno los poros de la roca, o color pardo a café y con nícoles cruzados isotrópico, lo que podría indicar una depositación directa de sílice (Simmons y Browne, 2000).

En el pozo TTC-2 la roca se encuentra silicificada a partir de los 158.5 m de profundidad.

En el pozo TTC-3 la silicificación se encuentra en poros muy finos y en vetillas a partir de los 175 m de profundidad. Se encontró sílice también en vetillas hidrotermales de 1 a 12 mm de espesor, las cuales también están formadas por arcilla, clorita, calcita y cuarzo.

Se encontró sílice en el Pozo TTC-9 desde los 310 a 804 m aproximadamente, está relleno los poros en la matriz y en los fragmentos de roca en las brechas polimícticas; y vesículas en los flujos de lava.



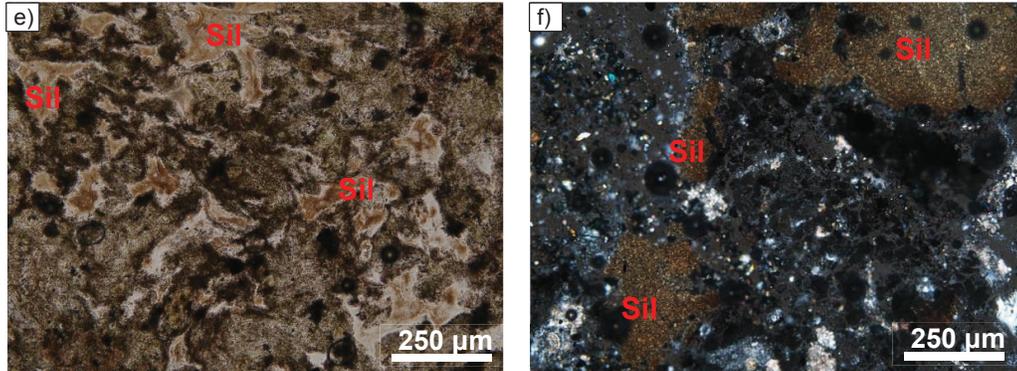
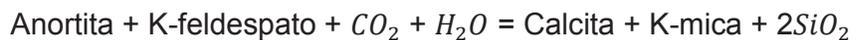


Figura 4.13: **a)** Fotografía a 204.40m de profundidad en el pozo TTC-3. La sílice se presenta en vetillas hidrotermales fracturando la roca. **b)** Fotografía SNX de la muestra TTC-3-204, vetilla hidrotermal de sílice el cual presenta una tonalidad café claro. En algunos espacios de la vetilla se observa que han sido rellenados por clorita. **c)** FCNX de la muestra TTC-2-159.3: se observa que el depósito lacustre presenta criptocristales de cuarzo rellenando todos los poros de la roca. **d)** Fotografía SNX de la muestra TTC-3-24, en ella se ve una vetilla de sílice de color café, la cual atraviesa y fractura a un fenocristal de piroxeno. **e)** Fotografía SNX de la muestra TTC-9-594, en ella se observa el sílice rellenando vesículas, presenta una tonalidad café, mientras que con nícoles cruzados son de carácter isotrópico. **f)** Fotografía de la muestra TTC-9-76, se observan masas silicificadas en la matriz de la roca, presentan una coloración café con carácter isotrópico.

4.2.6 CALCITA

La formación de calcita hidrotermal es gobernada por parámetros acuosos que incluyen fCO_2 , pH, temperatura y la actividad del ion calcio. Otros parámetros que controlan el ingreso del dióxido de carbono en las profundidades de un sistema hidrotermal son: el equilibrio fluido-mineral, la permeabilidad, ebullición y la mezcla de fluidos (Simmons and Christenson, 1994). El reemplazamiento de calcita puede deberse a un proceso de hidrólisis, como se indica en la siguiente reacción:



La presencia del dióxido de carbono juega el doble rol de (1) hacer que el fluido se reactive por abastecimiento de iones de hidrógeno (H_2CO_3 viene a ser el carbonato acuoso dominante), quienes promueven la hidrólisis e introducen el calcio en la solución, y (2) abastecer el carbonato disuelto necesario para la formación de calcita (Simmons y Christenson, 1994).

La concentración relativamente alta de dióxido de carbono de la solución en presencia de un mineral regulador del pH hace que se forme calcita en lugar de otros aluminos-silicatos cálcicos (Browne y Ellis, 1984).

El reemplazamiento de calcita por hidrólisis es favorable en un ambiente de “roca dominante”, donde el lento movimiento del fluido favorece la reacción entre el fluido y la roca (Simmons and Christenson, 1994).

Otro mecanismo de precipitación de calcita es mediante ebullición (boiling) a temperaturas de 320°C, en este caso el incremento de la concentración de dióxido de carbono disuelto provoca el incremento de la solubilidad de la calcita con especies carbonatadas acuosas que principalmente controlan el pH. La calcita “hojosa” (platy en inglés) precipita en espacios abiertos por la pérdida de dióxido de carbono debido a la ebullición. Y esto es descrito por la siguiente reacción (Simmons and Christenson, 1994):



La precipitación de la calcita se produce también debido a su solubilidad inversa (Ellis, 1959). Cuando los fluidos están saturados en calcita y se calientan al entrar en contacto con rocas calientes, pueden precipitar calcita. Este proceso se restringe a las partes marginales y someras de un sistema hidrotermal (Simmons and Christenson, 1994).

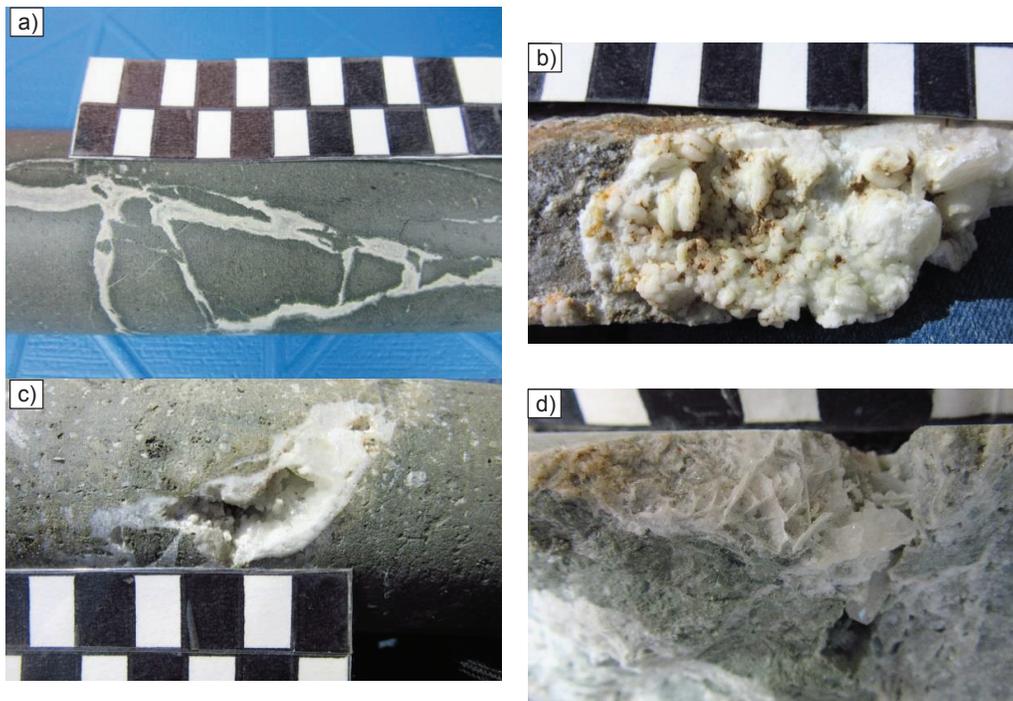
En los tres pozos se encontró abundante cantidad de calcita, principalmente en vetillas subverticales e irregulares, de espesor <5 mm a 4 cm, generalmente las de mayor espesor son vetillas hidrotermales formadas por bordes de cuarzo o sílice y rellenas de calcita, arcilla y fragmentos de la roca caja.

Se encontró calcita reemplazando parcial y totalmente a los cristales de plagioclasa y ocasionalmente a cristales de piroxeno y anfíbol. En los minerales máficos se evidencia que el reemplazamiento de calcita es posterior a la alteración a clorita, porque se observan remanentes de clorita en el interior de los cristales prismáticos de calcita.

