

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE INGENIERO GEÓLOGO

TRABAJO DE GRADUACIÓN



ANÁLISIS GEOQUÍMICO-PETROGRÁFICO DE LAS ROCAS
GRANÍTICAS QUE AFLORAN AL SUR DE SAN LUCAS TOLIMÁN,
SOLOLÁ.

CARLOS MANUEL CAAL DE LA CRUZ

COBÁN, ALTA VERAPAZ, SEPTIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE INGENIERO GEÓLOGO

TRABAJO DE GRADUACIÓN

ANÁLISIS GEOQUÍMICO-PETROGRÁFICO DE LAS ROCAS
GRANÍTICAS QUE AFLORAN AL SUR DE SAN LUCAS TOLIMÁN,
SOLOLÁ.

PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

POR

CARLOS MANUEL CAAL DE LA CRUZ
200940090

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

COBÁN, ALTA VERAPAZ, SEPTIEMBRE DE 2016

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR MAGNÍFICO

Dr. Carlos Estuardo Gálvez Barrios

CONSEJO DIRECTIVO

PRESIDENTE:	Lic. Zoot. Ervin Gonzalo Eskenasy Morales
SECRETARIO:	Ing. Geól. César Fernando Monterroso Rey
REPRESENTANTE DOCENTES:	Lcda. T. S. Floricelda Chiquin Yoj
REPRESENTANTE EGRESADOS:	Lic. Admón. Fredy Fernando Lemus Morales
REPRESENTANTES ESTUDIANTILES:	Br. Fredy Enrique Gerada Milián PEM. Cesar Oswaldo Bol Cú

COORDINADOR ACADÉMICO

Ing. Ind. Francisco David Ruiz Herrera

COORDINADOR DE LA CARRERA

Ing. Geól. Sergio David Morán Ical

COMISIÓN TRABAJOS DE GRADUACIÓN

COORDINADOR	Ing. Geól. Osmin Jared Vásquez Hernández
SECRETARIA	Inga. Geól. Silvia Friné Cortez Bendfeldt
VOCAL	Ing. Geól. Ricardo Enrique Milián de la Cruz

REVISORA DE REDACCIÓN Y ESTILO

Inga. Geól. Silvia Friné Cortez Bendfeldt

REVISOR TRABAJOS DE GRADUACIÓN

Ing. Geól. César Fernando Monterroso Rey

ASESOR

Ing. Geól. Osmin Jared Vásquez Hernández

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



07 de marzo de 2016

**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz

PBX: 79 566 600 Ext. 209

Guatemala, C. A.

c. e.: geologiasac@gmail.com

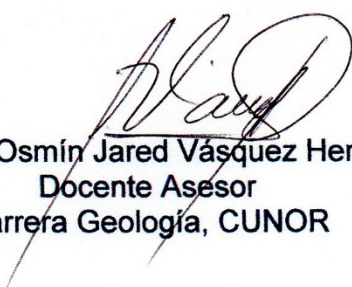
Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

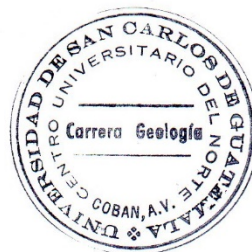
Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEÓL. CARLOS MANUEL CAAL DE LA CRUZ**, carné No. **200940090**, titulado: **“ANÁLISIS GEOQUÍMICO-PETROGRÁFICO DE LAS ROCAS GRANÍTICAS QUE AFLORAN AL SUR DE SAN LUCAS TOLIMÁN, SOLOLÁ”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. M. Sc. Osmín Jared Vásquez Hernández
Docente Asesor
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX: 79 566 600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
c. e.: geologiausac@gmail.com

Ref. 15-CG-241/2016
15 de agosto de 2016

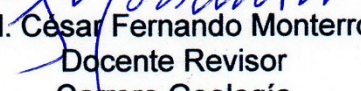
Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **REVISIÓN** del informe final de Trabajo de Graduación del **T.U. GEÓL. CARLOS MANUEL CAAL DE LA CRUZ**, carné n.º **200940090**, titulado: **“ANÁLISIS GEOQUÍMICO-PETROGRÁFICO DE LAS ROCAS GRANÍTICAS QUE AFLORAN AL SUR DE SAN LUCAS TOLIMÁN, SOLOLÁ”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Geól. Cesar Fernando Monterroso Rey
Docente Revisor
Carrera Geología
CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz

PBX: 79 566 600 Ext. 209

Guatemala, C. A.

c. e.: geologiausac@gmail.com

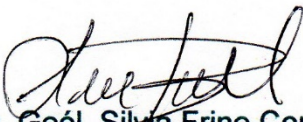
Ref. 15-CG-264/2016
20 de septiembre de 2016

Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio remito el informe Final de Trabajo de Graduación a nivel de grado titulado: **“ANÁLISIS GEOQUÍMICO-PETROGRÁFICO DE LAS ROCAS GRANÍTICAS QUE AFLORAN AL SUR DE SAN LUCAS TOLIMÁN, SOLOLÁ”**, realizado por el T.U. GEÓL. CARLOS MANUEL CAAL DE LA CRUZ, carné n.º 200940090, titulado, el cual ya fue revisado por la **COMISIÓN DE REDACCIÓN Y ESTILO** de la Carrera de Geología, quienes consideramos llena los requisitos establecidos para su aprobación.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Geól. Silvia Frine Cortez Bendfeldt
Comisión Redacción y Estilo
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

HONORABLE COMITÉ EXAMINADOR

En cumplimiento a lo establecido por los estatutos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración de ustedes el trabajo de graduación titulado: Análisis geoquímico-petrográfico de las rocas graníticas que afloran al sur de San Lucas Tolimán, Sololá como requisito previo a optar al título profesional de Ingeniero Geólogo.


Carlos Manuel Caal de la Cruz
Carné: 200940090

RESPONSABILIDAD

“La responsabilidad del contenido de los trabajos de graduación es Del estudiante que opta al título, del asesor y del revisor; la Comisión de Redacción y Estilo de cada Carrera, es la responsable de la estructura y la forma.”

Aprobado en punto SEGUNDO, Inciso 2.4., subinciso 2.4.1. del Acta No. 17-2012 de Sesión Extraordinaria de Consejo Directivo de fecha 18 de julio del 2012.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme las fuerzas, valor y sobre todo sabiduría para alcanzar esta meta.

A mis padres, Carlos Alfredo y Glenda Beatriz, por su apoyo, amor, comprensión, paciencia y fortaleza que siempre me han brindado.

Mis hermanos Pepe, Julia, y Dianita, por su cariño y apoyo demostrado en todo momento.

A mis abuelos Martha (†), Max, Bertha y Beto, por su ejemplo y sabios consejos de vida.

A mis tíos y familia en general por el apoyo y consejos.

A mis amigos y compañeros por los momentos compartidos, las enseñanzas y las muestras de aprecio, especialmente a Daniel, Huesos, Ocho, Tieso, Dulce, Carla, Vargas, Pablo, Eliud, Diablo, Alejandra, Karen y Maria, así como los TH, Indita y todos los que cerramos en 2014.

A la Universidad de San Carlos de Guatemala, en especial al Centro Universitario del Norte, por prepararme y seguir creciendo profesionalmente.

A la carrera de Geología y a cada uno de los catedráticos que la conforman, por las enseñanzas y guía en las distintas áreas de la misma, especialmente al ingeniero Osmin Vásquez por su asesoría, apoyo y disposición en todo momento.

A todos ellos muchas gracias.

El autor.

DEDICATORIA

Acto que dedico a mis padres, Glenda y Carlos que siempre me han apoyado y especialmente a mi Tita, que sé que desde el cielo está feliz de ver que por fin alcancé este logro. Te quiero y extraño mucho, Martha Julia.

ÍNDICE GENERAL

	Página
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	vii
RESUMEN	ix
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	3
1.3 Hipótesis	3
1.3.1 Variables	4
1.4 Antecedentes	4
1.5 Objetivos	5
1.5.1 General	5
1.5.2 Específicos	5
1.6 Ubicación y extensión del área de investigación	6
1.7 Accesos	7
1.8 Marco Geológico Regional	9
1.8.1 Estratigrafía	9
1.8.2 Geología Estructural	12
1.9 Revisión bibliográfica	17
1.9.1 Fundamento metodológico	17

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

Etapa de recopilación y análisis bibliográfico	25
Etapa de trabajo de campo	25
Etapa de trabajo de laboratorio	26
Etapa de gabinete	27

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Geología local	29
a. Andesita	29
b. Granito	31
c. Diorita	33
d. Toba pomácea	34
e. Ceniza volcánica	35
f. Aluvión	36
3.2 Petrografía	37
3.2.1 Unidad de Granito	37
3.2.2 Unidad de Diorita	40
3.2.3 Secuencia de cristalización	45
a. Granito	45
b. Diorita	46
3.3 Geoquímica	48
3.3.1 Elementos mayores	48
3.3.2 Elementos trazas	59
3.3.3 Discriminantes tectónicos	63
3.4 Discusión	68
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES	75

BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	
I GLOSARIO	81
II MAPA GEOLÓGICO	83

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Columna litoestratigráfica caldera de Atitlán	11
2	Marco geológico estructural regional	16
3	Clasificación modal de Streckeisen para la unidad de Granito	40
4	Clasificación modal de Streckeisen para la unidad de Diorita	44
5	Clasificación de rocas gabroícas con hornblenda de Le Maitre Et. Al. 2002	45
6	Secuencia de cristalización teórica de Bowen, 1912	47
7	Mapa de muestras analizadas geoquímicamente	49
8	Diagrama tipo Harker de elementos mayores vs sílice	53
9	Diagramas de dos y tres variables de elementos	55
10	Diagrama de “minerales característicos” B- A de Debon y Le Fort, 1983	56
11	Diagramas de clasificación geoquímica	57
12	Diagrama FD1-FD2 de Bea et al., 2000 para granitoides	58
13	Diagramas de elementos traza normalizados respecto al manto primitivo	60
14	Diagramas de tierras raras normalizadas respecto a valores de condrita	62
15	Diagramas de discriminación tectónica de Pearce et al., 1984	64
16	Diagrama Hf – Rb/30 – 3Ta Harris et al., 1986	65
17	Diagrama Ce/Y vs. SiO ₂ para profundidades de Mantle y Collins, 2008	66
18	Diagrama de temperaturas Al ₂ O ₃ /TiO ₂ vs CaO/Na ₂ O de Jung y Pfänder, 2007	67

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

1	Afloramiento de andesita en las coordenadas UTM: este 700102, norte 1616423	30
2	Andesita melanocrática extraída en las coordenadas UTM: este 700102, norte 1616423	30
3	Afloramiento de granito localizado en las coordenadas UTM: este 700375, norte 1616634	31
4	Relaciones espaciales de la Unidad de Granito	32
5	Granito leucocrático extraído en las coordenadas UTM: este 700691, norte 1616870	32
6	Afloramiento de diorita localizado en las coordenadas UTM: este 700264, norte 1617714	33
7	Diorita melanocrática extraída en las coordenadas UTM: este 700350, norte 1617877	34
8	Afloramiento de toba pomácea localizado en las coordenadas UTM: este 700020, norte 1617100	35
9	Afloramiento de ceniza volcánica en las coordenadas UTM: este 700854, norte 1617850	36
10	Planicie aluvial al suroeste del área de estudio	37
11	Microfotografías correspondientes a la Unidad de Granito muestras MC-7003-16166-1, MC-7006-16168-2 y MC-7005-16166-4	39
12	Enclaves microgranudos dentro de la diorita muestra MC-7003-16178-6	42
13	Microfotografías correspondientes a la Unidad de Diorita muestras MC-7002-16177-5, MC-7003-16178 y MC-7003-16179-7	43

ÍNDICE DE TABLAS

1	Coordenadas UTM que delimitan el área de investigación	6
2	Elementos e iones detectados mediante ICP-MS	19
3	Ambientes tectónicos rocas plutónicas	21
4	Clasificación de las rocas ígneas según su concentración de óxidos de silicio o sílice (SiO ₂)	22

5	Tipos de rocas de acuerdo al Índice de Saturación de Alúmina (ISA)	23
6	Resultado de los análisis químicos de las muestras del área de estudio	50
7	Composición mineralógica normativa de las muestras analizadas según la norma catiónica ICPW	52

ÍNDICE DE MAPAS

1	Ubicación área de investigación	6
2	Accesos a área de investigación	8

LISTA DE ABREVIATURAS

CUNOR	Centro Universitario del Norte.
GARICLA	Gestión ambiental y de riesgos en la cuenca del Lago Atitlán.
ICP-MS	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente.
PPL	Luz polarizada plana.
ppm	Partes por millón.
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala.
UTM	Universal Transverse Mercator.
XPL	Luz polarizada cruzada.

ABREVIATURAS DE MINERALES Y MINERALES NORMATIVOS

Pl	Plagioclasa.	Q	Cuarzo
Hbl	Hornblenda.	C	Corindón
Or	Ortoclasa.	Or	Ortoclasa
Qz	Cuarzo.	Ab	Albita
Chl	Clorita.	An	Anortita
Op	Mineral opaco.	Di	Diópsido
Mc	Microclina.	Hy	Hiperstena
Bt	Biotita.	Il	Ilmenita
		Hm	Hematita
		Ru	Rutilo
		Ap	Apatito

RESUMEN

En este trabajo titulado: Análisis geoquímico-petrográfico de las rocas graníticas que afloran al sur de San Lucas Tolimán, Sololá, se presentan datos geoquímicos de las rocas graníticas que afloran al sur del municipio de San Lucas Tolimán e información cartográfica de los *stocks* de granito y diorita, así como sus relaciones de campo.

El *stock* de granito analizado presenta una mineralogía característica de plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico ortoclasa y microclina, biotita y hornblenda. Sus contactos son claramente intrusivos cuya roca caja son coladas andesíticas. Por otro lado el *stock* de diorita presenta una mineralogía compuesta de plagioclasa, hornblenda, feldespato potásico ortoclasa, cuarzo y clinopiroxeno. Los contactos en este último intrusivo no son claros, y se encuentra intruyendo coladas andesíticas.

La geoquímica de elementos mayores permitió clasificar al granito como un granito peraluminoso félsico tipo S el cual se originó por la fusión parcial de rocas sedimentarias clásticas. Mientras que la diorita se clasificó como un granito metaluminoso intermedio tipo I derivado directamente de magmas del manto o de la fusión de otras rocas ígneas o metaígneas. La geoquímica de elementos traza en ambas rocas evidencia un comportamiento típico de arco volcánico con anomalías negativas de Nb y Ti, además de enriquecimiento en Ba, K y Sr en ambas rocas, propios de magmas se originados en la corteza. El espesor de la corteza en la que se originaron es de 60 Km – 65 Km para el granito, y <40 Km para la diorita, mientras que la temperatura es de 760° C y de 950°C – 960°C respectivamente.

INTRODUCCIÓN

En el límite entre las placas del Caribe y Cocos, en Guatemala, al norte de esta se encuentran diversas calderas volcánicas, entre ellas la caldera de Atitlán, que está constituida por un complejo de rocas volcánicas y plutónicas, las cuales se han depositado e intruído con la evolución de la misma.

Esparcidos alrededor de la caldera existen varios cuerpos plutónicos de diferentes tipos y dimensiones, al sureste de la misma en el municipio San Lucas Tolimán afloran dos *stocks* independientes, los cuales son de granito y diorita. Establecer las características geoquímicas de estos cuerpos intrusivos es importante para comprender la evolución de la caldera del lago de Atitlán, la cual ha sufrido tres ciclos de formación los cuales se ven reflejados en el relieve y geología actual.

En esta investigación titulada: Análisis geoquímico-petrográfico de las rocas graníticas que afloran al sur de San Lucas Tolimán, Sololá, se establece que el *stock* de granito es un granito peraluminoso tipo S, mientras que la diorita es un granito metaluminoso tipo I que intruyen rocas andesíticas del margen de caldera. Cuya química indica que el granito se originó de un magma ácido (~70 % SiO₂), rico en minerales alcalinos, con una diferenciación muy evolucionada, mientras que la diorita se originó por un magma intermedio (~54 % SiO₂), rico en minerales ferromagnesianos y alcalinos, pobremente evolucionado.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

¿Cuáles son las características geoquímicas y petrográficas de las rocas graníticas que afloran al sur del municipio de San Lucas Tolimán, Sololá?

1.2 Justificación

Los cuerpos graníticos en Guatemala han sido poco estudiados, y las rocas graníticas que afloran al sur de San Lucas Tolimán no escapan a esto. Las rocas graníticas son una gran fuente de información geológica, ya que de ella se puede comprender la historia geológica local y regional, esto a partir de la información generada por análisis geoquímicos.

Por lo que esta investigación pretende analizar geoquímicamente y petrográficamente las rocas graníticas que afloran al sur de San Lucas Tolimán, para poder comprender la historia geológica local y enriquecer la información geológica regional de la caldera de Atitlán, determinando el ambiente tectónico en el que se formaron, su protogénesis y saturación en sílice.

1.3 Hipótesis

Las rocas graníticas que afloran al sur de San Lucas Tolimán son metaluminosas, cuya formación está relacionada con el segundo ciclo de la formación de la caldera de Atitlán, correlacionables con las cuarzo-monzonitas mencionadas por Williams y McBirney, 1969.

1.3.1 Variables

- a. Dependiente
 - 1. Geoquímica de rocas.
 - 2. Petrografía

- b. Independiente
 - 1. Contenido de elementos mayores y traza.
 - 2. Grado de saturación de alúmina.
 - 3. Ambiente de formación y protegénesis de la roca.
 - 4. Contenido mineral.

1.4 Antecedentes

Christopher G. Newhall en 1 981, en su tesis de doctorado titulada “*Geology of the Lake Atitlán region, western Guatemala*¹” expone un estudio geológico regional del lago de Atitlán, dentro del cual muestran dataciones realizadas a las cuarzodioritas que afloran en la bahía de Santiago, las granodioritas que afloran en las proximidades de San Juan La Laguna y las cuarzo-monzonitas que afloran en San Lucas Tolimán, las biotitas y hornblendas que se dataron dieron una edad de 13.8, 9.0 y 8.5 Ma, respectivamente, realizadas por Williams y McBirney, 1 969. Además de las relaciones de las mismas con los tres eventos de formación de la caldera de Atitlán, denominadas Atitlán I, Atitlán II y Atitlán III de 11-12, 8 y 0.08 Ma respectivamente.

Rose, W.I., Newhall, C.G., Bornhorst, T.J. y Self, S. en 1 987 en la investigación titulada “*Quaternary silicic pyroclastic deposits of Atitlán caldera, Guatemala*²”, exponen un estudio sobre los depósitos piroclásticos silíceos posteriores a la actividad basáltica/andesítica y a la erupción de Los Chocoyos,

¹ Newhall, Christopher G. *Geology of the Lake Atitlán region, western Guatemala*. Hanover, Alemania. Dartmouth College, Hanover. 1981.

² Rose, William I. et al. *Quaternary silicic pyroclastic deposits of Atitlán caldera, Guatemala*. Michigan, USA. Department of Geology and Geological Engineering, Michigan Technological University, Houghton. 1987.

realizando estudios geoquímicos tanto de los depósitos de Los Chocoyos, así como de los depósitos piroclásticos posteriores a este evento dentro de la caldera y sus alrededores.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Analizar geoquímicamente las rocas graníticas que afloran al sur de San Lucas Tolimán, Sololá.

1.5.2 Específicos

- Analizar petrográficamente las rocas graníticas mediante secciones delgadas.
- Determinar el tipo de roca mediante el diagrama TAS para rocas plutónicas.
- Establecer la saturación de alúmina de las rocas.
- Definir la proterogénesis y el ambiente de emplazamiento de las rocas graníticas.