El reemplazamiento de calcita en fenocristales de plagioclasa ocurre mayormente a temperaturas de sub-ebullición, 170°C aproximadamente, en función de la presión litostática (Simmons y Christenson, 1994).

La calcita también se encuentra en poros muy finos, varían en tamaño desde 3 a 0.2mm, aproximadamente. En algunos casos estos poros tienen a los bordes cuarzo, clorita, arcilla o sílice, y calcita en la parte central.

Se asume que la precipitación de calcita se produce durante un proceso de enfriamiento del sistema, evidencia de esto es que tanto las vetillas como los poros rellenos presentan bordes de cuarzo (el cual precipita primero, a mayor temperatura) y calcita al centro (precipita posteriormente, conforme disminuye la temperatura).



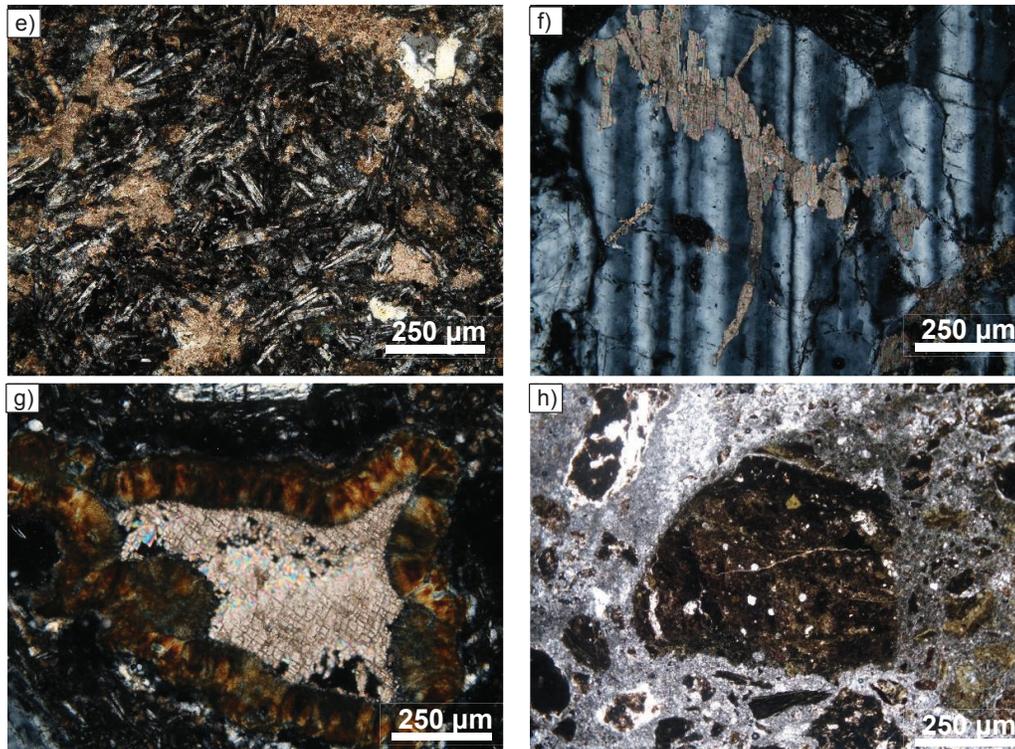


Figura 4.14: **a)** Fotografía de 28.00-28.13m de profundidad en el pozo TTC-2, muestra una vetilla hidrotermal de calcita con fragmentos de la roca caja en el interior (brecha hidrotermal). **b)** Fotografía a 58.25m de profundidad en el pozo TTC-3, muestra de una veta de calcita botroidal. **c)** Fotografía a 59.15m de profundidad en el pozo TTC-3, en la que observa una cavidad rellena por calcita. **d)** Fotografía a 692.25m de profundidad en el pozo TTC-9, muestra de calcita hojosa formada por ebullición (platy calcite). **e)** FCNX de la muestra TTC-2-57: se observa que la calcita se encuentra reemplazando parcialmente al vidrio y a los microlitos de plagioclasa. **f)** FCNX de la muestra TTC-3-86, se observa un fenocristal de plagioclasa el cual presenta reemplazamiento parcial de calcita. **g)** FCNX de la muestra TTC-9-124: se observan vesículas rellenas a los bordes por arcilla y al centro por calcita. **h)** FSNX de la muestra TTC-9-97: se observa la matriz anastomosada de calcita en la brecha.

El espectro de calcita se caracteriza por tener un pico bien pronunciado en ~ 2340 nm (este pico hace referencia a la cantidad de calcio) y \sim puede presentar picos poco pronunciados en ~ 1400 nm, ~ 1875 nm, ~ 2000 nm y ~ 2160 nm (Spectral International, Inc., 2005)

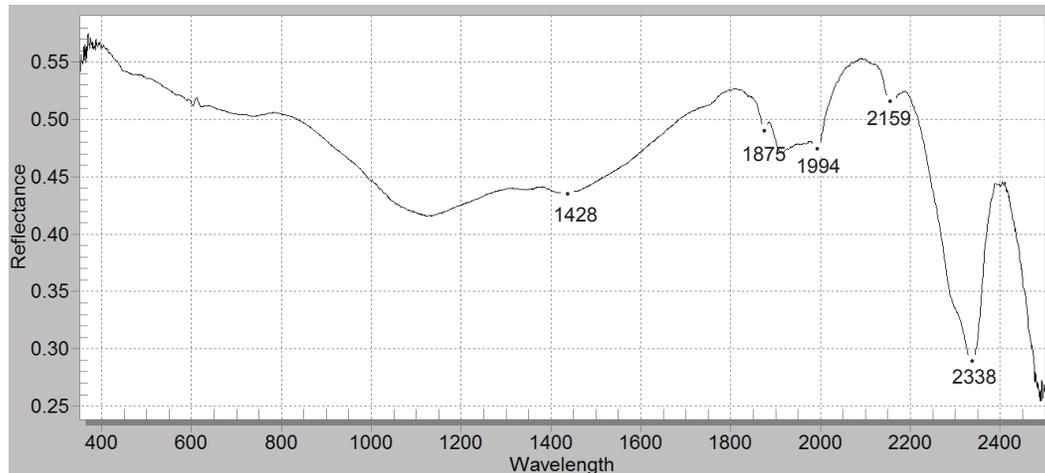


Figura 4.15: Espectro de calcita de la muestra TTC-2-30

4.2.7 CUARZO

El cuarzo hidrotermal es fácilmente reconocido ya que se presenta como un mineral de reemplazamiento, como inclusiones libres, en forma de cristales de algunos milímetros de longitud, relleno de cavidades y fracturas. Es particularmente común reemplazando pómez, plagioclasa y vidrio. Se forma a profundidades donde la temperatura alcanza los 100°C pero es más abundante en zonas de buena producción de vapor (Browne and Ellis, 1970).

En los tres pozos se encontró cuarzo hidrotermal relleno de vetillas de espesor desde 12 a 0.1 mm, aproximadamente. Algunas son vetillas hidrotermales formadas por arcilla, clorita, sílice, calcita, fragmentos de la roca caja y cuarzo en los bordes. La mayoría de vetillas son irregulares, subhorizontales y en pocos casos son de alto ángulo.

Hay cuarzo microcristalino relleno de poros, los cuales son generalmente muy pequeños, desde 1 a 0.1 mm. Algunos poros están rellenos por otros minerales secundarios como arcilla, clorita, calcita, sílice y bordeados por cuarzo.

También se encontró cuarzo reemplazando a los cristales de piroxeno y anfíbol alterados inicialmente a clorita, en ellos se observa que el reemplazamiento de

cuarzo fue posterior a la alteración a clorita, ya que los cristales reemplazados por cuarzo microcristalino conservan relictos de clorita (ver Figura 4.16 f).