1.6 Ubicación y extensión del área de investigación

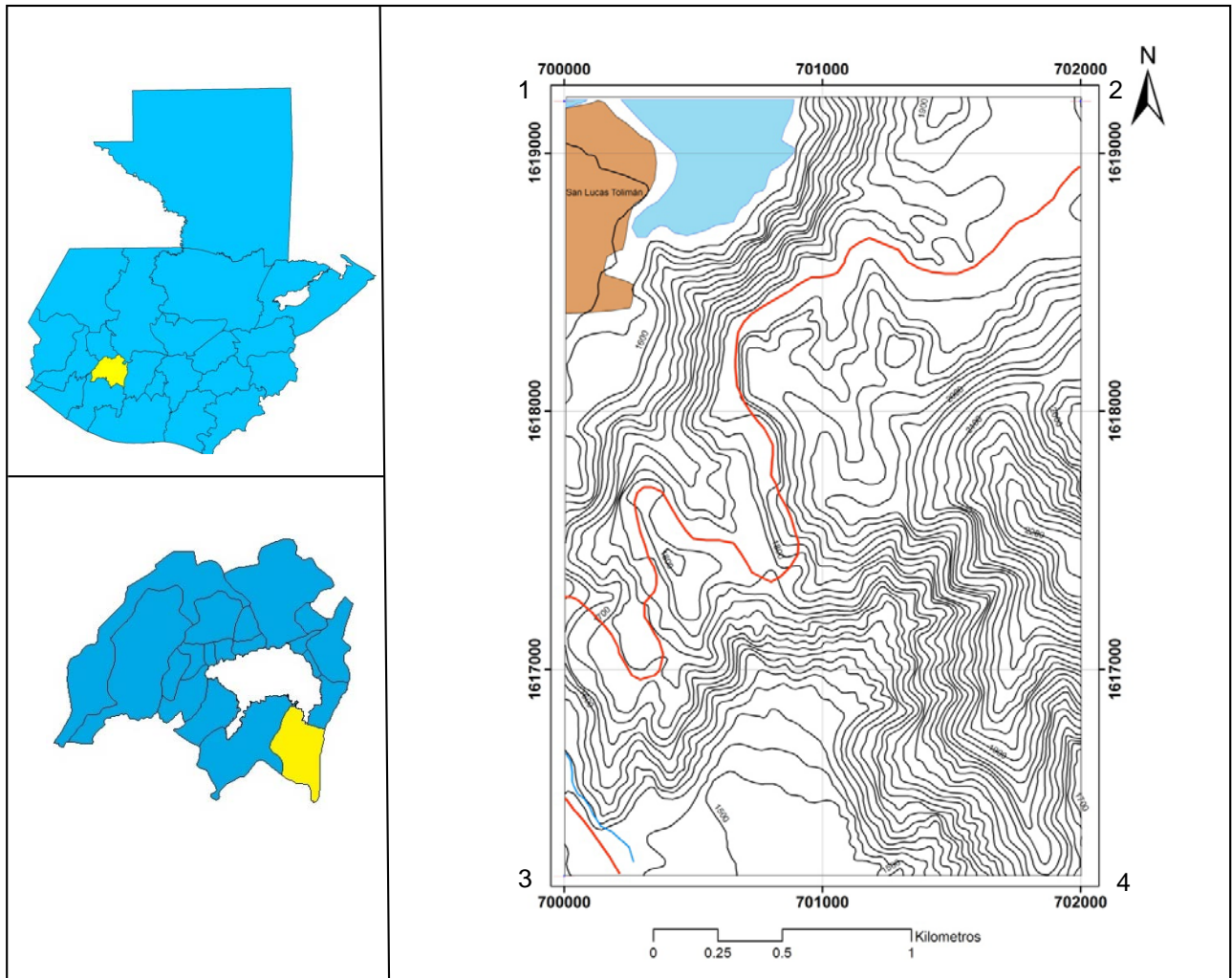
El área de estudio se encuentra ubicada al sur del municipio de San Lucas Tolimán, Sololá, abarcando un área de 6 Km² delimitado por las coordenadas UTM indicadas en la tabla 1.

TABLA 1
COORDENADAS UTM QUE DELIMITAN EL ÁREA DE ESTUDIO

COORDENADAS		
	ESTE	NORTE
1	700000	1619200
2	702000	1619200
3	700000	1616200
4	702000	1616200

Fuente: Investigación de campo. 2015.

MAPA 1
UBICACIÓN ÁREA DE INVESTIGACIÓN



Fuente: Investigación de campo. 2015.

1.7 Accesos

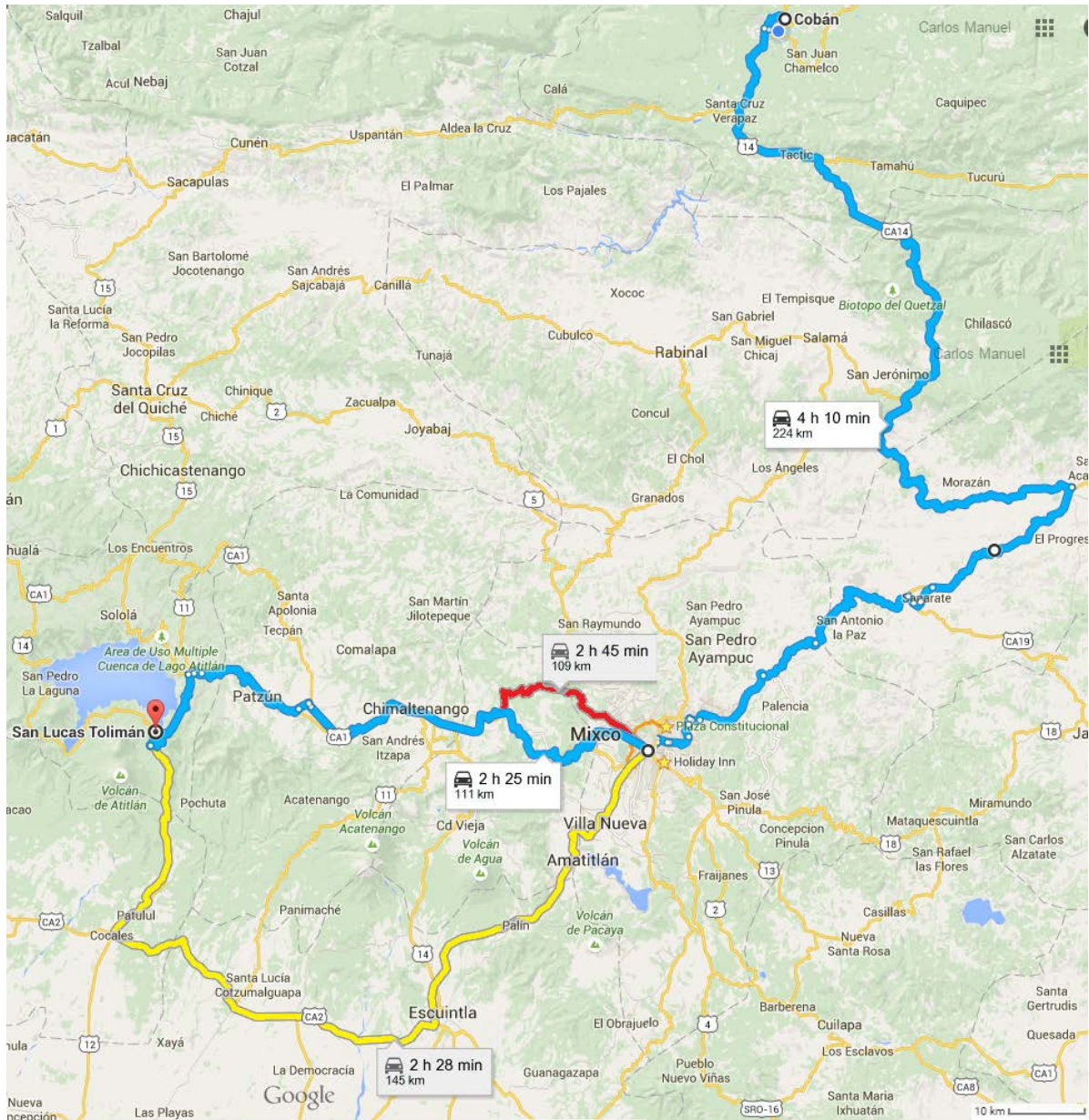
El área se localiza en el municipio San Lucas Tolimán, del departamento de Sololá. Se encuentra a 111 kilómetros de la ciudad de Guatemala, y a 335 kilómetros de la ciudad de Cobán, Alta Verapaz.

Para acceder desde Cobán por la ruta 1, se viaja por la carretera CA-14, hasta el cruce de El Rancho, en el departamento de El Progreso, donde se cruza al oeste hasta la ciudad de Guatemala a través de la carretera CA-9. Para llegar desde la ciudad capital, se viaja hacia Mixco, después la carretera Interamericana CA-1, hasta Patzum, Chimaltenango hasta San Lucas Tolimán.

Por la ruta 2 se viaja por la carretera CA-14, se viaja por la carretera CA-14, hasta el cruce de El Rancho, en el departamento de El Progreso, donde se cruza al oeste hasta la ciudad de Guatemala a través de la carretera CA-9. Para llegar desde la ciudad capital, hasta llegar a la ciudad de Guatemala, yendo al sur hasta el municipio de Amatitlán, por la autopista Palin-Escuintla, desviándose al oeste por la carretera CA-2, hasta el cruce de Cocales, yendo al norte por Patulul hasta San Lucas Tolimán.

A través de la ruta 3 posee el mismo recorrido que el de la ruta 1, con la diferencia que no se utiliza la salida por el municipio de Mixco.

MAPA 2 ACCESOS A ÁREA DE INVESTIGACIÓN



Ruta 1: Azul

Ruta 2: Amarillo + Azul

Ruta 3: Rojo + Azul

Fuente: Modificado de Google Maps.

1.8 Marco Geológico Regional

1.8.1 Estratigrafía

La región del lago de Atitlán se ha formado a partir de 3 ciclos volcánicos que comenzaron hace 14 Ma y que conllevan el crecimiento de estratovolcanes, diversas erupciones silíceas y formaciones de caldera (Newhall, 1986). Cada ciclo empieza con la intrusión de magma máfico (básico) e intermedio, que da lugar al crecimiento de estratovolcanes, en lo que posteriormente será el borde de la caldera ³.

Mientras están creciendo estos estratovolcanes, por debajo de ellos, se están formando plutones silíceos, parte de los cuales entran en erupción esporádicamente, dando lugar a la expulsión de pequeños volúmenes de cenizas silíceas, (que posteriormente formarán tobas volcánicas). Estos plutones silíceos pueden llegar a convertirse en un gran cuerpo de magma silíceo cerca de la superficie. Este gran cuerpo de magma alcanza las condiciones de presión y temperatura necesaria y entra en erupción de manera explosiva, como un gran flujo de ceniza volcánica (si éstas se encuentra incandescentes en el momento de su deposición, se funden formando tobas). La expulsión de este volumen de magma, deja un espacio vacío, que provoca el colapso de las paredes y formación de la caldera volcánica⁴.

Después del colapso y formación de la caldera, comienza un periodo de menor actividad volcánica, en el que dominan los procesos

³ Núñez Álvarez, Laura y Vanessa Martínez Cobo. *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica (1:25 000) de la cuenca del Lago Atitlán*. Proyecto Gestión ambiental y de riesgos en la cuenca del Lago Atitlán –GARICLA–. Panajachel, Sololá, Guatemala: Geólogos del Mundo y Asociación Vivamos Mejor, 2 011.

⁴ *Ibíd* 9.

de erosión y sedimentación y, por lo tanto, comienza a rellenarse de la caldera⁵.

Los primeros sedimentos de relleno se encuentran derivados de la erosión de las tobas jóvenes, y más tarde sedimentos retrabajados, así como depósitos de los estratovolcanes y adicionalmente por flujos de ceniza silíceas (que pueden ser expulsados esporádicamente). En consecuencia, cada caldera es rellenada por sedimentos ricos en materiales relacionados con la caldera y con los materiales jóvenes del siguiente ciclo volcánico⁶.

De este modo, termina cada ciclo volcánico y comienza el siguiente con la nueva intrusión de magma básico e intermedio, y por lo tanto con el crecimiento de nuevos estratovolcanes⁷.

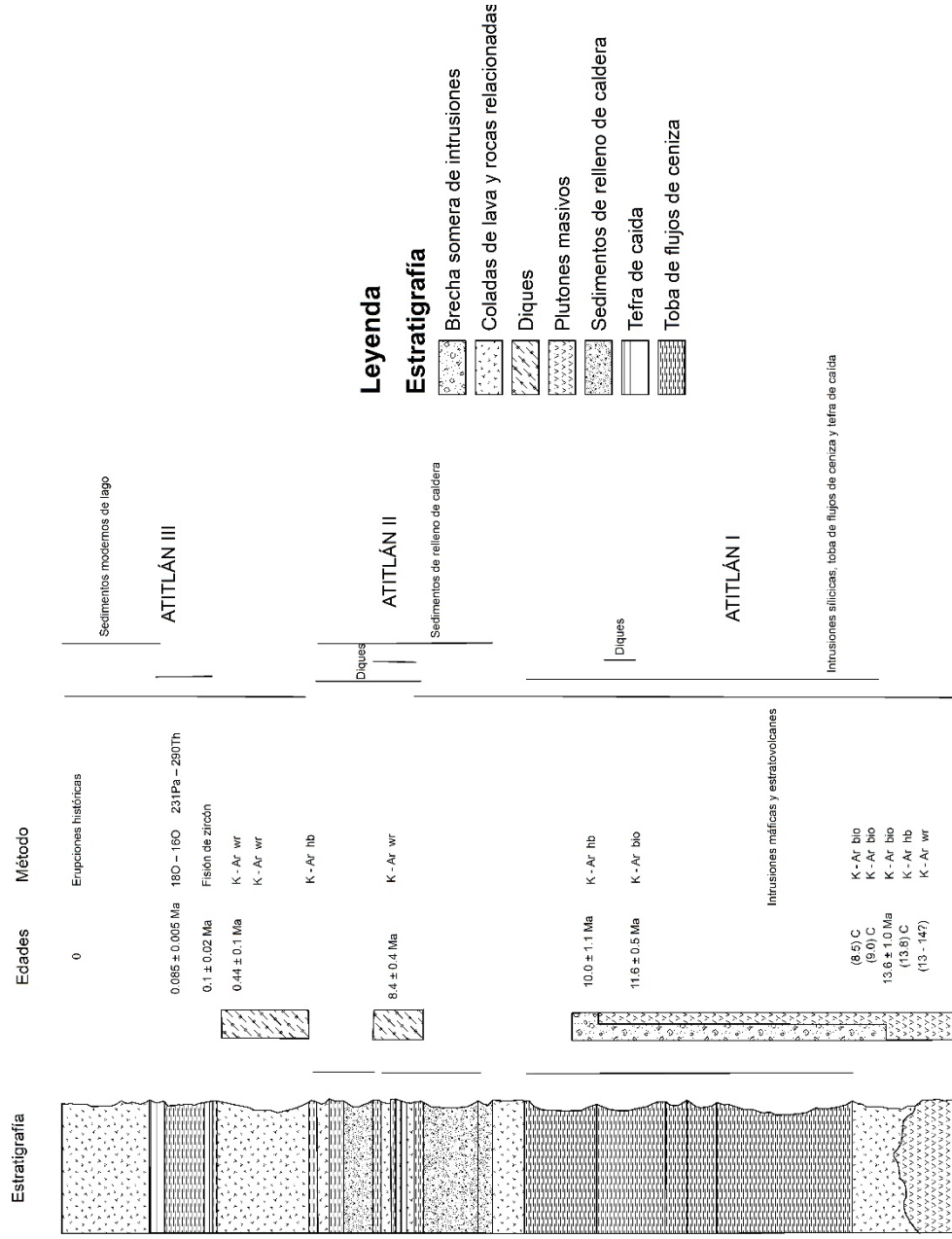
La figura 1 muestra la columna litoestratigráfica regional de los tres ciclos de formación de la caldera de Atitlán.

⁵ Núñez Álvarez, Laura y Vanessa Martínez Cobo. *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica (1:25 000) de la cuenca del Lago Atitlán*. Proyecto Gestión ambiental y de riesgos en la cuenca del Lago Atitlán –GARICLA–. Panajachel, Sololá, Guatemala: Geólogos del Mundo y Asociación Vivamos Mejor, 2 011.

⁶ *Ibíd* 10.

⁷ *Ibíd* 10.

FIGURA 1 COLUMNA LITOSTRATIGRÁFICA CALDERA DE ATITLÁN



Fuente: Modificado de Newhall, Christopher G. Geology of the Lake Atitlán region, western Guatemala. 2 016.

1.8.2 Geología Estructural

La cuenca del lago Atitlán se encuentra limitada en su margen sur por una cadena de estratovolcanes andesíticos y basálticos activos. Las unidades de tefra cuaternarias, las cuales cubren la mayoría de las zonas altas de la cuenca, raramente superan los 15 metros de espesor en una misma localidad. Sin embargo, los depósitos de ceniza no consolidados del cuaternario rellenaron la mayoría de las cuencas occidentales del altiplano guatemalteco y en algunos lugares alcanzan espesores de más de 200 m (Newhall, 1986)⁸.

Desde el punto de vista estructural, el plegamiento de las zonas volcánicas más elevadas es secundario y se limita a la deformación local a través de las zonas de falla y en algunos pliegues generales (Williams, 1960). La tendencia de las zonas de falla generales es:

- A N45-60W and N30-60E, tendencia tanto en dirección dextral como sinistral.
- Una tendencia N-S que provoca fracturas por tensión y grabens que controlan las lineaciones volcánicas y los cursos de algunos ríos.
- Una tendencia de fracturas de dirección E-W, 20 km al norte del área de estudio, que podría relacionarse con el movimiento hacia el este del movimiento relativo de la placa del Caribe hacia la placa Norte Americana⁹.

Estos tres comportamientos de las fallas regionales corresponden a los patrones de fallas descritas en otras partes de

⁸ Núñez Álvarez, Laura y Vanessa Martínez Cobo. *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica (1:25 000) de la cuenca del Lago Atitlán*. Proyecto Gestión ambiental y de riesgos en la cuenca del Lago Atitlán –GARICLA–. Panajachel, Sololá, Guatemala: Geólogos del Mundo y Asociación Vivamos Mejor, 2 011.

⁹ *Ibíd* 12.

Guatemala por Stoiber y Carr (1973), Carr (1976), Plafket (1976), Schwartz et al. (1979), and Burkart and Self (1985)¹⁰.

La caldera de Atitlán se formó a partir de tres ciclos, los cuales originaron el colapso de la caldera y los edificios volcánicos que se observan actualmente, estos ciclos empezaron hace aproximadamente 14 millones de años.

Primer ciclo (14-11 Ma)¹¹:

- Crecimiento de estratovolcanes andesíticos con la intrusión de magma básico e intermedio. Aunque los estratovolcanes del ciclo Atitlán I no están expuestos en la actualidad, su existencia ha sido demostrada y probada por xenolitos presentes en las tobas de flujos de cenizas silíceas (Newhall, 1986).
- Formación de un gran plutón silíceo, parte del cual será expulsado como cenizas silíceas (en la siguiente fase) y, parte será enfriado en el interior, dando lugar a los granitos de la Bahía de Santiago.
- Gran erupción de flujos y cenizas silíceos de la serie María Tecún, que dio lugar a la cordillera del mismo nombre, al norte de la cuenca actual.
- Colapso y formación de la caldera Atitlán I. Al vaciarse la cámara magmática, el techo de ésta colapsa, dando lugar a la caldera Atitlán I, ubicada al norte de la caldera actual.
- Relleno de la caldera Atitlán I. Comienzan los procesos de erosión y relleno de la caldera I, dando lugar a los denominados Sedimentos de Relleno de Caldera I.

¹⁰ Núñez Álvarez, Laura y Vanessa Martínez Cobo. *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica (1:25 000) de la cuenca del Lago Atitlán*. Proyecto Gestión ambiental y de riesgos en la cuenca del Lago Atitlán –GARICLA–. Panajachel, Sololá, Guatemala: Geólogos del Mundo y Asociación Vivamos Mejor, 2 011.

¹¹ *Ibíd* 13.

Segundo ciclo (10-8 Ma)¹²:

- Crecimiento de estratovolcanes andesíticos. Estos estratovolcanes se evidencian en los cerros de lavas andesíticas, al este de la cuenca (San Antonio Palopó) que se encuentran cubiertos de depósitos piroclásticos posteriores.
- Formación de un plutón silíceo, parte del cual será expulsado como cenizas silíceas (en la siguiente fase) y, parte será enfriado en el interior dando lugar a los granitos de suroeste de la cuenca (San Juan La laguna y San Pablo La Laguna).
- Erupción de flujos y cenizas silíceos engloba la erupción de cenizas y flujos de la serie San Jorge, serie El Adelanto, serie Panajachel, y las series de erupción de cenizas Catarata Inferior y Catarata Superior.
- Colapso y formación de la caldera Atitlán II, Al vaciarse la cámara magmática, el techo de ésta colapsa, dando lugar a la caldera Atitlán II, ubicada al entre la caldera III y la I. Inyecciones de estado tardío de diques anulares.
- Relleno de la caldera Atitlán II. Comienzan los procesos de erosión y relleno de la caldera II, dando lugar a los denominados Sedimentos de Relleno de Caldera II.

El tercer ciclo (1-0 Ma)¹³:

- Crecimiento de estratovolcanes cuaternarios andesíticos: Volcán Tecolote (en San José Chacayá), Volcán San Marcos (Parte de lo que es el cerro San Marcos) y Volcán Paquisis (lo que es el cerro Paquisis, en San Pedro La Laguna) y otras erupciones silíceas.

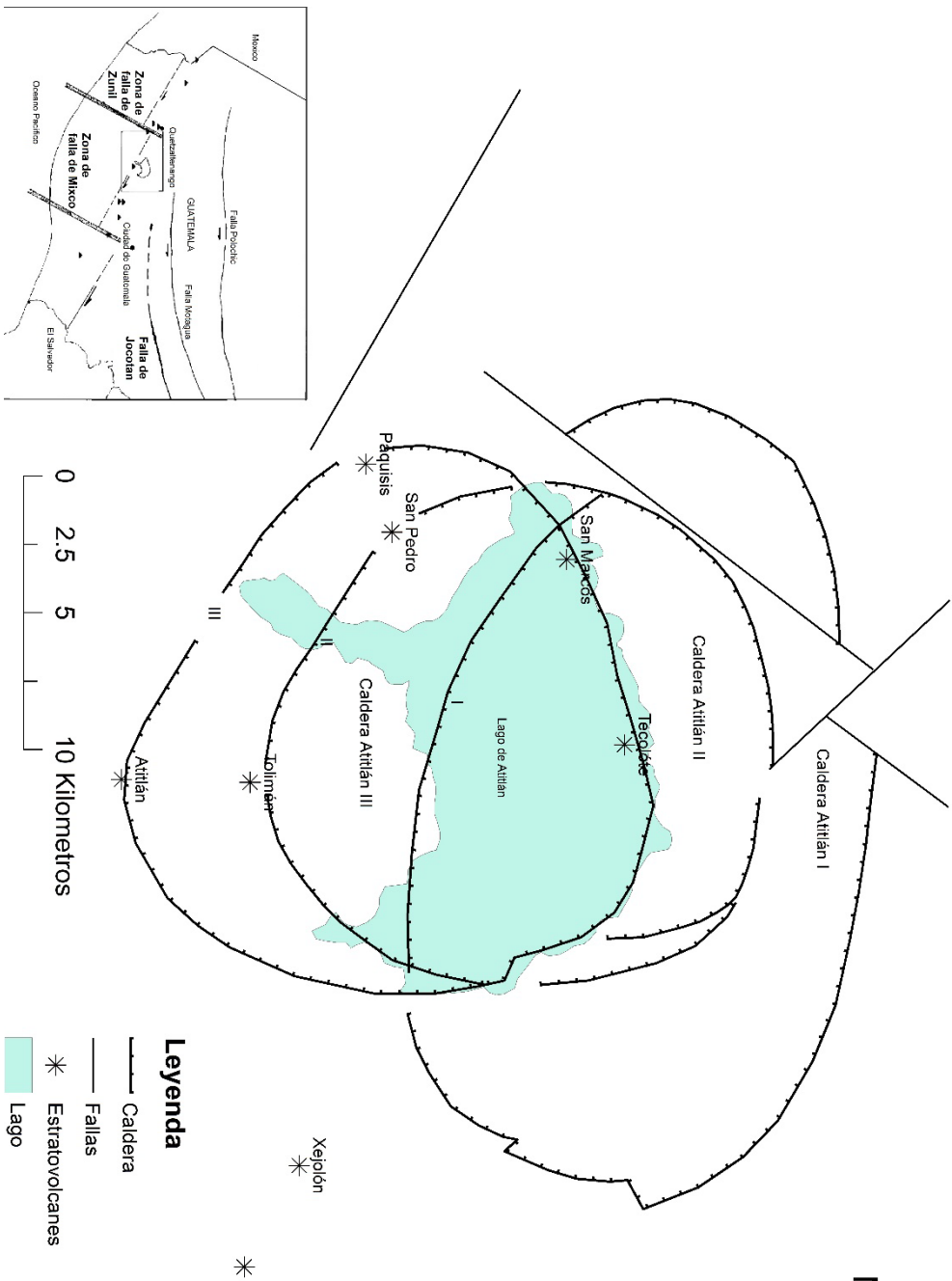
¹² Ibíd 13.

¹³ Núñez Álvarez, Laura y Vanessa Martínez Cobo. *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica (1:25 000) de la cuenca del Lago Atitlán*. Proyecto Gestión ambiental y de riesgos en la cuenca del Lago Atitlán –GARICLA–. Panajachel, Sololá, Guatemala: Geólogos del Mundo y Asociación Vivamos Mejor, 2 011.

- Desarrollo de un plutón de al menos 5 km^3 - 10 km^3 de magma riolítico a una profundidad de alrededor de 10 km.
- Erupción de W, en una erupción mixta.
- Desarrollo de un gran plutón de magma riolítico (250 km^3), de composición similar a la riodacita W.
- Gran erupción de flujos y cenizas de Los Chocoyos (que comenzó hace 160 000 y terminó hace 84 000 años).
- Colapso y formación de la actual caldera Atitlán III.
- Relleno de la caldera Atitlán III. Comienzan los procesos de erosión y sedimentación de la caldera III, que comenzó hace 85 000 años y continúan hasta nuestros días. Como está ocurriendo actualmente con la erosión y sedimentación de cuencas actuales (por ejemplo en las cuencas del Quiscab y del San Francisco).
- Crecimiento de los modernos estratovolcanes, Volcán San Pedro (se formó hace más de 40 000 años), Volcán Atitlán (40 000 años -10 000 años) y Volcán Tolimán (se formó hace menos de 10 000 años, y se tienen datos de erupciones recientes en 1 469 e intermitentemente desde 1826 hasta 1856). La ubicación de estos volcanes es al sur de los de la etapa 1, lo que refleja movimiento hacia el sur del frente volcánico.

La figura 2 muestra la evolución y configuración de la caldera de Atitlán, además de las estructuras más importantes regionalmente.

FIGURA 2
MARCO GEOLÓGICO ESTRUCTURAL REGIONAL



Fuente: Modificado de Rose, William I. et al. *Quaternary silicic pyroclastic deposits of Atitlán caldera, Guatemala*. 2 016.

1.9 Revisión bibliográfica

1.9.1 Fundamento metodológico

El estudio a realizar consiste en describir las propiedades geoquímicas y petrológicas de las rocas graníticas para establecer las características de protogénesis, ambientes tectónicos y contenido de alúmina. Además del contenido mineralógico y características petrológicas.

Los parámetros geoquímicos serán establecidos mediante este método:

- Espectrometría de masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)

ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente es una técnica de análisis inorgánico que es capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica en un rango dinámico lineal de 8 órdenes de magnitud (ng/l – mg/l). Consiste en un equipo dotado de un monocromador posterior a la muestra y una serie de detectores dedicados a cada elemento en diferentes posiciones del plano focal¹⁴.

Su principal ventaja son sus bajos límites de detección para la mayoría de los elementos detectando unas pocas partes por billón – partes por trillón (ppb – ppt) lo que la hace ideal para el análisis de elementos traza. La muestra líquida es vaporizada e ionizada gracias a un plasma de Argón. Los iones una vez formados pasan al espectrómetro de masas donde son separados mediante un cuadropulo y dirigidos al detector¹⁵. La tabla 2 muestra los elementos e iones detectados.

¹⁴ Thomas, Robert. *A beginner's guide to ICP-MS. Part I*. Iselin, New Jersey. USA. 2001.

¹⁵ Ibid 17.

Tiene gran variedad de aplicaciones en las siguientes áreas: biología, física de materiales, medioambiente, geoquímica¹⁶.

Esta importante técnica analítica proporciona un completo análisis elemental e isotópico para un amplio rango de muestras. Desde su lanzamiento comercial en los años ochenta ha ido ganando aceptación en un amplio abanico de disciplinas en las que se incluyen los análisis medioambientales, biológicos, nucleares, mineralógicos e industriales¹⁷.

- Ambiente tectónico

Numerosos investigadores sostienen que la clasificación de los granitos según el ambiente tectónico, es más adecuada que la clasificación alfabética. La tabla 3, muestra esta clasificación que ha sido modificada de Pitcher (1983, 1993), Barbarín (1990) y de Winter (2001). Aunque las clasificaciones químicas proveen a los investigadores algunos criterios para poder caracterizar la fuente de los materiales, una clasificación basada en el ambiente tectónico, provee a los estudiosos, las razones y donde estos se han formado. Asimismo pone en evidencia la continuidad entre los procesos geológicos y la generación magmática, rompiendo un poco esa estructura en compartimiento, a lo que somos tan afectos¹⁸.

¹⁶ Thomas, Robert. *A beginner's guide to ICP-MS. Part I. Spectroscopy*. Iselin, New Jersey. USA. 2001.

¹⁷ Romaní, Jacobo Otero. *Desarrollo de nuevos métodos de extracción en fase sólida para la preconcentración de metales traza en el agua de mar: Evaluación de un soporte de C-18 y de polímeros de impronta iónica. Aplicación al estudio de la ría de Arousa*. Universidad de Santiago de Compostela. Tesis doctoral. La Coruña, España: Facultad de Química, 2009.

¹⁸ http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/11.htm

TABLA 2
ELEMENTOS E IONES DETECTADOS MEDIANTE ICP-MS

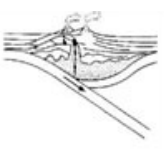
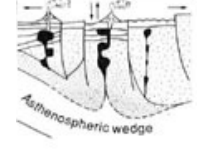
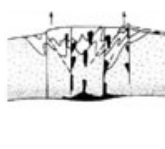
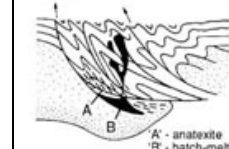
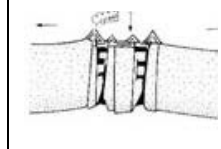
Elemento	Límite de detección	Límite superior	Elemento	Límite de detección	Límite superior
SiO ₂	0.01 %	100 %	Er	0.03 ppm	10 000 ppm
Al ₂ O ₃	0.01 %	100 %	Eu	0.02 ppm	10 000 ppm
CaO	0.01 %	100 %	Ga	0.5 ppm	10 000 ppm
Cr ₂ O ₃	0.002 %	100 %	Gd	0.05 ppm	10 000 ppm
Fe ₂ O ₃	0.04 %	100 %	Hf	0.1 ppm	10 000 ppm
K ₂ O	0.01 %	100 %	Ho	0.02 ppm	10 000 ppm
MgO	0.01 %	100 %	La	0.1 ppm	50 000 ppm
MnO	0.01 %	100 %	Lu	0.01 ppm	10 000 ppm
Na ₂ O	0.01 %	100 %	Nb	0.1 ppm	50 000 ppm
P ₂ O ₆	0.01 %	100 %	Nd	0.3 ppm	10 000 ppm
TiO ₂	0.01 %	100 %	Pr	0.02 ppm	10 000 ppm
Ba	5 ppm	5 %	Rb	0.1 ppm	10 000 ppm
Nb	5 ppm	50 000 ppm	Sm	0.05 ppm	10 000 ppm
Ni	20 ppm	10 000 ppm	Sn	1 ppm	10 000 ppm
Sc	1 ppm	10 000 ppm	Sr	0.5 ppm	50 000 ppm
Sr	2 ppm	50 000 ppm	Ta	0.1 ppm	50 000 ppm
Y	3 ppm	50 000 ppm	Tb	0.01 ppm	10 000 ppm
Zn	5 ppm	50 000 ppm	Th	0.2 ppm	10 000 ppm
LOI	0.1 %	100 %	Tm	0.01 ppm	10 000 ppm
Sum	0.01 %	100 %	U	0.1 ppm	10 000 ppm
Ce	30 ppm	50 000 ppm	V	8 ppm	10 000 ppm
Co	20 ppm	10 000 ppm	W	0.5 ppm	10 000 ppm
Cu	5 ppm	10 000 ppm	Y	0.1 ppm	50 000 ppm
Zn	5 ppm	10 000 ppm	Yb	0.05 ppm	10 000 ppm
Ba	1 ppm	50 000 ppm	Zr	0.1 ppm	50 000 ppm
Be	1 ppm	10 000 ppm			
Ce	0.1 ppm	50 000 ppm			
Co	0.2 ppm	10 000 ppm			
Cs	0.1 ppm	10 000 ppm			
Dy	0.05 ppm	10 000 ppm			

Fuente: Modificado de Catalogo empresa Bureau Veritas Minerals. 2015 Schedule of services and Fees (CDN).

La tabla 3 muestra que los granitos ocurren en diferentes ambientes, que pueden ser groseramente agrupados en: orogénicos y anorogénicos. Los orogénicos: están claramente definidos, como los que resultan de la formación de montañas, resultantes de esfuerzos compresivos asociados con la subducción. Los anorogénicos: se refieren al magmatismo de intraplaca, o de bordes de placas distensivas. Los post-orogénicos: son más dificultosos de clasificar, porque sin orogenia ellos no se habrían formado, por lo que intruyen después de un evento orogénico. Por esta razón han sido clasificados como orogénicos por algunos autores y anorogénicos por otros. Aunque algunos autores los llaman transicionales, por tener ciertos aspectos que pertenecen a ambas categorías. Esto no quiere decir que los granitoides transicionales deben ocurrir entre los eventos magmáticos orogénicos y anorogénico, aunque esto muchas veces tiene lugar¹⁹.

¹⁹ http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/11.htm

TABLA 3
AMBIENTES TECTÓNICOS ROCAS PLUTÓNICAS.

	Orogénico			Transicional	Anorogénico
	Arco de islas oceánicas	Margen continental activo	Colisión continental	Levantamiento/colapso post-orogénico	Rift continental. Punto caliente
					
Geoquímica	Calc-alc>tol. Tipo M e I-M híbridos. Met-Al.	Calc-alc. Tipo I>Tipo S. Met-Al. a Per-Al.	Calc-alc. Tipo S. Per-Al.	Calc-acl. Tipos-I y S. (Tipo A) Met-Al a Per-Al.	Alcal. Tipo A. Per-Alcal.
Tipos de roca	Cz-diorita en arco maduro.	Tonalit-granod>granito-gabro.	Leucogranito y migmatitas.	Granod. + diorita-gabro. Bimodal.	Granito-sienita + diorita-gabro.
Minerales	Hbl>bi	Hbl, bi.	Bi, mu, hbl, grt, Sil-Al, crd.	Hbl>bi.	Hbl, bi, aegir, fayal, riebeck, arfved.
Origen	Fusión parcial de manto.	Fusión parcial de manto con corteza	Fusión parcial de corteza reciclada	Fusión parcial de corteza inf y media+manto	Fusión parcial de manto y/o corteza inf. anhidra
Mecanismos de fusión	Subducción, transferencia de calor y fluidos hacia arriba que disuelven minerales de la loza.		Engrosamiento tectónico+ calor radiogén.	Calor cortical + mantélico (ascen. Astenosfera).	Punto caliente y/o ascenso del manto

Fuente: Instituto superior de correlación geológica. Disponible http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/11.htm.

- Criterio de saturación de sílice

Relacionado con la concentración de sílice (SiO_2) presente en la roca. Este criterio permite dividir a las rocas como sobresaturadas, saturadas y subsaturadas en sílice. La tabla 4 muestra las relaciones con los diferentes tipos de rocas.

TABLA 4
CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS ÍGNEAS SEGÚN SU
CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE SILICIO O SÍLICE (SiO₂)

SiO ₂ (% m/m)	Tipo de roca	Ejemplo de rocas
> 66	Ácida o félsica	Granito-Riolita
52 – 65	Intermedia	Granodiorita-Dacita
45 – 52	Básica o máfica	Gabro-Basalto
< 45	Ultrabásica	Komatita-Peridotita

Fuente: Mendez, J. *Petrología*. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 2004

- Criterio de saturación de alúmina (Al₂O₃)

La alúmina es el segundo componente más abundante en las rocas ígneas y en los minerales denominados feldespatos, siendo estos los más abundantes de las rocas ígneas en general. Este criterio está basado en el índice de saturación de alúmina (ISA). El ISA ($ISA = \frac{Al_2O_3}{Na_2O + K_2O + CaO}$), muestra la concentración de alúmina en relación a la concentración de los óxidos de sodio (Na₂O), potasio (K₂O) y calcio (CaO), en sus proporciones moleculares. Existen tres condiciones (tabla 5).

TABLA 5
TIPOS DE ROCAS DE ACUERDO AL ÍNDICE DE SATURACIÓN
DE ALÚMINA (ISA).

Saturación de alúmina	Tipo de roca	Expresión química
Subsaturada en alúmina (Al ₂ O ₃) y sobresaturada en álcalis (Na ₂ O + K ₂ O)	Peralcalinas	$Al_2O_3 < (Na_2O + K_2O)$
Saturadas en alúmina	Metaluminosas	$Al_2O_3 < (CaO + Na_2O + K_2O) > (Na_2O + K_2O)$
Sobresatura en alúmina	Peralumínicas	$Al_2O_3 > (CaO + Na_2O + K_2O)$

Fuente: Shand, S. James. *The eruptives rocks*. John Wiley and Sons. New York, USA. 1947.

- Petrología

Ciencia que estudia las rocas en general, incluyendo su distribución, estructura, origen e historia, así como su mineralogía y texturas²⁰.

- Petrografía

Es la ciencia, parte de la geología, que estudia el origen, evolución y composición de las rocas, de una manera descriptiva. Se divide en Petrografía Macroscópica (estudio a la simple vista del ojo) y Petrografía microscópica (estudio haciendo uso del microscopio)²¹.

²⁰ López Gómez, José, Et. Al. *Ciencias de la Tierra*. Oxford University Press. Oxford, Reino Unido: Editorial Complutense, S.A. 2000.

²¹ Dávila Burga, Jorge. *Diccionario geológico*. Universidad Nacional de Ingeniería Perú-Perú: Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. 2011.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

Etapas de recopilación y análisis bibliográfico

Durante esta etapa se realizaron las consultas a todos los artículos disponibles que se consideren de utilidad para el desarrollo de la investigación, tales como: tesis, artículos publicados, páginas web, informes técnicos, que sirvan de soporte para el fin de esta investigación.

Etapas de trabajo de campo

En el área de estudio se realizaron observaciones, descripciones y mediciones de las características litológicas (color, mineralogía, fábrica, etc.) y las variaciones de las mismas, principalmente de las rocas graníticas, de estructuras geológicas (fallas, fracturas, pliegues, etc.), de contactos litológicos, además de la obtención de tres muestras representativas de cada uno de los diferentes cuerpos de rocas graníticas, los cuales se analizaron petrográficamente. Las muestras fueron de rocas sanas, sin alteraciones, que muestren variaciones a nivel macroscópico y de una masa aproximada de cinco libras.

Se utilizó el método cartográfico de caminamientos con GPS (Sistema de posicionamiento global por sus siglas en inglés), mapa base y el método de afloramientos que consiste en ubicar los afloramientos actuales, identificar las estructuras geológicas, cuerpos intrusivos, contactos, de cada una de las unidades litológicas. El mapeo se realizó a escala 1:10 000. Asimismo se tomó

fotografías de las relaciones espaciales de las rocas para referencias posteriores en este informe.

Etapa de trabajo de laboratorio

Esta etapa se dividió en dos fases diferentes:

Fase 1: Petrografía

Se analizó petrográficamente cada una de las muestras de mano recolectadas en el campo, a partir de análisis de secciones delgadas, observadas en el microscopio petrográfico.

El análisis petrográfico permitió clasificar petrográficamente y diferenciar más exactamente las variaciones que presenten las rocas graníticas, fundamentadas en el contenido y cantidad mineralógicas de la misma.

Fase 2: Geoquímica

El análisis geoquímico se realizó mediante la empresa *Inspectorate America Corp*, en la división *Metals & Minerals*, donde se seleccionaron muestras frescas y sin alteración química, además de ser representativas de la unidad o formación en estudio. Utilizando el método ICP-MS.

Las muestras se trituraron para obtener fragmentos menores a 4 milímetros que fueron enjuagados con agua desionizada. Esto para descartar fragmentos alterados. Seguidamente se pulverizaron entre 30 g y 40 g de la muestra hasta un tamaño menor a 75 micras.

Este proceso se realizó para obtener información sobre elementos mayores y menores.

Los elementos mayores se refieren a todos los elementos químicos que están presentes en concentraciones mayores al 0.1 % o 1 000 ppm en roca total.

Los elementos menores o traza se refieren a los elementos cuya concentración es menor al 0.1 % o a 1 000 ppm del total de la roca.

Etapas de gabinete

Durante esta etapa se realizó el análisis e interpretación de cada una de las pruebas realizadas durante la investigación y la etapa de campo con el fin de indicar las propiedades geoquímicas y petrológicas de las rocas graníticas. Así como la elaboración del presente informe con sus respectivas conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el capítulo se presenta el análisis y discusión de resultados de la petrografía mediante el análisis de secciones delgadas y geoquímica de elementos mayores y traza de los cuerpos graníticos, asimismo la geología local y las relaciones espaciales de las distintas unidades litológicas descritas a continuación y plasmadas en el mapa geológico del anexo II.

3.1 Geología local

a. Andesita

Las andesitas afloran en gran parte del área de estudio, son las rocas más antiguas y poseen grandes espesores, observados principalmente en el margen de la caldera de Atitlán donde muestra sus mejores exposiciones, de igual manera en la carretera que dirige de San Lucas Tolimán hacia Godinez (fotografía 1).

La roca presenta una coloración oscura, en tonalidades de gris, con una textura afanítica en muestra de mano, con pórfidos de plagioclasa menores a 1 mm (fotografía 2).

Esta unidad subyace a las unidades de Toba pomácea y Ceniza volcánica, además de ser la roca caja de los *stocks* de Granito y Diorita.

FOTOGRAFÍA 1
AFLORAMIENTO DE ANDESITA EN LAS
COORDENADAS UTM: ESTE 700102, NORTE 1616423



Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2015.

FOTOGRAFÍA 2
ANDESITA MELANOCRÁTICA EXTRAÍDA EN LAS
COORDENADAS UTM: ESTE 700102, NORTE 1616423



Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2016.

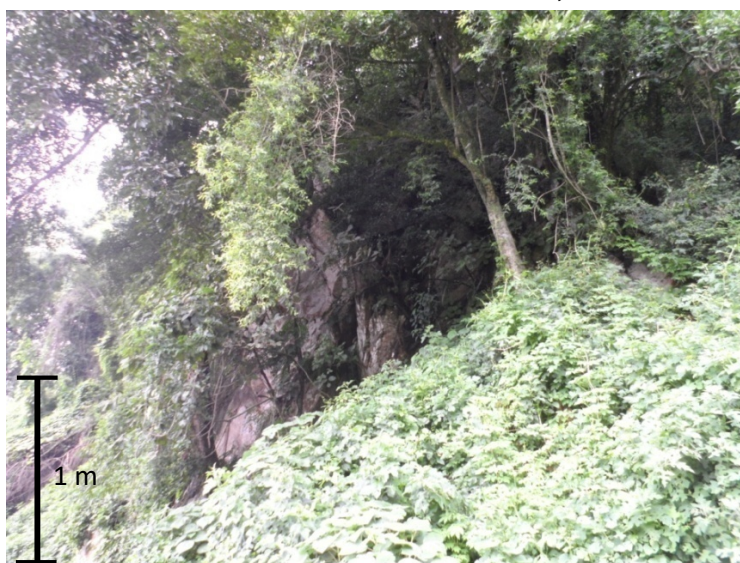
b. Granito

Esta unidad está constituida por un *stock* con dos cuerpos aflorantes independientes, el mayor se encuentra al sur del área de estudio, posee forma irregular alargada, cuyo eje mayor está orientado en dirección NE-SO. El segundo cuerpo aflora en la parte central del área cuyo eje mayor está orientado NO-SE, el cual se encuentra altamente meteorizado.