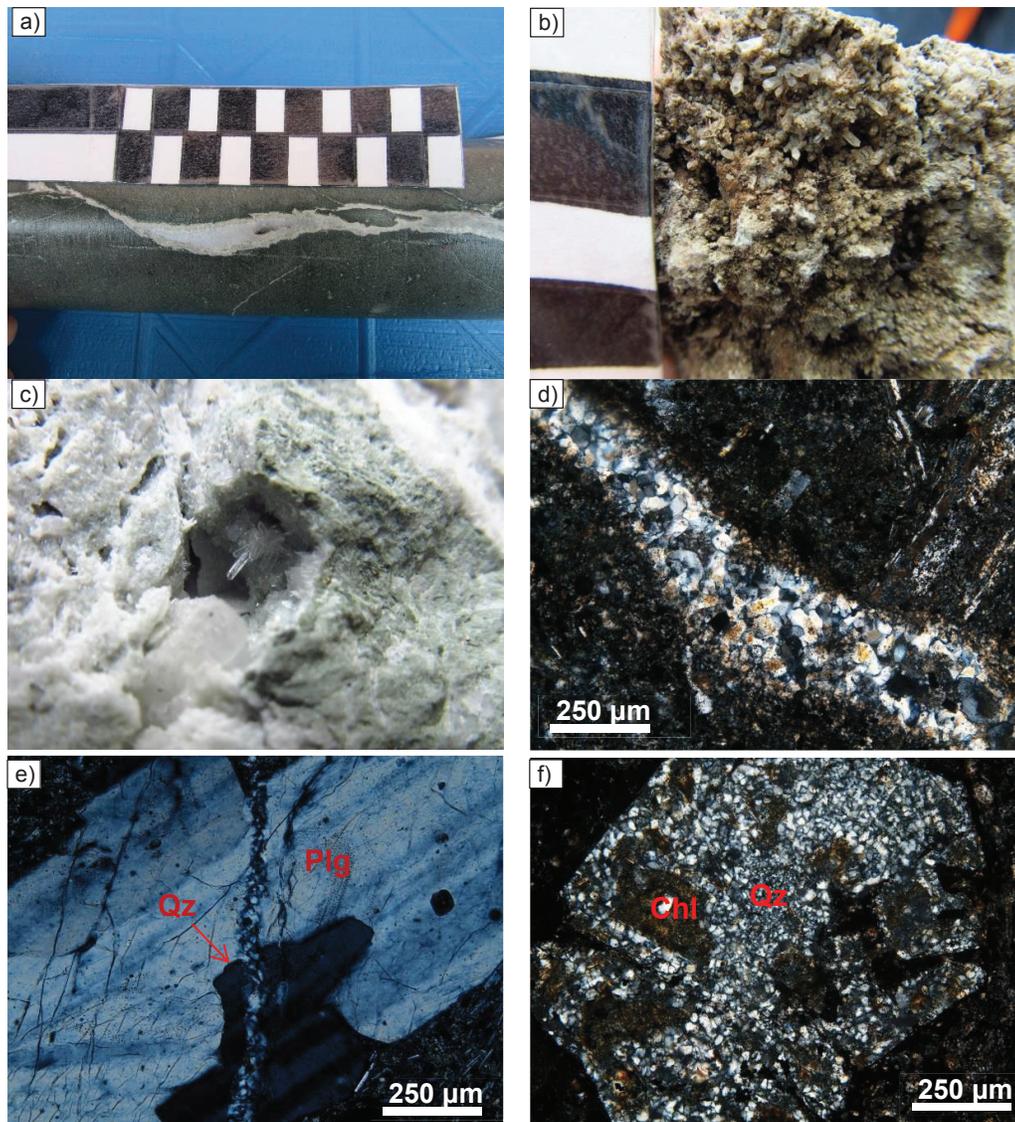


Figura 4.16: **a)** Muestra de 24.00m de profundidad en la que se aprecia una vetilla hidrotermal que presenta cuarzo a los bordes de la vetilla y calcita con fragmentos de la roca caja al centro (brecha hidrotermal) **b)** Fotografía a 95.95m de profundidad en el pozo TTC-3. El Cuarzo cristaliza dentro de cavidades y espacios vacíos en las rocas. **c)** Fotografía a 693m de profundidad en el pozo TTC-9, se encontró cuarzo de aproximadamente 1mm dentro de cavidades de la roca. **d)** FCNX de la muestra TTC-3-140, vetilla de cuarzo que atraviesa la matriz de la roca. **e)** FCNX de la muestra TTC-3-138, en la que se observa una vetilla muy fina de cuarzo que atraviesa un fenocristal de plagioclasa. **f)** FCNX de la muestra TTC-9-63, en la que se observa como el cuarzo reemplazó un cristal de piroxeno que primeramente fue alterado a clorita.

4.2.8 PIRITA

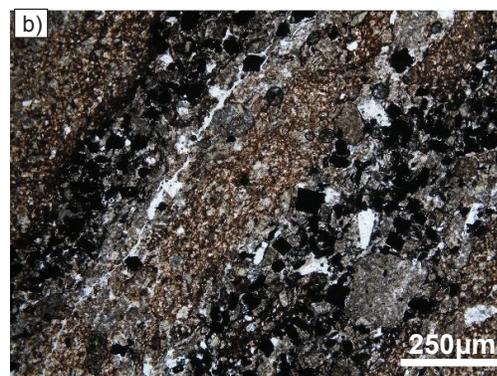
La pirita es el sulfuro más común en la alteración propilítica y sub-propilítica, se forma principalmente como un reemplazamiento de fases, en forma de cristales euhedrales, rellenando poros y vetillas (Simmons y Browne, 2000).

La pirita puede formarse como producto de alteración de la magnetita y minerales ferromagnesianos, pero la abundancia de pirita y su presencia en vetillas sugieren que puede ser depositada de soluciones por adición de hierro y sulfuros. La pirita se forma fácilmente a temperaturas bajo los 100°C (Browne and Ellis, 1970).

En el Pozo TTC-2, la pirita es muy escasa, a partir de 159.50 m de profundidad hay <<1% de pirita, la cual es muy fina y esta pobremente diseminada.

En el Pozo TTC-3 la pirita también es muy escasa (<1%), la cual es muy fina y esta pobremente diseminada en las rocas.

En el Pozo TTC-9, la pirita se encuentra diseminada en casi todas las rocas, es de tamaño fino y en algunos tramos se forman cúmulos de pirita. En muy pocos casos se concentra en vetillas muy finas junto con cuarzo. Es más evidente y abundante en los fragmentos de roca porfídicos que conforman la brecha freatomagmática (diatrema).



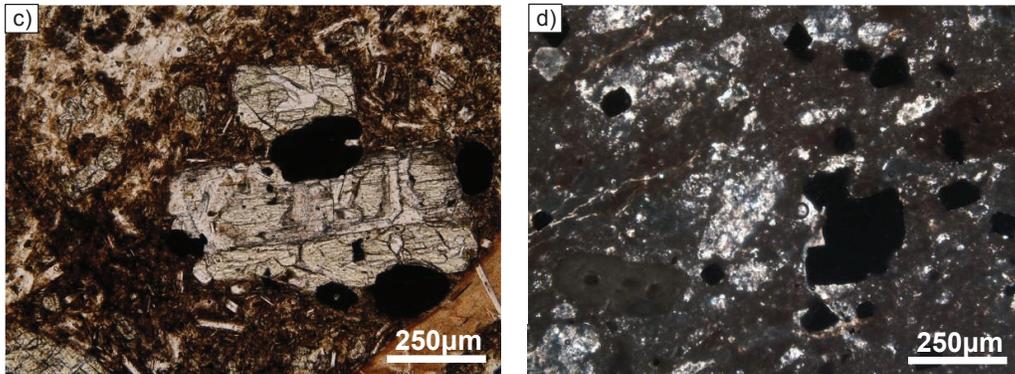


Figura 4.17: a) Fotografía a 576.10m de profundidad, la pirita se concentra en partes de la roca, formando agregados de pirita muy fina. b) FSNX de la muestra TTC-2-159.7, en la que se observa pequeños cristales de pirita concentrados en forma de bandas en la arenisca. c) FSNX de la muestra TTC-3-249, se observa cristales de pirita junto a fenocristales de anfíbol. d) FSNX de la muestra TTC-9-340, pirita diseminada en la matriz de la roca.

4.3 RESULTADOS

Pirajno (2009), caracteriza a la alteración propilítica por la asociación paragenética epidota - clorita - carbonatos, a veces albita, K-feldespatos y pirita; Corbett y Leach (1997), definen que esta alteración se forma en condiciones neutras a alcalinas en rangos de temperatura de 200 a 250°C, y considera que cuando la alteración es dominada por zeolitas en lugar de epidota, el término sub-propilítica puede ser aplicado. Gonzalez – Partida, et al., (2000) define que la alteración propilítica es producto de la circulación de fluidos clorurados-sódicos calientes, con temperaturas entre 200 y 350°C.