La exposición total de este *stock* es aproximadamente de 0.3 Km², las mejores exposiciones de roca se encuentran dentro de una finca cafetalera localizada al sur del área de estudio (fotografía 3). El segundo cuerpo aflora en la carretera que dirige a la población de Godínez.

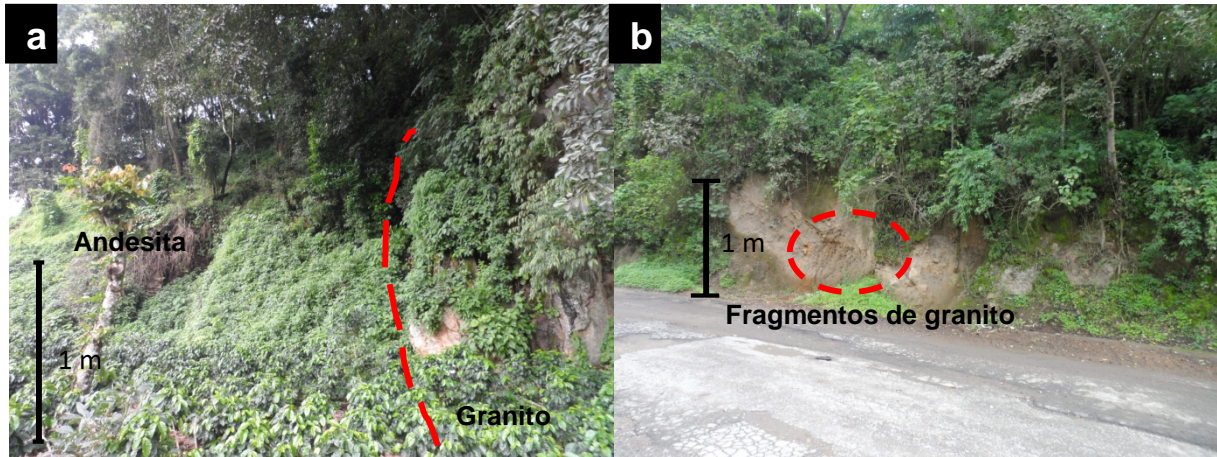
La roca se encuentra intruyendo a la Unidad de Andesita, lo cual se evidencia por los contactos intrusivos que presenta con dicha roca, evidente al sur del área de estudio (fotografía 4 a). En la parte central estos contactos no se pueden apreciar debido al grado de meteorización de la roca, la cual se encuentra dentro de una matriz de ceniza (fotografía 4 b).

FOTOGRAFÍA 3 AFLORAMIENTO DE GRANITO LOCALIZADO EN LAS COORDENADAS UTM: ESTE 700375, NORTE 1616634



Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2015.

FOTOGRAFÍA 4 RELACIONES ESPACIALES DE LA UNIDAD DE GRANITO



Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2015.

Macroscópicamente el granito es leucocrático con textura fanerítica holocristalina, con cristales inequigranulares de grano medio de cuarzo, feldespato, biotita y hornblenda de 1 mm – 3 mm (fotografía 5).

FOTOGRAFÍA 5 GRANITO LEUCOCRÁTICO EXTRAÍDO EN LAS COORDENADAS UTM: ESTE 700691, NORTE 1616870



Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2016.

c. Diorita

Esta unidad es un *stock* constituido por un solo cuerpo, el cual se encuentra al oeste del área de estudio, en la parte media, posee forma semi circular.

La exposición total de este *stock* es aproximadamente de 0.2 Km², las mejores exposiciones de roca se encuentran descendiendo desde el mirador localizado en la carretera que dirige a la población de Godínez.

La roca se encuentra intruyendo a la Unidad de Andesita, los contactos intrusivos no se observan con claridad, ya que se encuentra cubierto de suelos y vegetación (fotografía 6).

FOTOGRAFÍA 6 AFLORAMIENTO DE DIORITA LOCALIZADO EN LAS COORDENADAS UTM: ESTE 700264, NORTE 1617714.



Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2015.

Macroscópicamente la diorita es melanocrática con textura afanítica holocristalina, con cristales inequigranulares de hornblenda y feldespato de grano medio 1 mm – 3 mm (fotografía 7).

FOTOGRAFÍA 7
DIORITA MELANOCRÁTICA EXTRAÍDA EN LAS
COORDENADAS UTM: ESTE 700350, NORTE 1617877



Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2016.

d. Toba pomácea

La unidad de Toba pomácea aflora en la parte central y oriental del área de estudio, es la de mayor extensión espacial. Las mejores exposiciones las presenta en la carretera que dirige de San Lucas Tolimán hacia Godinez (fotografía 8). Esta unidad suprayace a las unidades de Andesita, Granito y Diorita, asimismo subyace a la unidad de Ceniza volcánica.

FOTOGRAFÍA 8 AFLORAMIENTO DE TOBA POMÁCEA EN LAS COORDENADAS UTM: ESTE 700020, NORTE 1617100



Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2015.

Los depósitos son de tipo caída, presentan una matriz de ceniza de grano fino, que se disgrega con facilidad, de coloración beige a naranja, presenta fragmentos de pómez de menos a 1 cm, los cuales se encuentran bien consolidados dentro de la matriz de ceniza. Además presenta un espesor > 1 m de ceniza en la parte superior de la secuencia.

e. Ceniza volcánica

La unidad de Ceniza volcánica aflora en el noreste del área de investigación, sus mejores exposiciones se observan en la carretera que dirige hacia la población de Godinez (fotografía 9). La unidad suprayace a las Unidades de Toba pomácea y Granito.

FOTOGRAFÍA 9
AFLORAMIENTO DE CENIZA VOLCÁNICA EN LAS
COORDENADAS UTM: ESTE 700854, NORTE 1617850



Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2015.

La roca presenta una coloración blanquecina, con un tamaño de grano menos a 1 mm, compuesto principalmente de ceniza. Se presenta moderadamente meteorizada (III – IV).

f. Aluvión

Los depósitos aluvionares se presentan en la parte suroeste y noroeste del área de estudio, donde se asientan la población de San Lucas Tolimán y una finca cafetalera.

Está constituido principalmente de suelos limosos, y grandes bloques de roca volcánica principalmente de los flujos andesíticos del margen de caldera, en menor parte de granito y diorita. Los bloques poseen dimensiones de entre 5 cm – 1 m, moderadamente angulosos debido al poco transporte que han tenido, principalmente en la planicie aluvial donde está asentada la finca cafetalera (fotografía 10).

FOTOGRAFÍA 10 PLANICIE ALUVIAL AL SUROESTE DEL ÁREA DE ESTUDIO



Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2015.

3.2 Petrografía

3.2.1 Unidad de Granito

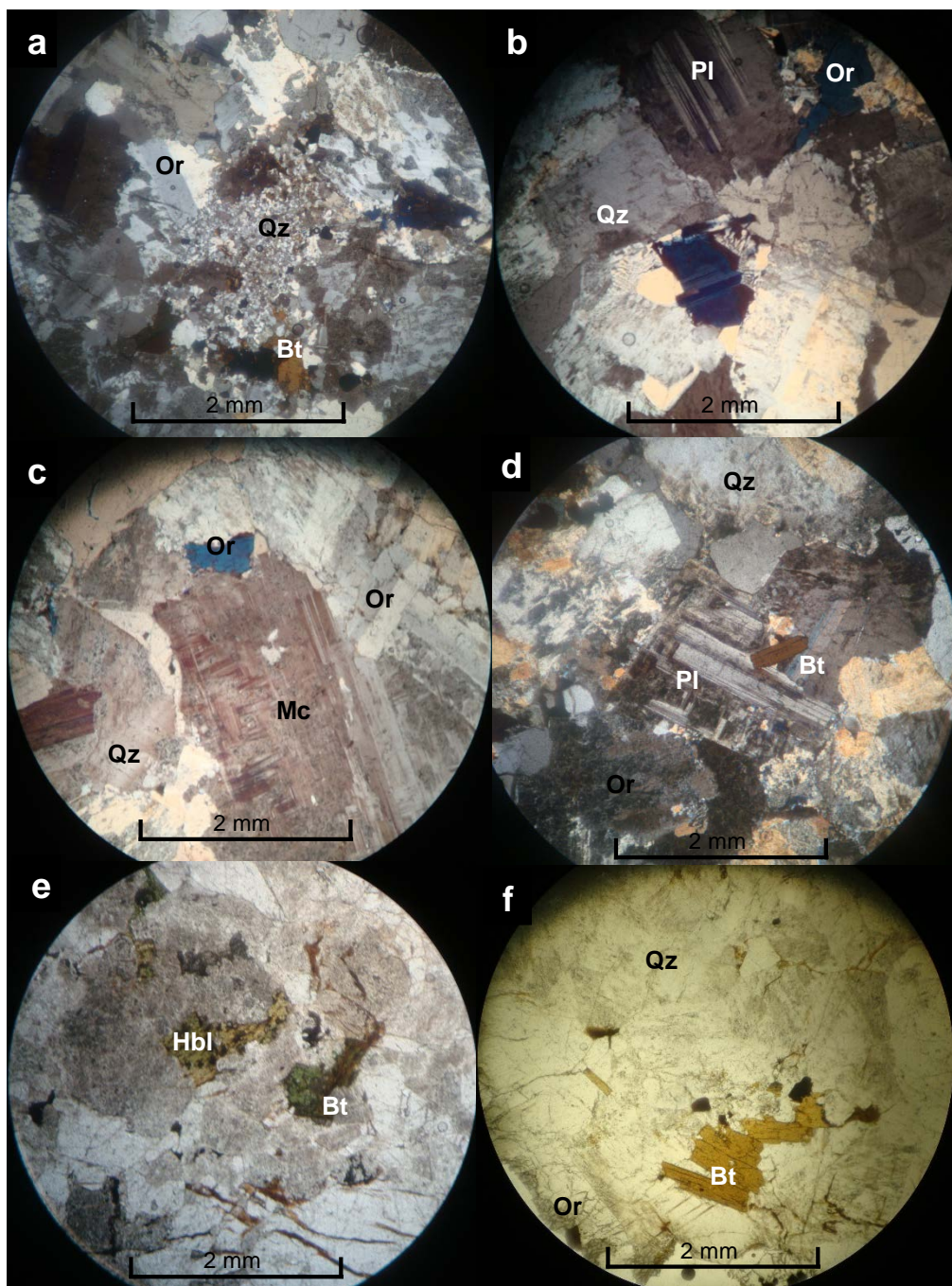
Mediante el análisis de tres secciones delgadas de las muestras MC-7003-16166-1, MC-7006-16168-2 y MC-7005-1616 se determinó que el Granito, en promedio, está compuesto mineralógicamente de plagioclasa (38 %), feldespato potásico (28 %), cuarzo (24 %), biotita (5 %), hornblenda (3 %) y como accesorios hematita (escasa) y otros minerales opacos muy escasos (2 %). Además de minerales secundarios, tales como sericita desarrollada principalmente como producto de la alteración de la plagioclasa y clorita, lo cual indica una leve alteración sericítico-arcillosa.

La plagioclasa en general es de tipo andesina (An30-50) y labradorita (An50-70). La plagioclasa presenta ocasionalmente texturas poiquilíticas con múltiples inclusiones de cuarzo. En ocasiones está muy alterada a sericita (fotografía 11 c). El feldespato potásico en todas las secciones delgadas observadas de este granito correspondió con la ortoclasa que en ocasiones es perítica (fotografía 11 e). Presenta muy poca microclina (fotografía 11 c). Es común que el feldespato presente extinción ondulante probablemente relacionado a la superposición de pequeños granos con forma de cuña.

El cuarzo presenta evidencias de recristalización dinámica principalmente como desarrollo de subgranos (fotografía 11 a) lo cual es indicativo de actividad de la migración de borde de grano en condiciones de alta temperatura. También se presenta en textura gráfica, mediante dos fases minerales junto con feldespatos (fotografía 11 b). La biotita se presenta en cristales euhedrales, relacionada con hornblendas, que se encuentran cloritizadas. La relación de estos minerales muchas veces es en forma de agregados policristalinos, denominados *clots*. Ambos minerales no presentan una orientación definida (fotografía 11 d, e y f).

La roca posee una cristalinidad de tipo holocristalina (fotografías 11 a y b). Presenta textura panidiomórfica, inequigranular unimodal debido a que presenta un tamaño de grano medio dominante. El hábito cristalino en todas las especies minerales es euedral a subedral.

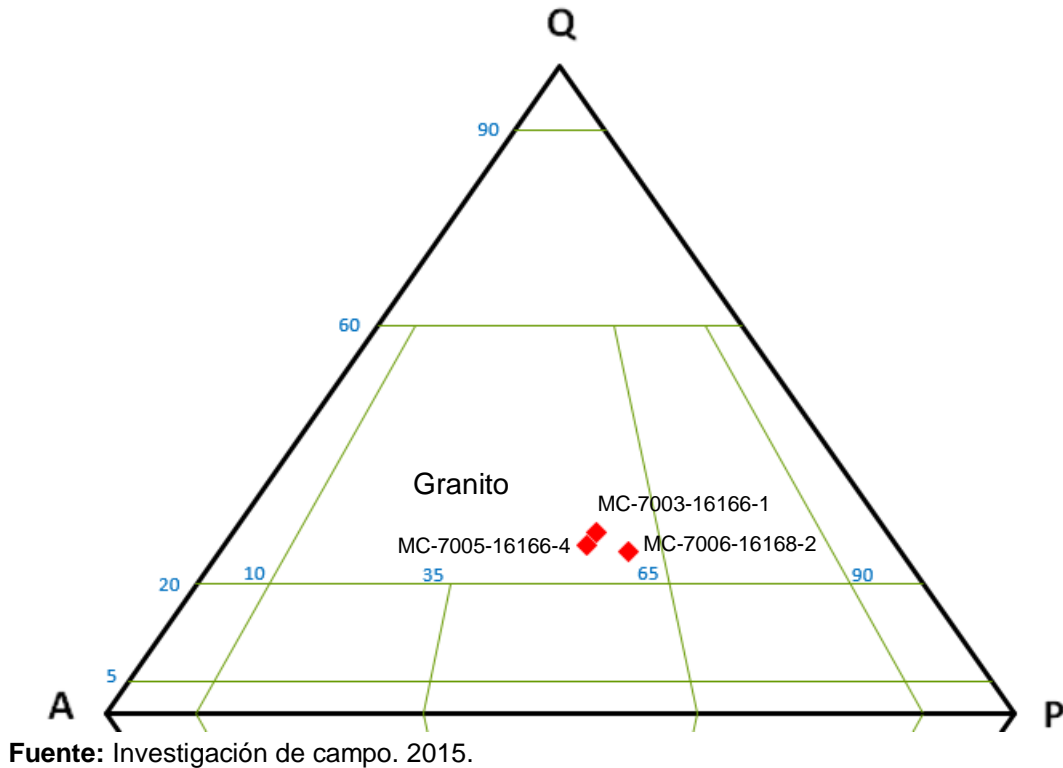
FOTOGRAFÍA 11
MICROFOTOGRAFÍAS CORRESPONDIENTES A LA
UNIDAD DE GRANITO MUESTRAS MC-7003-16166-1, MC-
7006-16168-2 y MC-7005-16166-4



Fotografías a, b, c y d en vista en XPL y fotografías e y f en vista PPL.
 Qz: Cuarzo. Pl: Plagioclase. Or: Ortoclase. Mc: Microclina. Bt: Biotita. Hbl: Hornblenda.
Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2015.

En base a su contenido modal de cuarzo (Q), feldespato potásico (A) y plagioclasa (P) la roca se clasificó como un Granito (figura 3).

FIGURA 3
CLASIFICACIÓN MODAL DE STRECKEISEN PARA LA
UNIDAD DE GRANITO



3.2.2. Unidad de Diorita

Mediante el análisis de tres secciones delgadas de las muestras MC-7002-16177-5, MC-7003-16178-6 y MC-7003-16179-7 se determinó que la Diorita, en promedio, está compuesta mineralógicamente de plagioclasa (55 %), hornblenda (30 %), feldespato potásico (5 %), cuarzo (3 %) y como accesorios clinopiroxenos (2 %) y hematita (5 %). Algunos minerales secundarios son la sericita desarrollada principalmente como producto de la

alteración de la plagioclasa y clorita producto de la alteración de la hornblenda.

La plagioclasa en general es de tipo andesina (An30-50) y oligoclasa (An10-30). Generalmente se presenta como pequeños cristales que forman la matriz la roca en conjunto con la hornblenda (fotografía 13 b). Ocasionalmente presenta texturas poiquilíticas con múltiples inclusiones de cuarzo. En ocasiones está muy alterada a sericita (fotografía 13 a y e). En menor parte presenta zonaciones regulares (fotografía 13 a).

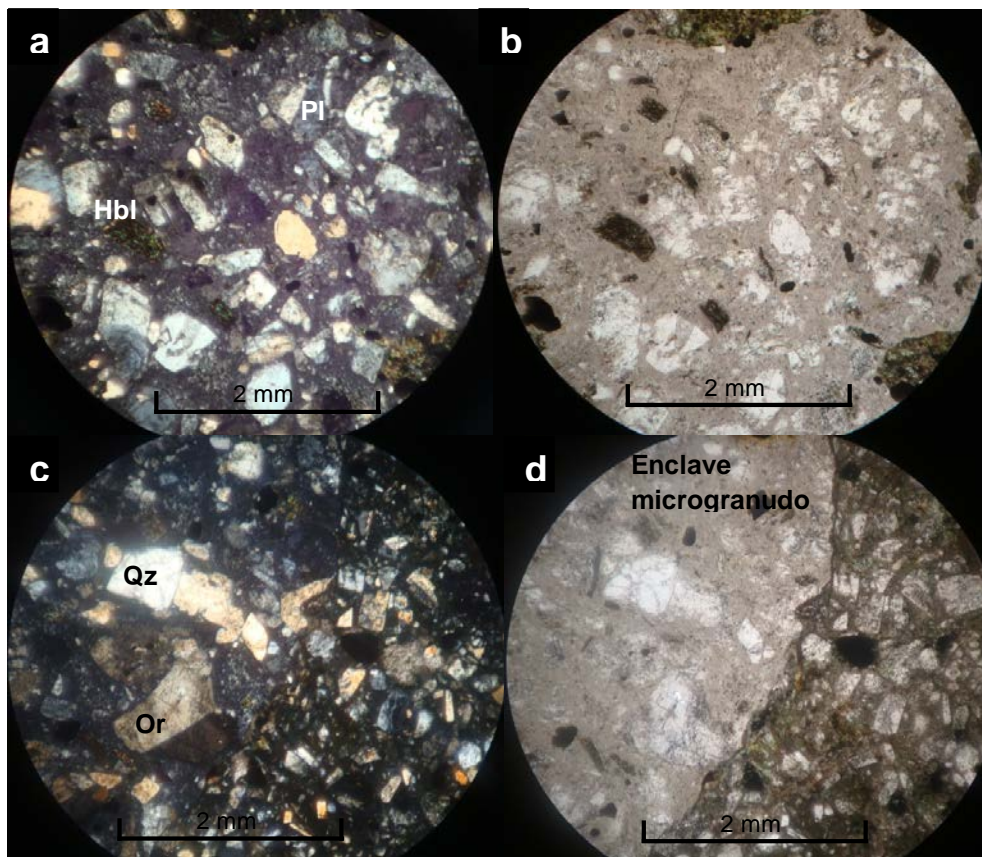
La hornblenda se presenta en cristales subhedrales con su típico clivaje basal a 120° . Recurrentemente los cristales presentan textura poiquilitica, con inclusiones de cuarzo y hematita (fotografía 13 c). Se presenta alterada por clorita, y además también conforma la matriz de la roca, junto con las plagioclasas (fotografía 13 b). El feldespato potásico en todas las secciones delgadas observadas correspondió con la ortoclasa (fotografía 13 e). El cuarzo presenta como cristales anhedrales, con fracturas y en pocos casos con extinción ondulante (fotografía 13 a).

Los clinopiroxenos presentan su típico clivaje a 90° , con cristales subhedrales (fotografía 13 f). Los minerales opacos en su mayoría hematita son anhedrales, con pequeñas inclusiones.

La roca presenta textura panidiomórfica, inequigranular bimodal mostrando fenocristales, principalmente de hornblenda, feldespato potásico y plagioclasa, dentro de una matriz de plagioclasa de grano fino. El hábito cristalino en todas las especies minerales es euedral a subedral.

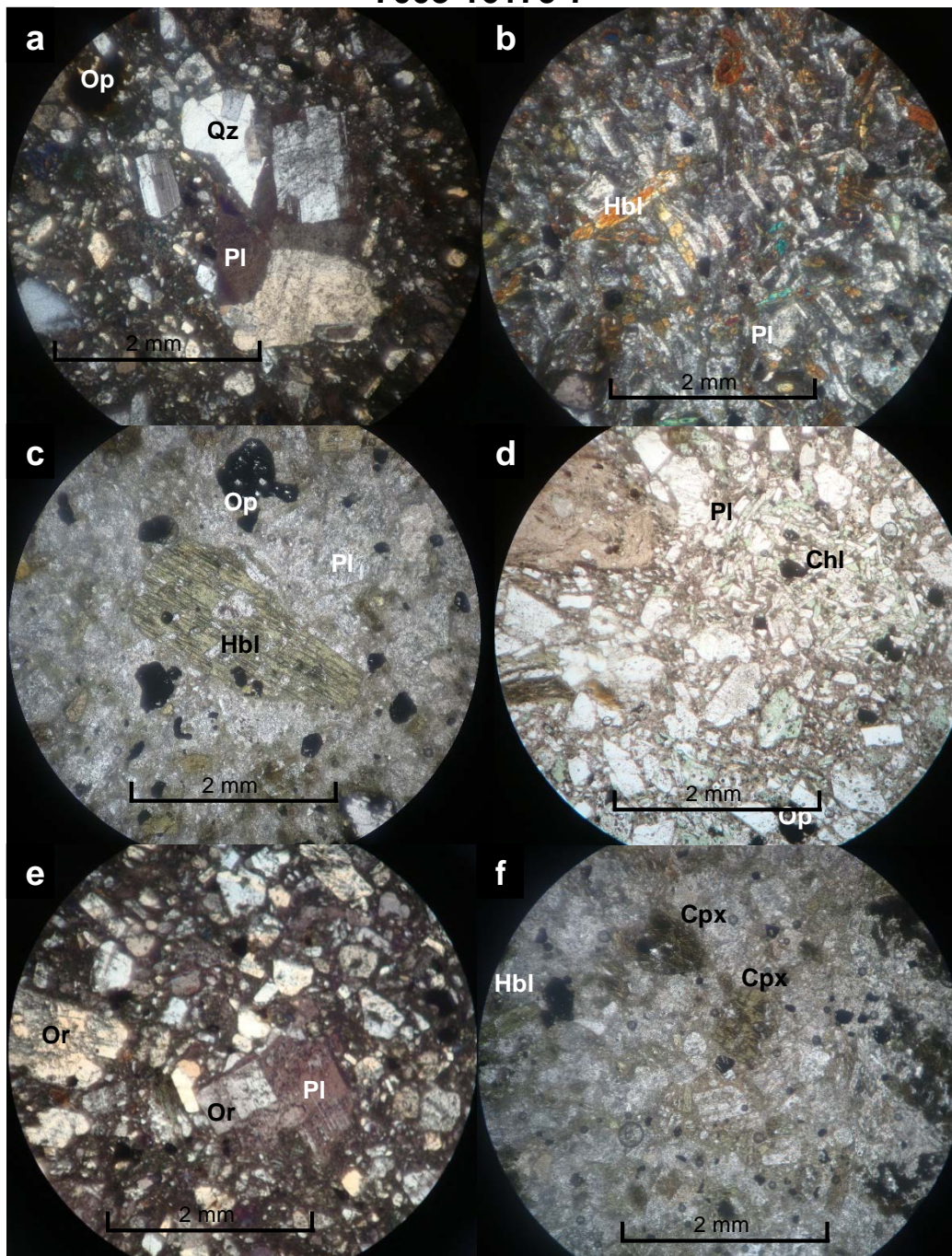
Además de contener esos minerales, la Diorita presenta xenolitos, los cuales son enclaves microgranudos, estos enclaves son de una matriz de grano fino, con xenocristales de plagioclasas, feldespato potásico, hornblenda, cuarzo, y, mineralógicamente es compatible con la paragénesis de la Diorita (fotografía 12). Poseen una forma redondeada y globosa, con dimensiones que van desde 1 cm – 3 cm de diámetro.

FOTOGRAFÍA 12
ENCLAVES MICROGRANUDOS DENTRO DE LA DIORITA
MUESTRA MC-7003-16178-6



Fotografías a y c en vista XPL. Fotografías b y d en vista PPL.
 Or: Ortosa. Qz: Cuarzo. Chl: Clorita. Op: Mineral opaco.
Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2015.

FOTOGRAFÍA 13
MICROFOTOGRAFÍAS CORRESPONDIENTES A LA UNIDAD DE
DIORITA MUESTRAS MC-7002-16177-5, MC-7003-16178 y MC-
7003-16179-7



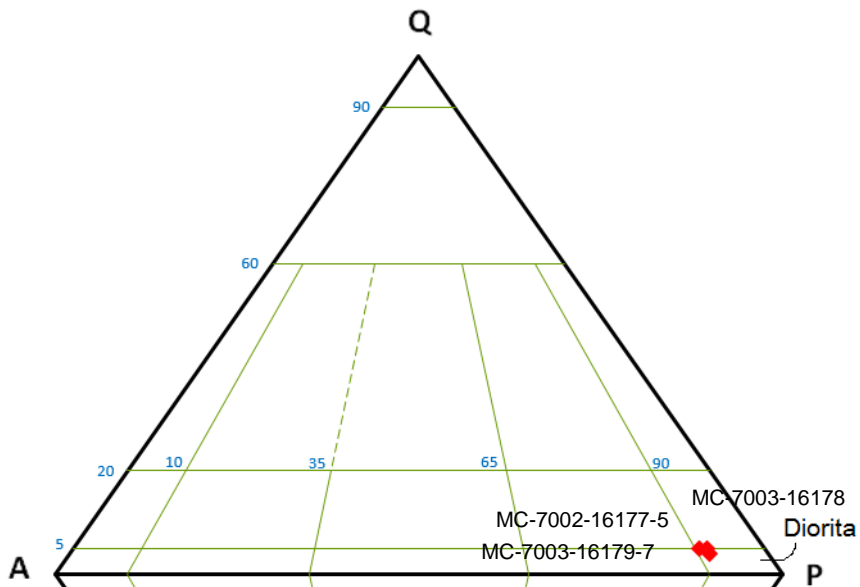
Fotografías a, b y e en vista en XPL y fotografías c, d y f en vista PPL.

Pl: Plagioclase. Hbl: Hornblende. Or: Ortoclase. Qz: Cuarzo. Chl: Clorita. Op: Mineral opaco.

Tomada por: Carlos Manuel Caal de la Cruz. 2015.

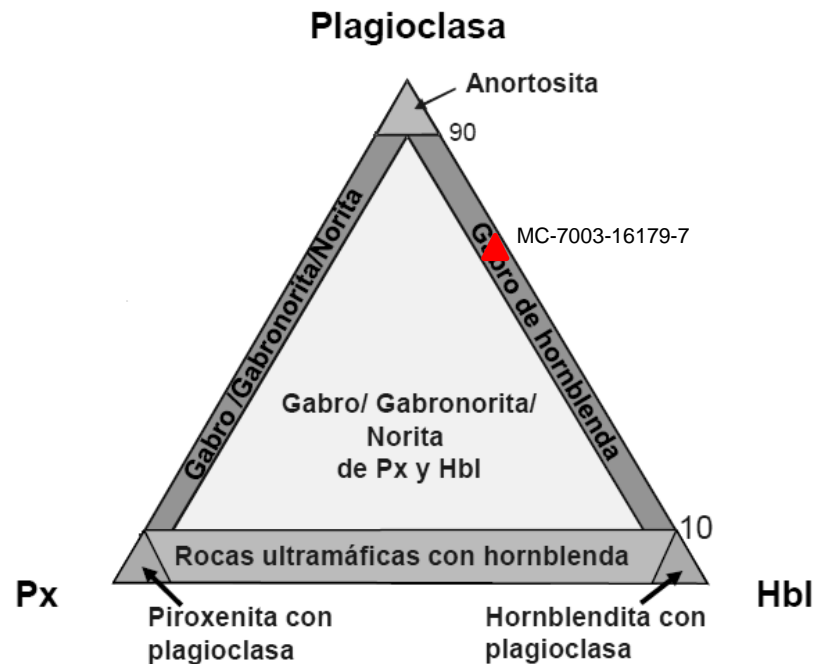
En base a su contenido modal de cuarzo (Q), feldespato potásico (A) y plagioclasa (P) las muestras de roca analizadas, las tres muestras quedaron en el límite de las regiones de Diorita y Gabro, por lo que esta unidad se clasificó como una Diorita (figura 4). Además se utilizó el diagrama ternario para rocas gabroícas con hornblenda de Le Maitre Et. Al. 2002 (figura 5) y las rocas caen en el campo de Gabro de hornblenda.

FIGURA 4
CLASIFICACIÓN MODAL DE STRECKEISEN PARA LA UNIDAD DE DIORITA.



Fuente: Investigación de campo. 2015.

FIGURA 5
CLASIFICACIÓN DE ROCAS GABROÍCAS CON HORNBLENDA
DE LE MAITRE ET. AL. 2002



Fuente: Investigación de campo. 2016.

3.2.3 Secuencia de cristalización

a) Granito

Los minerales precoces o antiguos en el granito son cuarzo, feldespato y plagioclasa (andesina (An₃₀₋₅₀) y labradorita (An₅₀₋₇₀)), esto se determinó en base a varios criterios, tales como el del idiomorfismo para las tres especies minerales, además de la presencia de zonaciones en las plagioclasas. Mientras que los minerales de fase tardía son los anfíboles y biotitas, en el caso de los anfíboles se determinó porque están englobados en cuarzo y feldespato principalmente. Además existen fenocristales poiquilíticos de feldespato y plagioclasa con inclusiones

dentro del núcleo de los cristales, que indican que son de una fase tardía e indican un enfriamiento²².

b) Diorita

En el caso de la diorita, los minerales precoces o más antiguos son los anfíboles (hornblenda), clinopiroxenos, fenocristales de plagioclasa (andesina (An30-50) y oligoclasa (An10-30)) y feldespato. En el caso de anfíboles se determinó que son de fase precoz al estar englobado en la matriz de grano fino de plagioclasa, y al tener inclusiones anteriores a él dentro del núcleo del mineral, mientras que los clinopiroxenos son relictos, y se puede inferir que sufrieron reemplazamiento peritético por anfíboles al interactuar con el líquido, lo cual es muy común en rocas dioríticas y graníticas de las series calcoalcalinas. En el caso de los fenocristales de plagioclasa y feldespato potásico se empleó el criterio del idioformismo para determinar que son antiguos, además de que las plagioclasas presentan zonaciones en el núcleo. Mientras que los minerales de fase tardía son la matriz de grano fino de plagioclasa, las inclusiones de minerales opacos y el cuarzo²³.

Lo establecido en base a los criterios texturales, tiene concordancia con la secuencia de cristalización teórica propuesta por Bowen²⁴ (1912). En el caso del granito, el feldespato alcalino, cuarzo y plagioclasa son minerales de fase precoz, mientras que los minerales

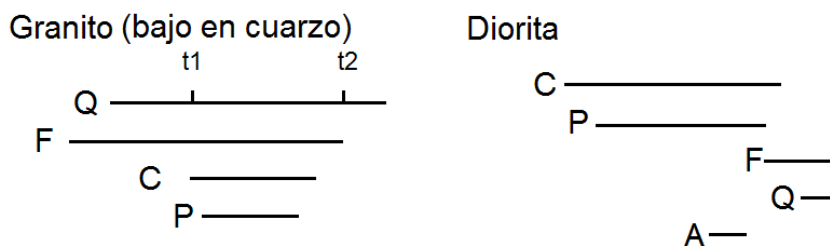
²² Castro Dorado, Antonio. *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, SA, 2 015.

²³ *Ibíd.*

²⁴ Bowen, N. L. *The Order of Crystallization in Igneous Rocks*. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts, United States of America: The University of Chicago Press, The Journal of Geology, 1912.

ferromagnesianos (hornblenda y biotita) son más tardíos. Mientras que en la diorita las plagioclasas y los minerales ferromagnesianos (hornblenda y clinopiroxenos) son precoces, mientras que el cuarzo y los feldespatos son tardíos. La figura 6 presenta la secuencia de cristalización teórica de Bowen.

FIGURA 6
SECUENCIA DE CRISTALIZACIÓN TEÓRICA DE BOWEN, 1912



- A Accesorios
 P Minerales ferromagnesianos
 C (Calcicalinos) Plagioclasas
 F Feldespato alcalino
 Q Cuarzo

Fuente: Modificado de Bowen, N. L. *The Order of Crystallization in Igneous Rocks*. 2016.

3.3 Geoquímica

Se analizaron por espectrometría de masas con plasma acoplado por inducción (ICP-MS por sus siglas en inglés), un total de 3 muestras que se colectaron de los *stocks* dentro del área de estudio. Una de la muestras corresponde al Granito (MC-7003-16166-1) y dos más a la Diorita (MC-7002-16177-5 y MC-7003-16179-7). La figura 7 presenta los puntos donde se extrajeron las muestras analizadas.

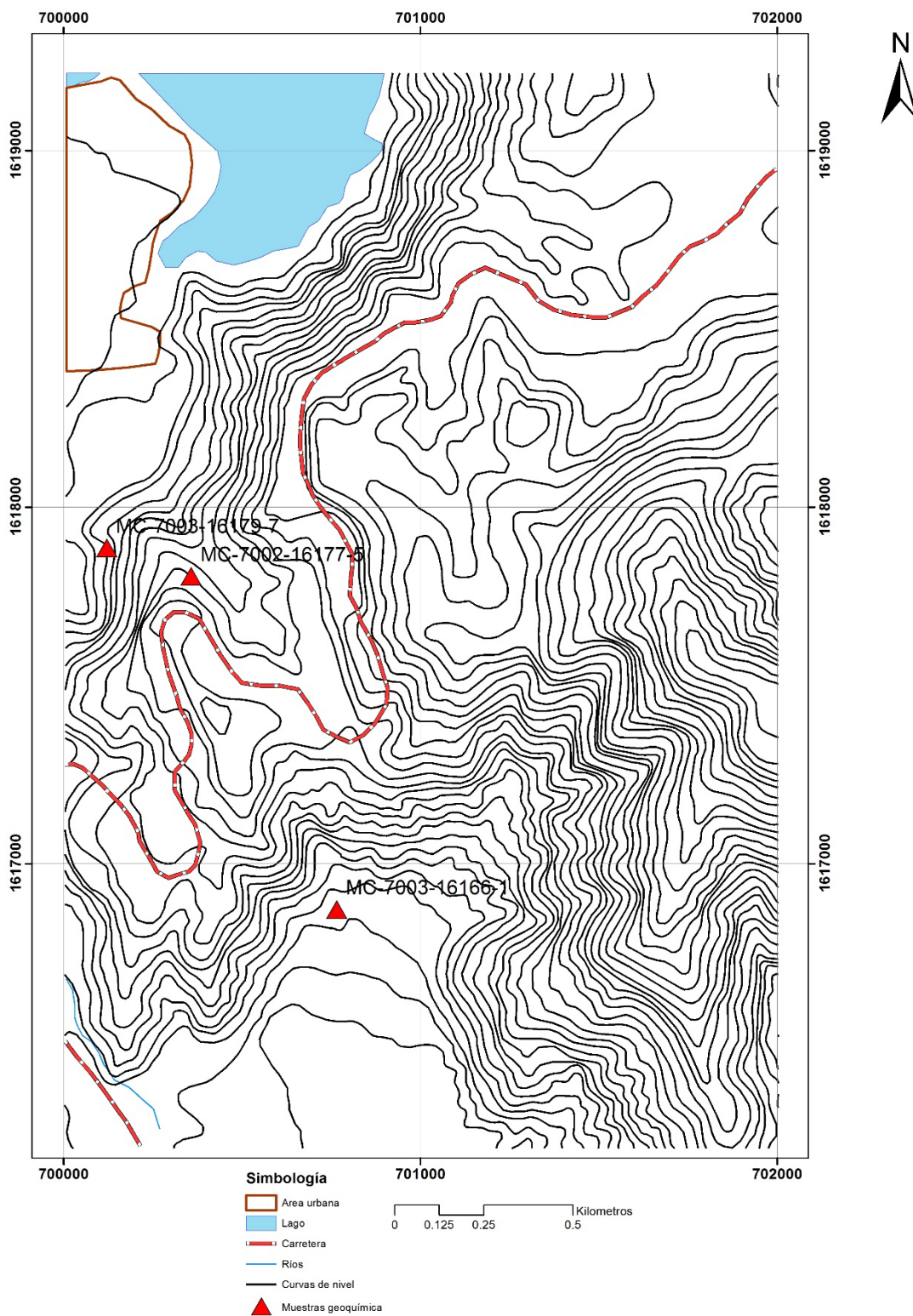
Los datos obtenidos de la técnica anteriormente mencionada se manipularon con el programa GCDkit 4.0 para Windows, con la finalidad de obtener las distintas gráficas de dos y tres variables de elementos mayores y traza, además de los diagramas normalizados de elementos traza compatibles y los diagramas normalizados de elementos de tierras raras, que se presentan en este capítulo. Asimismo utilizando este programa se calculó el contenido de minerales normativos de las diferentes muestras.

Los resultados de los análisis de las tres muestras están agrupadas por tipo de roca (Tabla 6).

3.3.1 Elementos mayores

La muestra de granito posee un contenido de SiO_2 de 70.39 % peso, mientras que las dos muestras de Diorita son comparativamente similares, varía entre 53.84 % y 54.5 % peso; las tres muestras poseen un contenido de aluminio relativamente alto, de 16.48 % para el granito y de 18.895 % y 19.27 % para la Diorita; el contenido de CaO en el Granito es relativamente bajo, siendo de 0.707 %, siendo comparado con los elementos alcalinos como el Na_2O (6.2 %) y K_2O (3.889 %) propio de una roca granítica.

FIGURA 7
MAPA DE MUESTRAS ANALIZADAS GEOQUÍMICAMENTE



Fuente: Investigación de campo. 2016.

TABLA 6
RESULTADO DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS DE LAS
MUESTRAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

	MC-7003-16166-1 Granito	MC-7002-161775-5 Diorita	MC-7003-16179-7 Diorita
SiO ₂ %	70.39	53.844	54.5
Al ₂ O ₃ %	16.48	18.895	19.27
Fe ₂ O ₃ %	1.84	9.36	9.08
MgO %	0.152	3.94	3.915
CaO %	0.707	7.88	6.94
Na ₂ O %	6.12	3.639	3.94
K ₂ O %	3.889	1.26	1.189
Ti ₂ O %	0.18	0.842	0.821
P ₂ O ₅ %	0.05	0.187	0.189
MnO %	0.09	0.146	0.147
Cr ₂ O ₃ %	0.022	0.007	0.009
LOI*	0.6	3.6	4.8
Total	100	100	100
Ni ppm	<20	<20	<20
Sc ppm	4	19	19
Ba ppm	2884	543	487
Be ppm	<1	2	<1
Co ppm	0.3	19.8	18.1
Cs ppm	1.6	0.7	0.6
Ga ppm	15.2	18.6	18.1
Hf ppm	6.8	3.4	3.5
Nb ppm	6.1	2.7	3.1
Rb ppm	71.5	32.1	23.2
Sn ppm	<1	<1	1
Sr ppm	54.6	612.9	564.6
Ta ppm	0.4	0.1	<0.1
Th ppm	10.7	1.8	2.1
U ppm	1.6	0.5	0.7
V ppm	<8	199	196
W ppm	<0.5	<0.5	<0.5
Zr ppm	242.2	145.4	128.5
Y ppm	17.3	17.7	14.7
La ppm	46.2	10.5	11
Ce ppm	85.7	22.3	23.9
Pr ppm	9.63	3.01	3.06
Nd ppm	35.7	13.3	13.9
Sm ppm	5.93	3.26	2.98
Eu ppm	1.63	0.89	0.87
Gd ppm	4.64	3.31	3.12
Tb ppm	0.6	0.51	0.48
Dy ppm	3.29	3.08	2.91
Ho ppm	0.62	0.63	0.57
Er ppm	1.86	1.94	1.64
Tm ppm	0.28	0.26	0.26
Yb ppm	2.01	1.83	1.72
Lu ppm	0.31	0.26	0.24

*LOI: pérdida por calcinación

Fuente: Investigación de campo. 2016.

Caso contrario con la Diorita, donde el porcentaje peso de CaO varía entre 6.94 % y 7.88 %, mientras que los elementos alcalinos Na₂O (3.639 % y 3.94 %) y K₂O (1.189 % y 1.26 %); el Fe₂O₃ y el MgO en el granito tienen valores muy bajos (1.84 % y 0.152 % en peso respectivamente), esto hace referencia de lo evolucionado de este granito, mientras que en la Diorita sucede todo lo contrario, los niveles de Fe₂O₃ y el MgO son altos (9.08 % - 9.36 % peso y 3.915 % - 3.94 % peso respectivamente).

Con los resultados obtenidos de los análisis químicos se calculó la composición mineral normativa de las tres muestras según la norma ICPW catiónica con el Fe₂O₃ y FeO recalculados y normalizada al 100% según Irvine y Baragar (1971), automáticamente con el programa GCDkit 4.0. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7. La presencia y ausencia de determinados minerales normativos son usadas como criterios en clasificaciones de tipos de rocas, y permite comparar rocas por su paragénesis teórica, sin embargo la correspondencia normativa y la paragénesis mineral real de las rocas ígneas no tiene que darse necesariamente.

La figura 8 muestra diagramas de variabilidad tipo Harker de algunos óxidos de elementos mayores respecto del SiO₂. Debido a que el número de muestras es reducido, los resultados no son concluyentes respecto a la evolución química que han sufrido las rocas. Sin embargo se puede apreciar que óxidos como el MgO, Fe₂O₃ y TiO₂ en el granito (triángulo azul) presentan valores bajos respecto al sílice (figura 8 b, h y f). Mientras que estos óxidos en la Diorita presentan valores altos respecto al sílice.