Con estos antecedentes y considerando la asociación mineral encontrada en las rocas de este estudio (cuarzo, clorita, calcita, pirita y la inexistencia de epidota y/o adularia), se determina que la alteración hidrotermal en los pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9 es de tipo sub-propilítica, según Corbett y Leach (1997).

En el pozo TTC-2 se pueden definir dos zonas paragenéticas basadas principalmente en el tipo de arcilla dominante: (Zona 1) desde 14 hasta aproximadamente 105 m de profundidad, dominada por la presencia de esmectita, clorita, calcita, cuarzo, zeolitas; y (Zona 2) desde 105 m hasta el fin del pozo a

160m de profundidad, caracterizada por la presencia del intercrecimiento illita – esmectita, clorita, calcita, cuarzo, zeolitas y pirita que aparece en los últimos metros del pozo.

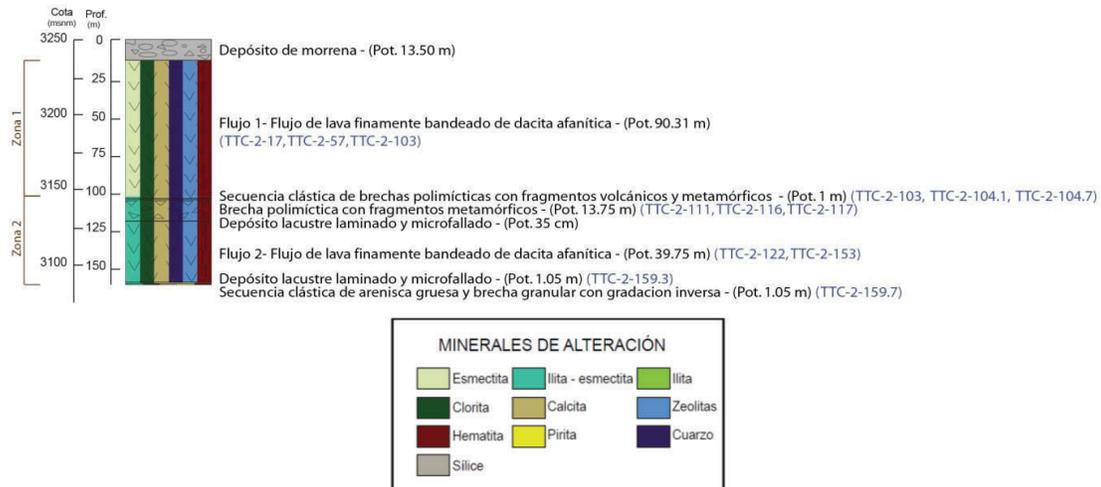


Figura 4.18: Esquema de mineralogía de alteración del Pozo TTC-2

En el pozo TTC-3 se encontró esmectita, clorita, calcita, cuarzo, pirita, sílice y hematita. En este caso se definen tres zonas paragenéticas en función de la presencia de pirita, sílice y geles de hematita, ya que son los minerales que varían a medida que aumenta la profundidad del pozo. (Zona 1) desde 25 a 200 m de profundidad, en este rango la pirita es común y se presenta en forma de cristales subhedrales a euhedrales; (Zona 2) a partir de 135 hasta 250 m de profundidad, caracterizada por la presencia de geles de hematita; y (Zona 3) a partir de 175 m hasta el fin del pozo en 250 m de profundidad, caracterizada por la presencia de sílice.

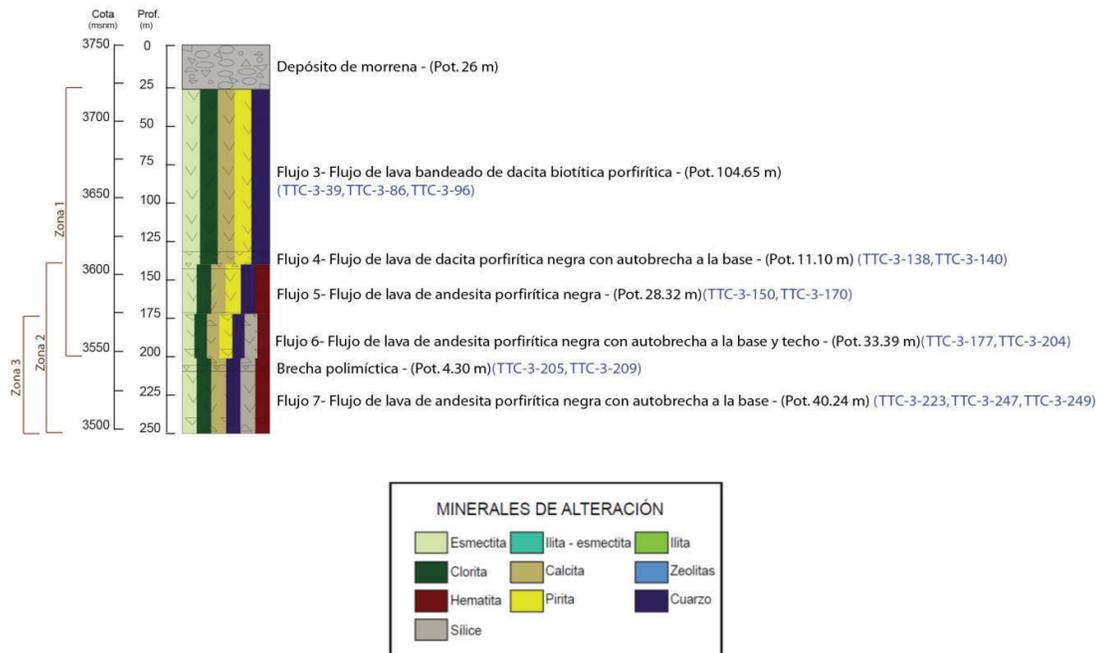


Figura 4.19: Esquema de mineralogía de alteración del Pozo TTC-3

En el pozo TTC-9 se encontró esmeclita, illita-esmeclita, illita, calcita, zeolitas, pirita, cuarzo y sílice, distribuidos en : (Zona 1) desde 15.60 m hasta aproximadamente 118 m de profundidad, en la cual se distingue la presencia de esmeclita, clorita, calcita, zeolitas, pirita, sílice, cuarzo y hematita; (Zona 2) desde 118m hasta 310 m de profundidad, caracterizada por la presencia de illita-esmeclita, clorita, calcita, zeolitas, pirita y cuarzo; (Zona 3) desde 310 m hasta 805m de profundidad, que se distingue por la presencia de illita, clorita, calcita, pirita, cuarzo y sílice; y (Zona 4) desde 805m hasta el fin del pozo a 880m de profundidad, caracterizado por la paragénesis clorita, calcita, hematita, pirita y cuarzo.

El cambio de esmeclita a illita-esmeclita en el pozo TTC-2 y el cambio de esmeclita a illita-esmeclita y a illita en el pozo TTC-9, indican un aumento de temperatura a medida que aumenta la profundidad. La esmeclita se presenta como arcilla dominante a temperaturas menores a 150°C (Simmons y Browne, 2000), el intercrecimiento illita-esmeclita a 220°C (Browne, 1978) y la illita a temperaturas mayores a 250 °C (Simmons y Browne, 2000).

La clorita está presente en los tres pozos, principalmente como producto de alteración de minerales ferromagnesianos y en pocos casos rellenando vetillas y poros. Esto indica que su estabilidad y distribución es independiente de la profundidad, permeabilidad y temperatura; y que su abundancia se relaciona con el contenido inicial de hierro de las rocas no alteradas. Aunque la clorita domina generalmente en temperaturas superiores a 200°C, según lo expone Inoue (1992).

De igual forma la calcita es muy común en los tres pozos, aparece principalmente como producto de reemplazamiento en cristales de plagioclasa, rellenando vetillas, poros y cavidades. El reemplazamiento de calcita en los cristales de plagioclasas se forma por reacciones de hidrólisis, mientras que la calcita en vetillas, poros y cavidades se debe a su solubilidad inversamente proporcional a la temperatura, es decir cuando la calcita precipita a partir de fluidos saturados que se calientan al entrar en contacto con rocas calientes. Se tiene rastros de calcita hojosa (*platy calcite*) a 692.25m de profundidad en el pozo TTC-9, esto indica que la calcita precipitó en espacios abiertos por la pérdida de dióxido de carbono debido a la ebullición (*boiling*). El reemplazamiento de calcita puede ocurrir en rangos de temperatura desde <125°C hasta >290°C. (Simmons and Christenson, 1994).

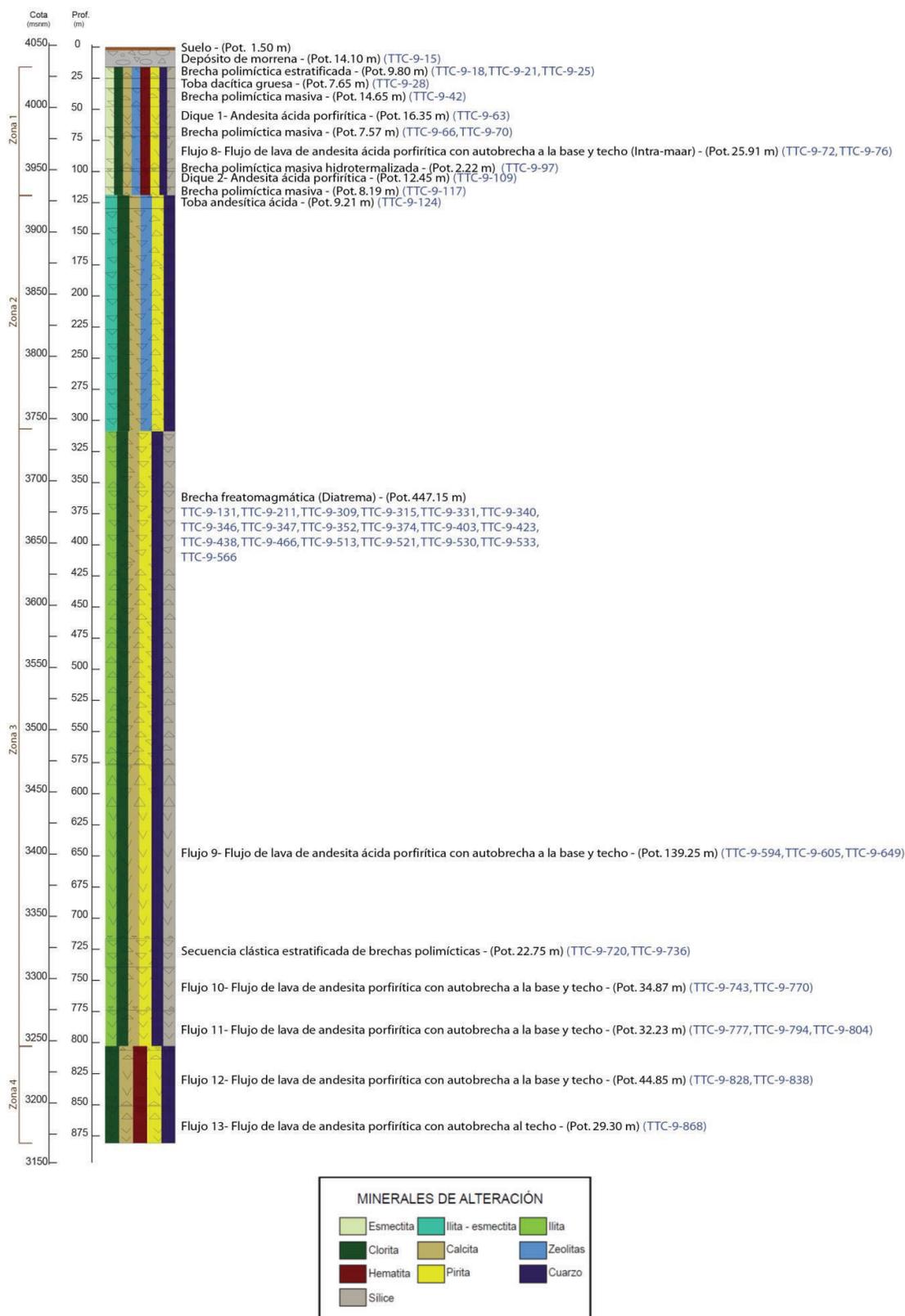


Figura 4.20: Esquema de mineralogía de alteración del Pozo TTC-9

El cuarzo, ya sea en mayor o menor cantidad está presente en los tres pozos, en forma de cristales de pocos milímetros de longitud relleno vetillas, poros y cavidades. Generalmente se forma a profundidades donde la temperatura alcanza los 100°C, pero es más abundante en zonas de buena producción de vapor, debido a que la ebullición produce vapor y el líquido remanente se satura en cuarzo y precipita (Browne and Ellis, 1970). Las vetillas de cuarzo con calcita en la parte central, indican que la calcita precipitó después de un proceso de enfriamiento en el sistema hidrotermal.

El sílice se presenta relleno cavidades y vetillas, por lo tanto se asume que son producto de una depositación directa.

Se encontró zeolitas en todo el pozo TTC-2 y en la zona 1 y 2 del pozo TTC-9, estas se encuentran principalmente en la matriz de los flujos de lava. Su formación se asocia a la alteración del vidrio volcánico por la acción de fluidos hidrotermales. La distribución de las zeolitas depende de la temperatura, por ejemplo la heulandita se forma a 100°C, laumontita de 150-200°C y wairakita a >250°C (Pirajno, 2009). Aunque estos rangos de temperatura no son iguales en todos los sistemas hidrotermales, se considera que las zeolitas se forman a temperaturas no muy elevadas y caen en el campo de la alteración sub-propilítica.

Es muy probable que la pirita se derive de la alteración de la magnetita, la cual es un mineral accesorio común en los flujos de lava. La presencia de pirita en vetillas es menos frecuente, sin embargo si se puede considerar que hubo fluidos que depositaron directamente la pirita por adición de hierro y sulfuros. Según Browne y Ellis (1970), la pirita se forma fácilmente a temperaturas bajo los 100°C.

En los flujos de lava se identificó alteración de magnetita a hematita que posiblemente es el resultado de la oxidación de la magnetita cuando la roca estuvo expuesta a la meteorización, mientras que en las brechas clásticas es común la presencia de soluciones ricas en hierro (geles de hematita?), que ingresan por las fracturas y microporosidad de las rocas formando pátinas de coloración rojiza.

La alteración hidrotermal en los tres pozos refleja las características de la acción de fluidos clorurados en condiciones neutras a alcalinas en rangos de temperatura de >150 hasta ~230°C, sin llegar a 240°C porque no hay presencia de epidota ni adularia.

CAPÍTULO 5

5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 DISCUSIÓN

Las rocas encontradas en los pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9, se formaron debido a una serie de eventos eruptivos (efusivos, explosivos) y procesos externos (gravitacionales, transporte, sedimentación), que han ocurrido en el interior de la Caldera Chacana y que forman parte de su evolución geológica. En este subcapítulo se presenta una comparación entre el logueo previamente realizado por la EPMAPS en los testigos de perforación de los tres pozos y los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto de titulación.

En el Pozo TTC-9 se encontraron secuencias de brechas y tobas que en este trabajo fueron interpretadas como un maar (parte del anillo de una brecha de diatrema, encontradas a una profundidad de 15.60 a 129.60 m) y una diatrema (de 129.60 a 576.75 m), formados por una explosión freatomagmática, en la que un cuerpo de magma dacítico entró en contacto con un acuífero profundo provocando la volatilización violenta de un acuífero y la fragmentación inmediata y total, en forma de embudo vertical de toda la columna de rocas suprayacentes. Estas secuencias son cortadas por diques e interrumpidas por un flujo de lava andesítico (intramaar). Las evidencias de esta interpretación son las características de cada depósito y sus constituyentes, las cuales han sido mencionadas previamente. En el trabajo de logueo de la EPMAPS a estas rocas se las describe como secuencias de brechas y tobas intercaladas con andesitas, asignadas como distintos eventos y que no se correlacionan entre sí.

Se encontraron fragmentos de esta diatrema freatomagmática en la escombrera de rocas ubicada en el portal de salida del Túnel Quito (en el Valle Carihuaycu) y hay un afloramiento de esta brecha a 215 m en dirección NE del Pozo TCC-9.