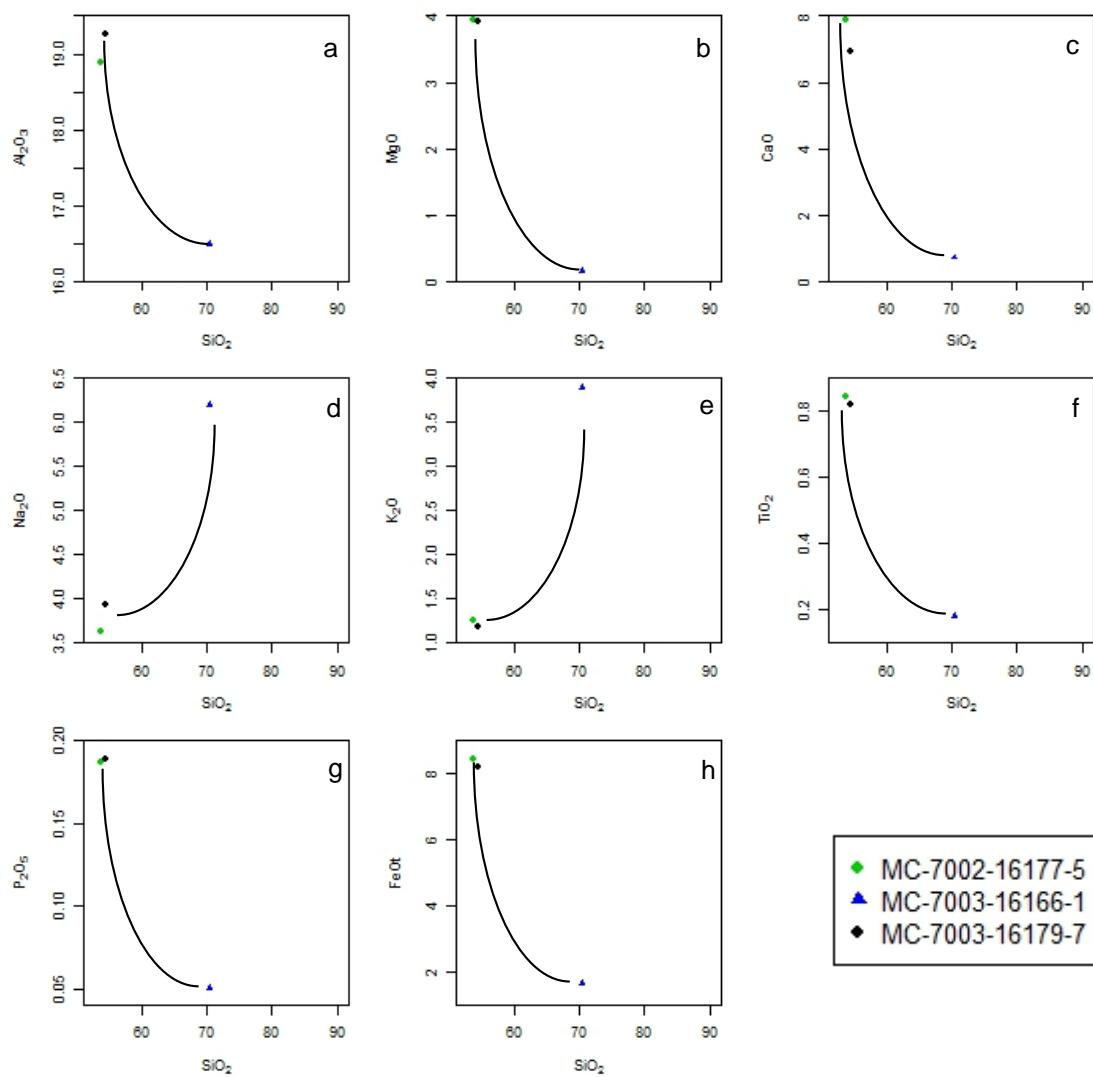
TABLA 7
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA NORMATIVA DE LAS
MUESTRAS ANALIZADAS SEGÚN LA NORMA CATIONICA
ICPW

Min. Normativos Norma ICPW	MC-7003-16166-1 Granito	MC-7002-16177-5 Diorita	MC-7003-16179-7 Diorita
Cuarzo (Q)	17.8	7	7.2
Corindón (C)	0.9	0	0
Ortoclasa (Or)	22.9	7.4	7
Albita (Ab)	52.5	30.8	33.3
Anortita (An)	3.2	31.5	31.4
Diópsido (Di)	0	3.1	0
Hiperstena (Hy)	0.4	8.4	9.8
Ilmenita (Il)	0.2	0.3	0.3
Hematita (Hm)	1.8	9.4	9.1
Tn	0	1.7	1.3
Rutilo (Ru)	0.07	0	0.1
Apatito (Ap)	0.12	0.4	0.4
Total	99.89	100	99.9

Fuente: Investigación de campo. 2016.

El CaO posee un comportamiento similar a los elementos anteriores en ambas rocas, el cual tiende a disminuir al precipitarse la plagioclasa, como se observa en el granito (figura 8c). Óxidos como el Na₂O y K₂O muestran patrones inversos a los elementos anteriores (figura 8 e y d), aumentan en el granito con el incremento de sílice, y disminuyen en la diorita cuyo contenido de sílice es menor. El Al₂O₃ parece tener un comportamiento compatible (figura 8 a), el P₂O₅ se puede decir poco (figura 8 g), ya que la roca no presenta minerales tales como la monazita y el apatito que es en general donde se concentra.

FIGURA 8
DIAGRAMA TIPO HARKER DE ELEMENTOS MAYORES VERSUS
SÍLICE



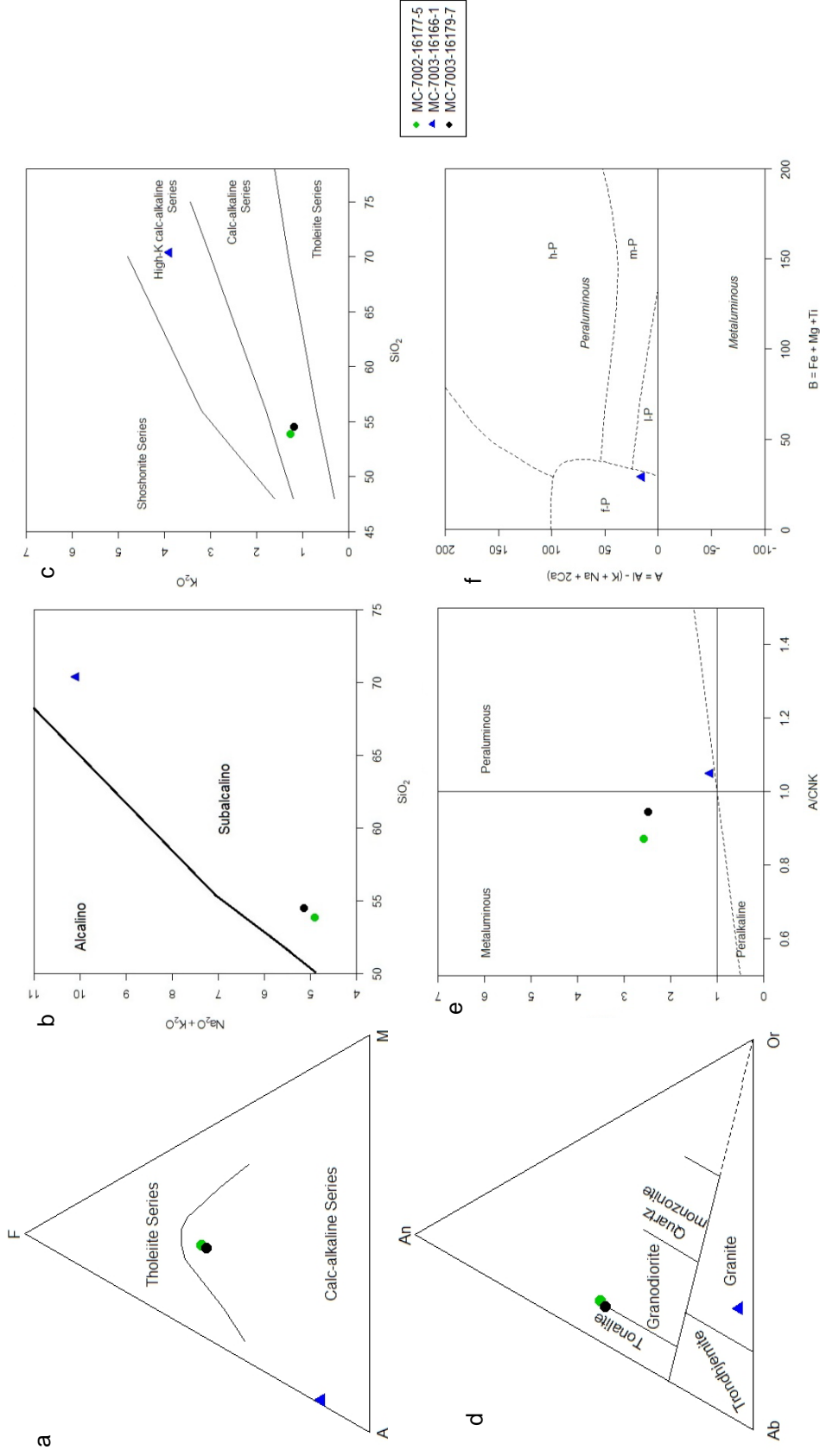
Fuente: Investigación de campo. 2016.

A pesar de no tener los miembros cogenéticos de estas rocas graníticas, al graficarlas en el diagrama AMF (figura 9 a), se observa que tienen tendencia calcialcalina según el diagrama de Irvine y Baragar (1971).

En función a diagramas de discriminación de carácter geoquímico de las rocas, se muestran en la figura 9. Según el valor en las rocas graníticas de $ACNK \{Al_2O_3 (A_{molar}) / [CaO (C_{molar}) + Na_2O (N_{molar}) + K_2O (K_{molar})]\}$ el granito es peraluminoso, mientras que la diorita es metaluminosa. En el diagrama de O'Connor que divide a los granitos según su contenido normativo de anortita, ortoclasa y albita, el granito cae dentro del campo del granito, mientras que la diorita en el límite de los campos de tonalita y granodiorita.

El diagrama B-A [$B = Fe + Mg + Ti$ & $A = Al - (K + Na + 2Ca)$] (modificado por Villaseca et al. 1998) en la cual únicamente se pudo graficar el granito, la cual cae en el campo de granitoides peraluminosos altamente félsicos (*fP*) el cual es un campo exclusivo para rocas de composición muy ácida, a las rocas de este campo se les denomina tradicionalmente leucogranitos (figura 9 f). Según el diagrama de discriminación de LeBas et al. (1986) basado en el contenido de los elementos alcalinos mayores, las muestras de estos granitos tienen un carácter subalcalino (figura 9 b).

FIGURA 9
DIAGRAMAS DE DOS Y TRES VARIABLES DE ELEMENTOS MAYORES

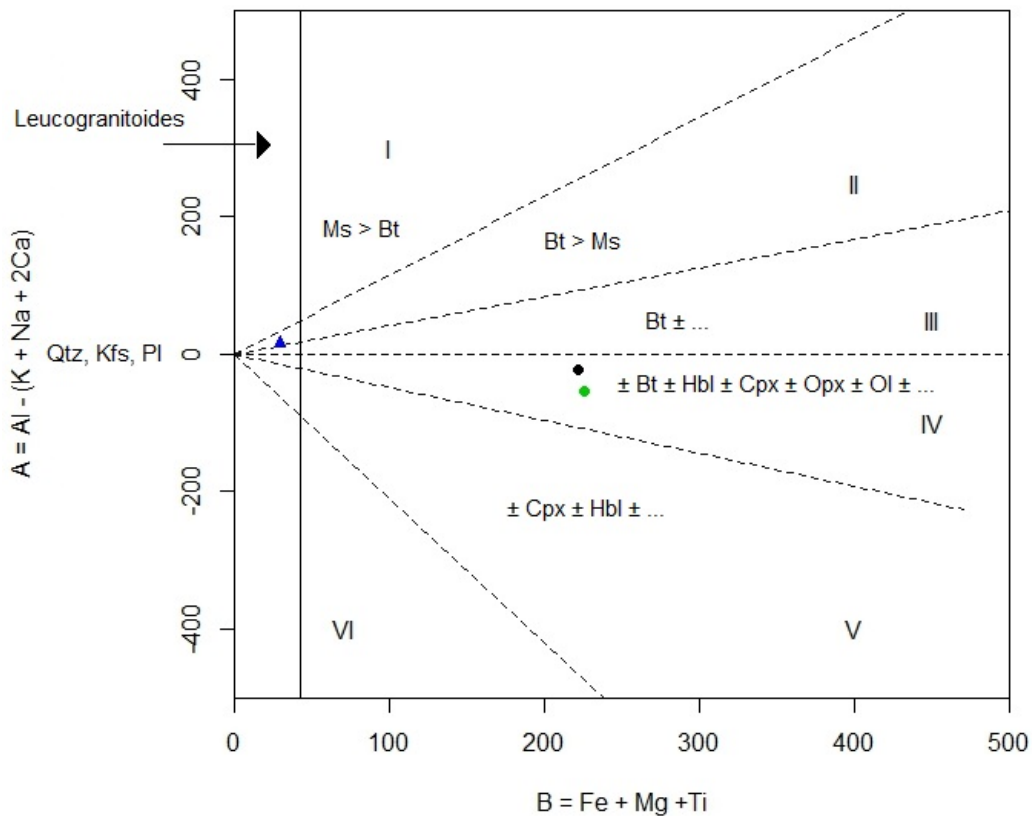


a. Diagrama A;F de Irvine y Baragar (1971). b. Diagrama de discriminación de LeBas et al. (1986). c. K_2O vs SiO_2 de Peccerillo y Taylor (1976). d. Diagrama de O'Connor (1971) para la clasificación de rocas graníticas según su contenido normal de Albita (Ab), Anortita (An) y Ortoclasa (Or) [norma ICPW]. e. A/CNK vs ANK (Shand 1943). f. Diagrama B-A [$B = \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ti}$ & $A = \text{Al} - (\text{K} + \text{Na} + 2\text{Ca})$] (modificado por Villaseca et al. 1998).

Fuente: Investigación de campo. 2016.

Como se observa en el diagrama A/CNK vs A/NK de Shand (1943), el granito es una roca peraluminosa, mientras que la diorita metaluminosa, esto indica la presencia de micas en el granito y la ausencia de las mismas en la diorita, esto se ve reflejado en el diagrama de “minerales característicos B-A de Debon y Le Fort (1983) (figura 10), donde se comprueba el carácter de leucogranito del granito de acuerdo a la baja proporción modal de minerales ferromagnesianos.

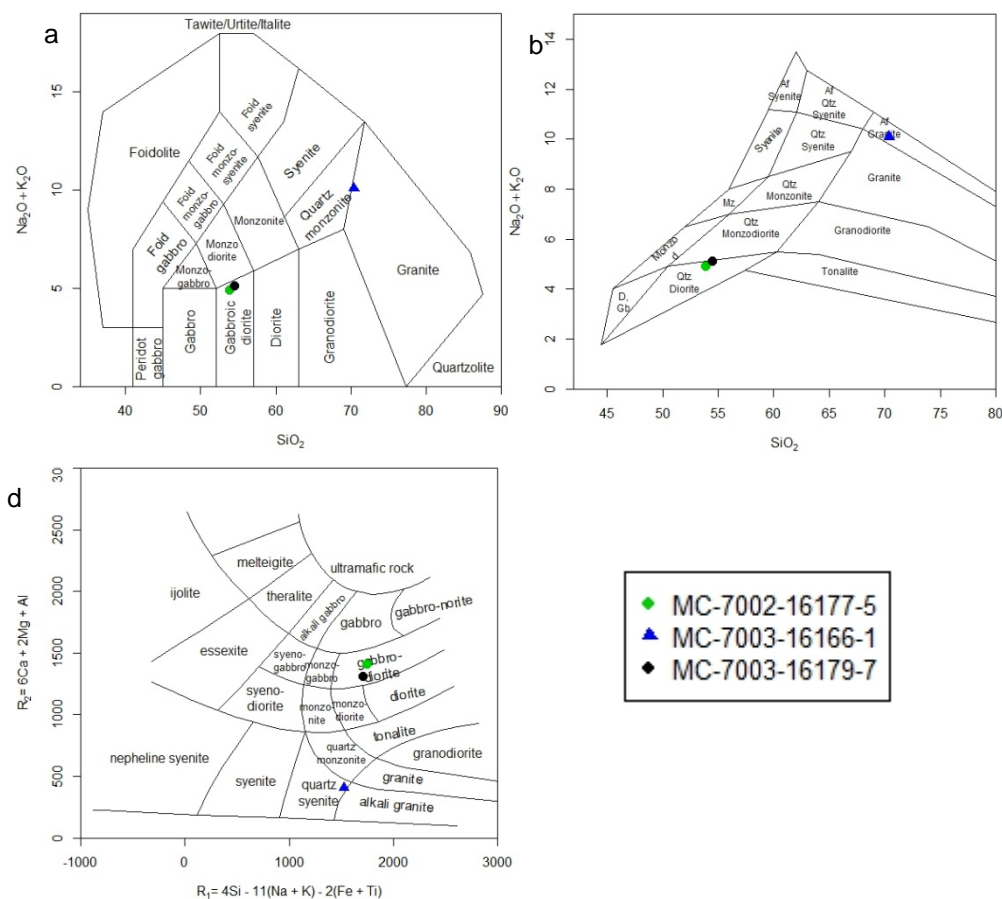
FIGURA 10
DIAGRAMA DE “MINERALES CARACTERÍSTICOS” B-A
DE DEBON Y LE FORT, 1983



Fuente: Investigación de campo. 2016

Respecto a la clasificación geoquímica de estas rocas, según los diagramas binarios propuestos por Middlemost (1985) en función a la relación $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2 denominados TAS (Total de álcalis y sílice), la muestra de granito en el diagrama de 1994 cae dentro del campo de granitos, mientras que las de diorita caen en el campo de diorita gabroica (figura 11 a). En el diagrama de 1985 el granito cae en el campo de granito alcalino, mientras que la diorita en el campo de cuarzo diorita (figura 11 b). En el diagrama R1-R2 de De la Roche et al. (1980), la muestra de granito cae en el campo de cuarzo sienita, en el caso de la diorita cae en el campo de diorita (figura 11 c).

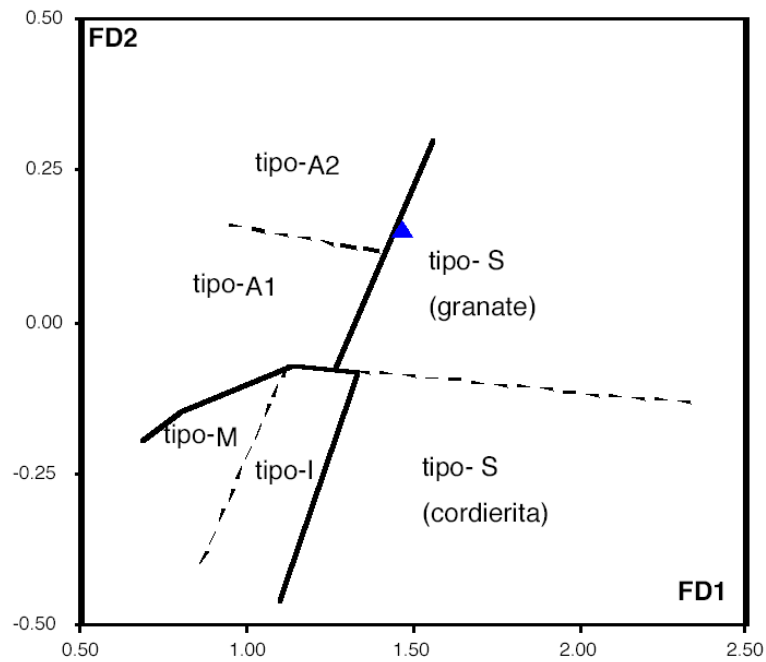
FIGURA 11
DIAGRAMAS DE CLASIFICACIÓN GEOQUÍMICA



Fuente: Investigación de campo. 2016.

Según el diagrama FD1-FD2 para granitoides con 64 % - 70 % de SiO₂ de Bea et al. (2000) el cual clasifica los granitoides en base a las concentraciones de Al₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O, FeO, Fe₂O₃ y MgO, el granito cae dentro del campo de Granito tipo S (granate), generados por fusión parcial de rocas sedimentarias, se forman en la parte superior de la corteza (figura 12).