En trabajos anteriores (Beate et al., 2009) propuso la existencia de la brecha freatomagmática Mogotes (diatrema) en la parte central de la caldera, formada durante un periodo de resurgencia, debido a una intrusión somera de magma evolucionado. Los afloramientos de esta brecha fueron encontrados en cercanías a la Laguna Mogotes, ubicada a aproximadamente 9.5 km en dirección NE del Pozo TTC-9; además Villares (2010) describe en esta brecha la presencia de fragmentos metamórficos, los cuales no fueron encontrados en la diatrema del Pozo TTC-9. Por estas razones se puede interpretar que estas dos brechas de origen freatomagmático no necesariamente pertenecen a un mismo evento.

El Pozo TTC-3 está constituido por flujos de lava porfiríticos que varían en composición de andesitas básicas a dacitas y el Pozo TTC-2 formado principalmente por flujos de lava afaníticos de composición dacítica. Algunos de estos flujos presentan autobrechamiento al techo y/o base. Anteriormente estas rocas fueron descritas como tobas, andesitas y basaltos faneríticos (EPMAPS, 2012).

Las brechas formadas por clastos de rocas metamórficas y volcánicas del Pozo TTC-2, fueron anteriormente descritas como brechas formadas por fragmentos de cuarzo y serpentina.

Al techo de los tres pozos se encontraron depósitos de morrena, que se formaron como resultado de los periodos de glaciación durante el Pleniglacial (TTC-2 y TTC-3) y el Tardiglacial (TTC-9). Anteriormente estos depósitos fueron descritos como coluviales.

Es necesario mencionar que la diferencia en la descripción petrográfica se debe a que el estudio de la EPMAPS se realizó con fines geotécnicos, en el que se analizaron principalmente las propiedades mecánicas de las rocas. A diferencia de este proyecto de titulación el objetivo fue determinar la litoestratigrafía de los pozos, que engloba la descripción detallada macro y microscópica de los testigos de roca, con la finalidad de aportar al entendimiento de los procesos geodinámicos ocurridos dentro de la Caldera.

Adicionalmente, es la primera vez que se realiza un análisis mineralógico de la alteración hidrotermal en estos testigos de roca, en la que la asociación mineral

encontrada está formada por: esmectita, illita-esmectita, illita, clorita, calcita, cuarzo, zeolitas, hematita, sílice, pirita y la inexistencia de epidota y/o adularia, con lo que se determinó que la alteración hidrotermal en los tres pozos es de tipo sub-propilítica, según Corbett y Leach (1997). Estos minerales reflejan las características de la acción de fluidos clorurados en condiciones neutras a alcalinas en rangos de temperatura de >150 hasta ~230°C. Esto corrobora los estudios anteriores de Beate et al. (2010) y Pilicita (2013), en los que definen que la Caldera Chacana constituye un prospecto para albergar fuentes de calor, debido a su fuerte y consistente anomalía térmica a niveles someros de la corteza.

5.2 CONCLUSIONES

En el pozo TTC-2 las unidades litológicas encontradas fueron: dos flujos de lava afaníticos de composición dacítica (Flujo 1 de 90 m de potencia y Flujo 2 de 40 m), que se encuentran separados por ~15 m de brechas clásticas polimícticas que contienen fragmentos de rocas volcánicas y metamórficas. La presencia de fragmentos metamórficos en estas brechas se debe a la cercanía del pozo con el borde estructural de la Caldera Chacana, donde aflora el basamento metamórfico de la Cordillera Real, por lo tanto se asume que estas brechas son depósitos coluviales formados por desprendimientos gravitacionales del borde de la caldera. Además se encontraron dos secuencias de cenizas finas laminadas y microfalladas, de menos de 1 metro de espesor, que se encuentran a la base y al techo del Flujo 2; estos depósitos lacustres de baja energía representan períodos de calma dentro de la Caldera. A la base del pozo se encontró una secuencia de arenisca gruesa que grada a brecha granular, que representa un depósito de origen fluvio-lacustre intra caldera.

El pozo TTC-3 está compuesto por una secuencia de cinco flujos de lava porfiríticos: Flujo 3 con potencia de 105 m, Flujo 4 de 11 m, Flujo 5 de 28 m, Flujo 6 de 33 m y Flujo 7 de 40 m, que varían en composición de andesitas básicas a dacitas, desde la base hacia el techo del pozo. Entre el Flujo 6 y el Flujo 7 se encontró un depósito de brechas polimícticas, que se interpretó como una secuencia de origen coluvial.

En el Pozo TTC-9 a 15 m bajo la superficie, se encontraron 115 m de varias secuencias de brechas polimícticas y tobas, intercaladas por un flujo de lava andesítico y cortadas por dos diques andesíticos. La secuencia de brechas ha sido interpretada como parte del anillo del maar, que representaría la expresión superficial de la diatrema freatomagmática, lo cual se evidencia por la presencia de algunos fragmentos de roca comunes incluidos tanto en las brechas del maar como en la diatrema.

La diatrema es el resultado de la actividad explosiva subterránea de tipo freatomagmática formada por la interacción de un cuerpo de magma ascendente con agua subterránea. Las evidencias que sustentan que el paquete de ~450 m

constituye una brecha freatomagmática son: (1) abundante matriz (60-90%) formada por ceniza y por fragmentos de roca de las mismas litologías que los fragmentos líticos de la brecha pero de tamaño de 2 a 0.01 mm; (2) presencia de fragmentos juveniles (dacitas afaníticas con márgenes de enfriamiento (chilled margins) y vidrio alterado totalmente a esmectita, que originalmente fueron fragmentos de magma); (3) fragmentos angulares de roca con bordes cuspidos debido al fracturamiento violento a lo largo del embudo de la diatrema; (4) presencia de fragmentos angulares a redondeados de la roca caja: flujos de lava pre-existentes (algunos pertenecen a los flujos de lava encontrados en el tercio inferior del Pozo TTC-9), pórfidos mineralizados, intrusivos con textura fanerítica y tobas, distribuidos aleatoriamente dentro de la brecha freatomagmática, debido a procesos convectivos que se generan mientras la diatrema permanece activa; (5) no hay contactos estratigráficos horizontales; (6) presencia de lapilli acrecionario en el anillo del maar; (7) alteración subvolcánica en toda la roca.

La secuencia de flujos de lava porfíricos andesíticos: Flujo 9 de 140 m de potencia, Flujo 10 de 35 m, Flujo 11 de 32 m, Flujo 12 de 45 m y Flujo 13 de 30 m, encontrados en la base del Pozo TTC-9, también se encuentran en forma de fragmentos dentro de la diatrema, por lo que se asume que constituyen una parte de la roca caja de la misma.

Los pozos TTC-2 y TTC-3 se encuentran cubiertos por depósitos de till (de 13.50 y 26.10 m respectivamente) que corresponden al Pleniglacial (35 - >40 ka, los glaciares llegaron hasta ~3400 msnm), mientras que el Pozo TTC-9 está cubierto por un till de 14 m que corresponde al Tardiglacial (10-12 ka, los glaciares llegaron hasta ~3900 msnm).

El estudio petrográfico en los flujos de lava y en las brechas de los tres pozos, permitió caracterizar las unidades litoestratigráficas y establecer diferencias composicionales, texturales, de facies y de origen de cada unidad, por esta razón se considera que, aparentemente, no existe una correlación entre las rocas de los tres pozos. Cabe mencionar que la distancia entre el Pozo TTC-2 y TTC-3 es ~ 2.5 km y que la distancia entre el Pozo TTC-3 y TTC-9 es de ~5 km.

Las rocas de los tres pozos, con excepción de los depósitos superiores de till, presentan un bajo grado de alteración hidrotermal, determinado por la presencia de arcillas (esmectita, illita- esmectita e illita, definidos con Terraspec), clorita, calcita y cuarzo, sílice, pirita, hematita (geles) y zeolitas.

Las arcillas identificadas con el Terraspec ayudaron a zonificar la alteración hidrotermal:

	POZO TTC-9 4047 msnm	POZO TTC-3 3722 msnm	POZO TTC-2 3253 msnm
ESMECTITA	15.60 m – 110 m	26.10 m - 250 m	13.50 m – 105 m
ILLITA-ESMECTITA	110 m - 310 m	-	105 m -160 m
ILLITA	310 m -880 m	-	-

Según Simmons y Browne (2000), la esmectita domina a temperaturas menores a 150°C, el intercrecimiento illita – esmectita a temperaturas entre 150 y 200°C y la illita a temperaturas mayores a 200°C.

Los minerales ferromagnesianos (píroxeno, anfíbol, biotita) se alteran fácilmente a clorita, mientras que las plagioclasas son más resistentes a ser alteradas a arcilla o reemplazadas por calcita; a diferencia del cuarzo primario que no sufre ningún cambio con la alteración hidrotermal subpropilítica.

La calcita es uno de los minerales de alteración dominantes en los tres pozos, reemplazando a cristales de plagioclasa, en vetillas tardías, poros y cavidades. En algunos casos se evidenció que la precipitación de calcita en vetillas representa un proceso de enfriamiento en el sistema, debido a que las vetillas formadas por cuarzo y/o arcilla presentan en la parte central calcita. También algunas brechas clásticas presentan calcita reemplazando totalmente a la matriz.

En la brecha freatomagmática (diatrema) del pozo TTC-9, se encontró que la roca se encuentra silicificada (intensidad ~3/10) desde los 310 m de profundidad para abajo (Zona 3, según esquema de alteración hidrotermal en los pozos), mientras que hacia el techo las rocas son más arcillosas, evidencia que los fluidos que silicificaron las rocas se distribuyen mayoritariamente en la zona media a profunda del sistema hidrotermal.

La intensidad de alteración en las rocas es baja a moderada, por lo que fue posible con bastante seguridad determinar el protolito (roca antes de ser alterada) debido a que las rocas conservan la textura original.

5.3 RECOMENDACIONES

Se recomienda hacer mapeo geológico a detalle en la caldera, para corroborar la presencia de la diatrema y del maar, además correlacionar los flujos de lava de superficie con los encontrados en el subsuelo.

Se recomienda realizar mediciones de flujo de calor en los pozos para determinar el gradiente geotérmico, lo cual servirá para evaluar la prospectividad de la caldera como un proyecto geotérmico.

Se recomienda hacer un estudio similar con las rocas de las perforaciones TTC-1 a TTC-10 que se encuentran dentro de la caldera y en flanco occidental, con el fin de complementar y correlacionar la información litoestratigráfica y sobre las alteraciones hidrotermales.

Se recomienda realizar dataciones de las rocas obtenidas en los pozos TTC-2, TTC-3 y TTC-9, para determinar edades absolutas y complementar la descripción litológica ubicándola en el contexto de espacio y tiempo. La primera datación que se recomienda es en el Flujo 8, el cual es un flujo intra-maar, con el cual se conocería la edad de la diatrema freatomagmática. También se recomienda hacer dataciones en los flujos de lava de los tres pozos para complementar con datos geocronológicos el modelo evolutivo de la caldera. Las dataciones se sugiere que se hagan en circones por el método de U-Pb, ya que otras dataciones radiométricas que se utilizan para flujos de lava como K-Ar y Ar-Ar se verían afectadas por la alteración hidrotermal.

Se recomienda hacer análisis geoquímicos de elementos mayores, trazas y elementos de Tierras Raras, en los flujos de lava de los tres pozos, con el fin de correlacionar dichos flujos con los flujos de lava que afloran en superficie, de los cuales algunos ya presentan análisis químicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Allpahuasi – Papallacta (2011). “Acerca de Papallacta” en:
<http://papallacta.info/Acerca-de-20Papallacta.html>
- Aspden, J. A., y Litherland, M. (1992). The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, 205(1-3), 187-204.
- Aspden, J. A., Fortey, N., Litherland, M., Viteri, F., y Harrison, S. M. (1992). Regional S-type granites in the Ecuadorian Andes: Possible remnants of the breakup of western Gondwana. *Journal of South American Earth Sciences*, 6(3), 123-132.
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (Eds.). (2004). La cuenca Oriente: geología y petróleo (Vol. 144). Institut français d'études andines.
- Baldock, J. W. (1982). Geology of Ecuador: explanatory bulletin of the national geological map of the Republic of Ecuador; 1: 1,000, 00 scale 1982. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, Dirección General de Geología y Minas.
- Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J. M., y Santacroce, R. (1988). Plio-quadernary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine*, 125(01), 1-14.
- Beate, B., y Urquiza, M. (2015). Geothermal Country Update for Ecuador, 2010-2015. *Proceedings World Geothermal Country*.
- Beate, B., Inguaggiato, S., Villares, F., Benitez, S., y Hidalgo, S. (2010). The Cachiycu Geothermal Prospect, Chacana Caldera, Ecuador. *World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.*, 10p.
- Beate, B., Villares, F., Inguaggiato, S., Hidalgo, S., y Benitez, S. (2009). Modelo geotérmico preliminar de tres áreas de interés en la caldera cuaternaria resurgente de Chacana y estimación teórica de su potencial geotermoeléctrico..., EPN., *Revista Politécnica.*, Vol 30, No. 1, pp: 64-85.

- Berger, G., y Velde, B. (1992). Chemical parameters controlling the propylitic and argillic alteration process. *European Journal of Mineralogy*, 4(6), 1439-1455.
- Browne, P. (1978). Hydrothermal Alteration in Active Geothermal Fields., *Rev. Earth Planet. Sci*, pp. 229 – 250.
- Browne, P. and Ellis, A. (1970). The Ohaki-Broadlands Hydrothermal Area, New Zealand: Mineralogy and Related Geochemistry, *Am. J. Sci.* 269, pp. 97 – 131.
- Cas, R. A. F., y Wright, J. V. (1988). Modern and ancient volcanic successions. Chapman y Hall.
- CELEC EP. (2012). Estudio de Pre-factibilidad Inicial para la Elaboración del Proyecto Geotérmico Chacana-Cachiyacu y Jamanco. Informe Técnico Inédito preparado por SYR (Servicio y Remediación S.A), dirigido por: Bernardo Beate, Quito, Ecuador. Sección Geología: Dr. Hall M.L y Villagómez D., 97 p, Sección Geomorfología: Echeverría M, 27 p.
- Clapperton, C. M., y McEwan, C. (1985). Late Quaternary moraines in the Chimborazo area, Ecuador. *Arctic and Alpine Research*, pp.135-142.
- Clapperton, C. M., y Vera, R. (1986). The Quaternary glacial sequence in Ecuador: a reinterpretation of the work of Walter Sauer. *Journal of Quaternary Science*, 1(1), 45-56.
- CODIGEM - BGS (1993). Mapa Geológico de la República del Ecuador, escala 1:1'000.000.
- Cole, J. W., Milner, D. M., y Spinks, K. D. (2005). Calderas and caldera structures: a review. *Earth-Science Reviews*, 69(1), pp. 1-26.
- Corbett, G. and Leach, T. (1997). Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. *Society of Economic Geologist, Special Publication Number 6*, pp:237.

- Corbett, G. J., y Leach, T. M. (1998). Controls on hydrothermal alteration and mineralization. Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization. Society of Economic Geologists Spec. Publ, 6, 69-82.
- Ellis, A. J., 1959, Solubility of calcite in carbon dioxide solutions: American Journal of Science, v. 257, p. 354-365.
- Feininger, T., y Bristow, C. R. (1980). Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador. Geologische Rundschau, 69(3), 849-874.
- Ford, K., Harris, J. R., Shives, R., Carson, J., y Buckle, J. (2008). Gamma-Ray Spectrometry: A Tool for Mapping Canada's North. Geoscience Canada, Vol. 35.
- Giggenbach, W. F. (1980). Geothermal gas equilibria. Geochimica et cosmochimica acta, 44(12), 2021-2032.
- Giggenbach, W. F. (1984). Mass transfer in hydrothermal alteration systems-a conceptual approach. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(12), 2693-2711.
- Giggenbach, W. F. (1986). The use of gas chemistry in delineating the origin of fluids discharged over the Taupo Volcanic Zone: Proceedings Symposium V, International. Volcanological Congress, Auckland, p. 47-50.
- González-Partida, E., Birkle, P., y Torres-Alvarado, I. S. (2000). Evolution of the hydrothermal system at Los Azufres, Mexico, based on petrologic, fluid inclusion and isotopic data. Journal of volcanology and geothermal research, 104(1), 277-296.
- Gould, K. M., Piper, D. J., Pe-Piper, G., y MacRae, R. A. (2014). Facies, provenance and paleoclimate interpretation using spectral gamma logs: Application to the Lower Cretaceous of the Scotian Basin. Marine and Petroleum Geology, 57, 445-454.
- Graettinger, A. H., Valentine, G. A., Sonder, I., Ross, P. S., White, J. D. L., y Taddeucci, J. (2014). Maar-diatreme geometry and deposits: Subsurface

blast experiments with variable explosion depth. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(3), 740-764.