FIGURA 12
DIAGRAMA FD1-FD2 DE BEA ET AL. 2000 PARA GRANITOIDES



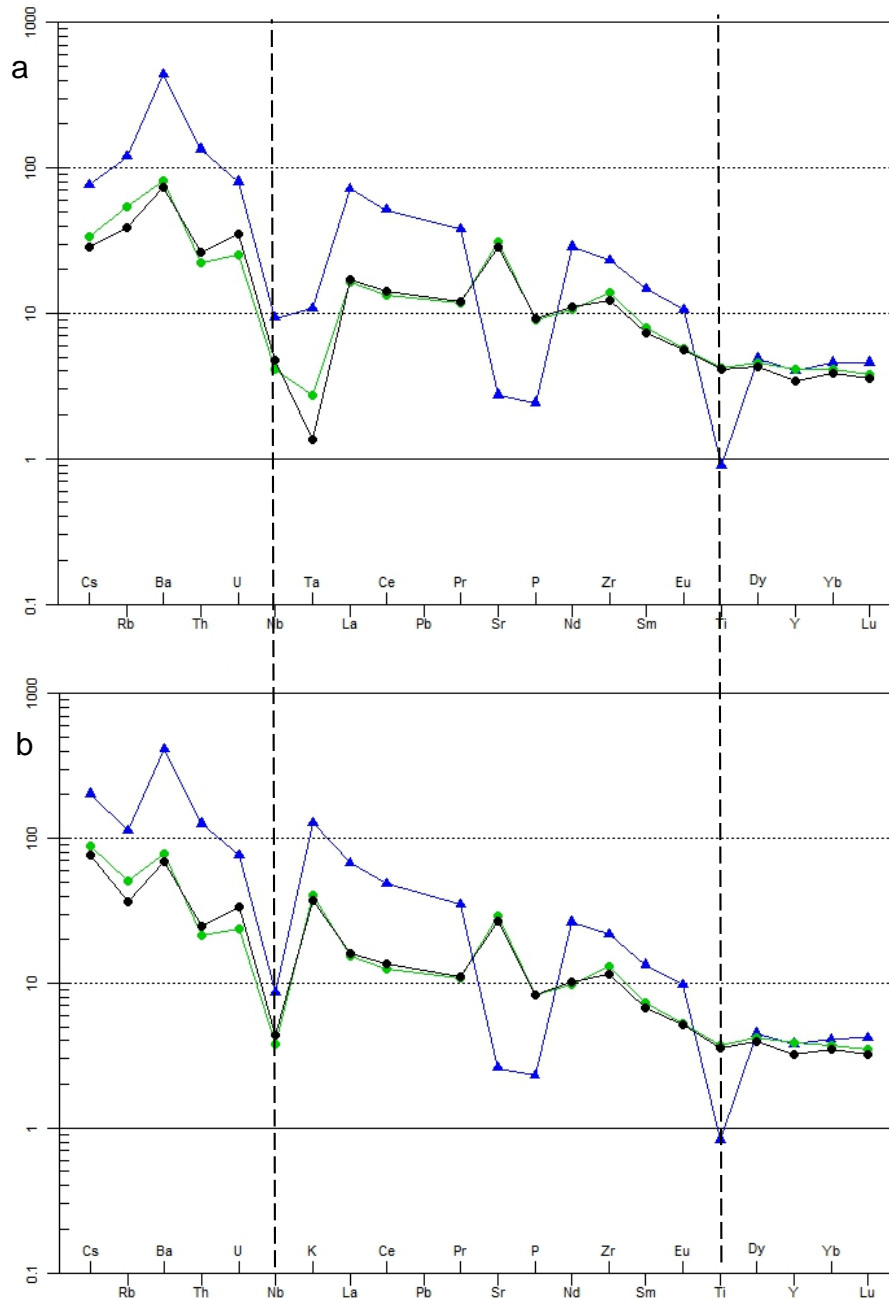
Fuente: Investigación de campo. 2016.

3.3.2 Elementos trazas

Las muestras de diorita tienen valores similares en contenido de elementos traza, con excepción del Ta que muestra un desfase según el diagrama de (McDonough y Sun, 1995) como se ve en la figura 13 a. Los diagramas de elementos traza incompatibles normalizados respecto al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989) se muestran en la figura 13 b, junto con los valores del granito. El granito tiene un patrón que difiere con la diorita. Asimismo en los diagramas se pueden observar anomalías negativas en ambos tipos de roca de Nb, y anomalías positivas de Ba y Rb. Mientras que únicamente en el granito se observan anomalías negativas de Sr, P y Ti. En la diorita, contrario al granito, muestra una anomalía positiva en el Sr.

Las anomalías negativas de Nb y Ti indican un comportamiento típico de arco volcánico. Altos contenidos de Rb y Ba (los elementos más móviles) puede sugerir metasomatismo, porque pueden ser fácilmente extraídos del manto y concentrados en la corteza continental. Algunos elementos pueden tener fuerte influencia sobre minerales particulares, tales como Zr sobre circón, P en el apatito, Sr en la plagioclasa relacionado a alteraciones.

FIGURA 13
DIAGRAMAS DE ELEMENTOS TRAZA NORMALIZADOS
RESPECTO AL MANTO PRIMITIVO.



Los triángulos azules corresponden al Granito, mientras que los puntos negros y verdes a las dos muestras de Diorita.

Fuente: Investigación de campo. 2016.

“Los patrones de los elementos de tierras raras (REE) de una roca ígnea están controlados principalmente por la química original de su fuente y por el equilibrio entre las fases cristal-magma que tiene lugar durante su evolución. Las anomalías de Eu están controladas principalmente por los feldespatos. Por ejemplo el Eu, en su estado divalente, es compatible en la plagioclasa y el feldespato potásico, no así las tierras raras que en estado trivalente (el estado de oxidación más común en estos elementos) son incompatibles. Por tanto, la remoción del feldespato en un magma félsico por cristalización fraccionada o la retención de los feldespatos en la roca fuente durante la fusión parcial puede ser la causa de una anomalía negativa de Eu en el magma (Rollinson, 1993)”²⁵.

Los diagramas de tierras raras normalizados con los valores de condritas de Boynton (1984) y Nakamura (1974) se muestran en la figura 14. La diorita muestra una pendiente negativa regular respecto a la disminución de las tierras raras livianas (LREE), mientras que las tierras raras pesadas (HREE) muestran un comportamiento lineal en las concentraciones. Además ambas muestras presentan pequeñas anomalías negativas de Eu. Por otro lado, el granito muestra una pendiente negativa más pronunciada en la disminución de las LREE (hasta el Dy), en las HREE presenta un comportamiento similar al de la diorita, con un comportamiento lineal en estos elementos.

²⁵ Rollinson, H., *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Londres, Inglaterra: Editorial Longman Scientific & Technical, 1 993.

FIGURA 14
DIAGRAMAS DE TIERRAS RARAS NORMALIZADAS RESPECTO
A LOS VALORES DE CONDRITA

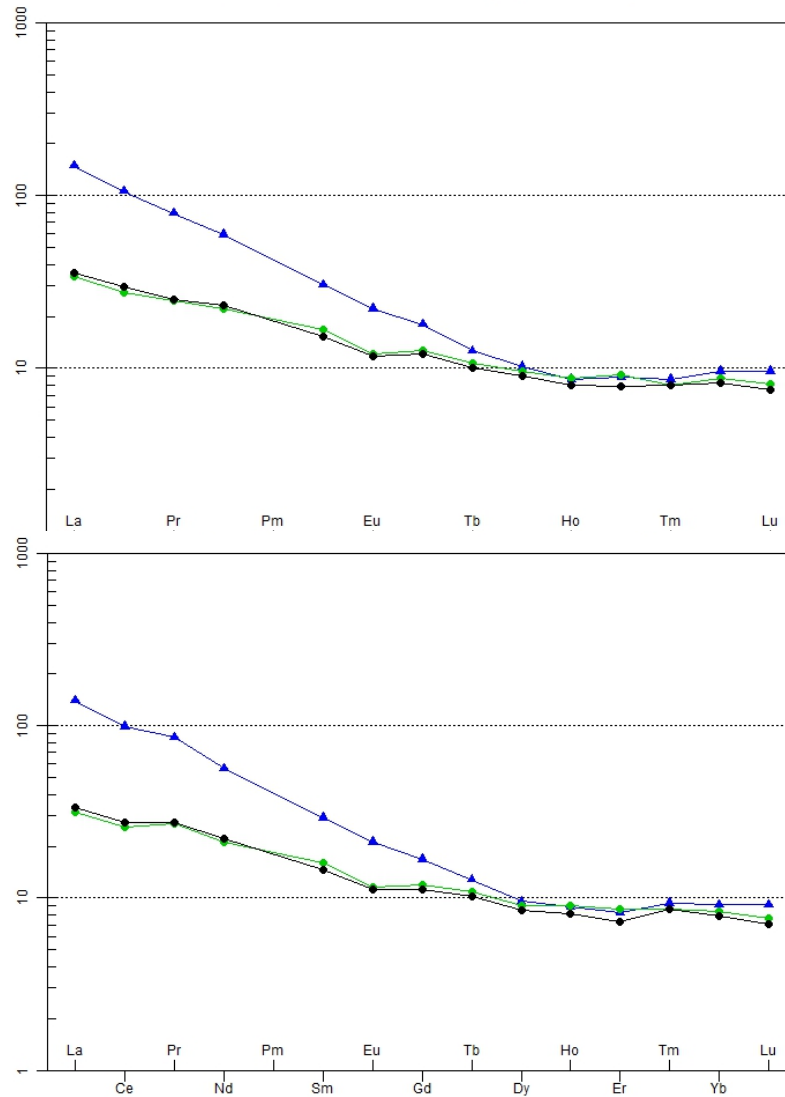


Diagrama de tierras raras normalizadas a condritas de Boynton, 1984 (a) y Nakamura, 1974 (b). Los triángulos azules corresponden al Granito, mientras que los puntos negros y verdes a las dos muestras de Diorita.

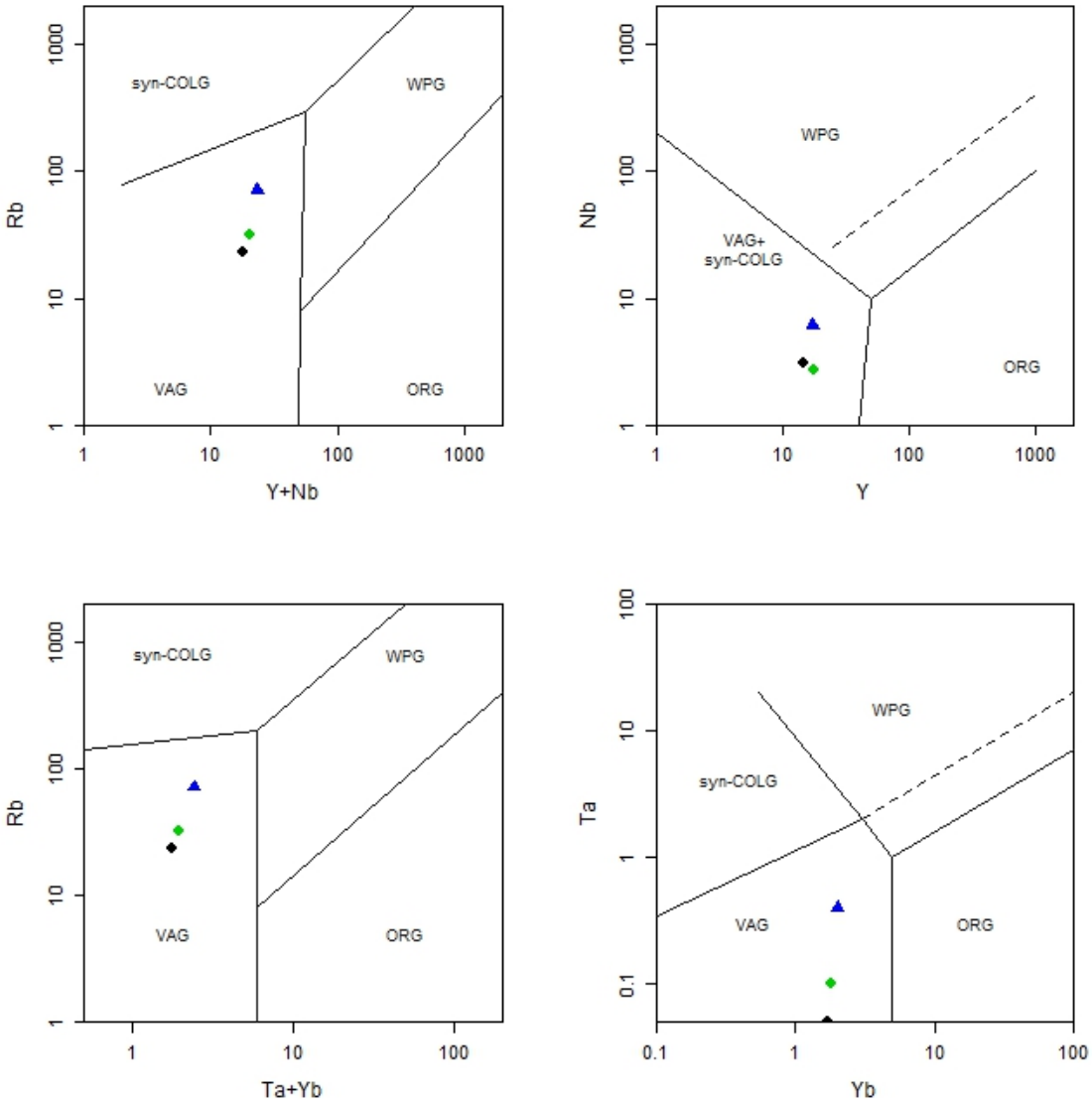
Fuente: Investigación de campo. 2016.

3.3.3 Discriminantes tectónicos

Pearce et al. (1984) realizó el primer estudio sistemático para conocer el ambiente tectónico en el que se emplazan las rocas graníticas. Definió en términos simples a los granitos como “cualquier roca plutónica que contiene más del 5 % de cuarzo modal”. Se graficaron los valores de Rb, Y, Yb (análogo de Y), Nb y Ta (análogo de Nb) en los diagramas de Pearce et al. (1984) para inferir el ambiente de tectónico en que se emplazaron las rocas graníticas que afloran dentro del área de estudio. Esto para distinguir granitos de ambientes de cordillera oceánica (ORG), de arco volcánico (VAG), intraplaca (WPG) y de colisión (Syn-COLG). En la figura 15 se muestran los diagramas de Pearce et al. (1984) para el granito (triángulo azul) y dioritas (puntos verdes y negros), los dos tipos de roca caen dentro del campo de arco volcánico (VAG).

También se utilizó el diagrama ternario Hf - Rb/30 - 3Ta de Harris et al. (1986), para discriminar ambientes tectónicos en los cuales las muestras tienen coincidencia con los de Pearce et al. (1984), en el cual las muestras caen en el campo de arco volcánico, como se muestra en la figura 16.

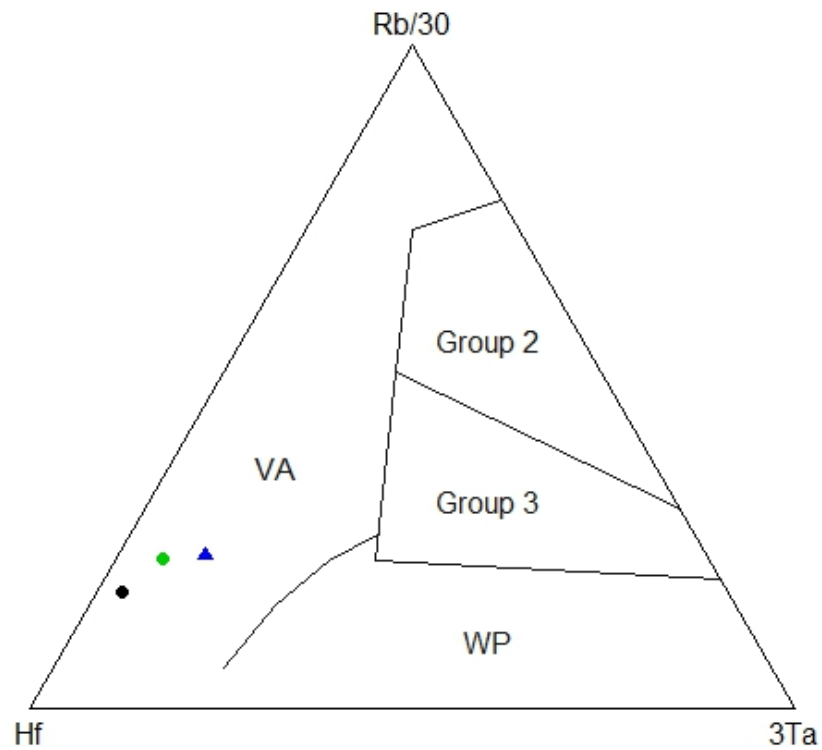
FIGURA 15
DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN TECTÓNICA DE PEARCE ET AL., 1984



Intraplaca (WPG), arco volcánico (VAG), cordillera oceánica (ORG) y colisionales (syn-COLG). El triángulo azul corresponde al Granito y los puntos verdes y negros a la Diorita.

Fuente: Investigación de campo. 2016.

FIGURA 16
DIAGRAMA Hf – Rb/30 – 3Ta HARRIS ET AL., 1986

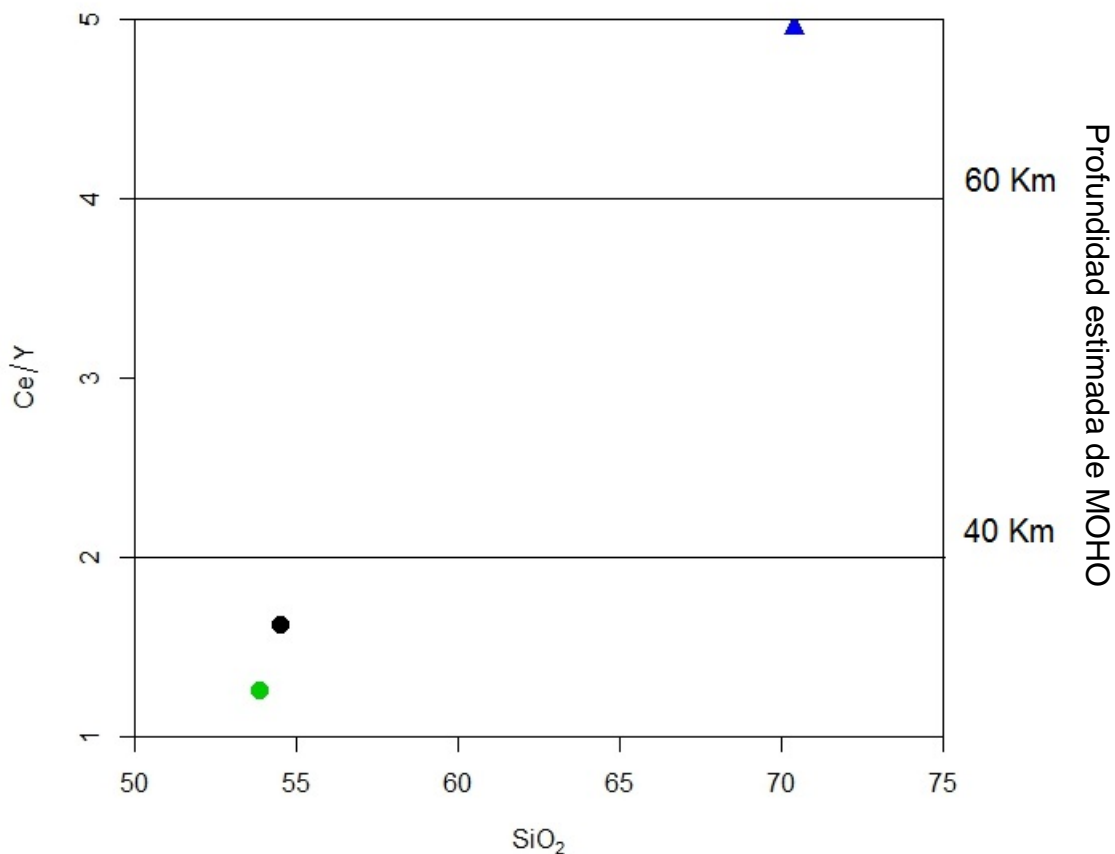


Arco volcánico (VA), intra placa (WP), colisional (Group 2 – Syn collisional) y ante y post colisional (Group 3 – Late and post-collisional). El triángulo azul corresponde al Granito y los puntos verdes y negros a la Diorita.

Fuente: Investigación de campo. 2016.

Para estimar la profundidad de las cámaras magmáticas que dieron origen a los cuerpos graníticos, se utilizó el diagrama Ce/Y vs. SiO₂ de Mantle y Collins, 2008, el cual estima espesor de la corteza donde se originó el magma. La figura 17 muestra los espesores sugeridos para la corteza, siendo de aproximadamente 65 Km para el granito y menos de 40 Km para la diorita.

FIGURA 17
DIAGRAMA Ce/Y vs. SiO₂ PARA PROFUNDIDADES DE
MANTLE Y COLLINS, 2008

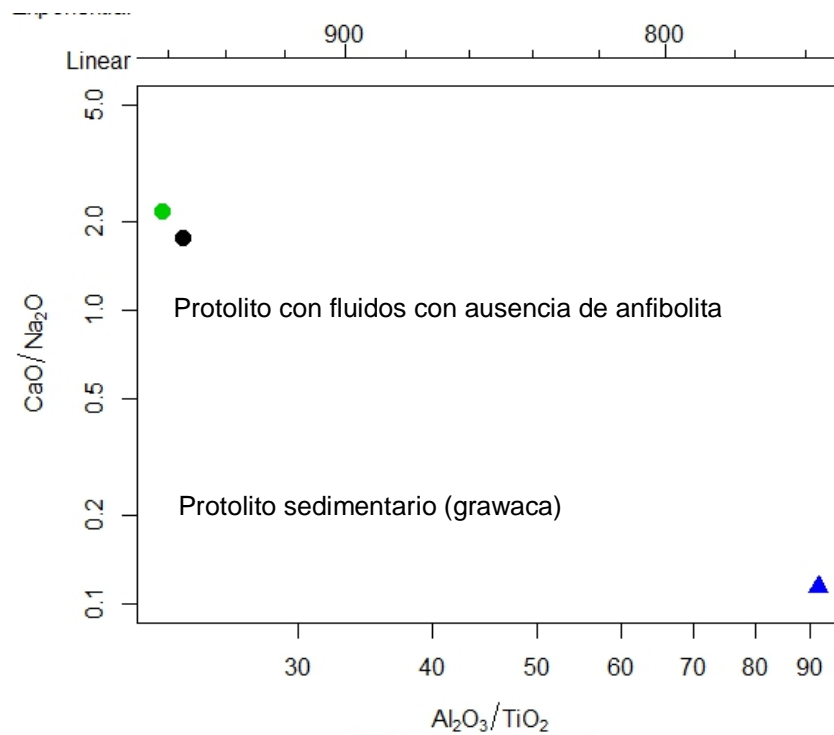


El triángulo azul corresponde al Granito y los puntos verdes y negros a la Diorita.