Gutscher, M. A., Malavieille, J., Lallemand, S., y Collot, J. Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3), 255-270.

Hall, M. L., y Beate, B. (1991). El volcanismo plio-cuaternario en los Andes del Ecuador. *Estudios Geograficos*, Quito, 4, pp.5-17.

Hall, M. L., y Mothes, P. A. (2001). La Caldera de Chacana, el Centro Riolfítico más grande de los Andes Septentrionales., Cuartas Jornadas en Ciencias de la Tierra, EPN, Quito.

Hall, M. L., y Mothes, P. A. (2008). The Chacana caldera complex in Ecuador. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 3, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.

Hammersley, L., De Paolo, D., Beate, B. and Deino, A., (2005), Quantitative model for andesite and rhyolite generation in a continental margin: the Chalupas Caldera, Ecuador. Submitted to *G3*.

Hedenquist, J. (1990). The Thermal and Geochemical Structure of The Broadlands-Ohaaki Geothermal System, New Zealand., *Geothermics*, Vol.19, No. 2, pp. 151-158.

Hughes, R. A., y Pilatasig, L. F. (2002). Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 345(1), 29-48.

Inoue, A. (1992). Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environments, pp. 268 - 329.

Instituto Geográfico Militar, IGM, 1986, Cartografía del Ecuador, escala 1: 250 000

Jaillard, E., Caron, M., Dhondt, A., Ordoñez, M., Andrade, R., Bengtson, P., ... y Huacho, J. (1997). Síntesis estratigráfica y sedimentológica del Cretáceo y

Paleógeno de la cuenca oriental del Ecuador. Orstom-Petroproduccion Publication, Quito.164 p.

- Jaillard, E., Ordoñez, M., Benitez, S., Berrones, G., Jiménez, N., Montenegro, G., y Zambrano, I. (1995). Basin development in an accretionary, oceanic-floored fore-arc setting: southern coastal Ecuador during late Cretaceous-late Eocene time. Pp. 615-631.
- Keith, T. E., Thompson, J. M., y Mays, R. E. (1983). Selective concentration of cesium in analcime during hydrothermal alteration, Yellowstone National Park, Wyoming. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(4), 795-804.
- Kerr, A. C., Aspden, J. A., Tarney, J., y Pilatasig, L. F. (2002). The nature and provenance of accreted oceanic terranes in western Ecuador: geochemical and tectonic constraints. *Journal of the Geological Society*, 159(5), 577-594.
- Killeen, P. G. (1963). Killeen, PG, Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration—application and interpretation; in *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*; Peter J. Hood, editor; Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, p. 163-229, 1979. Economic Geology Report, (31), 163.
- Lasso, G. (2009). Guía Turística de la Reserva Ecológica Cayambe-Coca. 78p.
PDF en:
<http://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/plugins/download/monitor/download.php?id=797yforce=1>
- Lipman, P. W. (1984). The roots of ash flow calderas in western North America: windows into the tops of granitic batholiths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B10), 8801-8841.
- Litherland, M., Aspen, J. A., y Jemielita, R. A. (1994). The metamorphic belts of Ecuador (Vol. 11). British Geological Survey. Overseas Memoir 11, 147 p.

- Lonsdale, P. (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. *Tectonophysics*, 404(3), 237-264.
- Lowell, J. D., y Guilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4), 373-408.
- Lutgens, F. K., Tarbuck, J.E., y Tasa, D. (2012). *Essentials of Geology*. Prentice Hall. 162 p.
- Mamberti, M., Lapierre, H., Bosch, D., Jaillard, E., Ethien, R., Hernandez, J., y Polvé, M. (2003). Accreted fragments of the Late Cretaceous Caribbean-Colombian Plateau in Ecuador. *Lithos*, 66(3), 173-199.
- McPhie, J. (1993). *Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Centre for Ore Deposits and Exploration Studies of University of Tanzania. 196 p.
- Michaud, F., Witt, C., y Royer, J. Y. (2009). Influence of the subduction of the Carnegie volcanic ridge on Ecuadorian geology: Reality and fiction. *Geological Society of America Memoirs*, 204, 217-228.
- Misión Británica- CODIGEM, 1993, mapa geológico del Ecuador 1:1.000.000
- Moore, J. G., y Peck, D. L. (1962). Accretionary lapilli in volcanic rocks of the western continental United States. *The Journal of Geology*, 70(2), 182-193.
- Palladino, D. M., Valentine, G. A., Sottili, G., y Taddeucci, J. (2015). Maars to calderas: end-members on a spectrum of explosive volcanic depressions. *Frontiers in Earth Science*, 3, 36 p.
- Pennington, W. D. (1981). Subduction of the eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11), 10753-10770.
- Pilicita, B. (2013). Estudio de fuentes termales, fallas geológicas, descarga de calor en la Caldera de Chacana y el aprovechamiento actual del recurso geotérmico. Tesis de Grado-EPN, Quito, 169 p.

- Pirajno, F. (2009). Hydrothermal processes associated with meteorite impacts. In *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*, Springer Netherlands. pp. 1097-1130.
- Reed, M. H., y Spycher, N. F. (1985). Boiling, cooling, and oxidation in epithermal systems: a numerical modeling approach. *Reviews in Economic Geology*, 2, 249-272.
- Schnyder, J., Ruffell, A., Deconinck, J. F., y Baudin, F. (2006). Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining late Jurassic–early Cretaceous palaeoclimate change (Dorset, UK). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229(4), 303-320.
- Segovia, M., y Alvarado, A. (2009). Breve Análisis de la Sismicidad y del Campo de Esfuerzos en el Ecuador. *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador: desde la costa continental hasta las Islas Galápagos*, 131-149.
- Struhsacker, D. W. (1978). Mixed basalt-rhyolite assemblages in Yellowstone National Park: The petro-genetic significance of magma mixing. Doctoral dissertation, MS Thesis, Univ. Montana, Missoula, Montana, 112p.
- Shikazono, N., y Kawahata, H. (1987). Compositional differences in chlorite from hydrothermally altered rocks and hydrothermal ore deposits. *Canadian Mineralogist*, 25(3), 465-474.
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., y Stix, J. (Eds.). (2015). *The encyclopedia of volcanoes*. Elsevier. 1417 p.
- Sillitoe, R. H. (1985). Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs. *Economic Geology*, 80(6), 1467-1514.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105(1), 3-41.
- Simmons, S. F., y Christenson, B. W. (1994). Origins of calcite in a boiling geothermal system. *American Journal of Science*, 294(3), 361-400.
- Simmons, S. F., and Browne, P. (2000). Hydrothermal Minerals and Precious Metals in the Broadlands-Ohaaki Geothermal System: Implications for

- Understanding Low-Sulfidation Epithermal Environments., *Economic Geology.*, Vol.95, pp.971-999.
- Soulas, J. P., Egüez, A., Yepes, H, y Pérez, V. H. (1991). Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes Ecuatorianos y el extremo sur de Colombia. *Boletín Geológico Ecuatoriano*, 2(1), 3-11.
- Spectral International Inc., (2005). *Espectroscopia de Reflectancia Aplicada. Manual de interpretación de espectros.* 180 p.
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., y Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 157-171.
- Valentine, G. A., Graettinger, A. H., Macorps, É., Ross, P. S., White, J. D., Döhring, E., y Sonder, I. (2015). Experiments with vertically and laterally migrating subsurface explosions with applications to the geology of phreatomagmatic and hydrothermal explosion craters and diatremes. *Bulletin of Volcanology*, 77(3), 1-17.
- Vera, R. y López, R. (1986). El Origen de la Cangahua. *Paisajes Geográficos, CEPEIGE, No.16, Quito, Ecuador.* pp: 21-28.
- Vera, R. (2016). *Geology of Ecuador. Gráficas Iberia, Quito, Ecuador.* 150 p.
- Villares Jibaja, F. M. (2010). Estudio geovulcanológico de la zona sur de la Caldera Chacana, provincias de Napo-Pichincha. Tesis de Grado-EPN, Quito, 209 p.
- White, J. D., y Ross, P. S. (2011). Maar-diatreme volcanoes: a review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1), pp: 1-29.
- Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., y Egüez, A. (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the Inter-Andean Depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(1), 5-19.

Winter, J. D. (2014). Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. Pearson
New International Edition.

Wirsching, U. (1981). Experiments on the hydrothermal formation of calcium
zeolites. Clays and Clay Minerals, 29(3), 171-183.