Fuente: Investigación de campo. 2016.

Jung y Pfänder (2007), realizaron modelos en función a las relaciones de los radios de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ vs $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ para inferir las temperaturas en las que se formó el magma, de igual manera con el protolito de la roca granítica. En la figura 18 se muestra las temperaturas y los valores aproximados de la relación de radios de $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ para el granito y la diorita. Se estima una temperatura de alrededor de 760°C para el granito y de $950^\circ\text{C} - 960^\circ\text{C}$ para la diorita.

FIGURA 18
DIAGRAMA DE TEMPERATURAS $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ vs $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$
DE JUNG Y PFÄNDER, 2007



El triángulo azul corresponde al Granito y los puntos verdes y negros a la Diorita.

Fuente: Investigación de campo. 2016.

3.4 Discusión

Dentro del área de estudio afloran siete diferentes tipos de rocas volcánicas y plutónicas, la distribución de la misma se muestra en el mapa del anexo II, estas rocas son andesitas, granito, diorita, toba pomácea y ceniza volcánica. Las andesitas son coladas de grandes espesores que forman el margen de caldera. Las rocas plutónicas están encajadas dentro de la andesita, el granito y diorita poseen asociaciones minerales y textura ígneas típicas, sin embargo en uno de los dos cuerpos de granito se ve afectado por la meteorización. La toba pomácea que es un paquete de espesores de ceniza con fragmentos de pómez intercaladas con ceniza, directamente superior a este paquete de tobas está espesores más grandes de ceniza volcánica.

Se analizó la química de una muestra de granito con la finalidad de conocer los procesos que ha sufrido durante su evolución y emplazamiento, asimismo para tratar de determinar el ambiente tectónico que le dio origen al magma del cual cristalizó. Una muestra no es suficiente para caracterizar a este *stock*, sin embargo, es una primera aproximación para entender su evolución química. De igual manera se hizo con dos muestras de la diorita, para determinar su evolución química y definir su ambiente tectónico de formación, además de establecer si presenta alguna relación con el granito.

Los resultados obtenidos por los análisis geoquímicos muestran que en el granito hay ciertos procesos de diferenciación, esto marcado por los valores bajos de óxidos compatibles, tales como el Fe_2O_3 , MgO , CaO y TiO_2 , en función a la cantidad de sílice, tal y como se observa en la figura 8, además de presentar valores altos en óxidos incompatibles como el K_2O y Na_2O . Caso contrario con lo que sucede con la diorita, en donde existen valores altos de óxidos compatibles (Fe_2O_3 , MgO , CaO y TiO_2), y valores bajos de los elementos

incompatibles (K_2O y Na_2O), lo cual indica poca evolución en cuanto a diferenciación.

Por otro lado, los diagramas de tierras raras normalizados a condrita, muestran un comportamiento de disminución de las tierras raras ligeras, marcado por las pendientes negativas y un comportamiento lineal en las tierras raras pesadas para ambas rocas. Según los valores $ACNK \{Al_2O_3 (A_{molar}) / [CaO (C_{molar}) + Na_2O (N_{molar}) + K_2O (K_{molar})]\} > 1.0$ (Shand, 1943), el granito es un granito peraluminoso tipo S, esto implica que se derivó a partir de la fusión de rocas sedimentarias clásticas o metamórficas (Chappel y White, 1974). La diorita es un granito metaluminoso, con un valor $ACNK$ menor a 1.0, por lo tanto es un granito tipo I, derivado directamente de magmas del manto o de la fusión de otras rocas ígneas o metaígneas. Los dos tipos de roca son de carácter calcoalcalino según el diagrama AFM de Irvine y Baragar (1971) (figura 9 d).

Los diagramas de Sun y McDonoug, 1989 para elementos incompatibles normalizados con los valores del manto primitivo, en el granito y la diorita muestran un enriquecimiento en elementos de bajo potencial iónico (LILE's) (Sr, K, Rb, Ba, Th, Cs, Pb), con excepción del Sr para el granito y Pb para la diorita, este enriquecimiento se atribuye ya que son rocas de arco volcánico continental y al metasomatismo de la fuente del manto asociado por los fluidos que se liberan de una placa de subducción (Wilson, 1989). En el caso de los elementos de alto potencial iónico (Nb, Ce, P, Zr, Sm, Ti, Y, Yb, Sc), los valores son bajos, a excepción del Ce para el granito, y Zr, Sm y Sc para ambas rocas, esto está asociado a altos grados de fusión parcial y a la estabilidad de las fases residuales del manto (Wilson, 1989). En el caso del granito, muestra valores anómalos de Nb y Ti, lo cual es muy característicos de rocas que se asocian a fenómenos de subducción (Wilson, 1989; Dostal et al., 1986; Keppie et al., 2000; Martiny et al., 2000).

Asimismo los resultados también se plotearon en los gráficos de discriminación tectónica para rocas graníticas de Pearce et al., 1984 y Harris et al., 1986 (figuras 15 y 16 respectivamente). En estos diagramas, las muestras cayeron dentro del campo de arco volcánico (VAG). El granito y la diorita presentan orígenes diferentes, fusión de sedimentos y generación de un magma del manto o de la fusión de otras rocas ígneas en la zona de subducción, respectivamente, esto a pesar de las coincidencias en tendencias con ciertos elementos. Además se estimó el espesor de las cortezas donde se formaron las cámaras magmáticas que originó estas rocas, con la ayuda del diagrama Ce/Y vs. SiO₂ de Mantle y Collins (2008), sugiriendo un espesor en el rango de 60 Km – 65 Km para el granito, mientras que para la diorita un espesor menor a 40 Km. De igual manera se infirió la temperatura del magma que las originó, asimismo el posible protolito utilizando el diagrama Al₂O₃/TiO₂ vs. CaO/Na₂O de Jung y Pfänder (2007), la temperatura para el Granito es de alrededor de 760° C y de 950°C – 960°C para la diorita, lo cual concuerda con la química de las mismas. El protolito de las rocas se estima en base a la relación de radios CaO/Na₂O, en el caso del granito la relación es menor a 0.5, lo cual indica que se haya originado de una grawaca o una fuente ígnea, lo cual se refleja en que es un granito tipo S; mientras que la diorita se pudo originar por la fusión rocas con fluidos con ausencia de anfibolita, esto en base a los experimentos realizados por Jung y Pfänder (2007).

Únicamente se tienen datos de la edad del Granito, que son análogas a las rocas graníticas datadas por Williams y McBirney, en 1969 a través del método K-Ar en las biotitas y hornblendas que dieron una edad 8.5 Ma.

CONCLUSIONES

General

El granito, según su química se originó de un magma ácido (~70 % SiO₂), rico en minerales alcalinos, fuertemente diferenciado, mientras que la diorita se originó por un magma intermedio (~54 % SiO₂), rico en minerales ferromagnesianos y de alcalinos, pobremente evolucionado. En función al comportamiento de elementos traza muestra una firma de arco volcánico para ambas rocas, además de una firma de subducción para el granito debido a las anomalías negativas de Nb y Ti, la cual sea aportada por los sedimentos que dieron origen a la roca.

Específicas

- Petrográficamente el granito se caracteriza por estar constituido de plagioclasa Andesina (38 %), cuarzo (24 %), feldespato potásico (28 %) y en menor parte biotita, hornblenda cloritizada y minerales opacos, con una textura inequigranular unimodal. La diorita la forman plagioclasa Andesina (55 %), hornblenda (30 %), feldespato potásico (5 %), cuarzo (3 %). En menor proporción clinopiroxeno y minerales opacos. Presenta textura inequigranular bimodal, mostrando fenocristales, principalmente de hornblenda, feldespato potásico y plagioclasa, dentro de una matriz de plagioclasa de grano fino. Además presenta enclaves microgranudos, mineralógicamente compatible con la paragénesis de la Diorita.

- La química de elementos mayores para el granito presenta: 70.39 % SiO_2 , 16.48 % Al_2O_3 , 1.84 % Fe_2O_3 , 0.152 % MgO , 0.707 % CaO , 6.2 % Na_2O , 3.889 % K_2O , 0.18 % TiO_2 , 0.05 % P_2O_5 , 0.09 % MnO y 0.022 % Cr_2O_3 , lo cual permite clasificarlo como un leucogranito de la serie calcialcalina de alto K. Mientras que la química de elementos mayores para la diorita presenta: ~54 % SiO_2 , ~19 % Al_2O_3 , ~9 % Fe_2O_3 , ~4 % MgO , ~7 % CaO , ~4 % Na_2O , ~1.5 % K_2O , ~0.82 % TiO_2 , ~0.188 % P_2O_5 , ~0.146 % MnO y ~0.008 % Cr_2O_3 , clasificándola como un granito de la serie calcialcalina.
- En base a los valores de SiO_2 vs $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ se estableció mediante los diagramas TAS de Middlemost (1985 y 1994) que el granito se clasifica como un granito, mientras que la diorita se clasificó como una cuarzo diorita (1985) y una diorita (1994). Mientras que la clasificación R1-R2 de De la Roche et al., 1980 el granito cae en el campo de una cuarzo sienita y la diorita como una diorita.
- En función al índice de saturación en alúmina, el granito se clasifica como un granito peraluminoso tipo S, félsico, con un alto nivel de aluminio, ya que presenta un ASI de ~1.05, el cual se originó por la fusión parcial de rocas sedimentarias clásticas, reflejado en el diagrama FD1-FD2 de Bea, Et Al (2000). Mientras que la diorita presenta un índice de saturación en alúmina ~0.90 el cual lo clasifica como un granito metaluminoso intermedio tipo I, derivado directamente de magmas del manto o de la fusión de otras rocas ígneas o metaígneas. Además ambas rocas fueron emplazadas en un ambiente tectónico de arco volcánico, según los diagramas de Pearce et al., y Harris et al.
- En base al comportamiento químico de los elementos traza, ambas rocas evidencian un comportamiento típico de arco volcánico con anomalías negativas de Nb y Ti, además de enriquecimiento en Ba

y K en ambas rocas, que son altamente incompatibles y que permite deducir que el magma se originó en la corteza en el caso del a diorita, mientras que en el granito es posible que la firma de subducción sea aportada por los sedimentos que le dieron origen. Por otro lado, el espesor de la corteza en la que se originaron las cámaras magmáticas es de 60 Km – 65 Km para el granito, y <40 Km para la diorita, mientras que la temperatura es de 760° C y de 950°C – 960°C respectivamente.

RECOMENDACIONES

- Realizar dataciones radiométricas K-Ar en las hornblendas de la diorita con el objetivo de establecer un rango de edad preciso para la formación de este *stock*.
- Datar por el método U-Pb mediante circones los granitos para conocer la edad de la roca fuente.
- Realizar estudios geoquímicos de los cuerpos graníticos que afloran en los alrededores de la caldera de Atitlán para determinar si estos pertenecen a un cuerpo granítico de mayor tamaño.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambiente tectónico*. http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/11.htm (11 de agosto de 2015).
- Bowen, N. L. *The Order of Crystallization in Igneous Rocks*. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts, United States of America: The University of Chicago Press, *The Journal of Geology*, 1912.
- Castro Dorado, Antonio. *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, 2015
- Dávila Burga, Jorge. *Diccionario geológico*. Universidad Nacional de Ingeniería. Perú: Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, 2011.
- Dostal, J., Et. Al. *Petrogenesis of the Natkusiak continental basalts, Victoria Island, N.W.T.* Canada: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1986.
- Jung, Stefan y Jörg, Pfänder. *Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids: constraints from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry*. Philipps-University Marburg. Marburg, Germany: *Europe Journal Mineral*, 2007.
- Keppie, D., Et. Al. *Superposed Neoproterozoic and Silurian Magmatic Arcs in Central Cape Breton Island, Canada: Geochemical and Geochronological Constraints*. Canada: *Geologic Magazine*, 2000.
- López Gómez, José., Et. Al. *Ciencias de la Tierra*. Oxford University Press, Oxford, Inglaterra, Reino Unido: Editorial Complutense, 2000.
- Mantle, G. W. y WJ, Collins. *Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens: Correlation between arc basalt composition and Moho depth*. United States of America: The Geological Society of America, 2008.
- Martiny B., Et. Al. *Stratigraphy, geochemistry and tectonic significance of the Oligocene magmatic Rocks of Western Oaxaca, southern Mexico. Tectonophysics*. Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF.: Instituto de geología, 2000
- Mendez, J. *Petrología*. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela: Facultad de Ciencias, 2004.

Newhall, Christopher G. *Geology of the Lake Atitlán region, western Guatemala*. Hanover, Alemania: Dartmouth College, 1981.

Núñez Álvarez, Laura y Vanessa Martínez Cobo. *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica (1:25 000) de la cuenca del Lago Atitlán*. Proyecto Gestión ambiental y de riesgos en la cuenca del Lago Atitlán –GARICLA–. Panajachel, Sololá, Guatemala: Geólogos del Mundo y Asociación Vivamos Mejor, 2013.

Rollinson, H. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Londres, Inglaterra: Editorial Longman Scientific & Technical, 1993.

Romani, Jacobo Otero. *Desarrollo de nuevos métodos de extracción en fase sólida para la preconcentración de metales traza en el agua de mar: Evaluación de un soporte de C-18 y de polímeros de impronta iónica. Aplicación al estudio de la ría de Arousa*. Tesis doctoral Geoquímica. Universidad de Santiago de Compostela. La Coruña, España: Facultad de Química, 2009.

Rose, William I. Et. Al. *Quaternary silicic pyroclastic deposits of Atitlán caldera, Guatemala*. Michigan Technological University. Michigan, United States of America: Department of Geology and Geological Engineering, Houghton, 1987.

Shand, S. James. *The eruptive rocks*. New York, United States of America: John Wiley and Sons. 1947.

Thomas, Robert. *A beginner's guide to ICP-MS. Part I. Spectroscopy*. Iselin, New Jersey. United States of America: snt, 2001.

Wilson, M. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. Londres, Inglaterra: Unwin Hyman, 1989.



Vº. Bº.

Adán García Veliz
Lic. en Pedagogía e Investigación educativa.
Bibliotecario.

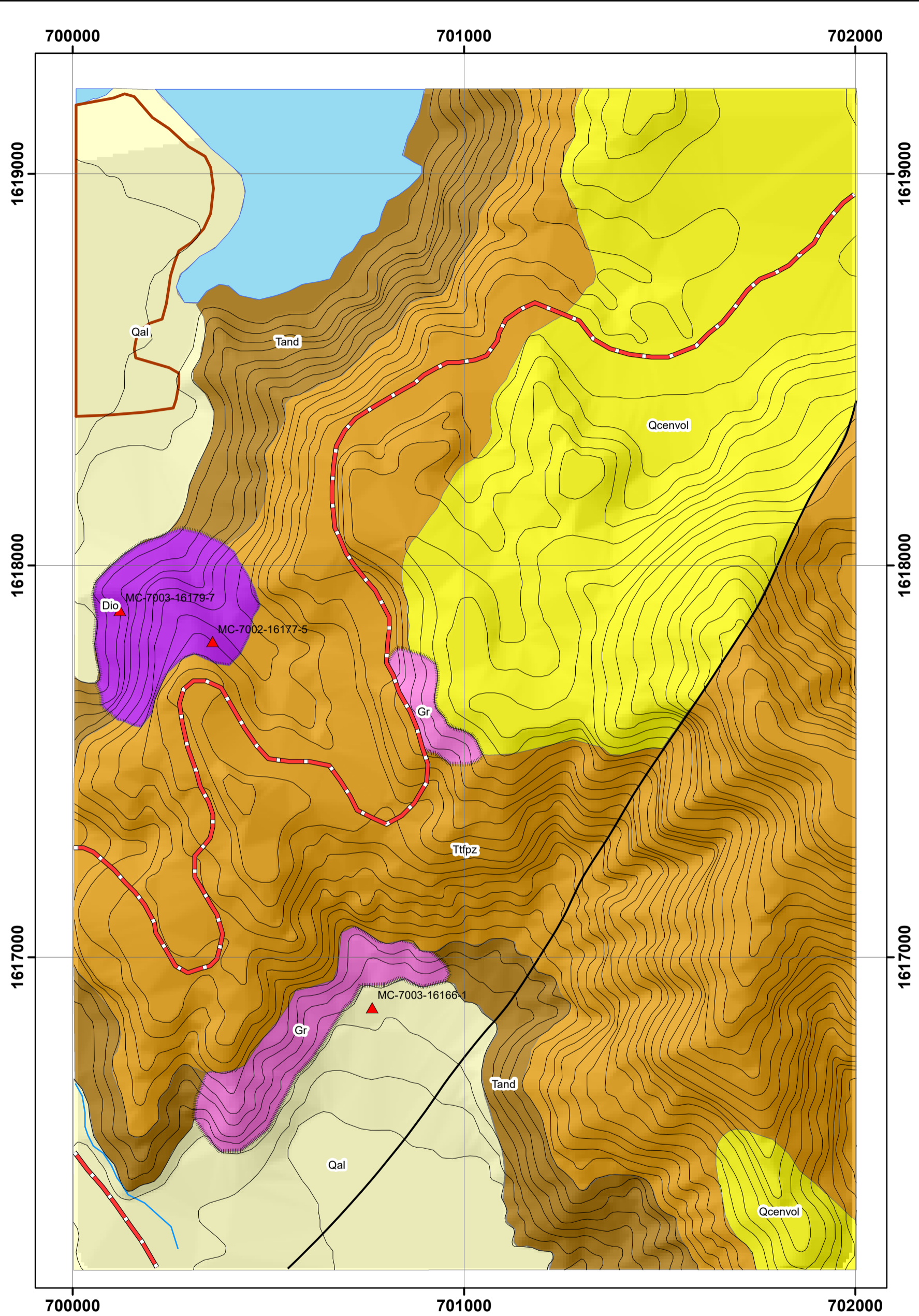


ANEXO I
GLOSARIO

GLOSARIO

Condrito	Meteorito no metálico rico en masas de olivino y piroxenos (cóndrulos).
Geoquímica	Ciencia que estudia la composición química de la Tierra, la distribución y abundancia de elementos químicos incluyendo isótopos en minerales, rocas, suelos, agua y atmosfera, así como las causas de la distribución y circulación en la naturaleza en base a las propiedades de sus iones y átomos.
Granito tipo I	Son los generados por fusión parcial de rocas ígneas máficas y se encuentran generalmente asociados a cobre y molibdeno.
Granito tipo S	Son los generados por fusión parcial de sedimentos peraluminosos, se encuentran generalmente asociados a estaño y tungsteno. Se forman en la parte superior de la corteza.
Idiomorfo	Término utilizado para describir la textura de una roca ígnea en la que los granos muestran una forma cristalina completamente desarrollada.
Leuco	Prefijo griego que significa blanco, claro.
Rocas metaluminosas	Se refiere a rocas ígneas que poseen una proporción molar de óxidos de aluminio mayor a la de óxido de sodio y óxido de potasio, pero menor a la suma de los óxidos anteriores más el óxido de calcio.
Rocas peraluminosas	Se refiere a rocas ígneas que poseen una proporción molar de óxido de aluminio superior a la suma de óxido de sodio, óxido de potasio y óxido de calcio.
<i>Stock</i>	Macizo rocoso menor a 100 km ² que se forma a una profundidad media y que es descubierto por acción de la erosión.

ANEXO II
MAPA GEOLÓGICO

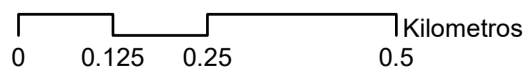


Leyenda

- Unidad**
- Aluvi3n
 - Ceniza volc3nica
 - Toba pomacea
 - Diorita
 - Granito
 - Andesita
 - Caldera

Simbología

- Area urbana
- Lago
- Carretera
- R3os
- Curvas de nivel
- Muestras geoqu3mica



An3lisis geoqu3mico-petrogr3fico de las rocas gran3ticas que afloran al sur de San Lucas Tolim3n, Solol3.

Contiene		Mapa geol3gico	
Realizado por		Carlos Manuel Caal de la Cruz	
Carn3		200940090	
Escala 1:10,000	Asesor:	Fecha:	ANEXO II
Referencia espacial: NAD 27 Z15N	Ing. Geol. Osmin V3squez	Septiembre de 2016	



CUNOR | CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

Universidad de San Carlos de Guatemala

El director del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer los dictámenes de la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de:

INGENIERO GEÓLOGO

Al trabajo titulado:

ANÁLISIS GEOQUÍMICO-PETROGRÁFICO DE LAS ROCAS GRANÍTICAS QUE AFLORAN AL SUR DE SAN LUCAS TOLIMÁN SOLOLÁ

Presentado por el (la) estudiante:

CARLOS MANUEL CAAL DE LA CRUZ

Autoriza el

IMPRIMASE

Cobán Alta Verapaz 22 de Septiembre de 2016.

Lic. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales
DIRECTOR

